



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE FRECUENCIA CARDIACA  
Y VARIABLES FÍSICAS PARA MEDIR EL DESEMPEÑO EN SESIONES DE  
ENTRENAMIENTO DE FUTBOLISTAS USANDO TECNOLOGÍAS DE  
COMUNICACIÓN INALÁMBRICA.**

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

AUTORES: FERNANDO EMANUEL ARCOS CORONEL

JONATHAN STEVE QUEZADA PATIÑO

TUTOR: ING. JUAN PAÚL INGA ORTEGA, MGT.

Cuenca – Ecuador

2023

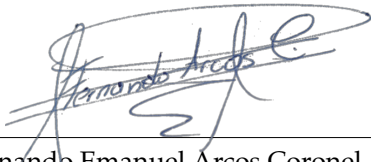
## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Fernando Emanuel Arcos Coronel con documento de identificación N° 0302584644 y Jonathan Steve Quezada Patiño con documento de identificación N° 0105150197; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 31 de agosto del 2023

Atentamente,



---

Fernando Emanuel Arcos Coronel

0302584644



---

Jonathan Steve Quezada Patiño

0105150197

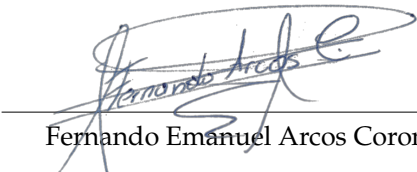
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Fernando Emanuel Arcos Coronel con documento de identificación N° 0302584644 y Jonathan Steve Quezada Patiño con documento de identificación N° 0105150197, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Desarrollo de un sistema de monitoreo de frecuencia cardiaca y variables físicas para medir el desempeño en sesiones de entrenamiento de futbolistas usando tecnologías de comunicación inalámbrica.” el cual 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 concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

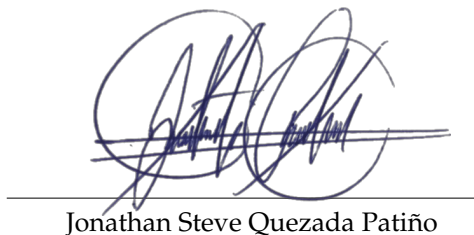
Cuenca, 31 de agosto de 2023

Atentamente,



Fernando Emanuel Arcos Coronel

0302584644



Jonathan Steve Quezada Patiño

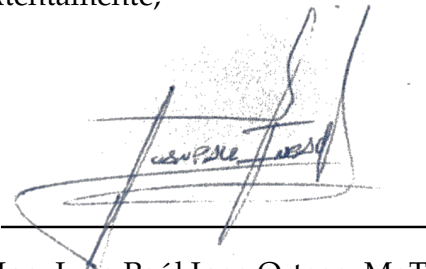
0105150197

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Paúl Inga Ortega con documento de identificación N° 0104166491, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE FRECUENCIA CARDIACA Y VARIABLES FÍSICAS PARA MEDIR EL DESEMPEÑO EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO DE FUTBOLISTAS USANDO TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA., realizado por Fernando Emanuel Arcos Coronel con documento de identificación N° 0302584644 y Jonathan Steve Quezada Patiño con documento de identificación N° 0105150197, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 31 de agosto de 2023

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Juan Paúl Inga Ortega', is written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat cursive.

Ing. Juan Paúl Inga Ortega, MgT.

0104166491



# AGRADECIMIENTOS

## *Agradecimiento de Fernando Arcos*

Agradezco a Dios por haberme permitido culminar esta meta maravillosa, a mi por soportar todas las adversidades de la vida, también a mi madre, quien ha sido mi motivación y que gracias a ella he conseguido ser un hombre correcto, y un abrazo al cielo a mi abuelita que me impulso y me enseñó acerca de la vida, aunque nunca me enseñó a vivir sin ella.

También a mi esposa, aquella persona que ha sido mi soporte en cada sueño y siempre está presente, y a mi hija Victoria Arcos Sacoto por ser el motivo de luchar por un buen porvenir, a mi compañero Jonathan Quezada que a largo de estos años siempre me ha apoyado y a un profesor Deivis Arias que trascendió en mi decisión de seguir adelante y no puede faltar, un agradecimiento al tutor Juan Inga por ser quién nos guió para completar esta meta y por su ardua labor en el bienestar de la educación. " Never Back Down "

## *Agradecimiento de Jonathan Quezada*

En primera instancia agradezco a Dios por permitirme vivir este proceso. A mis padres por darme la confianza, esfuerzo y su amor incondicional para poder cumplir mi sueño y a mi tutor que nos encaminó en pos de alcanzar esta meta.

# DEDICATORIAS

Quiero dedicar esta meta a mi abuelita Maruja Coronel allá en el cielo y a mi madre Filomena Coronel, que a pesar de todo me ha apoyado y ha estado a mi lado, de igual forma mi esposa Samanta Sacoto y mi hija Victoria Arcos y por último a mi tío Miltón Ramírez allá en el cielo, que fue como un padre.

*Fernando Arcos*

Dedico mi trabajo de titulación a mi familia y amigos. Un especial sentimiento de gratitud a mis queridos padres, Agustín y Narcisa, que con sus palabras de aliento me convencieron de que puedo ser el mejor y me dieron fuerza aun cuando pensaba rendirme. A mi hermano Boris, a mis hermanas Jhoana y Erika, quienes nunca dejaron de creer en mí. También dedico este trabajo a todos mis amigos, familiares y conocidos cercanos que me apoyaron durante todo el proceso.

Un agradecimiento especial a mi compañero de trabajo Fernando Arcos, que lo convencí de que hacer esto juntos, sin él, nada de esto se habría completado. Un fuerte agradecimiento a nuestro tutor de tesis que nos apoyó en todo momento. "People don't get what they deserve. They just get what they get. There's nothing any of us can do about it." Gregory House, M.D.

*Jonathan Quezada*

# Índice general

Agradecimientos	I
Dedicatorias	II
Índice General	III
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	IX
Resumen	X
Abstract	XII
Antecedentes	1
Justificación	4
Objetivos	5
Introducción	6
<b>1. Fisiología del deporte y Variables físicas en el fútbol</b>	<b>7</b>
1.1. Fisiología del deporte . . . . .	7
1.1.1. Adaptaciones metabólicas musculares . . . . .	8
1.1.2. Adaptaciones circulatorias . . . . .	8
1.1.3. Adaptaciones Respiratorias . . . . .	10
1.1.4. Adaptaciones cardiacas . . . . .	11

1.2.	Tecnología aplicada en el deporte . . . . .	12
1.2.1.	Tecnología aplicada en el fútbol . . . . .	13
1.3.	Variables físicas fundamentales del jugador. . . . .	13
<b>2.</b>	<b>Tecnologías inalámbricas y tipos de microcontroladores</b>	<b>15</b>
2.1.	Redes de Sensores Inalámbricos . . . . .	15
2.1.1.	Tecnologías de comunicación usadas en WSN . . . . .	16
2.1.2.	Elementos Principales de una WSN . . . . .	18
2.2.	Bluetooth 4.0 . . . . .	18
2.2.1.	Arquitectura de BLE . . . . .	19
2.3.	ZigBee . . . . .	23
2.3.1.	Arquitectura de ZigBee . . . . .	23
2.3.2.	Redes de sensores ZigBee . . . . .	27
2.3.3.	Topologías de una red ZigBee . . . . .	29
2.3.4.	Funcionalidad de operación ZigBee . . . . .	29
2.4.	Microcontroladores . . . . .	30
2.4.1.	Tipos de microcontroladores . . . . .	30
2.4.2.	Protocolos de Comunicación en Serie . . . . .	31
2.5.	Protocolos de Comunicación MQTT . . . . .	32
2.5.1.	Plataforma IoT Open source . . . . .	33
<b>3.</b>	<b>Diseño y Desarrollo</b>	<b>34</b>
3.1.	Red de sensores Implementada . . . . .	34
3.2.	Selección de dispositivos de la placa Desarrollada . . . . .	36
3.2.1.	Microcontrolador Esp32-s . . . . .	36
3.2.2.	Módulo XBee 3 . . . . .	37
3.2.3.	Sensor inercial MPU6050 . . . . .	38
3.2.4.	Chip GPS-NEO-6M . . . . .	39
3.2.5.	Banda Polar H9 . . . . .	40
3.3.	Configuración de los módulos XBee . . . . .	40
3.4.	Configuración del entorno de programación . . . . .	45
3.5.	Programación del nodo sensor . . . . .	48

- 3.5.1. Comunicación Bluetooth con la banda polar H9 . . . . . 49
- 3.5.2. Comunicación UART con GPS NEO 6M . . . . . 54
- 3.5.3. Comunicación I2C con MPU-6050 . . . . . 55
- 3.5.4. Comunicación SPI con micro SD card . . . . . 56
- 3.6. Programación del nodo Coordinador. . . . . 57
  - 3.6.1. Protocolo MQTT y Plataforma IoT Thingsboard . . . . . 59
- 3.7. Comunicación con plataforma IoT para la visualización de datos . . . . . 60
- 3.8. Diseño de la placa electrónica . . . . . 63
- 3.9. Implementación del nodo sensor . . . . . 64
- 3.10. Implementación del nodo coordinador . . . . . 64
- 3.11. Diseño de prototipo de carcasa para los nodos . . . . . 65
  
- 4. Análisis y Resultados . . . . . 67**
  - 4.1. Análisis de Resultados . . . . . 67
  
- 5. Conclusiones y Trabajos Futuros . . . . . 78**
  - 5.1. Conclusiones . . . . . 78
  - 5.2. Recomendaciones . . . . . 79
  - 5.3. Trabajos futuros . . . . . 80
  
- Glosario . . . . . 85**
  
- Referencias . . . . . 94**

# Índice de figuras

1.1. Circulación mayor y menor [13]. . . . .	9
2.1. Redes inalámbricas [42] . . . . .	17
2.2. Arquitectura apilada de Bluetooth Low Energy [45]. . . . .	19
2.3. Características de cliente para establecer una estructura lógica [56]. . . . .	22
2.4. Arquitectura apilada de ZigBee [60]. . . . .	24
3.1. Red de sensores inalámbrica implementada [Fuente Autores]. . . . .	36
3.2. Esp 32 pines de configuración Fuente[ <a href="https://www.espressif.com/">https://www.espressif.com/</a> ] . . . . .	36
3.3. Arquitectura del Esp32 Fuente[ <a href="https://www.espressif.com/">https://www.espressif.com/</a> ]. . . . .	37
3.4. Digi XBee 3 Fuente[ <a href="https://www.digikey.com/">https://www.digikey.com/</a> ]. . . . .	38
3.5. Chip MPU6050 [Fuente autores] . . . . .	39
3.6. GPS NEO 6 Fuente[ <a href="https://www.u-blox.com/en/">https://www.u-blox.com/en/</a> ] . . . . .	39
3.7. Banda polar H9 Fuente[ <a href="https://www.polar.com/es">https://www.polar.com/es</a> ] . . . . .	40
3.8. XBees usados para la creación de la red ZigBee [Fuente Autores]. . . . .	41
3.9. Discovery devices [Fuente Autores]. . . . .	42
3.10. Selección del Puerto para escanear [Fuente Autores]. . . . .	42
3.11. Dispositivo agregado [Fuente Autores]. . . . .	43
3.12. Update the radio module firmware [Fuente Autores]. . . . .	43
3.13. Configuración del canal, ID y del modo coordinador [Fuente Autores]. . . . .	44
3.14. Configuración en modo transparente [Fuente Autores]. . . . .	44
3.15. Configuración del canal, ID y del modo router en los nodos sensores [Fuente Autores].	45
3.16. Verificación de los enlaces entre los nodos sensores y el nodo coordinador [Fuente Autores]. . . . .	45
3.17. Menú preferences [Fuente Autores]. . . . .	46

3.18. Additional boards manager URLs [Fuente Autores]. . . . .	47
3.19. Librerías Esp32 [Fuente Autores]. . . . .	47
3.20. Lógica de programación del nodo sensor [Fuente Autores]. . . . .	48
3.21. Protocolo de comunicación de la banda H9 Fuente[https://www.bluetooth.com/]. . . . .	49
3.22. Representación de los atributos de servidor y cliente [Fuente Autores]. . . . .	49
3.23. Atributos Bluetooth para Heart rate [Fuente Autores]. . . . .	50
3.24. Características de la banda H9 compartidas a la placa [Fuente Autores]. . . . .	51
3.25. Cliente creado (Placa) y conectado al servidor (H9) [Fuente Autores]. . . . .	51
3.26. Monitor Serial de la característica solicitada a la banda H9 (heart rate) [Fuente Autores].	51
3.27. Modificación del código del sketch [Fuente Autores]. . . . .	52
3.28. Modificación del código con la unidad [Fuente Autores]. . . . .	52
3.29. Monitor Serial de la placa con las modificaciones para la impresión del heart rate [Fuente Autores]. . . . .	52
3.30. Notificación de fuera de rango [Fuente Autores]. . . . .	53
3.31. Monitor serial ejecutando un error de comunicación [Fuente Autores]. . . . .	53
3.32. Reinicio del Esp32 [Fuente Autores]. . . . .	53
3.33. Monitor serial de la impresión de datos del GPS [Fuente Autores]. . . . .	54
3.34. Monitor serial del código para el sensor MPU6050 [Fuente Autores]. . . . .	55
3.35. Calibración del sensor mpu6050 [Fuente Autores]. . . . .	56
3.36. Monitor serial de las características de la tarjeta microSD insertada en la placa [Fuente Autores]. . . . .	56
3.37. Lógica de programación nodo coordinador [Fuente Autores]. . . . .	57
3.38. Inicialización de la interfaz UART[Fuente Autores]. . . . .	58
3.39. Probabilidad de información recibida [Fuente Autores]. . . . .	58
3.40. Mensaje recibido por el XBee coordinador [Fuente Autores]. . . . .	58
3.41. Separación de string [Fuente Autores]. . . . .	58
3.42. Credenciales de la red Wi-Fi [Fuente Autores]. . . . .	59
3.43. Credenciales MQTT [Fuente Autores]. . . . .	59
3.44. Selección del microcontrolador [Fuente Autores]. . . . .	60
3.45. Agregar dispositivos [Fuente Autores]. . . . .	60
3.46. Token [Fuente Autores]. . . . .	61

3.47. Datos recibidos en la plataforma [Fuente Autores]. . . . .	62
3.48. Visualizaciones de datos en un dashboard de la frecuencia cardiaca [Fuente Autores]. . . . .	62
3.49. Visualizaciones de datos de cada Nodo [Fuente Autores]. . . . .	62
3.50. Diseño Pcb [Fuente Autores]. . . . .	63
3.51. Nodo sensor para la red ZigBee [Fuente Autores]. . . . .	64
3.52. Nodo Coordinador para la red ZigBee [Fuente Autores]. . . . .	65
3.53. Diseño de prototipo de carcasa [Fuente Autores]. . . . .	65
3.54. Nodo sensor [Fuente Autores]. . . . .	66
3.55. Diseño de placa electrónica [Fuente Autores]. . . . .	66
4.1. Equipamiento [Fuente Autores]. . . . .	67
4.2. Participantes [Fuente Autores]. . . . .	68
4.3. Frecuencia cardiaca durante sesión de entrenamientos [Fuente Autores]. . . . .	68
4.4. Recorrido obtenido por el módulo GPS [Fuente Autores]. . . . .	69
4.5. Datos del giroscopio integrado [Fuente Autores]. . . . .	70
4.6. Datos del acelerómetro integrado [Fuente Autores]. . . . .	70
4.7. Ubicación de nodos a 72 metros [Fuente Autores]. . . . .	71
4.8. RSSI de paquetes a 72 metros [Fuente Autores]. . . . .	72
4.9. Ubicación de nodos a 106 metros [Fuente Autores]. . . . .	72
4.10. RSSI de paquetes a 106 metros [Fuente Autores]. . . . .	72
4.11. Ubicación de nodos a 125 metros [Fuente Autores]. . . . .	73
4.12. RSSI de paquetes a 125 metros [Fuente Autores]. . . . .	73
4.13. Cantidad de muestras recolectadas en la topología estrella en campo abierto [Fuente Autores]. . . . .	74
4.14. Cantidad de muestras recolectadas en la topología estrella con obstáculos[Fuente Autores]. . . . .	74
4.15. Cantidad de muestras recolectadas en la topología DigiMesh en campo abierto[Fuente Autores]. . . . .	75
4.16. Cantidad de muestras recolectadas en la topología DigiMesh con obstáculos [Fuente Autores]. . . . .	76
4.17. Promedio de muestras recibidas de las diferentes pruebas de topologías [Fuente Autores]. . . . .	77



# Índice de tablas

1.1. Frecuencia cardíaca en relación la edad y género [23] . . . . .	11
1.2. Variables físicas consideradas en el fútbol [36]. . . . .	14
3.1. Número de asignaciones de servicio [Fuente Autores]. . . . .	50
3.2. Número de asignaciones de características [Fuente Autores]. . . . .	50
3.3. Credenciales MQTT [Fuente Autores] . . . . .	61
4.1. Pruebas de fiabilidad del sistema [Fuente autores]. . . . .	77

# Resumen

La tecnología vestible está experimentando un crecimiento significativo debido a la miniaturización de los sensores y los sistemas de microprocesadores. Los datos recogidos a través de esta tecnología son valiosos para atletas y entrenadores, ya que les permiten tomar decisiones informadas, personalizar los programas de entrenamiento y maximizar el rendimiento deportivo.

En este contexto, se ha realizado un estudio centrado en jugadores de fútbol para identificar sensores que puedan recoger datos sobre variables físicas, incluida la frecuencia cardiaca. Aunque en el mercado existen numerosos dispositivos basados en tecnología vestible, su precio y falta de escalabilidad plantean dificultades. Por ello, se propone una solución hardware alternativa que combina tecnología IoT (Internet of Things) para la captura de variables físicas y monitorización en tiempo real desde un ordenador e incluso a través de Internet a bajo coste. La propuesta consiste en utilizar un dispositivo wearable que funcione como concentrador de datos de múltiples sensores. Utilizando una red ZigBee, los datos se transmiten desde los jugadores a un nodo concentrador y luego se publican en una plataforma IoT. Se sugiere el uso de la plataforma virtual Thingsboard como alternativa inicial.

Se realizaron pruebas experimentales para determinar el alcance óptimo de los dispositivos de frecuencia, considerando dos topologías: estrella y malla. Se concluyó que la topología en malla presenta una tasa de pérdida de paquetes muy baja en comparación con la topología en estrella. Durante las pruebas, se realizaron transmisiones desde múltiples nodos a distancias de 30, 60, 90 y 120 metros dentro de un campo de fútbol reglamentario. Se comprobó que el sistema de comunicación inalámbrica funcionaba de forma fiable. Al final de las pruebas, se estableció que el hardware obtenido, debido a sus dimensiones y peso, no representa una carga para

los jugadores de fútbol.

*Palabras clave:* frecuencia cardiaca; Redes de sensores; ZigBee; XBee; Thingsboard; Placa electrónica.

# Abstract

Wearable technology is experiencing significant growth due to the miniaturization of sensors and microprocessor systems. The data collected through this technology is valuable to athletes and coaches, enabling them to make informed decisions, personalize training programs, and maximize sports performance.

In this context, a study on soccer players has been conducted to identify sensors that can collect data on physical variables, including heart rate. Although numerous devices are based on wearable technology on the market, their price and lack of scalability pose difficulties. Therefore, an alternative hardware solution is proposed that combines IoT (Internet of Things) technology to capture physical variables and real-time monitoring from a computer and even through the Internet at low cost. The proposal uses a wearable device as a data concentrator of multiple sensors. Using a ZigBee network, data is transmitted from the players to a hub node and published on an IoT platform. The use of the Thingsboard virtual platform is suggested as an initial alternative.

Experimental tests were carried out to determine the optimal range of the frequency devices, considering two topologies: star and mesh. It was concluded that the mesh topology presents a meager packet loss rate than the star topology. During the tests, transmissions were performed from multiple nodes at 30, 60, 90, and 120 meters within a regulation soccer field. The wireless communication system was found to operate reliably. At the end of the tests, it was established that the hardware obtained does not represent a burden for soccer players due to its dimensions and weight.

**Keywords:** *Heart rate; Sensor networks; ZigBee; Things board; Electronic board.*

# Antecedentes

El Internet de las Cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*) integra cualquier objetos físicos con conexión a internet con un identificador único [1] por lo que permite ser monitoreado y controlado [2]. Además permite múltiples aplicaciones como: ciudades inteligentes, monitoreo ambiental, tecnología para vestir (en inglés *wearable technology*) [3]. Para que todo esto sea posible, es necesario de un sistema de comunicaciones donde, las redes de sensores inalámbricas (WSN, del inglés *Wireless Sensor Networks*) se han convertido en el motor para que el paradigma IoT tome fuerza y cualquiera de sus aplicaciones puedan existir, ya que estas redes son consideradas como la principal solución de conectividad. Así, las redes de sensores inalámbricos son de interés ya que permiten flexibilidad en su enlace, reduciendo costos por el despliegue de una infraestructura cableada. En este sentido, múltiples tecnologías han surgido para dar respuesta a las necesidades de WSN y corresponden al conjunto de redes de área personal (PAN, del inglés *Personal Area Network*) y al conjunto de redes de área vecindaria (NAN, del inglés *Neighborhood Area Network*), en estos grupos, están las tecnologías ZigBee o Bluetooth.

Incluso en la actualidad se disponen de tecnologías para WSN que sacrifican tasas de transmisión conseguir mayores distancias a las redes anteriores y bajo ciertos contextos, gracias que usan menores tasas de transmisión pueden ser mucho más eficientes en cuanto al consumo de energía [2]. De acuerdo a lo mencionado, estas redes están enmarcadas como redes de bajo consumo de energía de área amplia (LPWAN, del inglés *Low Power Wide Area Networks*). Por esto, nuevos trabajos están considerando el uso de LPWAN [4]. Cabe señalar aquí, que la selección de la tecnología dependerá mucho del alcance, nivel de consumo de energía deseado, cantidad de datos a transmitir, la latencia soportada y por tanto la velocidad de

transmisión de datos (en inglés *Data Rate*) así como la tasa de transmisión efectiva (en inglés *Throughput*); todos parámetros necesarios importantes de considerar para soportar la aplicación de WSN deseada.

Cada una de estas mejoras tecnológicas han llevado al desarrollo y mejora de sistemas de medición y monitoreo de variables fisiológicas en pos del desarrollo del deporte, verificándose que el conocimiento de datos relacionados al estado físico permiten la mejora del rendimiento deportivo y/o prevenir lesiones [5]. La tecnología vestible o *Wearable Technology* en inglés, según Vashist [3], corresponde al uso de dispositivos electrónicos como si fueran una prenda más a usar en la vida diaria, con el objetivo de recolectar diferentes tipos de datos que permitan realizar un seguimiento y análisis correspondiente de acuerdo a la actividad que se esté realizando. Un claro ejemplo son los relojes inteligentes *Smartwatch*, que pueden monitorear el ritmo cardíaco de la persona en todo momento. Esta información es importante para la toma de medidas de precaución en cuanto a la salud [6].

También, la utilización de la tecnología usable en el deporte ha crecido de forma exponencial debido a la posibilidad de monitorear señales físicas de jugadores durante un partido, datos relevantes como su velocidad, distancia de recorrido total, ritmo cardíaco, entre otras mediciones son claves para la selección de una estrategia con vistas al mejoramiento del desempeño, tanto del deportista de forma individual, como del equipo en su totalidad [3]. Existen casos de estudio, concretamente en el fútbol, donde parámetros de respuesta biométrica y posicionamiento de los jugadores [7], son información valiosa para el entrenador. Por ejemplo, se presenta el caso de la Federación Internacional de Fútbol Asociado (FIFA), que pretende incorporar la utilización de sensores para generar una estimación de la posición, velocidad, de múltiples futbolistas para analizar y mejorar la preparación física en los entrenamientos [8].

Se puede decir que la competencia se define generalmente como una situación en la que dos o más rivales compiten entre sí por un mismo objetivo. Motiva a las personas a un mejor rendimiento en muchas actividades, incluidos los deportes, dan como resultado una mayor intensidad de ejercicio que las prácticas o el entrenamiento [8].

Debido a la alta competitividad en los deportes, existen varios dispositivos en el mercado que monitorean al usuario y ayudan a la toma de decisiones para mejorar el rendimiento del individuo. Estas mediciones son indicadores importantes para evaluar el estado funcional del cuerpo humano, ya que en conjunto permiten conocer si el deportista está entregando su máximo potencial, incluso evaluar su posible mejora en cuanto al rendimiento deportivo, conocer si sufre golpes de calor que puedan poner en riesgo su vida o que el cuerpo está adaptándose al entrenamiento [9].

Por lo antes expuesto, el presente trabajo se centra en la problemática que se evidencia en el equipo de fútbol femenino de las "Carneras" de la Universidad Politécnica Salesiana. No dispone de un sistema de seguimiento y análisis de mediciones (esfuerzo, fisiológicas) para evaluar y mejorar el rendimiento de las jugadoras del equipo. En este sentido, sería de gran relevancia generar un espacio de investigación y aplicación de la llamada tecnología usable dentro del medio local, ya que esto permitirá al entrenador generar una base de información del rendimiento en cada uno de los entrenamientos. Con esta información, el entrenador, con un mejor criterio, podría corregir diferentes ejercicios y exigir más, dependiendo de la información de cada deportista; además, se puede crear un plan de entrenamiento adecuado de forma individualizada y para todo el equipo en conjunto [10].

# Justificación

Las tecnologías de comunicación están en constante evolución y cada vez se busca aprovecharlas en diferentes contextos de aplicación, como es el caso del deporte. Por ejemplo, en fútbol, la profesionalización de los jugadores los ha convertido en atletas de alto rendimiento; así, para mejorar el rendimiento de estos y ayudarlos a superar su estado físico, se busca monitorear su estado fisiológico durante sus entrenamientos para mejorar la aplicación de cargas de físicas con el objeto optimizar su entrenamiento y, a posterior, su rendimiento en el deporte. En este sentido, resulta necesario la generación de una base de datos para que los entrenadores puedan planificar de manera más específica los procesos de entrenamiento para optimizar el rendimiento físico de los atletas [11].

De acuerdo con lo descrito, se propone en el presente trabajo, el diseño de un sistema inalámbrico, prototipo capaz de monitorear la fisiología de un atleta, como es el caso de un futbolista, permitiendo valorar su potencial en los entrenamientos, así como identificar posibles características para un progreso exponencial en el juego. Este sistema busca integrar tecnologías de comunicación inalámbrica para la comunicación de los datos registrados y permitir su análisis a través de una plataforma basada en IoT para que puedan ser evaluados por el cuerpo técnico. Cabe mencionar que este trabajo es un caso práctico con fines investigativos para ser aplicado con el equipo de fútbol femenino, las “Carneras” de la Universidad Politécnica Salesiana para dar una retroalimentación que garantice cumplir con los objetivos del proceso de entrenamiento físico de la pretemporada.



# Objetivos

## Objetivo General

- Desarrollar un sistema de monitoreo de frecuencia cardíaca y variables físicas para medir el desempeño en sesiones de entrenamiento de futbolistas usando tecnologías de comunicación inalámbrica.

## Objetivos específicos:

- Realizar un estado del arte sobre la frecuencia cardíaca y las variables físicas relevantes a la actividad física enfocada al fútbol como deporte, las tecnologías de comunicación inalámbricas existentes y diferentes tipos de microcontroladores.
- Diseñar un sistema electrónico de captura de variables físicas y fisiológicas con capacidad de transmisión inalámbrica de datos.
- Diseñar un sistema de visualización basado en web de los datos capturados y transmitidos por la red inalámbrica implementada.
- Evaluar la confiabilidad del sistema desarrollado y la red de comunicaciones usada para probar su operación y capacidad de transferencia de datos.

# Introducción

Nuestras interacciones con el mundo que nos rodea están cambiando fundamentalmente como resultado del Internet de las cosas (IoT).

La salud, la agricultura, el transporte y la domótica son solo algunos de los sectores que ya han adoptado esta tecnología innovadora. En el mundo de los deportes, en particular el fútbol, el Internet de las cosas está empezando a desarrollar todo su potencial.

En el fútbol, como en muchos otros deportes, la recopilación y el análisis de datos es esencial para mejorar el rendimiento de los jugadores y los equipos. En el pasado, se utilizaban métodos manuales y sencillos para lograrlo. Sin embargo, ahora es posible realizar un seguimiento preciso de todas las variables del juego en tiempo real, desde las posiciones de los jugadores hasta la velocidad de la pelota, gracias a la convergencia del Internet de las cosas y redes de comunicación como ZigBee.

En esta introducción, veremos cómo se pueden utilizar las tecnologías de redes de comunicación IoT y ZigBee para analizar el fútbol con mayor profundidad y detalle.

Esto beneficiará a los entrenadores, jugadores y aficionados al ayudarlos a comprender el juego y desempeñarse mejor. El uso de IoT y ZigBee está marcando el comienzo de una nueva era de innovación y competencia en el fútbol, desde sensores en los balones y botas de los jugadores hasta el seguimiento del estado físico de los jugadores. A la luz de esto, examinamos cómo estas tecnologías están alterando la forma en que se juega y se experimenta el fútbol, así como también cómo están allanando el camino para un futuro emocionante para el deporte.

# Capítulo 1

## Fisiología del deporte y Variables físicas en el fútbol

En el presente capítulo se describen características básicas relacionadas con la fisiología del deporte, las adaptaciones fisiológicas que produce el organismo, y por motivos de investigación se enfoca en la frecuencia cardíaca como variable de interés. Más adelante, se analiza la tecnología aplicada al deporte y por último las variables físicas en el fútbol que es de relevancia para el estudio.

### 1.1. Fisiología del deporte

La fisiología del deporte es el estudio de procesos fisiológicos y metabólicos en el cuerpo humano mediante la actividad física, es decir, estudia cómo el cuerpo humano se adapta y responde al ejercicio. Esto es fundamental para el incremento del rendimiento deportivo y poder crear planes de entrenamiento eficaces para los deportistas [12]. De hecho, cualquier cambio, movimiento o búsqueda por generar una jugada, por ejemplo en el fútbol, significa que el cuerpo debe realizar muchos ajustes basados en interacciones complejas de muchos sistemas corporales, incluso a nivel celular y molecular [13].

Frente a esto, el alto rendimiento es la combinación de múltiples factores genéticos, biomecánicos, fisiológicos y psicológicos, estos factores se pueden potenciar al máximo mediante el entrenamiento, este define como un proceso continuo de

adaptación de cargas de trabajo y su objetivo es desarrollar diferentes habilidades y capacidades técnicas muy sofisticadas, un deportista de alto rendimiento es el resultado de una preparación conjunta entre el deportista, entrenador y médicos [14]. En este sentido, se ha verificado que hay una respuesta del cuerpo humano durante el ejercicio, existe una demanda mayor de energía y un aumento de la tasa metabólica, esto se da por la activación del sistema cardiovascular y el aumento de la demanda de oxígeno y el uso de los nutrientes [13].

Por lo antes expuesto se tiene las siguientes adaptaciones producidas por el ejercicio:

1. Adaptaciones metabólicas musculares
2. Adaptaciones circulatorias
3. Adaptaciones respiratorias
4. Adaptaciones cardíacas

### **1.1.1. Adaptaciones metabólicas musculares**

El Adenosín Trifosfato (ATP) es la única fuente directa de energía de la unidad funcional del músculo, durante el ejercicio el consumo de ATP aumenta considerablemente que a tener el músculo en reposo, para satisfacer las demandas excesivas de ATP, el cuerpo utiliza las reservas de ATP intracelulares, convierte la energía fosfocreatina en ATP, genera por glucólisis anaeróbica ATP, también por el metabolismo oxidativo del acetil-CoA [15]. En otras palabras, el sistema muscular convierte a través de un proceso bioquímico en ATP para satisfacer la demanda de energía, durante el ejercicio internamente se produce los cambios sistémicos metabólicos musculares, que se traduce en un consumo eficiente de la energía [13].

### **1.1.2. Adaptaciones circulatorias**

El corazón genera presión, esta debe permanecer constante y acoplarse a las necesidades de oxígeno de cada individuo. El flujo sanguíneo debe mantener un ciclo que es el siguiente: la sangre ingresa a la aurícula derecha, en ella desembocan las

venas cava superior e inferior y el seno coronario que trae el drenaje venoso (sangre con dióxido de carbono -  $CO_2$ ) del corazón, la aurícula derecha se comunica con el ventrículo derecho, a través de un orificio denominado la válvula tricúspide, y de aquí la sangre sale por la arteria pulmonar donde se oxigenaba en los pulmones (circulación menor) por consiguiente la sangre oxigenada regresa a la aurícula izquierda por cuatro venas pulmonares y es transportada al ventrículo izquierdo atravesando la válvula bicúspide, el ventrículo izquierdo encargado de transportar la sangre a todo los sistemas (circulación mayor) [16]. La Figura 1.1 ilustra las cámaras del corazón y el sentido de la circulación de la sangre por sus cavidades antes explicado.

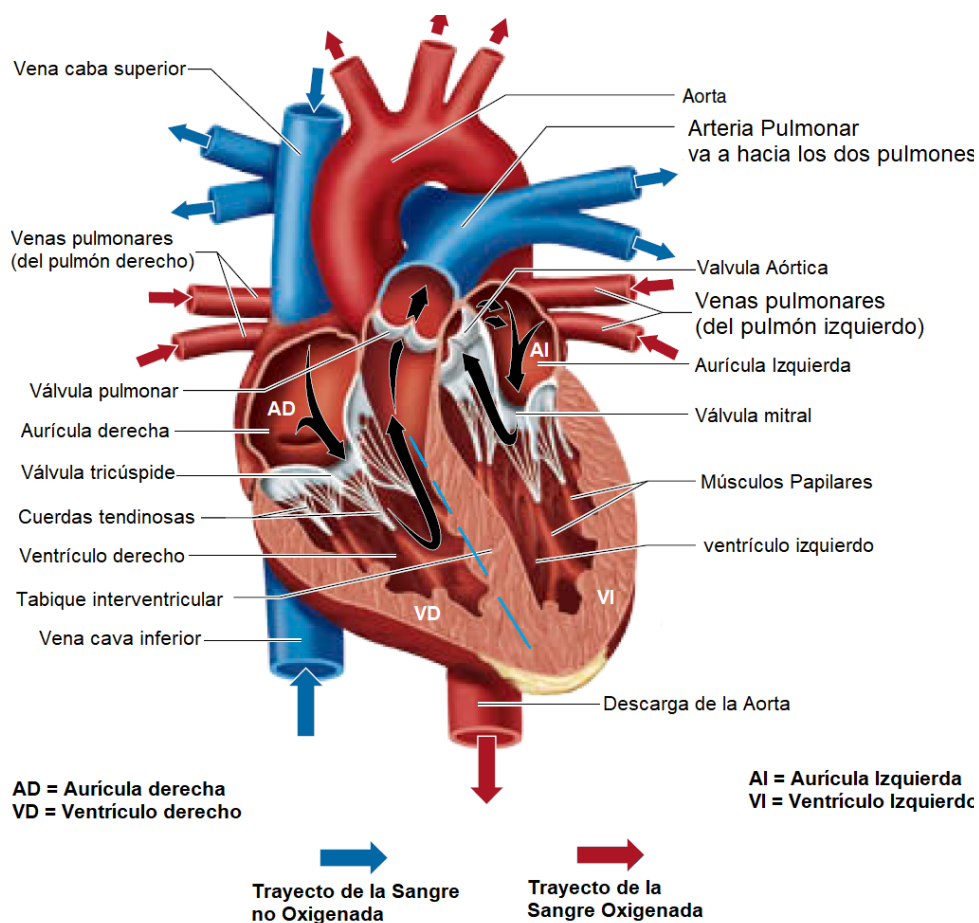


Figura 1.1: Circulación mayor y menor [13].

Según [15], durante el ejercicio físico, el corazón bombea y suministra la cantidad necesaria de sangre a los músculos, de esta manera la demanda de oxígeno provocado por la contracción muscular tiene una relación con la presión arterial, encargada de la fuerza del flujo sanguíneo.

Además, el incremento del flujo sanguíneo en los pulmones debe coincidir en medida con el aumento del flujo de otras partes del sistema circulatorio, manteniendo un equilibrio para permitir un intercambio de gases eficientes. Sin embargo, estos importantes ajustes en la circulación se producen debido a la interacción de factores nerviosos y químicos, evitando que la velocidad del flujo sanguíneo se acelere excesivamente y comprometa el intercambio gaseoso necesario [17].

El corazón posee una serie de contracciones ordenadas, permitiendo el correcto funcionamiento y coordinación con las diferentes cavidades cardiacas. Estas contracciones responde al sistema de conducción eléctrica del corazón. Además, consta de un sistema de regulación de contracción involuntario formado por dos componentes: simpático encargado del aumento de la cantidad de latidos por minuto y parasimpático en la fuerza de contracción del corazón, estos componentes están equilibrados. En condiciones de actividad física existe una activación simpática originando una mayor fuerza de contracción y una mayor frecuencia cardiaca [18].

### 1.1.3. Adaptaciones Respiratorias

El consumo del oxígeno es fundamental para el buen estado físico y para un óptimo rendimiento de los deportistas, ya que, los músculos respiratorios influyen en el entrenamiento, además, contribuye con la estabilización y los movimientos del tronco, sin embargo, la limitación respiratoria puede influir con la fatiga de los mismos, provocando una menor demanda de oxígeno y afectando a la técnica de carrera del futbolista [19].

Según Morrilla [19] la frecuencia respiratoria en futbolistas puede variar dependiendo de la intensidad de un entrenamiento físico, ya que, el cuerpo requiere aumentar la frecuencia respiratoria para abastecer los músculos en movimiento y además eliminar el dióxido de carbono acumulado, sin embargo, la frecuencia respiratoria normal dependiendo de diferentes factores como: la edad, el nivel de actividad física y en general el estado de salud, el promedio oscila entre 12 y 20 respiraciones por minuto, mientras en deportistas oscila entre 50 y 60 respiraciones por minuto, ciertamente la frecuencia respiratoria en futbolistas entrenados tienden a tener una capacidad respiratoria más eficiente.

### 1.1.4. Adaptaciones cardiacas

El ejercicio físico produce una serie de cambios morfológicos y funcionales a nivel cardíaco, en el caso de un deportista, su corazón puede llegar a tener un aumento de masa cardíaca de un 20 % [20]. Además, se encontró que hay trastornos de ritmo como la bradicardia sinusal y de la frecuencia cardíaca, trastorno inespecífico de la conducción intraventricular [21]. Para mejor comprensión de estos trastorno primero se debe conocer que la frecuencia cardiaca es la cantidad de veces que se contrae el corazón por unidad de tiempo, su unidad es lpm (latido por minuto) [22].

Así mismo, la frecuencia cardíaca en reposo (FCR) es el número de pulsaciones mínimas en el instante que la persona está en descanso o actividad mínima, el promedio es de 60 a 80 latidos/min [23]. En la tabla 1.1, se presenta la relación de la frecuencia cardíaca de acuerdo a la edad y el género.

Tabla 1.1: Frecuencia cardíaca en relación la edad y género [23]

Hombres				
Edad	Mal	Normal	Bien	Excelente
20-29	86 o más	70-84	62-68	60 o menos
30-39	86 o más	72-84	64-70	62 o menos
40-49	90 o más	74-88	66-72	64 o menos
50+	90 o más	76-88	68-74	66 o menos
Mujeres				
Edad	Mal	Normal	Bien	Excelente
20-29	96 o más	78-94	72-76	70 o menos
30-39	98 o más	80-96	72-78	70 o menos
40-49	100 o más	80-98	74-78	72 o menos
50+	104 o más	84-102	76-82	74 o menos

Además, la frecuencia cardíaca es directamente proporcional al incremento de la intensidad del ejercicio y está empieza a nivelar hasta que el deportista siente el agotamiento. Esto significa que se llega al punto máximo [23]. Por lo tanto, la frecuencia cardíaca máxima (FC<sub>máx</sub>), es el valor más alto de pulsaciones que puede alcanzar una persona durante el ejercicio físico hasta llegar al agotamiento, y esta puede variar con la edad, sexo, y el tipo de ejercicio. Según Tanaka [24] este parámetro

se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$208,75 - (0,73 * edad) \quad (1.1)$$

Uno de los componentes más importante sin duda es la  $FC_{max}$ , ya que ofrece el parámetro de control del ejercicio. Además, según Uth [25] propone una ecuación que permite estimar el  $Vo2_{máx}$  aplicando la  $FCR$  y  $FC_{max}$ , también, permite tener el valor del gasto diario energético y también, la interrupción del esfuerzo de una prueba ergométrica. Por otra parte, si no se supera 80 a 85 % de la  $FC_{max}$ , en un futbolista puede presentar la existencia de una coronopatía [24].

En conclusión, la frecuencia cardíaca en deportista es de suma importancia y considerar las personas que realizan habitualmente ejercicio y que su ritmo cardiaco como la braquicardia sinusal, que oscila entre 40 a 60 latidos/min, son deportista adaptado a cargas de trabajo [20]. Por lo antes expuesto conocer la frecuencia cardíaca de cada futbolista del equipo, las carneras es fundamental para mejorar su rendimiento deportivo, cabe mencionar que no es el único valor en tener en cuenta.

## 1.2. Tecnología aplicada en el deporte

Durante décadas los entrenadores han buscado mejorar el rendimiento deportivo creando diferentes métodos de entrenamiento y basándose en la obtención de resultados por cronómetro u anotaciones en papel, actualmente se tiene métodos más avanzados para obtener información, usando tecnología [26]. El desarrollo de la tecnología tiene un impacto positivo en la práctica del deporte, generando líneas de investigación de cada disciplina, un ejemplo es la tecnología wearable, que es toda prenda de vestir implementado un dispositivo tecnológico como: cámaras, micrófonos y sensores a pequeña escala con la capacidad de transmitir información [27].

Según Fava [28] los dispositivos wearable y la transmisión de información en tiempo real, permiten un monitoreo constante de los deportistas, estos datos optimiza el rendimiento y permite personalizar las rutinas de ejercicio. Además, la obtención de datos es más exactos, por lo que puede obtener parámetros como: ritmo cardiaco, su velocidad, aceleración, distancia recorrida, biomecánica y mucha más información.



### 1.2.1. Tecnología aplicada en el fútbol

La introducción de la tecnología de un sistema posicionamiento global (GPS) en los deportes de competencia proporcionan datos precisos del juego y de la actividad de cada deportista [29], estos dispositivos van en la parte posterior del jugador, cuantificando el movimiento dentro de la cancha, de igual manera, registra las cargas externas de trabajo, variables físicas fundamentales de los jugadores [30], [31].

Por ejemplo, el uso de la tecnología implementada en el fútbol ha desembocado en diversas aplicaciones como es el sistema de árbitro asistente de vídeo (VAR, del inglés *Video Assistant Referee*), tiene como objetivo disminuir desaciertos humanos, teniendo un juego limpio [32]. También, los clubes deportivos ha implementado indumentaria deportiva capaz de monitorear a cada uno de los futbolistas.

Otro caso es el uso de sensores inerciales, cuantifica el cambio de dirección de los futbolistas, su aplicación es relevante para conocer velocidad que es de relevancia para mejorar el ataque y la defensiva, también, detalla patrones del movimiento eficaces en la actividad [33]. Para complementar en el fútbol, el jugador posee una banda torácica que cuantifica la cantidad de latidos por minuto [34]. En el capítulo 1 se detalla la importancia de esta variable en el deporte.

## 1.3. Variables físicas fundamentales del jugador.

Las principales métricas es la distancia recorrida en competencia, varía de acuerdo a la posición del futbolista según la investigación realizada por Rey [35] a 432 futbolistas en 31 partidos. Entre los resultados se identifica que la distancia recorrida promedio independiente de la posición del jugador es  $10.1 \text{ km} \pm 0.870$ . También, se encontró diferencias en el recorrido entre las diferentes posiciones:

- defensa central ( $9.3 \text{ km} \pm 0.542$ ),
- defensa lateral ( $10.1 \text{ km} \pm 0.599$ )
- medio centro ( $10.9 \text{ km} \pm 0.662$ )
- medio interior ( $10.7 \text{ km} \pm 0.648$ )

- delantero (10 km  $\pm$  0.576)

Se debe indicar que la distancia es una variable no significativa, pero relativizando distancia relativa al tiempo de juego: m/min se puede cuantificar el esfuerzo del partido y la distancia recorrida se considera como un volumen de trabajo [36]. Por otra parte, según Reche la distancia recorrida en alta intensidad es por encima de los 14 km/h y la velocidad recorrida de un sprint supera los 21 km/h aunque solo representa del 1 a 12 % de la distancia recorrida, es considerada relevante en rendimiento del futbolista en competencia [37].

En la tabla 1.2 se puede considerar las siguientes métricas medibles en el fútbol:

Tabla 1.2: Variables físicas consideradas en el fútbol [36].

VARIABLES	UNIDADES
Distancia Total (DT)	metros (m)
Distancia Total a Sprint (DTSPRINT)	metros (m)
Distancia Total a Alta Intensidad (DTHIA)	metros (m)
Distancia Relativa (DR)	metros/minuto (m/min)
Aceleraciones Relativas (Acc/min)	número/min (n/min)
Desaceleraciones Relativas (Dec/min)	número/min (n/min)
Velocidad Media (VMEDIA)	kilómetros/hora (km/h)

## Capítulo 2

# Tecnologías inalámbricas y tipos de microcontroladores

En este segundo capítulo se describen las diversas tecnologías inalámbricas usadas en redes de sensores, su clasificación y por motivos de investigación se enfoca en redes de área personal (WPAN) y como elección de tecnologías de comunicación inalámbrica de interés: ZigBee y Bluetooth, en una nueva sección abarca los microcontroladores y sus tipos de microcontroladores y por último en una plataforma de open source denominada Thingsboard.

### 2.1. Redes de Sensores Inalámbricos

Una red de sensores inalámbricos (WSN, del inglés *Wireless Sensor Network*)), corresponde a un sistema de dispositivos autónomos capaces de adquirir una o más variables físicas y que, por tanto, constan de radiotransmisores, sensores y por supuesto, microcontroladores, todos en una sola placa electrónica. Estos dispositivos se interconectan para formar una red inalámbrica perfectamente sincronizada con capacidad de autorrestaurarse. Es decir, en caso de avería de un nodo, el sistema busca vías alternas para el intercambio de información [38].

Según Yick [39] menciona que una de las principales ventajas de los sistemas de WSN es que permiten monitorear cualquier entorno en un área extensa y en lugares inaccesibles, permitiendo controlar diferentes condiciones remotamente, ya que tiene

la capacidad de comunicarse con una pasarela de datos (en inglés *gateway*) que permite que la WSN pueda conectarse con una red con mayores capacidades de transmisión en cuanto a volúmenes de datos y velocidad para poder acceder a la Internet o al menos agrupar conjuntos de sensores dentro una red inalámbrica de área personal (WPAN, del Inglés *Wireless Personal Area Network*) para luego acceder a la Internet.

Por otra parte, los dispositivos integran una fuente de alimentación que, por lo general, son baterías, cada uno de los nodos se construye teniendo en cuenta la conservación de la energía, por lo que los dispositivos pasan en modo “sleep” esto quiere decir: en un bajo consumo de potencia cuando no están transmitiendo información.

### 2.1.1. Tecnologías de comunicación usadas en WSN

Las redes de comunicación inalámbrica es el intercambio de información entre dispositivos, y como medio de comunicación, el aire, la información es enviada por ondas electromagnéticas, esta información puede estar codificada [40], por otra parte, las ventajas de las comunicaciones inalámbrica son su acceso puede ser desde zonas remotas y sus costos de implementación son menores a los de una tecnología de comunicación cableada, además las redes inalámbricas pueden ser de corto y largo alcance, las características de transmisión va a depender de la tecnología inalámbrica [41] y su clasificación se puede observar en la figura 2.1.

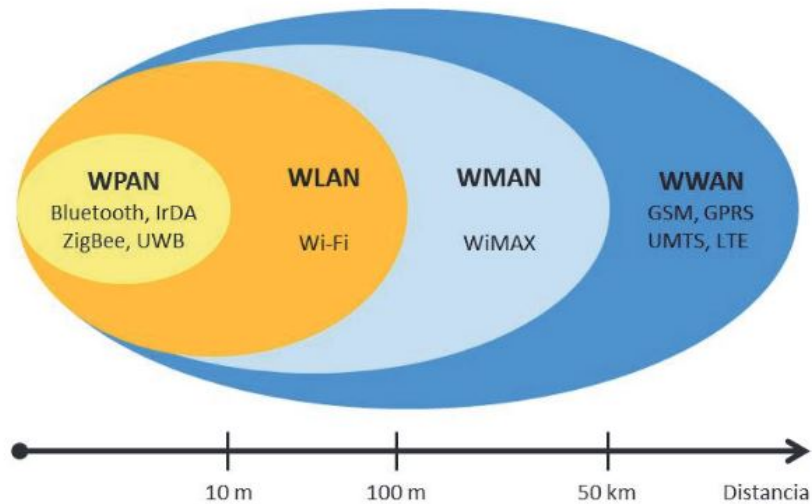


Figura 2.1: Redes inalámbricas [42]

1. Redes inalámbricas de área personal (WPAN) se basan en el estándar IEEE 802.15, su rango de comunicación es corto, para su implementación, no requiere de infraestructura y da solución a pequeñas comunicaciones entre dispositivos, específicamente, comunicaciones entre móviles inteligentes, una de las características es su bajo consumo de energía. Las tecnologías dentro de WPAN son: Bluetooth, DECT8, IrDa9, NFC10 y ZigBee.
2. Redes inalámbricas de área local (WLAN) Se basan en el estándar IEEE 802.11, su rango de comunicación aproximadamente es de 100 m están diseñadas para puntos de acceso. La tecnología dentro de WLAN es: Wi-Fi
3. Redes inalámbricas de área metropolitana (WMAN) se basan en el estándar IEEE 802.16, se ha denominado WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), su rango de comunicación es 50 km hacia la base estación, además puede coexistir con las redes inalámbricas LAN se interconectan por WiMAX creando una gran WMAN.
4. Redes inalámbricas de área amplia (WWAN) su rango se extienden más allá de los 50 kilómetros y son redes se pueden abarcar ciudades o países, se necesita una licencia, su comunicación es por los múltiples sistemas de satélites o ubicaciones con antena atendidos por un proveedor de servicios de Internet [43].

### 2.1.2. Elementos Principales de una WSN

Guy [44] menciona los elementos que constan en una red de sensores:

1. **Sistemas de adquisición de datos:** los sensores pueden usar diferentes tecnologías inalámbricas y pueden adquirir diferentes parámetros como sensores de presión barométrica, GPS, radiación solar, humedad, temperatura, sonido, etc.
2. **Motas:** cuentan con un sistema de procesamiento y un sistema de comunicación, ambos distribuidos en una sola placa, mientras los sensores adquieren los parámetros mientras los procesadores utilizan los datos, dicha información es enviada a una estación base.
3. **Gateway:** es la puerta de enlace entre la red de sensores a una red TCP/IP, mediante un puerto Ethernet se puede conectar un ordenador.
4. **Estación base:** encargado de la recolección de datos basado en un sistema embebido o un ordenador, este debe ser capaz de recolectar toda la información de cada uno de los nodos.

Luego de revisar las características principales de estos tipos de tecnologías que sobre todo están orientadas a las redes de sensores inalámbricos, se considera ideal trabajar con redes área personal como la tecnología Bluetooth Low Energy, una variante con mejor tasa de transmisión que Bluetooth, y comunicación ZigBee para la creación de redes de sensores, en la siguiente sección se detalla en profundidad el uso de la Bluetooth Low Energy y ZigBee en las siguientes subsecciones.

## 2.2. Bluetooth 4.0

Bluetooth 4.0 o Bluetooth Low Energy (BLE) es una tecnología inalámbrica de baja potencia diseñado para la transmisión de datos a corto alcance y su principal limitación es una baja tasa de transmisión de datos [45].

### 2.2.1. Arquitectura de BLE

En la figura 2.2 se observa la arquitectura de Bluetooth, que representa los conjunto de capas que permite la interacción con el usuario.

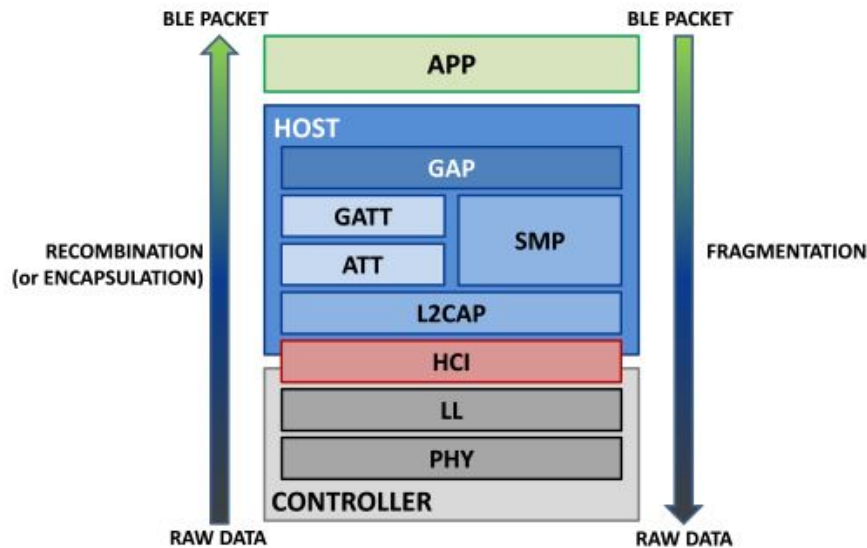


Figura 2.2: Arquitectura apilada de Bluetooth Low Energy [45].

Según Darroudi [46], el Bluetooth Low Energy es una estructura apilada y agrupada por 3 bloques principales.

1. La aplicación (APP) es la interacción entre el usuario y la interface, permite la operabilidad con el dispositivo.
2. Host es el administrador de cómo se comunica uno o más dispositivos e incluye las siguientes subcapas:
  - Perfil acceso genérico “Generic Access Profile (GAP)”
  - Perfil atributos genéricos “Generic Attribute Profile (GATT)”
  - Protocolo de adaptación y control enlace lógico “Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)”
  - Protocolo de atributos “Attribute protocol (ATT)”
  - Protocolo de administrador de Seguridad “Security Manager protocol (SMP)”

- Subcapa de interfaz de control del Anfitrión “Host Controller Interface (HCI)”
3. El controlador encargado de intercambiar señales e interpretar en paquetes de información e incluye las siguientes subcapas:
- Subcapa de Interface de control del Host “Host Controller Interface (HCI)”
  - Subcapa de enlace “Link Layer (LL)”
  - Subcapa física “Physical Layer (PHY)”

### Subcapas del controlador

1. Subcapa física “Physical Layer (PHY)”.

La subcapa física encargada de intercambiar señales, usa la banda de frecuencia industrial, Scientific Medical (ISM) diseñada para operar en la banda 2.4 GHz y se divide en 40 canales que se extiende desde 2,402 hasta 2,480 Ghz donde de los cuales, tres canales (37, 38 y 39) están reservados para paquetes “advertising” y los 37 canales restantes son utilizados para intercambiar paquetes de datos cuando hay una conexión [46]. Los canales reservados para “advertising” están ubicados estratégicamente para evitar la interferencia y el desvanecimiento provocado por otras tecnologías que operan a la misma frecuencia, además se ha implementado un Adaptive Frequency Hopping que permite soportar las interferencias de radio [47].

Por otro lado, el tipo de modulación que utiliza Bluetooth Low Energy es GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying), y permite a la capa física trabajar a una tasa de 1 Mbps, donde cada bit transmitido corresponde a un único símbolo, usando “error correction coding” se puede tener de 2 a 8 símbolos por bit asimismo la capa física también puede trabajar a 2 Mbps, pero funciona con datos no codificados [48].

Además, Bluetooth Low Energy define límites de potencia de transmisión, el mínimo es de 0,01 mW (-20 dBm) y un máximo de 10 mW (+10 dBm) esto para optimizar el consumo de energía [48].



### 2. Subcapa de enlace “Link Layer (LL)”

Según Karhumaa [49] la subcapa LL es encargada de la recepción, procesamiento y reenvío de unidades de protocolos de datos (PDU), y además se encarga de la comunicación de radiofrecuencia (RF) con la capa física.

La subcapa de enlace mantiene un identificador de dispositivo único, esta dirección del dispositivo es lo que permite distinguir diferentes interlocutores de comunicación.

### 3. Subcapa de interfaz de control del Anfitrión “Host Controller Interface (HCI)” (HCI).<sup>es</sup> un protocolo que permite la comunicación entre controlador y el host, define un conjunto de eventos y comandos relacionados con la configuración de los dispositivos, es decir, del funcionamiento y envío de paquetes de datos a través de interfaces físicas: UART, USB, y SDIO a la capa del host y viceversa [50].

## Subcapa del host

### 1. Protocolo de adaptación y control enlace lógico “Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)”

Protocolo que actúa como multiplexor pueden encapsular los datos de la capa de red y le da un formato de paquete para definir los protocolos de los atributos y gestión de seguridad y viceversa fragmentar los datos desde las capas superiores hacia las inferiores [51].

### 2. Protocolo de administrador de Seguridad “Security Manager protocol (SMP)”

Encargado de la seguridad de los paquetes de datos, su función es cifrar y descifrar, también define dos estados durante el inicio de conexión, el primero es la inicialización que envía el dispositivo maestro y la respuesta que da el dispositivo esclavo [52].

### 3. Protocolo de atributos “Attribute protocol (ATT)”

Según Decuir [53] attribute Protocol establece una conexión cliente-servidor, es decir el cliente solicita los datos del servidor, estos roles de maestro y

esclavo respectivamente son establecidos en la capa de red, además se asigna un identificador único universal (UUID).

#### 4. Perfil atributos genéricos “Generic Attribute Profile (GATT)”

Es encargado de encapsular los protocolos de los atributos, su función es intercambiar perfiles de información de datos, estos definen el comportamiento de los dispositivos BLE y los tipos de datos que transmiten, dichos datos están organizados: secciones denominado servicio y datos agrupados llamados características [54].

La tecnología BLE estándar permite los servicios y características tengan un formato de 16 bits, pero el sistema es más robusto, permite un servicio de 128 bits para nuevas aplicaciones.

Por otra parte, según Horvat [55] cuando se produce la conexión, el servidor presenta sus servicios y características al cliente para establecer la estructura lógica de conexión.

Un servicio agrupa los atributos mientras que las características son atributos incluidos en un servicio, las características contienen el valor de los datos y la descripción de la información adicional, mientras que las propiedades indican al cliente que operaciones se permite realizar en las características [55].

En la figura 2.3 se observa la lógica de comunicación.



Figura 2.3: Características de cliente para establecer una estructura lógica [56].

Las operaciones son las siguientes.

- Broadcast: Envía los paquetes “advertising”

- Readable: El cliente puede solo leer el valor.
- Writable: El cliente puede escribir un nuevo valor.
- Notifiable: El cliente recibe una notificación cuando el servidor cambia las características.

#### 5. Perfil acceso genérico “Generic Access Profile (GAP)”

Especifica los roles de los dispositivos, modo y procedimientos, también gestiona la conexión y seguridad e interactúa directamente con la capa de aplicación, controla todos los protocolos inferiores y proporciona el enlace entre el usuario y todos los protocolos [56].

## 2.3. ZigBee

ZigBee es un estándar basado en protocolos de comunicación con una tasa de transmisión desde 256 kbps, bajo consumo de potencia (1 mW o menos en algunos casos), una red inalámbrica de largo alcance con hasta 1200 metros en exteriores y 60 metros en interiores, etc. [57], fue diseñado por ZigBee Alliance el cual define la capa de red, la seguridad y capa de aplicación, mientras que el estándar IEEE802.15.4 define la capa física y la capa de control de acceso al medio para LR-WPAN [58], cabe mencionar un ejemplo de aplicación con ZigBee es el monitoreo de pacientes con presión arterial y frecuencia cardiaca, se lleva un análisis desde la casa con el uso de los wereable y es transmitido a un servidor para su posterior análisis por un profesional de la salud [59].

### 2.3.1. Arquitectura de ZigBee

Esta arquitectura es diseñada para trabajar con dos estándares: El primero 802.15.4 que controla la capa física (PHY) y de control de acceso al medio (MAC) y el segundo es ZigBee Alliance que controla la capa de aplicación, capa de red (NWK) y la seguridad.

También, la arquitectura es una estructura apilada basada en un sistema interconectado, es decir entre cada capa existe un punto de acceso al servicio

(Service Access Point SAP) estos puntos de acceso aíslan el trabajo entre capas, por consiguiente, ZigBee usa dos puntos de acceso al servicio, uno de datos y otro de gestión [60].

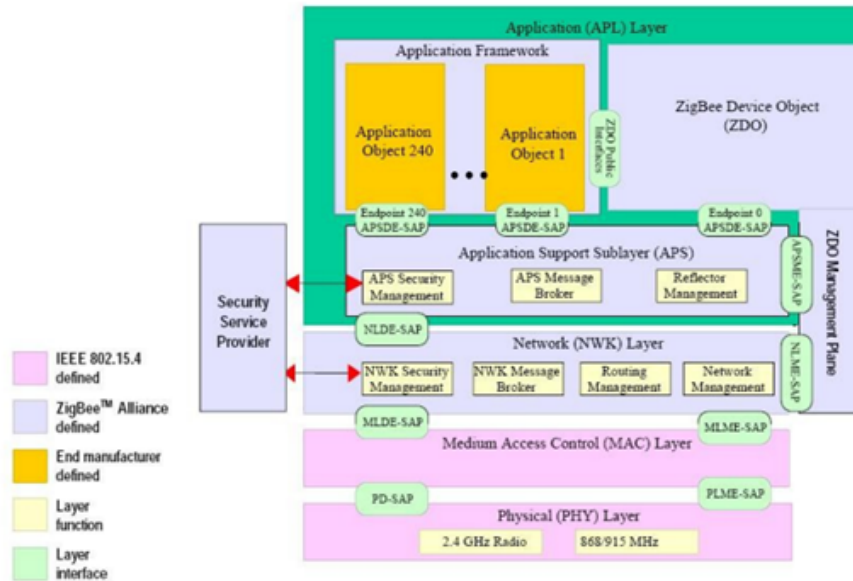


Figura 2.4: Arquitectura apilada de ZigBee [60].

### Capa física "Physical Layer (PHY)"

La capa física del estándar IEEE 802.15.4 proporciona dos tipos de interfaz denominado servicio de datos de la capa física (PD) e interfaz de entidad de servicio de administración de la capa física (PLME). El PD permite la transmisión y recepción de unidad de datos (PPDU), por otro lado, la capa física controla y comunica directamente con las señales de radio, activa y desactiva el transceptor, maneja la inicialización de hardware, estimación de calidad de enlace (LQI), detección de energía (ED), evaluación de canal claro (CCA) [61].

- **Detección de energía recibida (ED):** consiste en detectar la energía del receptor estimando la cantidad de potencia de la señal y luego utiliza un algoritmo de selección de canal, luego el tiempo de la energía de la señal en la banda debe ser periodos de ocho símbolos, su comunicación es por un número entero de 8 bits que va desde 0x00 a 0xff y la sensibilidad del receptor debe ser capaz detectar y demodular con éxito con una tasa de error menor a 1 por ciento [61].

El IEEE 802.15.4 permite una diferencia de 10 dB entre el nivel de sensibilidad del receptor requerido y el nivel de detección de energía requerido [62].

- Estimación de calidad de enlace (LQI): consiste en evaluar la calidad de los paquetes de datos recibidos, para esta estimación se utiliza la intensidad de la señal recibida (RSS) o también la relación entre la señal deseada y la energía total del ruido dentro de la banda (SNR) en otras palabras a mayor relación señal-ruido mejor es la calidad de la señal [62]. Por otra parte, la LQI es un valor entre 0x00 y 0xff. El mínimo y el máximo se debe relacionarse respectivamente con menor y mayor calidad y los valores LQI deben distribuirse uniformemente entre estos dos límites. Un LQI más alto indica una mejor calidad de enlace y menos tasa de pérdida de datos [63].
- Evaluación de canal claro (CCA): implica en la detección de una portadora por encima de la energía detectada e informará si cumple con las características de modulación y propagación establecidas en el estándar IEEE 802.15.4 [61].

### Capa de Control Acceso al Medio "Media Access Control (MAC)"

Media Access Control del estándar IEEE 802.15.4 proporciona dos tipos de interfaz denominados: El Servicio de datos MAC que permite la transmisión y recepción de protocolos MAC y la administración de servicio MAC (MLME) que interactúan con el servicio de entidad de la subcapa MAC mediante el punto de acceso [64].

La capa MAC es la encargada de generar balizas, implementación de acceso múltiple con detección de portadora con prevención de colisiones, manejo del mecanismo de intervalo de tiempo garantizado y servicios de transferencia de datos para capas superiores.

Para esto, el estándar 802.15.4 define una estructura de tramas: datos, ACK, comandos MAC y balizas [65].

- La trama de datos ocupa hasta 104 bytes y asegura que todos los paquetes sean rastreados y se reciban sin errores.

- La trama ACK es una retroalimentación al receptor que el paquete fue recibido sin errores.
- La trama de comando MAC proporciona el mecanismo para control remoto y configuración de los nodos clientes.
- La trama de balizas activa los dispositivos cliente y se vuelven a dormir cuando no escucha para ahorrar la energía.

### Capa de red "Network Layer (NWK)"

Según Wang [66] menciona que la capa de red propone dos tipos de servicio: "Network Layer Data Entity (NLDE)" encargado del transporte de tramas, y la entidad de control y configuración denominado "Network Layer Management Entity (NLME)".

La capa de red encargada de formación de nodos de red de comunicación, asignación de direcciones de red, enrutamiento de tramas, base de datos sobre el funcionamiento del sistema de red.

### Capa de aplicación "Application Layer (APL)"

Es la que permite la interacción con el usuario de una manera comprensible, además esta simplifica la lógica y filtra los mensajes duplicados de la NWK, mantiene una tabla que indica los nodos o grupos de red [67] y está compuesta por subcapas [68]:

- Application framework
- Application object
- ZigBee Device Object (ZDO) Es la ejecución de la aplicación desde el punto 0 como interface de datos y se le asigna un único número y puede existir hasta 240 objetos y 30 funcionar al mismo tiempo en un dispositivo, además gestiona la red inalámbrica controlando diferentes protocolos de los dispositivos ZigBee, en este último da seguimiento del estado de dispositivos ZigBee dentro de la red.

También proporciona un perfil de aplicación con ID 0x0000 permite mantener y configurar los servicios proporcionados por la red ZigBee, encargado de definir el rol del dispositivo en la red (coordinador, router o dispositivo final) [69].

- Application Profile supported Proporciona una interfaz entre la capa de red (NWK) y la capa de aplicación (APL), los servicios los ofrecen dos entidades: la entidad de datos APS (APSD) a través del servicio de punto de acceso APSDE (APSDE-SAP) y la entidad gestora del APS (APSME-SAP) a través de un servicio que ofrece el punto de acceso APSE-SAP.

APSDE proporciona el servicio necesario para la transmisión de datos y el transporte de datos de aplicación entre dos o más dispositivos en la misma red. APSME proporciona el servicio de descubrimiento y enlace de dispositivos y mantiene una base de datos de los objetos llamados "APS Information Base (AIB)".

### 2.3.2. Redes de sensores ZigBee

Es una red de sensores que usa el protocolo de comunicación ZigBee es una tecnología inalámbrica y consta de dispositivos denominados nodos que se comunican en la banda ISM, además pueden formar una red de varios niveles, también, ZigBee permite la conexión a redes más grandes, como el internet a través de un gateway por lo que es usado también para internet de las cosas (IoT) [70].

#### Dispositivos ZigBee

En una red ZigBee encontramos la combinación de tres tipos de dispositivos que permite establecer una red inalámbrica [71], [72], [73].

#### Nodo Coordinador ZigBee (ZC):

Es el elemento central más importante en la red de ZigBee, algunas de sus funciones principales son:

- Inicializar la red ZigBee

- Administrar la asignación de direcciones a los dispositivos dentro de la red.
- Coordinar y controlar la comunicación entre los dispositivos.
- Mantener la tabla de enrutamiento para facilitar la transmisión de mensajes entre los dispositivos de la red.
- Puede estar conectado a una computadora o sistema de control para interactuar con la red.

**Nodo Enrutador (ZR):**

Son elementos intermedios en la red ZigBee y sus funciones principales son:

- Extender el alcance de la red ZigBee actuando como nodos intermedios.
- Ayudar en la creación de una red en malla.
- El router debe permitir que otros dispositivos se unan a la red.
- Permitir la eliminación de la red de dispositivos asociados bajo su control de aplicación.
- Participar en el enrutamiento y reenvío de paquetes.

**Nodo Dispositivo Final (ZED):**

Son dispositivos finales, que están diseñados para ahorrar energía, sus funciones principales son:

- Comunicarse directamente con el coordinador o a través de los Routers para enviar y recibir datos.
- Consumir muy poca energía para prolongar la vida útil de la batería.
- No participar activamente en el enrutamiento de mensajes o el reenvío de paquetes para minimizar el consumo de energía.



### 2.3.3. Topologías de una red ZigBee

Las redes ZigBee pueden implementarse utilizando diferentes topologías, dependiendo de las necesidades específicas de la aplicación y la arquitectura del sistema. Según Romero [74] menciona las siguientes topologías:

- Topología en estrella:
- Topología entre pares:
- Topología en malla:

La topología en estrella, ya que, establece la comunicación entre los dispositivos y un controlador central único. La topología entre pares, se refiere a la topología de punto a punto. En el caso de la topología de árbol, se trata de una red organizada en ramificaciones de flujos de datos. Por último, está la topología en malla (en inglés *Mesh*)

La topología Mesh, también conocido como topología de malla y puede ser de auto organización y auto recuperación.

### 2.3.4. Funcionalidad de operación ZigBee

Según Villamar [75] los dispositivos pueden trabajar de dos formas diferentes, las cuales son:

Dispositivo de Funcionalidad Completa (FFD): También se le denomina nodo activo, además este tipo de nodo tiene la capacidad de recibir mensajes en formato estándar y desempeñar diversas funciones en una red, como Coordinador, Router o Dispositivo final, esto es posible gracias a que cuenta con más memoria y una capacidad de procesamiento mayor en comparación con otros nodos.

Dispositivo de Funcionalidad Reducida (RFD): También conocido como nodo pasivo, este modo de operación se caracteriza por tener capacidades limitadas debido a su baja capacidad de memoria, además estos dispositivos se utilizan principalmente como sensores y actuadores en redes debido a su bajo consumo de energía y su capacidad para realizar acciones simples.

## 2.4. Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado que posee una unidad de procesamiento (CPU) y es capaz de guardar la información en la unidad de memoria (RAM y ROM), posee puertos de entrada salida para la conexión de periférico [76].

El microcontrolador puede interpretar un lenguaje de código y ejecutar sus instrucciones.

Las aplicaciones desarrolladas son limitadas por la imaginación del usuario, los campos en los que se los aplica los microcontroladores son la robótica, telecomunicaciones, industria, en la automatización, como en dispositivos electrónicos de consumo, automóviles, electrodomésticos, equipos industriales y sistemas de control de procesos [77].

### 2.4.1. Tipos de microcontroladores

Según Valdes [76] menciona que los microcontroladores se clasifican dependiendo del ancho de bus, estructura de la memoria y conjunto de instrucciones.

#### 1. Tipo de controladores según el número de bits

- Los microcontroladores 8 bits poseen un bus de 8 bits, que permite operaciones aritméticas y lógicas, tiene limitaciones de memoria y su procesamiento es bajo, su rango es  $0 \times 00 - 0xFF$  (0-255).
- Los microcontroladores 16 bits, mayor precisión en operaciones aritméticas y lógicas, tiene un rango de  $0 \times 0000 - 0xFFFF$  (0-65535).
- Los microcontroladores 32 bits, mayor procesamiento en operaciones aritméticas y lógicas, sus aplicaciones; médicas, deportivas y sistemas de control, etc., son microcontroladores de alto rendimiento.

#### 2. Tipo de controladores según el dispositivo de la memoria

- Los microcontroladores de memoria integrada son los que en un solo chip contiene memoria de programa, datos, puertos y comunicación serie.

- Los microcontroladores de memoria externa no poseen memoria programada en el chip.

### 3. Tipo de microcontroladores según el conjunto de instrucciones.

- Los microcontroladores de instrucciones CISC permite convertir instrucciones complejas en instrucciones sencillas.
- Los microcontroladores de instrucciones RISC permite que las instrucciones sean reducidas y opere en cualquier modo de direccionamiento y acceso de datos.

### 4. Tipo de controladores según la arquitectura de memoria

- Los microcontroladores de arquitectura de memoria de Harvard.
- Los microcontroladores de arquitectura de memoria de Princeton

## 2.4.2. Protocolos de Comunicación en Serie

### Protocolos de Comunicación en Serie

Los diferentes módulos tienen que establecer un protocolo para poder comunicarse entre sí, esto quiere decir, en que establece un formato y forma para transmitir la información.

Existe gran cantidad de protocolos entre ellos se tiene UART, SPI e I2C, estos protocolos tienen un modelo maestro/esclavo, el dispositivo maestro se debe enlazar con el dispositivo esclavo y éste interpreta las instrucciones, por otra parte, puede el dispositivo maestro enlazar con múltiples dispositivos esclavos, pero debe estar sincronizados para recibir la información [78].

#### 1. UART (UniversalAsynchronousReceiverandTransmitter)

Es un protocolo de comunicación asincrónica en serie, utiliza dos cables, uno de transmisión y el otro de recepción de datos, los dispositivos utilizan un clock interno, y la velocidad es definida por el Baud Rate, la información es transmitida en forma de tramas. La comunicación UART puede ser simple, esto quiere decir, que los datos son enviados en una sola dirección, semidúplex en la que los datos

son enviados ambas direcciones, pero no al mismo tiempo, o dúplex en la que los datos son enviados en ambas direcciones y al mismo tiempo [78].

## 2. I2C (Inter-Integrated Circuit)

Es un protocolo en serie sincrónico, emplea una interfaz de dos cables para realizar todo el proceso, por lo general es una conexión de baja velocidad, entre un microcontrolador y los periféricos. Estos dos cables son el SDA (Serial Data) y SCL (Serial Clock), el SDA se encarga de transmitir datos y el SCL mantiene la sincronización con un Clock que lo provee el dispositivo maestro activo [78].

## 3. SPI (Serial Peripheral Interface)

Protocolo de comunicación sincrónica tiene dos líneas de comunicación, las dos líneas de datos permiten transmitir y recibir al mismo tiempo, en SPI, solo puede haber un dispositivo maestro y múltiples esclavos, solamente uno puede responder al dispositivo maestro [78].

Las líneas que este protocolo posee son:

- MOSI: Master Out Slave In (Envía datos a los esclavos, Tx para maestro, Rx para los esclavos).
- MISO: Master In Slave Out (Los esclavos responden al maestro por esta línea, Rx para maestro, Tx para esclavos).
- SCK: Serial Clock (clock provisto por el maestro).
- SS, Slave Select (utilizado para seleccionar el esclavo con el cual se comunica).

## 2.5. Protocolos de Comunicación MQTT

Es un protocolo de machine to machine, su estructura consiste en un publicador y suscriptor, de manera que el cliente se comunica con el servidor a través del puerto 1883 o TCP/IP, además el servidor o broker mantiene la comunicación abierta y se encarga del envío y recepción de datos [79]. Para la identificación de la información, el broker, tiene tópicos estableciendo una jerarquía, que permite

establecer la comunicación con el cliente y pueda publicar los mensajes y además permite que otros clientes puedan suscribirse.

Para que la comunicación se establezca es por una petición denominada CONNECT que es enviada por el cliente, la información que recibe el broker es un usuario y una contraseña, además el broker responde con una petición denominada CONNACK que indica la aceptación o negación de la comunicación.

Por otro lado, el cliente envía un mensaje PUBLISH, que contienen el tópico a publicar y los datos denominado PAYLOAD, mientras que los mensajes SUBSCRIBE y UNSUBSCRIBE son utilizados para la suscripción y de-suscripción del servidor.

### 2.5.1. Plataforma IoT Open source

Thingsboard permite crear paneles de IoT para la visualización de datos, procesamientos y el control remoto de dispositivos en tiempo real. Más de 30 widgets permiten crear paneles personalizados para usuarios finales para la mayoría de los casos de uso de IoT, funciona como un broker MQTT.

Para establecer comunicación con el broker es necesario enviarle una petición de tipo CONNECT, en la que tiene que ir incluido el access token asignado al dispositivo, el cual es un código alfanumérico que genera el propio Thingsboard al momento de crear el dispositivo y para realizar la suscripción, el payload en formato JSON y su tópico v1/devices/me/telemetry [80].

# Capítulo 3

## Diseño y Desarrollo

En este capítulo se detallará la selección de módulos incorporados en placa electrónica y el procedimiento que se realizó para el diseño e implementación de los 3 nodos sensores con la capacidad de captura de variables físicas y fisiológica con la capacidad de transmisión inalámbrica de datos a un nodo coordinador que se comunica con una plataforma IoT para la visualización de los datos capturados de la red inalámbrica implementada.

### 3.1. Red de sensores Implementada

Una vez conocida la importancia de la frecuencia cardíaca en el fútbol y las métricas que se puede determinar y como las tecnologías inalámbricas puede solucionar dicha problemática, se propone implementar una red de comunicación inalámbrica de área personal, que tiene como objetivo monitorear constantemente a los futbolistas durante las sesiones de entrenamiento, los parámetros a monitorear son la frecuencia cardíaca, esta variable fisiológica permite conocer el rendimiento deportivo del jugador y poder controlarlo, además se podrá conocer la posición del jugador dentro del área de juego y por último cuantificar su movimiento y determinar su aceleración, por otra parte, cada nodo sensor posee redundancia de datos gracias a la tarjeta microSD integrada, es decir, cada nodo sensor almacena de forma individual la información adquirida de los sensores.

A continuación, se detalla la red de sensores implementada, esta red usa

protocolo de comunicación inalámbrica ZigBee y está formado por 4 nodos: un nodo coordinador y tres nodos de sensores, donde cada nodo sensor transmite la información de los sensores incorporados en la placa electrónica, mediante radiofrecuencia en la banda de 2.4 Ghz.

Además, la topología inalámbrica implementada fue DigiMesh las ventajas de esta topología es que se reduce la distancia entre los nodos sensores y el nodo coordinado, por lo tanto, los datos enviados del jugador A pueden pasar por el jugador B y C hasta llegar al nodo coordinador minimizando las posibles pérdidas de información debido a interferencias o bloqueo físico entre los jugadores y el nodo coordinador.

Cabe mencionar que el coordinador tiene la capacidad de funcionar como un *gateway*, pasando de una red inalámbrica de área personal a una red inalámbrica de área local. Esto quiere decir que la data adquirida de los jugadores es reenviada por Wi-Fi al servidor Thingsboard, en el cual se los puede visualizar en línea en su página web con una computadora o en su aplicación del teléfono móvil y los jugadores son monitoreados desde la oficina del cuerpo técnico.

Por consiguiente, las gráficas visualizadas a través de la plataforma web IoT, son importantes para el entrenador o médico, ya que influyen en la toma de decisiones médicas y deportivas.

En la Figura 3.1 se observa la topología física de la WSN implementada para las sesiones de entrenamiento de los futbolistas.

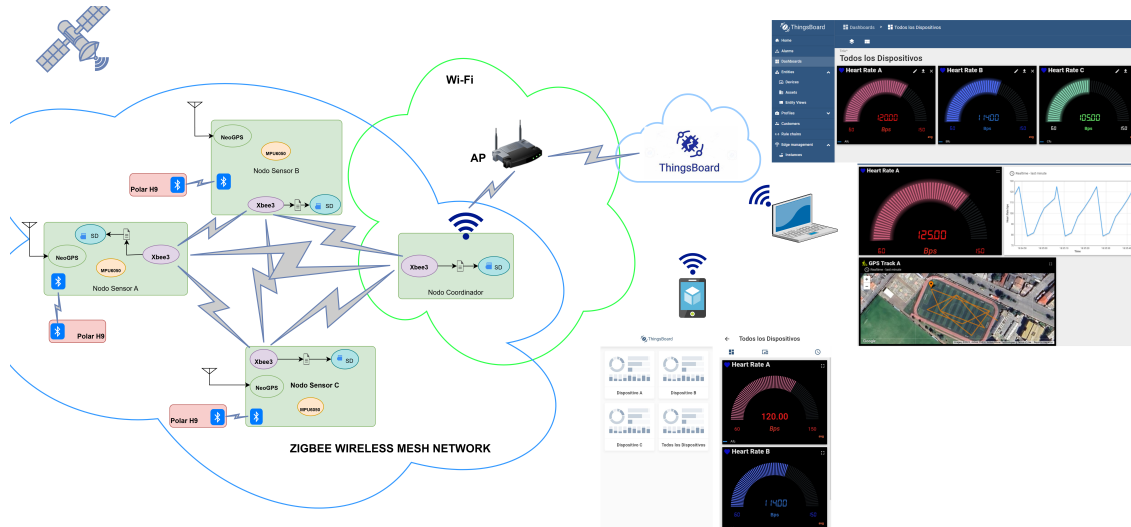


Figura 3.1: Red de sensores inalámbrica implementada [Fuente Autores].

## 3.2. Selección de dispositivos de la placa Desarrollada

### 3.2.1. Microcontrolador Esp32-s

Esp32-s es un SoC (System on a Chip), desarrollado por la empresa Espressif Systems, permite comunicación en serie con entrada para múltiples periféricos con conexión UART, I2C Y SPI, además permite conectividad inalámbrica Wi-Fi en la banda de 2.4 Ghz y Bluetooth ideal para la aplicación [81]. En la figura 3.2 se observa los pines de conexión para cada periférico.

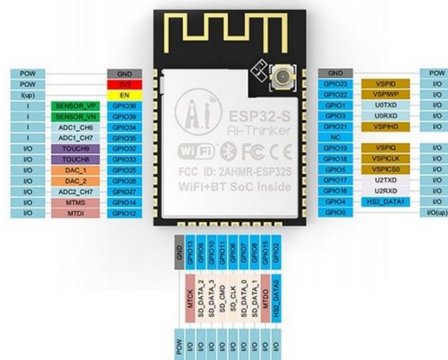


Figura 3.2: Esp 32 pines de configuración Fuente[<https://www.espressif.com/>]



También, tiene una capacidad de bus de 32 bits y proporciona una velocidad de procesamiento alta, entre otras características es un microcontrolador dual core lo que permite leer las variables y simultáneamente transmitir, además es un microcontrolador que permite integrar una memoria externa la que nos permite almacenar la información en cada nodo, por otro lado, es de bajo costo y bajo consumo de energía e ideal para el desarrollo de IoT (Internet de las cosas) [82]. En la figura 3.3 se observa la arquitectura.

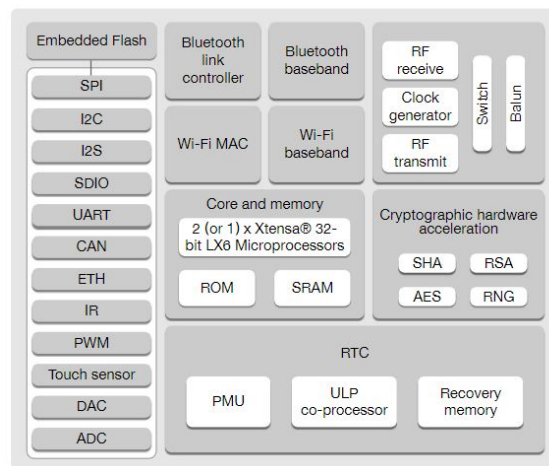


Figura 3.3: Arquitectura del Esp32 Fuente[<https://www.espressif.com/>].

La integración del Esp32 a diseño de la placa fue la principal elección, ya que al tener un sistema de tranceptor permite la comunicación inalámbrica entre el sensor de frecuencia cardiaca y la placa electrónica.

### 3.2.2. Módulo XBee 3

El módulo XBee 3 tiene como característica sobresaliente la de realizar redes de conexión punto a punto, punto a multipunto, broadcast y DigiMesh, su frecuencia de operación es 2.4 Ghz y su comunicación inalámbrica es de 1200 metros en campo abierto y 60 metros en interiores, además, permite la comunicación con el microcontrolador por comunicación serie UART [83].

En la figura 3.4 Se observa su forma y la antena incorporada.



Figura 3.4: Digi XBee 3 Fuente[<https://www.digikey.com/>].

DigiMesh es la topología de conexión exclusiva de los dispositivos Digi, la cual asegura que un mensaje transmitido llegue a su destino usando saltos entre dispositivos en la misma red. La red Zigbee creada posee su propio Personal Area Networks Identifier (PAN ID) la cual sirve como código de seguridad para unirse a la red.

### 3.2.3. Sensor inercial MPU6050

Según Sindhanaiselvi [84] menciona que un sensor inercial es un dispositivo estructurado con una masa y unos resortes, capaz de calcular aceleración lineal y velocidad angular, la combinación de la aceleración y del giroscopio permite determinar el movimiento de un cuerpo en las tres dimensiones (x, y, z).[20]

Con los 3 ejes ( $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ ) se calcula el módulo resultante del vector aceleración, para su cálculo se aplica la siguiente ecuación:

$$aT = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (3.1)$$

En la figura 3.5 se establece la comunicación I2C, se observa los pines utilizados para comunicarse con el microcontrolador.

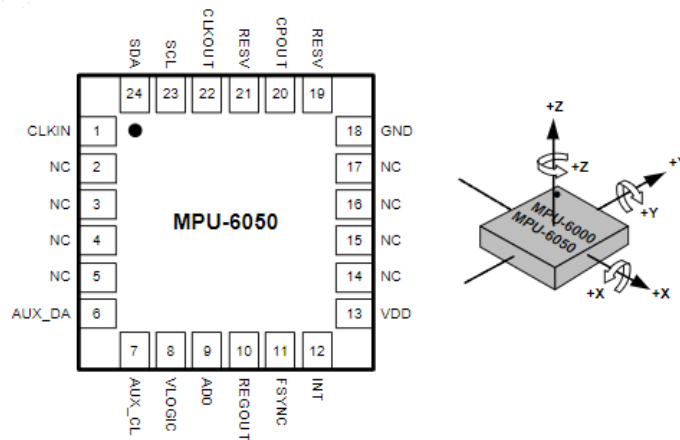


Figura 3.5: Chip MPU6050 [Fuente autores]

Su elección es para cuantificar el movimiento de los futbolistas y correlacionar con el módulo GPS.

### 3.2.4. Chip GPS-NEO-6M

El sistema de posición global conocido como GPS es un sistema de navegación que puede determinar la ubicación y dar seguimiento. Este chip puede funcionar como un rastreador y dar seguimiento, se eligió este chip, ya que posee una memoria EEPROM que permite almacenar las ubicaciones, su frecuencia de posicionamiento es de 5 Hz [85].

En la figura 3.6 se observa el esquema y conexión con el microcontrolador.

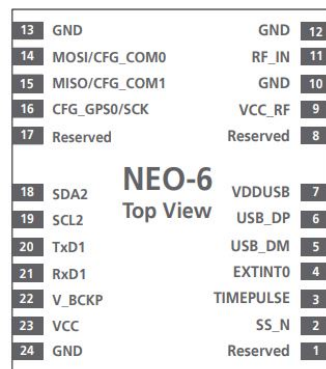


Figura 3.6: GPS NEO 6 Fuente[<https://www.u-blox.com/en/>]

### 3.2.5. Banda Polar H9

La banda polar h9 es un sensor de frecuencia cardíaca de calidad, permite comunicación inalámbrica Bluetooth y ANT+, lo que me permite comunicarse con el microcontrolador Esp32-s [86]. En la figura 3.7 se establece la comunicación I2C, se observa los pines utilizados para comunicarse con el microcontrolador.



Figura 3.7: Banda polar H9 Fuente[<https://www.polar.com/es>]

## 3.3. Configuración de los módulos XBee

Para la creación de la red ZigBee se establece 3 módulos XBee como encargados de enviar los datos de cada una de las placas y un cuarto XBee con el rol de coordinador, véase figura 3.8. A continuación se detalla cada paso que llevo para construir una red inalámbrica de sensores.

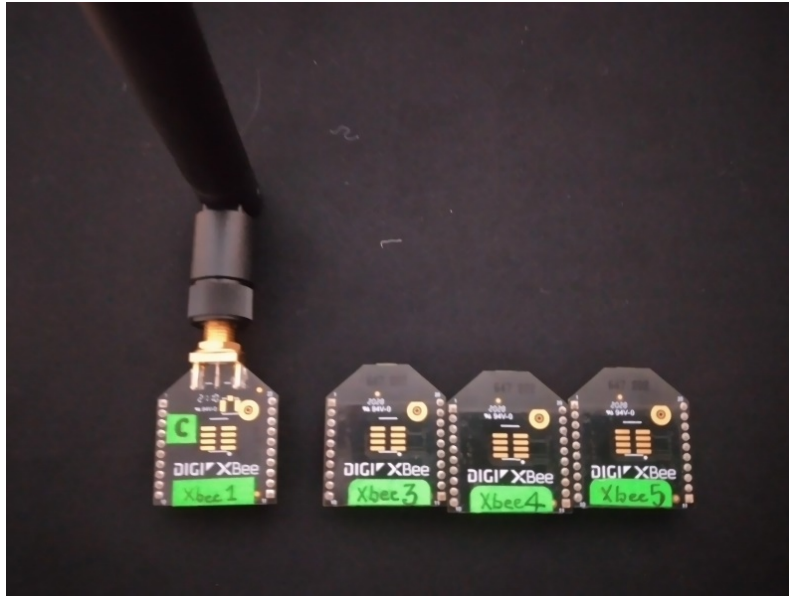


Figura 3.8: XBees usados para la creación de la red ZigBee [Fuente Autores].

Los parámetros para configurar con la herramienta XCTU son los siguientes para el coordinador:

- CE Device Role = Indirect smg Coordinator [1]
- ID Extended PAN ID = 2023
- NI Node Identifier = Xbee1
- API Enable = Transparent Mode [0]

Se conecta el coordinador a la pc y se ejecuta el software el XCTU, en la pantalla principal se selecciona “Discover devices”. En la figura 3.9 se observa el entorno de programación.

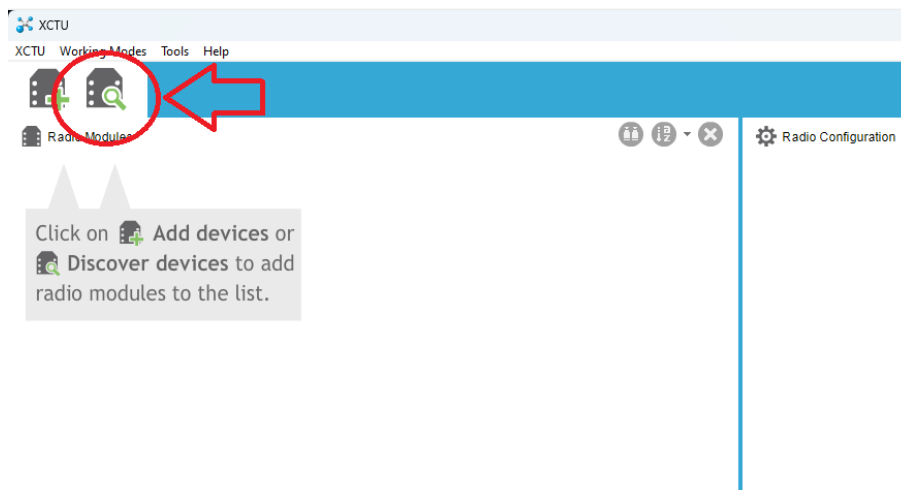


Figura 3.9: Discovery devices [Fuente Autores].

A continuación, en la figura 3.10 se observa la selección de puerto y se inicializa la búsqueda de dispositivos.

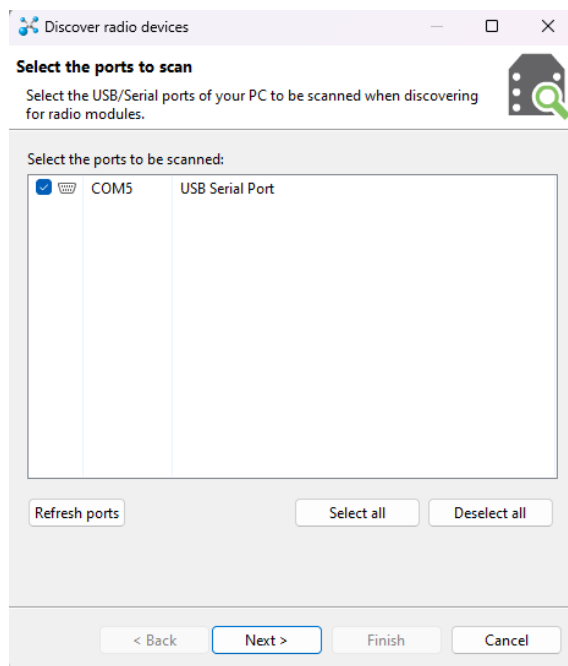


Figura 3.10: Selección del Puerto para escanear [Fuente Autores].

Se selecciona al dispositivo para acceder a sus configuraciones. En la figura 3.11 se observa los dispositivos en la red.

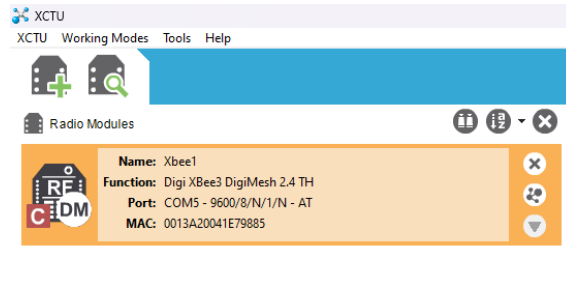


Figura 3.11: Dispositivo agregado [Fuente Autores].

En las configuraciones del XBee se carga el firmware “Digi XBee3 DigiMesh 2.4 TH” con la última versión disponible, véase la figura 3.12.

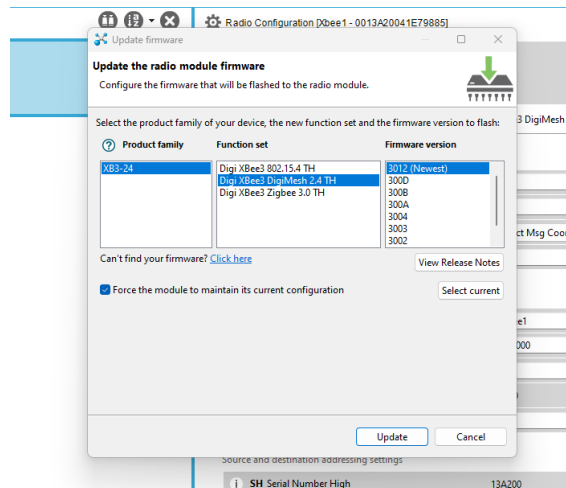


Figura 3.12: Update the radio module firmware [Fuente Autores].

En la figura 3.13 y 3.14 los parámetros del coordinador son los siguientes.

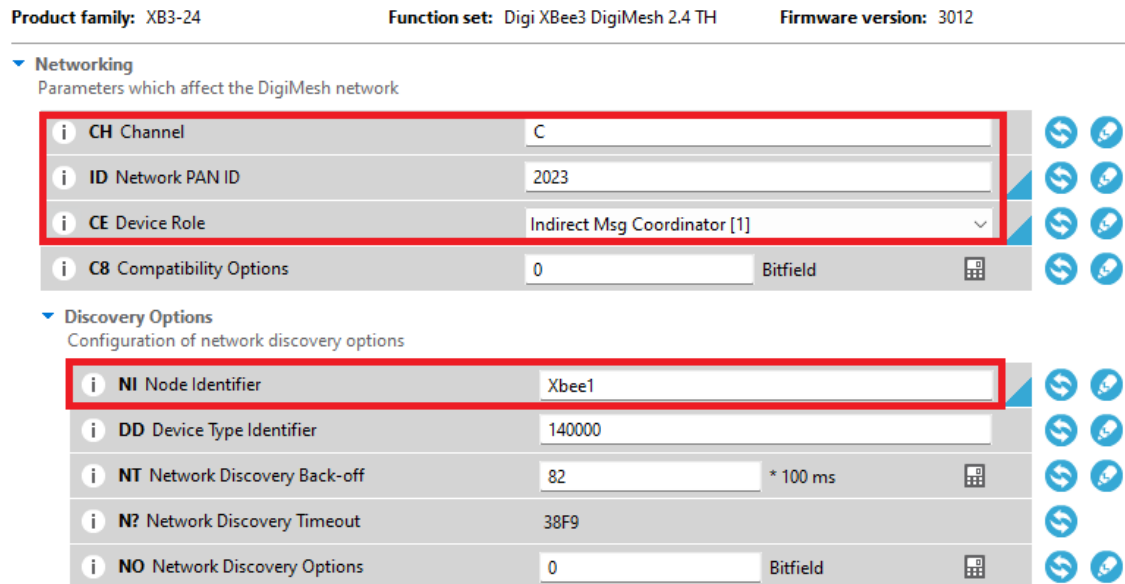


Figura 3.13: Configuración del canal, ID y del modo coordinador [Fuente Autores].

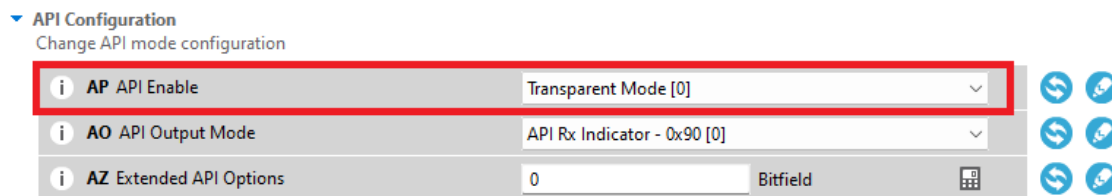


Figura 3.14: Configuración en modo transparente [Fuente Autores].

Para los tres dispositivos sensores se establece los siguientes parámetros. En la figura 3.15 se observa la configuración de los dispositivos router.

- CE Device Role = Standard Router [0]
- ID Extended PAN ID = 2023
- NI Node Identifier = Xbee3
- API Enable = Transparent Mode [0]



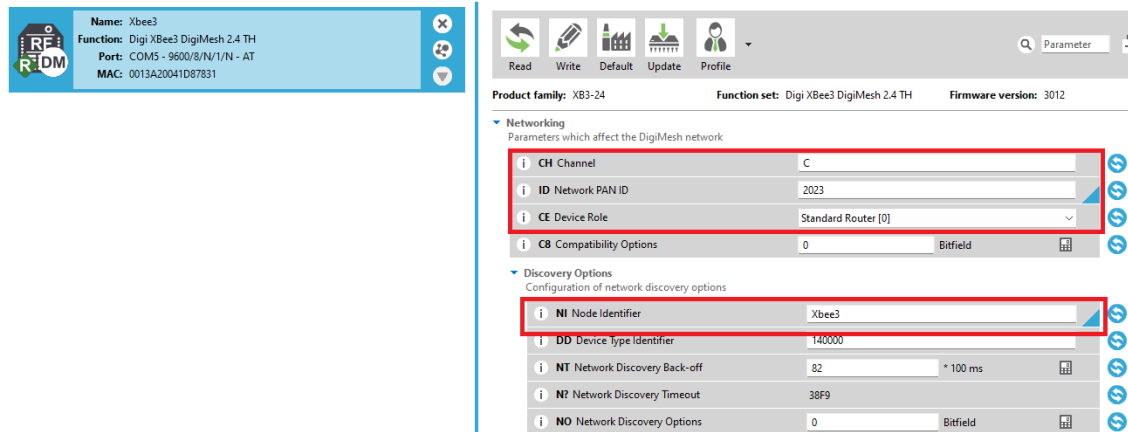


Figura 3.15: Configuración del canal, ID y del modo router en los nodos sensores [Fuente Autores].

En la figura 3.16 se puede observar la red ZigBee planteada, tiene la capacidad de autor restaurarse, esto quiere decir, en caso de algún nodo sufre un daño, busca caminos para enviar la información.

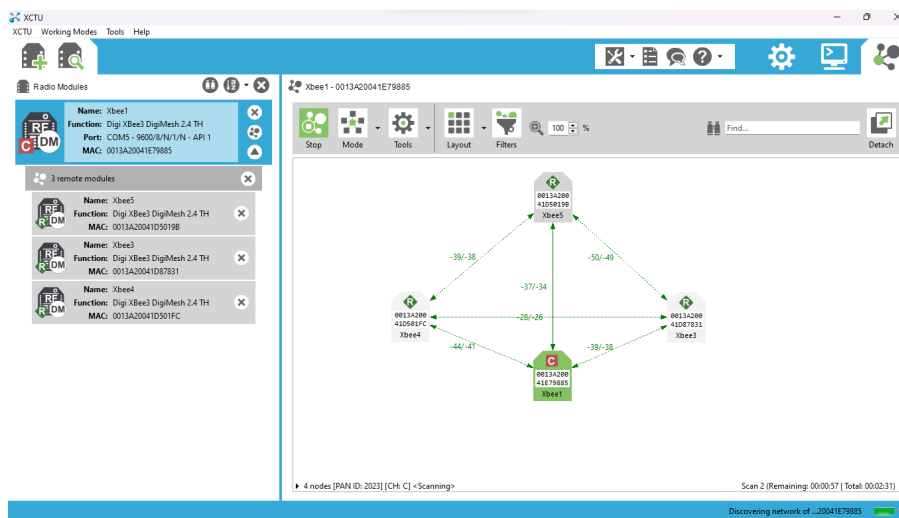


Figura 3.16: Verificación de los enlaces entre los nodos sensores y el nodo coordinador [Fuente Autores].

### 3.4. Configuración del entorno de programación

Para la configuración de los nodos (sensor y coordinador) se utilizó el IDE (integrated development environment), es un editor de código, compilador, depurador y constructor de interfaz gráfica (GUI).

El IDE de Arduino va a ser la herramienta de trabajo con el Esp32. En la figura 3.17 se observa la integración de las librerías para el reconocimiento de las tarjetas SoC Esp32. A continuación se detalla la instalación del módulo Esp32 en el IDE de arduino:

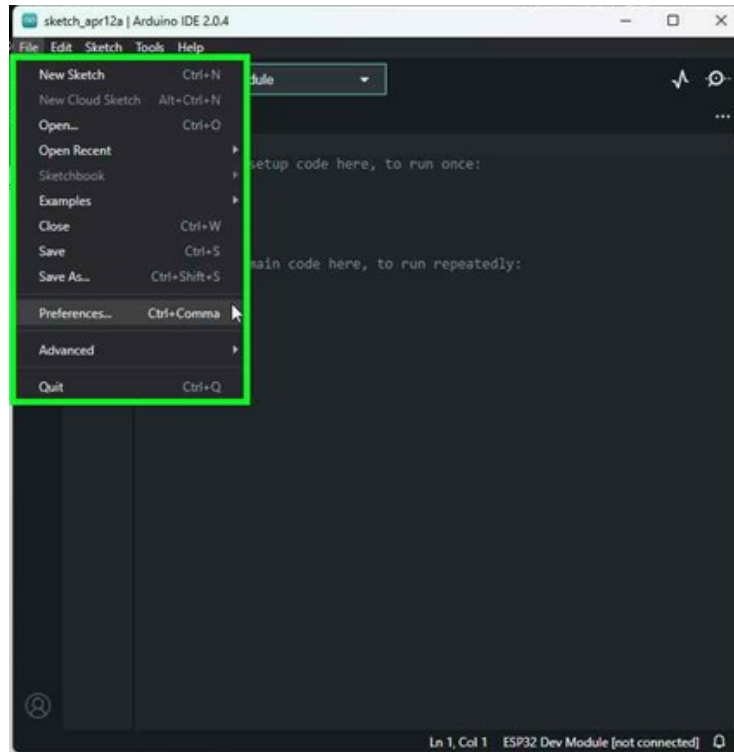


Figura 3.17: Menú preferences [Fuente Autores].

En el menú de preferences, en la figura 3.18 se observa el “Additional boards manager URLs” colocado los siguientes enlaces para agregar los módulos Esp32 al IDE de Arduino: [https://dl.espressif.com/dl/package\\_esp32\\_index.json](https://dl.espressif.com/dl/package_esp32_index.json)  
[https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh-pages/package\\_esp32\\_index.json](https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh-pages/package_esp32_index.json)      [https://resource.heltec.cn/download/package\\_heltec\\_esp32\\_index.json](https://resource.heltec.cn/download/package_heltec_esp32_index.json).

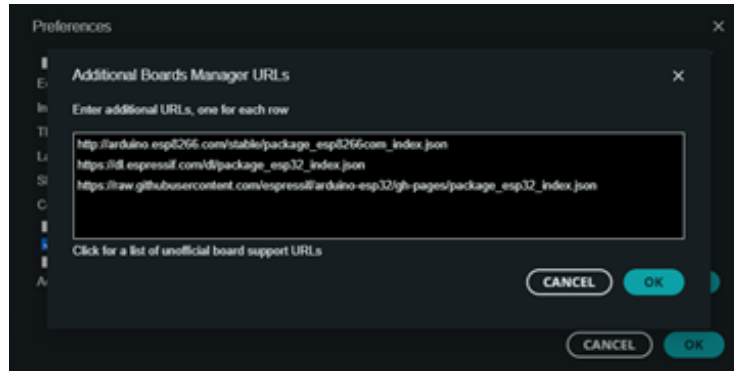


Figura 3.18: Additional boards manager URLs [Fuente Autores].

Se descarga la librería del Esp32, en la pantalla principal, en el menú de la izquierda se elige “Boards manager”, selecciona y descarga de Esp32 de Espressif Systems. En la figura 3.19 se observa la instalación.

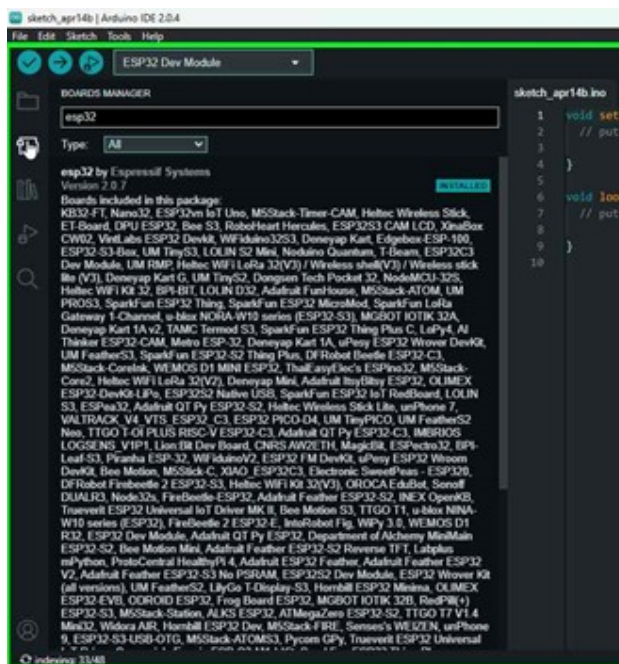


Figura 3.19: Librerías Esp32 [Fuente Autores].

Una vez ya instalado el board Esp32, se procede a seleccionar el módulo correspondiente Esp32 Dev Module.

### 3.5. Programación del nodo sensor

La lógica aplicada para cada nodo sensor, se observa en la figura 3.20 el diagrama de flujo del nodo sensor.

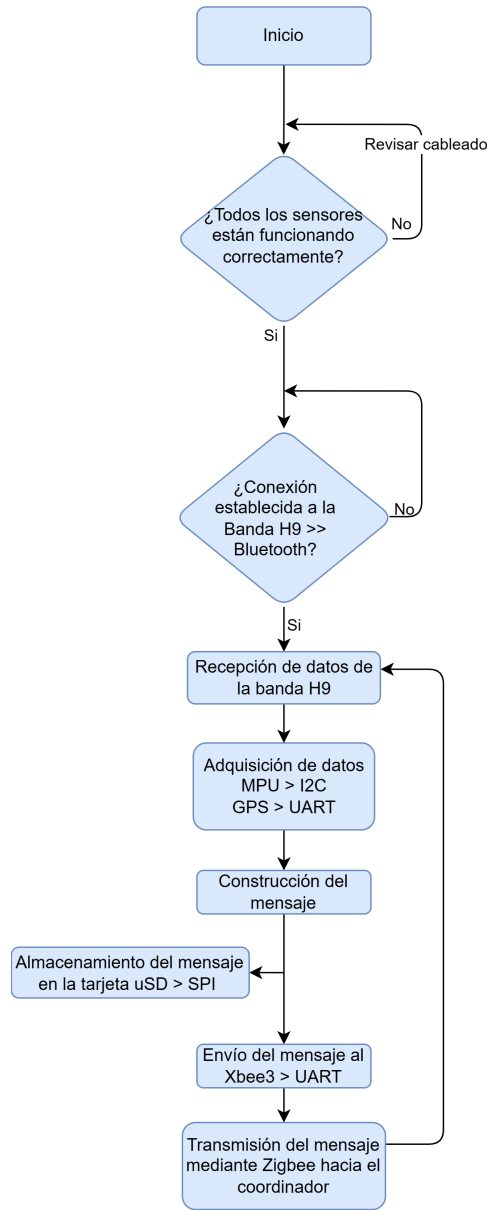


Figura 3.20: Lógica de programación del nodo sensor [Fuente Autores].

Se debe tomar en cuenta que esta parte se enfoca en la programación de los sensores (recolección de datos/señales de los módulos).

Cada sensor tiene su propio protocolo de comunicación especificada en la

sección anterior con el módulo Esp32, a continuación se realiza la programación independiente de cada sensor:

### 3.5.1. Comunicación Bluetooth con la banda polar H9

La banda es un sensor que proporcionan la solución perfecta para los entrenamientos deportivos, ya que se obtiene mediciones precisas de la frecuencia cardíaca. En la figura 3.21 se observa su protocolo de comunicación Bluetooth Low Energy, ideal para secciones largas de entrenamientos.



Figura 3.21: Protocolo de comunicación de la banda H9 Fuente[<https://www.bluetooth.com/>].

Para establecer la comunicación en el arduino IDE se direcciona a: Examples >Esp32 BLE Arduino >BLEclient. En la figura 3.22 se muestra el sketch que presenta una comunicación entre el cliente y el servidor (el cliente es el Esp32 y el servidor es la banda H9) y establece atributos propios del BLE.

```
// The remote service we wish to connect to.  
static BLEUUID serviceUUID("4fafc201-1fb5-459e-8fcc-c5c9c331914b");  
// The characteristic of the remote service we are interested in.  
static BLEUUID charUUID("beb5483e-36e1-4688-b7f5-ea07361b26a8");
```

Figura 3.22: Representación de los atributos de servidor y cliente [Fuente Autores].

Se presentan dos tipos de atributos, el primero UUID o Universally Unique Identifier, es un número de 16 bits, el cual representa el tipo de servicio. En caso de la banda H9 es el servicio Heart rate.

Para obtener el valor deseado del servicio, en la tabla 3.1 el número asignado del servicio en la documentación de Bluetooth es la siguiente: [www.bluetooth.com](http://www.bluetooth.com)

Tabla 3.1: Número de asignaciones de servicio [Fuente Autores].

Tipo de servicio	Valor
Glucose service	0x1808
Health Thermometer service	0x1809
Hearing Access service	0x1854
Heart Rate service	0x180D
HTTP Proxy service	0x1823
Human Interface Device service	0x1812

Se reemplaza el valor en el servicio:

- `serviceUUID(BLEUUID((uint16_t)0x180D));`

Para la característica se accede la sección 3.8 characteristics de la documentación de Bluetooth y en la tabla 3.2 se observa el número de las características correspondiente Heart Rate Measurement.

Tabla 3.2: Número de asignaciones de características [Fuente Autores].

Tipo de características	Valor
Glucose Measurement Context	0x2A34
Blood Pressure Measurement	0x2A35
Intermediate Cuff Pressure	0x2A36
Heart Rate Measurement	0x2A37
Body Sensor Location	0x2A38

Se reemplaza la característica:

- `charUUID(BLEUUID((uint16_t)0x2A37));`

En la figura 3.23 se observa el servicio y las características en el entorno IDE de arduino establecidas para la banda polar H9:

```
// The remote service we wish to connect to.
static BLEUUID serviceUUID(BLEUUID((uint16_t)0x180D));
// The characteristic of the remote service we are interested in.
static BLEUUID charUUID(BLEUUID((uint16_t)0x2A37));
```

Figura 3.23: Atributos Bluetooth para Heart rate [Fuente Autores].

A continuación se compila para verificar el programa, y se procede a carga el programa en el módulo Esp32 y con la banda h9 colocada en el torso, se procede abrir el monitor serie.

En las primeras impresiones del monitor, ver en la figura 3.24, se observa que se crea el cliente BLE para luego buscar el servicio que se especificó y que estaba en el documento de Bluetooth (Heart Rate service), al encontrar al servidor banda H9 imprime sus datos por defecto.

```
Starting Arduino BLE Client application...
BLE Advertiser found: Name: , Address: 14:75:0e:ae:02:ad, manufacturer data: 0600010920229ec0e8a15e71062ddad3163299381f222353a3947fb53e
BLE Advertiser found: Name: , Address: 14:75:0e:ae:02:ad, manufacturer data: 0600010920229ec0e8a15e71062ddad3163299381f222353a3947fb53e
BLE Advertiser found: Name: , Address: 14:75:0e:ae:02:ad, manufacturer data: 0600010920229ec0e8a15e71062ddad3163299381f222353a3947fb53e
BLE Advertiser found: Name: Polar H9 HCBA928, Address: ed:4d:f3:d1:2b:d5, manufacturer data: 6b002b0c645e, serviceUUID: 0000180d-0000-1000-8000-00805f9b34fb,
```

Figura 3.24: Características de la banda H9 compartidas a la placa [Fuente Autores].

Una vez encontrado el servicio se procede a establecer una conexión con el dispositivo server (la banda H9). En la figura 3.25 se observa la creación del cliente y la conexión con el server.

```
Forming a connection to ed:4d:f3:d1:2b:d5
- Created client
- Connected to server
```

Figura 3.25: Cliente creado (Placa) y conectado al servidor (H9) [Fuente Autores].

Una vez establecida la conexión, el cliente (Esp32) pide la característica establecida (Heart Rate Measurement 0x2A37). En la figura 3.26 se observa la obtención de los datos, pero no se observa el valor en números.

```
- Found our service
- Found our characteristic
We are now connected to the BLE Server.
Setting new characteristic value to "Time since boot: 4"
Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 4
data: [ ]
Setting new characteristic value to "Time since boot: 5"
Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 4
data: [ ]
Setting new characteristic value to "Time since boot: 6"
Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 6
data: [ ]
Setting new characteristic value to "Time since boot: 7"
Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 4
data: [ ]
Setting new characteristic value to "Time since boot: 8"
Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 6
```

Figura 3.26: Monitor Serial de la característica solicitada a la banda H9 (heart rate) [Fuente Autores].

Para corregir el dato, en la figura 3.27 del sketch en la parte inferior del código, se modifica la representación del dato.

```

BLE_client.ino
22 static void notifyCallback(
23   BLERemoteCharacteristic* pBLERemoteCharacteristic,
24   uint8_t* pData,
25   size_t length,
26   bool isNotify) {
27   Serial.print("Notify callback for characteristic ");
28   Serial.print(pBLERemoteCharacteristic->getUUID().toString().c_str());
29   Serial.print(" of data length ");
30   Serial.println(length);
31   Serial.print("data: ");
32   Serial.println((char*)pData);
}
    
```

Figura 3.27: Modificación del código del sketch [Fuente Autores].

Recordar que el dato recibido de la banda H9 es un entero de 8 bits (uint8), y el primer bit es el que está solicitando, por lo tanto, cambia la representación del dato. Siguiendo la documentación de Bluetooth, se añade la unidad del dato. En la figura 3.28 se observa la modificación.

```

22 static void notifyCallback(
23   BLERemoteCharacteristic* pBLERemoteCharacteristic,
24   uint8_t* pData,
25   size_t length,
26   bool isNotify) {
27   Serial.print("Notify callback for characteristic ");
28   Serial.print(pBLERemoteCharacteristic->getUUID().toString().c_str());
29   Serial.print(" of data length ");
30   Serial.println(length);
31   Serial.print("data: ");
32   Serial.print(pData[0]);
33   Serial.println(" bpm");
34 }
    
```

Figura 3.28: Modificación del código con la unidad [Fuente Autores].

Una vez establecido los parámetros correctos, se procede a cargar el programa. En la figura 3.29 se observa las mediciones que se hacen cada segundo.

```

21
Output Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM3')
14:03:20.344 -> Starting Arduino BLE Client application...
14:03:21.022 -> BLE Advertised Device found: Name: Polar H9 BBCBA928, Address: ed:4d:f3:d1:2b:d5, manufacturer data: 6b00
14:03:22.036 -> Forming a connection to ed:4d:f3:d1:2b:d5
14:03:22.036 -> - Created client
14:03:22.158 -> - Connected to server
14:03:23.845 -> - Found our service
14:03:23.845 -> - Found our characteristic
14:03:23.919 -> We are now connected to the BLE Server.
14:03:23.919 -> Setting new characteristic value to "Time since boot: 3"
14:03:24.303 -> Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 4
14:03:24.303 -> data: 79 bpm
14:03:24.949 -> Setting new characteristic value to "Time since boot: 4"
14:03:25.320 -> Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 6
14:03:25.320 -> data: 80 bpm
14:03:25.966 -> Setting new characteristic value to "Time since boot: 5"
14:03:26.293 -> Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 4
14:03:26.329 -> data: 80 bpm
14:03:27.046 -> Setting new characteristic value to "Time since boot: 6"
14:03:27.312 -> Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 4
14:03:27.312 -> data: 81 bpm
14:03:28.037 -> Setting new characteristic value to "Time since boot: 7"
14:03:28.341 -> Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 6
14:03:28.341 -> data: 82 bpm
14:03:29.098 -> Setting new characteristic value to "Time since boot: 8"
    
```

Figura 3.29: Monitor Serial de la placa con las modificaciones para la impresión del heart rate [Fuente Autores].



Por otra parte, el Bluetooth tiene un rango de distancia y al perder la señal envía una notificación. En la figura 3.30 se observa la siguiente notificación: lldpdugettxflushnb HCI packet count mismatch (0, 1).

```
BLE Advertised Device found: Name: Polar H9 BBCBA928, Address:
Forming a connection to ed:4d:f3:d1:2b:d5
- Created client
lldpdugettxflushnb HCI packet count mismatch (0, 1)
- Connected to server
```

Figura 3.30: Notificación de fuera de rango [Fuente Autores].

Una vez fuera de rango, el dispositivo servidor (H9) no puede restablecer la conexión. En la figura 3.31 se observa que no intenta restablecer la conexión.

```
Setting new characteristic value to "Time since boot: 9"
Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 4
data: 78 bpm
Setting new characteristic value to "Time since boot: 10"
Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 4
data: 77 bpm
Setting new characteristic value to "Time since boot: 11"
Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 4
data: 75 bpm
Setting new characteristic value to "Time since boot: 12"
Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 4
data: 74 bpm
Setting new characteristic value to "Time since boot: 13"
Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 6
data: 73 bpm
Setting new characteristic value to "Time since boot: 14"
Notify callback for characteristic 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb of data length 6
data: 74 bpm
Setting new characteristic value to "Time since boot: 15"
onDisconnect
```

Figura 3.31: Monitor serial ejecutando un error de comunicación [Fuente Autores].

Para que la banda polar H9 restablezca la conexión, mediante software es crear un reinicio del Esp32, que vuelve a buscar el servicio, establecer la conexión y pedir las mediciones. En la figura 3.32 se observa las modificaciones para reiniciar el Esp32 por software.

```
class MyClientCallback : public BLEClientCallbacks {
  void onConnect(BLEClient* pclient) {
  }

  void onDisconnect(BLEClient* pclient) {
    connected = false;
    Serial.println("onDisconnect");
    delay(5000); //Espera un tiempo para proceder con el reinicio del ESP32
    ESP.restart(); //REINICIO DEL ESP32
  }
};
```

Figura 3.32: Reinicio del Esp32 [Fuente Autores].

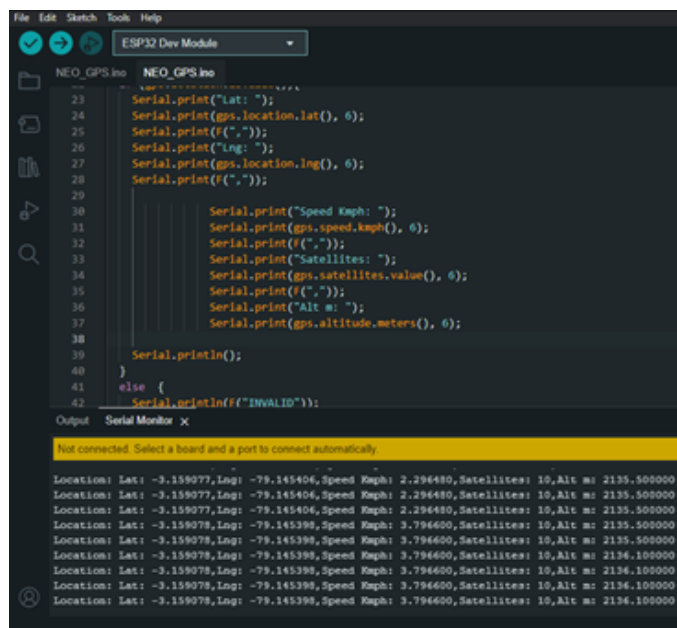
### 3.5.2. Comunicación UART con GPS NEO 6M

A continuación se establece la comunicación con el GPS, primero se direcciona Examples >TinyGPSPlus-Esp32 >BasicExample.

En el código se definen los pines de la conexión en el GPS y la velocidad de transmisión:

- RxPin = 18
- TxPin = 19
- GPSTx = 9600

Para la obtención de valores la antena debe estar conectada correctamente a la placa, una vez verificada, se compila y carga el código. En la figura 3.33 se observa las lecturas del GPS.



```
File Edit Sketch Tools Help
ESP32 Dev Module
NEO_GPS.ino NEO_GPS.ino
23 Serial.print("lat: ");
24 Serial.print(gps.location.lat(), 6);
25 Serial.print(",");
26 Serial.print("lng: ");
27 Serial.print(gps.location.lng(), 6);
28 Serial.print(",");
29
30 Serial.print("Speed Km/h: ");
31 Serial.print(gps.speed.kmph(), 6);
32 Serial.print(",");
33 Serial.print("Satellites: ");
34 Serial.print(gps.satellites.value(), 6);
35 Serial.print(",");
36 Serial.print("Alt m: ");
37 Serial.print(gps.altitude.meters(), 6);
38
39 Serial.println();
40 }
41 else {
42 Serial.println("INVALID");
Output Serial Monitor x
Not connected. Select a board and a port to connect automatically.
Location: Lat: -3.159077, Lng: -79.145406, Speed Km/h: 2.296480, Satellites: 10, Alt m: 2135.500000
Location: Lat: -3.159077, Lng: -79.145406, Speed Km/h: 2.296480, Satellites: 10, Alt m: 2135.500000
Location: Lat: -3.159078, Lng: -79.145398, Speed Km/h: 3.794600, Satellites: 10, Alt m: 2135.500000
Location: Lat: -3.159078, Lng: -79.145398, Speed Km/h: 3.794600, Satellites: 10, Alt m: 2135.500000
Location: Lat: -3.159078, Lng: -79.145398, Speed Km/h: 3.794600, Satellites: 10, Alt m: 2134.100000
Location: Lat: -3.159078, Lng: -79.145398, Speed Km/h: 3.794600, Satellites: 10, Alt m: 2134.100000
Location: Lat: -3.159078, Lng: -79.145398, Speed Km/h: 3.794600, Satellites: 10, Alt m: 2134.100000
Location: Lat: -3.159078, Lng: -79.145398, Speed Km/h: 3.794600, Satellites: 10, Alt m: 2134.100000
```

Figura 3.33: Monitor serial de la impresión de datos del GPS [Fuente Autores].

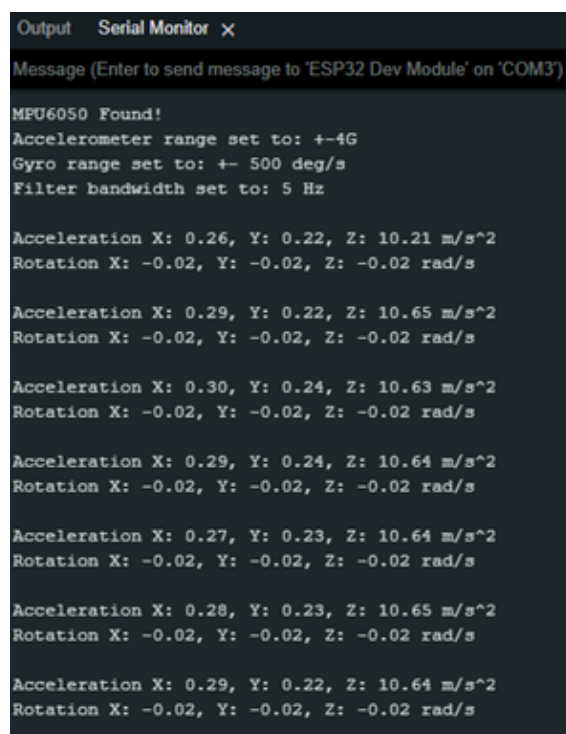
Consideraciones:

- La antena cerámica del módulo GPS es para exteriores.
- Al iniciar el módulo GPS, necesita unos minutos para buscar y sincronizarse con los satélites, para luego obtener los datos (latitud, longitud).

### 3.5.3. Comunicación I2C con MPU-6050

Para la configuración del sensor, se direcciona en el IDE a `Examples > AdafruitMPU6050 > basicreadings`. Se debe tomar en cuenta que el programa permite modificar ciertos parámetros a cerca de los rangos del acelerómetro, giroscopio y filtros de banda.

El código usado adquiere los valores del giroscopio y acelerómetro en los planos 'x', 'y' y 'z'. Una vez compilado el programa y cargado a la placa. En la figura 3.34 se obtiene lo siguiente:



```
Output Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM3')
MPU6050 Found!
Accelerometer range set to: +-4G
Gyro range set to: +- 500 deg/s
Filter bandwidth set to: 5 Hz

Acceleration X: 0.26, Y: 0.22, Z: 10.21 m/s^2
Rotation X: -0.02, Y: -0.02, Z: -0.02 rad/s

Acceleration X: 0.29, Y: 0.22, Z: 10.65 m/s^2
Rotation X: -0.02, Y: -0.02, Z: -0.02 rad/s

Acceleration X: 0.30, Y: 0.24, Z: 10.63 m/s^2
Rotation X: -0.02, Y: -0.02, Z: -0.02 rad/s

Acceleration X: 0.29, Y: 0.24, Z: 10.64 m/s^2
Rotation X: -0.02, Y: -0.02, Z: -0.02 rad/s

Acceleration X: 0.27, Y: 0.23, Z: 10.64 m/s^2
Rotation X: -0.02, Y: -0.02, Z: -0.02 rad/s

Acceleration X: 0.28, Y: 0.23, Z: 10.65 m/s^2
Rotation X: -0.02, Y: -0.02, Z: -0.02 rad/s

Acceleration X: 0.29, Y: 0.22, Z: 10.64 m/s^2
Rotation X: -0.02, Y: -0.02, Z: -0.02 rad/s
```

Figura 3.34: Monitor serial del código para el sensor MPU6050 [Fuente Autores].

Los valores presentados equivalen al sensor en estado estático, idealmente los valores del giroscopio deben ser cero en todos los planos.

Por lo que es necesario la calibración del sensor, además cada sensor tiene su offset, por lo que se deberá ajustar independientemente.

Realizado los cambios en el código para calibrar las mediciones en estado estático de la placa. En la figura 3.35 se observa las lecturas ideales.

```

basic_readings.ino  basic_readings.ino
96   Serial.print("Acceleration X: ");
97   Serial.print(a.acceleration.x*0.30);
98   Serial.print(", Y: ");
99   Serial.print(a.acceleration.y*0.22);
100  Serial.print(", Z: ");
101  Serial.print(a.acceleration.z*0.81);
102  Serial.println(" m/s^2");
103
104  Serial.print("Rotation X: ");
105  Serial.print(g.gyro.x*0.02);
106  Serial.print(", Y: ");
107  Serial.print(g.gyro.y*0.02);
108  Serial.print(", Z: ");
109  Serial.print((g.gyro.z)+0.02);
110  Serial.println(" rad/s");
***
Output  Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'CO
Rotation X: -0.00, Y: 0.00, Z: 0.00 rad/s
Acceleration X: -0.01, Y: -0.00, Z: 9.80 m/s^2
Rotation X: -0.00, Y: 0.00, Z: 0.00 rad/s
Acceleration X: -0.01, Y: 0.00, Z: 9.80 m/s^2
Rotation X: -0.00, Y: 0.00, Z: -0.00 rad/s
Acceleration X: -0.01, Y: -0.00, Z: 9.80 m/s^2
Rotation X: -0.00, Y: 0.00, Z: 0.00 rad/s
Acceleration X: -0.01, Y: -0.01, Z: 9.80 m/s^2
Rotation X: -0.00, Y: 0.00, Z: 0.00 rad/s

```

Figura 3.35: Calibración del sensor mpu6050 [Fuente Autores].

### 3.5.4. Comunicación SPI con micro SD card

Para empezar, la tarjeta microSD debe ser formato FAT32, una vez seleccionado el formato, se procede a direccionar a Examples >SD (Esp32) >SD Test, se inserta la microSD (8 GB) en la placa, se compila y carga el programa. En la figura 3.36 se observa que reconoce a la memoria SD.

```

Output  Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Modu
SD Card Type: SDHC
SD Card Size: 7388MB
Listing directory: /
DIR : /System Volume Information
FILE: /test.txt SIZE: 1048576
FILE: /foo.txt SIZE: 13
Creating Dir: /mydir
Dir created
Listing directory: /
DIR : /System Volume Information
FILE: /test.txt SIZE: 1048576
FILE: /foo.txt SIZE: 13
DIR : /mydir
Removing Dir: /mydir
Dir removed
Listing directory: /

```

Figura 3.36: Monitor serial de las características de la tarjeta microSD insertada en la placa [Fuente Autores].

### 3.6. Programación del nodo Coordinador.

La lógica aplicada para la el nodo coordinador, se observa en la figura 3.37 el diagrama de flujo del nodo coordinador.

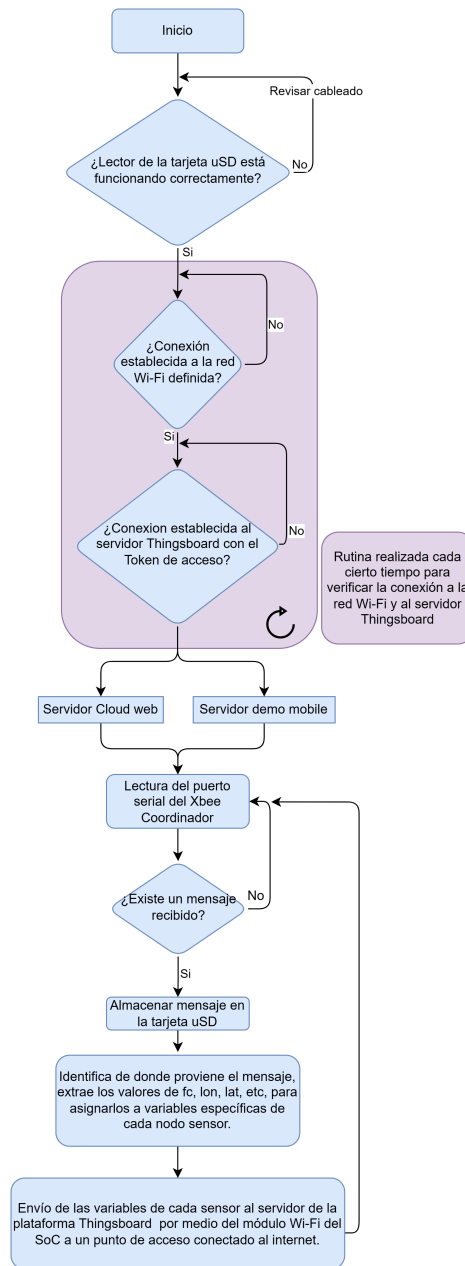


Figura 3.37: Lógica de programación nodo coordinador [Fuente Autores].

El módulo XBee del coordinador usa la interfaz UART. En la figura 3.38 se observa la inicializa del puerto serial de la placa.

```
// ++++++ VOID SETUP inicio ++++++
void setup() {
  Serial.begin(9600); // Inicio de conexión serial con el módulo xbee3 coordinador
  delay(1000);
}
```

Figura 3.38: Inicialización de la interfaz UART[Fuente Autores].

A continuación escucha si hay nodos sensores transmitiendo información, además se establece la velocidad de transmisión en baudios, en la figura 3.39 se observa los parámetros.

```
void loop() {
  if (Serial.available() > 0){
    Serial.print("Zigbee incoming... ");
    RecivedData = Serial.readString(); //Lectura del mensaje recibido por parte del xbee coordinador
    Serial.println(RecivedData);
  }
}
```

Figura 3.39: Probabilidad de información recibida [Fuente Autores].

Una vez detectada la información transmitidas por los nodos. En la figura 3.40 se puede observar el formato.

```
Zigbee incoming... 1111,120,-2.885130,-78.989197,-2.398,2.643,-2.950,0.309,0.998,-0.279
```

Figura 3.40: Mensaje recibido por el XBee coordinador [Fuente Autores].

El formato es el siguiente: “Identificador, HeartRate, Latitud, Longitud, giroscopioEjeX, giroscopioEjeY, giroscopioEjeZ, acelerometroEjeX, acelerometroEjeY, acelerometroEjeZ”.

Por lo tanto, una vez establecido el identificador se reconoce de qué nodo proviene la información. En la figura 3.41 se observa la separación del formato string.

```
//Luego de identificar el inicio del mensaje de cada nodo sensor se prosigue a separar el resto de datos de mensaje,
//cada dato esta separado por una coma (,)
//La función indexOf() nos ayuda a localizar un caracter o caracteres en formato String dentro de otro String
//Al saber donde empieza el mensaje lo siguiente es identificar los separadores (,) de datos e ir almacenando cada uno en una variable diferente
int i11 = RecivedData.indexOf(',', i1111+5); //Primer dato identificado equivalente a la frecuencia cardiaca del nodo sensor A
int i12 = RecivedData.indexOf(',', i11+1); //Segundo dato identificado equivalente a la latitud del nodo sensor A
int i13 = RecivedData.indexOf(',', i12+1); //Tercer dato identificado equivalente a la longitud del nodo sensor A
int i14 = RecivedData.indexOf(',', i13+1); //Resto del mensaje identificado que sera almacenado temporalmente en una variable del nodo sensor A
String firstValue1 = RecivedData.substring(i1111+5, i11); //Primer dato separado equivalente a la frecuencia cardiaca del nodo sensor A
String secondValue1 = RecivedData.substring(i11 + 1, i12); //Segundo dato separado equivalente a la latitud del nodo sensor A
String thirdValue1 = RecivedData.substring(i12 + 1, i13); //Tercer dato separado equivalente a la longitud del nodo sensor A
String fourthValue1 = RecivedData.substring(i13 + 1, i14); //Resto del separado que sera almacenado temporalmente en la variable del nodo sensor A
```

Figura 3.41: Separación de string [Fuente Autores].

Una vez separados, los datos se transforman en números enteros y flotantes previos a su envío a la plataforma.

- Entero Fc (frecuencia cardiaca)

- Flotante Lat (latitud)
- Flotante Long (longitud)
- Flotante Long (Aceleración x, y, z)

Para concluir se tiene los valores separados y almacenados en variables, adecuado para ser transmitidos a la plataforma en formato json.

### 3.6.1. Protocolo MQTT y Plataforma IoT Thingsboard

En esta parte el dispositivo pasa ser un gateway esto quiere decir que se comunica mediante protocolo MQTT a una red de área extensa. Por lo que el dispositivo debe estar conectado a una red Wi-Fi. En la figura 3.42 se observa las credenciales Wi-Fi.

```
constexpr char WIFI_SSID[] = "SayMyName";           //Nombre de la red wifi a la cual nos vamos a conectar
constexpr char WIFI_PASSWORD[] = "boliche1984";    //Contraseña de la red wifi a la cual nos vamos a conectar
```

Figura 3.42: Credenciales de la red Wi-Fi [Fuente Autores].

Para establecer la comunicación MQTT se define el servidor de la plataforma thingboard que es el siguiente demo.thingsboard.io y se crea un dispositivo que define un Token. Además, define el tamaño del mensaje y del puerto de comunicación TCP/IP. En la figura 3.43 se observa las credenciales para establecer la comunicación con la plataforma Thingsboard.

```
//OPCION UNO CLOUD WEB
constexpr char TOKEN[] = "NM0C4tHhg5NUvBXGwZvd";    //Token de identificación para el enlace con la plataforma Thingsboard
constexpr char THINGSBOARD_SERVER[] = "thingsboard.cloud"; //Servidor cloud web al cual se conecta con la plataforma Thingsboard
//OPCION DOS MOBILE APP
constexpr char TOKEN[] = "44afvp1l8zjci5t3o6pf";    //Token de identificación para el enlace mobile app con la plataforma Thingsboard
constexpr char THINGSBOARD_SERVER[] = "demo.thingsboard.io"; //Servidor mobile app al cual se conecta con la plataforma Thingsboard

constexpr uint16_t THINGSBOARD_PORT = 1883U;       //Puerto MQTT usado para comunicarse con el servidor, 1883 por defecto
constexpr uint32_t MAX_MESSAGE_SIZE = 256U;        //Máximo tamaño de paquetes que serán enviados o recibidos por parte del cliente MQTT, si el tamaño
                                                    //del mensaje es pequeño corre el riesgo de ser ignorado
constexpr uint32_t SERIAL_DEBUG_BAUD = 115200U;    //Baud rate para debugging de la conexión serial
WifiClient wifiClient;                             //Wifi establecer conexión con el cliente
ThingsBoard tb(wifiClient, MAX_MESSAGE_SIZE);       //Inicio del Thingsboard con el máximo de tamaño para el buffer
bool subscribed = false;                           //Estado para la suscripción rcp
constexpr int16_t telemetrySendInterval = 2000U;    //Constante para la telemetría
uint32_t previousDataSend;                          //Constante para almacenar el "tiempo" (milis) para enviar cada intervalo
// ***** LIBRERIAS, VARIABLES, CONSTANTES *****
```

Figura 3.43: Credenciales MQTT [Fuente Autores].

### 3.7. Comunicación con plataforma IoT para la visualización de datos

Para la conexión del nodo coordinador con la plataforma Thingsboard, se accede a la guía.

En la figura 3.44 se observa la selección del dispositivo microcontrolador “Esp32 Dev Kit V1”.

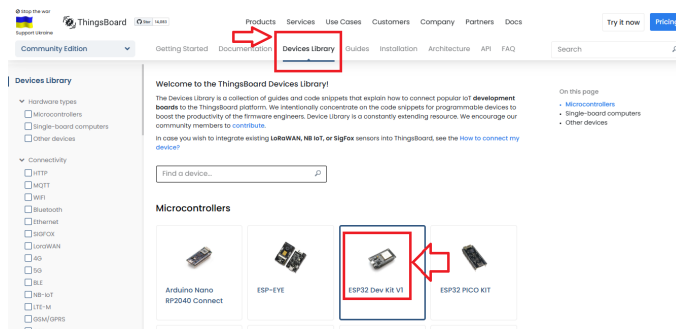


Figura 3.44: Selección del microcontrolador [Fuente Autores].

Una vez seleccionado el microcontrolador, se accede a la página de la plataforma, <https://thingsboard.cloud/> se crea una cuenta. En la figura 3.45 se puede observar en la parte izquierda el acceso al menú principal, para añadir un dispositivo nuevo, la ruta es Entities >Devices >Add device.

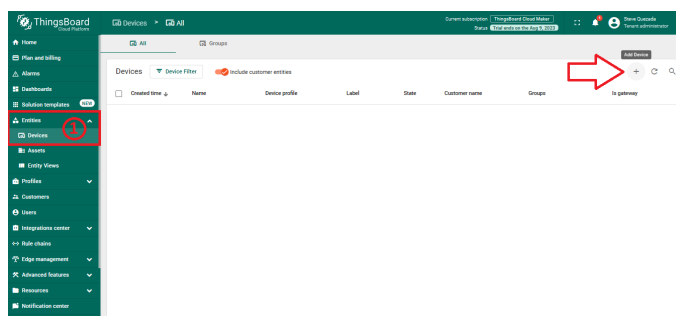


Figura 3.45: Agregar dispositivos [Fuente Autores].

Se agrega un nombre al dispositivo y la plataforma da un token de acceso, implementado en el gateway. En la figura 3.46 se observa el valor por asignado.



### 3.7. COMUNICACIÓN CON PLATAFORMA IOT PARA LA VISUALIZACIÓN DE DATOS61

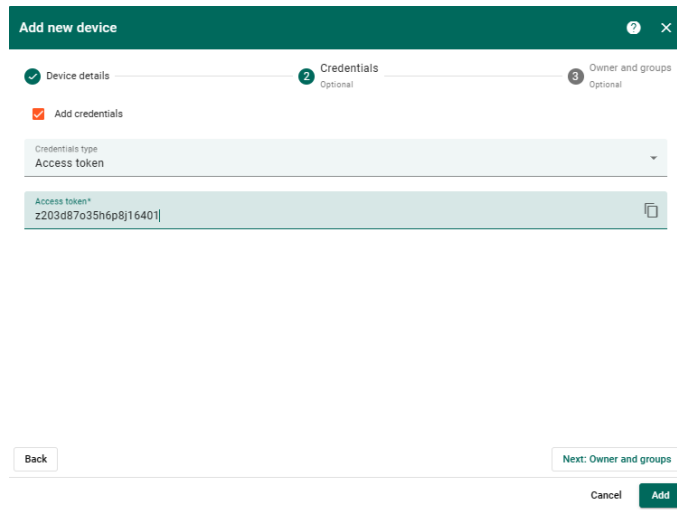


Figura 3.46: Token [Fuente Autores].

Para crear la comunicación con el servidor, en la tabla 3.3 se puede observar la información solicitada.

Estable una comunicación con una red wi-fi y luego establece la comunicación con el servidor de la plataforma thingsboard.cloud mediante el puerto MQTT.

Tabla 3.3: Credenciales MQTT [Fuente Autores]

Nombre de la variable	Valor por defecto
Wi-Fi_SSID	YOUR_WIFI_SSID
Wi-Fi_PASSWORD	YOUR_WIFI_PASSWORD
TOKEN	YOUR_DEVICE_ACCESS_TOKEN
THINGSBOARD_SERVER	thingsboard.cloud
THINGSBOARD_PORT	1883U
MAX_MESSAGE_SIZE	256U
SERIAL_DEBUG_BAUD	1883U

Una vez establecida la conexión mediante el protocolo MQTT, se accede a la siguiente ruta Attributes o Latest telemetry en la figura 3.47 se observa los valores e información recibida por la plataforma.

### 3.7. COMUNICACIÓN CON PLATAFORMA IOT PARA LA VISUALIZACIÓN DE DATOS<sup>62</sup>

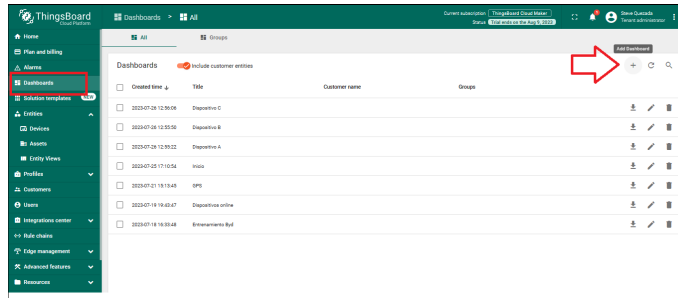


Figura 3.47: Datos recibidos en la plataforma [Fuente Autores].

Para una mejor visualización de los datos se genera un Dashboard. En el menú principal dashboards >add dashboard >create new dashboard. En la figura 3.48 se observa los datos en un dashboard de todos los dispositivos trabajando simultáneamente.

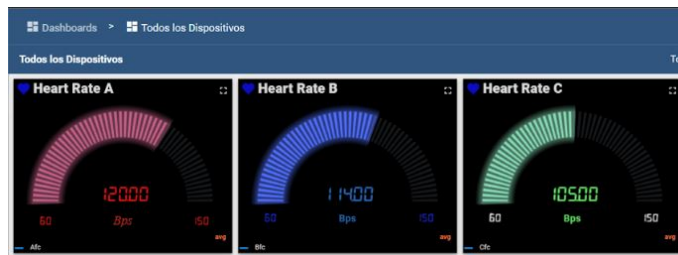


Figura 3.48: Visualizaciones de datos en un dashboard de la frecuencia cardiaca [Fuente Autores].

En la siguiente figura 3.49 se puede observar los parámetros de cada Nodo.

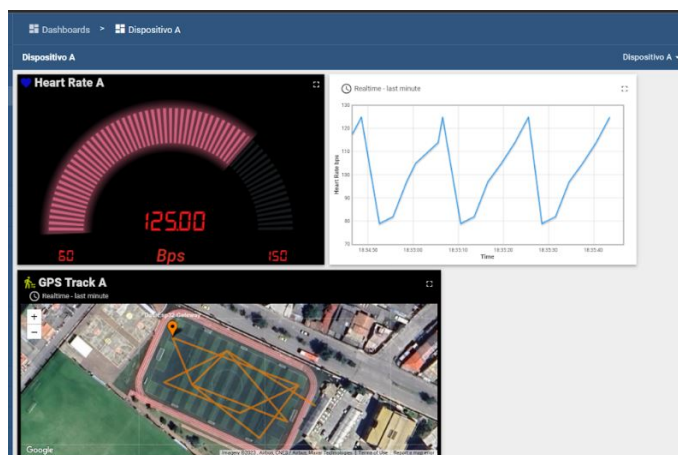


Figura 3.49: Visualizaciones de datos de cada Nodo [Fuente Autores].

### 3.8. Diseño de la placa electrónica

El diseño propuesto es una placa electrónica que incorpora como unidad principal el SoC Esp32-s y un chip IMU y un módulo de geo posicionamiento, dichos módulos utilizan las interfaces I2C y UART respectivamente para comunicarse físicamente y para la incorporación del sensor de frecuencia cardíaca los datos son recibidos por comunicación inalámbrica Bluetooth.

Además, la tarjeta electrónica consta de una ranura que permite introducir una tarjeta micro SD y almacenar los datos recolectados por los sensores, por consiguiente para su comunicación física usa la interfaz SPI del SoC.

También la placa cuenta con un circuito programador automático y para su alimentación consta con un circuito regulador de voltaje y un circuito que permite almacenar la energía en la batería.

Por último, el Esp32-s se comunica a través de la interfaz UART con un módulo XBee de comunicación inalámbrica de larga distancia, el cual permite transmitir las variables a un nodo coordinador.

Una vez definido las interfaces de comunicación con cada elemento, se procede al desarrollo del diseño, para la elaboración se utilizó el software Altium Designer, primero se estructura los esquemáticos de cada circuito, y por consiguiente procede al ruteo de las pistas en la Pcb y como último paso a la fabricación de la placa electrónica. En la figura 3.50 se puede observar la distribución de las rutas que conectan a cada elemento.

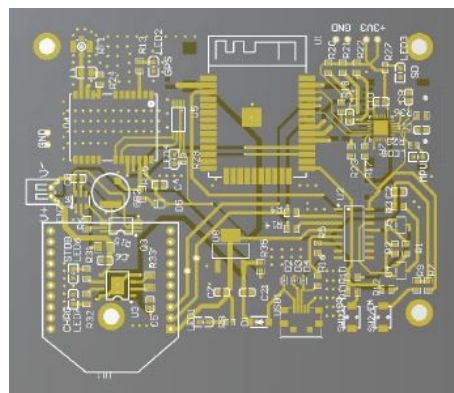


Figura 3.50: Diseño Pcb [Fuente Autores].

### 3.9. Implementación del nodo sensor

El nodo sensor consta de la placa diseñada que se alimenta por una batería recargable de doble celda de 7.4 voltios aproximadamente y con un consumo de corriente de 1800 mAh, esta energía se distribuye directamente a un regulador de 3.3 voltios y mantiene el voltaje constante para cada elemento, la ventaja de usar la batería descrita es que proporcionar la energía suficiente para transmitir al nodo coordinador por un tiempo prolongado, por otro lado, el nodo sensor cuenta con una banda polar H9 que trasmite los datos por Bluetooth al SoC de la placa.

El objetivo del nodo sensor es el constante monitoreo de los futbolistas, la posición dentro del terreno de juego, la cuantificación del movimiento y su frecuencia cardiaca, estos datos son transmitidos al nodo coordinador para su posterior análisis.

En la figura. 3.51 se observa todos los elementos que conforman un nodo sensor.

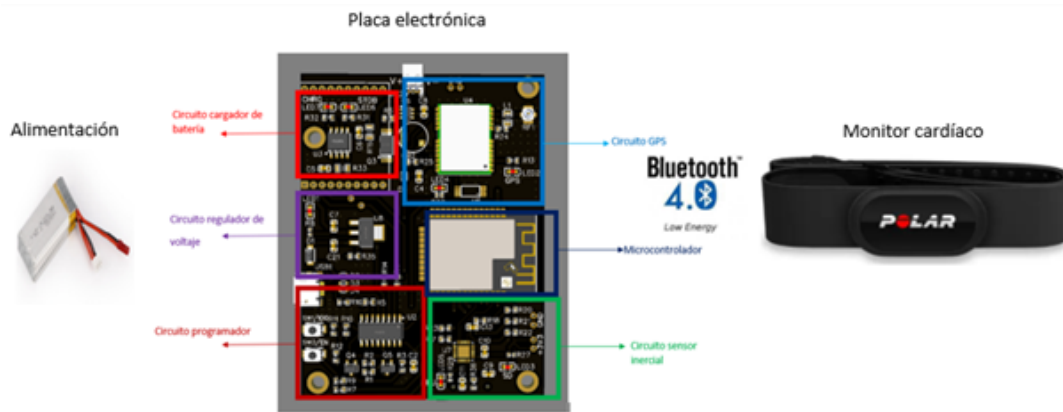


Figura 3.51: Nodo sensor para la red ZigBee [Fuente Autores].

### 3.10. Implementación del nodo coordinador

Para la implementación se consideró utilizar la misma tarjeta electrónica y usar el SoC Esp32-s, el módulo de comunicación XBee y la ranura microSD para almacenar los datos recibidos por los nodos sensores, además se incorporó una antena externa direccional. En la figura 3.52 se puede observar el nodo coordinador.



Figura 3.52: Nodo Coordinador para la red ZigBee [Fuente Autores].

El objetivo del nodo coordinador es recibir la información transmitida por el nodo coordinador e identificar de qué nodo procede dichos datos y además el nodo coordinador tiene la capacidad de establecer la comunicación con la plataforma Thingsboard.

### 3.11. Diseño de prototipo de carcasa para los nodos

Para el diseño se utilizó el software inventor, en el proceso de la carcasa se consideró un material ligero denominado PLA o ácido polilácteo, para que los deportistas puedan moverse con libertad y desarrollar su máximo potencial, las dimensiones de la carcasa es de 8.2 cm X 6.3 cm X 2.4 cm, también se consideró ranuras para la colocación de la antena, que permite hacer la comunicación con los satélites y la ranura de XBee permite la comunicación con el nodo coordinador y una ranura para la tarjeta microSD que permite el almacenamiento de datos. En la figura 3.53 se observa la forma y sus ranuras correspondientes.



Figura 3.53: Diseño de prototipo de carcasa [Fuente Autores].

Mediante una impresora 3D se procede a la impresión del prototipo y al armado final de cada nodo. En la figura 3.54 se observa el prototipo final y funcional.

<https://www.overleaf.com/project/61d45ec3fc54e598ca8b8501>



Figura 3.54: Nodo sensor [Fuente Autores].

En conclusión, la tarjeta es de doble cara y la distribución de los elementos antes descritos se ubicaron en la parte frontal y posterior y así reducir el espacio de la tarjeta para que sea pequeña para porta en los chalecos.

En la figura 3.55 se observa la distribución de los componentes electrónicos en la placa.

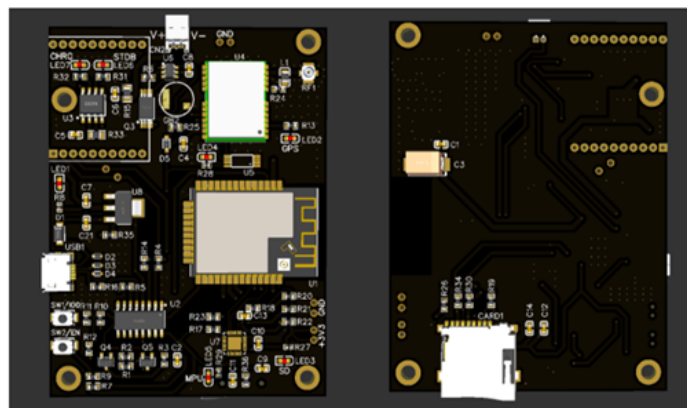


Figura 3.55: Diseño de placa electrónica [Fuente Autores].

# Capítulo 4

## Análisis y Resultados

### 4.1. Análisis de Resultados

El grupo de investigación en Telecomunicaciones y Telemática de la Universidad Politécnica Salesiana entregó los elementos para realizar una prueba experimental para la validación del sistema inalámbrico. En la figura 4.1 se observa los elementos utilizados para las pruebas (chalecos, bandas h9 y nodos sensores).



Figura 4.1: Equipamiento [Fuente Autores].

Para analizar el dispositivo se incluyeron pruebas físicas propuestas por el laboratorio físico de la universidad Politécnica Salesiana. En la figura 4.2 se observa a los participantes.





Figura 4.2: Participantes [Fuente Autores].

La primera prueba consiste en evaluar el funcionamiento de la tarjeta electrónica diseñada, además verificar el funcionamiento de sus sensores incorporados en una sesión de entrenamiento.

En la figura 4.3 corresponde a la frecuencia cardiaca durante la sesión de entrenamiento.

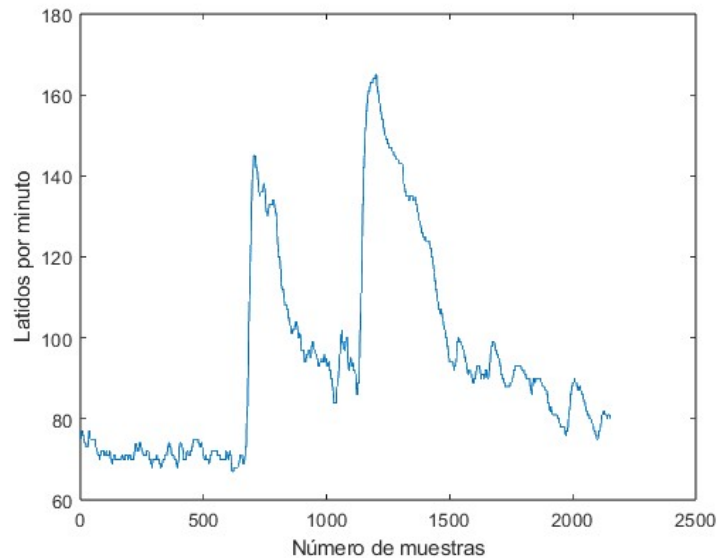


Figura 4.3: Frecuencia cardiaca durante sesión de entrenamientos [Fuente Autores].

En el caso del GPS va a depender de la frecuencia de muestreo para mejorar



la precisión, a continuación en la figura 4.4 corresponde a los datos obtenidos por los satélites en la que se muestra la trayectoria.



Figura 4.4: Recorrido obtenido por el módulo GPS [Fuente Autores].

Y por último, la verificación de funcionamiento del giroscopio y del acelerómetro.

En la figura 4.5 los valores representan la velocidad de rotación alrededor de cada uno de estos ejes, con los datos se puede determinar la velocidad a la que un objeto se está moviendo o girando en un entorno 3D.

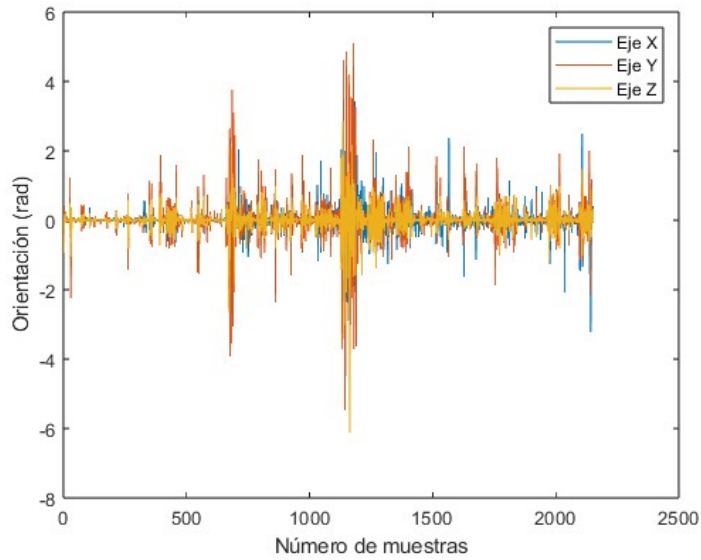


Figura 4.5: Datos del giroscopio integrado [Fuente Autores].

En la figura 4.6 los siguientes valores representan la aceleración en los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y se expresan en unidades de gravedad ( $g$ ), con los datos se puede cuantificar el movimiento y determinar aceleraciones, velocidades, fuerza de impacto y posiciones de los jugadores.

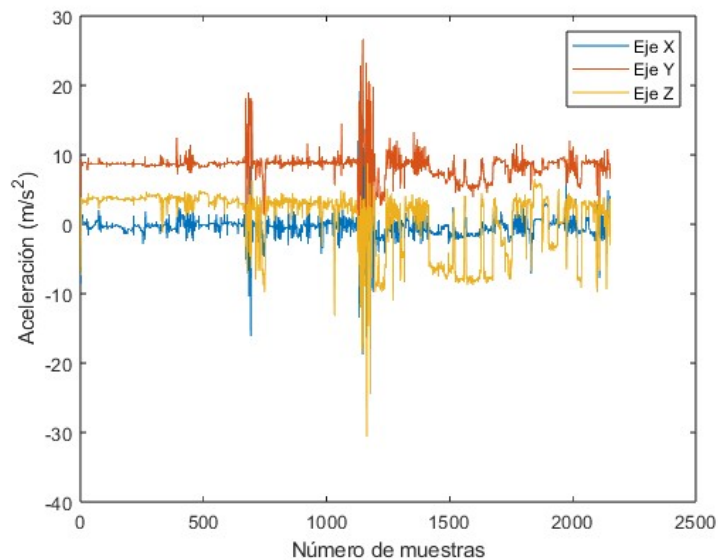


Figura 4.6: Datos del acelerómetro integrado [Fuente Autores].

Una vez comprobado el funcionamiento correcto de todos los sensores

incorporados en la placa electrónica, se procede evaluar la potencia de trasmisión en función de las distancias y de la recopilación de paquetes trasmitados y recibidos, para la evaluación se utilizó el rango de test incorporado en el XCTU.

Se considera 3 distancias para la evaluación.

En la figura 4.7 se observa la ubicación distancia entre el nodo coordinador y nodo sensor a 72 metros aproximados.



Figura 4.7: Ubicación de nodos a 72 metros [Fuente Autores].

El RSSI (Received Signal Strength Indicator) indica el nivel de potencia con que se recibieron los datos, se mide en dBm. Un valor negativo mayor en dBm indica una señal más débil. Por lo tanto, en la figura 4.8 se observa una señal de -75 dBm considerada excelente y un cien por ciento de paquetes trasmitados y recibidos.

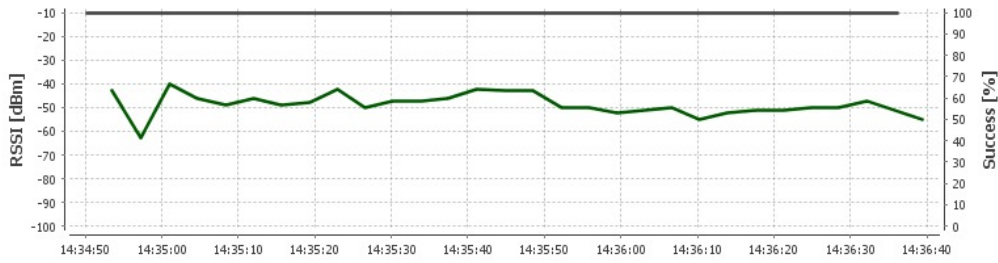


Figura 4.8: RSSI de paquetes a 72 metros [Fuente Autores].

En la figura 4.9 se observa la ubicación distancia entre el nodo coordinador y nodo sensor a 106 metros aproximados.

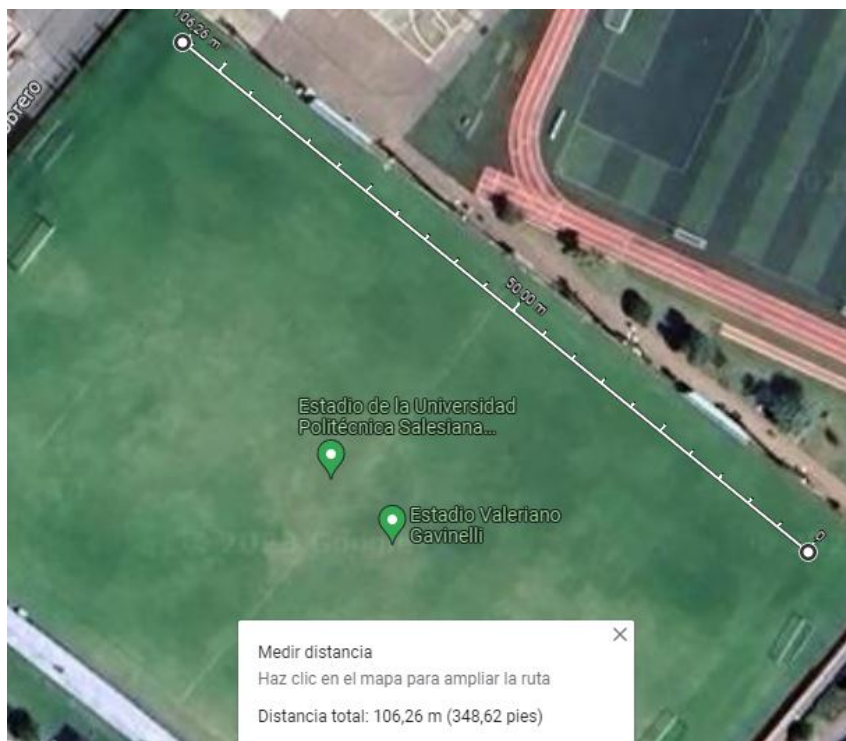


Figura 4.9: Ubicación de nodos a 106 metros [Fuente Autores].

En la figura 4.10 se observa una señal de -80 dBm lo que indica que la señal se debilita, sin embargo, existe un cien por ciento de paquetes transmitidos y recibidos.

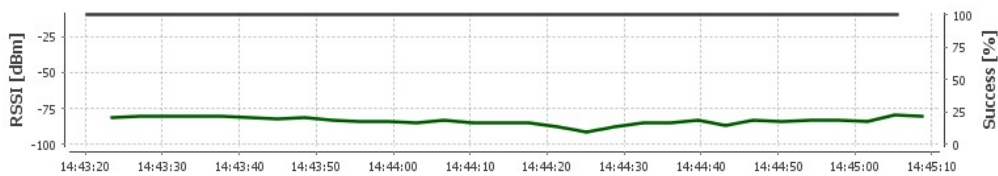


Figura 4.10: RSSI de paquetes a 106 metros [Fuente Autores].

En la figura 4.11 se observa la ubicación distancia entre el nodo coordinador y nodo sensor a 125 metros aproximados.



Figura 4.11: Ubicación de nodos a 125 metros [Fuente Autores].

En la figura 4.12 se observa una señal de -87 dBm lo que indica que la señal se debilita, sin embargo, existe un cien por ciento de paquetes transmitidos y recibidos.

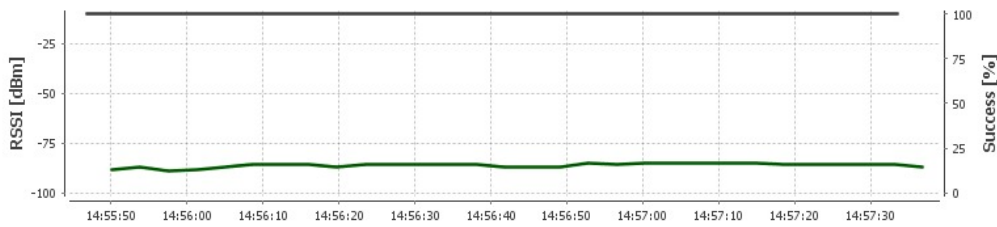


Figura 4.12: RSSI de paquetes a 125 metros [Fuente Autores].

Cabe resaltar que va a depender de las características técnicas de la antena del nodo coordinador.

Para la tercera prueba se evalúa la topología de red para verificar su fiabilidad de transmisión de datos, por lo que se implementó una topología estrella sin ningún obstáculo y se procede a comprobar los datos recibidos y transmitido en función de la distancia. En la figura 4.13 se observa los datos de los sensores y se determina que al aumentar la distancia existe una mayor pérdida de información en los datos recibidos.

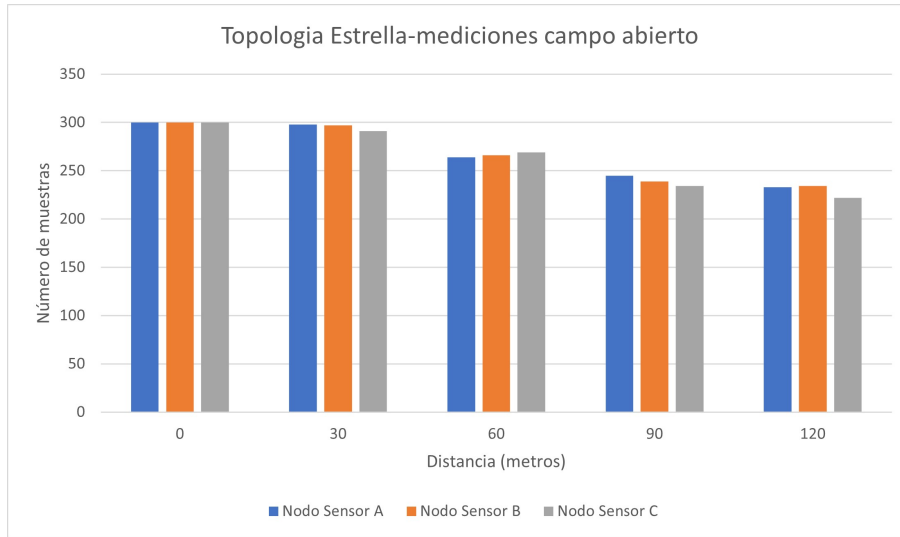


Figura 4.13: Cantidad de muestras recolectadas en la topología estrella en campo abierto [Fuente Autores].

Se implementó una topología estrella con jugadores dentro del área de prueba. En la figura 4.14 se observa que al aumentar la distancia y al tener obstáculos entre los sensores emisores y el receptor existe un aumento de muestras perdidas con referencia a la prueba anterior.

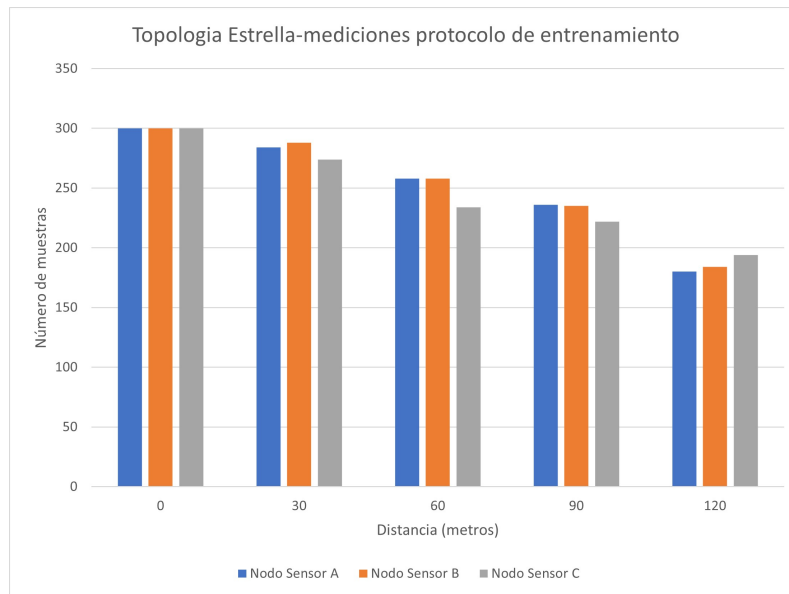


Figura 4.14: Cantidad de muestras recolectadas en la topología estrella con obstáculos [Fuente Autores].

Se vuelven a realizar las mismas pruebas, pero con la topología DigMesh, los

resultados son presentados en las figuras 4.15 y 4.16, se aprecia mejora considerable en cuanto a la trasmisión y recepción de información, esto es gracias a la topología. Si un nodo emisor no detecta al nodo receptor, el mensaje pasa por nodos adyacentes hasta llegar al nodo receptor, es decir, busca otro camino a su destino, asegurando que el mensaje sea recibido aún con la presencia de interferencia directa entre emisor y receptor, por ende resuelve el problema de la pérdida de información por la distancia y obstáculos presentes [fuente autores].

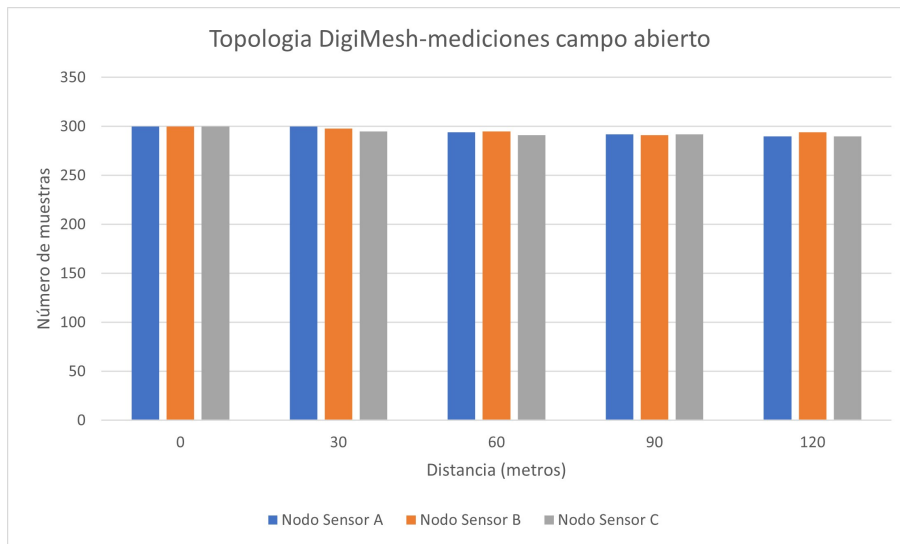


Figura 4.15: Cantidad de muestras recolectadas en la topología DigiMesh en campo abierto[Fuente Autores].



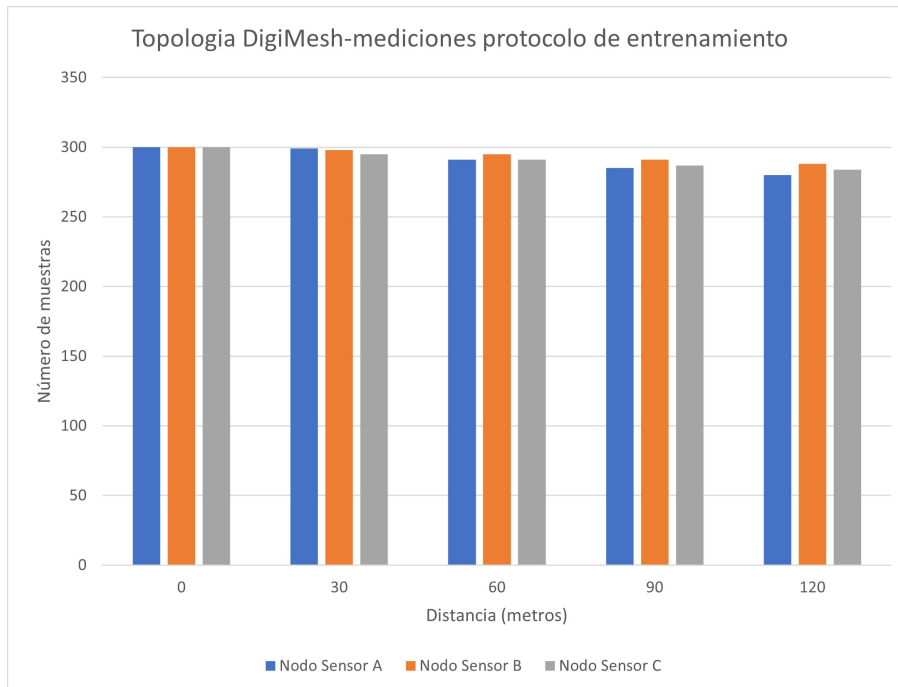


Figura 4.16: Cantidad de muestras recolectadas en la topología DigiMesh con obstáculos [Fuente Autores].

En la figura 4.17 se observa la fiabilidad del sistema, se promediaron las muestra obtenidas por cada distancia y se comparan con las muestras almacenadas en la tarjeta de memoria microSD.



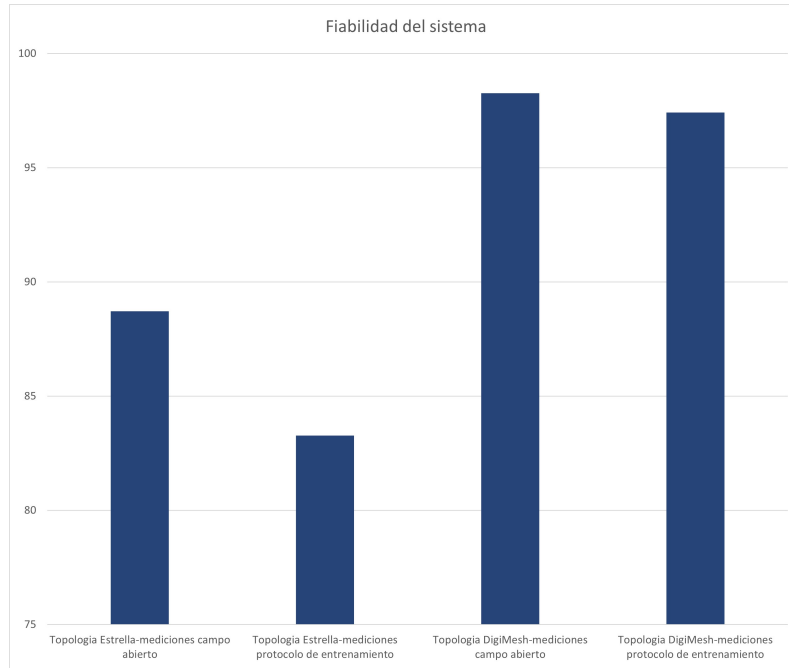


Figura 4.17: Promedio de muestras recibidas de las diferentes pruebas de topologías [Fuente Autores].

Las pruebas experimentales se demostró baja perdida de datos, sin embargo, la topología DigiMesh demuestra ser más robusta para la aplicación y tiene la mayor fiabilidad en cuanto a transmisión de información en diferentes distancias. En la tabla 4.1 se obtiene los promedios de datos de las diferentes pruebas de topología.

Tabla 4.1: Pruebas de fiabilidad del sistema [Fuente autores].

Tipo de topología	Tipo de prueba	Fiabilidad %
Topología Estrella	campo abierto	88,711
Topología Estrella	protocolo de entrenamiento	83,266
Topología DigiMesh	campo abierto	98,266
Topología DigiMesh	protocolo de entrenamiento	97,422

# Capítulo 5

## Conclusiones y Trabajos Futuros

### 5.1. Conclusiones

El SoC, módulos, chips y componentes que conforman la placa electrónica fueron seleccionados debido a sus características de bajo consumo de potencia, adquisición de datos, precio accesible y tamaño, la última mencionada ayuda en la reducción total del tamaño final de la placa electrónica.

La placa electrónica al ser genérica puede trabajar como Nodo Sensor o Nodo Coordinador, la placa tiene la posibilidad de extender el rango de la comunicación inalámbrica con antenas externas que ocupan mayor consumo de energía, pero se soluciona gracias a que se puede alimentar directo a una computadora o un tomacorriente mediante un cable USB. Existen diferentes IDE´s para su programación debido a que la placa electrónica es de código abierto. La viabilidad de poder conectarse al internet brinda la facilidad de visualizar la información de manera virtual desde cualquier parte.

Se eligió ZigBee como tecnología para la comunicación inalámbrica de información, ya que garantizan transmisión de datos en grandes distancias, soporta un gran número de nodos en una misma red y DigiMesh como topología implementada por los saltos que hace el mensaje enviado a través de los demás nodos para asegurar que el mensaje llegue al coordinador.

El diseño propuesto del sistema electrónico satisface las necesidades de adquisición de variables física y fisiológicas, además del envío de información

mediante un protocolo de comunicación inalámbrica seleccionado. Posee características sobresalientes tales como la convergencia tecnológica de protocolos de comunicación hacia el SoC, escalable, bajo consumo de potencia, bajo costo y la posibilidad de elegir el modo de la transmisión inalámbrica de datos. El diseño físico de los nodos sensores (carcasa PLA incluida) es conveniente para el usuario, ya que su tamaño ofrece ser fácil de transportar y no incomodar al usarlo. También, para la visualización de datos se utilizó una aplicación de código abierto denominada Thingsboard, está funciona mediante el protocolo de comunicación MQTT en la que se publican los datos, cabe destacar que está es mas eficiente que el protocolo de comunicación HTTP, ya que es full-duplex.

La confiabilidad del sistema garantiza información vital para la toma de decisiones con base en las variables adquiridas por los sensores, decisiones como: las estrategias de juego, rendimiento del jugador, posición dentro del campo de juego, cuantificación de movimiento, intensidad del esfuerzo físico, diagnóstico de enfermedades cardiovasculares, capacidad cardio respiratoria durante y para mejorar protocolos de entrenamiento.

## 5.2. Recomendaciones

- Considerar en el diseño de la placa electrónica un circuito cargador de baterías de doble celda.
- Considerar las características técnicas de la antena del coordinador.
- Considerar las actualizaciones de firmware del SoC.
- El chip de acelerómetro y giroscopio de 3 ejes debe ser calibrado en la programación individualmente (por cada placa electrónica) antes de su uso.
- La tecnología al estar en constante evolución en un futuro se puede cambiar los módulos / chips de la placa electrónica y disminuir aún más su tamaño.
- Los datos recibidos del giroscopio y acelerómetro aún están por trabajar, se necesita un post-procesamiento de los mismos.

- Creación de un software exclusivo de la red creada para la visualización y post-procesamiento de la información recibida.
- Durante los entrenamientos es posible que la banda Polar H9 (colocada en el torso del jugador) pueda perder contacto directo, por lo que los datos pueden ser erróneos.
- El módulo GPS posee un rango de error entre mediciones de 1.5 metros y tarda un tiempo estimado entre 1 y 2 minutos para encontrar la señal de los satélites, además de ser de uso solo para exteriores.

### **5.3. Trabajos futuros**

Para trabajos futuros, mejoras en el diseño del hardware de los nodos sensores, implementación de un servicio web dedicado a uso exclusivo del sistema electrónico, optimización en la transmisión inalámbrica de información, la posibilidad de seguir agregando más sensores al hardware.

# Glosario

**ACK** Acknowledgment.

**AES** Advance Encryption Standard.

**AP** Access Point.

**APS** Application Support Sublayer.

**ATP** Adenosín Trifosfato.

**ATT** Attribute protocol.

**BLE** Bluetooth Low Energy.

**BPM** Beat per Minute.

**CCA** Clear Channel Assessment.

**DECT** Digital Enhanced Cordless Telecommunications.

**ED** Energy detection.

**EEPROM** Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory.

**FC** Frecuencia Cardíaca.

**FCmax** Frecuencia Cardíaca Máxima.

**FCR** Frecuencia cardiaca en reposo.

**FFD** Full Function Device.

**FIFA** Federation Internationale de Football Association.

**GAP** Generic Access Profile.

**GATT** Generic Attribute Profile.

**GFSK** Gaussian Frequency Shift Keying.

**GPS** Global Position System.

**HbO<sub>2</sub>** Oxihemoglobina.

**HCI** Host Controller Interface.

**HTTP** Hypertext Transfer Protocol.

**I<sup>2</sup>C** Inter-Integrated Circuit.

**ICP** Información y tecnología de comunicación.

**IoT** Internet of Things.

**IP** Internet Protocol.

**IrDA** Infrared Data Association.

**ISM** Industrial, Scientific Medical.

**L2CA** Logical Link Control Y Adaptation Protocol.

**LL** Link Layer .

**LPWAN** Low Power Wide Area Networks.

**LQI** link quality indicator.

**MAC** Media Access Control.

**MIC** Message Integrity Code.

**MISO** Master In Slave Out .

**MOSI** Master Out Slave In .

**MQTT** Message Queuing Telemetry Transport.

**NAN** Neighborhood Area Network.

**NFC** Near Field Communication.

**NIST** National Institute of Standards and Technology.

**NLDE** Network Layer Data Entity .

**NLME** Network Layer Management Entity.

**NWK** Network Layer.

**O2** Oxygen.

**PAN** Personal Area Network .

**PD** Data request.

**PDU** Protocol Data Unit.

**PHY** Physical Layer.

**PLME** Physical Layer Management Entity.

**PPDU** Physical Layer Protocol Data Unit.

**RAM** Random Access Memory.

**RFD** Reduce Funtion Device.

**ROM** Read Only Memory.

**SAP** Service Access Point.

**SCK** Serial Clock .

**SCL** Serial Clock .

**SDA** Serial Data .

**SDIO** Secure Digital Input Output.

**SKKE** Symmetric-Key Key Establishment).

**SM** Security Managerecurity Manager.

**SMP** Security Manager protocol.

**SNR** Signal to noise ratio.

**SoC** System on a Chip.

**SPI** Serial Peripheral Interface.

**SpO2** Serial Peripheral Interface .

**SS** Slave Select .

**TCP** Transmission Control Protocol.

**UART** Universal Asynchronous Receiver and Transmitter .

**UPS** Universidad Politécnica Salesiana .

**USB** Universal Serial Bus.

**UUID** Universally Unique Identifier.

**VAR** Video Assistant Referee.

**Vo2** Volumen respiratorio máximo.

**Wi-Fi** Wireless Fidelity.

**WiMAX** Worldwide Interoperability for Microwave.

**WLAN** Wireless Local Area Network .

**WMAN** Wireless Metropolitan Area Network.



**WPAN** Wireless Personal Area Network .

**WSN** Wireless Sensor Networks .

**WWAN** Wireless Wide Area Network.

**ZC** ZigBee Coordinator.

**ZDO** ZigBee Device Objec.

**ZED** ZigBee End Device.

**ZR** ZigBee Router.

# Referencias

- [1] M. Mumdouh y N. Akhtar, «The Internet-of-Things ( IoT ) Security : A Technological Perspective and Review The Internet-of-Things ( IoT ) Security : A Technological,» February 2019. DOI: 10.32628/CSEIT195193.
- [2] A. Shahraki, A. Taherkordi, O. Haugen y F. Eliassen, «A Survey and Future Directions on Clustering: From WSNs to IoT and Modern Networking Paradigms,» *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 18, págs. 2242-2274, 2 2021, ISSN: 19324537. DOI: 10.1109/TNSM.2020.3035315.
- [3] S. K. Vashist y J. Luong, *Wearable Technologies for Personalized Mobile Healthcare Monitoring and Management*. Elsevier Inc., 2018, págs. 235-260, ISBN: 9780128118108. DOI: 10.1016/B978-0-12-811810-8.00012-9.
- [4] M. Ghislieri, L. Gastaldi, S. Pastorelli, S. Tadano y V. Agostini, «Wearable inertial sensors to assess standing balance: a systematic review,» *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, págs. 1-25, 19 2019, ISSN: 14248220. DOI: 10.3390/s19194075.
- [5] D. Boscán, «Ventajas de la tecnología vestible en la actividad física,» *Télématique: Revista Electrónica de Estudios Telemáticos*, vol. 21, n.º 2, págs. 69-74, 2022.
- [6] L. Sirio, «Confiabilidad de parámetros fisiológicos estimados por elementos vestibles (wearables),» pág. 5, 2017. dirección: [http://www.nib.fmed.edu.uy/seminario\\_ib/2017/Monografia2017\\_Sirio\\_Lucia.pdf](http://www.nib.fmed.edu.uy/seminario_ib/2017/Monografia2017_Sirio_Lucia.pdf).
- [7] J. Almulla, A. Takiddin y M. Househ, «The use of technology in tracking soccer players' health performance: A scoping review,» *BMC Medical Informatics and Decision Making*, vol. 20, págs. 1-10, 1 2020, ISSN: 14726947. DOI: 10.1186/s12911-020-01156-4.
- [8] H. Nunome, B. Drust y B. Dawson, *Science and Football VII: The Proceedings of the Seventh World Congress on Science and Football*, 1.ª ed. 2015, 2013, pág. 448. DOI: doi.org/10.4324/9780203131879.

- [9] M. Velasteguí y K. Marcelo, *Aplicación para la optimización del monitoreo y control del entrenamiento de deportistas. Caso de estudio: Centro de Especialización Deportiva GoSport*, 2021. dirección: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/25084>.
- [10] L. Jones, «Wearable GPS Devices in a British Elite Soccer Academy Setting: A Foucauldian Disciplinary Analysis Of Player Development And Experience,» vol. 1, 1 2019. DOI: 10.25035/jade.01.01.04.
- [11] G. Vélez, *Aplicación de Agentes Físicos*, 2014. dirección: <https://www.uta.edu.ec/v2.0/phocadownload/mallas/humanas/modulos/culturafisicasemi/quinto/aplicacionagentesfisicos.pdf>.
- [12] E. E. R. Aguilar, «Bases fisiológicas de los principios del entrenamiento deportivo,» *Revista politécnica*, vol. 5, n.º 8, págs. 84-93, 2009. dirección: <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/129>.
- [13] W. L. Kenney, J. H. Wilmore y D. L. Costill, *Physiology of sport and exercise. Human kinetics*, 2021.
- [14] D. J. Ursino, L. Cirami y R. M. Barrios, «Aportes de la Psicología del Deporte para conceptualizar, operacionalizar y maximizar el rendimiento deportivo,» *Anuario de Investigaciones*, vol. 25, págs. 331-339, 2018. dirección: <https://www.redalyc.org/journal/3691/369162253040/html/>.
- [15] J. H. Wilmore y D. L. Costill, *Fisiología a Del Esfuerzo Y Del Deporte*. Editorial Paidotribo, 2004.
- [16] M. Nogales-Gámiz, «Aparato Cardiovascular,» 2021. dirección: [https://crea.ujaen.es/bitstream/10953.1/13536/1/NOGALES\\_GAMIZ\\_MARIA\\_TFM\\_BIOLOGIA\\_Y\\_GEOLOGIA.pdf](https://crea.ujaen.es/bitstream/10953.1/13536/1/NOGALES_GAMIZ_MARIA_TFM_BIOLOGIA_Y_GEOLOGIA.pdf).
- [17] Z. Pancar, M. Cevher-İşeri y col., «Comparison of circulation parameters and some motoric adaptations of futsal athletes and sedentaries,» *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, vol. 34, n.º S3, págs. 109-114, 2022. dirección: <https://ojs.uniquindio.edu.co/ojs/index.php/riuuq/article/download/1003/1287/4905>.
- [18] J. T. Hansen, *NETTER. Anatomia clinica*. Elsevier, 2020.
- [19] F. L. Morillas, *Efectos del entrenamiento muscular respiratorio en jugadores de fútbol*, 2021.

- [20] A. Cordero, M. D. Masiá y E. Galve, «Ejercicio físico y salud,» *Revista Española de Cardiología*, vol. 67, n.º 9, págs. 748-753, 2014, ISSN: 0300-8932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2014.04.007>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300893214002656>.
- [21] A. Boraita Pérez y L. Serratosa Fernández, ««El corazón del deportista»: hallazgos electrocardiográficos más frecuentes,» *Revista Española de Cardiología*, vol. 51, n.º 5, págs. 356-368, 1998, ISSN: 0300-8932. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0300-8932\(98\)74759-1](https://doi.org/10.1016/S0300-8932(98)74759-1). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300893298747591>.
- [22] Á. Chancusi, *Módulo Didáctico De Un Medidor De La Frecuencia Cardiaca Mediante Fotopletimografía para el Laboratorio de Instrumentación Biomédica de la Universidad De Las Fuerzas Armadas-ESPE*, 2015. dirección: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/9350>.
- [23] M. A. Llamuca Caiza y G. F. Tubón Tite, «Sistema de Monitoreo Personal Inalámbrico Para Atletas de Fondo,» 2017. dirección: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/4467>.
- [24] J. C. Marins, N. M. O. Marins y M. D. Fernándezb, «Aplicaciones de la frecuencia cardiaca máxima en la evaluación y prescripción de ejercicio,» *Apunts Medicina de l'Esport*, vol. 45, n.º 168, págs. 251-258, 2010, ISSN: 18866581. DOI: [10.1016/j.apunts.2010.04.003](https://doi.org/10.1016/j.apunts.2010.04.003).
- [25] N. Uth, Æ. H. Sørensen y Æ. K. Overgaard, «VO<sub>2</sub>max from the ratio between HR max Estimation of V and HR rest – the Heart Rate Ratio Method,» págs. 111-115, 2004. DOI: [10.1007/s00421-003-0988-y](https://doi.org/10.1007/s00421-003-0988-y).
- [26] H. Rojas, «Correlación Entre Parámetros Antropométricos y Motores por Posición de Juego en Jugadores Colombianos de Fútbol,» págs. 1-106, 2022. dirección: <https://hdl.handle.net/10893/22418>.
- [27] J. L. Ordóñez, «Dispositivos y tecnologías wearables,» 2016. dirección: [https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias\\_y\\_tecnologia/041001.pdf](https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/041001.pdf).
- [28] L. Fava, D. Vilches, J. Díaz, M. Pagano y R. R. Dapozo, «Tecnología aplicada al deporte de alto rendimiento,» págs. 864-868, 2018. dirección: <https://core.ac.uk/download/pdf/296403057.pdf>.

- [29] R. J. Aughey, «Applications of GPS Technologies to Field Sports Applications of GPS Technologies to Field Sports,» n.º May, 2014. DOI: 10.1123/ijsspp.6.3.295.
- [30] J. Castellano, «Deporte con dispositivos de posicionamiento global (GPS): Aplicaciones y limitaciones 1,» vol. 23, págs. 355-364, 2014. dirección: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4872379>.
- [31] W. G. Sierralta, «Digital Twins, los humanos y el fútbol,» 2018. dirección: <https://repositorio.21.edu.ar/handle/ues21/16453>.
- [32] R. Petersen-wagner, J. Andre y L. Ludvigsen, «The video assistant referee (VAR) as neo-coloniality of power? Fan negative reactions to VAR in the 2018 FIFA Men's World Cup power? Fan negative reactions to VAR in the 2018 FIFA,» *Sport in Society*, vol. 26, n.º 5, págs. 869-883, 2023. DOI: 10.1080/17430437.2022.2070481. dirección: <https://doi.org/10.1080/17430437.2022.2070481>.
- [33] I. M. C. Molina, «Cuantificación de los cambios de dirección en fútbol mediante un dispositivo inercial (wimu),» *VII Congreso Internacional de la Asociación Española de Ciencias del Deporte*, 2012. dirección: <http://hdl.handle.net/10201/29496>.
- [34] J. C. B. Álvarez, J. G. Vera y V. M. S. Hermoso, «Análisis de la frecuencia cardíaca durante la competición en jugadores profesionales de fútbol sala,» *Apunts. Educación física y deportes*, vol. 3, n.º 77, págs. 71-78, 2004. dirección: <https://raco.cat/index.php/ApuntsEFD/article/view/301467>.
- [35] E. Rey, L. Casáis, C. Lago y J. Lago, «Superando el mito de la fatiga en el fútbol. Influencia del tiempo efectivo de juego sobre la distancia recorrida por futbolistas de elite,» *Futbolpf: Revista de Preparación Física en el Fútbol*, vol. 2, págs. 54-62, 2011.
- [36] R. Martín Moya y P. Ruiz Montero, «Demandas físicas centradas en factores externos del futbolista profesional,» *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y del Deporte*, vol. 6, pág. 26, abr. de 2019. DOI: 10.24310/riccafd.2017.v6i3.6129.
- [37] P. Reche, *Fútbol y tecnología. Análisis del rendimiento en entrenamiento y competición en Fútbol Semiprofesional*, 2020.
- [38] C. S. Raghavendra, K. M. Sivalingam y T. Znati, *Wireless sensor networks*. Springer, 2006.
- [39] J. Yick, B. Mukherjee y D. Ghosal, «Wireless sensor network survey,» *Computer networks*, vol. 52, n.º 12, págs. 2292-2330, 2008.

- [40] J. Prieto Blázquez, *Introducción a los sistemas de comunicación inalámbricos*. 2011, pág. 11. dirección: [https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/9582/7/Tecnolog%C3%ADa%20y%20desarrollo%20en%20dispositivos%20m%C3%B3viles\\_M%C3%B3dulo1\\_Introducci%C3%B3n%20a%20los%20sistemas%20de%20comunicaci%C3%B3n%20inal%C3%Almbricos.pdf](https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/9582/7/Tecnolog%C3%ADa%20y%20desarrollo%20en%20dispositivos%20m%C3%B3viles_M%C3%B3dulo1_Introducci%C3%B3n%20a%20los%20sistemas%20de%20comunicaci%C3%B3n%20inal%C3%Almbricos.pdf).
- [41] W. Stallings, *Wireless communications and networks*. Prentice Hall, 2004, ISBN: 0131918354.
- [42] M. E. Baydal Cardona, «Clasificación de las redes inalámbricas,» 2018.
- [43] J. Salazar Soler, *Redes inalámbricas*. 2016. dirección: <https://techpedia.fel.cvut.cz/single/?objectId=9>.
- [44] C. Guy, «Wireless sensor networks,» en *Sixth international symposium on instrumentation and control technology: Signal analysis, measurement theory, photo-electronic technology, and artificial intelligence*, SPIE, vol. 6357, 2006, págs. 322-325.
- [45] R. Heydon, *Bluetooth Low Energy: The Developers Handbook*, ép. Pearson Always Learning. Prentice Hall, 2012, ISBN: 9780132888363. dirección: <https://books.google.com.ec/books?id=Ag2tXwAACAAJ>.
- [46] J. Tosi, F. Taffoni, M. Santacatterina, S. Roberto y D. Formica, «Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy : A Systematic Review,» págs. 1-34, 2017. DOI: 10.3390/s17122898.
- [47] M. Siekkinen, M. Hienkari, J. K. Nurminen y J. Nieminen, «How low energy is bluetooth low energy? Comparative measurements with ZigBee/802.15.4,» en *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 2012, págs. 232-237. DOI: 10.1109/WCNCW.2012.6215496.
- [48] C. Gomez, J. Oller y J. Paradells, «Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology,» págs. 11734-11753, 2012. DOI: 10.3390/s120911734.
- [49] M. Karhumaa, *Bluetooth low energy link layer injection*, 2021. dirección: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-202106178527.pdf>.
- [50] M. Siekkinen, M. Hienkari, J. K. Nurminen y J. Nieminen, «How low energy is bluetooth low energy? comparative measurements with zigbee/802.15.4,» en *2012 IEEE wireless communications and networking conference workshops (WCNCW)*, IEEE, 2012, págs. 232-237. DOI: 10.1109/WCNCW.2012.6215496.

- [51] E. Pek y N. Bogunovic, «Formal verification of logical link control and adaptation protocol,» en *Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (IEEE Cat. No. 04CH37521)*, IEEE, vol. 2, 2004, págs. 583-586. DOI: 10.1109/MELCON.2004.1346997.
- [52] P. Cope, J. Campbell y T. Hayajneh, «An investigation of Bluetooth security vulnerabilities,» en *2017 IEEE 7th annual computing and communication workshop and conference (CCWC)*, IEEE, 2017, págs. 1-7. DOI: 10.1109/CCWC.2017.7868416.
- [53] J. DeCuir, «Introducing Bluetooth Smart: Part 1: A look at both classic and new technologies.,» *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 3, n.º 1, págs. 12-18, 2013. DOI: 10.1109/MCE.2013.2284932.
- [54] G. Celosia y M. Cunche, «Fingerprinting bluetooth-low-energy devices based on the generic attribute profile,» en *Proceedings of the 2nd International ACM Workshop on Security and Privacy for the Internet-of-Things*, 2019, págs. 24-31. DOI: 10.1145/3338507.3358617.
- [55] I. Horvat, N. Lukac, R. Pavlovic y D. Starcevic, «Smart plug solution based on bluetooth low energy,» en *2015 IEEE 5th International Conference on Consumer Electronics-Berlin (ICCE-Berlin)*, IEEE, 2015, págs. 435-437. DOI: 10.1109/ICCE-Berlin.2015.7391301.
- [56] H. Elhesseawy y L. Riad, *Bluetooth Low Energy Industrial Sensor*, 2018. dirección: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8963493&fileId=8963651>.
- [57] C. M. Ramya, M. Shanmugaraj y R. Prabakaran, «Study on ZigBee technology,» en *2011 3rd international conference on electronics computer technology*, IEEE, vol. 6, 2011, págs. 297-301. DOI: 10.1109/ICECTECH.2011.5942102.
- [58] S. C. Ergen, «ZigBee/IEEE 802.15. 4 Summary,» *UC Berkeley, September*, vol. 10, n.º 17, pág. 11, 2004. dirección: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:62388391>.
- [59] A. M. OBANDO, *ESTUDIO DE PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS PARA EL DESARROLLO DE APLICACIONES DE INTERNET DE LAS COSAS (IoT) EN SISTEMAS EMBEBIDOS*. 2011. dirección: <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/168052.pdf>.
- [60] D. Gislason, *Zigbee Wireless Networking*. Elsevier Science, 2008, ISBN: 9780080558622. dirección: <https://books.google.com.ec/books?id=up80a7456I8C>.

- [61] S. Pollin, M. Ergen, S. C. Ergen y B. Bougard, «Performance Analysis of Slotted Carrier Sense,» n.º May, 2008. DOI: 10.1109/WCNC.2008.279.
- [62] S. Farahani, «ZigBee and IEEE 802.15.4 Protocol Layers,» en dic. de 2008, págs. 33-135, ISBN: 9780750683937. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8393-7.00003-0.
- [63] T. Yang, Q. Yang y L. Cheng, «Experimental study: a LQI-based ranging technique in ZigBee sensor networks,» *International Journal of Sensor Networks*, vol. 19, n.º 2, págs. 130-138, 2015. dirección: <https://scholarworks.montana.edu/xmlui/bitstream/handle/1/9192/LQI.pdf>.
- [64] C. B. Mwakwata, H. Malik, M. Mahtab Alam, Y. Le Moullec, S. Parand y S. Mumtaz, «Narrowband Internet of Things (NB-IoT): From physical (PHY) and media access control (MAC) layers perspectives,» *Sensors*, vol. 19, n.º 11, pág. 2613, 2019. DOI: 10.3390/s19112613.
- [65] J. Azevedo, F. Santos, M. Rodrigues y L. Aguiar, «Sleeping ZigBee networks at the application layer,» *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 4, n.º 1, págs. 35-41, 2014. DOI: 10.1049/iet-wss.2013.0024.
- [66] W. Wang, G. He y J. Wan, «Research on Zigbee wireless communication technology,» en *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, IEEE, 2011, págs. 1245-1249. DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057961.
- [67] H. Li, Z. Jia y X. Xue, «Application and analysis of ZigBee security services specification,» en *2010 Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*, IEEE, vol. 2, 2010, págs. 494-497. DOI: 10.1109/NSWCTC.2010.261.
- [68] S. Safaric y K. Malaric, «ZigBee wireless standard,» en *Proceedings ELMAR 2006*, IEEE, 2006, págs. 259-262. DOI: 10.1109/ELMAR.2006.329562.
- [69] S. Ondrej, B. Zdenek, F. Petr y H. Ondrej, «Zigbee technology and device design,» en *International Conference on Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies (ICNICONSMCL'06)*, IEEE, 2006, págs. 129-129. DOI: 10.1109/ICNICONSMCL.2006.233.
- [70] D. M. A. Córdoba y F. A. S. Buitrago, «Estado del arte de las redes de sensores inalámbricos,» *Tecnología Investigación y Academia*, vol. 1, n.º 2, 2013. dirección: <http://hdl.handle.net/11349/21057>.



- [71] J. Moreno y D. R. Fernández, «Informe Técnico Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4),» *No publicado*, 2007.
- [72] G. A. Intriago Velasquez, *Diseño e implementación de un sistema domótico de radiofrecuencia para brindar gestión de networking, seguridad y confort usando los protocolos z-wave y zigbee*, B.S. thesis, 2015.
- [73] M. Barrera Durango, N. Londoño Ospina, J. Carvajal y A. Fonseca, «Análisis y diseño de un prototipo de sistema domótico de bajo costo,» *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, n.º 63, págs. 117-128, 2012.
- [74] C. A. V. Romero, J. E. B. Jaimes y D. C. P. González, «La Tecnología ZigBee estudio de las características de la capa física,» *Scientia et Technica*, vol. 22, n.º 3, págs. 238-245, 2017.
- [75] A. A. Villamar Alvarado, *Análisis comparativo de tecnologías WSN en base a la seguridad y su forma de operación, aplicado al entorno IOT*. 2022.
- [76] F. Valdés y R. P. Areny, *Microcontroladores fundamentos y aplicaciones con PIC*. Marcombo, 2007, vol. 1149.
- [77] E. Díaz Ronceros, «Relevancia de la ejecución experimental de proyectos con microcontroladores en el aprendizaje de la ingeniería electrónica,» *Educación*, vol. 29, n.º 56, págs. 48-72, 2020.
- [78] C. Robles y L. Belén, «Universidad Nacional de La Plata Facultad de Inform a Tesina de grado Uso de dispositivos GPS e IMU para analizar la performance de deportistas de alto rendimiento,» 2020. dirección: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/111890>.
- [79] F. Moreno Cerdá, *Demostador arquitectura publish/subscribe con MQTT*, B.S. thesis, 2018.
- [80] J. M. Sigua Salinas y J. F. Guillén Guillén, *Plataforma de monitoreo y control remoto open source, basada en comunicaciones inalámbricas. Aplicación a celdas de manufactura bajo entornos virtualizados utilizando la herramienta Plant Simulation*, 2021.
- [81] J. Ikiss, *Sistema de adquisición de datos con ESP32*, B.S. thesis, 2020.
- [82] R. S. Burgoa Callisaya, *Diseño de un sistema automatizado de riego por goteo, mediante el microcontrolador ESP32 por medio de red inalámbrica Wifi y la plataforma BLYNK, en la plaza triangular de la ciudad de La Paz*.
- [83] A. Reyna, I. Lima y E. Bravo, *Wireless Transmission of ECG Biopotentials Using XBee Technology Transmisión Inalámbrica de Biopotenciales ECG Utilizando Tecnología XBee*, 2016.

- [84] D. Sindhanaiselvi y T. Shanmugantham, «Design and implementation of indoor tracking system using inertial sensor,» en *Microelectronics, Electromagnetics and Telecommunications: Proceedings of the Fourth ICMEET 2018*, Springer, 2019, págs. 465-473.
- [85] P. Kanani y M. Padole, «Real-time location tracker for critical health patient using Arduino, GPS Neo6m and GSM Sim800L in health care,» en *2020 4th international conference on intelligent computing and control systems (ICICCS)*, IEEE, 2020, págs. 242-249.
- [86] I. Hemmerling Bazán, «Impacto del entrenamiento interválico de alta intensidad en jóvenes deportistas,»