



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE SIGNOS VITALES
Y LOCALIZACIÓN BASADO EN REDES INALAMBRICAS PARA
JUGADORES DE VOLEIBOL

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSÉ ANTONIO MALDONADO CRUZ

TUTORA PRINCIPAL
FATIMA MOUMTADI
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, OCTUBRE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Martynyuk Oleksandr
Secretario: Dr. Ceballos Herrera Daniel Enrique
Vocal: Dra. Moumtadi Fátima
1^{er.} Suplente: Dr. Landeros Ayala Salvador
2^{d o.} Suplente: Dr. Peña Cabrera Juan Mario

Lugar donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería

TUTORA DE TESIS:

DRA. FATIMA MOUMTADI

FIRMA

Agradecimientos

Quiero dar las gracias.

A Dios por todo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al posgrado de Ingeniería Eléctrica opción Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería por la formación académica y el lugar que me brindaron.

Al CONACYT por el apoyo económico durante mis estudios.

A mi tutora la Dra. Fatima MOUNTADI, gracias por su confianza, tiempo y orientación académica que me guio en el desarrollo de la presente tesis.

A mis profesores y sinodales por sus enseñanzas, profesionalismo y sus imprescindibles aportaciones.

A mi abuelos maternos y a mi abuela paterna por todo su cariño y cuidado.

A mis padres por ser los mayores promotores durante este proceso, gracias por su amor incondicional, confianza, dedicación, consejos, valores y soporte que me han permitido superarme día a día.

A mis tíos, primos y mis demás familiares por estar presentes en mis vida, en especial a mi tía Martha por todo su cariño.

A mis compañeros del posgrado por compartir conmigo sus conocimientos y brindarme su amistad, en especial a los futuros M.I. Roberto, Gerardo, Denisse, Oswaldo, Antonio, Gibran, Yoendric, Pedro y Arachely.

Al M.I. Alexis R.B por ayudarme a resolver múltiples dudas, orientarme profesionalmente y brindarme tu tiempo en especial en las juntas, al M.I. Horacio D.R. por sus aportaciones, al M.I. Teo C.C. por compartir tus conocimientos conmigo, al Lic. y próximamente M.I. Daniel S.P. incluso cuando trabajabas a la par en tu tesis me echaste una mano gracias por todas tus enseñanzas académicas y de vida, y por tu enorme paciencia.

A mis amigos por sus palabras de aliento, ánimos y por tranquilizarme a lo largo de mis estudios, en especial a Erick C., a Edgar M.C., Alin C. y Viridiana P.

Resumen

Se presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo real de parámetros fisiológicos y posición para dos jugadores de voleibol de sala durante sesiones de entrenamiento. El monitoreo de signos vitales abarca únicamente: frecuencia cardiaca, porcentaje de saturación de oxígeno en la sangre y temperatura corporal y se lleva a cabo por medio del estándar IEEE 802.15.4 (Bluetooth de Baja Energía), mientras que el monitoreo de posición de los jugadores con respecto a la cancha de juego se realiza por medio de la adquisición del parámetro de intensidad de señal recibida (RSS) tomado de la trama Beacon del estándar IEEE 802.11 (WiFi), un algoritmo de posicionamiento basado en RSS y la técnica de trilateración. Un sistema de monitoreo con estas características permite construir una solución costo-efectiva para entornos cerrados como alternativa a las tecnologías de localización de video y al sistema de posicionamiento global (GPS), que faculta al entrenador, educador y auxiliar deportivo realizar evaluaciones cuantitativas de desempeño y rendimiento a sus jugadores.

Índice

Agradecimientos	I
Resumen	II
Introduccion	1
Objetivo	1
Justificacion	2
Metodologia	5
Antecedentes	7
1. Deportes de sala, la importancia en la evaluación del desempeño de jugadores profesionales y las redes de área corporal.	12
1.1. Competitividad en los deportes modernos	12
1.2. El voleibol como deporte de sala	12
1.2.1. Posicionamiento en el voleibol	15
1.3. Monitoreo de posición	17
1.4. Monitoreo de signos vitales	19
1.4.1. Métodos de medición de signos vitales en el voleibol.	20
1.5. Monitoreo de posición para jugadores de voleibol por RF.	23
1.6. Estándares de redes inalámbricas de rango corto.	24
1.6.1. ZigBee	26
1.6.2. Bluetooth	27
1.6.3. WiFi	27
1.7. Beacon	28
2. Monitoreo de posicionamiento y signos vitales en entornos cerrados por medio de radiofrecuencia.	30
2.1. Visión general de las técnicas y tecnologías de posicionamiento en interiores.	30
2.1.1. Ángulo de arribo	31
2.1.2. Tiempo de arribo	31
2.1.3. Diferencia de tiempo de arribo	32

2.1.4.	Intensidad de señal recibida	32
2.2.	Técnicas de Posicionamiento	34
2.2.1.	Triangulación	35
2.2.2.	Trilateración	35
2.2.3.	Proximidad	36
2.3.	Algoritmos basados en RSSI para estimar distancias	37
2.4.	Tecnologías para los algoritmos de posición	40
2.5.	Precisión en el posicionamiento de jugadores de deportes de sala	41
2.5.1.	Estándares de comunicación inalámbricos para una red inalámbrica.	42
2.6.	Dispositivos transmisores de una red de área corporal.	42
2.7.	Dispositivos receptores de una red de área corporal.	45
3.	Diseño del sistema de monitoreo de localización, frecuencia cardíaca, oximetría y temperatura corporal en entornos cerrados.	46
3.1.	Requerimientos del sistema	46
3.2.	Sensado	47
3.2.1.	Sensores	47
3.2.2.	Microcontroladores	51
3.2.3.	Módulos compatibles con el estándar ZigBee	51
3.2.4.	Módulos compatibles con el estándar WiFi.	54
3.2.5.	Conexión entre sensor y microcontrolador.	57
3.3.	Generación de beacons	58
3.3.1.	Beacon con información de posición y desplazamiento.	60
3.3.2.	Portabilidad de los sensores	61
3.3.3.	Colocación de los dispositivos de portabilidad.	62
3.3.4.	Características de los beacons.	63
3.4.	Adquisición y filtrado de información generada por los beacons.	66
4.	Integración e implementación	67
4.1.	Características del entorno cerrado	67
4.2.	Dispositivo receptor de signos vitales.	68
4.3.	Dispositivo receptor de posición y desplazamiento.	69

4.3.1.	Base de los dispositivos receptores	71
4.4.	Experimento para modelo de estimación de distancias	72
4.4.1.	Algoritmo de estimación de posición	78
4.5.	Optimización del área para estimar posición.	80
4.5.1.	Inclinación y giro del dispositivo generador del beacon.	81
4.6.	Patrón de radiación de la antena receptora y transmisora.	83
4.7.	Técnica de trilateración	86
4.8.	Algoritmos para resolver el problema de estimación de distancias basado en RSSI	87
5.	Análisis de resultados	90
5.1.	Sistema dual de BLE y WiFi	90
5.2.	Consolidación y síntesis de la información	92
5.3.	Control, Procesamiento y Visualización	96
5.3.1.	Procesamiento de datos de posición	97
5.3.2.	Análisis estadístico de la visualización.	99
5.3.3.	Visualización de la posición en un servidor web.	102
5.3.4.	Visualización de los signos vitales en un servidor.	104

Índice de figuras

0.1. Metodología para desarrollar el sistema de monitoreo.	5
0.2. Técnicas de entrenamiento en las olimpiadas del 164 a 152 a.C.	7
1.1. Cancha tradicional de voleibol (FIVB)	13
1.2. Posición y desplazamiento de los jugadores dentro de la cancha de voleibol [16].	16
1.3. Sistema de ataque 4 :2 o llamado 6-2 [22].	18
1.4. (a) Sistema de defensa 3-2-1 y (b) Sistema de defensa 3-1-2 [22].	18
1.5. Técnicas de oximetría [27].	21
1.6. Diagrama de absorbancia de la oxihemoglobina y desoxihemoglobina [27]. . .	21
1.7. Señal pletismografica obtenida por un oxímetro [29].	23
1.8. Arquitectura a modo estrella.	26
1.9. Funcionamiento de una red inalámbrica de área corporal.	28
1.10. Trama Beacon WiFi IEEE, 2012b.	29
1.11. Trama Beacon Bluetooth IEEE, 2005.	29
2.1. Ángulo de arribo [35].	31
2.2. Tiempo de arribo [35].	32
2.3. Diferencia de tiempo de arribo [35].	33
2.4. Estimación de distancia por RSSI [35].	33
2.5. Representación de la técnica de triangulación [35].	35
2.6. Representación de la técnica de trilateración [35].	36
2.7. Método de trazado de rayos [37].	39
2.8. Comparación de varias tecnologías de posicionamiento IEEE 2007.	40
2.9. Módulos periféricos para una red WBAN.	44
2.10. Módulos centrales WiFi para una red WBAN.	45
3.1. Diagrama del sistema.	46
3.2. Sensor de frecuencia cardíaca y %SpO2.	48
3.3. Sensor de temperatura corporal MAX30205.	50
3.4. Curva característica del MAX30205 [Anexo-MAX30205].	51
3.5. Trama API de los módulos XBee.	52
3.6. Diferentes tipos de conectores de antenas de los módulos XBee.	53

3.7. Diferentes versiones de los módulos XBee.	54
3.8. (a)Microcontrolador WiPy v. 2.0, (b) base del micrcontrolador Pycom. . . .	57
3.9. Conexión del modulo Wipy 2 con el sensor MAXREFDES117#.	58
3.10. (a) Conexión esquematica del modulo Wipy 2 con el sensor MAXREFDES117#, (b) conexión fisica, (c) conexión fisica con placa soldada y bateria (prototipo a colocar en el jugador).	58
3.11. Conexión del modulo Wipy 2 con el sensor MAX30205.	59
3.12. (a) Conexión esquemática del modulo Wipy 2 con el sensor MAX30205, (b) Conexión física, (c) Conexión física con placa soldada y batería (prototipo a colocar en el jugador).	59
3.13. Circuito impreso para el microcontrolador ESP32.	60
3.14. (a) Conexión esquemática del microcontrolador Wipy 2.0 con un acelerómetro, (b) conexión física con placa soldada y batería (prototipo a colocar en el jugador).	60
3.15. (a) Pulsera para la portabilidad del sensor de oximetría, (b) Pulsera física.	61
3.16. (a) Pulsera para la portabilidad del sensor de temperatura corporal, (b) Pul- sera física.	61
3.17. (a) Top para la portabilidad del beacon con la información de posición y desplazamiento, (b) Representación física	62
3.18. (a) Ubicación de las pulseras y el top en el jugador de voleibol, (b) Ubicación del dispositivo que emite el beacon con la información de posición y despla- zamiento.	63
3.19. Representación de la portabilidad de los dispositivos de sensado en un jugador de voleibol.	63
3.20. Formato de SSID para el sensor de oximetría.	64
3.21. Formato de SSID para el sensor de temperatura corporal.	64
3.22. Formato de SSID para el beacon con la información de posición y desplazamiento.	65
3.23. Diagrama de Flujo para la generación de Beacons.	65
3.24. Patrón de radiación omnidireccional [50].	66
4.1. Cancha de voleibol donde se realizaron las pruebas.	67
4.2. Cobertura del WiPy 2.0 configurado como AP BLE.	69
4.3. Microcontrolador Dragino Yun v1.1.6.	70

4.4. Antena externa para el microcontrolador Dragino Yun.	70
4.5. Representación del módulo Dragino Yun con antena externa.	71
4.6. (a) Vista frontal del tripie de la antena receptora, (b) Representación isométrica del tripie.	72
4.7. Vista superior de la base del dispositivo receptor Dragino Yun v1.1.6 colocado en la base del tripie.	72
4.8. Experimento para determinar el modelo de estimación de distancias.	72
4.9. Representación del experimento para determinar el modelo de estimación de distancias.	73
4.10. Parte del código ejecutado por el nodo receptor para obtener el parámetro RSSI.	73
4.11. Curvas de RSSI contra distancias específicas durante 5 minutos.	74
4.12. Curva de RSSI vs distancia de 1 metro durante 5 minutos.	74
4.13. Curva experimental de mediciones de RSSI del jugador con respecto a la antena receptora fija (WiPy 2.0).	75
4.14. Curva experimental de mediciones de RSSI del jugador con respecto a la antena receptora fija (ESP32).	75
4.15. Representación del experimento para el modelo de estimación de distancias (ESP32).	76
4.16. Software XCTU para obtener el parámetro RSSI de los módulos XBee.	76
4.17. Curva experimental de mediciones de RSSI del jugador con respecto a la antena receptora fija (XBee).	77
4.18. Representación del experimento para el modelo de estimación de distancias (XBee).	77
4.19. Curva de RSSI vs distancia teórica y experimental hasta 10 m.	80
4.20. Zona de cobertura de la trilateración en la cancha.	81
4.21. Colocación de dispositivos receptores para implementar trilateración.	82
4.22. (a) Vista lateral del microcontrolador WiPy 2.0 AP WiFi, (b) Vista frontal del microcontrolador WiPy 2.0 AP WiFi.	82
4.23. Experimento para obtener el patrón de radiación de la antena del dispositivo WiPy 2.0 AP WiFi.	84

4.24. Representación del experimento para obtener el patrón de radiación de la antena del dispositivo WIpY 2.0 AP WiFi.	84
4.25. Patrón de radiación de la antena del dispositivo WIpY 2.0 AP WiFi.	85
4.26. Experimento para obtener el patrón de radiación de la antena del dispositivo receptor Dragino Yun v1.1.6 con la antena externa GW.11	85
4.27. Patrón de radiación del dispositivo Dragino Yun v1.1.6 con la antena externa GW.11.	86
4.28. Modelo de área de ejemplo de la técnica de fingerprint para $c = 25$, $d = 3$ [52].	89
5.1. Adquisición y filtrado de los beacons generados por los protocolos WiFi y BLE.	90
5.2. Colocación de los sensores en el cuerpo del jugador.	91
5.3. Representación de los dispositivos receptores y transmisores.	91
5.4. Diagrama de flujo para filtrar RSSI y SSID de los beacons.	92
5.5. Raspberry Pi 3 B+ 2017.	93
5.6. Parte del código ejecutado en la Raspbeberry pi con lenguaje Python.	94
5.7. Datos obtenidos por la raspberry Pi 3B+.	94
5.8. Consolidación y síntesis de la información por medio de la RaspBerry Pi 3 B+.	94
5.9. Switch ethernet utilizado para recibir información de los dispos. receptores. .	95
5.10. Sistema de monitoreo de posición y signos vitales.	95
5.11. Diagrama de flujo de la etapa de control, procesamiento y visualización. . . .	96
5.12. Esquema de control, procesamiento y visualización del sistema de monitoreo.	97
5.13. Representación de la técnica de trilateración.	98
5.14. Diagrama de bloques para el filtrado de RSSI.	98
5.15. Gráfico de ubicación de jugadores.	99
5.16. Ubicación del jugador con la información del error.	101
5.17. Algoritmo LDPL con restricciones en la rotación y ubicación del jugador. . .	102
5.18. Visualización de la posición de dos jugadores en un área de 9m por 9m en tiempo real en una página web.	103
5.19. Formato de los datos de posición de los jugadores para la visualización. . . .	104
5.20. Visualización de la información de signos vitales de un jugador en tiempo real en una página web.	104

Índice de tablas

0.1. Lista de beneficios de un análisis cuantitativo	3
1.1. Lista de eventos en la historia de voleibol	13
1.2. Lista de consideraciones generales en el voleibol	15
1.3. Aspectos a tener en cuenta en el desplazamiento de jugadores en el voleibol.	17
1.4. Signos vitales que se pueden medir en los jugadores de voleibol.	20
1.5. Principales estándares de comunicación de rango corto.	26
2.1. Clasificación de Técnicas de posicionamiento en interiores [35].	30
2.2. Características de los parámetros de estimación de posición.	34
2.3. Características de las tecnicas de posicionamiento.	37
2.4. Tecnologías para crear una red de área personal	43
2.5. Módulos periféricos WiFi.	44
4.1. Resultados, error en la estimación de distancias.	79
5.1. Sumario de test de localización WiFi por método LDPL.	99
5.2. Resultados de diferentes algoritmos de posición.	100
5.3. Precisión en la estimación de la ubicación de los jugadores.	101

Introducción

El objetivo de este trabajo es diseñar e implementar un sistema para el monitoreo de signos vitales y posición de jugadores de voleibol, con respecto a una cancha de juego cerrada durante sesiones de entrenamiento. En el primer capítulo se presenta una visión del panorama en el que se encuentran las tecnologías de monitoreo para deportistas en entornos cerrados y su importancia en la evaluación del desempeño deportivo, se exploran los problemas actuales, así como las oportunidades de innovación. En el segundo capítulo se describe la teoría de los signos vitales de un ser humano, así como las técnicas, herramientas y tecnologías orientadas al monitoreo de deportistas. En el tercer capítulo se presenta una descripción general del diseño de estudio y metodología. En el cuarto capítulo se presenta la implementación y fabricación del sistema. Finalmente, en el quinto capítulo se presentan los resultados y su análisis estadístico.

Objetivo

Desarrollo de un sistema para el monitoreo en tiempo real de posición, temperatura corporal, frecuencia cardiaca y %SPO2 de dos jugadores de voleibol en una cancha de juego cerrada durante sesiones de entrenamiento basado en una red inalámbrica de área corporal que permita realizar evaluaciones cuantitativas de desempeño.

Objetivos particulares:

Se mostrará la posición de dos jugadores de voleibol en una representación en coordenadas en dos dimensiones (2D) en una página web.

Se mostrará la información de latidos por minuto, porcentaje de oxígeno en la sangre, y temperatura corporal de dos jugadores de voleibol de forma gráfica en una página web.

Justificación

El voleibol es uno de los deportes de conjunto con más seguidores en el mundo. Como espectáculo, se encuentra dentro de los 5 juegos olímpicos más vistos [1]. Lo que convierte al voleibol en un deporte relevante. En este deporte competitivo moderno las demandas de capacidad integral hacia los jugadores son muy altas para lograr un desempeño exitoso [2],[3]. En este aspecto, los entrenadores desempeñan un papel fundamental al tener una gran influencia en las cualidades de rendimiento de los aprendices y/o jugadores profesionales, así como en los resultados de las competencias. Además del conocimiento específico del deporte, los entrenadores de alto nivel requieren el conocimiento de áreas como anatomía, fisiología, biomecánica, psicología, sociología y didáctica para aprovechar al máximo las habilidades de los jugadores [3],[5].

Tradicionalmente los entrenadores realizan un análisis cualitativo de los jugadores durante las sesiones de entrenamiento, que consiste en tomar decisiones principalmente por la experiencia e interpretación visual, para determinar jugadas, posiciones, evitar sobrecarga, etc. Pocas veces un entrenador lleva a cabo un análisis cuantitativo durante las sesiones de entrenamiento, un análisis de este tipo conlleva recabar e interpretar datos estadísticos de condición física, signos vitales y rendimiento del desempeño de los jugadores, principalmente por medio de técnicas como seguimiento de los jugadores por video cámara y por técnicas de localización basadas en radiofrecuencia (RF) [6]. Se ha demostrado que realizar un análisis cuantitativo que comprenda el monitoreo de posición y signos vitales como un soporte extra de las apreciaciones cualitativas de los jugadores por parte del entrenador, además del conocimiento de las áreas mencionadas anteriormente, puede traer múltiples beneficios al entrenador, como lo son: [6] - [10].

Tabla 0.1: Lista de beneficios de un análisis cuantitativo

Beneficios de un análisis cuantitativo que involucra el monitoreo de posición y signos vitales.
Desarrollar jugadas eficaces de ataque y/o defensa.
Controlar las posiciones de los jugadores dentro de la cancha.
Proporcionar información de las señales fisiológicas bajo diversas condiciones de ejercicio.
Detectar signos tempranos de deterioro de salud.
Notificar al entrenador de atención médica para los jugadores en situaciones críticas.
Permitir un seguimiento cercano en los procesos de rehabilitación.
Mejorar el desempeño individual y colectivo por parte de los jugadores de voleibol.

Sin embargo, existe el problema que en los deportes donde los jugadores se mueven rápidamente como lo es el caso del voleibol, resulta complicado llevar a cabo un análisis cuantitativo ya que es extremadamente difícil analizar los movimientos repentinos de los jugadores y monitorear sus signos vitales sin la ayuda de instrumentos de medición y monitoreo [6].

En el caso del monitoreo de signos vitales, tanto en investigación como en la industria, ha aumentado el interés por los dispositivos portátiles de monitoreo de la salud. Estos dispositivos son particularmente importantes para la población que requiera que su salud deba evaluarse periódicamente o monitorearse continuamente, sin embargo, para que estos dispositivos portátiles sean prácticos, es necesario superar una serie de obstáculos técnicos. Por ejemplo, para los jugadores de voleibol es necesario que los instrumentos de medición sean no invasivos, ligeros (menores a 500g incluyendo batería), diminutos (menores a 30 mm por 30 mm), cómodos de usar (no interfieran en el desempeño de los jugadores), de menor costo a los sistemas actuales (menores a \$300 USD), confiables (sensores fisiológicos calibrados), tener una interfaz amigable accesible para el usuario (una visualización de la información fisiológica procesada de forma gráfica en 2 dimensiones con herramientas del internet de las cosas IoT) y de bajo consumo energético (menores a 100mA). Por ende, el monitoreo de signos vitales en tiempo real por parte de los entrenadores hacia los jugadores de forma inalámbrica se ha desarrollado notablemente en los últimos años obteniendo protocolos estandarizados, el problema actual persiste en que los sistemas de monitoreo a la venta para jugadores tienen un alto costo y son difíciles de implementar por lo que estos sistemas únicamente son empleados por equipos profesionales [6].

Para el caso de un monitoreo de localización y seguimiento de jugadores; aunque los sistemas de seguimiento al aire libre para el deporte han existido durante algún tiempo, los sistemas potenciales para su implementación en sistemas de rastreo de jugadores de interior solo se introdujeron recientemente a mediados de los 2000 [11]. Los entrenadores comúnmente usan tecnologías basadas en video o en el sistema de posicionamiento global (GPS) [6],[9]. la problemática con las tecnologías basadas en video es que son complejas, exclusivas y con precios elevados [7],[8].

Si bien el GPS es el estándar establecido empleado para estimar la ubicación de los jugadores, no es adecuado para un posicionamiento en interiores preciso, debido a la obstrucción de la señal del techo y la pared. Por este motivo se han sugerido múltiples técnicas para el posicionamiento inalámbrico en interiores de objetos estáticos y en movimiento con métodos mejorados para limitar los errores de estimación de posición, como lo son las técnicas basadas en RF. Para las técnicas de interiores que dependen de la propagación de la señal de RF, las estadísticas de propagación son útiles para determinar la pérdida de trayecto y la degradación de la señal. Este conocimiento de propagación es crítico en el diseño de sistemas inalámbricos de posicionamiento en interiores y, en última instancia, en la precisión de la estimación de la posición; las pérdidas de propagación de la ruta de señal y sus variaciones en entornos cerrados como oficinas, casas, industrias, etc., presentan obstáculos al diseñar un sistema de posicionamiento confiable y preciso. Sin embargo, los entornos deportivos en interiores generalmente tienen un área de piso abierto donde el juego se lleva a cabo libre de objetos aparte de los jugadores mismos [11], por lo que dentro de una cancha cerrada de voleibol los objetos que provoquen interferencia en la propagación de señales de RF a diferencia de oficinas, casas e industrias son menores. Estas áreas de interiores están diseñadas y construidas según especificaciones internacionales, para el caso del voleibol las normas son establecidas principalmente por la Federación Internacional de Voleibol (FIVB).

Por lo tanto, para llevar a cabo técnicas de posicionamiento que dependen de la propagación de señales de RF en donde existe una oportunidad de innovación, hay que superar una serie de obstáculos tecnológicos y normativos. Además de no afectar en el desempeño de

los jugadores en la cancha al implementar un sistema de posicionamiento. Por lo que se abre un panorama para desarrollar sistemas basados en tecnologías innovadoras en telecomunicaciones como lo son las redes inalámbricas de área corporal que también se pueden usar en el monitoreo de signos vitales, con el fin de proporcionar una herramienta costo efectiva de ayuda a los entrenadores y educadores de voleibol que buscan obtener información fisiológica de sus jugadores. Con el desarrollo de sistemas de seguimiento de desplazamiento de jugadores de voleibol basados en redes inalámbricas se espera contribuir en la creación de sistemas confiables, precisos y que sean capaces de cumplir los requerimientos y especificaciones de los protocolos que aparecerán con el internet de las cosas (IoT), tecnología que está creciendo desde hace algunos años [12]. Un sistema de posicionamiento de jugadores por medio de propagación de señales de RF en un área de juego en interiores se puede usar en muchas otras aplicaciones. Las áreas de interiores se utilizan para una variedad de deportes además del voleibol, por ejemplo: baloncesto, cricket de interior, fútbol, netball y balonmano. Un sistema de posicionamiento de jugadores puede ser utilizada potencialmente para todos estos deportes [4],[6],[9].

Metodología

El presente trabajo sigue la metodología de Ulrich, Diseño de Producto, que consta de 4 etapas [13], como se observa en la figura 0.1.

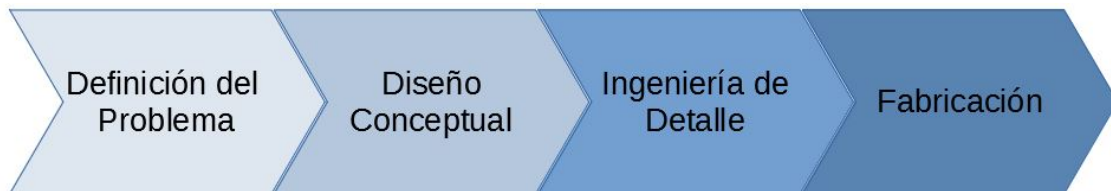


Figura 0.1: Metodología para desarrollar el sistema de monitoreo.

En la etapa de definición de problema se llevará a cabo:

- Búsqueda de antecedentes sobre el tema definido para este trabajo.

- Se analizará y delimitará el conjunto de variables fisiológicas que son más útiles para un entrenador. En base a las variables obtenidas se definirán los sensores fisiológicos.
- Se realizará un estudio de técnicas de localización y redes inalámbricas de área personal en deportes de sala.

En la etapa de Diseño conceptual:

- Se analizará e identificarán los módulos existentes que permitan estimar distancias y puedan formar una red inalámbrica de área personal.
- Se implementará un módulo inalámbrico para el sistema de comunicación.
- Se implementará un microcontrolador que permita integrar el módulo inalámbrico y el sensor, obteniendo módulos periféricos.
- Se implementará un módulo central que se encargará de controlar y recopilar la información de los módulos periféricos.
- Se diseñará una red inalámbrica que integre los dispositivos transmisores y receptores.

En la etapa de Ingeniería de detalle:

- Se realizarán pruebas de propagación de señales de RF en la cancha cerrada, para elaborar un análisis estadístico de propagación de la señal.
- Se obtendrán patrones de radiación que permitan describir el comportamiento de las antenas de transmisión y recepción.
- Se desarrollarán algoritmos de seguimiento y monitoreo de signos vitales de jugadores de voleibol.

En la etapa de Fabricación:

- Se interconectarán varios niveles de red con el fin de crear una red WBAN.
- Se fabricará un prototipo que pueda usarse en entrenamientos de voleibol.
- Se procesará y analizará la información obtenida.
- Se desarrollará software donde sea posible visualizar la información procesada.

Antecedentes

El uso de métodos, técnicas y herramientas para mejorar el desempeño de deportistas ha existido desde que los atletas comenzaron a entrenar, este acontecimiento data de los inicios de los Juegos Olímpicos que se realizaron en Grecia; en donde los atletas desarrollaron métodos simples de entrenamiento al adquirir técnicas de atletas más experimentados, y utilizar herramientas para mejorar sus habilidades. Un ejemplo fue el corredor famoso Leónidas de Roda que cargaba un escudo mientras corría como parte de su entrenamiento para las olimpiadas del 164 al 152 a.C., como se observa en la figura 0.2 [14].



Figura 0.2: Técnicas de entrenamiento en las olimpiadas del 164 a 152 a.C.

Actualmente los deportes modernos son muy competitivos, lo que ha llevado a demandas altas de capacidad integral hacia los jugadores por parte de los entrenadores. Por ende, la necesidad de herramientas y técnicas de entrenamiento en los deportes es un requisito establecido para los entrenadores y formadores educativos, ya que buscan nuevas formas de mejorar el rendimiento y competitividad de cada jugador y de su equipo en general para obtener la victoria del partido.

En algunos deportes de sala competitivos como el voleibol, baloncesto y futbol de sala es muy común que los jugadores se desplacen velozmente por todo el terreno de juego o que realicen movimientos rápidos de pies y brazos tanto defensivos como ofensivos. Este factor de fluidez en el juego eleva la importancia del desarrollo tanto de habilidades individuales como de estrategias de juego en equipo. En deportes donde existe este factor de fluidez resulta difícil llevar a cabo un análisis cualitativo, por esta razón y por altas demandas de capacidad

integral, ha llevado a que los entrenadores recurran a métodos y herramientas diferentes a la tradicionales, que conlleva el uso de tecnología.

El uso de la tecnología moderna en los deportes de equipo para la mejora y evaluación del desempeño de los jugadores esta estandarizada y continúa creciendo a medida que aumenta la capacidad de procesamiento y la eficiencia energética, así como la disminución en el tamaño de los procesadores integrados, lo que ha creado la oportunidad de implementar algoritmos avanzados de procesamiento de señales en tiempo real en dispositivos portátiles miniatura alimentados por batería. Ya que hoy en día los deportistas pueden portar dispositivos móviles que no son invasivos, tienen un ligero peso, un bajo consumo energético y no afectan su rendimiento al llevarlos puestos, estos dispositivos son de gran utilidad ya que entre sus aplicaciones se encuentran: Monitorear parámetros fisiológicos, obtener la posición de los jugadores, obtener información del movimiento de los músculos, mandar alertas en caso de anomalías en la salud, etc. Dos aplicaciones que tienen un impacto en la mejora de los jugadores y equipos en el deporte del voleibol es la capacidad de analizar el desplazamiento de los jugadores en la cancha y obtener los signos vitales de los jugadores. La principal motivación para estos sistemas es la valiosa información que proporcionan a los entrenadores y educadores para mejorar el rendimiento de los jugadores y, en última instancia, las jugadas ofensivas y defensivas del equipo. Al mejorar las jugadas ofensivas y defensivas en un juego, se puede lograr una ventaja competitiva sobre el equipo de los oponentes [5],[6].

Uno de los primeros ejemplos de monitoreo de posición fue el que se llevó a cabo en Australia, se analizaron jugadas defensivas y ofensivas usando grabaciones de video del juego [6]. Los componentes electrónicos y la tecnología eran incómodos y voluminosos en ese momento, ya que impedían el uso de sistemas de rastreo inalámbricos intrusivos (para llevar el cuerpo). Por lo tanto, el análisis de video se propuso por primera vez para uso en deportes de equipo para el análisis de seguimiento. En [11], se señala que el salto en el análisis de la visión por computadora después del año 2000 fue lo que llevó a estos sistemas de seguimiento a los deportes de equipo. Esto coincide y es un resultado directo del avance en los sistemas de hardware y software de las computadoras. En [15], se confirmó que, a diferencia de otros deportes populares (por ejemplo, fútbol, tenis o béisbol), solo se han completado algunos

trabajos para el análisis de video de baloncesto y voleibol.

Antes del año 2000, los sistemas inalámbricos de posicionamiento en interiores para uso en el seguimiento de jugadores individuales en deportes de equipo no existían [11]. Esto se debió principalmente a:

1. La naturaleza engorrosa (factor de forma) de los componentes electrónicos disponibles que dificultaría el movimiento del jugador.
2. Las preocupaciones de seguridad para otros jugadores que surjan del uso de tales dispositivos.
3. El disgusto de usar tales dispositivos por los propios jugadores, lo que podría llevar a problemas con el rendimiento del jugador.

Como resultado del trabajo inicial, la mayoría de los sistemas de rastreo empleados en el voleibol y baloncesto están basados en tecnologías de video. La problemática con las tecnologías basadas en video es que implementan algoritmos complejos con múltiples etapas de procesamiento de computo, son exclusivas (software único para cada sistema de monitoreo) y tienen precios elevados (de hasta \$100k USD al año). Otro estándar establecido para estimar la ubicación de los jugadores es el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), sin embargo, el GPS no es adecuado para un posicionamiento en interiores preciso, por lo que tiene un alto porcentaje de error en la ubicación de jugadores de baloncesto, voleibol, balonmano y cualquier otro deporte que se desarrolla en un entorno cerrado (deportes de sala), debido a la obstrucción de la señal del techo y la pared. Además, en el GPS hay una tecnología generalizada para posicionamiento global con velocidad de medición y precisión (sin correcciones adicionales) limitada [16].

Los sistemas de posicionamiento inalámbrico en interiores basados en la propagación de señales de radiofrecuencia (RF) dependen del conocimiento de propagación del canal de transmisión subyacente y de las características del entorno interior. La necesidad de conocimientos de propagación de señales estáticas y no estáticas en estos entornos sigue siendo importante hoy en día y es altamente valorada para una variedad de entornos interiores. Se han realizado

estudios sobre técnicas inalámbricas de posicionamiento en interiores y modelos de propagación [17],[18],[19], que ayudan a los ingenieros en el diseño de sistemas de monitoreo de posición, desafortunadamente, no existe un modelo empírico o una técnica de posicionamiento adecuada para todos los ambientes interiores. Esto se debe principalmente a la variación en la posición, la forma de los objetos y superficies entre un entorno y el siguiente. La variación desconocida en la interferencia de trayectoria múltiple, dispersión y desvanecimiento de transmisión dificultan los algoritmos necesarios para producir un modelo de propagación universal y un sistema de seguimiento interior para todos los ambientes interiores. Esto ha llevado a la mayoría de los sistemas de posicionamiento en interiores que emplean técnicas elaboradas y costosas para superar los problemas inherentes a las rutas múltiples que resultan de estos objetos. En contraste, el área de juego utilizada por algunos deportes de equipo de élite de interior está libre de estos objetos interferentes y variables, a excepción de los jugadores y los propios árbitros. Sin un problema significativo de rutas múltiples, se pueden emplear técnicas de posicionamiento menos complicadas y se pueden reducir los costos de desarrollo e implementación del sistema [11].

Dado que el diseño del área de juego de la cancha de voleibol sigue especificaciones internacionales y se repite en cientos de lugares en todo el mundo, existe la posibilidad de producir un sistema general de posicionamiento para jugadores de voleibol, o para algún otro deporte que utilicen un área de juego interior similar. Un sistema de seguimiento de jugadores de señal de RF inalámbrico en el interior proporcionará información valiosa comparable a los sistemas empleados en ambientes exteriores, en particular [6],[11],[15],[18]:

- Optimizar y desarrollar jugadas defensivas y ofensivas.
- Analizar el desplazamiento de los jugadores con el registro de la información almacenada.
- Facilitar el crecimiento del jugador, tanto mental como físicamente, para entrenadores profesionales y educadores de clubes deportivos juveniles.

Con el uso de un sistema de posicionamiento de señal RF inalámbrico en deportes de sala, el atleta usa una pequeña baliza o sensor inalámbrico como parte del sistema de posi-

cionamiento y seguimiento con muy poca intrusión en el jugador. La tecnología en sensores inalámbricos también ha acumulado un impulso significativo en la investigación en los últimos años, donde se puede derivar información adicional de otros atributos físicos. Esto proporciona una oportunidad de innovación para expandir el sistema de posicionamiento de jugadores de voleibol con más datos valiosos como la información fisiológica del jugador para su análisis y uso, que no se puede lograr en los sistemas de seguimiento basados en video. Al proporcionar un sistema de seguimiento de jugadores costo-efectivo para canchas cerradas, el sistema estará disponible para todas las escuelas, clubes y sociedades de todo el mundo sin los límites de costos altos impuestos por los sistemas comerciales actuales [20].

1. Deportes de sala, la importancia en la evaluación del desempeño de jugadores profesionales y las redes de área corporal.

1.1. Competitividad en los deportes modernos

Actualmente los deportes modernos son muy competitivos, lo que ha llevado a demandas altas de capacidad integral hacia los jugadores por parte de los entrenadores. Por ende, la necesidad de herramientas y técnicas de entrenamiento en los deportes es un requisito establecido para los entrenadores y formadores educativos, ya que buscan nuevas formas de mejorar el rendimiento y competitividad de cada jugador y de su equipo en general para obtener la victoria del partido. La sociedad actual demanda profesionales capaces de impactar, transformar y mejorar las pocas y limitadas herramientas tecnológicas para la evaluación en el desempeño de jugadores en deportes de sala como el voleibol [20].

1.2. El voleibol como deporte de sala

El voleibol fue creado en 1895 por William G. Morgan (1870 - 1942), director de educación física del YMCA (Young's Men's Christian Association) y bajo la influencia de James Naismith, quien en 1891 había creado el baloncesto, surgió este gran deporte individual y las estructuras propias del juego en equipo. Algunos momentos importantes en la historia del voleibol se resumen en la siguiente tabla [21].

Tabla 1.1: Lista de eventos en la historia de voleibol

Eventos importantes en la historia del voleibol
1885 - Creación del juego mintonette
1886 - Cambio de nombre a voleibol
1947 - Creación de la federación internacional de voleibol (FIVB)
1947 - Inclusión del voleibol en los juegos olímpicos de Tokio
2018 - El voleibol cuenta con alrededor de 900 millones de seguidores en el mundo

El organismo que representa la autoridad suprema del voleibol en todo el mundo es la Federación Internacional de Voleibol (FIVB) [21], fundada el 20 de abril de 1947 en Paris, Francia. La FIVB es una organización no lucrativa, cuya finalidad es desarrollar el voleibol en todo el mundo a través del control, promoción y otorgación de competencias internacionales, cursos, conferencias y otras actividades deportivas educacionales.

El voleibol es un deporte colectivo, jugado por dos equipos de 6 jugadores, en una cancha con forma rectangular de 18m x 9m, rodeado de una zona libre de por lo menos 3m, como en la figura 1.1.

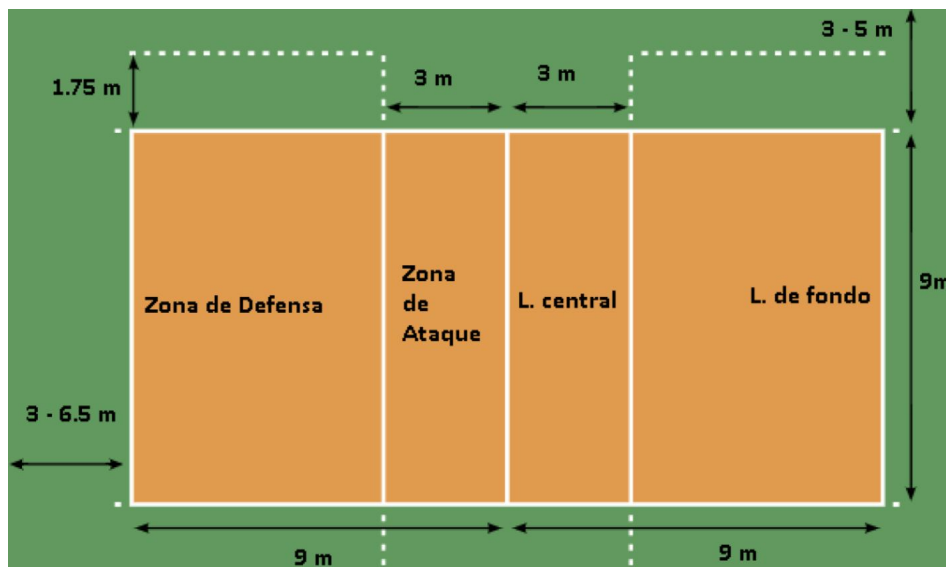


Figura 1.1: Cancha tradicional de voleibol (FIVB)

La cancha está dividida en 2 campos iguales por una línea central, sobre la cual se coloca una red que tiene una altura que depende de los deportistas que realicen el juego, que

corresponde a 2.43 m para hombres y 2.24 m para mujeres. El objetivo de los jugadores es enviar, sin cometer faltas, el balón por encima de la red al suelo del campo contrario (las líneas del campo están dentro del terreno de juego) para marcar 1 punto, cuando un equipo supera los 25 puntos con ventaja de dos sobre el puntaje del equipo adversario, se le declara ganador de un set. El equipo que acumule 3 sets seguidos ganados consigue la victoria, en el caso de ir empatados en 4 sets, los equipos deberán disputarse el gane en un quinto set, pero únicamente acumulando 15 puntos. La duración de los partidos de voleibol está determinada por el número de sets jugados [21].

El balón que es esférico (65 - 67 cm de circunferencia), de color uniforme y claro, se pone en juego con un saque ejecutado por el jugador zaguero derecho colocado en la zona de saque. El balón debe ser golpeado con una mano y enviado directamente al campo contrario para pasarlo sobre la red, dentro de los límites laterales (definidos por dos varillas o antenas que se elevan por encima de la red). El balón solo puede ser tocado con las manos o brazos [21].

Cada equipo tiene derecho a dar 3 toques al balón (además del bloqueo) para impedir que el balón toque el suelo de su propio campo y enviarlo al campo contrario por encima de la red. Al primer toque del balón se le llama recepción de saque, el segundo toque o pase de colocación lo realiza el jugador que organiza el juego de ataque (llamado colocador), el tercer y último toque el jugador debe mandar el balón al campo contrario realizando un remate, con él se consigue la mayor eficiencia en el ataque, de tal forma que las palabras ataque y remate tienden a ser utilizadas indistintamente.

Los sistemas defensivos son las distintas posiciones iniciales que adoptan los jugadores en el campo para defender el ataque adversario. El bloqueo constituye la acción principal de la defensa en la red contra el ataque del adversario. Por defensa en campo o defensa de la segunda línea se entiende la recepción de balones que no logra salvar el bloqueo (remate, fintas, rechazos, etc.) y que corre a cargo de jugadores zagueros o aquellos que no participan en el bloqueo.

En el voleibol se distinguen dos situaciones básicas en las que se puede encontrar un

equipo:

- El contrario posee el derecho de saque; el equipo propio intenta recuperar el pase o impedir que el contrario marque puntos ello tiene lugar en las fases del juego de la recepción, la construcción del ataque y el apoyo al ataque.
- El equipo propio posee el derecho de saque e intenta marcar puntos, son las bases de juego del bloqueo, la cobertura del bloqueo y la defensa del campo.

Las consideraciones generales en el voleibol se muestran en la tabla 1.2 [22].

Tabla 1.2: Lista de consideraciones generales en el voleibol

Consideraciones generales en el voleibol
Un jugador, salvo en el bloqueo, no puede tocar el balón 2 veces consecutivas.
El balón continua en juego mientras no toca el suelo, los muros ni otro objeto hasta que el jugador comete falta.
El set podrá prolongarse hasta un máximo de 17 puntos finalizando con el resultado de 17-16.
Anota un punto el equipo que esté sacando y consigue que el balón caiga en el campo contrario. Si cae en su campo, el adversario consigue el derecho al saque y debe mover a sus jugadores a una posición efectuando una rotación en el sentido de las manecillas del reloj.

Algunos ejercicios de desplazamientos sin balón son los siguientes [22]: El saque, la recepción del saque, sistemas de recepción, pase de colocación, el remate, el bloqueo la defensa en campo, los sistemas defensivos, apoyos al ataque y fundamentos de la táctica de equipo.

1.2.1. Posicionamiento en el voleibol

Un aspecto en el que toma importancia el monitoreo de posición y desplazamiento de jugadores de voleibol es en la rotación que obliga el reglamento (cada vez que hay un cambio de saque los jugadores están obligados a rotar o cambiar de lugar), donde es necesario tener

en cuenta 26 cómo se van a situar los jugadores en el campo (rematadores y colocadores) en la rotación inicial para que exista un equilibrio entre la línea de ataque y defensa permitiendo una adecuada colocación para realizar un buen gesto técnico, así como se observa en la figura 1.2, donde cada jugador es representado con un número y se debe ubicar en un determinado cuadrante.

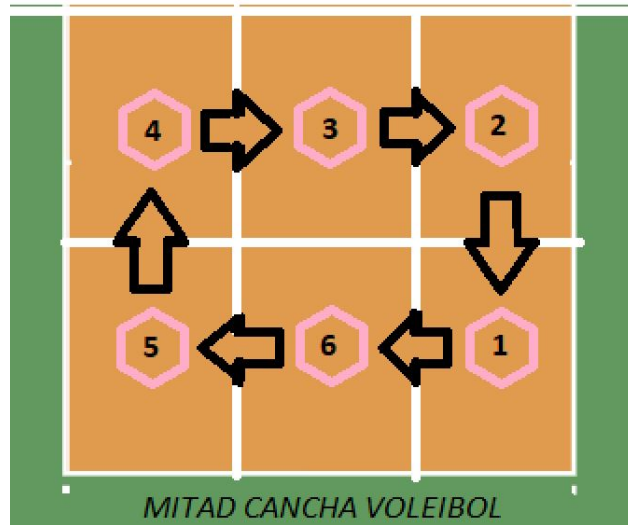


Figura 1.2: Posición y desplazamiento de los jugadores dentro de la cancha de voleibol [16].

En el voleibol un jugador debe cumplir con una posición fundamental y con desplazamientos [22].

- La posición fundamental es la actitud que adopta todo jugador que se dispone a recibir un balón, bien sea de un compañero o del campo contrario. Es imprescindible y necesario adoptar la posición fundamental antes del contacto con el balón, ya que en el momento del pase es imposible realizar la menor rectificación de la posición, con peligro de cometer falta. En esta posición el jugador debe colocar sus pies, piernas, tronco y sus brazos de forma específica.
- Todas las acciones con balón en el voleibol van precedidas de un desplazamiento. Éste se define como la traslación que ejecutan los jugadores del lugar donde se encuentran hasta el lugar donde deben tocar el balón, permitiendo una adecuada colocación para realizar un buen gesto técnico.

En el presente proyecto la investigación se enfoca más en el desplazamiento de los jugadores en la cancha; La buena técnica de desplazarse con rapidez en formas diferentes en el voleibol aseguran el éxito de todos los gestos técnicos, sin embargo, para el entrenador muchas veces resulta difícil analizar el desplazamiento de los jugadores por la gran rapidez de estos. En el desplazamiento se deben tener las siguientes características mostradas en la tabla 1.3 [22].

Tabla 1.3: Aspectos a tener en cuenta en el desplazamiento de jugadores en el voleibol.

Características en el desplazamiento de los jugadores.
La detención después del desplazamiento (se debe golpear el balón de forma equilibrada y nunca en movimiento).
Finalizar el desplazamiento en una posición específica según el gesto técnico a realizar.
Poseer una gran variedad en desplazamientos (adelante, atrás, lateral), así como cambio de dirección y sentido.
Desarrollar la cualidad física de la velocidad.

1.3. Monitoreo de posición

En el voleibol un jugador debe tener postura, posición y desplazamientos específicos [22]. Además de la rotación que obliga el reglamento, otro aspecto donde el monitoreo de desplazamiento de jugadores de voleibol es vital, es en el desarrollo y aplicación de jugadas de ataque y defensa, un ejemplo es el sistema de ataque más usual con 2 colocadores y 4 rematadores situados de forma diagonal, el entrenador debe cerciorarse que los jugadores cumplan con una correcta colocación y desplazamiento [22], como se observa en la figura 1.3:

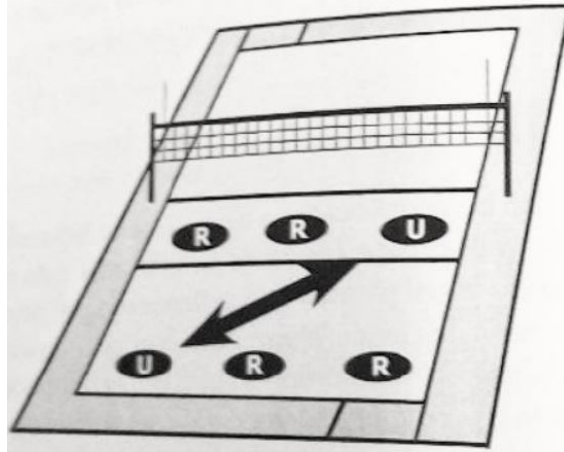


Figura 1.3: Sistema de ataque 4 :2 o llamado 6-2 [22].

Mientras que para la parte defensiva una jugada muy efectiva es aquella donde se utiliza bloqueo doble y cuatro jugadores para la defensa en campo como se observa en la figura 1.4:

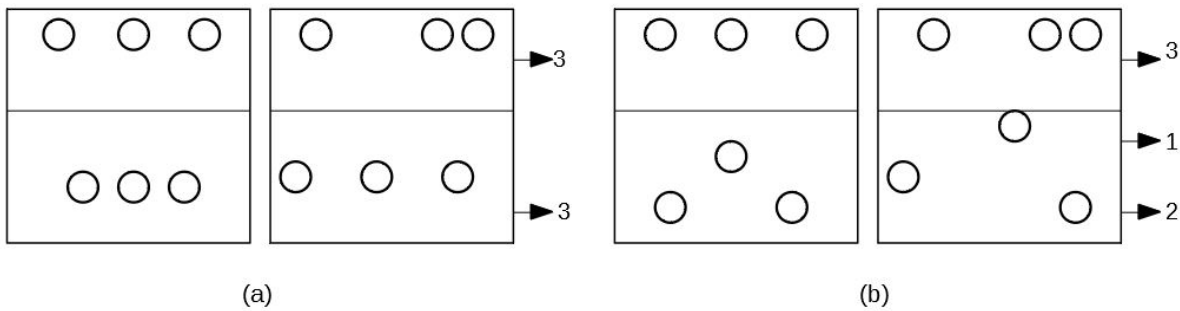


Figura 1.4: (a) Sistema de defensa 3-2-1 y (b) Sistema de defensa 3-1-2 [22].

Debido a la dificultad de analizar el desplazamiento de los jugadores por su gran velocidad, se han propuesto múltiples herramientas para el monitoreo de posición y desplazamiento que como ya se mencionaron, resultan costosas, poco accesibles y con retos al momento de implementarlas.

1.4. Monitoreo de signos vitales

Para mediados del siglo XIX, la palabra fisiología ha implicado el uso de métodos experimentales, así como técnicas de las ciencias físicas para investigar las causas y mecanismos de las actividades de los seres vivos [23].

De estos métodos experimentales y observaciones científicas se fueron clasificando aquellas características físicas y químicas medibles en un ser vivo y que se relacionaran directamente con el estado de salud del mismo. Siendo así los parámetros fisiológicos, aquellas variables físicas medibles en los seres vivos que permiten hacer una correlación con el estado de salud. De ellos, los signos vitales son los parámetros básicos utilizados en la evaluación clínica de un paciente durante un examen médico [24].

Los signos vitales expresan de manera inmediata los cambios funcionales que suceden en el organismo, cambios que de otra manera no podrían ser cuantificados. Los signos vitales principales que los médicos y los profesionales de la salud examinan de forma rutinaria son: la frecuencia respiratoria, frecuencia cardíaca, temperatura corporal, presión arterial y saturación de oxígeno. La temperatura corporal es una dimensión física que representa la capacidad del organismo de generar y eliminar calor, la frecuencia respiratoria representa el número de ciclos respiratorios que comprende exhalación e inhalación en un minuto, la frecuencia cardíaca es el número de veces que el corazón se contrae en un minuto, la saturación de oxígeno indica el nivel de oxigenación de la sangre y la presión arterial representa la presión que ejerce la sangre sobre las paredes arteriales, en este caso existen dos tipos de medidas de presión: la presión sistólica, que es la presión de la sangre debida a la contracción de los ventrículos, y la presión diastólica, que es la presión cuando los ventrículos se relajan [25].

1.4.1. Métodos de medición de signos vitales en el voleibol.

En el voleibol, el monitoreo de los signos vitales de los jugadores aportan información útil a los entrenadores y/o educadores [10],[26] sin embargo, existe un número limitado de sensores comerciales de signos vitales que puede utilizar un jugador de voleibol, ya que los sensores de signos vitales que puede portar un jugador debe cumplir una serie de propiedades como lo son: No invasivo, peso ligero (menor a 100 g), que no afecte el desempeño del jugador y que sea móvil (alimentado por baterías). Como se observa en la tabla 1.4 los sensores de signos vitales comerciales que puede portar un jugador de voleibol actualmente son de frecuencia cardíaca, temperatura corporal y oximetría de pulso.

Tabla 1.4: Signos vitales que se pueden medir en los jugadores de voleibol.

Signos vitales	Unidad	¿Existen sensores comerciales para deportistas?	¿Disponibilidad de sensores no invasivos?	¿Afectan en el desempeño del jugador?
Frecuencia cardíaca	Latidos por minuto	si	si	no
Frecuencia respiratoria	Respiraciones por minuto	si	no	si
Presión arterial	Sistólica y Diastólica (mmHg)	si	si	si
Temp. corporal	Grados Centígrados	si	si	no
Oximetría de pulso	%SpO2	si	si	no

El porcentaje de saturación de oxígeno arterial y la frecuencia cardiaca se pueden obtener por métodos no invasivos indirectos (que son de interés al monitorear la actividad fisiológica de los deportistas) por medio de la oximetría. La oximetría básicamente es la interpretación de la coloración sanguínea que depende de la saturación arterial de oxígeno (%SpO2). Un oxímetro de pulso mide la absorción de luz de longitudes de onda específicas que dependerá

de la proporción existente entre la hemoglobina oxigenada u oxihemoglobina y la hemoglobina desoxigenada. La luz pasa a través de un lecho vascular arterial pulsátil [27].

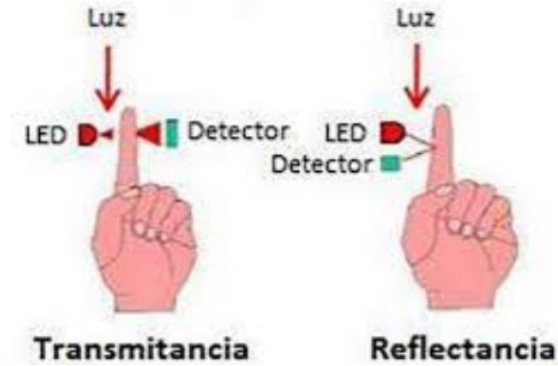


Figura 1.5: Técnicas de oximetría [27].

En general, un oxímetro utiliza dos longitudes de onda generadas por un diodo (LED) que son detectadas por un fotodetector para realizar mediciones de saturación de oxígeno en la sangre. Un LED emite una longitud de onda aproximada al rojo, que es absorbida principalmente por la hemoglobina desoxigenada, mientras que un segundo LED emite una longitud de onda aproximada al infrarrojo cercano y es absorbida por la oxihemoglobina, ver figura 1.5. Los LEDs prenden y apagan a través de pulsos secuenciales y el fotodetector es sincronizado para hacer simultáneamente la lectura de la transmisión roja e infrarroja [27].

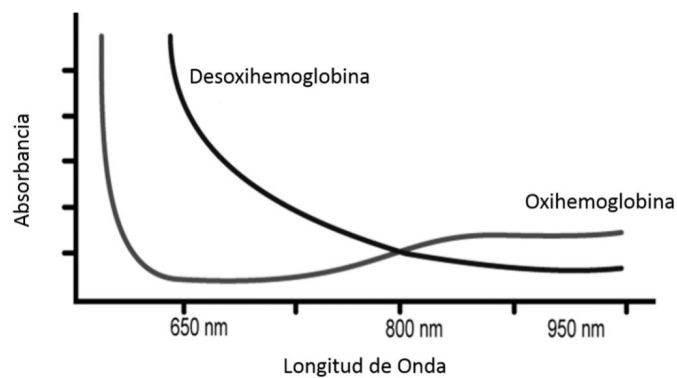


Figura 1.6: Diagrama de absorción de la oxihemoglobina y desoxihemoglobina [27].

Los dispositivos de oximetría se pueden dividir en dos métodos de espectrofotometría

para recibir la señal fotopleletismográfica, transmitancia y reflectancia. La espectrofotometría está basada en dos leyes, la Ley de Beer que describe la atenuación de la luz que viaja a través de un medio uniforme donde se tiene una sustancia absorbente y la ley de Lambert donde se dice que la cantidad de luz que incide perpendicularmente sobre un medio decrece exponencialmente con el espesor del medio. La ley de Beer-Lambert en conjunto indica que la atenuación depende de la concentración de las moléculas absorbentes y de la longitud del trayecto. Obteniendo las amplitudes de las señales de oxihemoglobina y desoxihemoglobina se realiza una relación entre ellas [28].

$$R_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{\frac{\lambda_{1AC}}{\lambda_{1DC}}}{\frac{\lambda_{2AC}}{\lambda_{2DC}}} \quad (1)$$

$$R_{\lambda_3, \lambda_2} = \frac{\frac{\lambda_{3AC}}{\lambda_{3DC}}}{\frac{\lambda_{2AC}}{\lambda_{2DC}}} \quad (2)$$

Donde $\lambda_1 = 740\text{nm}$, $\lambda_2 = 850\text{nm}$, $\lambda_3 = 940\text{nm}$ y R es el radio de absorción. AC corresponde a la componente pulsante de la señal fotopleletismográfica y DC la banda base de la señal fotopleletismografica. R corresponde al radio de absorción. Esta relación nos da una aproximación a los niveles de oxígeno en la sangre, pero se requiere una calibración para obtener un valor de interés. Además, al obtener la señal de fotopleletismogarma, ver figura 1.7., que representa la forma de onda de la oxigenación arterial se pueden medir los cambios de volumen como consecuencia de las variaciones del flujo sanguíneo, por ende, se puede obtener la frecuencia del pulso (frecuencia cardíaca) [29].

Monitorear el porcentaje de oxígeno en la sangre le permite a un entrenador detectar si algún jugador tiene síntomas prematuros de hipoxia o alguna patología pulmonar, en cuanto a la frecuencia cardíaca, un corazón normal en reposo late entre 40 y 100 veces por minuto (LPM). Un entrenador puede monitorear si este rango de latidos por minuto es normal en sus jugadores o si es que presentan o presentaron síntomas de taquicardia (valores cercanos a los 100 LPM) o bradicardia (valores inferiores a los 40 LPM) durante las sesiones de entrenamiento [25], [30].

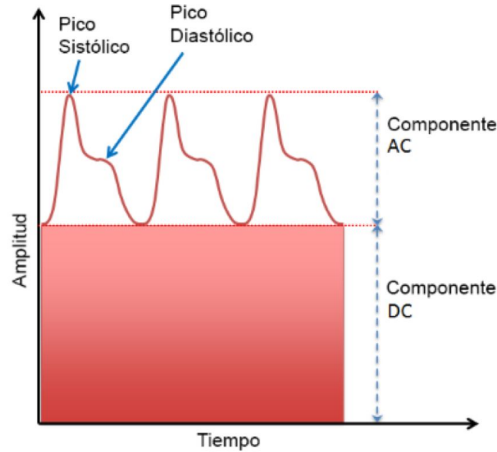


Figura 1.7: Señal pletoisomográfica obtenida por un oxímetro [29].

Con respecto a la temperatura corporal, el rango normal para la temperatura corporal central fluctúa entre 36.5 grados C y 37.2 grados C. No obstante, la temperatura corporal central varía en función de la hora del día o si el individuo realiza alguna actividad física. Los métodos de medición de la temperatura corporal central pueden clasificarse según si son invasivos o no. Un método muy útil para monitorear la temperatura corporal en deportistas es mediante la medición de la temperatura directamente en la piel de forma no invasiva, que puede realizarse gracias a la tecnología de termistor. Un termistor estima temperatura a través de los cambios de resistencia provocado por la variación de calor. La ventaja de implementar un termistor permite usarse en conjunto con dispositivos electrónicos, por lo que un sensor de temperatura corporal usa un termistor en conjunto con un convertidor analógico-digital (ADC). Monitorear la temperatura corporal de los jugadores le permite al entrenador detectar problemas de metabolismo y síntomas de fiebre [25], [30].

1.5. Monitoreo de posición para jugadores de voleibol por RF.

La comunicación por medio de RF tiene lugar cuando una señal, en el rango de 3 Hz a 3 GHz, se propaga de transmisor (envía señal) a receptor (recibe señal) [31]. El conocimiento de propagación de señales de RF es crítico en el diseño de sistemas inalámbricos de

posicionamiento en entornos cerrados y, en última instancia, en la precisión de la estimación de la posición. Fenómenos como: Multi trayectoria, perdida de trayecto, difracción y desvanecimiento, dificultan los algoritmos necesarios para producir un modelo de propagación universal y un sistema de seguimiento para todos los entornos en interiores, debido a que en las comunicaciones basadas de RF no existe la línea de vista lo que provoca que la señal transmitida sufra diversos efectos antes de llegar a su destino [11],[31].

El enfoque en los sistemas de estimación de posición basado en RF fue principalmente hacia entornos cerrados como oficinas y fábricas, donde existe un desorden significativo al tener maquinas, muebles, paredes, etc., [11] estos entornos muestran incertidumbres posicionales mayores al de una cancha de voleibol debido a que los entornos deportivos cerrados como lo es la cancha de voleibol tienen un área de piso abierto donde el juego se lleva a cabo libre de objetos aparte de los jugadores mismos. Una aportación importante de las investigaciones realizadas del análisis de posición usando RF en oficinas y fabricas se presentó, cuando únicamente se analizó el desplazamiento de personas (es decir se realizaron pruebas sin objetos que interfirieran con la propagación de la señal además de las personas mismas), los resultados de este análisis informaron que existe una correlación entre la velocidad del movimiento humano y la reducción de la intensidad de la señal, por lo que la atenuación de la intensidad de la señal varía con el número de personas y su desplazamiento. Además, es posible utilizar estándares comunes de RF como lo es el IEEE 802.11 (WiFi) y el IEEE 802.15 (Bluetooth) porque el espectro de 2.4 y 5 GHz no está tan saturados en los entornos de entrenamiento deportivo [32].

1.6. Estándares de redes inalámbricas de rango corto.

Una red inalámbrica se define como dispositivos transmisores y receptores interconectados entre sí, sin conexiones físicas utilizando el espectro electromagnético. Los rangos de frecuencias más comunes en comunicaciones inalámbricas son:

- Radiofrecuencia (3 Hz - 3 GHz); es el rango que utilizan los transmisores AM y FM,

televisión digital (TDT) entre otros, las ondas electromagnéticas de RF son en general omnidireccionales y pueden atravesar obstáculos sin problemas.

- Microondas (3 GHz - 300 GHz); las microondas por lo general son direccionales por lo que son ideales para transmisiones de largo recorrido como las comunicaciones satelitales, por ejemplo.
- Infrarrojo (mayor a 300 GHz); este medio se utiliza en comunicaciones punto a punto de corto alcance debido a que no pueden atravesar obstáculos.

Las microondas a diferencia de RF e Infrarrojo no están orientadas a comunicaciones que se llevarían a cabo dentro de una cancha cerrada de voleibol, si bien el Infrarrojo y RF se pueden implementar para un sistema de monitoreo de posición en una cancha cerrada, el presente sistema tiene como finalidad usar las tecnologías y estándares basadas en RF por el gran desarrollo que han tenido en los últimos años.

Actualmente se han desarrollado y definido varios protocolos de comunicación y estándares de tecnologías inalámbricas de radiofrecuencia orientadas a redes WPAN (redes de área personal orientadas hasta 10 m). La red de sensores inalámbricos, la red inalámbrica de sensores corporales y la red inalámbrica de área corporal (WSN, WBSN y WBAN respectivamente). En general las tecnologías de redes inalámbricas para uso personal son implementaciones de protocolos de comunicación inalámbrica de baja potencia entre sistemas de medición y procesamiento ligados al cuerpo de un ser vivo, ya sea como implantes o como sistemas externos. La filosofía de este tipo de red inalámbrica busca distribuir en unidades independientes las tareas necesarias en la medición y el procesamiento de señales fisiológicas para facilitar así la miniaturización del sistema y reducir en lo posible la interferencia con las actividades que pueda tener desde una persona normal hasta un deportista [33],[34]. Por lo que este tipo de tecnología inalámbrica puede ser implementada en jugadores de voleibol donde es fundamental no interferir en el desempeño del jugador.

El rango de operación de aplicaciones de redes inalámbricas orientadas a área personal es de pocos metros y se caracterizan por arquitecturas a modo de estrella, en donde los nodos

de medición (módulos periféricos) se conectan de manera individual y directa a un nodo concentrador (modulo central) [33].

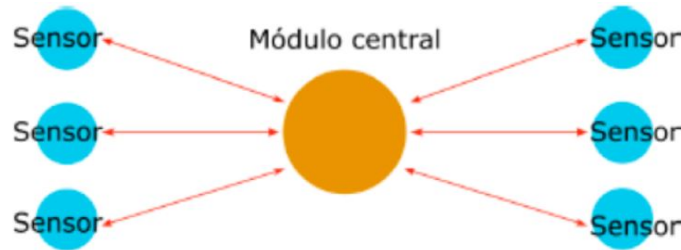


Figura 1.8: Arquitectura a modo estrella.

Por un lado, los módulos periféricos de medición requieren de autonomía suficiente para reducir la necesidad de intervención en su mantenimiento, además de soportar una comunicación inalámbrica confiable y robusta con el módulo central, tanto en la capa física de implementación como en los protocolos informáticos. Por su parte, el módulo central debe permitir que los módulos periféricos se conecten. Los principales estándares de comunicación de rango corto que se pueden utilizar en este tipo de redes inalámbricas de área personal son las siguientes [33].

Tabla 1.5: Principales estándares de comunicación de rango corto.

Principales estándares de comunicación inalámbrica de rango corto 1 a 20 m.
WiFi o WLAN de la familia IEEE 802.11 IEEE, 2012b
Bluetooth IEEE 802.15.1 IEEE, 2005
Bluetooth de baja energía IEEE 802.15.1
ZigBee IEEE 802.15.4 IEEE, 2011
ZigBee de banda Ultra Ancha (UWB) IEE 802.15.4a IEEE, 2007

1.6.1. ZigBee

IEEE 802.15.4 es un estándar diseñado para redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos (LW-WPAN), este estándar está basado en la pila de protocolos del modelo OSI (Open System Interconnection) que define la capa física y la capa

de control de acceso al medio (MAC); la capa física se encarga de activar y desactivar el radio transceptor, realiza la selección de canales junto con el control de consumo y de la señal, mientras que la capa MAC proporciona dos tipos de servicios, el servicio de datos y el servicio de control, regula el acceso al canal de la red, controla la validación de las tramas y la asociación entre nodos además de garantizar ranuras de tiempo; ZigBee Alliance es una organización que ha desarrollado el estándar ZigBee basado en el IEEE 802.15.4. [33],[34].

1.6.2. Bluetooth

Bluetooth está basado en el protocolo IEEE 802.15.1 que representa un sistema de comunicación de corto alcance, la interfaz de radio utiliza por lo general una antena de 1 mW de potencia y ganancia de 0 dB, su tasa de transmisión va desde 1 Mb/s a 4 Mb/s; su modo de operación es del tipo maestro/esclavo, el término piconet se refiere a la red formada por un dispositivo principal denominado maestro y todos aquellos que se encuentren conectados dentro de su rango llamados esclavos [33],[34].

1.6.3. WiFi

WiFi es el nombre de la certificación otorgada por la Wi-Fi Alliance, que garantiza la compatibilidad entre dispositivos que utilicen esta tecnología, WiFi está basado en el estándar 802.11, este estándar permite un ancho de banda de 1 a 2 Mbps, sin embargo, este ancho de banda se ha optimizado con los estándares 802.11a, 802.11b, 802.11g, etc, que representan una modificación al estándar 802.11 operando con velocidades de transmisión de datos diferente. Con esta tecnología se pueden crear redes de alta velocidad siempre y cuando el equipo conectado este cerca del punto de acceso, los dispositivos conectados a este tipo de red deben tener prioridades de conexión de 11 Mbps o superior dentro de un radio de 20 m a 50 m en entornos cerrados o un radio de cientos de metros al aire libre [33],[34].

Tanto como ZigBee, WiFi y Bluetooth operan en una frecuencia de 2.4 GHz [33],[34].

De manera general el funcionamiento de una red de área personal consiste en que el módulo central, al obtener la información de los módulos periféricos se conecte con un sistema intermedio, como una computadora, que puede transmitir esta información a una nube informática o ser procesado de manera local en una misma PC. En la figura 1.9 se muestra un diagrama de una conformación basándose en una red inalámbrica de área personal.

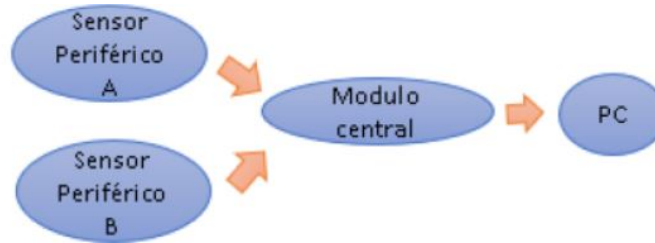


Figura 1.9: Funcionamiento de una red inalámbrica de área corporal.

1.7. Beacon

Una señal muy común que es emitida tanto por el módulo concentrador como por los módulos periféricos es el beacon, él cual es una señal de broadcast emitida por un transmisor de radiofrecuencia; una señal de broadcast consiste en una señal que puede ser recibida por una multitud de nodos receptores de manera simultánea, sin necesidad de reproducir la misma transmisión nodo por nodo. En general un beacon es emitido por un dispositivo configurado como punto de acceso (AP), mientras que una baliza representa un objeto señalizador, un punto de acceso representa dispositivo que ejerce funciones de puente entre una red [11]. Un beacon contiene toda la información sobre la red y son transmitidos periódicamente para anunciar su presencia. El contenido de información y la transmisión periódica dependen del protocolo de comunicación. Para el protocolo de comunicación IEEE 802.11 (WiFi), la información del beacon se representa en una trama (frame), la trama del beacon WiFi consta de una cabecera MAC adress, un cuerpo y un FCS y su tamaño es aproximadamente de 48 bytes, aunque varía dependiendo la versión del IEEE 802.11a/b/g/n/ac.[34].

Los beacons se envían en un intervalo predeterminado de 102.4ms, pero este puede variar y modificarse en la mayoría de los productos WiFi IEEE, 2012b.

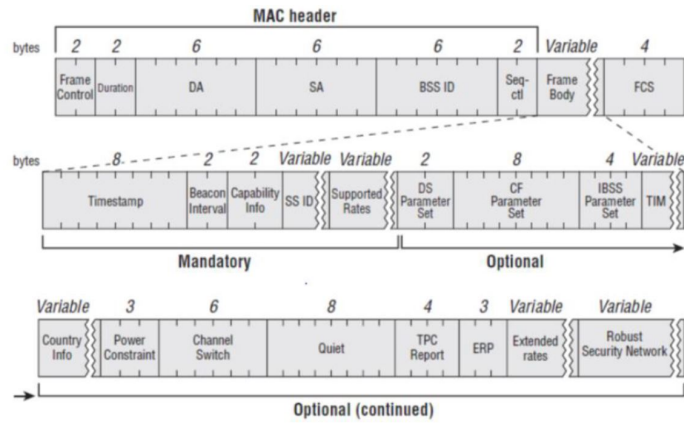


Figura 1.10: Trama Beacon WiFi IEEE, 2012b.

Para el protocolo de comunicación IEEE 802.15 (Bluetooth), la información del beacon se representa en una trama similar al protocolo IEEE 802.11, la diferencia es que la trama beacon de Bluetooth suele ser de menor tamaño a diferencia de la trama de WiFi.

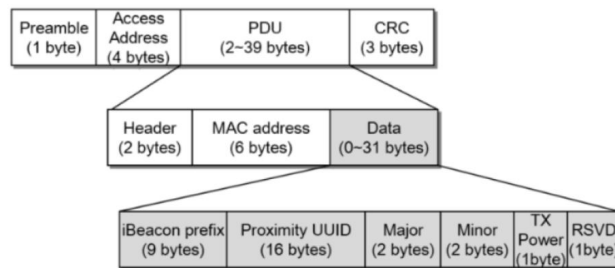


Figura 1.11: Trama Beacon Bluetooth IEEE, 2005.

Los parámetros que destacan tanto de la trama beacon de WiFi y Bluetooth son SSID y RSSI, el dispositivo receptor del beacon puede interpretar estos parámetros, el parámetro SSID indica el nombre del dispositivo que está emitiendo el beacon, mientras que el parámetro RSSI, indica la potencia de la señal recibida con respecto al dispositivo emisor del beacon. Ambos parámetros serán clave en el funcionamiento del sistema de monitoreo de jugadores de voleibol.

2. Monitoreo de posicionamiento y signos vitales en entornos cerrados por medio de radiofrecuencia.

2.1. Visión general de las técnicas y tecnologías de posicionamiento en interiores.

Para determinar la posición de un usuario, las dos técnicas más comunes de posicionamiento utilizadas son las propiedades de la señal y los algoritmos de posicionamiento, que se muestran en la tabla 1.2 [35].

Tabla 2.1: Clasificación de Técnicas de posicionamiento en interiores [35].

Propiedades de la señal	Algoritmos de posición
Ángulo de arribo (AoA)	Triangulación
Tiempo de llegada (ToA)	Trilateración
Diferencia de Tiempo de llegada (TDoA)	Multilateración
Intensidad de señal recibida (RSS)	Proximidad, Multilateración

Los sistemas de posicionamiento pueden clasificarse según la medición de la señal y/o las técnicas que emplean. Las propiedades de la señal son parámetros geométricos que consisten en métricas como el ángulo, la distancia y la señal para estimar la posición de un objeto utilizando algoritmos. Las técnicas prevalecientes son el ángulo de llegada (AoA), el tiempo de llegada (ToA), la diferencia de tiempo de llegada (TDoA) y el indicador de intensidad de señal recibida (RSSI).

2.1.1. Ángulo de arribo

AoA es el ángulo y la distancia calculados en relación con dos o múltiples puntos de referencia a través de la intersección de líneas de dirección entre los puntos de referencia. El cálculo del ángulo y la distancia se utilizan para estimar y determinar la posición de un transmisor, y la información se utiliza para seguimiento o para fines de navegación. El hardware tiende a ser complejo y costoso. La figura 2.1 muestra el método de posicionamiento AOA [35],[36].

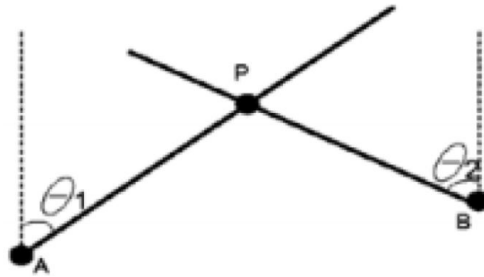


Figura 2.1: Ángulo de arribo [35].

2.1.2. Tiempo de arribo

Mientras que la medición de AoA se basa en ángulos, la medición de TOA se basa principalmente en la distancia. A veces, ToA se denomina tiempo de vuelo (ToF). Esto se debe a que ToA es el tiempo que tarda una señal en llegar a un receptor desde un transmisor fijo, con el transmisor como punto de referencia. Por otro lado, TOF es el tiempo que tarda una señal en despegar de un transmisor a un receptor, con el receptor como punto de referencia. Por lo tanto, ToA y ToF son iguales porque el tiempo en ambos casos es el mismo. La medición del ToA de una señal es un método robusto para estimar distancias que se usa, entre otros, en GPS. ToA proporciona alta precisión, pero a un costo de mayor complejidad de hardware [35],[36].

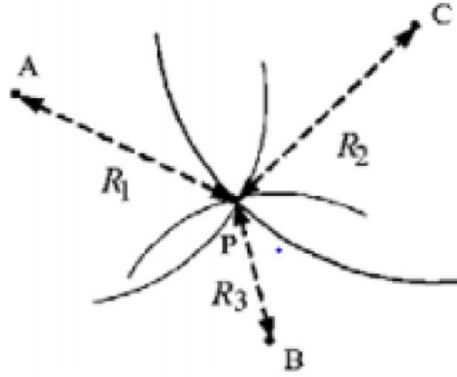


Figura 2.2: Tiempo de arribo [35].

2.1.3. Diferencia de tiempo de arribo

Al igual que ToA, TDoA también se basa en la distancia. TDoA determina la posición relativa de un transmisor móvil según la diferencia en el tiempo de propagación de la llegada del transmisor y los múltiples puntos de referencia o sensores. En otras palabras, TDoA mide la diferencia en ToA en dos sensores diferentes y, por lo tanto, elimina la necesidad de saber cuándo se transmitió la señal. Como una mejora en ToA, TDoA elimina la modificación del transmisor para el tiempo de llegada absoluto, y por lo tanto reduce su complejidad, sin embargo es un método muy costoso [35],[36].

Tanto TDoA y ToA resultan difíciles de implementar en un entorno deportivo cerrado como en una cancha de voleibol debido al tamaño de la cancha que provoca una imposible sincronización de los relojes.

2.1.4. Intensidad de señal recibida

A diferencia de las métricas angulares y basadas en la distancia, RSSI es una medida del nivel de potencia de la intensidad de la señal recibida presente en una infraestructura de radio que se puede usar para estimar la distancia entre dispositivos móviles. En otras palabras, el enfoque de RSSI mide la atenuación de las señales transmitidas para calcular la reducción de la intensidad o la pérdida debida a la propagación, por lo tanto, la distancia entre dispositivos

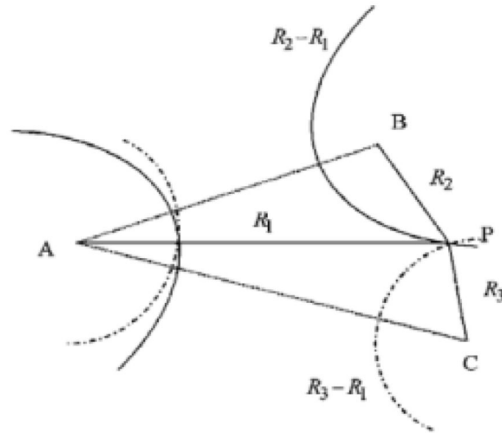


Figura 2.3: Diferencia de tiempo de arribo [35].

móviles se puede estimar. RSSI es el RSS relativo en un entorno inalámbrico; cuanto más alto sea el RSSI, mejor será la calidad de la señal. Sin embargo, en ambientes interiores donde es difícil obtener la línea de vista (LOS), el RSS y el posicionamiento pueden verse afectados por la trayectoria múltiple y el desvanecimiento de la señal, lo que reduce la precisión. La Figura 2.4 muestra el método de posicionamiento RSS y la Tabla 2.2 resume las características de las propiedades de la señal [19],[35],[36].

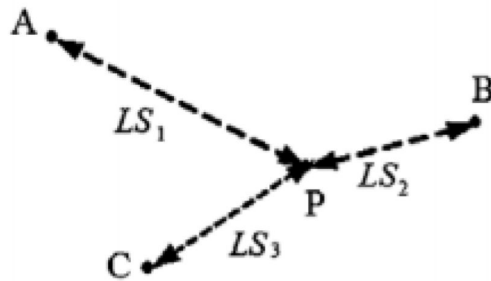


Figura 2.4: Estimación de distancia por RSSI [35].

De los parámetros anteriores, el problema de ToA y TDoA radica en que es complejo sincronizar los relojes del emisor y el receptor en un entorno de hasta 100m por 100m, la desventaja de AoA es requerir hardware adicional demasiado caro (mayor a \$1000 USD) y exclusivo.

Tabla 2.2: Características de los parámetros de estimación de posición.

Parámetro	Métrica de Medición	Pros	Contras
AoA	Ángulo	Alta precisión a nivel de cuarto	Complejo, Caro y baja precisión en áreas amplias
ToA	Distancia	Alta precisión	Complejo y caro
TDoA	Distancia	Alta precisión	Caro
RSSI	RSSI	Bajo costo	Mediana precisión

El parámetro RSSI destaca debido a que, por su facilidad de trabajo y rentabilidad, sigue siendo muy utilizada por investigadores. Las técnicas basadas en RSSI tienden a ser muy precisas en distancias cortas, pero son imprecisas cuando se aumentan unos pocos metros. En distancias cortas, las estimaciones obtienen errores de aproximadamente un 10 % en una distancia máxima de 20 metros [19].

2.2. Técnicas de Posicionamiento

Las técnicas de posicionamiento especifican cómo calcular la posición de un objeto objetivo. En otras palabras, estos algoritmos traducen las propiedades de la señal grabada en distancias y ángulos, y luego calculan la posición real de un objeto objetivo. Por ejemplo, cuando se estima la distancia entre un objeto y los puntos de referencia, el algoritmo calcula y determina la posición del objeto. Tanto la propiedad de la señal como el algoritmo de posicionamiento trabajan juntos para determinar la posición de un objeto. Por lo que un algoritmo de posicionamiento procesa la propiedad de la señal y genera una posición. La precisión de la información recopilada en la posición depende de la exactitud del valor de la propiedad de la señal. Además, los algoritmos de posicionamiento tienen ventajas y desventajas únicas, por lo que utilizar más de un tipo de algoritmo de posicionamiento puede mejorar la precisión y el rendimiento de la posición.

Las principales técnicas actuales utilizadas para estimar posición local de objetos estáti-

cos y/o móviles en redes inalámbricas son triangulación, trilateración, proximidad y huella digital (fingerprint, que se abarcará en el capítulo 4) todas ellas basadas en RF. Los sistemas de localización actuales las utilizan individualmente o combinadas.

2.2.1. Triangulación

La triangulación utiliza las propiedades geométricas de los triángulos para estimar la posición de un objeto objetivo mediante el cálculo de las medidas angulares en relación con dos puntos de referencia conocidos. La posición del objetivo se determina calculando la posición de un transmisor en función del ángulo y la distancia con respecto a los puntos de referencia. Además, los requisitos de hardware para un área de cobertura amplia tienden a ser complejos y caros [35],[36].

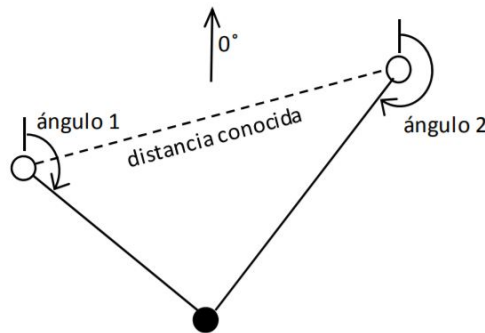


Figura 2.5: Representación de la técnica de triangulación [35].

2.2.2. Trilateración

La técnica de trilateración calcula la posición de un nodo midiendo las distancias desde él mismo hasta tres posiciones de referencia. Para calcular la posición de un nodo en dos dimensiones es necesario conocer al menos las distancias no colineales (en diferentes líneas), como se muestra en la figura 2.6 [35],[36].

De manera similar, la multilateración que es similar a la trilateración usa cuatro o más

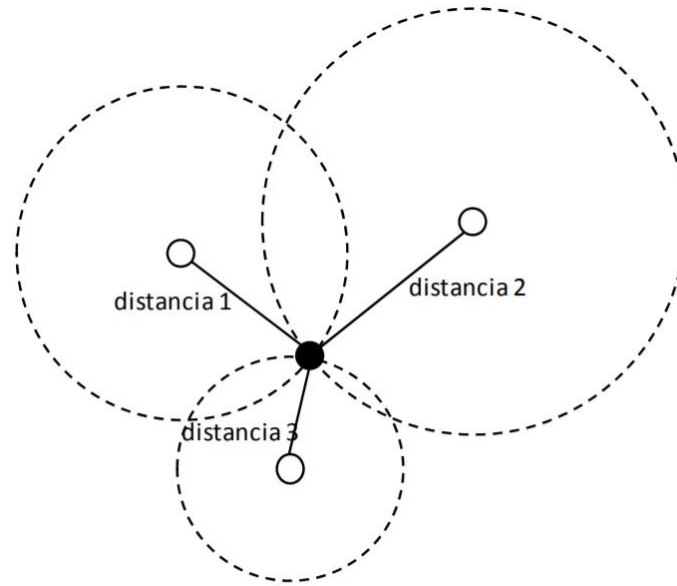


Figura 2.6: Representación de la técnica de trilateración [35].

puntos de referencia. La trilateración es un método óptimo de RF utilizado con los parámetros RSS, TDoA y ToA en entornos cerrados y permite por medio de algoritmos de propagación, estimar posición [36].

2.2.3. Proximidad

Para estimar la posición del objetivo, se utiliza una cuadrícula de antenas con posiciones conocidas. Cuando se detecta un dispositivo móvil en movimiento, la antena más cercana se usa para calcular su posición. Pero si el dispositivo móvil es detectado por más de una antena, la antena con la señal más fuerte se usa para calcular su posición [35],[36].

Al tener un problema con la única incertidumbre del desplazamiento de un determinado número de jugadores, se pueden emplear técnicas de posicionamiento menos complicadas como lo es la trilateración que además ofrece una buena precisión en la estimación de posición, aunque para lograr este objetivo es esencial realizar un estudio de propagación de señales de RF en el entorno cerrado de interés donde se implementara el sistema de monitoreo de posicionamiento que corresponde a una cancha cerrada de voleibol.

Tabla 2.3: Características de las técnicas de posicionamiento.

Algoritmo de posición	Propiedad de la señal	Pros	Contras
Triangulación	AoA	Alta precisión	Complejo y con alto costo
Trilateración, Multilateración	ToA, TDoA, RSSI	Simple, menor costo y alta precisión a nivel de cuarto	Baja precisión en áreas amplias
Proximidad	RSSI	Pocos dispositivos	Baja precisión

2.3. Algoritmos basados en RSSI para estimar distancias

Actualmente existen muchos modelos de propagación orientados a entornos cerrados. El modelo de propagación en el espacio libre generalmente se puede usar para predecir la intensidad de la señal recibida bajo la condición de la propagación de la señal sin ningún blindaje y reflector en el camino de transmisión, y la potencia de la señal recibida se puede expresar en la ecuación 3 [37].

$$P_d = \frac{P_t * G_t * G_r * \lambda^2}{4\pi^2 * d^2 * L} \quad (3)$$

En la ecuación 3, d es la distancia entre la antena transmisora y receptora; P_t es la potencia transmitida; G_t es la ganancia de la antena transmisora; G_r es la ganancia de la antena receptora; L es el factor de pérdida del sistema no relacionado con la comunicación inalámbrica; λ es la longitud de onda. De la ecuación 3 se puede obtener un modelo de pérdida de trayectoria libre (FSPL) que se muestra en la ecuación 4 [37].

$$P_r = P_t - 20 * \log \frac{4\pi * f * d}{c} \quad (4)$$

Donde P_r es la potencia de la señal recibida en (dBm), P_t es la potencia de transmisora en (dBm), f es la frecuencia en Hz y c es la velocidad de la luz. Como ya se mostró, la técnica de

trilateración en conjunto con el parámetro RSSI es muy útil, práctico y eficiente debido a que los únicos obstáculos en la cancha de juego son los jugadores mismos. RSSI se define como diez veces el logaritmo de la relación entre la potencia de la señal recibida y una potencia de referencia [13]. Un algoritmo para estimar distancias basado en RSSI es el de pérdida de trayectoria libre basado en el algoritmo de la distancia (LDFS), expresado en la ecuación 5.

$$RSSI = 10 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad (5)$$

Donde P es la potencia de la señal recibida y Pref es la potencia de referencia, además la potencia de la señal recibida está relacionada inversamente a la distancia, esto es:

$$RSSI \propto \frac{1}{D^n} \quad (6)$$

Donde D es la distancia entre nodos y n es el factor exponente de path loss. De la ecuación 5 y 6 se tiene que [38],[39].

$$RSSI = -10n \log(D) + C \quad (7)$$

De (7), se observa que el parámetro RSSI tiene una relación lineal con el logaritmo de distancia, donde C es una constante fija. La ecuación (7) también se puede representar como (8):

$$RSSI = -m \log(D) + C \quad (8)$$

El factor de pérdida de trayecto (n) se puede expresar como:

$$n = \frac{m}{10} \quad (9)$$

Donde m es la pendiente de la relación lineal entre RSSI y el logaritmo de la distancia; tanto como m y C son valores constantes y se pueden obtener al realizar un estudio de propagación en el entorno cerrado. Al obtener el valor de RSSI entre un transmisor y un receptor se puede estimar la distancia entre ellos, si se quiere obtener la posición en forma de coordenada es necesario implementar la técnica de trilateración [38],[39].

Otro método para estimar posición en el que puede implementar RSSI que parte de la teoría electromagnética es el trazado de rayos (ray-tracing), en este método los cálculos se realizan tomando en consideración una trayectoria directa y diferentes ondas reflejadas de las paredes como se observa en la figura 2.7. Los coeficientes de reflexión, se utilizan para estimar las atenuaciones de potencia de la onda reflejada [37].

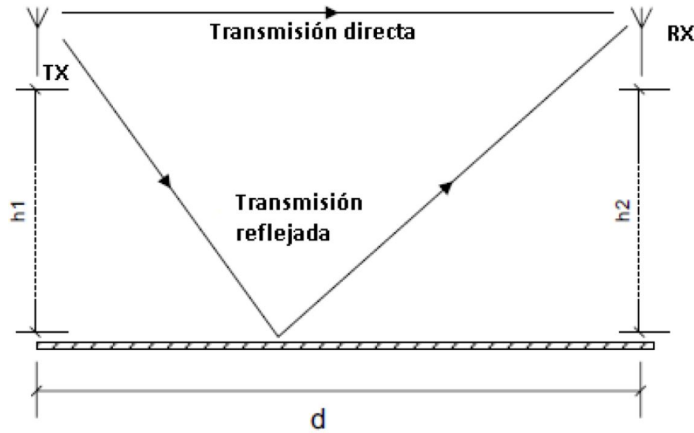


Figura 2.7: Método de trazado de rayos [37].

El algoritmo que describe el método de trazado de rayos se muestra en la ecuación (10) en el vector de polarización:

$$\Gamma = \frac{(\epsilon_r - j60\sigma\lambda)\sin(\phi) - \sqrt{\epsilon_r - j60\sigma\lambda - \cos(\phi)^2}}{(\epsilon_r - j60\sigma\lambda)\sin(\phi) + \sqrt{\epsilon_r - j60\sigma\lambda - \cos(\phi)^2}} \quad (10)$$

Donde epsilon es la constante dieléctrica, phi es el ángulo de reflexión y sigma es el parámetro de conductividad [37]. Para el presente proyecto se usará los algoritmos 4, 7 y 10 basadas en el parámetro RSS en conjunto con la técnica de trilateración para estimar la ubicación y desplazamiento de los jugadores de voleibol.

2.4. Tecnologías para los algoritmos de posición

La metodología de posicionamiento, la tecnología y los algoritmos empleados por el sistema de posicionamiento impactarán en los límites de precisión o resolución del sistema de posicionamiento. La Figura 2.8 muestra una comparación de varias tecnologías de posicionamiento, que fue proporcionada por [36] en su sumario de estudio de técnicas y sistemas inalámbricos de posicionamiento en interiores. Esta versión destaca la relación entre las tecnologías y sus precisiones de estimación de posición para un ambiente interior típico [36].

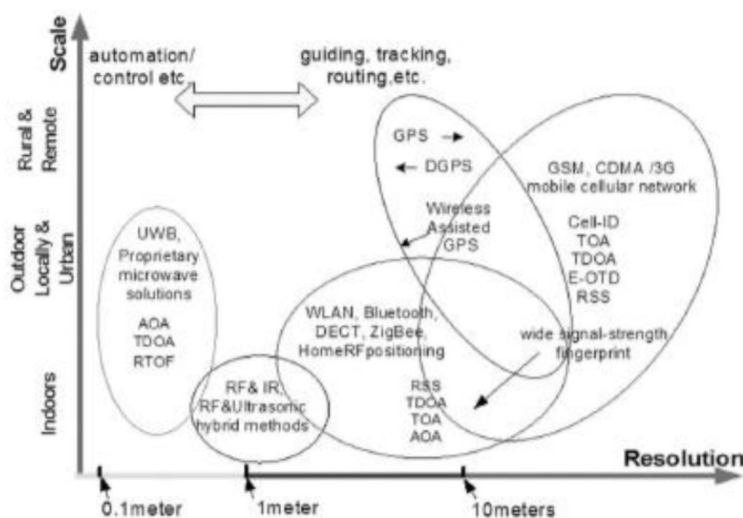


Figura 2.8: Comparación de varias tecnologías de posicionamiento IEEE 2007.

Un ambiente interior típico generalmente incluye el desorden interior que afecta la precisión del sistema de posicionamiento. Se esperaría que se pudieran obtener resoluciones más altas para una cancha de voleibol cubierta típica, ya que no se espera que el ambiente sufra problemas graves de trayectoria múltiple debido a la cantidad más pequeña de desorden. La interferencia es una fuente bien conocida para limitar la capacidad de resolución para muchas de las tecnologías de posicionamiento [11].

Las tecnologías WLAN han progresado hasta tal punto que son ampliamente utilizadas en varios dispositivos inalámbricos como PDA, computadoras portátiles, teléfonos móviles, etc. Como la mayoría de los edificios de oficinas interiores ya tienen algún tipo de archi-

tectura LAN para computadoras, el uso de redes inalámbricas. LAN se puede implementar fácilmente en la arquitectura existente a un costo significativamente menor. La WLAN no se diseñaron originalmente para la localización, pero se puede usar en técnicas de estimación de ubicación que utilizan la intensidad de señal recibida, ya que los valores de RSSI ya están disponibles y están integrados en los puntos de acceso de la WLAN (que pueden existir) como ubicaciones de referencia y unidades de medición de posicionamiento. Estos sistemas utilizan una interfaz de radio para permitir la comunicación entre los nodos de anclaje y la red. Los protocolos y estándares de radio, permiten la medición fácil de los paquetes de datos de radio que se pueden usar para estimar la distancia entre el transmisor y el receptor utilizando modelos de propagación. En todos los ambientes interiores donde hay desorden y movimiento, la precisión de las estimaciones de ubicación basadas en la intensidad de la señal de las señales WLAN se ve afectada de manera espectacular [40].

2.5. Precisión en el posicionamiento de jugadores de deportes de sala

La precisión del sistema de posicionamiento puede tener una relación directa con el costo del sistema en general. En general, para mayores precisiones, se necesitan componentes complejos de tecnología y hardware adicionales que resulten en mayores costos comerciales del sistema. Un ejemplo de esto es la sincronización de los relojes necesarios para cumplir con los requisitos de tiempo precisos para los sistemas de posicionamiento ToA y TDoA. Para la mayoría de los escenarios de localización de ubicaciones, como centros comerciales o en edificios, no es necesario lograr precisiones del orden de centímetros [40].

Para el posicionamiento y seguimiento de jugadores de deportes de sala, la precisión del posicionamiento está relacionada con el espacio horizontal que un jugador ocupa en la cancha. Obviamente, no se requeriría tener precisiones del orden de unos pocos centímetros ya que esta distancia casi nunca se realizaría entre los jugadores. La cantidad de espacio asignado a cada jugador podría usarse para determinar los requisitos de precisión del sistema de posicio-

namiento del jugador. Los jugadores de voleibol que ocupan una cierta cantidad de área en la cancha de juego, pueden estar de pie, inclinados en una postura defensiva o inclinados con el balón. Para un sistema de posicionamiento que rastrea a los jugadores de un solo equipo, una precisión de posicionamiento de 1 m por 1 m es suficiente [8], [11], [18], [20], [41].

Para un sistema que estima la posición de los jugadores de ambos equipos al mismo tiempo, se debe tener en cuenta la interacción entre los jugadores ofensivos y defensivos. En una estructura de defensa de hombre a hombre, la distancia entre los centros del torso del cuerpo varía enormemente. Sin embargo, la mayoría de las veces la distancia mínima es de aproximadamente 0.9 m. Nuevamente, una precisión mínima del sistema de ± 1 metro sería suficiente para la mayoría del tiempo de juego. En el peor de los casos, los jugadores se ubicarían en la misma posición. Sin embargo, esto podría explicarse en el procesamiento de datos posicionales. Sabríamos cuál es el jugador defensivo u ofensivo y se podría hacer un ajuste simple en la pantalla, ya que en el voleibol los jugadores que se colocan cerca de la red comúnmente están muy cerca entre si [22].

2.5.1. Estándares de comunicación inalámbricos para una red inalámbrica.

En la tabla 2.4 se muestran los estándares de comunicación inalámbricos para implementar las técnicas de posicionamiento [42].

2.6. Dispositivos transmisores de una red de área corporal.

Teniendo el dato de las dimensiones de una cancha de voleibol y las características de una red inalámbrica de área corporal, se encuentran los dispositivos [43], [44], de la figura 2.9.

Los cuales cumplen con la propiedad de ser dispositivos baratos, con velocidades de transmisión aceptables y de bajo consumo energético, la ventaja de la tecnología WiFi es ser altamente compatible con otros sistemas (WPAN), como lo pueden ser celulares, computadoras,

Tabla 2.4: Tecnologías para crear una red de área personal

Estándar	Velocidad de transmisión	Orientado a crear una red inalámbrica	Tipo de red	Dispositivos comerciales
WiFi	hasta 150 Mbps	si	LAN y WAN	ESP8266, ESP32, ESP12.
BT	hasta 4 Mbps	si	PAN	HC05, HC06, ESP32
ZigBee	hasta 0.25 Mbps	si	PAN y WAN	XBee S1, XBee S2, XBee Pro
Enhanced Shockburst	hasta 2 Mbps	si	PAN	NRF2401

entre otros; pero su desventaja reside en que utiliza una franja del espectro electromagnético que está muy ocupado, con un ancho de banda del canal de 22 MHz y con un moderado consumo energético (de hasta 300 mA). Las tecnologías ZigBee, BT y el NRF24L01 utilizan un ancho de banda del canal que no está tan saturado (0.6 MHz, 1 MHz y 1 MHz en el espectro de 2.4 GHz respectivamente), además que la implementación de estos estándares resuelve la congestión de dispositivos. Sin embargo, el NRF24L01, así como el BT y BT de bajo consumo no están orientados a implementar corrección de errores, a tener topologías tipo malla, calidad de servicio y con potencias de transmisión limitadas de 0 a 10 dBm.

Lo que nos deja con dos dispositivos que pueden ser usados para implementar una red WBAN, el módulo con tecnología inalámbrica ZigBee y el módulo con tecnología WiFi; De los cuales se encuentra el módulo XBee y el ESP8266 respectivamente, si bien el XBee tiene un menor consumo energético a diferencia del módulo WIFI, el XBee tiene un mayor costo y cuenta con menos modelos comerciales a comparación de dispositivos que cuenta con el estándar WiFi [44]; más adelante se hará un comparativa de estos dos dispositivos. Con respecto al problema del espectro ocupado, se tiene en consideración que se estimara posición sobre una cancha de voleibol cerrada durante una sesión de entrenamiento, lo que significa que no se tendrán otros dispositivos aparte de los sensores mismos, que puedan ocupar el espectro electromagnético, por lo tanto, el módulo ESP8266 y el módulo XBee S2 cumplen con todos los requerimientos del sensor propuesto, incluso no es un problema el consumo






Dispositivo	Estandar	Consumo Energía	Costo aproximado	Max. Transmisión de datos	Compatible	Alcance
 NRF2401	2.4 Ghz ISM banda	Tx 14 mA @ 3.3V	\$30 pesos	2 Mbps	2.4 Ghz ISM banda	20 m en entornos cerrados
 XBEE s2 2.4Ghz	IEEE 802.15.4 ZigBee	Tx 40 mA @ 3.3V	\$450 pesos	250 Kbps	IEEE 802.15.4 ZigBee	10 - 90 m en entornos cerrados
 ESP8266	IEEE 802.11b/g/n WiFi	Tx +19dBm 200 mA @ 3.3V	\$200 pesos	7 Mbps varía versión y protocolo	WiFi	50 m en entornos cerrados
 ESP32	IEEE 802.11b/g/n WiFi IEEE 802.15 Bluetooth IEEE 802.15.4 BLE	Tx WiFi +16dBm 190mA Tx BT/BLE 0dBm 130mA	\$160 pesos	WiFi - 7 Mbps BT - 4 Mbps	WiFi/BT/BLE	Entornos cerrados WiFi - 50m BT - 5 m
 WiPy	IEEE 802.11b/g/n WiFi IEEE 802.15 Bluetooth IEEE 802.15.4 BLE	Tx WiFi +12dBm 95mA Tx BT/BLE 0dBm 92mA	\$200 pesos	WiFi - 16 Mbps BT - 4 Mbps	WiFi/BT/BLE	Entornos cerrados WiFi - Hasta 1 Km BT - 5 m

Figura 2.9: Módulos periféricos para una red WBAN.

energético del ESP8266 debido a que la sesión de entrenamiento de voleibol solo dura aprox. 1 hora [22].

Tabla 2.5: Módulos periféricos WiFi.

Dispositivo WiFi	Interfases periféricas	Protocolos de red	Consumo energético	Tipo de antena	Potencia de la antena	Rango de frecuencia (HZ)	Alcance en entornos abiertos	Costo	No invasivo
ESP8266	UART-SDIO-SPI-I2C-I2S-IR	IPv4-TCP-UDP-HTTP	120 - 170 mA	PCB Trace	802.11 b +20 dBm, 802.11 g +17 dBm, 802.11 n +14 dBm	2400 - 2483.5 MHz	25 - 50 m	\$200	si
ESP32	UART-SDIO-SPI-I2C-I2S-IR	IPv4-TCP-UDP-HTTP-BSS	180 - 240 mA	PCB Trace, soporta antena externa	802.11b +19.5dBm, 802.11g +16dBm, 802.11n +14 dBm	2412 - 2484 MHz	25 - 50 m	\$200	si
WiPy 2.0	UART-SDIO-SPI-I2C-I2S-IR-micro SD	IPv4-IPv6-TCP-UDP-HTTP-BSS	180 - 240 mA	SMD antena de alto desempeño, soporta antena externa	802.11 b-g-n-e-i +12dBm	2412 - 2484 MHz	mayor a 100 m	\$400	si

En la tabla 2.5 se observan los módulos periféricos de WiFi comerciales para aplicaciones de monitoreo de posición, el microcontrolador ESP32 representa una mejora del dispositivo ESP8266, mientras que el dispositivo WiPy 2.0 implementa el microcontrolador ESP32 con una antena omnidireccional de alto desempeño, por lo que representa una solución óptima

para aplicaciones de monitoreo de posición en interiores, además el dispositivo WiPy 2.0 está orientado a desarrollar aplicaciones del internet de las cosas [ver anexo WiPy 2.0].

2.7. Dispositivos receptores de una red de área corporal.

En cuanto a los módulos receptores se tienen los siguientes dispositivos.


Dispositivo	Consumo Energía	Tecnologías	Seguridad	Orientado a una red WBAN	Costo	Alcance	Precisión
 <p>Dragino YUN</p>	Bajo	SPI, UART, I2C, SSH, Telnet, Serial, Ethernet	si	si	Bajo	Hasta 30 m	Baja
 <p>Modem WiFi</p>	Medio	SSH, Telnet, Serial, Ethernet	si	si	Medio	15 a 20 m	Baja
 <p>SDR</p>	Alto	SSH, Telnet, Serial, Ethernet	si	si	Alto	Hasta 120 m, depende de dispositivo.	Alta

Figura 2.10: Módulos centrales WiFi para una red WBAN.

Los dispositivos de la figura 2.10 pueden funcionar como módulos receptores centrales en una red inalámbrica orientada a WIFI, si bien el Software definido por Radio (SDR) en un módulo muy poderoso que incluso cuenta con modulaciones como OFDM que permitirían una alta precisión al momento de estimar posición, es un módulo con precio similar a los dispositivos de un sistema de monitoreo por video. En cuanto al módem WIFI y el microcontrolador con WIFI (como lo es el Dragino Yun), el menor consumo energético y el mayor alcance son críticos, estas características las cumple el módulo de Dragino Yun. El módulo esta basado en el Arduino Yun y cuenta con un procesador Atheros AR9331. El procesador Atheros es compatible con una distribución Linux basada en OpenWrt. Los comandos de OpenWrt permiten obtener la información de RSSI del módulo periférico de manera sencilla y útil.

3. Diseño del sistema de monitoreo de localización, frecuencia cardíaca, oximetría y temperatura corporal en entornos cerrados.

El sistema de monitoreo de signos vitales y posicionamiento propuesto en la figura 3.1 consta de 6 partes principales: Sensado, generación de beacons, adquisición y filtrado de información generada por los beacons, consolidación y síntesis de la información, control y procesamiento y finalmente visualización.

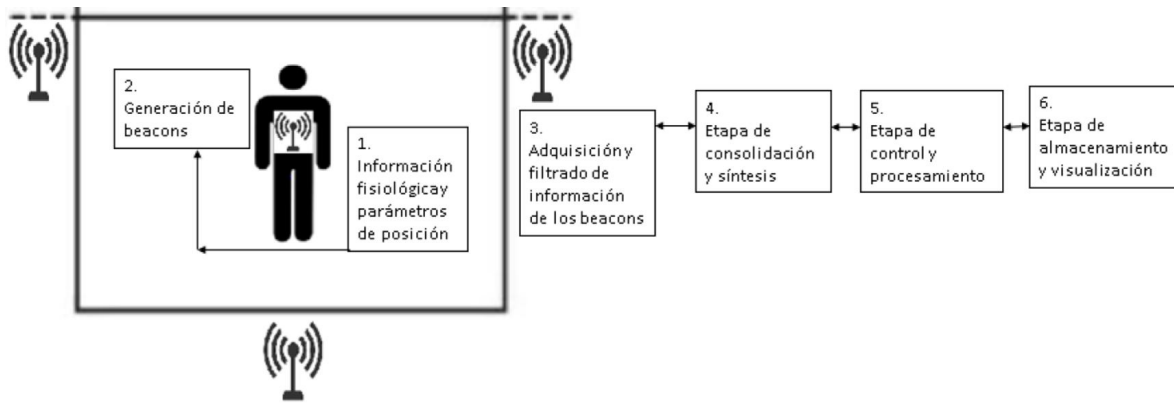


Figura 3.1: Diagrama del sistema.

3.1. Requerimientos del sistema

1. Sensado: Esta etapa requiere la instrumentación y programación de diferentes dispositivos con el fin de obtener los signos vitales del jugador. Los sensores de frecuencia cardíaca y oximetría a instrumentar se basan en el principio de fotoplecitometría con las longitudes de onda de 600 y 940 nm mientras que el sensor de temperatura corporal se basa en un termistor.
2. Generación de beacons: Para transmitir las señales es necesario desarrollar dispositivos

en los que los jugadores puedan portar los diferentes dispositivos de sensado, además es necesario seleccionar un microcontrolador que pueda procesar la información de los sensores y se pueda configurar como AP para generar un beacon con la información de interés en el protocolo de comunicación establecido (con la información de signos vitales en el bloque SSID).

3. Adquisición y filtrado de información generada por los beacons: Para esta etapa es necesario implementar tres antenas receptoras para la técnica de trilateración, el protocolo de comunicación de los dispositivos receptores debe ser el mismo que el de los dispositivos transmisores.
4. Consolidación y síntesis de información: Esa etapa se encarga de realizar la conmutación entre los diferentes dispositivos receptores para poder sintetizar la información de los signos vitales de los jugadores y realizar cálculos para poder estimar la ubicación del jugador en forma de coordenada.
5. Control y Procesamiento. Al mismo tiempo el concentrador deberá detectar y realizar acciones en caso de detectar errores, así como realizar un análisis estadístico de los datos y enviar la información final vía petición HTTP a un servidor web.
6. Visualización: La información de interés de signos vitales se debe mostrar de forma digital mientras que la posición debe visualizarse en dos dimensiones en forma de coordenada.

3.2. Sensado

La etapa de sensado se compone de sensores y microcontroladores.

3.2.1. Sensores

Los sensores tienen como finalidad obtener únicamente los signos vitales de frecuencia cardíaca, temperatura corporal y porcentaje de saturación de oxígeno que son útiles para el

entrenador y/o educador de voleibol. En la presente inventiva se usaron sensores comerciales biomédicos especializados en los parámetros fisiológicos de interés, seleccionados después de un estudio de requerimientos y especificaciones.

Para obtener la frecuencia cardíaca y % SpO₂ se empleó el sensor MAXREFDES117# del fabricante Maxim Integrated. Una alternativa a este sensor puede ser el MAX30100 [45], [46].

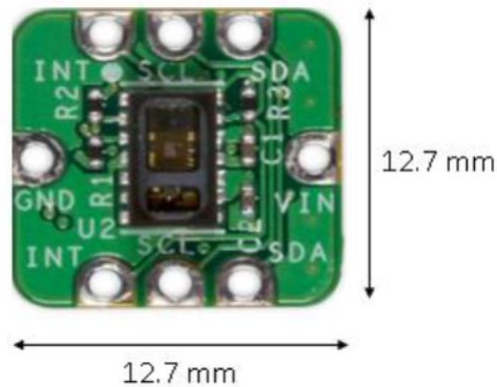


Figura 3.2: Sensor de frecuencia cardíaca y %SpO₂.

El diseño del MAXREFDES117# está orientado para monitorear las señales fisiológicas del porcentaje de saturación de oxígeno en la sangre y del ritmo cardíaco por medio de fotoplethismografía de manera portátil de tal manera que puede colocarse en el dedo, muñeca o lóbulo de la oreja [47]. El sensor integra tres circuitos:

1. El MAX30102 que cuenta con el módulo de oximetría de pulso y frecuencia cardíaca con la técnica de reflectancia con LEDs rojo e Infrarrojo (IR) [ver anexo MAXREFDES117#].
2. El reductor MAX1921 que convierte la entrada de alimentación de 5.5V a 2.2V y genera un voltaje de 1.8V para el sensor de frecuencia cardíaca.
3. Finalmente cuenta con un traductor de nivel lógico de voltaje MAX14595 que proporciona una interfaz entre el sensor de ritmo cardíaco- %SpO₂ y la placa del controlador, que generalmente utilizan un nivel lógico diferente.

El sensor es de baja potencia menor a 1mW y puede operar en un rango de temperatura de -40C a +85C. El sensor puede ser usado con cualquier microcontrolador debido a que cuenta con una interfaz I2C. I2C (Circuito Inter-Integrado) es un estándar para bus de comunicaciones serie utilizado para comunicar microcontroladores y sus periféricos en sistemas integrados. El bus I2C está formado por dos cables de comunicación (SDA, datos seriales y SCL, reloj serial) y un tercero para conectar las tierras de los dispositivos.

Los algoritmos para obtener frecuencia cardíaca y %SpO2 de este dispositivo son open-source (código libre). El cálculo de SpO2 se basa en la ecuación 11. La determinación de las constantes (C1, C2 y C3) requirió de un estudio clínico exhaustivo de los datos de oximetría de pulso de un conjunto de población estadísticamente significativo. Tal estudio clínico está fuera del alcance de este diseño. Por lo tanto, el valor calculado de SpO2 puede tener un pequeño porcentaje de error [28].

$$\%SpO2 = C1 * R_{\lambda1} + C2 * R_{\lambda2} + C3 \quad (11)$$

Donde R-lambda es el radio de absorción de las lecturas de LED rojo e IR. C1, C2 y C3 son constantes.

La frecuencia cardíaca se determina de la siguiente manera: cuando ocurre un nuevo periodo en la señal de fotopletismografía obtenida por el sensor se registra un latido, el sensor inicialmente toma lecturas de latidos durante 10 segundos para posteriormente multiplicar la cantidad de latidos por 6, para obtener latidos por minutos; posteriormente a los 10 segundos cada vez que se detecta un nuevo latido, el primer dato registrado se cambia por el ultimo.

Para obtener la temperatura corporal se usó el sensor MAX30205 del fabricante Mikroe [ver anexo MAX30205].

El sensor MAX30205 convierte las medidas de temperatura a formato digital utilizando un convertidor analógico digital (ADC) de alta resolución, sigma-delta. Cuenta con una interfaz en serie de dos hilos compatible con I2C que le permite acceder a los resultados

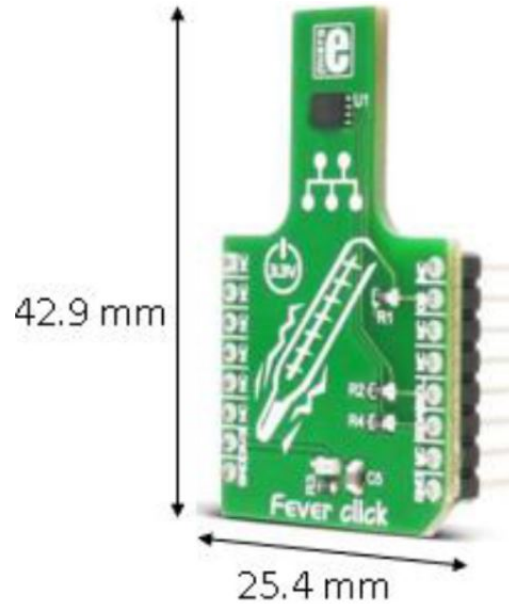


Figura 3.3: Sensor de temperatura corporal MAX30205.

de conversión. El MAX30205 tiene una precisión de 0.1C en un rango de 37C a 39C y una resolución de temperatura de 16 bits (0.00390625 C). El sensor cuenta con una corriente de alimentación operativa de 600uA y opera a un voltaje de alimentación de 3.3 V.

El diseño del MAX30205 está orientado para monitorear los valores de temperatura corporal de manera portátil por medio de un termistor, la curva característica de este sensor se puede observar en la figura 3.4. Este sensor puede colocarse en la muñeca, en los bíceps, en el pecho, espalada y en la frente [48].

El MAX30205 también puede ser usado con cualquier microcontrolador debido a que cuenta con una interfaz I2C. Los algoritmos para obtener temperatura corporal son open-source y están relacionados con la figura 3.4

Cabe destacar que tanto el sensor MAX30205 y MAXREFDES117# se calibraron con instrumentos especializados para los jugadores de voleibol.

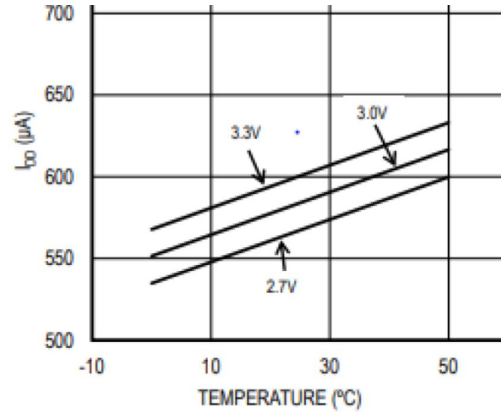


Figura 3.4: Curva característica del MAX30205 [Anexo-MAX30205].

3.2.2. Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado que es capaz de ejecutar programas. Para la presente inventiva el microcontrolador tiene como finalidad obtener la información generada por los sensores para su post-procesamiento. Se usaron microcontroladores que contaran con la capacidad de comunicación inalámbrica con algún protocolo de RF, que fueran móviles y portables, de consumo energético menor a 300 mA y que tengan la funcionalidad de procesar la información de los sensores fisiológicos definidos anteriormente.

Los estándares inalámbricos definidos anteriormente para el microcontrolador que se encargara de la generación de beacons son ZigBee y WiFi.

3.2.3. Módulos compatibles con el estándar ZigBee

Los módulos XBee están diseñados bajo el estándar IEEE 802.15.4, proporcionan seguridad en la entrega de datos entre dispositivos, los módulos trabajan en la banda de frecuencia ISM (Industrial, Scientific and Medical) de 2.4 GHz.

Estos dispositivos tienen 6 convertidores analógico-digital, 8 entradas digitales, terminales de transmisión y recepción de datos (Rx y Tx). La velocidad de transmisión en RF que soportan los módulos es 250 Kbps. Con estos dispositivos se pueden crear redes punto-punto,

punto-multipunto y redes tipo malla.

Hay tres tipos de dispositivos en una red ZigBee, donde cada módulo puede ser configurado para cualesquiera de los 3 dispositivos.

- **Coordinador:** Cada red tiene solamente un dispositivo coordinador.
- **Router:** Puede enviar y recibir información, sirve para conectar dispositivos que están lejos y no se pueden comunicar entre ellos.
- **Dispositivo Final:** Puede enviar y recibir información, no tiene que estar encendido todo el tiempo. Debe estar conectado a un router o al coordinador.

También los módulos XBee tienen dos modos de comunicación

- **Modo AT:** Es el modo de transmisión serial transparente, en el cual la comunicación se asemeja a lo que sería una transmisión a través de un puerto serial, el dispositivo crea la trama y el dato que llega al pin, este modo es el más sencillo a utilizar.
- Requiere de un microcontrolador externo que se encarga de crear una trama específica al tipo de información que se va a enviar, este modo es utilizado en redes donde no se puede perder tiempo entrando y saliendo del modo de configuración de los dispositivos, La trama API tiene la siguiente estructura:



Figura 3.5: Trama API de los módulos XBee.

Además, los conectores que implementan los módulos XBee son los siguientes:

- Chip Antenna. Es un pequeño chip que actúa como antena.
- Wire Antenna (Whip Antenna). Es un pequeño cable que sobresale.
- u.FL Antenna. Es un conector pequeño para conectar una antena externa.
- RPSMA (Polaridad inversa). Es un conector con cilindro de tuerca para conectar antena externa.

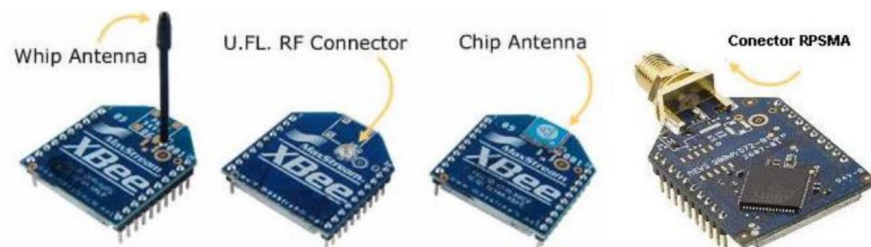


Figura 3.6: Diferentes tipos de conectores de antenas de los módulos XBee.

Para que los módulos XBee se comuniquen es necesario configurarlos, se pueden configurar de dos maneras: por medio de una terminal serial con comandos AT y a través del software XCTU, en el presente proyecto se configuraron los módulos XBee con el software XCTU del fabricante DIGI.

Las principales series de los módulos XBee son los siguientes:

- XBee Series 1 (también llamados XBee 802.15.4). Son la serie más fácil para trabajar, no necesitan ser configurados.
- XBee Znet 2.5 (Formalmente Series 2). Los módulos serie 2 deben ser configurados antes de ser usados. Pueden funcionar en modo Transparente o por medio de comandos API, dependiendo de cual firmware se configure en los módulos.
- ZB (el actual módulo Series2). Es el módulo Znet 2.5, pero con un nuevo firmware. Esto significa que también funcionan en modo transparente o por medio de comandos API.

- 2B. Son módulos que poseen mejoras en el hardware respecto de los de la Serie 2. Funcionan con el Firmware del módulo ZB, pero debido al cambio de hardware, ya no pueden funcionar con el firmware del módulo Znet 2.5.

Los módulos XBee también cuentan con versiones normales y PRO. La diferencia en cuanto a hardware es que el XBee PRO es un poco más largo. Con respecto a comunicación, la versión Pro tiene un mayor alcance (1.6 Km línea vista), pero para ello tiene un mayor consumo de potencia.



Figura 3.7: Diferentes versiones de los módulos XBee.

3.2.4. Módulos compatibles con el estándar WiFi.

Los módulos ESP8266, ESP32 y WiPy 2.0 (ver tabla 2.4) están diseñados bajo el estándar 802.11, además los módulos ESP32 Y WiPy 2.0 incorporan el estándar 802.15.1 (BT y BT de baja energía) además del WiFi. El esquemático de estos módulos se puede ver en el apartado de anexos.

El módulo ESP8266 es un microcontrolador diseñado por la compañía china Espressif y fabricado por TSMC, soporta IPv4 y los protocolos TCP/UDP/HTTP/FTP. Tiene 17 pines GPIO, pero solo se pueden usar 10. El GPIO16 es especial ya que está conectado al RTC (Real Time Clock) y pueden ser configurados con resistencia Pull-up o Pull-down. Este módulo además soporta los principales buses de comunicación (SPI, I2C, UART).

NodeMCU es una placa que dispone de un regulador de alimentación, así como un chip USB-Serial para la comunicación con el ESP8266 directamente desde el USB de una PC,

también cuenta con fácil acceso a los pines GPIO, una memoria Flash de 1Mb para el almacenamiento de varios programas, 2 puertos Rx/Tx, etc.

El ESP32 es un SoC (System on Chip) integrando en un único chip un procesador Tensilica Xtensa de doble núcleo de 32bits a 160Mhz (con posibilidad de hasta 240Mhz), está diseñado por la misma compañía del ESP8266, representa una mejora con respecto a el ESP8266 añadiendo muchas funciones como lo son mayor potencia, Bluetooth 4.0, encriptación por hardware así como una gran cantidad de periféricos incluyendo: Protocolos 2 x UART, 2 x SPI, I2C, I2S, canales analógicos: 8x12 bit ADCs, un total de 24 pines GPIO. Wifi: 802.11 b/g/n/e/i (802.11n 2.4 GHz hasta 150 Mbit/s), versión de Bluetooth y Bluetooth de Baja Energía (BLE) y un conector para antena externa tipo U.FL

El microcontrolador WiPy 2.0 del fabricante Pycom cuenta con el chipset Espressif ESP32 con revisión del año 2016 y un procesador dual con la tecnología inalámbrica de WiFi y Bluetooth. Además está habilitado con MicroPython para el desarrollo de programas orientados al Internet de las cosas. Sus características son muy similares al ESP32 su diferencia radica en que el WiPy 2.0 cuenta con una versión de WiFi: 802.11b/g/n de 16mbps y una antena SMD omnidireccional de alto desempeño. En el presente proyecto se utilizaron NodeMCU en conjunto con cada módulo ESP8266, ESP32 y WiPy 2.0. El nodeMCU del WiPy 2.0 además de contar con una conexión micro USB a una PC para subir scripts, cuenta con un conector de tipo JST para la alimentación con una batería de LiPo de 3.3 V. (ver figura 3.8 b).

Tanto el módulo ESP8266, ESP32 y WiPy 2.0 se puede configurar en 3 modos diferentes:

- Estación
- Punto de Acceso
- Estación más Punto de Acceso.

Los dispositivos que se conectan a la red WiFi se llaman estaciones (STA). La conexión a WiFi es proporcionada por un punto de acceso (AP), que actúa como un centro para una o más estaciones. Un punto de acceso generalmente se integra con un router para proporcionar

acceso desde la red WiFi a Internet. Cada punto de acceso es reconocido por un SSID (Service Set Identifier), que esencialmente es el nombre identificador de la red.

Los módulos ESP8266, ESP32 y WiPy 2.0 pueden funcionar como una estación, por lo que podemos conectarlos a una red WiFi. Y también pueden funcionar como un punto de acceso inalámbrico habilitado por software (SoftAP), para establecer su propia red WiFi. Por lo tanto, podemos conectar otras estaciones a dichos módulos. Al configurarse como (AP + STA) pueden operar tanto en modo estación como en modo punto de acceso, lo que proporciona la posibilidad de diseñar topologías como de tipo malla. Cuando el módulo funciona como SoftAP se elige el SSID y la contraseña con la cual se desea identificar la red, si el chip funciona como STATION, al módulo se le deben dar los datos de SSID y contraseña del AP al cual se desea conectar.

Para que los módulos ESP8266, ESP32 y WiPy 2.0 se comuniquen, es necesario configurarlos, de manera similar a los dispositivos XBee estos 3 módulos se puede configurar con comandos AT, otro software y entornos de desarrollo integrado (IDE) que también permiten configurarlos son Esp-idf (Espressif IoT Development Framework, para el caso del ESP8266 y el ESP32), Arduino (con su IDE en lenguaje C/C++), en lenguaje Python, MicroPython (Pymakr IDE para el caso del WiPy 2.0), Javascript, entre otros. Otra alternativa es configurar los módulos de forma inalámbrica por medio de Telnet y SSH por medio de software cliente como PuTTY.

Telnet es un protocolo de red, utilizado en Internet para acceder remotamente a una máquina o servidor. Tanto Telnet como SSH son protocolos que permiten acceder a la línea de comandos del servidor, para realizar cualquier tipo de administración del sistema. Telnet utiliza el puerto 23. SSH a diferencia de Telnet utiliza una conexión segura hacia nuestro servidor, con lo que la información viaja encriptada. SSH utiliza el puerto 22. Para el microcontrolador Wipy 2.0 la línea de comandos aceptada para SSH Y Telnet es de Linux [49].

Después de un estudio de requerimientos y especificaciones que incluye un análisis del patrón de radiación de las antenas de los diferentes microcontroladores, así como un experi-

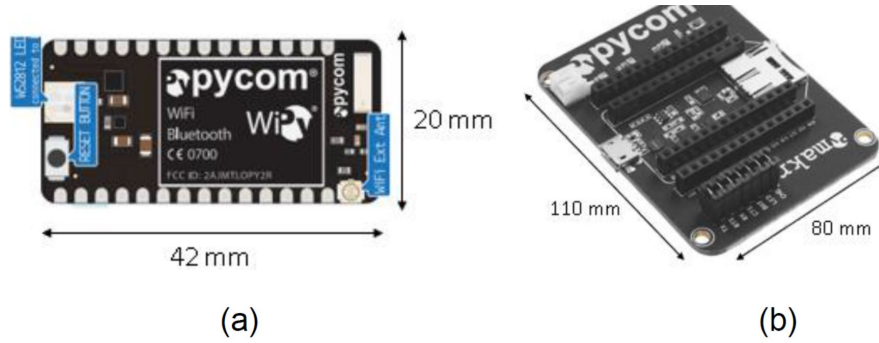


Figura 3.8: (a)Microcontrolador WiPy v. 2.0, (b) base del microcontrolador Pycom.

mento para obtener un modelo de estimación de distancias (que se abarcara en el capítulo 4) se seleccionó el microcontrolador WiPy 2.0, como el dispositivo que se configurara como AP y será monitoreado para obtener la información de posición; mientras que el microcontrolador ESP32 será el dispositivo que transmitirá la información de los sensores fisiológicos, más adelante se abarcara con mayor detalle el funcionamiento y las características definidas del sistema.

3.2.5. Conexión entre sensor y microcontrolador.

La conexión entre microcontrolador y sensores se realizaron por medio del protocolo I2C, se implemento una batería para la alimentación del microcontrolador y sensor de 3.7V de 300 mAh. Las conexiones se observan a continuación:

La programación del microcontrolador ESP32 para el control de los sensores se realizo por medio de la IDE de Arduino para Windows por medio del lenguaje C++, se usaron las librerías del ESP32 de Espressif, del sensor MAX30205 y del sensor MaxREFDES117#, que son código libre (opensource).

Se diseñaron y fabricaron circuitos impresos para colocar los sensores por medio del software Eagle v. 8.0 de Autodesk como se observa en la figura 3.13.

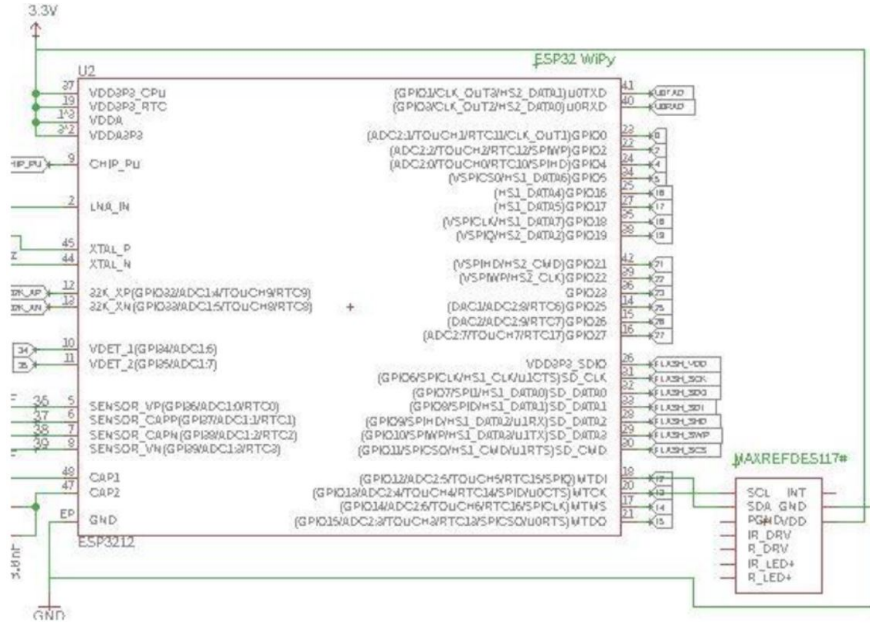


Figura 3.9: Conexión del módulo Wipy 2 con el sensor MAXREFDES117#.

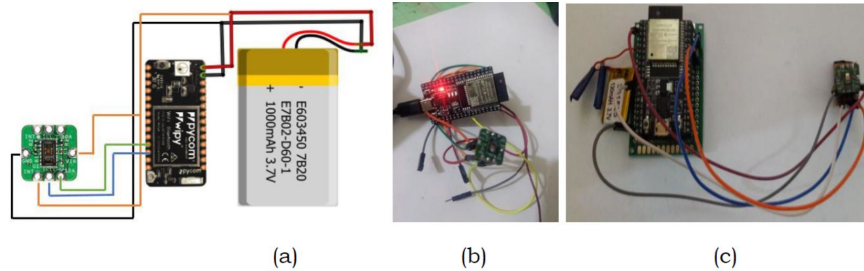


Figura 3.10: (a) Conexión esquemática del módulo Wipy 2 con el sensor MAXREFDES117#, (b) conexión física, (c) conexión física con placa soldada y batería (prototipo a colocar en el jugador).

3.3. Generación de beacons

Como se detalló en el arte previo relacionado a la invención, la característica principal de la presente invención es la adquisición de la información fisiológica y de posición por medio de beacons [39].

Las ventajas de obtener información por medio de beacons a comparación de la tradicional comunicación punto a punto de WiFi y Bluetooth son las siguientes:

- Menor ancho de banda en los mensajes.

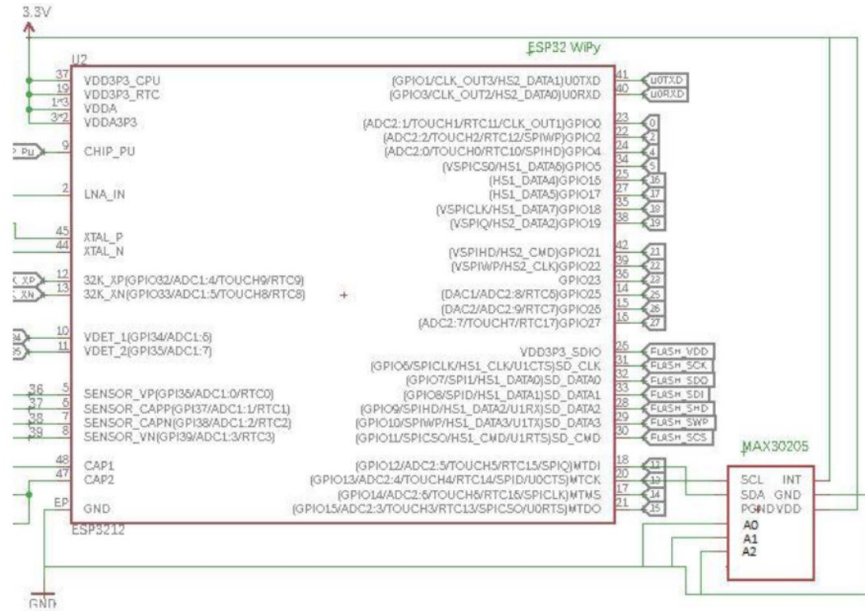


Figura 3.11: Conexión del modulo Wipy 2 con el sensor MAX30205.

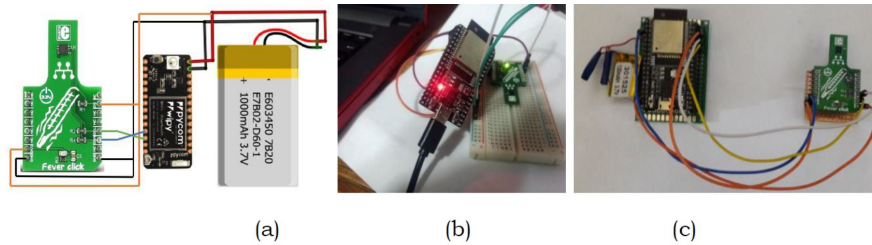


Figura 3.12: (a) Conexión esquemática del modulo Wipy 2 con el sensor MAX30205, (b) Conexión física, (c) Conexión física con placa soldada y batería (prototipo a colocar en el jugador).

- Menor consumo energético en la transmisión de mensajes.
- No es necesario sincronizar al transmisor y receptor.
- Sencilla implementación.
- Permite desarrollar sistemas de posicionamiento.

Para generar beacons, se configuro al microcontrolador WIPy 2.0 en modo punto de acceso (AP), por medio del software PuTTY con una conexión SSH.

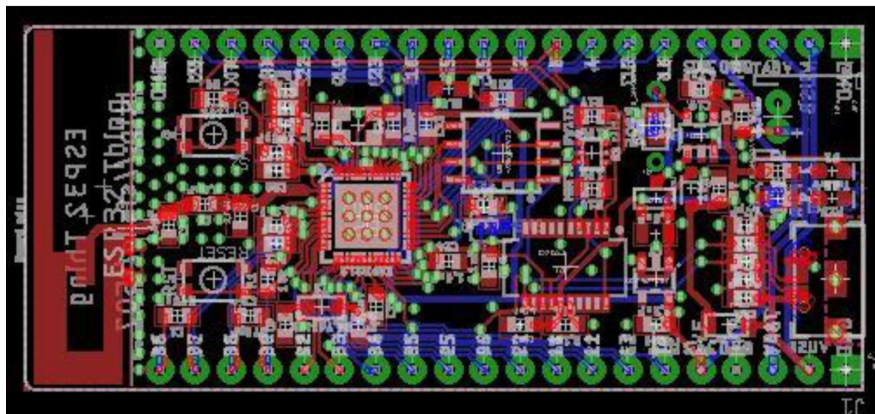


Figura 3.13: Circuito impreso para el microcontrolador ESP32.

3.3.1. Beacon con información de posición y desplazamiento.

Para la generación del beacon que permitirá estimar la posición y desplazamiento de los jugadores con respecto a la cancha se utilizó el protocolo IEEE 802.11 b, configurando al microcontrolador como punto de acceso WiFi [40]. El circuito para implementar el beacon para posición y desplazamiento corresponde a la figura 3.14.

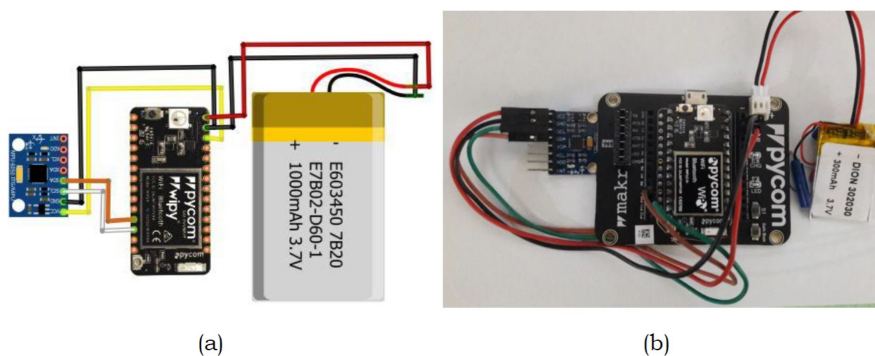


Figura 3.14: (a) Conexión esquemática del microcontrolador Wipy 2.0 con un acelerómetro, (b) conexión física con placa soldada y batería (prototipo a colocar en el jugador).

En la figura 3.14 además del dispositivo WiPy 2.0 y la batería de LiPo de 3.7 V, se conectó un acelerómetro MPU-6050 por medio del bus I2C al microcontrolador Wipy 2.0 que proporcionara la información de giro e inclinación del microcontrolador. La información de giro e inclinación del microcontrolador es de gran utilidad y se explicará más adelante.

Cada jugador de voleibol portara los dispositivos de sensado y emisión de beacon por

medio de accesorios de portabilidad.

3.3.2. Portabilidad de los sensores

Para la portabilidad del sensor de oximetría y frecuencia cardíaca, el jugador llevara el dispositivo (ver figura 3.10) por medio de una pulsera de neopreno con tela resorte representada en la figura 3.15 colocada en su muñeca izquierda con contacto directo con la piel

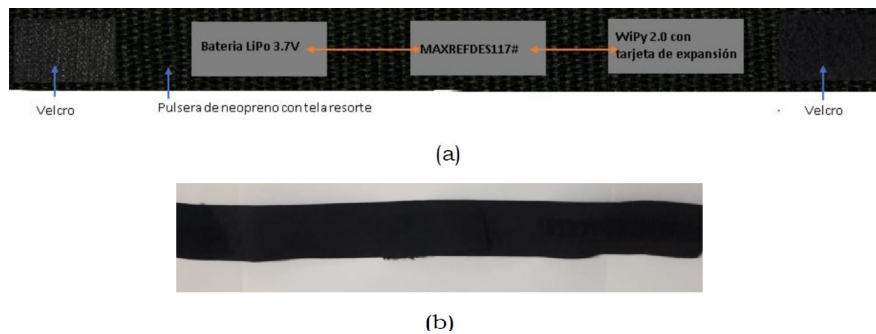


Figura 3.15: (a) Pulsera para la portabilidad del sensor de oximetría, (b) Pulsera física.

Para la portabilidad del sensor de temperatura corporal, el jugador llevara el dispositivo (ver figura 3.12) por medio de una pulsera de neopreno con tela resorte representada en la figura 3.16 colocada en su bicep derecho con contacto directo con la piel.

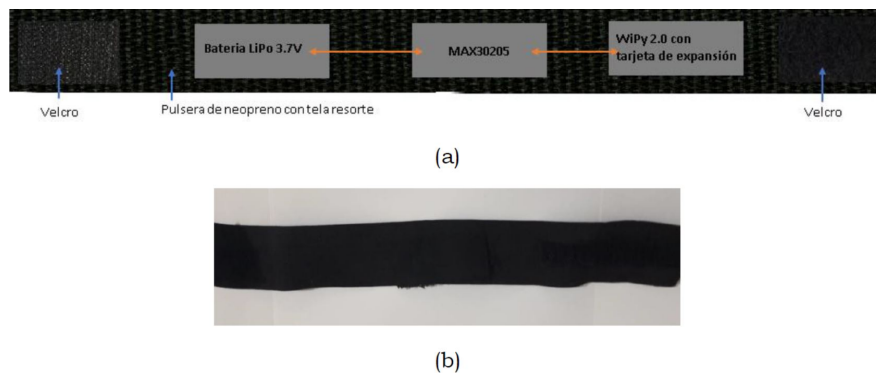


Figura 3.16: (a) Pulsera para la portabilidad del sensor de temperatura corporal, (b) Pulsera física.

Para la portabilidad del beacon con la información de posición y desplazamiento, el jugador llevara el dispositivo (ver figura 3.14) por medio de un top de neopreno con tela resorte

representado en la figura 3.17 colocado a la altura del pecho, este puede estar sobre alguna prenda.

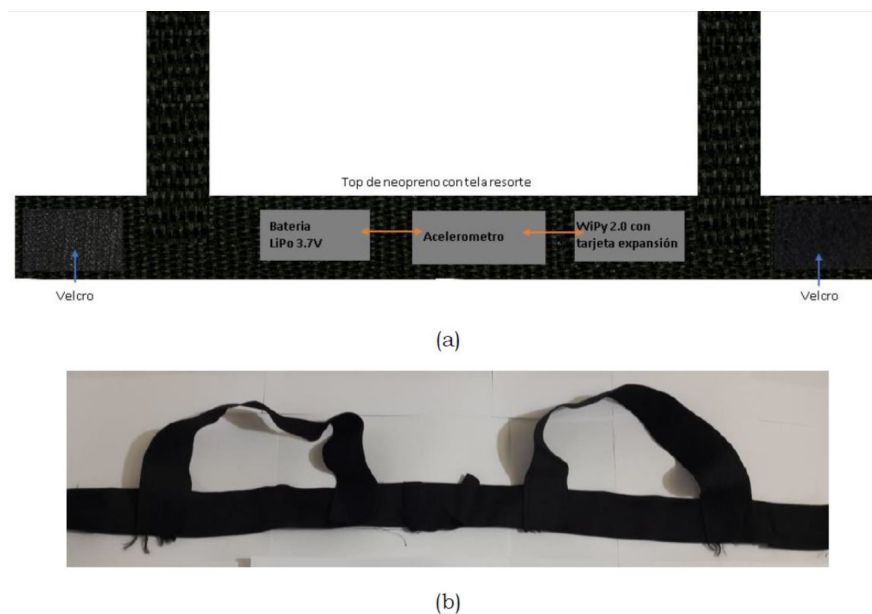


Figura 3.17: (a) Top para la portabilidad del beacon con la información de posición y desplazamiento, (b) Representación física

3.3.3. Colocación de los dispositivos de portabilidad.

La colocación de cada dispositivo de sensado y beacon en las diferentes partes corporales del jugador se eligieron después de un estudio de requerimientos y especificaciones, de tal manera que la colocación de los dispositivos de sensado y beacon no afectaran en el desempeño y rendimiento de los jugadores de voleibol además de tener un funcionamiento correcto.

Cabe destacar que el dispositivo que emite el beacon con la información de posición y desplazamiento se ubica en la parte posterior del jugador (en su espalda) a la altura del pecho, ya que en esa ubicación el dispositivo tiene un mínimo giro e inclinación al momento de que el jugador se desplaza o realiza algún movimiento, a diferencia del pecho, las piernas o en los brazos.

La colocación de los diferentes dispositivos de sensado y beacon en el jugador de voleibol se puede observar en la figura 3.18.

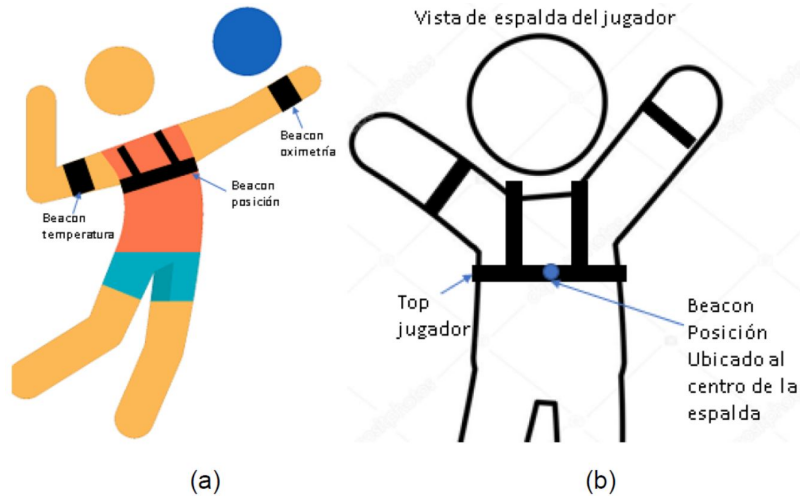


Figura 3.18: (a) Ubicación de las pulseras y el top en el jugador de voleibol, (b) Ubicación del dispositivo que emite el beacon con la información de posición y desplazamiento.

La representación de la figura 3.18 se puede observar en la figura 3.19



Figura 3.19: Representación de la portabilidad de los dispositivos de sensado en un jugador de voleibol.

3.3.4. Características de los beacons.

Para el dispositivo de oximetría (ver figura 3.10) el beacon tendrá las siguientes características:

- El dispositivo ESP32 se configurará como AP con el protocolo BLE.
- La información de latidos por minuto y porcentaje de saturación de oxígeno del jugador se colocará en el SSID del beacon con el siguiente formato:

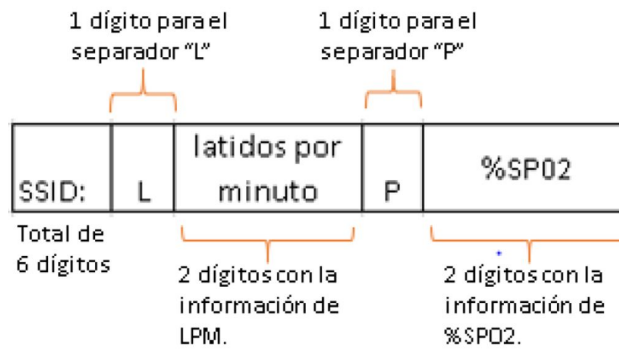


Figura 3.20: Formato de SSID para el sensor de oximetría.

Para el dispositivo de temperatura corporal (ver figura 3.12) el beacon tendrá las siguientes características:

- El dispositivo ESP32 se configurará como AP con el protocolo BLE.
- La información del valor de temperatura corporal del jugador se colocará en el SSID del beacon con el siguiente formato:

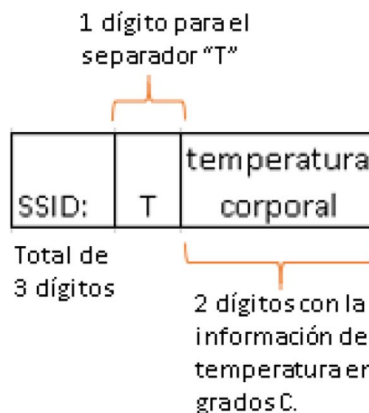


Figura 3.21: Formato de SSID para el sensor de temperatura corporal.

Para el dispositivo que generara el beacon de posición y desplazamiento (ver figura 3.14) el beacon tendrá las siguientes características:

- El dispositivo WiPy se configurará como AP con el protocolo WiFi.
- La antena receptora filtrara el valor de RSSI del beacon configurado como AP con el protocolo WiFi.
- La información del giro e inclinación del dispositivo WiPy que portará el jugador se colocará en el SSID del beacon con el siguiente formato:

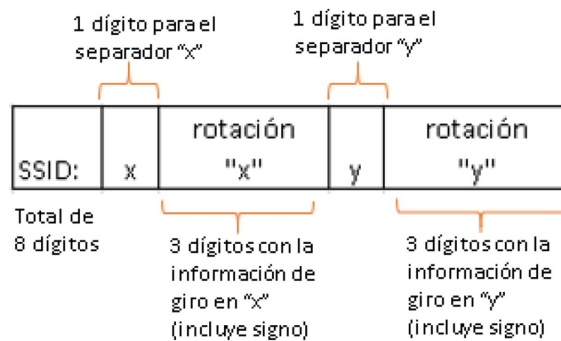


Figura 3.22: Formato de SSID para el beacon con la información de posición y desplazamiento.

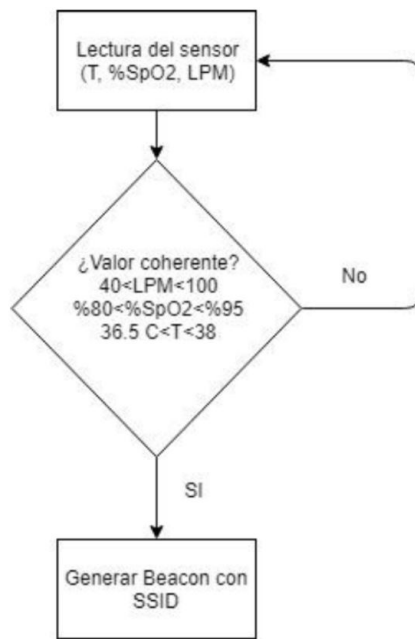


Figura 3.23: Diagrama de Flujo para la generación de Beacons.

3.4. Adquisición y filtrado de información generada por los beacons.

Un parámetro importante antes de adquirir y filtrar la información de los beacons es conocer el comportamiento de la antena de los dispositivos transmisores, es decir, el comportamiento de la antena del microcontrolador WiPy 2.0, para determinar su cobertura de alcance y su patrón de radiación. La cobertura es un factor importante ya que permite conocer la máxima distancia de transmisión posible entre transmisor y receptor para que puedan establecer una comunicación exitosa entre ellos. Una de las maneras más comunes de clasificar las antenas es por la forma de su radiación y las direcciones que ésta toma.

Un patrón de radiación es la representación de la radiación o recepción de la antena de los campos eléctricos en el espacio. Un patrón de radiación que destaca es el omnidireccional cuyo objetivo es irradiar o recibir radiación en la mayor cantidad de direcciones posibles. En general se considera una antena omnidireccional si es capaz de irradiar en todas las direcciones de un plano con una distribución relativamente uniforme; obteniéndose una escasa radiación en el eje sobrante debido a las limitaciones físicas de las antenas [50]. La representación común de un patrón de radiación omnidireccional es el que se observa en la figura 3.24

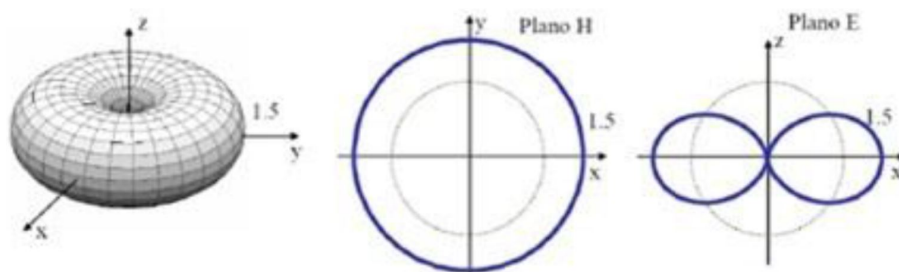


Figura 3.24: Patrón de radiación omnidireccional [50].

El microcontrolador WiPy 2 cuenta con una antena omnidireccional, para conocer su cobertura y patrón de radiación se realizaron pruebas de caracterización en la cancha de voleibol cerrada.

4. Integración e implementación

4.1. Características del entorno cerrado

La cancha de voleibol (que también puede ser usada como de baloncesto) cerrada donde se realizaron todas las pruebas tiene las dimensiones correspondientes a la figura 1.1. En la cancha se realizaron mediciones con el espectro de 2.4 GHz sin estar saturado, las únicas señales de 2.4 GHz que se detectaron correspondían a los dispositivos de sensado y a los beacons. Este entorno es controlado ya que se espera que en las sesiones de entrenamiento y juegos no se presenten más señales de RF además de las generadas por los dispositivos que portaran los jugadores.



Figura 4.1: Cancha de voleibol donde se realizaron las pruebas.

4.2. Dispositivo receptor de signos vitales.

Se decidió elegir el estándar BLE para transmitir la información fisiológica debido a que el microcontrolador ESP32 cuenta con ese estándar de comunicación además del WiFi y a comparación del microcontrolador WiPy 2.0 tiene un menor costo.

También se consideró el ancho de banda de los canales de BLE que corresponde a 1 MHz separados a 1 MHz del siguiente canal, ocupando el espectro de 2400 MHz a 2480 MHz lo que resulta en 40 canales disponibles para transmitir.

El estándar 802.11b donde se tiene una potencia de transmisión de +19dBm, el ancho de banda de los canales corresponde a 20 MHz en el espectro de 2400 MHz a 2480 MHz, con 5 MHz de separación del siguiente canal, con 11 canales que se superponen, disponibles para transmitir.

Considerando que se va a monitorear la posición de dos jugadores, con su respectiva información fisiológica, se presentaría un problema de saturación del espectro electromagnético de 2400 MHz a 2480 MHz si solo se usara el estándar WiFi, por lo que se decidió utilizar el estándar BLE para no saturar el espectro y elegir un canal diferente al que ocuparan los beacons de WiFi.

Al configurar el dispositivo ESP32 como AP con el protocolo BLE se colocó en el centro de la cancha a una altura de 1.4 m con un tubo de madera, posteriormente se utilizó otro dispositivo ESP32 configurado como escaner de dispositivos BLE colocado en los extremos de la cancha a una altura de 1.4 m con un tubo de madera para conocer si el beacon del AP llegaba hasta los extremos de la cancha, garantizando así una completa cobertura en la cancha de juego como se observa en la figura 4.2:

De la figura 4.2 se observa que el beacon generado por el dispositivo ESP32 colocado en el centro de la cancha de voleibol con dimensiones de 9m x 18m, es recibido correctamente por el dispositivo ESP32 configurado como SCAN en las cuatro esquinas de la cancha a 12.7

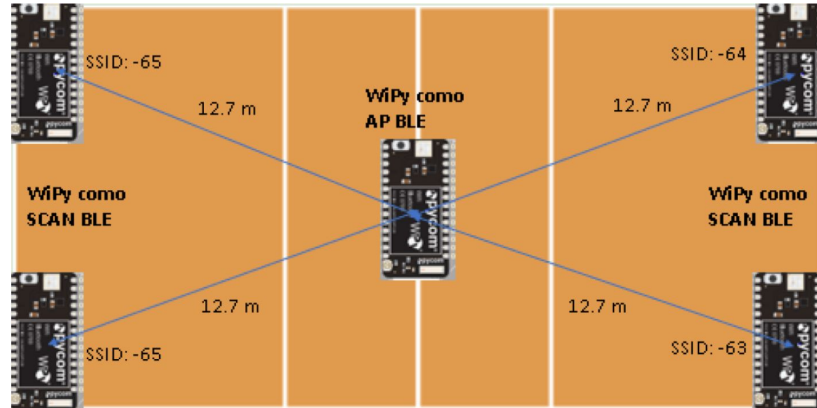


Figura 4.2: Cobertura del WiPy 2.0 configurado como AP BLE.

m del dispositivo colocado en el centro con lecturas de RSSI recibidas de -63 a -65 lo que equivale a una comunicación aceptable.

Al realizar esta prueba se asegura que el beacon que contiene la información de oximetría y temperatura corporal puede ser detectado por el dispositivo ESP32 en los extremos de la cancha de voleibol.

Este experimento se realizó de forma similar con el microcontrolador XBee y WiPy 2.0, obteniendo una cobertura completa en la cancha de juego cerrada con ambos dispositivos.

4.3. Dispositivo receptor de posición y desplazamiento.

Después de un estudio de requerimientos y especificaciones se eligió el microcontrolador Dragino YUN (ver figura 4.3). El módulo Dragino Yun v1.1.6 está basado en el microcontrolador Dragino YUN pero con menor precio, cuenta con un procesador Atheros AR9331. El procesador Atheros es compatible con una distribución Linux basada en OpenWrt. Los comandos de OpenWrt permiten obtener la información RSSI de dispositivos configurados como AP con el protocolo WiFi de manera estandarizada, sencilla y útil.

Además, el microcontrolador cuenta con un puerto Ethernet y USB por el cual puede

comunicarse con una PC para una posterior síntesis. El microcontrolador Dragino Yun integra un conector UHL para una antena externa, el cual se utilizó para conectar una antena omnidireccional (ver figura 4.4).



Figura 4.3: Microcontrolador Dragino Yun v1.1.6.



Figura 4.4: Antena externa para el microcontrolador Dragino Yun.

Se utilizó la antena monopolo GW.11.A153 del fabricante taoglas (ver figura 4.4), que tiene un patrón de radiación omnidireccional más uniforme a comparación de la antena integrada del microcontrolador Dragino Yun v1.1.6. La antena GW.11 está diseñada para aplicaciones inalámbricas de 2.4 GHz como Bluetooth y WiFi. Tiene una longitud de 84 mm de longitud y una ganancia omnidireccional de 2.3dBi garantizando una recepción y transmisión de datos constantes.

El microcontrolador Dragino Yun se configuró de forma remota con SSH, como cliente WIFI para identificar el beacon proveniente del dispositivo WiPy 2.0 configurado como AP con el protocolo WiFi y a continuación monitorear el RSSI y SSID con la información de giro e inclinación del WiPy 2.0. El microcontrolador se alimenta por medio de un eliminador de

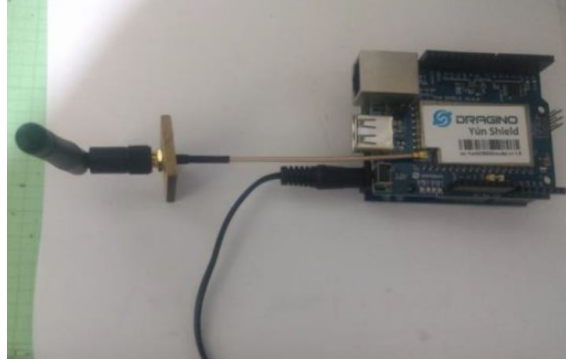


Figura 4.5: Representación del módulo Dragino Yun con antena externa.

9 V conectado a una toma de 127 V de corriente alterna.

4.3.1. Base de los dispositivos receptores

El experimento para determinar el modelo de estimación de distancias para los jugadores de voleibol consistió en el desplazamiento en línea recta de un jugador de voleibol con el top para la portabilidad del beacon con la información de posición y las pulseras (ver figura 3.10, 3.12 y 3.14) con respecto al nodo receptor WiFi que permaneció fijo en la esquina de la cancha de voleibol; con la condición ideal que el nodo transmisor se movió sin cambiar su dirección y giro para obtener un modelo de estimación de distancia según (4) y (8). Es destacable enfatizar que el módulo WiPy 2.0 como AP WiFi se configuró con el estándar 802.11b.

El nodo receptor Dragino Yun con la antena externa se colocó en una base por medio de un tripie de madera (material elegido para evitar hacer un plano en tierra por la antena externa GW.11) como se observa en la figura 4.6 y 4.7, a una altura de 1.42 m debido a que (tras un análisis estadístico) corresponde a la altura promedio del dispositivo WiPy 2.0 configurado como AP WiFi colocado en la espalda del jugador.

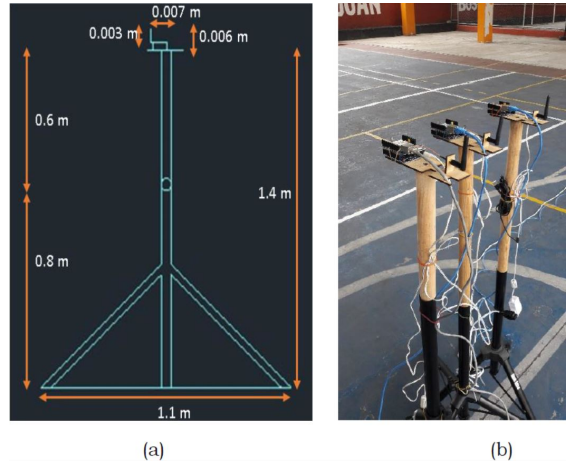


Figura 4.6: (a) Vista frontal del tripie de la antena receptora, (b) Representación isométrica del tripie.

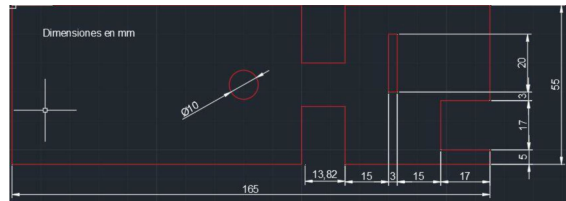


Figura 4.7: Vista superior de la base del dispositivo receptor Dragino Yun v1.1.6 colocado en la base del tripie.

4.4. Experimento para modelo de estimación de distancias

Se obtuvieron mediciones de RSS contra distancias fijas conocidas a medida que el jugador se alejara del dispositivo receptor. Destacando que la inclinación del microcontrolador WiPy 2.0 AP WiFi que porta el jugador fue vertical y el jugador siempre se mantuvo en forma recta.

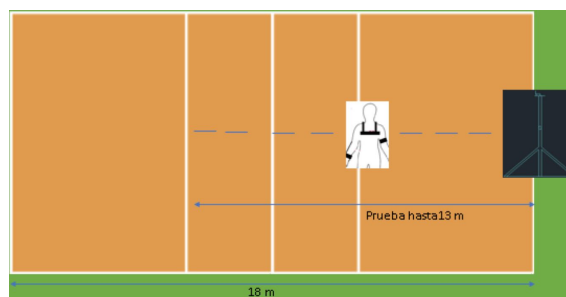


Figura 4.8: Experimento para determinar el modelo de estimación de distancias.

Dado que los valores de RSSI varían aleatoriamente con el tiempo [51], se realizaron mediciones de RSS durante 5 minutos cada segundo, para 27 distancias establecidas (de 0.3 m a 13 m, con intervalos de 0.3 y 0.5 m) como se observa en la figura 4.11. Los valores de RSS medidos de forma experimental por el nodo receptor presentaron un comportamiento discreto.



Figura 4.9: Representación del experimento para determinar el modelo de estimación de distancias.

De las curvas de RSS contra distancias específicas, se obtuvo la media de RSS para cada una de las 27 curvas, para posteriormente graficar la curva experimental de RSSI contra distancia promedio que corresponde a la figura 4.13, se notó que después de las mediciones de 11 m se presentaba bastante incertidumbre en las mediciones de RSS por lo que, la máxima estimación de distancia recomendable es de 10.5 m.

```
while True:#flag != 300:
    casa = subprocess.check_output("iwlist wlp4s0 scan | awk '{if (/ESSID:/) {print $1;}} {if (/Signal/) {print $3;}}'", shell=True)
    essid = "Jugador"
    ptr=casa.find(essid)
    if ptr != -1:
        valor = casa[ptr:ptr+9]
        level = casa[ptr-11:ptr-8]
    else :
        valor = "NO"
        level = "0"
```

Figura 4.10: Parte del código ejecutado por el nodo receptor para obtener el parámetro RSSI.

El nodo transmisor se configuro como AP con el estándar 802.11b por medio de una conexión SSH, mientras que el receptor se configuro por medio de una configuración SSH con comandos BASH de Linux con la línea de comando (iwlist) como se observa en la figura 4.10.

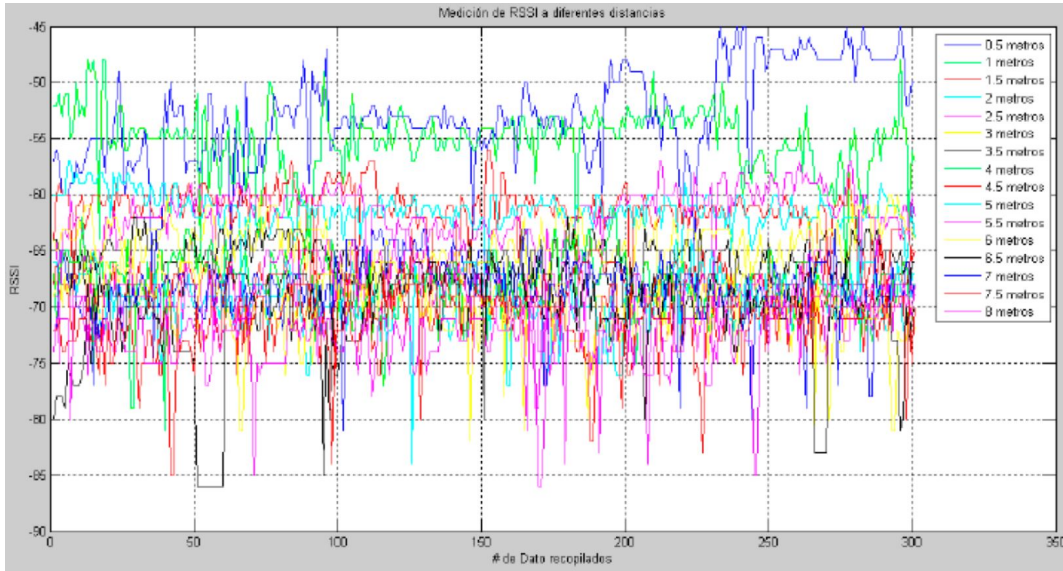


Figura 4.11: Curvas de RSSI contra distancias específicas durante 5 minutos.

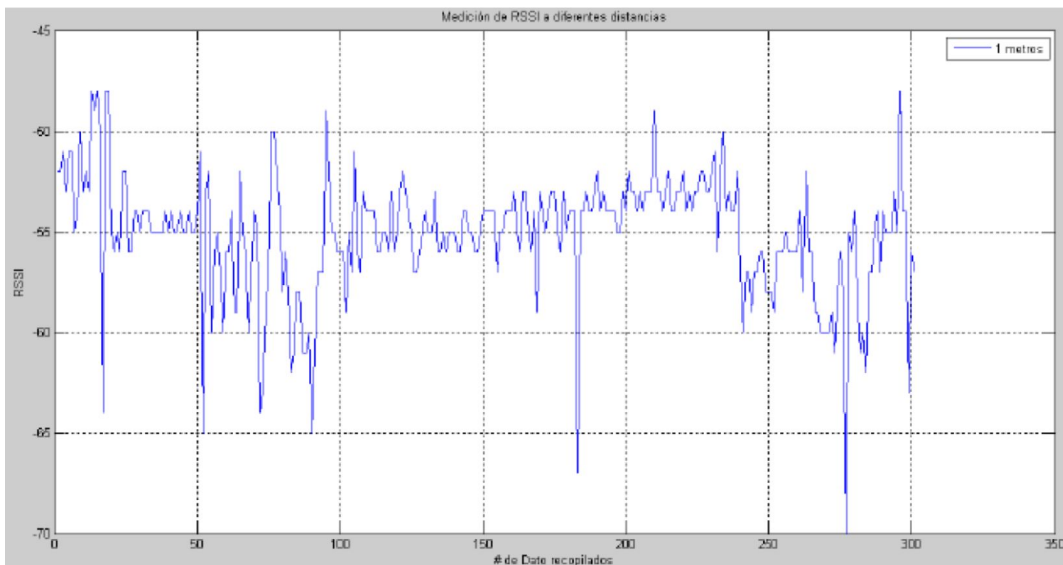


Figura 4.12: Curva de RSSI vs distancia de 1 metro durante 5 minutos.

El procedimiento anterior se realizó de forma idéntica con los dispositivos ESP32 y XBee S2 obteniendo las siguientes curvas de estimación experimental de distancias. Para el módulo ESP32 se obtuvo la siguiente curva (ver figura 4.14):

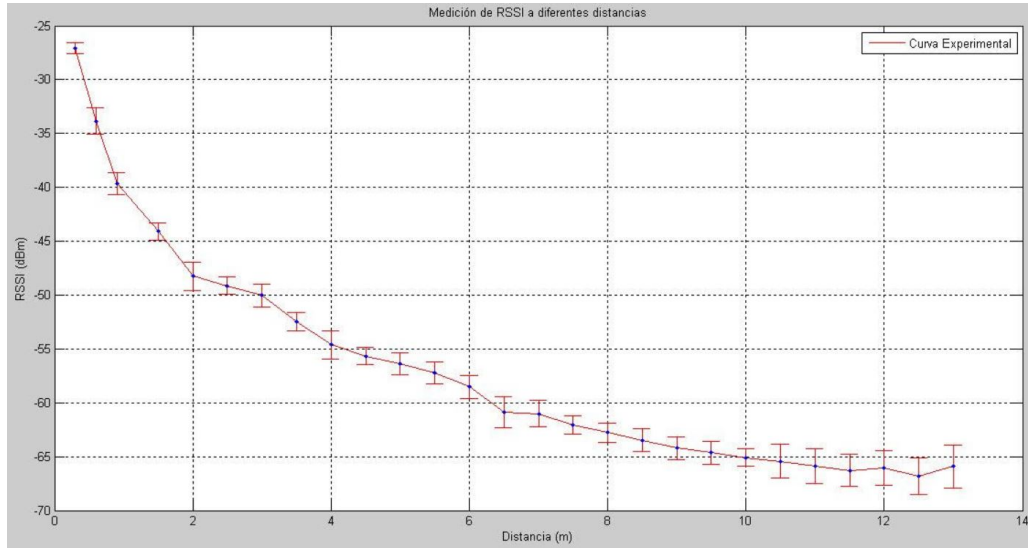


Figura 4.13: Curva experimental de mediciones de RSSI del jugador con respecto a la antena receptora fija (WiPy 2.0).

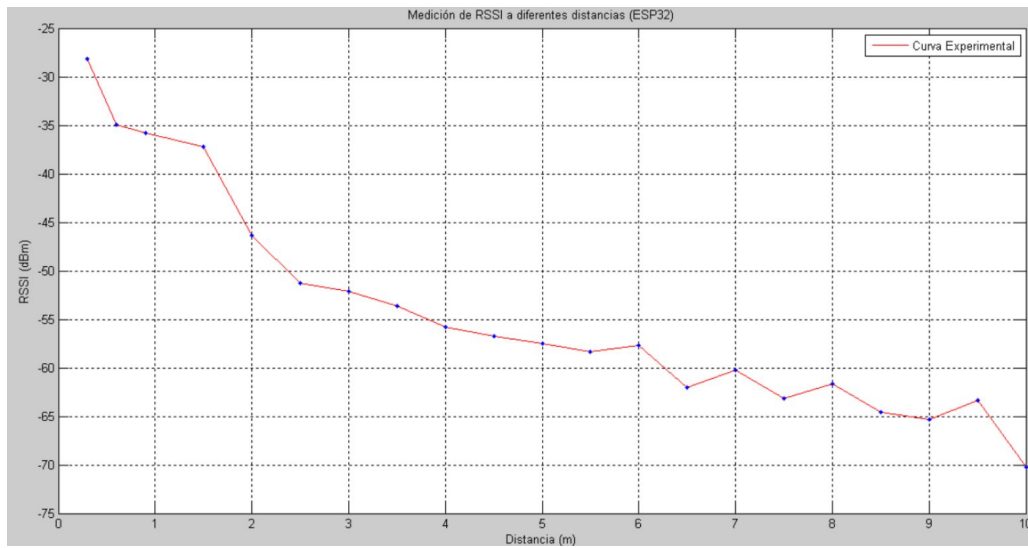


Figura 4.14: Curva experimental de mediciones de RSSI del jugador con respecto a la antena receptora fija (ESP32).



Figura 4.15: Representación del experimento para el modelo de estimación de distancias (ESP32).

De la figura 4.14 se observa que el microcontrolador ESP32 presenta incertidumbre en la relación RSSI-distancia a partir de una distancia de 6 m.

Para el microcontrolador XBee se utilizó el software XCTU v. 6.4.1 del fabricante DIGI para determinar el RSSI del dispositivo transmisor como se observa en la figura 4.16, los intervalos de distancias y el número de pruebas son los mismos que se utilizaron con los módulos ESP32 y WiPy 2.0.

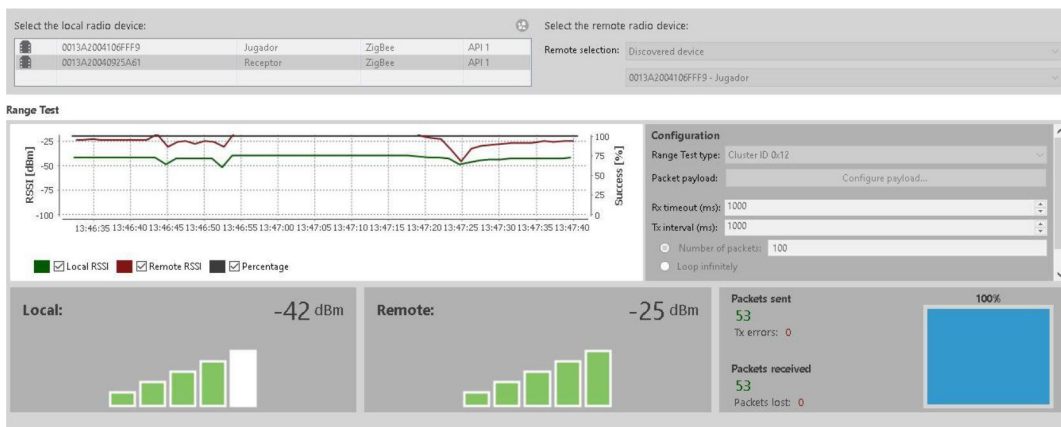


Figura 4.16: Software XCTU para obtener el parámetro RSSI de los módulos XBee.

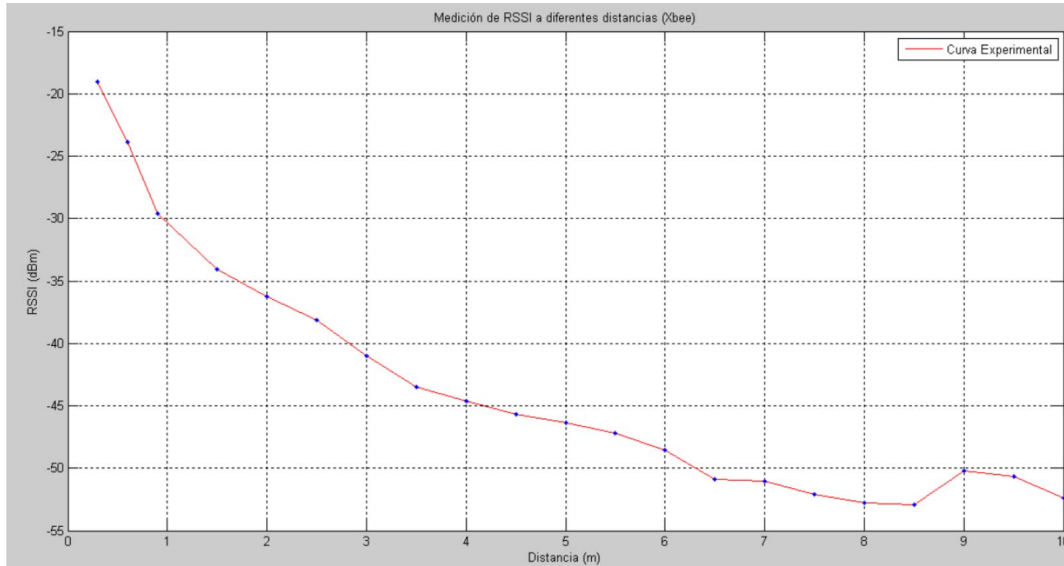


Figura 4.17: Curva experimental de mediciones de RSSI del jugador con respecto a la antena receptora fija (XBee).

De la figura 4.17, se puede observar se observa que el microcontrolador XBee S2 presenta incertidumbre en la relación RSSI-distancia a partir de una distancia de 8.5 m.



Figura 4.18: Representación del experimento para el modelo de estimación de distancias (XBee).

Por lo tanto, el módulo que presenta un mejor modelo de estimación de distancias es el dispositivo WiPy 2.0 al presentar incertidumbre a partir de las mediciones posteriores a 11 m con una distancia máxima de estimación de 10.5 m, por lo que el dispositivo WiPy es el mejor de entre los seleccionados, para emitir el beacon con la información de RSSI a monitorear.

4.4.1. Algoritmo de estimación de posición

Hasta la medición de 10.5 m se observa un comportamiento logarítmico casi ideal por lo que se puede aplicar el modelo de pérdida de trayectoria.

De la ecuación (4), se obtiene (FSPL):

$$D = \frac{(10^{\frac{P_t - P_r}{20}}) * C}{4\pi * f} \quad (12)$$

$$D(m) = \frac{(10^{\frac{+19,5dBm - RSS}{20}}) * (3E8)}{4\pi * 2,4GHz} \quad (13)$$

De la ecuación (8) se puede obtener la siguiente ecuación (LDPL):

$$D = 10^{\frac{RSS - C}{m}} \quad (14)$$

Considerando únicamente los valores experimentales de RSS hasta 10 m, se realizó una relación lineal entre RSS y el logaritmo de la distancia, por lo que se obtuvieron los coeficientes m y C . Estos coeficientes se muestran a continuación: m = - 25.09 y C = - 39.623. Por lo tanto, se tiene:

$$D = 10^{\frac{RSS - (-39,623)}{-25,09}} \quad (15)$$

Además, el factor de pérdida de trayectoria para el entorno de interior donde se realizó el experimento es igual a: n = -2.503. La ecuación (13) y (15) representa la relación entre RSS y distancia para el entorno cerrado de la cancha de voleibol. Por medio de la ecuación (15) y los datos promedio de RSS recabados del experimento, se calcularon las distancias teóricas y se compararon con respecto a las distancias establecidas en el experimento, la curva teórica que corresponde a (15) se muestra en la figura 4.5.1.

El error en la estimación de la distancia entre el AP y el dispositivo receptor Dragino Yun se puede obtener comparando las distancias teóricas y las distancias establecidas en el experimento.

La Tabla 4.1 muestra el error en la estimación de la distancia al implementar (15). La media de error para el modelo de estimación de distancia obtenido en condiciones donde el dispositivo WiPy 2.0 configurado AP WiFi colocado en la espalda del jugador de voleibol por medio del top no cambió su dirección y giro hasta 10 m es: 0.2444 m.

Tabla 4.1: Resultados, error en la estimación de distancias.

Distancias	Promedio RSS (dBm)	RSS Desviación estándar (dBm)	Distancia calculada (m)	Error (m)
0.3	-27.0625	0.504	0.3147	0.0147
0.6	-33.8437	1.2472	0.5872	0.0128
0.9	-39.625	1.0395	0.9994	0.0994
1.5	-44.0937	0.8175	1.5074	0.0074
2	-47.25	1.3137	2.0153	0.0153
2.5	-49.125	0.8032	2.3946	0.1054
3	-50.0312	1.0313	2.6028	0.3972
3.5	-52.4687	0.9832	3.257	0.243
4	-54.625	1.0395	3.9715	0.0285
4.5	-55.6562	1.4280	4.3667	0.1333
5	-56.375	1.2378	4.6651	0.3349
5.5	-57.2187	0.8322	5.0416	0.4584
6	-58.5312	0.9153	5.6886	0.3114
6.5	-60.875	1.0395	7.0572	0.5572
7	-61.0312	1.0621	7.1594	0.1592
7.5	-62.0625	0.8007	7.8718	0.3718
8	-62.78	1.6418	8.4088	0.4088
8.5	-63.4687	1.4927	8.9588	0.4588
9	-64.2135	1.608	9.5141	0.5941
9.5	-64.125	1.664	9.5963	0.0163
10	-65.0937	1.7175	10.4032	0.4032

Con el valor de la máxima distancia de estimación de posición obtenida a partir del experimento, se determinó la ubicación óptima de los tres dispositivos que actuaran como nodos receptores WiFi de RSS, en la cancha para implementar la técnica de trilateración para ubicar al jugador dentro de la cancha de juego.

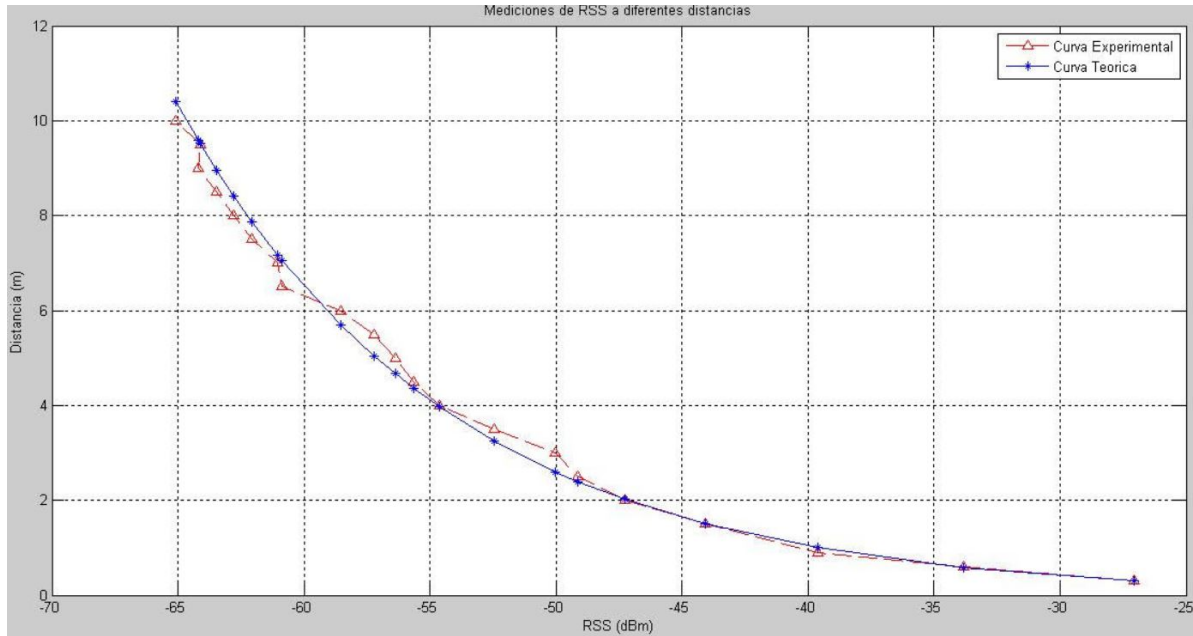


Figura 4.19: Curva de RSSI vs distancia teórica y experimental hasta 10 m.

4.5. Optimización del área para estimar posición.

Debido a que el microcontrolador Dragino Yun con la antena GW.11 tiene un valor de estimación radial de distancia máxima de 10 m, solo puede cubrir la mitad de la cancha de voleibol colocada en posiciones específicas (ver figura 4.20). La posición de las antenas receptoras se muestra en la figura 4.21 por medio de coordenadas con un punto de referencia en la esquina inferior izquierda.

Por ende, este sistema con 3 antenas receptoras para trilateración solo puede monitorear la posición de un jugador en la mitad de la cancha.



Figura 4.20: Zona de cobertura de la trilateración en la cancha.

4.5.1. Inclinación y giro del dispositivo generador del beacon.

Un parámetro importante es el giro e inclinación del microcontrolador WiPy 2.0 AP WiFi ya que si se inclina cuando el jugador lo porte, puede provocar diferentes lecturas de valores de RSSI a las experimentales de la figura . Por lo tanto, se debe analizar la inclinación que podría tener el dispositivo cuando lo porte el jugador (ver figura 4.22).

Después de un estudio de movimientos corporales de los jugadores de voleibol que portaban el dispositivo que genera el beacon WiFi, se encontró que la inclinación desde la vista lateral del dispositivo WiPy (eje Y) en los movimientos comunes del jugador va de los -75 a 75 grados mientras que la inclinación desde la vista frontal del dispositivo WiPy (eje X) en los movimientos corporales comunes del jugador van de los -70 a 70 grados.

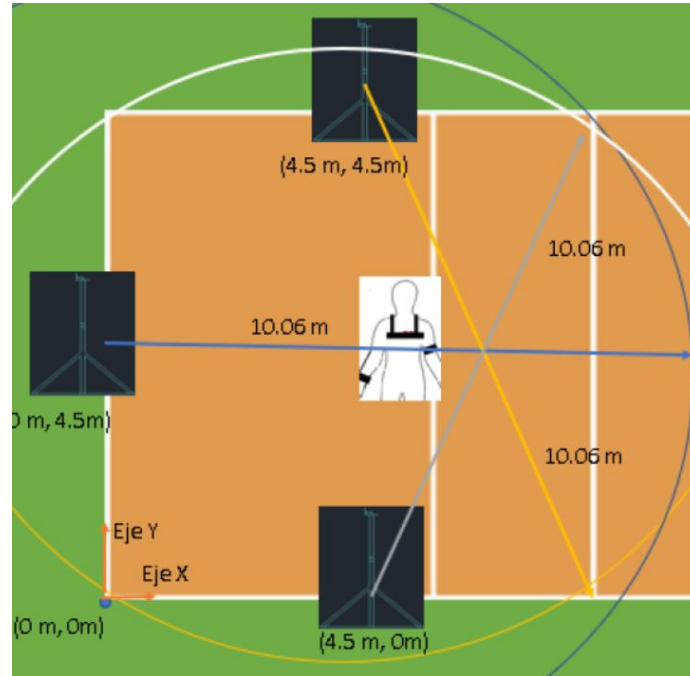


Figura 4.21: Colocación de dispositivos receptores para implementar trilateración.

La inclinación del dispositivo WiPy 2.0 AP WiFi al realizar el experimento (ver figura 4.22) corresponde a cero grados en el eje Y y cero grados en el eje X, colocado de forma vertical y no acostado.

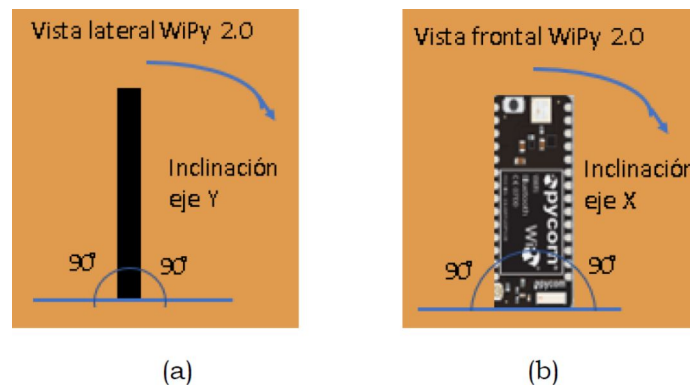


Figura 4.22: (a) Vista lateral del microcontrolador WiPy 2.0 AP WiFi, (b) Vista frontal del microcontrolador WiPy 2.0 AP WiFi.

Se realizó el mismo experimento de la figura 4.8, pero con la diferencia que ahora se inclinó el dispositivo WiPy en el eje X y eje Y (ver figura 4.22) para determinar si variaba la lectura de RSSI por la antena receptora a medida que se alejaba el dispositivo transmisor

WIpY 2.0 AP WiFi.

Los resultados mostraron que una variación en la inclinación del eje Y de entre -75 grados a 75 grados del dispositivo transmisor WIpY 2.0 AP WiFi hasta una distancia de 10 metros provocó un cambio de hasta 1 dBm, mientras que la variación en la inclinación del eje X de entre -70 grados a 70 grados del dispositivo transmisor WIpY 2.0 AP WiFi hasta una distancia de 10 metros provocó un cambio de hasta 2 dBm.

Los valores de inclinación se toman por medio del acelerómetro conectado al dispositivo WIpY 2.0 AP WiFi (ver figura 3.14) y se filtran al tomar el SSID para realizar correcciones en la medición de RSSI del dispositivo receptor Dragino Yun en caso de que el jugador se incline o cambie su postura corporal durante las sesiones de entrenamiento y partidos.

4.6. Patrón de radiación de la antena receptora y transmisora.

El patrón de radiación de las antenas de los dispositivos receptores (las tres antenas para implementar la técnica de trilateración) y del transmisor en la cancha cerrada (WIpY 2.0 AP WiFi) se obtuvo de la siguiente manera:

Se colocó el dispositivo receptor en el centro de la cancha (ver figura 4.23) y el jugador con los dispositivos de portabilidad (top y pulseras) se colocó a 1 metro del dispositivo receptor y se desplazó en forma radial alrededor del dispositivo receptor cada 10 grados con un total de 36 posiciones, mientras que el dispositivo receptor tomaba lecturas de RSSI cada 10 grados.

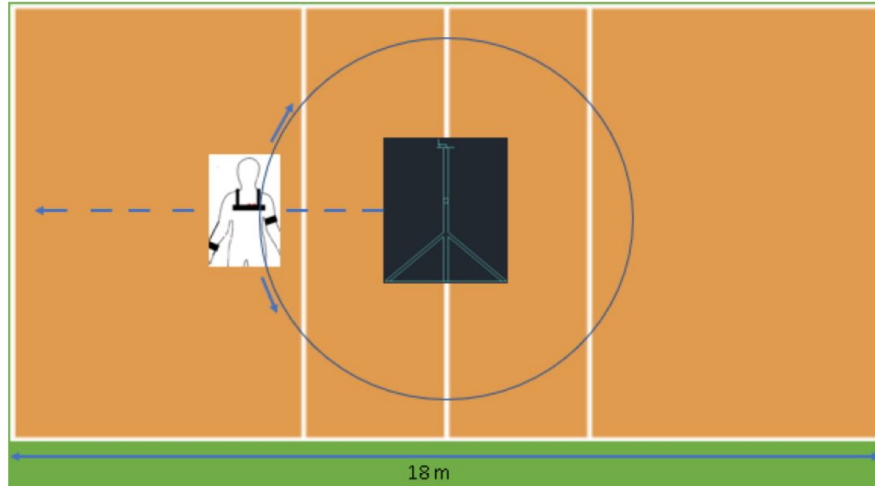


Figura 4.23: Experimento para obtener el patrón de radiación de la antena del dispositivo WIpY 2.0 AP WiFi.

Al terminar las 36 lecturas el jugador se colocó a 2 metros del dispositivo receptor y repitió el procedimiento anterior hasta llegar a 10 m. Los resultados para 1 m y 10 m se observan en la figura 4.25.



Figura 4.24: Representación del experimento para obtener el patrón de radiación de la antena del dispositivo WIpY 2.0 AP WiFi.

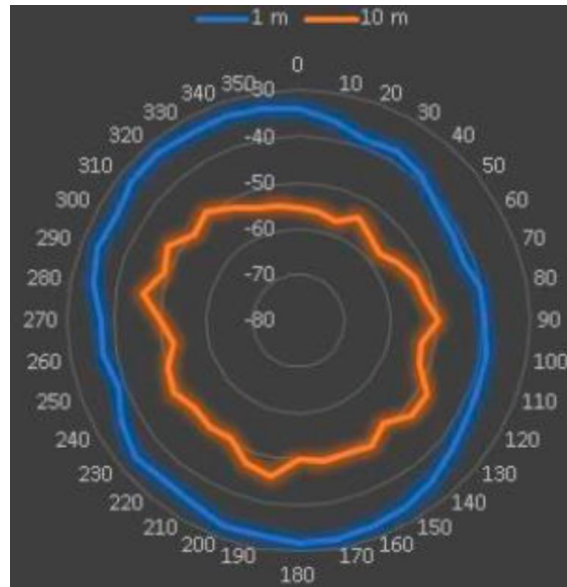


Figura 4.25: Patrón de radiación de la antena del dispositivo WIpY 2.0 AP WiFi.

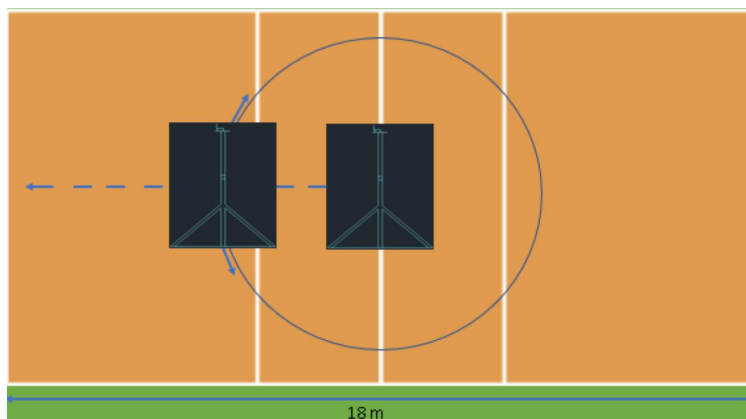


Figura 4.26: Experimento para obtener el patrón de radiación de la antena del dispositivo receptor Dragino Yun v1.1.6 con la antena externa GW.11

Para obtener ahora el patrón de radiación de la antena del dispositivo receptor (la antena GW.11), se realizó el mismo procedimiento anterior solo que ahora se cambió el jugador de voleibol por el dispositivo receptor Dragino Yun v1.1.6 con la antena externa GW.11 (ver figura 4.26). Los resultados se observan en la figura 4.27. Los patrones de radiación a como se esperaba de las hojas de especificaciones del dispositivo transmisor y receptor tienen un comportamiento omnidireccional en la cancha de juego donde se realizaron las pruebas.

El patrón de radiación también ayuda a demostrar que la antena transmisora y receptora tienen cobertura en un área radial con un diámetro de 20 m, y por lo tanto cubren satisfactoriamente la mitad de la cancha. De la figura 4.26 y 4.27 se eligió la mejor orientación (donde se tenía una mayor sensibilidad de RSSI y el comportamiento omnidireccional más uniforme) de las antenas para realizar los experimentos que determinaron el algoritmo de posición basado en Eq. (13) y (15) y la inclinación del WiPy 2.0 AP WiFi. La orientación que se determinó para las antenas también es la que se usara para implementar la técnica de trilateración.

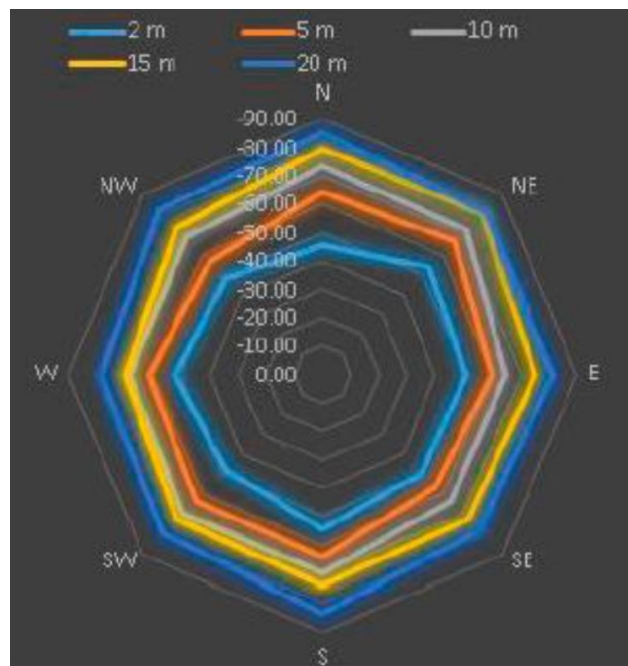


Figura 4.27: Patrón de radiación del dispositivo Dragino Yun v1.1.6 con la antena externa GW.11.

4.7. Técnica de trilateración

Para implementar la técnica de trilateración es importante destacar que las antenas de los nodos receptores en condiciones ideales corresponden a un patrón circular, asumiendo $z = 0$, la ecuación de cada círculo es:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = R^2 \quad (16)$$

Donde (x_i, y_i) , representa la coordenada de localización de cada nodo receptor y R representa el radio, para una máxima estimación de distancia de 10 metros que corresponde al radio del patrón circular de la antena, se eligió un área de 9 m por 9m dentro de la cancha de 9 m x 18 m de voleibol, que corresponde a la mitad de la cancha de voleibol, para la técnica de trilateración como se observa en la figura 4.21, se implementaron las siguientes ecuaciones:

$$(x)^2 + (y + 4,5)^2 = R1^2 \quad (17)$$

$$(x + 4,5)^2 + (y)^2 = R2^2 \quad (18)$$

$$(x + 4,5)^2 + (y + 4,5)^2 = R3^2 \quad (19)$$

Basándose en los resultados si se quisiera abarcar con totalidad la cancha de juego donde se realizó el experimento se requeriría implementar 2 veces la técnica de trilateración

4.8. Algoritmos para resolver el problema de estimación de distancias basado en RSSI

En los últimos años, se han propuesto varios algoritmos diferentes para resolver el problema de estimación de ubicación RSS. Uno de los más importantes es el de Ray-Tracing que ya se describio y el algoritmo k-vecino más cercano (KNN).

El algoritmo (KNN) se utiliza en la tecnica de posicionamiento de huella digital (Fingerprint), que consiste en utilizar dos fases de medición, una fase offline en la que se toman datos de RSS de una baliza en diferentes lugares conocidos en forma de calibración, este procedimiento es similar al que se realizo de forma experimental para obtener las curvas RSSI contra

d, y una segunda fase online que consiste en tomar datos reales de la baliza en movimiento y comparar los datos obtenidos de RSS con los obtenidos en la fase offline, de esta forma se obtiene una estimación de la ubicación de la baliza de una forma muy precisa y mejor a la ofrecida por los métodos de Logaritmo de la distancia (LDPL) y de pérdida de señal en espacio libre (FSPL) [52].

En la técnica de Fingerprint cada vez que se realiza una medición, se obtiene un vector RSS x ,

$$x^T = (x_1, x_2, \dots, x_d) \quad (20)$$

Donde x_k es el RSS del k th AP. Además, los vectores RSS obtenidos durante la fase de calibración (offline) se definen como y ,

$$y^T = (y_1, y_2, \dots, y_d) \quad (21)$$

Su posición se denota como i , $i = 1, \dots, C$. Por lo tanto, la estimación de ubicación se puede definir como la obtención de la posición i que corresponde a un vector RSS recibido x . Para ejemplificar la técnica de Fingerprint, se puede representar un área con posiciones c , rodeado por una circunferencia donde los AP se distribuyen equitativamente, como se muestra en la figura 4.28.

La técnica de fingerprint se basa en estimar la posición i dependiendo del promedio (en el espacio físico) de las coordenadas de los k puntos de calibración (offline) más cercanos al vector RSS recibido x (en el espacio RSS). La distancia vectorial generalizada $d(x, y_i)$ se puede definir como:

$$d(x, y^i) = \frac{1}{d} * \left(\sum_{k=1}^d |x_k - y_k^i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (22)$$

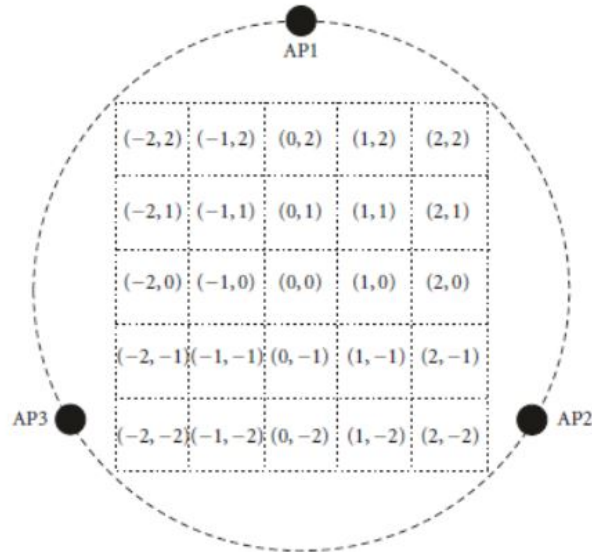


Figura 4.28: Modelo de área de ejemplo de la técnica de fingerprint para $c = 25$, $d = 3$ [52].

Donde $p = 2$ denota la distancia euclidiana y $p = 1$ la Manhattan uno [52].

La técnica de Fingerprint depende mucho de la correcta fase offline de calibración para obtener estimaciones precisas, sin embargo, dado que se deben comparar una gran cantidad de datos de RSS que se adquirieron en la etapa de calibración con respecto a los datos de medición experimentales (online), resulta complicado procesar una gran cantidad de información y mas aun si se desea mostrar la información de la posición en forma de coordena en tiempo real con las tecnologías del internet de las cosas. Por lo que no se implementara la técnica de fingerprint para visualizar la información en tiempo real pero si para corregir errores, este procedimiento se explicara con mas detalle en el capítulo 5.

La técnica de Trazado de Rayos (ray-tracing) en el presente proyecto es compleja de implementar ya que se necesitan plantear multiples trayectorias en la cancha, realizar multiples pruebas en el entorno de interes que van desde conocer los materiales con los que esta construida la cancha hasta el comportamiento de las antenas que van mas alla de pruebas de patron de radiación y RSSI, y finalmente software de alto rendimiento; por lo que esta técnica se llevara a cabo como trabajo a futuro.

5. Análisis de resultados

5.1. Sistema dual de BLE y WiFi

Como se observa en la figura 4.20, la técnica de trilateración está orientada a que los dispositivos receptores Dragino Yun colocados sus respectivos tripies, monitoreen los valores de RSSI del beacon generado por el dispositivo transmisor que porta el jugador en el top y el SSID con la información de inclinación. Sin embargo, para filtrar y monitorear los beacon BLE con la información SSID de los parámetros fisiológicos de temperatura corporal, frecuencia cardíaca y porcentaje de saturación de oxígeno en la sangre se necesita un dispositivo con el protocolo BLE. Se conecto otro dispositivo ESP32, configurado como AP BLE por medio de I2C a únicamente solo un microcontrolador Dragino Yun de los 3 disponibles para la trilateración, que se encargara de procesar y filtrar el SSID con los parámetros fisiológicos como se observa en la figura 5.1.

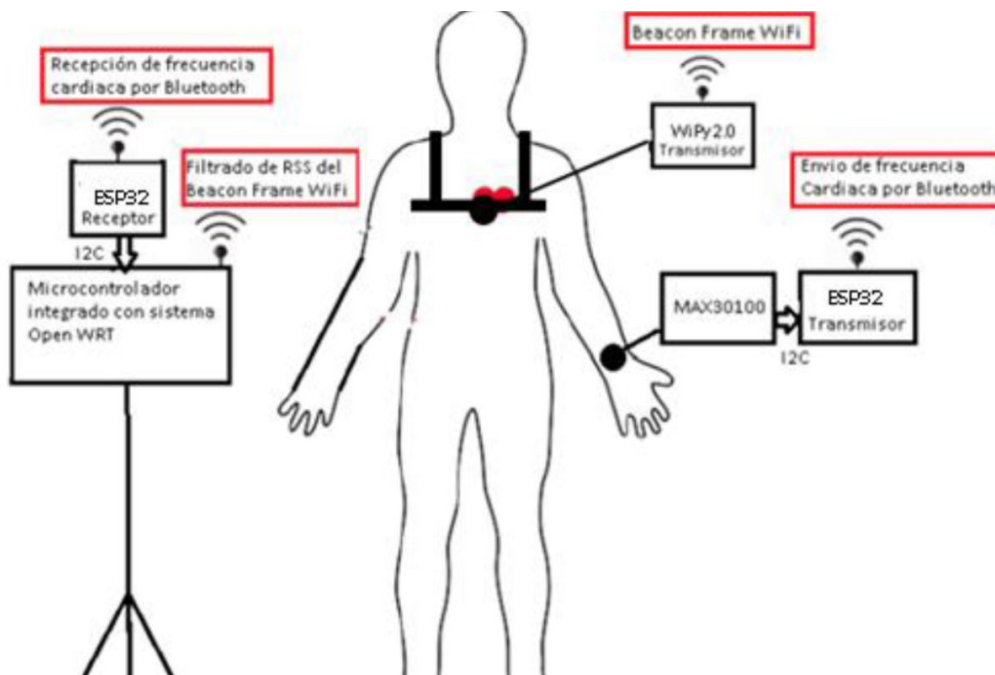


Figura 5.1: Adquisición y filtrado de los beacons generados por los protocolos WiFi y BLE.



Figura 5.2: Colocación de los sensores en el cuerpo del jugador.

La representación isométrica de la adquisición y filtrado de los beacons se puede observar en la figura 5.3.

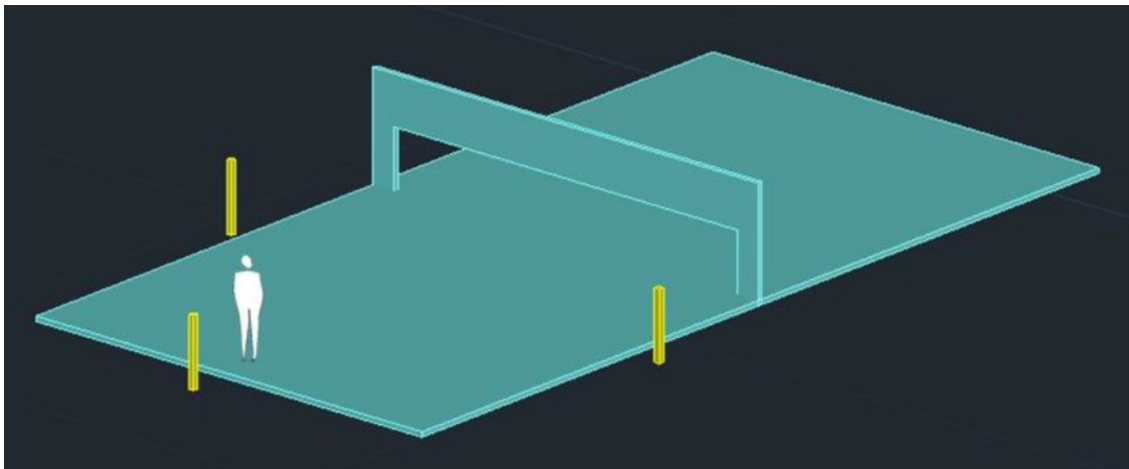


Figura 5.3: Representación de los dispositivos receptores y transmisores.

La figura 5.4 muestra el procedimiento que se llevó a cabo para filtrar el parámetro de RSSI y SSID de los beacons.

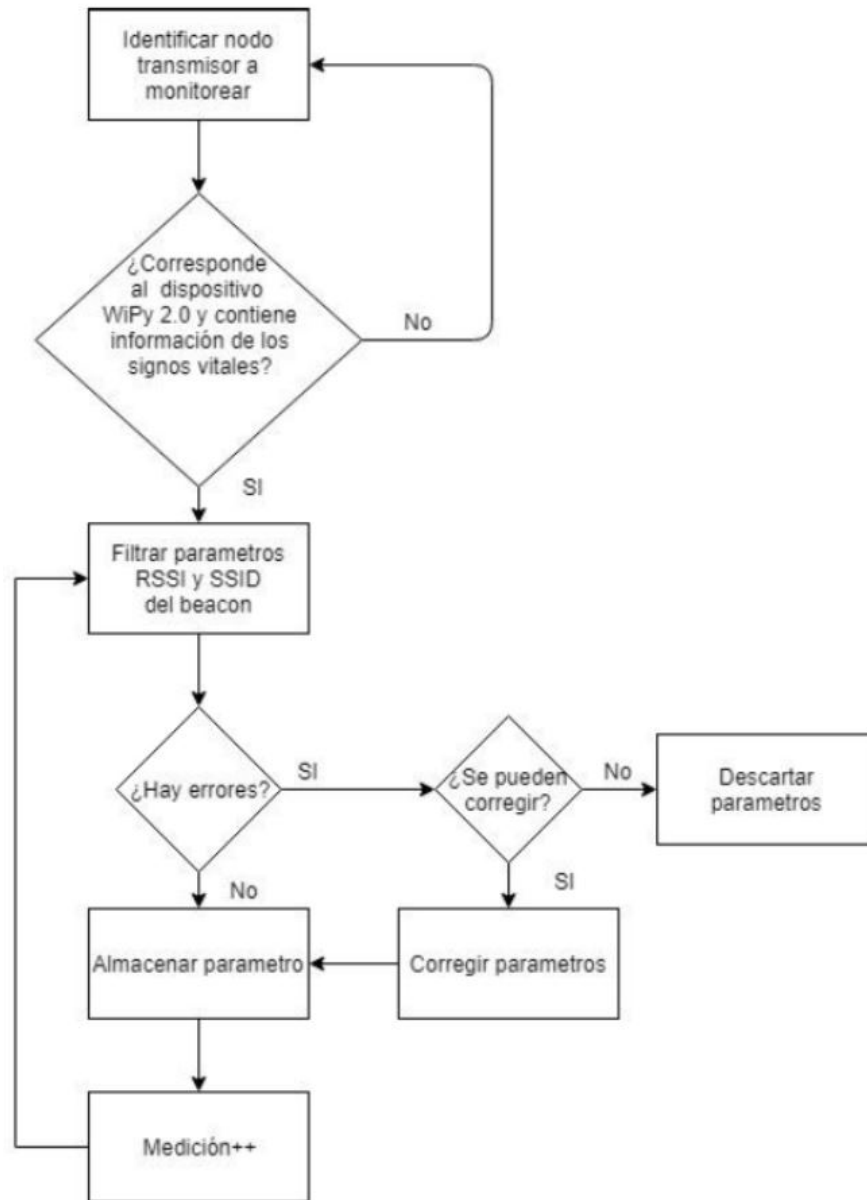


Figura 5.4: Diagrama de flujo para filtrar RSSI y SSID de los beacons.

5.2. Consolidación y síntesis de la información

Para la consolidación y síntesis de la información de los tres dispositivos receptores Dragino Yun colocados en sus respectivos tripies, se utilizó una comunicación alámbrica por medio del puerto ethernet de cada dispositivo receptor hacia un switch, se eligió este tipo de comunicación inalámbrica para no saturar el espectro de 2.4 GHz en la cancha de juego,

debido a que la transmisión de los datos de los beacons se pudo enviar al concentrador por medio de una comunicación inalámbrica. Después de un estudio de requerimientos y especificaciones se eligió al ordenador de placa reducida Raspberry Pi 3 Modelo B+ 2017 del fabricante Raspberry Pi Foundation como el concentrador en donde se realizaría la consolidación y síntesis de la información.



Figura 5.5: Raspberry Pi 3 B+ 2017.

La Raspberry Pi 3 modelo B+ cuenta con un procesador Broadcom BCM2837 de núcleo cuádruple ARM Cortex-A53 de 64 bits que funciona a 1,4 GHz. Esta computadora del tamaño de una tarjeta de crédito es capaz de hacer muchas tareas que realiza una PC de escritorio, como hojas de cálculo, procesamiento de texto, reproducir videos y juegos de alta definición. Puede ejecutar varias versiones de Linux (e incluso Windows 10). Las principales especificaciones de esta PC son las siguientes [53]: Gigabit Ethernet sobre USB 2.0 (rendimiento máximo de 300 Mbps), LAN inalámbrica de 2,4 GHz y 5 GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac, Bluetooth 4.2, BLE, soporta Raspbian, Windows 10 IoT Core, y cuenta con un total de periféricos: 27x GPIO, UART, I2C bus y bus SPI.

Se instaló la versión NOOBS 3.0 que contiene el sistema operativo Raspbian basado en Linux en las Raspberry PI 3 B+. Por medio de un editor de Python en la Raspberry se desarrolló un código en lenguaje Python, para implementar un kernel para poder recibir la información proveniente del switch al puerto ethernet de la Raspberry, como se observa en la figura 5.6.

La información se recibió de la siguiente forma:

```

import socket
import threading

class ThreadedServer(object):
    def __init__(self, host, port):
        self.host = host
        self.port = port
        self.sock = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
        self.sock.setsockopt(socket.SOL_SOCKET, socket.SO_REUSEADDR, 1)
        self.sock.bind((self.host, self.port))

    def listen(self):
        self.sock.listen(5)
        while True:
            client, address = self.sock.accept()
            client.settimeout(60)
            threading.Thread(target = self.listenToClient, args = (client, address)).start()

```

Figura 5.6: Parte del código ejecutado en la Raspberry pi con lenguaje Python.

```

192.168.1.1: -50x-10y+5T37L80P05 192.168.1.2: -59 192.168.1.3: -57

```

Figura 5.7: Datos obtenidos por la raspberry Pi 3B+.

De la figura 5.7, las direcciones IP corresponden a cada dispositivo receptor colocado alrededor de la cancha y están representadas en la figura 5.8, se realizó otro código para detectar los separadores de la información de interés y ordenar la información de los sensores, destacando que el primer valor de tres dígitos (incluyendo signo) que se recibido después la dirección IP, corresponde al valor de RSSI.

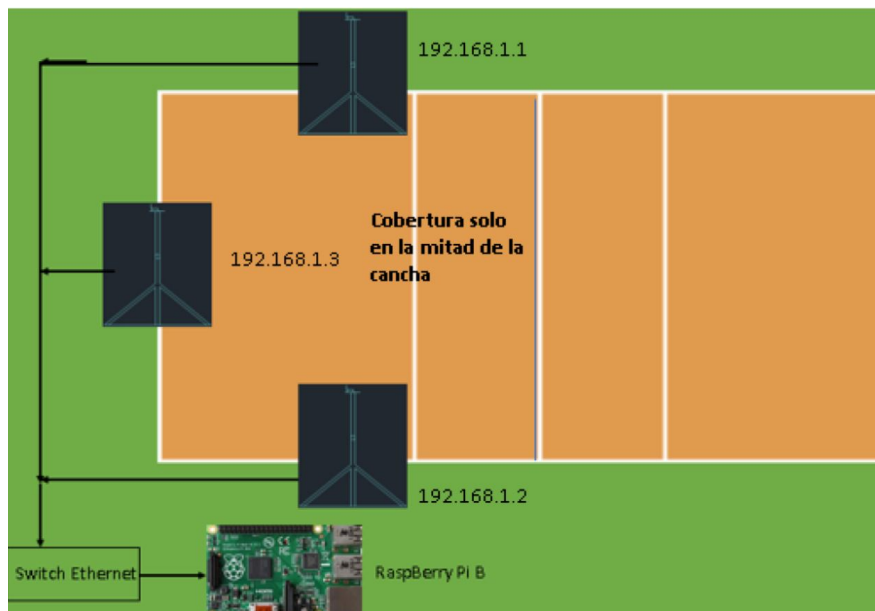


Figura 5.8: Consolidación y síntesis de la información por medio de la RaspBerry Pi 3 B+.



Figura 5.9: Switch ethernet utilizado para recibir información de los dispositivos receptores.

El switch que se utilizó fue el Catalyst 2950 del fabricante Cisco debido a que ya se contaba con él, sin embargo, se puede reemplazar por cualquier switch Ethernet de capa 2 o 3 que tenga al menos 4 puertos ethernet.

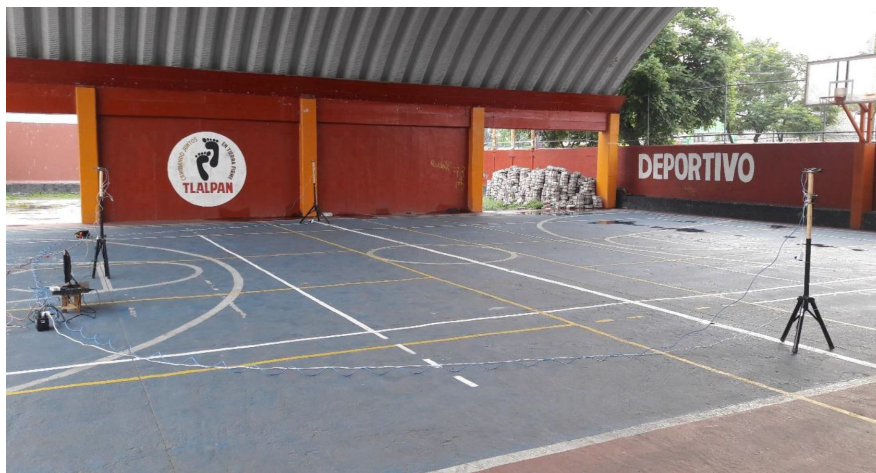


Figura 5.10: Sistema de monitoreo de posición y signos vitales.

De la figura 5.10, se representa la conexión física de la figura 5.8, la adquisición de información de posición y signos vitales se realizó en la terminal de comandos de la Raspberry pi 3.

5.3. Control, Procesamiento y Visualización

El diagrama de flujo para obtener la ubicación y los parámetros fisiológicos del jugador se observa en la figura 5.11:

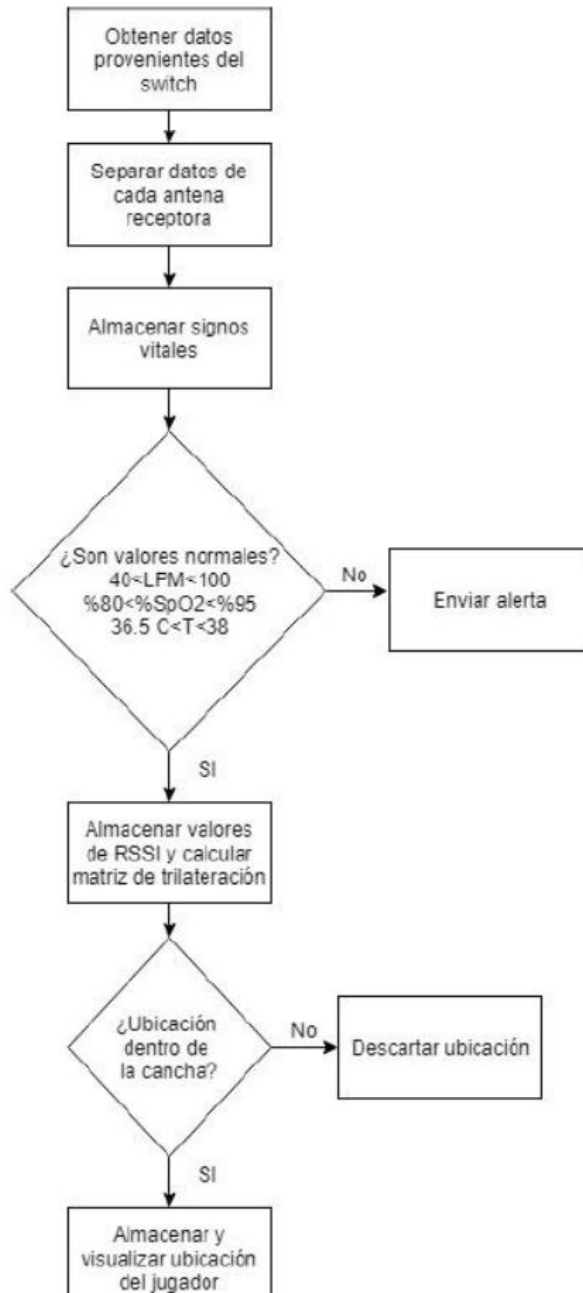


Figura 5.11: Diagrama de flujo de la etapa de control, procesamiento y visualización.

El esquema para el control y procesamiento que se llevó a cabo es el que se muestra en la figura 5.12. El concentrador Raspberry Pi 3 B+ envió los datos a un servidor por medio de una petición PHP por medio de una conexión WiFi.

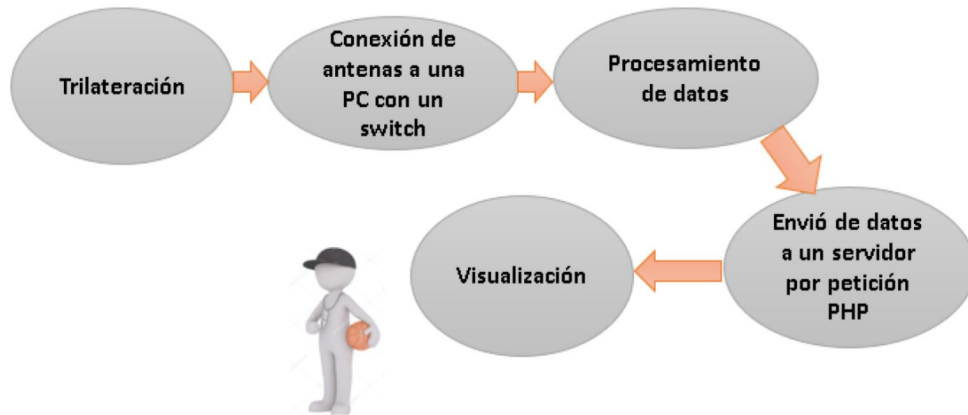


Figura 5.12: Esquema de control, procesamiento y visualización del sistema de monitoreo.

5.3.1. Procesamiento de datos de posición

La figura 5.13 muestra la representación esquemática de cómo se mostrará la posición del jugador a partir de la etapa de trilateración.

Mientras que en la figura 5.14. se muestra el procedimiento que se llevó a cabo para solo usar valores de RSSI coherentes (que estiman la posición del jugador dentro de la cancha de juego) en el cálculo de la matriz de trilateración.

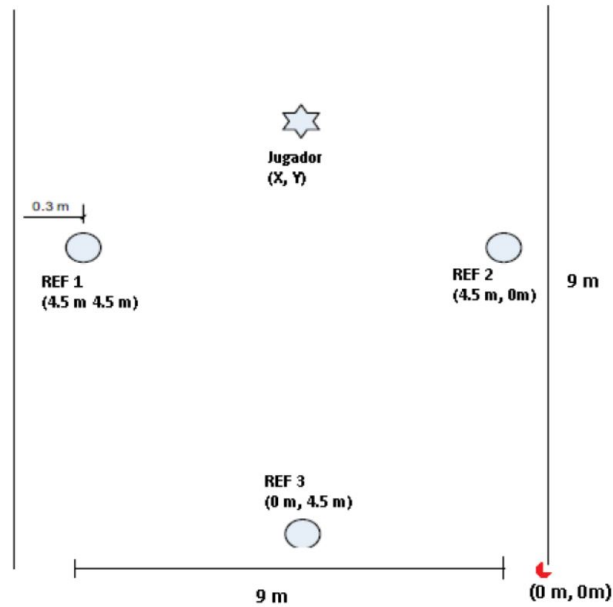


Figura 5.13: Representación de la técnica de trilateración.

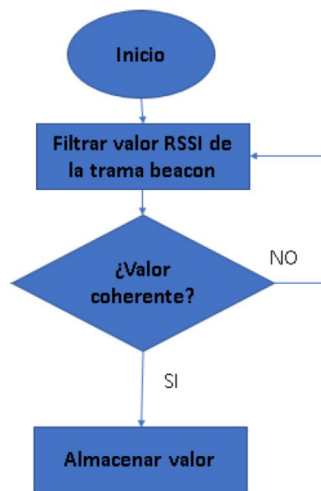


Figura 5.14: Diagrama de bloques para el filtrado de RSSI.

En la etapa de procesamiento de datos, se graficaron las coordenadas de ubicación con valores coherentes de un jugador en tres posiciones diferentes obtenidas por la Raspberry 3b + del recorrido de un solo jugador, La proyección de las coordenadas de ubicación del jugador se muestran a continuación:

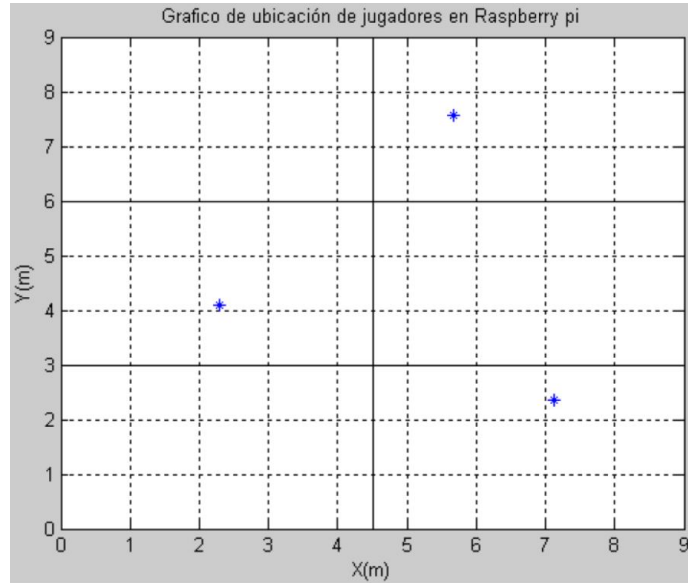


Figura 5.15: Gráfico de ubicación de jugadores.

Las coordenadas de la posición del jugador en tres posiciones diferentes obtenidas a partir de la técnica de trilateración y el algoritmo del logaritmo de la distancia (LDPL) se muestran en la tabla 5.1, con un error promedio de 0.171 m en el eje X y 0 m en el eje Y. La visualización del gráfico de ubicación de jugadores se realizó por medio del software MATLAB.

Tabla 5.1: Sumario de test de localización WiFi por método LDPL.

Punto de prueba	Coordenada Eje X (m)	Coordenada Eje Y (m)	Error WiFi eje X (m)	Error WiFi eje Y (m)
D1	2.3	4.1	0.139	0.1298
D2	5.67	7.554	0.198	0.231
D3	7.15	2.4	0.182	0.166
Promedio:			0.171	0.1756

5.3.2. Análisis estadístico de la visualización.

De los tres datos de posición recopilados se procedió a realizar un análisis estadístico de una sola posición, donde se determinó la media de error de estimación de distancias para cada antena, a partir de los algoritmos de pérdida de trayectoria, logaritmo de la distancia y

logaritmo de la distancia con huella digital (fingerprint).

El logaritmo de la distancia (LDPL) en conjunto con el algoritmo huella digital (fingerprint) consistió en un método de corrección de errores para el algoritmo de LDPL, en este caso si un valor de RSS tomado por cada antena receptora que conforma la técnica de trilateración era incoherente (correspondía a una mayor estimación de 10 metros de distancia a la antena), se reemplazaba por un nuevo valor de RSS, que se calculaba promediando los valores anteriores de RSS medidos, para después realizar el calculo de la matriz de trilateración con el nuevo valor de RSS y los restantes de las demás antenas.

Tabla 5.2: Resultados de diferentes algoritmos de posición.

	Distancia real (m)	Modelo	Error media (m)	Error Desviación estándar (m)	# de mediciones
Antena 1	2.5	FSPL	0.31	0.62	60
	2.5	LDPL	0.26	0.59	60
	2.5	LDPL-Fingerprint	0.15	0.34	N/A
Antena 2	4	FSPL	0.42	0.55	60
	4	LDPL	0.28	0.42	60
	4	LDPL-Fingerprint	0.21	0.3	N/A
Antena 3	5	FSPL	0.36	0.68	60
	5	LDPL	0.25	0.61	60
	5	LDPL-Fingerprint	0.19	0.38	N/A

En la tabla 5.2 se observa que el método de LDPL y LDPL-fingerprint ofrecieron una mejor precisión en la estimación de la posición, sin embargo es importante destacar que el método de LDPL-fingerprint solo se implemento como parte de un análisis estadístico y no para visualizar la posición del jugador en tiempo real.

Además los tres algoritmos ofrecen una precisión en la estimación menor a 1 m² reportada actualmente en la teoría como precisión mínima requerida para un sistema de monitoreo

de posición. La tabla 5.2 y 5.3 resumen los datos estadísticos de los diferentes modelos de estimación de localización.

Tabla 5.3: Precisión en la estimación de la ubicación de los jugadores.

Modelo	Media del error de localización	Desviación estandar del error de localización	# de pruebas de posición
FSPL	0.9 m	0.67 m	60
LDPL	0.74 m	0.62 m	60
LPDL-Fingerprint	0.51 m	0.58 m	N/A

De la tabla 5.3 se observa que la media del error de localización por la técnica de trilateración con los datos de las distancias de las 3 antenas corresponde a una ubicación con respecto a la ubicación real del jugador a una distancia radial menor a 0.7 m.

Finalmente, el grafico de posición del jugador con la información del error en la estimación con respecto a la figura , se observa en la figura 5.3.2:

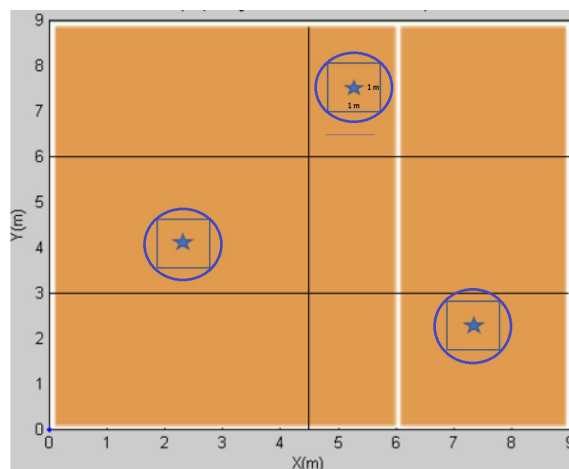


Figura 5.16: Ubicación del jugador con la información del error.

Una variante que se aplico al algoritmo de LDPL-Fingerprint, fue la ubicación y rotación (como se detallo en el capítulo 1) que los jugadores deben tomar en la cancha de voleibol

durante las sesiones de entrenamiento que corresponde a cuadrantes que se detallan en la figura 5.16. y 5.17.

Para el caso de dos jugadores en la cancha al mismo tiempo, un receptor-colocador en el rectángulo a partir de (X mayor a 4.5m) y un defensor en el rectángulo a partir de (X mayor a 4.5m) practicando un sistema de ataque 4:2 se representan en la figura 5.17.

En este caso, el receptor no debe ocupar ni pasar el área ocupada por el colocador y viceversa, por lo que el algoritmo de LDPL-Fingerprint puede descartar valores de RSS que correspondan a distancias en las que el jugador desocupo su área de juego y no descartar valores que correspondían a que el jugador desocupo el área de la mitad de la cancha de juego, de esta forma se puede disminuir considerablemente el error en la estimación de distancias, no obstante este método no se implemento y se propone como trabajo a futuro.

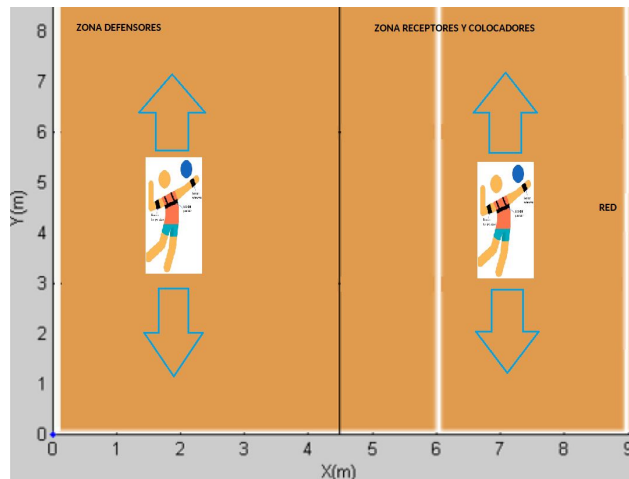


Figura 5.17: Algoritmo LDPL con restricciones en la rotación y ubicación del jugador.

5.3.3. Visualización de la posición en un servidor web.

En la siguiente gráfica (ver figura 5.19.) se puede observar la visualización de la posición de dos jugadores con respecto a la cancha de juego cerrada en forma de coordenada en un área de 9m por 9m en tiempo real, para cada jugador se grafica la posición anterior y la

actual de tal manera que se puede monitorear el movimiento que tienen los dos jugadores en la cancha de juego. Para este caso se utilizó el algoritmo LDPL en conjunto con la técnica de trilateración conforme a la figura 5.8. , destacando que si obtenía una coordenada incoherente (el jugador salía de la cancha) se destacaba el valor de coordenada y se reemplazaba por la coordenada anterior.

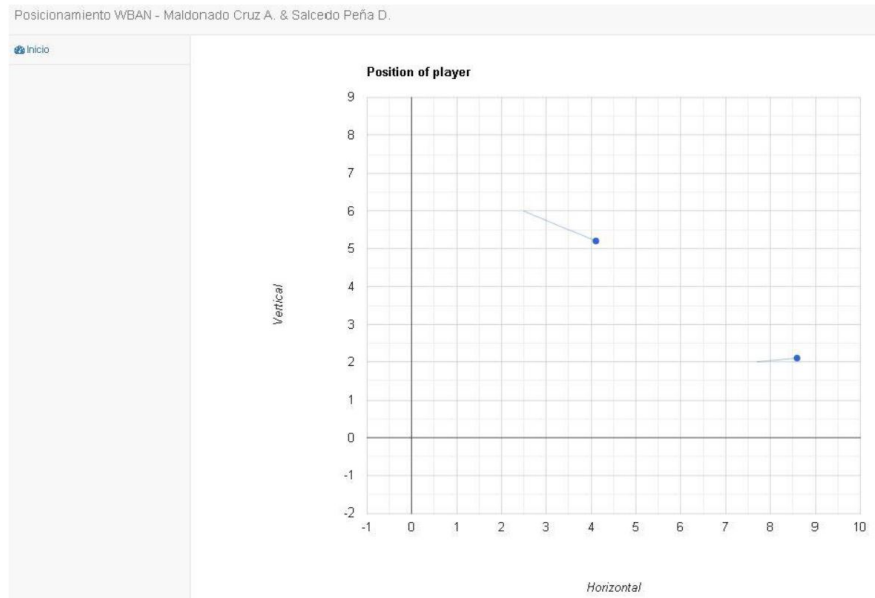


Figura 5.18: Visualización de la posición de dos jugadores en un área de 9m por 9m en tiempo real en una página web.

Se utilizó programación en Python para realizar una petición GET, en un servidor HTTP diseñado para que filtrara la etiqueta del jugador, el tiempo de adquisición del dato en formato UNIX-STAMP, y finalmente la coordenada (X,Y).

Se utilizó un servidor propio, debido a que la visualización solo representa dos posiciones al mismo tiempo de cada jugador, la posición actual y la posición anterior, lo cual resulta complicado de implementar utilizando plataformas orientadas a graficar puntos. La visualización de la posición de dos jugadores se representa en la figura 5.18.

Parámetro	Descripción
{player}	Identificador del jugador a rastrear Debe corresponder a un ID de jugador previamente registrado. Usa <code>{jugador}</code> para depuración.
{time}	Marca de tiempo de la medición Marca de tiempo correspondiente al momento en el que se realizó la medición. No es necesario que sea una marca de tiempo UNIX, pero si debe ser persistente a lo largo de todas las mediciones.
{coordX}	Coordenada horizontal (ancho del terreno) Posición "X" en el terreno de juego, en metros. Se espera un número con un máximo de 2 decimales de precisión, y un rango completo de 00.00 a 20.00
{coordY}	Coordenada vertical (profundo del terreno) Posición "Y" en el terreno de juego, en metros. Se espera un número con un máximo de 2 decimales de precisión, y un rango completo de 00.00 a 20.00

Figura 5.19: Formato de los datos de posición de los jugadores para la visualización.

5.3.4. Visualización de los signos vitales en un servidor.

La figura 5.20 muestra la visualización de la información de los signos vitales de frecuencia cardíaca, porcentaje de saturación de oxígeno y temperatura de corporal en forma de grafica con respecto al tiempo con el que se tomó la lectura. El sistema es capaz de monitorear la posición e información fisiológica de dos jugadores por hasta dos horas (sesiones de entrenamiento) y mostrar datos cada dos segundos. El procedimiento para subir la información fisiológica al servidor web es similar al procedimiento de visualización de la posición del jugador, solo que, en este caso, su utilizo el servidor web ThingSpeak con sus herramientas IoT que genera automáticamente el indicador `TIMESTAMP`, por lo que solo se mandó el dato del signo vital correspondiente.

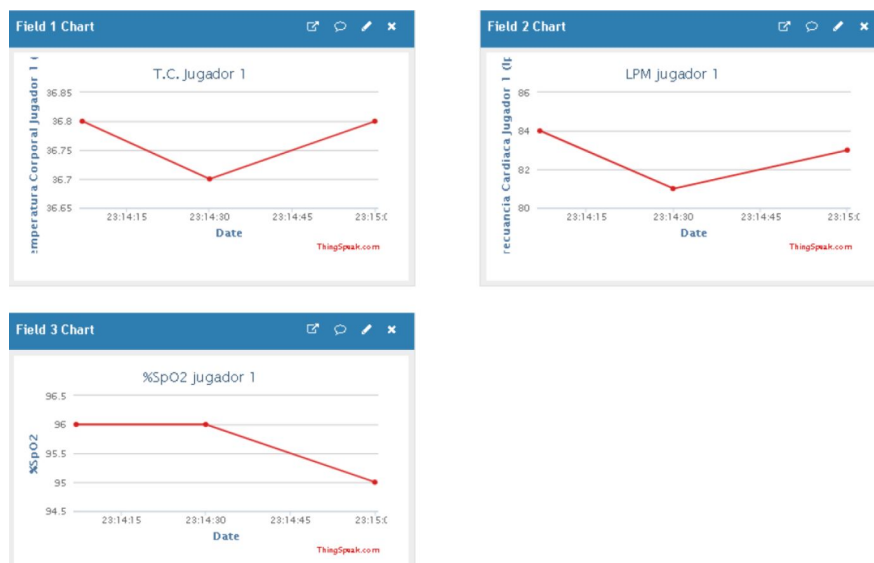


Figura 5.20: Visualización de la información de signos vitales de un jugador en tiempo real en una página web.

Conclusiones

Se desarrollo un sistema de monitoreo que permite adquirir los signos vitales de temperatura corporal, frecuencia cardíaca y porcentaje de SPo2 de hasta dos jugadores dentro de un entorno cerrado de 9m por 18m, además de estimar la posición y desplazamiento de hasta dos jugadores dentro de un entorno cerrado de 9m por 9m con una precisión menor a 1m2, el sistema de monitoreo funciona en tiempo real con un retardo máximo de hasta 3 segundos y permite la visualización de posición en forma de coordena en una página web de la posición actual y anterior del jugador, mientras que la visualización de la información fisiológica se realiza en una página web en forma gráfica. El sistema de monitoreo puede funcionar hasta 2 horas continuas sin necesidad de recargar baterías o cambiar algún dispositivo. La transmisión inalámbrica de información fisiológica se llevó a cabo por medio de beacons de radiofrecuencia con el estándar BLE, mientras que la adquisición del parámetro de RSSI se llevó a cabo por medio de beacons de radiofrecuencia con el estándar WiFi. Del análisis de resultados se puede concluir lo siguiente:

- De las gráficas de RSSI contra distancia se puede observar que a medida que incrementa la distancia, la incertidumbre aumenta y por ende en cualquier sistema de monitoreo que empleé el parámetro RSS habrá una máxima distancia de estimación de posición. En este caso correspondió a 10.5 m, para el dispositivo WiPy 2.0.
- Al tener una distancia máxima de estimación de posición se encontró con un problema de optimización de espacio que solo permitió que se estimara posición de los jugadores únicamente en la mitad de la cancha.
- El parámetro RSS resulta muy práctico y preciso en la estimación de distancias con un error promedio de 0.28m en una distancia máxima de 10 m.
- El sensor basado en oximetría tiene error en las lecturas de porcentaje de SpO2 cuando el jugador cambia bruscamente de posición fundamental, que se corrigió al solo tomar lecturas cuando el jugador se encuentra en reposo.

- La presión en la posición se ve fuertemente afectada cuando el jugador gira y/o se inclina, este problema se solucionó al añadir un acelerómetro y estudiar el comportamiento del patrón de radiación de las antenas.
- La ubicación del sensor que genera el beacon con el parámetro RSSI debe estar a una altura considerable, en este caso correspondió a 1.45m aprox, colocado en la espalda del jugador de voleibol.
- El método basado en el algoritmo de la distancia LDPL, ofreció mejores estimaciones de la posición con un error promedio menor a 0.9m2 a comparación del método de FSPL.
- El dispositivo WiPy ofreció un mejor comportamiento con los algoritmos de estimación de distancias a diferencia de los microcontroladores ESP32 y XBee S2.
- La transmisión de los beacons es confiable, ya que se estudió el medio de propagación y se implemento detección de errores.
- Por medio de un análisis estadístico de la ubicación de los jugadores es posible mejorar la precisión en la estimación como se estudio al implementar la técnica de LDPL-Fingerprint.
- Por medio de un análisis estadístico de los signos vitales de los jugadores se pueden registrar y enviar alertas en caso de anomalías.
- Los datos que se visualizan en el servidor web (posición e información fisiológica) se pueden descargar para un post-procesamiento y análisis.

La aportación novedosa que proporciona el sistema es la adquisición de la posición e información fisiológica de dos jugadores dentro de una cancha de juego cerrada en tiempo real con una red inalámbrica por medio de beacons de radiofrecuencia, por lo que no es necesaria una comunicación bidireccional entre transmisor y receptor. Adicionalmente el dispositivo requiere el uso de un procesador portátil que interconecta los múltiples dispositivos de comunicación. El sistema ofrece la característica de almacenar los datos en un navegador web que puede visualizar cualquier usuario que desee monitorear la información de posición y signos

vitales de los jugadores en tiempo real y en una representación en dos dimensiones. Siguiendo la metodología llevada a cabo, el sistema de monitoreo de signos vitales y posición se puede aplicar a cualquier otro deporte de sala.

Entre las principales ventajas del sistema de monitoreo con respecto a los análisis cualitativos actuales, se encuentran el análisis estadístico de la posición de los jugadores dentro de la cancha que ayuda a desarrollar y/o corregir jugadas de ataque/defensa, y en el caso de la adquisición de signos vitales ayuda a prevenir y/o detectar anomalías en la salud del jugador con el paso de las sesiones de entrenamiento.

Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro se espera mejorar la precisión de la posición al implementar técnicas de corrección de errores como los algoritmos de Kalman y el algoritmo de Fingerprint en tiempo real, además de implementar diferentes módulos inalámbricos en un rango de frecuencia menor a 2.4 GHz que permitan una estimación de la posición que abarque con totalidad la cancha de juego.

Referencias

- [1] L. HAUE-PEDERSEN, *2018 Olympic Sports Social Media Ranking*, Burson Cohn & Wolfe sports practice, Lausanne, January 28 2019.
- [2] R. SANTOS, *Metodología del rendimiento*, Baloncesto Series, INDE Publicaciones, ISBN 9788495114334., 2002.
- [3] L. T. A. W. ENFENG, *Study on the Trait Sport-confidence of the collegiate basketball athletes and its influence factors*, Proceedings 2011 International Conference on Human Health and Biomedical Engineering, vol. 1, no. 1, pp. 775-779, 2011 Jilin.
- [4] P. S. A. P. B. P. RANGSEE, *Simplified low-cost GPS-based tracking system for soccer practice*, 13th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), vol. DOI: 10.1109, no. 1, pp. pp. 724-728, 2013.
- [5] Y. G. D. L. REYES, *Voleibol: Entrenamiento de la tactica*, Colombia: Kinesis 13493, 2013.
- [6] J. A. KIRKUP, *Real-time Wireless Player Positioning System in Basketball*, Griffith University Australia: COT Beng, GradDip (Comp.) MIT, 2016.
- [7] E. M. P. T. Y. U. R. P. WILHELM, *SPA A system for analysis of indoor team sports using video tracking and wireless sensor network*, 2009 Proceedings of 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, Salzburg, 2009, pp. 237-241, DOI: 10.1109,ISPA.2009.5297714
- [8] S. G. A. F. A. A. R. E. MORAIS, *Automatic Tracking of Indoor Soccer Players Using Videos from Multiple Cameras*, 25th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images, Ouro Preto, vol. DOI: 10.1109, no. 1, pp. 174-181, 2012.
- [9] B. C. U. A. E. G. Y. ACIKMESE, *Towards an artificial training expert system for basketball*, 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering *ELECO*, vol. 1, no. 1, pp. 1300-1304, 2017 Bursa.

- [10] C. Z. T. K. A. K. Y. J. TURNER, *Continuous heart rate monitoring using smartphone*, IEEE International Conference on Electro Information Technology *EIT* Lincoln, NE, DOI: 10.1109, no. 1, pp. 324-326, 2017.
- [11] D. D. R. D. V. T. JAMES A. KIRKUP, *Indoor Propagation Investigation From a 2.4GHz Waist Mounted Beacon*, Procedia Engineering, ISSN 1877-7058, no. 1, p.p 188-194, 2013.
- [12] P. F. OVIDIU VERMESAN, *Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems*, EU: River Publishers, 2013.
- [13] KARL T. ULRICH, *Product Design and Development*, McGraw-Hill Education, Edicion 5, 2011.
- [14] KAMERAD, *Los hombres olimpicos griegos contra el deporte moderno*, Espana, Editorial Kamerad, 2014.
- [15] A. I. J. H. M. P. Y. U. R. W. IBRAHEEM, *Reconfigurable vision processing system for player tracking in indoor sports*, Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing (DASIP), DOI 10.1109, no. 1, pp. 1-6, 2017.
- [16] K. P. Y. A. F. A. STELZER, *Concept and application of LPM - a novel 3-D local position measurement system*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, DOI 10.1109, no. 1, pp. 2664-2669, 2004.
- [17] S. v. W. C. R. A. N. W. R. XIONG, *Development of a Novel Indoor Positioning System With mm-Range Precision Based on RF Sensors Network*, IEEE Sensors Letters, DOI 10.1109, Art no. 5500504, pp. 1-4, Oct. 2017.
- [18] B. C. A. S. MEHER, *Real-time position estimation and tracking of a basketball*, IEEE International Conference on Signal Processing, Computing and Control, vol. 1, no. 1, pp. 1-6, 2012.
- [19] Y. M. Y. J. C. S. LIU, *Research of three-dimensional indoor positioning based on RSSI*, 9th International Congress on Image and Signal Processing (CISP-BMEI), DOI 10.1109., no. 1, pp. 1227-1231, 2016.

- [20] D. D. R. J. A. KIRKUP, *Team Player Tracking Using Sensors and Signal Strength for Indoor Basketball*, IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 11, pp. 4622-4630, 2016.
- [21] LUIS GUILLERMO GARCIA GARCIA, *Voleibol : Fundamentacion Tecnica y Tactica*, Editorial Kinesis, 2013.
- [22] TONINHO GUIMARAES, *Voleibol : Iniciacion y Alto Rendimiento*, Editorial Deportiva magister, 2011.
- [23] E. BRADLEY TITUS SCHEER, *Physiology - enciclopedia britannica online url : <https://www.britannica.com/science/physiology>*, Noviembre 2018.
- [24] THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, *Vital sign enciclopedia britannica online url : <https://www.britannica.com/science/vital-sign>*, Noviembre 2017.
- [25] ANGELA AGUAYO P. ANA PAULINA LAGOS T., *Guia clinica de control de signos vitales*, Facultad Ciencias de la Salud, Universidad Pedro de Valdivia.
- [26] A. D. DIAZ ALONSO, C. M. TRAVIESO, J. B. ALONSO, M. K. DUTTA AND A. SINGH, *Biometric personal identification system using biomedical sensors*, 2nd International Conference on Communication Control and Intelligent Systems CCIS, Mathura, 2016.
- [27] FREDDY DEL ANGEL ARRIETA, SERGIO ESCALERA CANTO, *Oximetro de pulso con pletismografia por reflexion implementando el modulo MAX30100 mediante procesamiento digital con interfaz grafica*, SOMIB dx.doi.org/10.24254/CNIB.17.86, 2017.
- [28] JOHN G. WEBSTER, *Design of pulse oximeters*, CRC Press, 1997.
- [29] XIAOMAN XING AND MINGSHAN SUN, *Optical blood pressure estimation with photoplethysmography and FFT-based neural networks*, BIOMEDICAL OPTICS EXPRESS 3007, Vol. 7, No. 8, 2016.
- [30] CORRAL QUIROZ ROSALBA DE JESUS, CORRAL MENDOZA MA. GERTRUDIS DEL ROSARIO, JUAREZ BARRON MA. EUGENIA, OCHOA CHAVEZ MA. LUISA, *Signos vitales conocimiento y cumplimiento de tecnicas de medicion*, IMSS Rev. Hospital General Regional No. 1 2006.

- [31] JETZE EMMANUEL BENGOCHEA CRUZ, *ESTUDIOS DE CAMPO Y SELECCION DE ANTENAS PARA REDES 802.11*, Facultad de IngenierÃa, Tesis UNAM, 2012.
- [32] M. S. ZEHL, N. KAROWSKI, A. ZUBOW AND A. WOLISZ, *LoWS A complete Open Source solution for Wi-Fi beacon stuffing based Location-based Services*, 9th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), Colmar, 2016, pp. 25-32. DOI 10.1109.
- [33] IEEE STANDARD FOR LOCAL AND METROPOLITAN AREA NETWORKS, *Wireless body area networks. IEEE Std 802.15.6 2012*, pag. 1 a 271, 2012, DOI 10.1109/IEEESTD.2012.6161600.
- [34] RAJANDEEP KAUR, ER. SHIKKA TUTEJA, *Need of WBAN a survey; International Journal of Engineering Research and Technology*, ISSN 2278-0181 Vol 4, 2019.
- [35] EVA M. GARCIA POLO, *Tecnicas de Localizacion en Redes Inalambricas de Sensores*, Instituto de Investigacion en Informatica de Albacete, Departamento de Sistemas Informaticos, Universidad de Castilla La Mancha, 2008.
- [36] YANYING, G., LO, A., NIEMEGERERS, I., *A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks*, Communications Surveys and Tutorials, IEEE, 11(1), 13 - 32, 2009.
- [37] O. KATIRCIOGLU, H. ISEL, O. CEYLAN, F. TARAKTAS AND H. B. YAGCI, *Comparing ray tracing, free space path loss and logarithmic distance path loss models in success of indoor localization with RSSI*, 19th Telecommunications Forum (TELFOR) Proceedings of Papers, Belgrade, pp. 313-316, 2011.
- [38] W. CHEN, K. KAO, Y. CHANG AND C. CHANG, *An RSSI - based distributed real - time indoor positioning framework*, 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI), Chiba, pp. 1288 - 1291, DOI 10.1109, 2018.
- [39] T. A. MOUNIR, P. S. MOHAMED, B. CHERIF Y B. AMAR, *Positioning system for emergency situation based on RSSI measurements for WSN*, International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN), pp. 1 - 6, 2017.

- [40] Z. M. LIVINSA AND S. JAYASHRI, *Performance analysis of diverse environment based on RSSI localization algorithms in wsns*, IEEE Conference on Information and Communication Technologies, Thuckalay, Tamil Nadu, India, pp. 572 - 576, DOI 10.1109, 2013.
- [41] A. A. SANGUESA, T. B. MOESLUND, C. H. BAHNSEN AND R. B. IGLESIAS, *Identifying Basketball Plays from Sensor Data; Towards a Low-Cost Automatic Extraction of Advanced Statistics*, IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW), New Orleans, pp. 894-901, 2017.
- [42] KAY ROMER, HOLGER KARL, FRIEDEMANN MATTERN, *Wireless Sensor Networks: Third European Workshop*, Springer, Switzerland, February, 2006
- [43] A. D. DIAZ ALONSO, C. M. TRAVIESO, J. B. ALONSO, M. K. DUTTA AND A. SINGH, *Biometric personal identification system using biomedical sensors*, 2nd International Conference on Communication Control and Intelligent Systems (CCIS), Mathura, 2016.
- [44] SEBASTIAN SADOWSKI, *RSSI-Based Indoor Localization With the Internet of Things*, IEEE Access 2018.2843325, 2018.
- [45] KERIM BEDRI SACAN, *Performance Assessment of MAX30100 SpO2-Heartrate Sensor*, IEEE Medical Technologies National Congress, 2017.
- [46] P. S. BHENDWADE, S. D. PATIL AND R. T. PATIL, *Design low energy consumption system for monitoring of patient physiological information*, International Conference on Communication and Signal Processing, Melmaruvathur, 2014.
- [47] LOPEZ HERRANZ, G. PATRICIA, *Oximetria de Pulso: A la vanguardia en la monitorizacion no invasiva de la oxigenacion*, Revista Medica del Hospital General de Mexico, p.p. 160 - 169, 2003.
- [48] TAIYANG WU , JEAN-MICHEL REDOUTE , MEHMET RASIT YUCE, *Design With Subcutaneous Energy Harvesting for Long-Term IoT Healthcare Applications*, IEEE Access.2018.2851940, 2018.

- [49] A GARCIA, *SERVICIOS DE APLICACION: TELNET, FTP, TFTP, NFS, SMTP, POP3, IMAP4, WWW Y GOPHER*, Pontificia Universidad Catolica de Peru, 2000.
- [50] NELSON MORALES, *Antenas, Polarizacion y Diagramas de Radiacion*, Facultad de Ciencias Fisicas y Matematicas, Universidad de Chile, 2012
- [51] R. H. MUROFUSHI, R. F. GONCALVES, A. R. SOUSA, *Indoor Positioning System Based on the RSSI Using Passive Tags*, XIII Latin American Robotics Symposium and IV Brazilian Robotics Symposium (LARS/SBR), Recife, pp. 323-327, 2016.
- [52] GALO NUNO-BARRAU, *A New Location Estimation System for Wireless Networks Based on Linear Discriminant Functions and HiddenMarkovModels*, EURASIP Journal on Applied Signal Processing, Article ID 68154, pp. 1-17, 2006.
- [53] EUGENIO LOPEZ ALDEA, *Raspberry Pi Fundamentos y Aplicaciones*, Ra-Ma; 2017978-84-9964-719-7.



1.2. Specifications

Table 1-1. Specifications

Categories	Items	Parameters	
Wi-Fi	Certification	Wi-Fi Alliance	
	Protocols	802.11 b/g/n (HT20)	
	Frequency Range	2.4G ~ 2.5G (2400M ~ 2483.5M)	
	TX Power		802.11 b: +20 dBm
			802.11 g: +17 dBm
			802.11 n: +14 dBm
	Rx Sensitivity		802.11 b: -91 dbm (11 Mbps)
		802.11 g: -75 dbm (54 Mbps)	
		802.11 n: -72 dbm (MCS7)	
Antenna		PCB Trace, External, IPEX Connector, Ceramic Chip	
Hardware	CPU	Tensilica L106 32-bit processor	
	Peripheral Interface		UART/SDIO/SPI/I2C/I2S/IR Remote Control
			GPIO/ADC/PWM/LED Light & Button
	Operating Voltage	2.5V ~ 3.6V	
	Operating Current	Average value: 80 mA	
	Operating Temperature Range	-40°C ~ 125°C	
	Package Size	QFN32-pin (5 mm x 5 mm)	
External Interface	-		
Software	Wi-Fi Mode	Station/SoftAP/SoftAP+Station	
	Security	WPA/WPA2	
	Encryption	WEP/TKIP/AES	
	Firmware Upgrade	UART Download / OTA (via network)	
	Software Development	Supports Cloud Server Development / Firmware and SDK for fast on-chip programming	
	Network Protocols	IPv4, TCP/UDP/HTTP	
	User Configuration	AT Instruction Set, Cloud Server, Android/iOS App	

Note:

The TX power can be configured based on the actual user scenarios.

ESP32 DATASHEET

1. Overview

ESP32 is a single 2.4 GHz Wi-Fi-and-Bluetooth combo chip designed with the TSMC ultra-low-power 40 nm technology. It is designed to achieve the best power and RF performance, showing robustness, versatility and reliability in a wide variety of applications and power scenarios.

The ESP32 series of chips includes ESP32-D0WQ6, ESP32-D0WD, ESP32-D2WD, and ESP32-S0WD. For details on part numbers and ordering information, please refer to [Part Number and Ordering Information](#).

1.1 Featured Solutions

1.1.1 Ultra-Low-Power Solution

ESP32 is designed for mobile, wearable electronics, and Internet-of-Things (IoT) applications. It features all the state-of-the-art characteristics of low-power chips, including fine-grained clock gating, multiple power modes, and dynamic power scaling. For instance, in a low-power IoT sensor hub application scenario, ESP32 is woken up periodically and only when a specified condition is detected. Low-duty cycle is used to minimize the amount of energy that the chip expends. The output of the power amplifier is also adjustable, thus contributing to an optimal trade-off between communication range, data rate and power consumption.

Note:

For more information, refer to Section 3.7 RTC and Low-Power Management.

1.1.2 Complete Integration Solution

ESP32 is a highly-integrated solution for Wi-Fi-and-Bluetooth IoT applications, with around 20 external components. ESP32 integrates an antenna switch, RF balun, power amplifier, low-noise receive amplifier, filters, and power management modules. As such, the entire solution occupies minimal Printed Circuit Board (PCB) area.

ESP32 uses CMOS for single-chip fully-integrated radio and baseband, while also integrating advanced calibration circuitries that allow the solution to remove external circuit imperfections or adjust to changes in external conditions. As such, the mass production of ESP32 solutions does not require expensive and specialized Wi-Fi testing equipment.

1.2 Wi-Fi Key Features

- 802.11 b/g/n
- 802.11 n (2.4 GHz), up to 150 Mbps
- WMM
- TX/RX A-MPDU, RX A-MSDU
- Immediate Block ACK
- Defragmentation
- Automatic Beacon monitoring (hardware TSF)
- 4 x virtual Wi-Fi interfaces

WiPy 2.0 DATASHEET

WiPy 2.0

Introducing the WiPy 2.0. The tiny MicroPython enabled Wifi & Bluetooth IoT development platform. With a 1KM WIFI range, state of the art Espressif ESP32 chipset and dual processor, the WiPy is all about taking the Internet of Things to the next level.

Create and connect your things everywhere. Fast.

WiPy Features

- Powerful CPU, BLE and state of the art WIFI radio.
- 1KM Wifi Range
- MicroPython enabled
- Fits in a standard breadboard (with headers)
- Ultra-low power usage: a fraction compared to other connected micro controllers

Processing

- Espressif ESP32 chipset
- Dual processor + WiFi radio System on Chip
- Network processor handles the WiFi connectivity and the IPv6 stack
- Main processor is entirely free to run the user application
- An extra ULP-coprocessor that can monitor GPIOs, the ADC channels and control most of the internal peripherals during deep-sleep mode while only consuming 25uA

Use the Pymakr IDE

Super easy code editor to write your Python scripts.

Quick Verification

For easy and fast debugging use the interactive shell that is accessible through telnet or one of the serial ports.

Easy Upload

Upload your scripts, and any other files you want to the WiPy via the FTP server

Locally or remotely

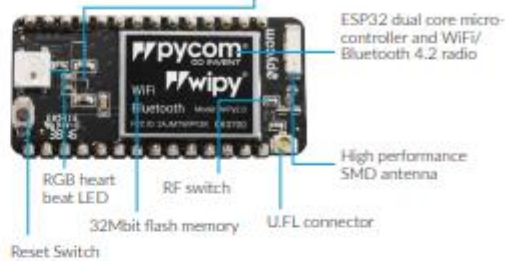
Reset the WiPy (you can do it locally, or remotely via Telnet)

Mechanical

Size: 42mm x 20mm x 3.5mm (excluding headers)

Operating temperature:
-40 to 85 degrees celsius

3V3 ultra low noise
switching regulator



Interfaces

- 2 x UART, 2 x SPI, I2C, I2S, micro SD card
- Analog channels: 8x12 bit ADCs
- Timers: 4x16 bit with PWM and input capture
- DMA on all peripherals
- GPIO: Up to 24

Hash / encryption

SHA, MD5, DES, AES

WiFi

802.11b/g/n 16mbps

Bluetooth

Low energy and classic

RTC

Running at 32KHz

Power

- 3.3V to 5.5V

3V3 output capable of
sourcing up to 500mA

Security & Certifications

- SSL/TLS support
- WPA Enterprise security
- FCC - 2AJMTWIPY2R
- CE 0700

Memory

- RAM: 512KB
- External flash 4MB
- Hardware floating point acceleration
- Python multi-threading

With dozens of ready to use templates and libraries soon to be available on the Pycom Exchange, developing a new IoT solution is now easier and faster. Additional support for Blynk: SMTP, MQTT, URLLIB, ONEWIRE, Accelerometer, Event loop MicroPython together with the universal hardware API allow us to build a large set of powerful, robust, and portable libraries across hardware platforms.

XBEE S2 DATASHEET

1.2. Specifications

Table 1-01. Specifications of the XBee Series 2 OEM RF Module (PRELIMINARY)

Specification	XBee Series 2
Performance	
Indoor/Urban Range	up to 133 ft. (40 m)
Outdoor RF line-of-sight Range	up to 400 ft. (120 m)
Transmit Power Output (software selectable)	2mW (+3dBm)
RF Data Rate	250,000 bps
Serial Interface Data Rate (software selectable)	1200 - 230400 bps (non-standard baud rates also supported)
Receiver Sensitivity	-95 dBm (1% packet error rate)
Power Requirements	
Supply Voltage	2.8 – 3.4 V
Operating Current (Transmit)	40mA (@ 3.3 V)
Operating Current (Receive)	40mA (@ 3.3 V)
Power-down Current	< 1 uA @ 25°C
General	
Operating Frequency Band	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)
Operating Temperature	-40 to 85° C (industrial)
Antenna Options	Integrated Whip, Chip, RPSMA, or U.FL Connector
Networking & Security	
Supported Network Topologies	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer & Mesh
Number of Channels (software selectable)	16 Direct Sequence Channels
Addressing Options	PAN ID and Addresses, Cluster IDs and Endpoints (optional)
Agency Approvals	
United States (FCC Part 15.247)	Pending
Industry Canada (IC)	Pending
Europe (CE)	Pending

MAXREFDES117# DATASHEET



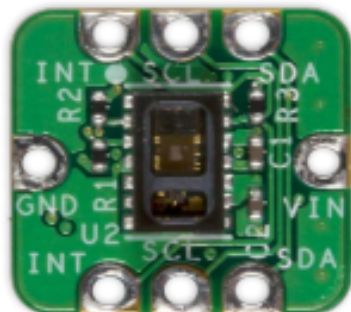
System Board 6300

MAXREFDES117#: Heart-Rate and Pulse-Oximetry Monitor

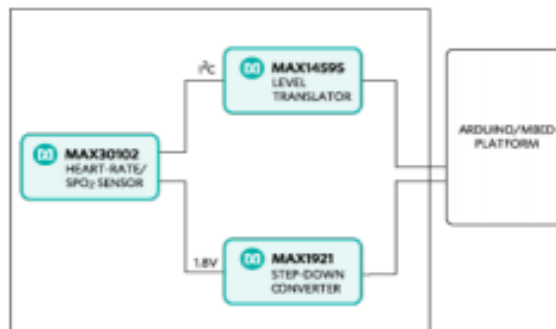
The MAXREFDES117# reference design is a low power, optical heart-rate module complete with integrated red and IR LEDs, and a power supply. This tiny board, perfect for wearable projects, may be placed on a finger or earlobe to accurately detect heart rate. This versatile module works with both Arduino and mbed platforms for quick testing, development and system integration. A basic, open-source heart-rate and SpO₂ algorithm is included in the example firmware.

The board features 8 sewing tap pads for attachment and quick electrical connection to a development platform.

MAXREFDES117# System Board



MAXREFDES117# Reference Design Block Diagram



Features

- Optical Heart-Rate Monitor and Pulse Oximetry Solution
- Tiny 12.7mm x 12.7mm (0.5in x 0.5in) Board Size
- Low Power
- Device Drivers
- Free Algorithm
- Example C Source Code For Arduino And mbed Platforms
- Test Data

Competitive Advantages

- Highly-integrated, small-size sensor
- Non-chest based heart-rate/SpO₂ detection
- Ultra-low power consumption



Fever click

PID: MIKROE-2554

Weight: 22 g



Fever click measures your body temperature with the accuracy of 0.1°C (37°C to 39°C). The click carries MAX30205 human body temperature sensor. Fever click is designed to work on a 3.3V power supply. It communicates with the target MCU over I2C interface.

MAX30205 sensor features

The MAX30205 temperature sensor accurately measures temperature and provide an overtemperature alarm/interrupt/shutdown output.

This device converts the temperature measurements to digital form using a high resolution, sigma-delta, analog-to-digital converter (ADC). An I2C-compatible two-wire serial interface allows access to conversion results.

The MAX30205 has 0.1°C accuracy (37°C to 39°C), and 16-Bit ($0.00390625^{\circ}\text{C}$) temperature resolution.

DRAGINO YUN DATASHEET



www.dragino.com

1 INTRODUCTION

1.1 What is Yun Shield

Yun Shield is one of the most powerful shields for Arduino Board. Yun Shield is designed to solve the Internet connectivity and storage issue for Arduino Board.

Yun Shield runs Open Source OpenWrt system (Same system as runs in Arduino Yun) and it is fully compatible with Arduino IDE v1.5.4 or later. Yun Shield is the ideally choice for Arduino Projects which require various internet connections and more storage.



Basically, Yun Shield + Leonardo equally to the official Arduino Yun, but Yun Shield is more flexible because it can work with other Arduino board such as Uno, Duemilanove, Mega etc. And Yun Shield uses external wifi antenna which provides stability and possibility for various environments.

1.2 Specifications

- Processor: 400MHz, 24K MIPS
- Flash: 16MBytes
- RAM: 64MBytes
- Power Input: 4.75v ~ 23v via Arduino VIN pin
- 1 x 10M/100M RJ45 connector
- 150M WiFi 802.11 b/g/n
- External Antenna via I-Pex connector
- 1 x USB 2.0 host connector, used for USB storage or 3G connection
- 1 x Reset button
- Compatible with 3.3v or 5v I/O Arduino.

1.3 Features

- ✓ Open source Linux (OpenWrt) inside

RASPBERRY DATASHEET

Overview



The Raspberry Pi 3 Model B+ is the latest product in the Raspberry Pi 3 range, boasting a 64-bit quad core processor running at 1.4GHz, dual-band 2.4GHz and 5GHz wireless LAN, Bluetooth 4.2/BLE, faster Ethernet, and PoE capability via a separate PoE HAT

The dual-band wireless LAN comes with modular compliance certification, allowing the board to be designed into end products with significantly reduced wireless LAN compliance testing, improving both cost and time to market.

The Raspberry Pi 3 Model B+ maintains the same mechanical footprint as both the Raspberry Pi 2 Model B and the Raspberry Pi 3 Model B.

Antena monopolo GW.11.A 153 DATASHEET.

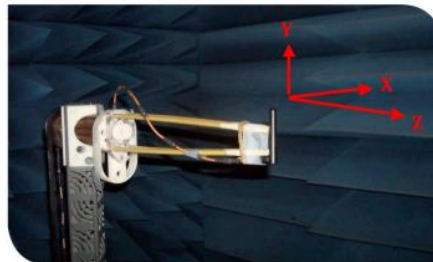


4. Radiation Patterns

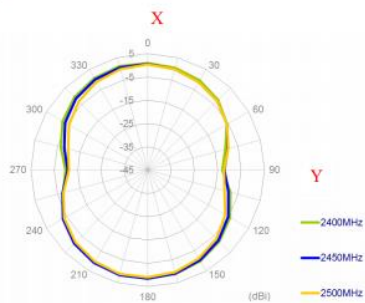
The antenna radiation pattern was measured in ETS Anechoic Chamber.
The testing setup is as below.
The antenna was measured in free space.

SPECIFICATION

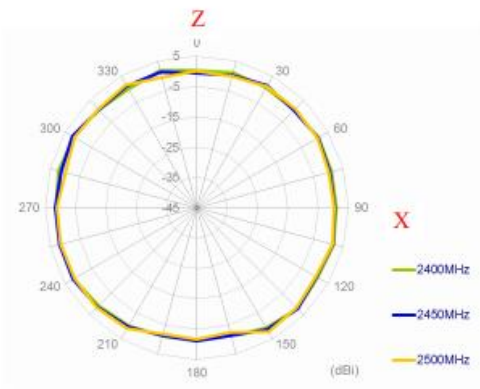
- Part No. : **GW.11.A153**
- Product Name : 2.4GHz 2.3dBi Screw mount Dipole Antenna
- Description : RP-SMA(M) Connector
Hinged
TPE Housing
IP65 at SMA Connector
Length 84mm
ROHS Compliant



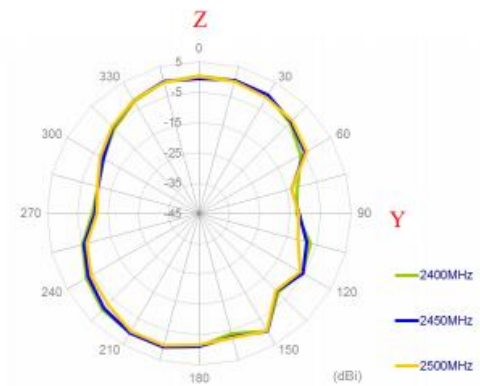
XY Plane



XZ Plane



YZ Plane





Sistema de monitoreo de frecuencia cardiaca y localización basado en radiofrecuencia para la evaluación del desempeño de jugadores de deportes de sala.

Maldonado J. A., Moumtadi F.

Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510

Av. Universidad 3000, Ciudad de México, México

tonatiuh@comunidad.unam.mx; fatima@fi-b.unam.mx

RESUMEN

Este artículo presenta el desarrollo de un sistema orientado a sesiones de entrenamiento de jugadores de deportes de sala con dos funciones: El monitoreo de frecuencia cardiaca por medio del estándar IEEE 802.15 (Bluetooth) usando un pulsioxímetro, que permita una medición no invasiva, móvil, confiable y de bajo consumo energético de latidos por minuto, así como el monitoreo de localización usando el parámetro de intensidad de señal recibida (RSS) tomado la trama Beacon del estándar IEEE 802.11 (WiFi), un algoritmo de posicionamiento basado en RSS y la técnica de trilateración, para construir una solución costo-efectiva para entornos de deportes de sala como alternativa a la tecnologías de localización de video y al sistema de posicionamiento global (GPS).

PALABRAS CLAVE: Frecuencia Cardiaca, Localización, Monitoreo, Radiofrecuencia, Trilateración.

1 INTRODUCCIÓN

El monitoreo de signos vitales y localización de deportistas ayuda a los entrenadores a tomar decisiones basadas en estadísticas para: prevenir lesiones, monitorear procesos de rehabilitación, desarrollar jugadas de ataque y/o defensa, así como un mejor desempeño individual y colectivo de los jugadores [1-4]. Sin embargo, existe el problema que en los deportes donde los jugadores se mueven rápidamente, es extremadamente difícil analizar los movimientos repentinos de los jugadores y monitorear sus signos vitales como lo es, la frecuencia cardiaca sin la ayuda de instrumentos de medición y monitoreo. El monitoreo de frecuencia cardiaca en tiempo real por parte de los entrenadores hacia los jugadores de forma inalámbrica se ha desarrollado notablemente en los últimos años, un ejemplo es el que se menciona en [5], donde se presentan protocolos estandarizados para llevar a cabo un monitoreo de este tipo, sin embargo para llevar a cabo un monitoreo de localización y seguimiento, los entrenadores



Wireless Networks and Internet of Things (IoT) Technologies based Localization System for Indoor Sports Player Performance Evaluation

J. A. Maldonado Cruz
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Nacional Autónoma de México, 04510
Ciudad de México, México

F. Mountadi
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Nacional Autónoma de México, 04510
Ciudad de México, México

Abstract—This paper proposes the development of a player localization system using the Received Signal Strength Indicator (RSSI) parameter taken from IEEE 802.11 beacon frame, a positioning algorithm based on RSSI and trilateration technique to build a cost-effective solution for indoor sport environment as an alternative to video and Global Position System (GPS) localization technology. The visualization of the player's location on the court will be done through a web page.

Keywords — Indoor, Localization, RSSI, Trilateration.

I. INTRODUCTION

Players tracking helps coaches make informed decisions based on statistics to: preventing injuries, closely monitoring rehabilitation process, developing attacking and/or defending plays, as well as a better individual and collective performance of the players [1-4]. Though, there is the problem that in sports where players move quickly it is extremely difficult to analyze the sudden movements of the players without the help of technology. To carry out a localization and tracking monitoring, coaches use video-based or GPS-based technologies [5-6], however, video-based technologies are complex and expensive [2]. Although GPS is the established standard used to estimate the location of players in different sports for a quantitative test, it is not suitable for a precise local positioning, due to obstruction of the sign by roof and wall. Furthermore, in the GPS there is a generalized technology for global positioning with speed of measurement and precision (without additional corrections) limited [5, 7].

For this reason, multiple techniques have been suggested to indirectly obtain the local position of static and / or moving objects with techniques such as: trilateration, multilateration, triangulation and proximity all of which are based on radiofrequency (RF) [8]. The main distance estimation parameters related to these techniques are: time of arrival (ToA), arrival time difference (TDoA), arrival angle (AoA) and Received Signal Strength Indicator (RSSI). The current location systems use these techniques individually or combined mainly in indoor environments such as houses and industries where there is a significant disorder of objects [9]. The advantage of bringing these systems to indoor sports is that, by not having objects interfering in the signals path except for the players themselves like in basketball [2], there is less effect from phenomena such as fading, scattering and reflections resulting in a better position estimate. Also, it is possible to use the IEEE 802.11 standard [10] standard

because the 2.4 and 5 GHz spectrum is not so saturated in training sport environments. RF localization techniques based on RSSI tend to be very accurate for short distances, but they are imprecise when increasing a few meters. However, as the RSSI parameter is very practical, it is still used by many researchers [7].

In this context, this paper presents the development of a location system for a transmitting beacon that will be carry by a player in indoor sport environment. A localization model will be made for the closed environment, the trilateration technique will be implemented, and the player localization with respect to the court will be shown in a two-dimensional representation by IoT technologies. The rest of the paper is organized as follows. In section II, a general description of the methodology will be presented. The results are shown in Section III. Finally, in section IV conclusions will be presented.

II. STUDY DESIGN AND METHODOLOGY

In order to develop an accurate positioning system is essential to carry out a study of RF signals propagation; nowadays there are currently many propagation models oriented to indoor environments [8,9] such as the RSSI parameter which is very practical [7] and useful since the unique obstacles in game fields are the players, therefore a model that employs this parameter was used. RSSI is defined as ten times the logarithm of the ratio power of the received signal and a reference power.

$$RSSI = 10\log(P / Pref) \quad (1)$$

Furthermore, the power of the received signal is inversely related to the distance, i.e., $RSSI \propto (1 / D^n)$. Where D is the distance between the transmitting and receiving antenna and n is the path loss exponent factor. Equation (1) is related to (2):

$$RSSI = -10\log(D) + C \quad (2)$$

From (2) [11], it's seen that RSSI has a linear relationship with the logarithm of distance, where C is a fixed constant. Equation (2) can also be represented as (3):

$$RSSI = -m\log(D) + C \quad (3)$$

Where m is the slope of the linear equation between RSSI and the logarithm of the distance, the path loss exponent factor n can be expressed as:

$$n = m / 10 \quad (4)$$

From (3), the relation of RSSI and the distance between antennas is obtained, this equation can also be expressed as (5) to estimate position.