



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

---

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO EN  
INTERIORES: TECNOLOGÍAS,  
APLICACIONES Y EVOLUCIÓN.

---

TRABAJO MONOGRÁFICO  
PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERO EN REDES.

PRESENTA

DIANGO EMMANUEL QUIJANO COCOM.

SUPERVISORES PROPIETARIOS

DR. HOMERO TORAL CRUZ.

DR. JOSÉ ANTONIO LEÓN BORGES.

DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC.

SUPERVISORES SUPLENTE

MT. MARTÍN ANTONIO SANTOS ROMERO.

M.S.I. LUIS FERNANDO MIS RAMÍREZ.



UNIVERSIDAD DE  
QUINTANA ROO  
CONTROL ESCOLAR  
TITULACIONES



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2019



# UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

## DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO MONOGRÁFICO TITULADO  
"SISTEMA DE POSICIONAMIENTO EN INTERIORES: TECNOLOGÍAS, APLICACIONES Y EVOLUCIÓN."

ELABORADO POR  
DIANGO EMMANUEL QUIJANO COCOM

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DEL PROGRAMA DE LICENCIATURA Y  
APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**INGENIERO EN REDES**  
**COMITÉ SUPERVISOR**

SUPERVISOR:

  
DR. HOMERO TOTAL CRUZ.

SUPERVISOR:

  
DR. JOSÉ ANTONIO LEÓN BORGES.

SUPERVISOR:

  
Dr. FREDDY IGNACIO CHAN PUC.

SUPLENTE:

  
M.T. MARTÍN ANTONIO SANTOS ROMERO.

SUPLENTE:

  
M.S.I. LUIS FERNANDO MIS RAMÍREZ.



UNIVERSIDAD DE  
QUINTANA ROO  
CONTROL ESCOLAR  
TITULACIONES



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2019

## **1 DEDICATORIAS.**

A mis padres Margarita y Romualdo, a mis abuelos Ramón y Eli, y también mis hermanos, que sepan que nunca podré agradecerlos todo el amor, sacrificio y sabiduría que me compartieron, todo el apoyo que recibí se quedará conmigo por siempre y me ha hecho ser quien soy, aunque el camino sea difícil sé que puedo contar con ustedes.

## 2 AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar a mi Asesor Homero Toral Cruz por no rendirse y siempre apoyarme durante todo este camino, también expreso mi agradecimiento a todos los profesores que estuvieron guiándome durante toda mi vida escolar, que sepan que todo su tiempo no se ha desperdiciado, todos han aportado una parte a mi persona, también quisiera mencionar a mi tío Ramón al que le agradezco el primer empujón a este camino y finalmente pero no menos importante a esta gran casa de estudios, que me ha formado con los más altos estándares de calidad como profesionalista a lo largo de los años.



### 3 RESUMEN

El posicionamiento de interiores es un tema abordado por muchos especialistas, que buscan entender y sacar el máximo partido a toda la gama de servicios que se pueden prestar, lo alcanzado desde que se concibió el primer concepto de navegación, posicionamiento y las primeras interpretaciones que se le fueron dando durante su evolución por mencionar algunos logros: la radio como tecnología que sentaría las bases de muchas de las tecnologías futuras, la industria militar como fuente de desarrollo tecnológico, naciendo muchas de las técnicas y dispositivos que luego pasaron al dominio civil, prácticamente el GPS es la evolución de sistemas militares de posicionamiento con intenciones primarias bélicas.

Las comunicaciones inalámbricas redujeron costos, los dispositivos evolucionaron se volvieron más pequeños y prácticamente cualquier persona tendría accesos a ellos, agregaron nuevas funciones y estándares, con esas herramientas se comienza a cuestionar si realmente el posicionamiento ha llegado al límite, la interpretación de la ubicación se vuelve local para algunos servicios y el GPS no es funcional para ello.

La comunicación móvil igual cambio la forma en la que el mercado funcionaba, asociaciones comerciales con intenciones de estandarizar sus funcionalidades implementaron certificaciones motivados por evaluar su compatibilidad, por nombrar algunos ejemplos, WIFI, bluetooth, etc.. Y con cada generación nuevas funciones y desafíos aparecía, las técnicas aplicadas creaban áreas nuevas a explorar.

El Internet al formar parte del día a día, se había fusionado con la movilidad y no solo era necesario acceder desde cualquier dispositivo móvil, sino que incluso al nacer el Internet de las cosas el Internet interconectaba los hogares.

Este documento, presentamos una revisión exhaustiva de la literatura sobre las diferentes tecnologías y metodologías utilizadas para la localización en interiores; además, analizamos diferentes aplicaciones basadas en localización, donde la información de ubicación es crítica para estimar. Finalmente, mostramos una comparación de los enfoques de posicionamiento en interiores y presentamos la evolución y las tendencias tecnológicas que tendrán los IPS en los próximos años, y algunas conclusiones.

# CONTENIDO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Dedicatorias.....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>2</b> | <b>Agradecimientos.....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>3</b> | <b>Resumen.....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>1</b> | <b>INTRODUCCIÓN.....</b>   | <b>12</b> |
| 1.1      | <i>ANTECEDENTES.....</i>   | 13        |
| 1.1.1    | NAVEGACIÓN.....  | 13        |
| 1.1.2    | RADIO.....   | 15        |
| 1.1.3    | SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO PRIMITIVOS.....                            | 17        |
| 1.1.4    | SATELITES ARTIFICIALES.....  | 18        |
| 1.1.5    | GPS.....   | 21        |
| 1.1.6    | TECNOLOGÍA MÓVIL.....  | 24        |
| 1.1.7    | ESTANDAR IEEE 802.11 Y 802.15.....                                     | 31        |
| <b>2</b> | <b>SISTEMA DE POSICIONAMIENTO EN INTERIORES.....</b>                   | <b>35</b> |
| 2.1      | <i>POSICIÓN EN INTERIORES.....</i>                                     | 35        |
| 2.1.1    | AREAS DE OPORTUNIDAD PARA EL POSICIONAMIENTO EN INTERIORES.....        | 37        |
| 2.2      | <i>CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO EN INTERIORES.....</i> | 38        |
| 2.2.1    | PARÁMETROS PARA LA CLASIFICACIÓN.....                                  | 39        |
| 2.3      | <i>LIMITACIONES EN EL POSICIONAMIENTO EN INTERIORES.....</i>           | 39        |
| 2.3.1    | SEGURIDAD Y PRIVACIDAD DE LOS USUARIOS.....                            | 39        |
| 2.3.2    | COSTO Y DISPONIBILIDAD COMERCIAL.....                                  | 40        |
| 2.3.3    | RENDIMIENTO, ROBUSTEZ Y TOLERANCIA A FALLAS.....                       | 40        |
| 2.3.4    | LIMITACIONES FÍSICAS O DEL MEDIO.....                                  | 41        |
| 2.4      | <i>GAMA DE TECNOLOGIAS DISPONIBLES.....</i>                            | 41        |
| <b>3</b> | <b>TECNICAS Y TECNOLOGÍAS DE POSICIONAMIENTO.....</b>                  | <b>42</b> |
| 3.1      | <i>PROPIEDADES DE LA SEÑAL.....</i>                                    | 42        |
| 3.1.1    | ANGLE OF ARRIVAL (AOA).....  | 43        |
| 3.1.2    | TIME OF ARRIVAL(TOA).....  | 44        |
| 3.1.3    | TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA).....                                 | 45        |
| 3.1.4    | RECEIVED SIGNAL STRENGTH IDENTIFICATION (RSSI).....                    | 45        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.2      | <i>ALGORITOMOS DE POSICIONAMIENTO</i>   | 46        |
| 3.2.1    | TRIANGULACIÓN   | 46        |
| 3.2.2    | TRILATERACIÓN   | 47        |
| 3.2.3    | PROXIMIDAD  | 47        |
| 3.2.4    | ANALISIS DE ESCENA Y HUELLAS DIGITALES  | 48        |
| 3.3      | <i>TECNOLOGÍAS DE POSICIONAMIENTO EN INTERIORES</i>                             | 48        |
| 3.3.1    | IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA  | 48        |
| 3.3.2    | WIFI  | 49        |
| 3.3.3    | BLUETOOTH   | 50        |
| 3.3.4    | ZIGBEE  | 51        |
| 3.3.5    | OPTICA O VISIÓN   | 52        |
| 3.3.6    | GEOMAGNETISMO   | 52        |
| 3.3.7    | ULTRA WIDE BAND (UWB)   | 54        |
| 3.3.8    | ULTRASONIDO O SONIDO  | 55        |
| 3.3.9    | LUZ VISIBLE   | 56        |
| 3.3.10   | PEDESTRIAN DEAD RECKONING (PDR)   | 57        |
| <b>4</b> | <b>APLICACIONES</b>   | <b>58</b> |
| 4.1      | <i>GESTIÓN Y RECUPERACIÓN DE DESASTRES</i>                                      | 58        |
| 4.2      | <i>SEGURIDAD</i>  | 58        |
| 4.3      | <i>ROBÓTICA</i>   | 59        |
| 4.4      | <i>Location Based Services (lbs)</i>  | 60        |
| 4.4.1    | Tecnología inalámbrica utilizada EN MBL   | 60        |
| 4.5      | <i>Inteligencia Ambiental o Vida Asistida por el Entorno</i>                    | 69        |
| 4.6      | <i>REDES 5G</i>   | 71        |
| <b>5</b> | <b>EVOLUCIÓN Y TENDENCIAS TECNOLÓGICAS DE LOS IPS</b>                           | <b>72</b> |
| 5.1      | <i>EVOLUCIÓN DE LOS IPS</i>   | 72        |
| 5.2      | <i>DESAFIOS Y PROBLEMAS ABIERTOS</i>  | 73        |
| 5.3      | <i>TENDENCIAS TECNOLÓGICAS E INVESTIGACIONES FUTURAS</i>                        | 82        |
| 6.3.1    | Construir un mapa de huellas digitales por radio con menos participación humana | 82        |
| 6.3.2    | Combinando varias técnicas no radiales  | 83        |
| 6.3.3    | Integración de varias soluciones de posicionamiento inalámbrico                 | 83        |
| 6.3.4    | Seguridad y privacidad  | 83        |
| 6.3.5    | Escalabilidad   | 84        |

|          |                                   |           |
|----------|-----------------------------------|-----------|
| 6.3.6    | Complejidad .....                 | 84        |
| 6.3.7    | Precisión vs costo efectivo ..... | 85        |
| 6.3.8    | Aplicaciones y precisión .....    | 86        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSIONES .....</b>         | <b>86</b> |
| <b>7</b> | <b>Bibliografía.....</b>          | <b>88</b> |

## TABLA DE IMAGENES

|            |  |    |
|------------|--|----|
| IMAGEN 1-1 | LATITUD Y LONGITUD .....                           | 15 |
| IMAGEN 1-2 | SISTEMA HIPERBÓLICO .....                          | 16 |
| IMAGEN 1-3 | COMUNICACIÓN SATELITAL .....                       | 20 |
| IMAGEN 1-4 | EVOLUCIÓN DEL POSICIONAMIENTO.....                 | 21 |
| IMAGEN 1-5 | ESTACIONES DEL SEGMENTO DE CONTROL .....           | 24 |
| IMAGEN 3-1 | POSICIONAMIENTO BASADO EN LA MEDICIÓN DE AOA ..... | 43 |
| IMAGEN 3-2 | POSICIONAMIENTO BASADO EN TOA .....                | 44 |
| IMAGEN 3-3 | POSICIONAMIENTO BASADO EN TDOA .....               | 45 |
| IMAGEN 3-4 | WIFI .....   | 49 |
| IMAGEN 3-5 | DISPOSITIVOS BLUETOOTH.....                        | 51 |
| IMAGEN 3-6 | ZIGBEE CONTROL TOTAL DEL HOGAR .....               | 51 |





# 1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones modernos tienen como objetivo principal, proporcionar altas velocidades de datos con una cobertura de servicio ubicua. Hoy en día, la disponibilidad de la información de ubicación de terminales móviles o dispositivos no localizados (Unlocated Device - UD) en las estaciones base, se ha convertido en un factor clave para permitir que los sistemas de comunicaciones proporcionen nuevos servicios basados en la ubicación [1] [2]. El aumento en el número de usuarios de dispositivos móviles ha llevado al desarrollo de varios servicios y aplicaciones basados en la tecnología de posicionamiento. Las tecnologías de posicionamiento se clasifican ampliamente en tecnologías de posicionamiento en exteriores e interiores [3].

Las técnicas prácticas de posicionamiento se basan en el tiempo de llegada (Time of Arrival - ToA), la diferencia horaria de llegada (Time Difference of Arrival - TDoA), la intensidad de la señal recibida (Received Signal Strength - RSS) y el ángulo de llegada (Angle of Arrival - AoA). En escenarios al aire libre, la posición de un UD se puede obtener con alta precisión de los sistemas de navegación global por satélite (Global Navigation Satellite Systems - GNSS), como el sistema de posicionamiento global (Global Positioning System - GPS), o de los sistemas celulares independientes [2]. Sin embargo, estos sistemas de posicionamiento están severamente degradados o pueden fallar por completo en ambientes interiores donde se interrumpen las señales satelitales o celulares, y en escenarios con profundos efectos de sombra [2] [4]. De hecho, la precisión de unos 50 metros dentro de un entorno comercial es inútil con respecto a una tarea como ubicar mercancías específicas en un estante [5]. Por lo tanto, los métodos y tecnologías especializadas para sistemas de posicionamiento en interiores (Indoor Positioning Systems - IPS) han sido ampliamente investigadas en las últimas décadas, principalmente en entornos industriales y para redes de sensores inalámbricos y robótica [5] [6].

Los sistemas de posicionamiento en interiores utilizan principalmente las tecnologías existentes de corto y mediano alcance, como [3] [6]: Wireless Fidelity (Wi-Fi), Bluetooth, Zigbee, visión, geomagnetismo, localización basada en sensores inerciales, Ultra Wide Band (UWB), identificación por radiofrecuencia, ultrasonido o sonido, luz y Pedestrian Dead Reckoning (PDR).

Los IPS tienen aplicaciones a gran escala en el sector de la salud, la industria, la gestión de desastres naturales, la gestión de edificios, la vigilancia y varios otros sectores. También puede beneficiar a muchos sistemas novedosos como Internet de las cosas (IoT), arquitecturas inteligentes (smart cities, smart buildings, smart grids) y comunicación máquina a máquina (M2M).

## 1.1 ANTECEDENTES

Si se hace un breve análisis, gran parte de los animales tienen la necesidad de desplazarse para cubrir sus instintos básicos como alimentarse, reproducirse o refugiarse del peligro sin ser la excepción el hombre, siempre han utilizado un punto de referencia para guiarse, la posición de los cuerpos celestes, el polo magnético; para el hombre reubicarse para tener ventaja sobre los grupos rivales o para dominar ciertos territorios era cosa de vida o muerte por ello se volvió una tarea más compleja, si bien la orografía del terreno fue fundamental para identificar lugares no era suficiente cuando de explorar nuevos territorios se trataba, sobre todo cuando la navegación comenzó a florecer y de ella comenzó a depender el comercio y la guerra; la curvatura de la tierra fue un obstáculo que obligó a crear un sistema mejor de ubicación que simplemente estar pendientes de la costa. La inexactitud era algo constante y requería de ajustes importantes que dificultaban las cosas, tal cual ocurre hoy día con el posicionamiento de interiores. En ese momento de la historia únicamente se contaba con la Latitud y el problema de la longitud se resolvió unos siglos después, dejando a la deriva el problema por generaciones pese a la importancia. Como se observa la forma en la que se ha medido la ubicación nunca fue constante ni igual a través de las épocas y siempre estuvo sometida a las iteraciones de prueba y error.

Con el surgimiento de tecnologías como las comunicaciones inalámbricas, se abrieron nuevas vertientes enfocadas en el posicionamiento. En el capítulo 1.1.2 se explican el desarrollo de la navegación. Seguido de las diferentes tecnologías que abrieron paso al posicionamiento moderno. [1]

### 1.1.1 NAVEGACIÓN

Durante miles de años, la navegación ha impactado significativamente en la humanidad. La exploración ha abierto un medio de encuentro entre diferentes culturas a

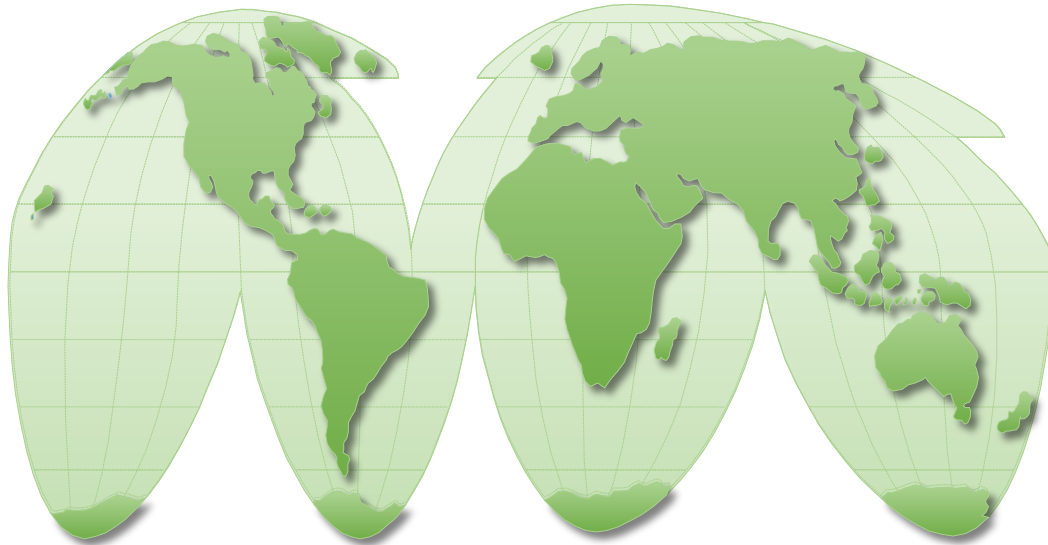
través del comercio, la guerra y la colonización, una mezcla de conocimientos que derivó en el crecimiento y florecimiento de las artes y la religión. Como se mencionó previamente la navegación se usaba para desplazarse y pescar o cazar a cierta distancia de la costa, el uso de referencias del terreno y faros fue esencial pues la línea de la costa era indispensable, generalmente cualquier movimiento alejado de ella terminaba en la pérdida de la embarcación, la dirección del viento y las corrientes eran una guía frecuente a usar. Como prueba de ello la construcción de una de las 7 maravillas del mundo antiguo, El Faro de Alejandría construida alrededor del año 200 en Egipto [1] [2].

Las culturas fenicias, griegas, persas por mencionar algunas utilizaban otro método; a través de los cuerpos celestes como el sol, la luna y algunas constelaciones como referencia, a través de una medida angular se calculaba una ruta, pero era por demás imprecisa además de utilizar instrumentos muy especializados, uno de estos primeros instrumentos fue el Astrolabio.

El cruce del viejo con el nuevo mundo fue uno de los encuentros más fortuitos, para aquel entonces se tenía un sistema más o menos establecido entre los navegantes. La latitud que se define como la distancia angular entre el ecuador y un punto norte, pudiendo ser Norte o Sur, La longitud de igual forma se trata de una media angular, pero como referencia se toma el Meridiano Principal.

Aquello que llevó más tiempo en resolverse fue el determinar el tema de la Longitud, tomo casi tres siglos llegar a algo significativo, en 1598 Philipp II de España ofreció un premio al que descubriera una solución, se fundó en Francia “Académie des Sciences” en 1666 también con dicha intención, las soluciones propuestas incluían la observación de las lunas de Júpiter, sin embargo era necesario contar con un telescopio, en julio de 1714 Sir Isaac Newton llego a la acertada conclusión de que era necesario el uso de un reloj para poder efectuar las mediciones más precisas, los relojes de ese tiempo funcionaban con un péndulo, pero dada la naturaleza de océano no era aplicable transportar uno. En agosto de 1765 Jon Harrison, un relojero logró tal Azaña al diseñar el primer cronometro marítimo de uso aplicable, la importancia de tener la precisión del tiempo radica en que el tiempo total de rotación de la tierra es de 24 horas, es decir que a cada hora corresponden  $15^\circ$  y mientras la latitud sea constante y tomando como referencia la diferencia de horas con respecto a un punto (el Sol, la Luna, constelaciones,

etc.) multiplicando esta diferencia se puede obtener la Longitud. El reloj que fue diseñado y comprobado fue el H-1, como consecuencia Harrison ganó un premio monetario de alrededor de 20000 £ y fue reconocido como la persona que logró solucionar el problema de la Longitud. [2]



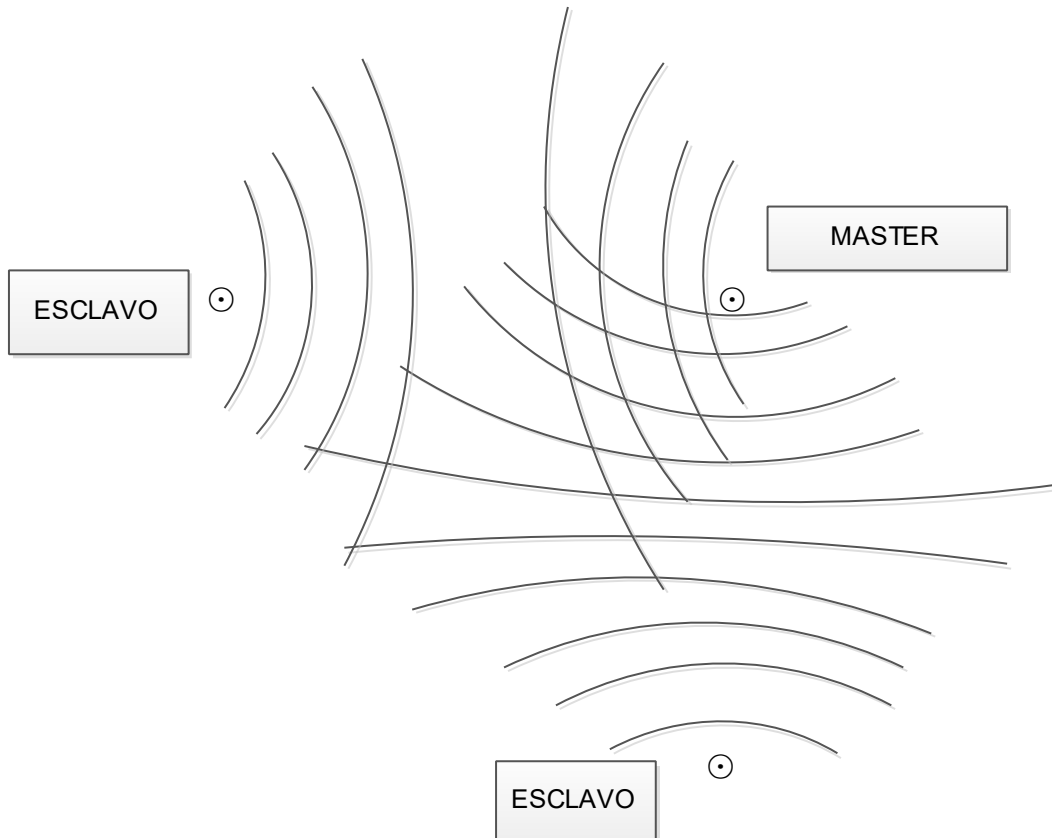
*Imagen 1-1 Latitud y longitud*

### 1.1.2 RADIO

El 12 de Diciembre de 1901 Guglielmo Marconi logro el primer intercambio intercontinental desde Cornwall, Inglaterra, hasta Newfoundland, Canadá, desde luego esto abrió el camino a la comunicación inalámbrica, partiendo desde el descubrimiento de dichas ondas en 1890 por Edouard Branly y con la reciente invención de la antena por Alexander Popov en 1896, previamente Marconi realizó diferentes experimentos transmitiendo mensajes a través de diferentes distancias sin que el efecto de la curvatura de la tierra tuviera un impacto negativo, G. Marconi demostró el potencial que tenían para lograr la comunicación entre la costa y los barcos, también se podía usar como una señal

de tiempo que permitía calcular la longitud, ya que hasta el momento el reloj de J. Harrison seguía siendo la forma principal para obtener esta.

La primera estación que se usó de forma práctica para realizar esta tarea y fungir



*Imagen 1-2 Sistema hiperbólico*

como un faro transmisor se estableció en 1908 contaba con una antena rotativa que permitía definir la posición y el ángulo del transmisor para un mejor ajuste a la línea de visión de la antena. Con la posibilidad de usar la radio como un marcador de posición, la radionavegación había nacido, casi de forma inmediata decenas de faros que emitían una señal de radio de sincronía se extendieron e incluso todavía hasta 1994 existían 2000 de estos faros alrededor del mundo. [2] [1]

Por el hecho de que se propagara el uso más frecuente de la señal de radio y con la evolución de las formas de medición del tiempo en alta mar, dio pie a un mejor y más complejo de uso de las señales como el sistema hiperbólico, el cual funcionaba a través de un transmisor maestro y otros transmisores esclavos que repetían una señal simultánea en forma de hipérbola, si el sistema detectaba una diferencia entre el tiempo de entrega de las señales a los esclavos, entonces se podía calcular dicha intercepción,



el método se utilizó hasta el final de la Segunda Guerra Mundial ejemplo de ello son el sistema LORAN-C (LONg RANGE Navigation system). [3] y OMEGA.

### 1.1.3 SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO PRIMITIVOS

El desarrollo de sistemas de posicionamiento por radio de forma hiperbólica dio paso a sistemas basados en el mismo principio, dos de los más importantes que fueron desarrollados son OMEGA y LORAN-C.

El sistema LORAN-C fue pensado como un sistema de radionavegación y posicionamiento terrestre, marino y aéreo en la costa a nivel civil y militar, a través de un acuerdo entre Canadá, Rusia y Estados Unidos, pero cuyo uso fue extendido a otros continentes como Europa y Asia con el propósito de brindar radionavegación y sincronía del tiempo con una precisión de 0.25 millas náuticas, a través de grupos de pulsos de 8 y 9 cada 150 $\mu$ s y operando a una frecuencia de 90 a 110 kHz no modulada. [3] [4] [5], aunque como contraparte requería una cantidad mayor de transmisores para cubrir áreas extensas, pero la precisión era mejor que la de OMEGA, por su parte este último tenía una cobertura global con apenas 8 estaciones repartidas por el mundo utilizaba una frecuencia de 10-14 kHz a través de ráfagas cada 0.9-1.2 s. trabajaron en sincronía por varios años hasta el retiro final de ambos, el funcionamiento básico es el siguiente, el master localiza al esclavo 1 y al esclavo 2, a continuación se sincroniza con ellos y cada cierto tiempo acordado, el muestreo es binario, 1 cuando el voltaje es +5 y 0 cuando el voltaje no existe, regularmente, la diferencia entre los tiempos permite calcular la posición del receptor el esquema básico se muestra en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** [6].

Pero para LORAN-C, su uso fue extendido e incluso siguió vigente hasta febrero del 2010 como plan de contingencia de seguridad en caso de alguna falla del sistema GPS, de forma posterior se desestimó su uso por el presidente Barack Obama el 28 de octubre de 2009 [7] [8] a través de una ley de seguridad firmada, ya que no cumplía con su propósito e incluso era superado con creces por el GPS, finalmente fue eliminado de los programas fiscales en el 2010 [8].

#### 1.1.4 SATELITES ARTIFICIALES

Como se mencionó en 1.1.3, el LORAN-C cayó en desuso y fue finalmente sustituido por el GPS (Global Positioning System), durante la segunda guerra mundial el estudio de las ondas de radio y el desarrollo de misiles se convirtió en una prioridad eventualmente ambas áreas se terminaron combinando por los esfuerzos de los expertos, de forma temprana se seguía usando los sistemas de navegación terrestres pero sin llegar a una mejor precisión que era lo que se buscaba, finalmente el detonante que lo permitió fue la carrera espacial iniciada el 4 de octubre de 1957 con el lanzamiento de Sputnik-1 por parte de la Unión Soviética el cual lograba una revolución completa en 98 min con una órbita de 227 km × 941 km inclinado a 65.1°, y transmitía a través una señal modulada a 400 MHz y que si se demodulaba entregaba un sonido interpretable como su mensaje [9] a través de él se obtuvo información sobre la densidad y temperatura de la atmosfera, después de 92 días en órbita se quemó mientras se precipitaba a la tierra el 4 de enero de 1958, el Sputnik-2 y Sputnik-3 le precedieron respectivamente, el Sputnik-2 fue lanzado el 3 de Noviembre de 1957 y tenía una órbita de 212 km × 1660 km a 65.33° la misión principal era demostrar los efectos de la gravedad cero y del espacio en los seres vivos se envió a un perro hembra llamada Laika siendo el primer ser vivo en estar en órbita, por otra parte el Sputnik-3 se lanzó el 15 de mayo de 1958 y pretendía obtener información de la ionosfera, los meteoritos, el campo magnético y los rayos cósmicos con su órbita de 217 km x 1864 km y una inclinación de 65.18°, gracias a las rivalidades existentes entre las grandes potencias, la URSS y Estados Unidos de América principalmente, esta carrera se venía gestando desde muchos años atrás y culminó en la evolución de la radionavegación a algo más parecido a lo actual [10]. Tras los primeros lanzamientos de la Unión Soviética, Estados Unidos se vio superado y avergonzado por su entonces enemigo, pues cuando el Sputnik-1 y el Sputnik-2 se proyectaron, ellos aún no contaban con ningún lanzamiento propio, no fue sino hasta el 31 de enero de 1958 que su primer lanzamiento exitoso se dio, el Explorer-1 se adentró al espacio, sucesivamente el Vanguard-1 , el explorer-2, el 5 de febrero de 1958 y 5 de marzo de 1958 pero no lograron su objetivo, por otra parte el Vanguard-1(TV-4) si lo logró y fue el primero de su tipo en utilizar paneles solares para cargar sus

baterías. La misión descubrió la forma real de la tierra al comprobar que era más parecida a una pera que a una esfera como se creía.

Con los primeros pasos dados por los Soviéticos y en pleno apogeo de la guerra fría, Estados Unidos se presionó para estar a la altura, ya contaban con sistemas complejos de navegación y con una buena precisión, sin embargo, dependían de puntos terrestres estratégicos y sin alcance mayor para posiciones que cubrieran el espacio aéreo, dejándolos indefensos para ataques aéreos. Esto cimiento lo que a continuación se describe y porque todo fue tan a prisa. [11]

A gran velocidad cada una de las superpotencias desarrollaba satélites con mayores capacidades, pasando a realizar tareas más avanzadas de comunicación y del pronóstico del clima, el periodo de mayor actividad sucedió entre 1960 a 1965 donde se experimentó con muchas variedades y usos para los satélites, en 1960 se mandó al TIROS-1 que proporcionaba televisión y observación en infrarrojo, el 1 de abril de 1960 TRANSIT-1B usado navegación, el 13 de abril de 1960 el MIDAS-2 se convirtió en el primer satélite de vigilancia infrarrojo, el 24 de mayo un satélite pasivo de comunicaciones llamado Echo-1 comenzó a funcionar, más lanzamientos exitosos se dieron y se comprendió por tal el uso de pasivos y activos en los sistemas [11].

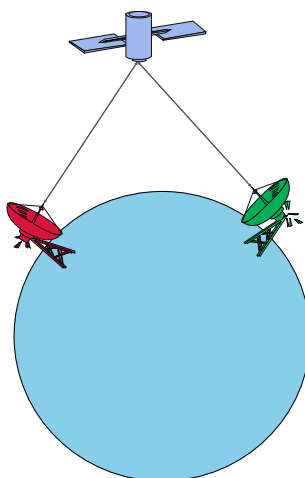
Los primeros satélites tenían costos elevados de mantenimiento y lanzamiento, de muy poca capacidad y con una vida útil reducida, por ejemplo uno de los primeros satélites que se lanzó, pesaba alrededor de 68 kg con una capacidad limitada de 480 canales de líneas telefónicas de un costo de \$32500 por canal por año incluyendo el costo de lanzamiento, esto debido a que en promedio este solo podía estar en órbita 1.5 años, con el tiempo los satélites se hicieron cada vez más pesados y más capaces. [6]

Las conexiones hacia dichos satélites fue de punto a punto con una línea de vista necesaria por lo que en tierra era necesario contar con antenas capaces y enormes de 30 metros, con costos millonarios que superaban fácilmente los 10 millones por estación. Pero únicamente podía recibir la información transmitida.

Con el éxito obtenido por la URSS, George C. Weiffenbach y William H. Guier miembros del departamento de física aplicada de la universidad Johns Hopkins se propusieron comprobar y realizar algunos experimentos para calcular la órbita del

Sputnik-1 a través de la variación del efecto Doppler durante el tiempo que se encontraba visible que eran alrededor de 40 minutos del total de tiempo que duraba su revolución.

Después de tres semanas de trabajo finalmente demostraron que era posible este cálculo conociendo la variación del efecto Doppler y tomando como referencia el punto donde se encontraban, en capítulos posteriores se retoma este tema. [9]



*Imagen 1-3 Comunicación satelital*

Para esos años la US NAVY tenía un conflicto para poder precisar el lugar de impacto de los misiles de sus aeronaves debido al movimiento de estas y que la posición de los blancos y de las naves se calculaba desde sistemas de posicionamiento terrestres, por lo que Frank McClure tras el exitoso cálculo de la posición de la órbita del Sputnik-1 propuso la cuestión de que si era posible obtener dicha ubicación, entonces probablemente también debería ser posible invertir el problema y calcular el punto de referencia conociendo la posición de la órbita, fue entonces que en 1958 Richard Kershner quedó a cargo del programa NNSS (Navy Navigation Satellite System), o "TRANSIT", ya en 1959 se realizó el primer lanzamiento con la intención de establecer ciertos requerimientos para que el programa comenzara a funcionar.

El establecimiento de una red satelital, la determinación de la gravedad para predecir la posición de la órbita durante el periodo completo y la definición completa de todos los receptores terrestres y marinos, TRANSIT se volvió operacional en 1964 y tenía una precisión que estaba entre 200-500 m, lo que se pretendía alcanzar con la implementación de sistemas parecidos a este era conseguir una disponibilidad de 24 horas los 365 días del año, sin que el clima impactara negativamente en el desempeño

del sistema y poder calcular la magnitud de cualquier vector que fuera medido así como el control exacto del tiempo [9] [12].

La operación de TRANSIT se dio a la par con los sistemas terrestres ya que se complementaban, el LORAN-C las costas, el OMEGA el globo en general y TRANSIT que se encargaba de todo lo que ocurría en línea de vista directa y con mejor precisión que el OMEGA hasta la introducción del sistema GPS ( ¡Error! No se encuentra el

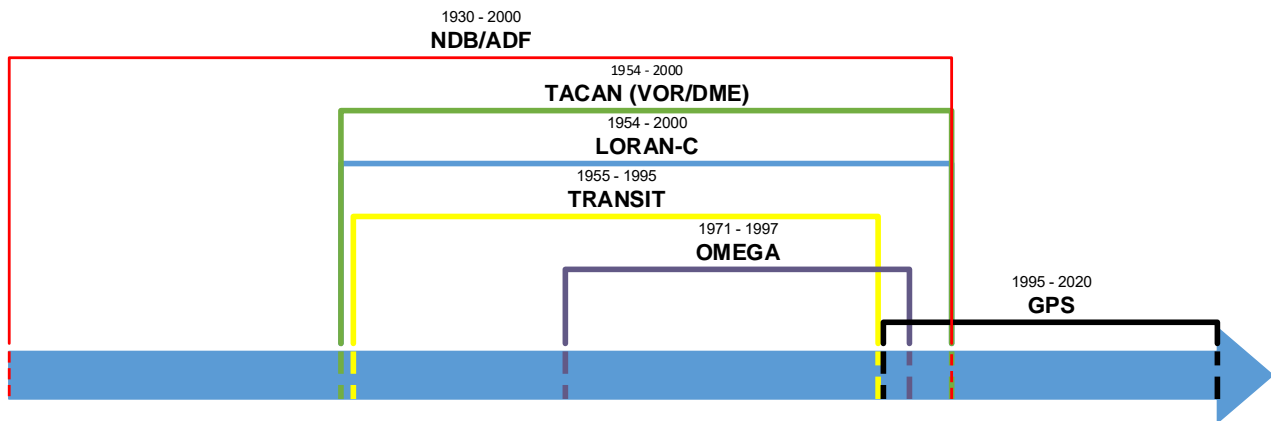


Imagen 1-4 Evolución del posicionamiento

origen de la referencia.).

Cada vez los satélites tuvieron más capacidad y mejor tecnología lo que permitió que realizaran más tareas, además de investigación, vigilancia e incluso, proporcionar y facilitar las comunicaciones para los civiles tales como la televisión.

### 1.1.5 GPS

En los últimos años antes de que los sistemas mencionados en 1.1.4 vieran su fin se comenzó a desarrollar el GPS (Global Positioning System) por el departamento de defensa de los Estados Unidos en 1971 con la intención de un uso militar al ser la radionavegación ya insuficiente para los sistemas aéreos y de localización de blancos a distancia de los misiles teledirigidos y con previa información recolectada de experimentos en dos sistemas de comunicación el esquema CDMA (code-division multiple access) y el PRN (pseudorandom noise).

El GPS es un sistema compuesto por 24 satélites operacionales, en sus etapas tempranas no contaba con todos los satélites y funcionaba como una IOC (initial operational capability) cuya despliegue finalizó en julio de 1993 y se anunció como finalizado el 8 de diciembre de 1993 [13] a este grupo de satélites que trabajan en conjunto se le conoce como constelación GPS, nombre que se le asignó después, el proyecto nació con el nombre de TIMATION (TIME/navigATION) bajo dicho nombre se trabajó en el sistema inicial NAVSTAR ( NAVigation Satellite Timing And Ranging) todo incluido en el programa DNSS (Defense Navigation Satellite System) el programa paso por ciertas fases antes llegar a ser conocido como GPS y se dividió en varias etapas en las cuales fueron propulsados múltiples satélites.

El primer grupo de satélites que fue lanzado para este fin se conoció como BLOCK I y su despliegue comenzó el 22 de febrero de 1978 y se finalizó el 9 de octubre de 1985, este primer grupo permitió a Estados Unidos poner en práctica todo lo aprendido con las generaciones pasadas de satélites la vida promedio planeada para este grupo de satélites era de 4.5 años y fue utilizado con únicos fines militares mencionados previamente, la inclinación de la órbita era de  $63^\circ$  con respecto al ecuador.

Una segunda generación de satélites le precedió llamada BLOCK II / IIA, su lanzamiento ocurrió de febrero de 1989 a noviembre de 1997 y 23 satélites de estos seguían en función hasta 2002 [13] y su tiempo de vida estimado era de 7.5 años a partir de su entrada en función, la inclinación de su se dispuso como de  $55^\circ$  con respecto al ecuador y con la posibilidad de almacenar datos para su navegación y corrección de hasta 180 días, a diferencia de BLOCK I que solo podía mantenerla por 14 días sin intervención de tierra. El 17 de Julio de 1995 oficialmente fue anunciado la capacidad total del sistema o FOC (full operational capability) al ya tener los 24 satélites en su totalidad.

Posteriormente una tercera generación fue dispuesta en la constelación, BLOCK IIR construida por Lockheed Martin Space Systems, a la que se le hizo una mejora importante en cada SV (space vehicles) con respecto al BLOCK IIA, a partir de 2001 y por 13 meses fueron lanzados a la constelación y la actualización continuaría por 5 años, a una generación mejorada llamada BLOCK IIF una mejora directa de su versión anterior en cuanto al cálculo de SIS URE (signal in-space user user range error), el ERD (estimated range deviation) pasando de 3.5m a 1.5m gracias al cambio en su reloj que



le permitía hacer cálculos más precisos, y mantener la información de navegación por 280 días haciéndolo autónomo por más tiempo que el anterior y retro compatibles para que el retiro de los SV anteriores sea gradual [14] la respectiva actualización de estos SV fueron los BLOCK IIF-M.

El sistema GPS está conformada por 3 segmentos en los que se divide: El segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuario. El segmento espacial está conformado por todos los satélites de la constelación operativos definido anteriormente por sus diferentes generaciones y que se encargan de enviar la señal que contienen lo siguiente: dos ondas sinusoidales, dos códigos digitales y un mensaje de navegación; los códigos y el mensaje se contienen dentro de la onda que funciona como una portadora mediante una conversión a bits a través de una modulación bifase. Es usado para interpretar la distancia del usuario, ya que el mensaje contiene las coordenadas del satélite en base al tiempo, que es calculado por un reloj atómico.

El segmento de control lo conforman todas las estaciones donde se lleva a cabo el seguimiento de las señales y cuentan con un MCS (Master Control Station) que se encuentra en Colorado Springs, Colorado. La función de control es determinar y predecir las posiciones del satélite, el estado del sistema, el reloj interno que dependiendo de la generación puede contener dos relojes de Cesio y dos de Rubidio o únicamente de este último elemento, el calendario, la información atmosférica y otros datos, todo esto es empacado y se sincroniza con el satélite GPS a través de la conexión S-Band.

Existen cinco estaciones de control alrededor del mundo ubicadas de forma muy precisa en las ciudades de Colorado Springs (MCS), Hawái, Kwajalein, Diego García, e Isla Ascensión (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

El tercer segmento es el de usuario conformado por todos los usuarios civiles y militares conectados a alguna antena GPS a través de un dispositivo compatible, sin ningún cargo por su uso. Sin embargo para tener la ventaja militar el Departamento de Defensa de Estados Unidos creó dos niveles de precisión del GPS, uno fue el PPS (Precise Positioning Service) utilizado solo por personal autorizado y el otro es SPS (Standard Positioning Service) a disposición de todo el mundo. La diferencia radica en

la precisión, mientras el PPS proporciona una precisión estimada de 95% con una diferencia de 16 m, el SPS puede fallar por 100m aunque gracias a las últimas [13, 1]



Imagen 1-5 Estaciones del segmento de control

### 1.1.6 TECNOLOGÍA MÓVIL

Con todos los sistemas globales de posicionamiento podíamos ubicarnos con cierto margen de error, no tan significativo cuando se trataban de áreas geográficas enormes donde situar el punto, sin embargo Alrededor de 1971 mientras el proyecto NAVSTAR aún se estaba gestando, la idea de la tecnología móvil surgió como un siguiente paso a las comunicaciones convencionales por cable, ya no era solamente mantener la comunicación entre dos puntos inmóviles, sino sostenerla incluso estando en movimiento, las primeras redes móviles comerciales surgieron en esta época lideradas por Japón con la primera red celular operativa en la ciudad de Tokyo, de cerca le siguió NMT (Nordic Mobile Telephony), AMPS (Advanced Mobile Phone Service) en Estados Unidos, y TACS (Total Access Communication System) en Reino Unido, fue la primera generación de las comunicaciones móviles, todas surgiendo a la par y siendo

incompatibles entre sí. A través de transmisión de señales análogas los servicios de voz se prestaron solo si los servicios pertenecían al mismo sistema, con la imposibilidad de un roaming en otros países dado que cada uno se desarrolló con sus propios algoritmos y estándares, cada área cubierta se dividía en sectores conocidos como celda y a su vez los teléfonos usados se conocieron como “cell phones” debido a esa relación. La necesidad del uso de tecnologías inalámbricas era una tendencia al alza y saber dónde se encontraba cada dispositivo en las interacciones una tarea que se debía realizar [15].

La primera generación no tuvo tanta cobertura, la incompatibilidad, las limitaciones de los estándares, así como el costo elevado de los accesorios y de los equipos mermó las posibilidades de la cobertura de esta tecnología, ya que un simple handset tenía un costo superior a \$1000 USD, demasiado costoso para el vulgo común [16].

Una de las primeras redes comerciales fue el NMT creado en 1981 a consecuencia del incremento y congestión de ARP (auto radio puhelin, or car radio phone), se basaba en una tecnología análoga (1G) en dos versiones diferentes NMT 450 y NMT 900, el número del final indicaba la banda de frecuencia en la que trabajaba. Era libre y abierta a los fabricantes por lo que el costo de los receptores era económico en comparación con otros, la desventaja radicaba en que la comunicación viajaba sin encriptación por lo que cualquiera que se posicionara en la frecuencia adecuada con un hardware que lo soportara tenía la capacidad de escuchar las conversaciones y aunque los fabricantes de escáneres de frecuencia omitieron las frecuencias del NMT, se podría con los conocimientos adecuados, reprogramarlos para detectar dichas frecuencias. Posterior NMT integró la encriptación siempre y cuando la estación soportara, o si ambos móviles tenían la capacidad de soporte, aunque la estación no la tuviera. El tamaño del celda era de 2km a 30km era una comunicación full dúplex lo que permitía la comunicación a dos vías y la llamada ocurría de forma simultánea. La frecuencia que se usaba para señalización entre la base y el móvil fue la misma que se usaba para la voz por lo que cada cierto tiempo se escuchaba una ráfaga de audio característica. La señalización permitía ubicar a los equipos dentro de dicha celda y diferenciarlos del resto. De forma primitiva podrías hablar de una de las primeras formas de posicionamiento local que seguiría evolucionando con cada generación [17, 16].

AMPS se introdujo a Estados Unidos tras haberse obtenido la licencia 1981 y se comercializó en 1983 usaba la tecnología FDMA(frequency division multiple access) que permitía tener múltiples usuarios en un mismo celda existían problemas subyacentes de interferencia y a medida que se integraban más usuarios era necesario más celda para cubrir dichas áreas, la seguridad era igual de pobre que la disponibilidad tanto que si se obtenía el código serial de algún usuario, era posible hacer llamadas ilegales con este. TACS funcionaba de la misma forma que el AMPS [18].

La segunda generación se desarrolló como una forma de unión y estandarización de todos los sistemas que hasta el momento no tenían una homogeneización y armonización entre todos los sistemas que asegurar una compatibilidad no excluyente surgiendo tras platicas en la Comisión Europea que se acordó en los 90's, con la digitalización de la señal en los parlantes al aproximar la lo más posible a la voz humana a través de filtros y muestreos, los sistemas claves que permitieron que esto se lograra fueron GSM (Global Systems for Mobile Communications), TDMA IS-136, CDMA IS-95, PDC (Personal Digital Cellular) y PHS (Personal Handy Phone System). [16]

IS 54 e IS 136 donde IS es (Interim Standard) corresponde a la segunda generación que constituía al DAMPS (Digital Advanced Mobile Phone System), como protocolo inalámbrico se utilizó TDMA (Time Division Multiple Access). Además, funcionaba en los mismos canales de AMPS para que la transición en las zonas fuera suave, los canales fueron divididos y la voz fue comprimida para permitir mayor cantidad de llamadas en una misma celda, y al ser una señal digital los escáneres de frecuencias no podían leer la comunicación, para el IS 136 adicional obtuvo otras mejoras como la implementación de un CSD (circuit switched data) y SMS (short message service) los cuales estaban disponibles en el protocolo GSM [16].

IS 95 o CDMA (Code Division Multiple Access) con sus variantes N-CDMA fue desarrollado por QUALCOMM en Estados Unidos su característica principal fue su gran capacidad y sus celda pequeñas en su radio. Tuvo una mejora conocida como IS-95B que incluía el aumento de frecuencias útiles, 10 veces lo que ofrecía AMPS, pero en contraposición se veía mermado cuando existía una alguna interferencia en el ambiente.

GSM se comenzó a desarrollar en los 80's utilizando el protocolo TDMA para la transmisión digital, para 1991 la primera especificación fue hecha. Presentaba múltiple

capacidad para soportar llamadas de un bajo costo, roaming internacional, buzón de voz, llamada en espera, SMS y una facilidad de manejo para el usuario. Al ser un sistema abierto permitió que los vendedores pudieran desarrollar una interoperabilidad entre dispositivos y un uso más extendido por el mundo. Algo que igual se debe de notar fue la variedad del tamaño de cada celda, clasificándose en 4 tipos: macro, micro, pico y umbrella [16].

Se incluyó un servicio de datos llamados GPRS(General Packet Radio Service) un valor agregado la generación 2.5 nació, este servicio se activa mediante unos nodos disponibles y dispuestos por el operador únicamente cuando el usuario lo solicitase, mientras la comunicación de voz era conmutada por paquetes, los datos eran enviados a través de la conmutación de circuitos, la velocidad de intercambio máxima era compartida por todos los usuarios de la celda y alcanzaba una velocidad máxima teórica de 171.2 kbps, es posible conectarse a internet como si se tratara de una subred de este, pero la velocidad practica es mucho inferior [15, 16].

Con la intención de mejorar el performance y las velocidades de transferencia del GPRS se introdujo el EDGE, sin embargo, no pudo alcanzar una mayor que 557 kbps teóricamente a la par del 3G, pero en la práctica apenas y pudo superar los 384 kbps para usuarios estáticos y 144 kbps para usuarios móviles [16]

El 3G trató de compensar todas las fallas cometidas y lograr la unificación que se esperaba en generaciones pasadas, ahora con una posible conexión a internet, la celda no solo debían conocer las ubicaciones de cada dispositivo a cada momento dentro de ella para conectar las llamadas sino también para permitir el intercambio de datos [16].

Evolucionando de CDMA en Estados Unidos y Canadá CDMA2000 inició como un desarrollo de 3GPP2 (3G Partnership Project) incompatible con el desarrollo de Europa que, aunque partía de CDMA tenía unas características muy diferentes UMTS (universal mobile telecommunication system), ambas funcionaban a 5Hz sin mantener un estándar similar. CDMA2000 también tuvo algunas variantes como: 1X, 1XEV-DO, 1XEV-DV and 3X, teóricamente podría alcanzar velocidades entre 2 y 4 Mbps [15].

UMTS contiene tres partes fundamentales que conforman toda la estructura propia que son: el CN (Core Network), UTRAN(UMTS Terrestrial Radio Access Network) y UE (User Equipment). En el UE se encuentra el SIM (Subscriber Identity Module) o USIM

(universal Subscriber Identity Module), el UMTS EU puede comunicarse en tres modos: CS (circuit switched), PS (packet switched) y CS/PS, cada uno de ellos pudiendo comunicarse al núcleo respectivo funcionando a través de la conmutación de paquetes, circuitos o en el caso de CS/PS ambos [15].

La composición del UTRAN es el BS (base station) y el RNC (Radio Network Controller), el BS se encarga del control de bucles, codificación física del canal, modulación/demodulación, segmentación, control de potencia, interface de recepción/transmisión y manejo de errores entre otras funciones mientras el RNC lleva a cabo la parte correspondiente a manejo y control de recursos, control de la potencia, control de acceso, segmentación/ re ensamblado, cifrado, etc [18].

El CN tiene las funciones principales de transponer, enrutar y transmitir el tráfico de los usuarios, así como contener los datos de administración de la red, el CN está dividido en dos dominios correspondientes a CS y PS respectivamente.

El supuesto inicial era que el 3G ofrecería mejores beneficios que el 2G, sin embargo no sobresalió mucho con respecto al 2.5G cuyos abanderados eran el GPRS y el EDGE, prácticamente ofreciendo una velocidad apenas superior que no valía todos los cambios a los que debían someterse los sistemas y usuarios. La industria optó por enfocarse menos en la siguiente generación y más en realizar mejoras en la corriente. La 3.5G y 3.75G fue prueba de ello. Así se les llegó a llamar a los siguientes sistemas que partían de la 3G [15, 16] se trataba de HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access) y HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access).

HSDPA también conocido como 3.5G fue un protocolo de telefonía que permitió una migración suave desde UMTS con un incremento en la velocidad de conexión de descarga llegando hasta 14.4 Mbps teóricos. Una nueva revisión, la número 7 fue hecha por 3GPP que pretendía lograr una descarga de hasta 28.8 Mbps, se aumentó también la capacidad de múltiples usuarios de realizar una descarga simultánea, además se reevaluó el problema que aquejaba a la revisión anterior, el consumo de energía que se enfrentaba para poder mantener la conexión de un par de páginas web e incluso cuando el sistema comenzaba a priorizar el consumo pasado 5-10 s, no era algo eficiente, para contrarrestar esto convencionalmente se opta por entrar en un modo de espera donde la conexión pasa a estar en descanso hasta ser reactivado por el usuario a través de un



acción, toma entre 1-3 s recuperarse, la meta principal del release 7 era acortar todos estos tiempos. Como forma efectiva de lograrlo se agregó el MIMO (Multiple Input Multiple Output), la finalizada era focalizar las múltiples señales duplicadas con diferente retardo en una mejor construida. [15]

Las aplicaciones multimedia peer to peer como videoconferencia, mensajes multimedia o correos electrónicos comenzaron a ser la prioridad para los usuarios, la mayoría de los sistemas no tenían esto en cuenta por lo que la limitante de los enlaces de subida oscilaba entre 64-128 kbps y hasta 384 kbps en condiciones perfectas. La respuesta fue el HSUPA, mejoraba este enlace de subida alcanzado hasta 5.76 Mbps en el release 6 de 3GPP y en el release 7, 11.5 Mbps.

Cada nueva generación fue aportando más velocidad de intercambio y un mayor control de la posición de sus usuarios dentro de la celda. En este punto la última descripción de HSUPA se llegó a reconocer como la 3.75G.

LTE (Long Term Evolution) nace de una reconstrucción y rediseño de la estructura desarrollada por 3GPP en la señalización y núcleo de las redes de los sistemas de radio. LTE trabajaba con una portadora con un ancho de banda 5 MHz, Access WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) fue la interface aérea utilizada, no escalable, ya que al intentar conseguir más velocidad se creaba un retardo en los siguientes estadios, cuanto más corto sea el paso de transmisión, mayor será el impacto del desvanecimiento por multi-trayectoria en la recepción de la señal.

El desvanecimiento por multi-trayectoria se puede observar cuando las ondas de radio rebotan en los objetos camino del transmisor al receptor, y por lo tanto el receptor no ve una sino varias copias que llegan con diferentes tiempos. [15] Como resultado, partes de la señal de un previo estadio de la transmisión que han rebotado en objetos y, por lo tanto, ha tardado más en viajar al receptor se superponen con la señal de radio que se transmitió al momento y que se recibió sin demoras mayores a través de un camino más directo. Cuanto más corto es un estadio de la transmisión, mayor es la superposición que puede ser observada y una mayor dificultad aparece al momento de interpretar la señal recibida. LTE intenta compensar estas señales con un retardo agregado, ya que en lugar de difundir una señal por completo en el ancho de banda de la portadora directamente, LTE utiliza OFDM(Orthogonal Frequency Division

Multiplexing), que transmite los datos a través de muchos operadores de banda estrecha de 180 kHz cada uno. En lugar de una única transmisión rápida, un flujo de datos se divide en muchos, más lentos pero que viajan de forma simultánea como resultado la tasa de datos en comparación con UMTS es similar en el mismo ancho de banda pero el efecto de señales con retardo se reduce.

LTE a diferencia de UMTS que aún utilizaba el conmutación de paquetes y circuitos para prestar servicios de voz, SMS, etc , LTE tiene un núcleo que funciona en base a IP por completo. Aunque en teoría todos los servicios están disponibles, en la práctica la mayoría de los operadores optó por aún utilizar un CSFB (Circuit-Switched Fallback) que permitía utilizar los sistemas UMTS y GSM para las llamadas de voz. El aumento en demanda de dispositivos con soporte para VoLTE (Voice over LTE ) y su crecimiento en infraestructura ha permitido la sustitución parcial del CSFB. Pero LTE aún debe trabajar en conjunto con el resto de protocolos, incluidos el UMTS, GSM, EDGE, GPRS, ya que la cobertura no está siempre disponible. [18]

Es difícil separar el servicio de voz GSM de la red GSM ya que el servicio (de voz) y la red están completamente integrados. Incluso en UMTS esto sigue siendo el caso sin embargo, para LTE, 3GPP decidió, con solo unas pocas excepciones, separar completamente la red de cualquier tipo de servicio de nivel superior, incluyendo telefonía de voz. Esta es la razón por la cual se ha necesitado de una respaldo para transmitir la voz, dicho respaldo solo pretendía ser una solución temporal con la intención de mudarse a un sistema que fuese completamente basado en IP, incluida la telefonía de voz, después de muchos años, esto finalmente se ha logrado con el VoLTE (Voice over LTE) que se basa en el Protocolo de inicio de sesión (SIP) [15].

Se puede observar hoy que las redes LTE aún no han alcanzado el mismo nivel de cobertura geográfica como redes GSM por lo tanto, una alternativa para una llamada de voz si no se cuenta con la cobertura es aplicar el sistema de respaldo que permite continuar la llamada alternando el sistema, esta funcionalidad se conoce como SRVCC (Single Radio Voice Call Continuity) y es una diferencia importante en comparación con los servicios de voz IP no basados en operadores, que tienen que abandonar una llamada cuando se está quedando sin cobertura de red LTE o UMTS [15, 18].

Para ser universales, los dispositivos con soporte para LTE también deben ser compatibles con GSM, GPRS, EDGE y UMTS. En el lado de la red, se han implementado interfaces y protocolos para que las sesiones de datos se pueden mover sin problemas entre GSM, UMTS y LTE cuando el usuario entra y sale de áreas cubiertas por diferentes tecnologías de telefonía, mientras en el primeros años de implementación la red LTS se encontraba a menudo separada de la estructura de GSM y UMTS, actualmente conviven en un mismo ambiente. Ahora es posible para los usuarios mantener las sesiones activas al cambiar entre coberturas [18].

Los muchos esfuerzos de parte de 3GPP revolucionaron la telefonía, aun sin haber logrado la total globalización del estándar, la compatibilidad fue la detonante para que los cambios fueran absorbidos sin repercusiones en el desempeño durante producción. De forma rápida hay que puntualizar que no solo los protocolos de comunicación se volvieron más robustos, como era de esperarse para soportar todas estas funciones, el hardware también se adaptó y cambio. [16, 15]

#### 1.1.7 ESTANDAR IEEE 802.11 Y 802.15

Los primeros dispositivos WLAN (Wireless LAN) aparecieron alrededor de los 90's pero la mayor relevancia la alcanzaron casi 10 años después cuando el consumo de los componentes se redujo y permitió que las pequeñas celdas de litio soportaran el consumo regular de ellos. Bajo la especificación de IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11, también recibe el nombre WLAN debido a que la especificación se basó en los estándares 802.X (802.3) llamados también Ethernet estándar. Ahora adaptados a los dispositivos móviles y funcionando en ellos [16].

Su aplicación principal es transportar paquetes IP (Internet Protocol) sobre la capa 3 del modelo OSI (Open System Interconnection), la capa 2 o de enlace de datos no sufre ninguna modificación significativa, únicamente la capa 3 tiene los cambios más importante al ya no utilizar cables sino ondas de radio para transportar las tramas de datos.

Desde la creación del estándar 802.11 se han logrado muchas mejoras en la capa 1, para poder diferenciarlas a cada una de estas se les ha asignado una letra que las identifica.

El gran avance para WLAN fue la aparición del estándar 802.11b que ofrecía tasas de datos de 1 a 11 Mbit / s. La tasa de datos máxima que se puede lograr en una situación real es de máximo 5 Mbps en una situación óptima sin interferencia. La calidad también se ve afectada además de los obstáculos por la distancia entre el emisor y el receptor [2] [16].

Para el 802.11b la frecuencia en la que transmitía era la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) 2.4 GHz que es de licencia libre a nivel global, también es conocido que en los lugares donde la frecuencia es de uso libre la limitante de 100mW de potencia es aplicada, también es usada para la implementación de otras tecnologías como el IEEE 802.15 (Bluetooth) pues no está limitada en cuanto al límite de tecnologías que la usen. Para el 802.11g las tasas de transferencias alcanzan los 54 Mbps teóricos mientras que en la práctica alcanza los 25 Mbps y es compatible con 802.11b. Además de la banda ISM 2.4 GHz también se abrió la frecuencia 5 GHz para la implementación de WLAN's pero los costos del 802.11a al ser multifrecuencia retro compatible con sus contrapartes anteriores elevaba el costo y nunca tuvo la popularidad de la 802.11g [16].

Un nuevo estándar nació de una mejor velocidad de conexión equiparable a la velocidad que ofrecían las conexiones a las redes Ethernet e internet a través del ADSL, el 802.11n, duplicando el ancho de banda del canal a 40 MHz con velocidades teóricas de hasta 600 Mbps, funcionando en ambas frecuencias 2.4 GHz y 5 GHz, además de ser compatible con los anteriores 802.11x , actualmente la frecuencia 5 GHz no se usa con tanta frecuencia como la otra. [16]

Si bien 802.11n tiene una amplia compatibilidad con dispositivos hoy en día, la industria ya ha avanzado de nuevo con el estándar 802.11ac, que generalmente es compatible con los últimos 802.11x. Un paso más en la evolución de WLAN es el 802.11ad, que utiliza la banda de 60 GHz para lograr incluso tasas de datos más altas en la práctica que 802.11ac pero solo en distancias cortas de la línea de visión [16].

Como muchas compañías producen productos WLAN hoy en día, la interoperabilidad entre ellas es de suma importancia. Es por eso que la Wi-Fi Alliance fue fundada en 1999 por varias empresas que fabrican dispositivos compatibles con 802.11, Wi-Fi Alliance es una organización sin fines de lucro, su objetivo es garantizar la interoperabilidad de productos WLAN con pruebas de compatibilidad y un programa de

certificación. Hoy, cientos de empresas se han unido a la Alianza Wi-Fi y usar el programa de certificación de Wi-Fi Alliance para validar sus productos y obtener el logotipo de marketing "Wi-Fi certificado" para su dispositivo. Esta es también la razón por la cual los dispositivos que se basan en el estándar 802.11 o WLAN a menudo también se conocen como Wi-Fi [16].

Las comunicaciones inalámbricas que hicieron nacer al 802.11x también abrieron paso para otro estándar con cualidades más sencillas y de un bajo consumo energético perseguido en los dispositivos móviles e inalámbricos. La conectividad Bluetooth se ha convertido en una alternativa a los cables para muchos intercambios de datos de corto alcance, aplicaciones y a menudo se utiliza junto con las tecnologías de radio celular que fueron mencionadas antes.

Debido a la continua miniaturización e integración, cada vez se hacen pequeños los dispositivos electrónicos, Bluetooth permite que estos dispositivos se comuniquen de forma inalámbrica entre sí, sin una conexión directa de línea de vista. Aunque en la última década hubo una amplia gama de aplicaciones de Bluetooth, se puede observar hoy que su uso ahora se centra principalmente en las siguientes aplicaciones:

- Conectividad inalámbrica desde teléfonos inteligentes y computadoras portátiles a dispositivos de audio remotos, como auriculares, equipos de telefonía manos libres, altavoces con Bluetooth y sistemas de entretenimiento en el automóvil.
- Intercambio de archivos entre teléfonos inteligentes y computadoras portátiles (por ejemplo, imágenes tomadas con un cámara del teléfono inteligente)
- Conexión de teclados inalámbricos y otros dispositivos de entrada a computadoras portátiles y teléfonos inteligentes.
- Otras aplicaciones, como, por ejemplo, compartir la conexión a Internet desde un teléfono inteligente a una computadora portátil; sincronización de calendario y libreta de direcciones.

Y Como hay una gran cantidad de diferentes dispositivos Bluetooth disponibles de diferentes proveedores como en el caso del WLAN, la interoperabilidad confiable es de suma importancia para el éxito de Bluetooth y es un desafío para lograr en la práctica.

Por lo tanto, los nuevos dispositivos deben ser puesto a prueba por BQTF(Bluetooth Qualification Test Facility) [18].

Hasta la versión 1.2 del estándar, la tasa de datos máxima de una transmisión en Bluetooth fue de 780 kbps. Todos los dispositivos que se comunican directamente entre sí tienen que compartir esta tasa de datos máxima. Lo máximo alcanzado por cada parte depende de lo siguiente: la cantidad de dispositivos que intercambian datos entre sí al mismo tiempo y la actividad de los otros dispositivos.

La velocidad de transmisión más alta se puede lograr si solo dos dispositivos se comunican entre sí y solo uno de ellos tiene una gran cantidad de datos para transmitir. En este caso, la tasa de datos más alta que se puede lograr es de 723 kbps. Después de quitar la los encabezados, la tasa de datos resultante es de aproximadamente 650 kbps. El ancho de banda restante para el otro dispositivo pueda enviar datos en la dirección inversa es de aproximadamente 57 kbps. Esto último es el escenario más común.

En 2004, se lanzó el estándar Bluetooth 2.0 + EDR (Enhanced Datarate). Esta Permite velocidades de datos de hasta 2178 kbit / s mediante el uso de técnicas de modulación adicionales.

Subsecuentemente en años posteriores se aplicaron mejoras, para 2007 la versión 2.1 tuvo mejoras en cuestiones de seguridad, simplificación de emparejamiento, opciones adicionales para el ahorro de energía en conexiones de datos de intercambio esporádico e informe de errores, la versión 3.0+HS que se lanzó en 2009 incluía en algunos casos el modo opcional Bluetooth de alta velocidad (HS). El modo HS usa Bluetooth para establecer la conexión inicial y mediante Wi-Fi transfiere los datos. No todos los dispositivos con 3.0 tenían la función activa. En 2010 con la versión 4.0 se incluyó el soporte para el Bluetooth de bajo consumo, con la versión 4.1 en 2013 y 4.2 en 2014 se agregó la posibilidad de la recuperación de la sesión en caso de un corte de señal, el establecimiento de IPSP( Internet Protocol Support Profile) o Internet IPV6 sobre Bluetooth.

Como 802.15 funciona en MSI 2.4GHz y considerando que otras tecnologías como el 802.11x también se pueden encontrar en esa frecuencia, 802.15 usa FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) es decir realiza un intercambio de frecuencia

entre cada paquete y no se queda en uno fijo para evitar interferencia con algún otro protocolo funcionando en la misma frecuencia [18]. Una red compuesta por dispositivos bluetooth se conoce como piconets y entra dentro de las redes conocidas como PAN (Personal area network).

La tendencia que nos marca la historia, todo el recuento en la evolución de la tecnología se marcó por sistemas tan grandes que tienen la capacidad de cubrir por completo la superficie de la tierra e identificar puntos estratégicos en tierra e incluso calcular la posición y velocidad de cualquier objetivo. Pasando por sistemas que seccionaron la geografía en celdas para poder encontrar la ubicación de ciertos dispositivos, y finalizando con redes aún más pequeñas. El siguiente capítulo aborda la parte más importante de este documento. ¿Qué es el Posicionamiento en Interiores y como se relaciona con todo lo relatado?

## **2 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO EN INTERIORES**

El primer capítulo hace un recuento de la evolución del posicionamiento desde los primeros exploradores del océano, hasta la llegada al espacio, la miniaturización de los dispositivos y la eliminación de cables al descubrirse las ondas de radio como medio versátil. Hasta este punto los sistemas GNSS y comunicación pueden encontrar y predecir la posición de objetos, calcular su velocidad, etc. Pero su comportamiento en ambientes cerrados por ejemplo el interior de un estacionamiento, un edificio e incluso una propiedad concreta de algunos cientos de metros como un hotel es impreciso y con resultados quizá sin una interpretación real. [1]

### **2.1 POSICIÓN EN INTERIORES**

Los robots y/o sistemas no son conscientes del entorno, o del mundo real en el que se encuentran. No ven, no escuchan, sienten y no comprenden nada sin instrucciones y dispositivos externos. Necesitan el hardware y el software para poder procesar la información que llega del exterior. Los primeros satélites al ponerse en órbita abrieron el sendero a esto. Capaces de encontrar cualquier punto y compartirlo en un lenguaje reconocible por cualquiera. Ahora el ser humano podía moverse por el planeta

conociendo su ubicación siempre, e incluso otras magnitudes como su velocidad y tiempo se podían compartir. Los dispositivos móviles y sus respectivos estándares descritos en 1.1.6 abrieron la posibilidad de una nueva forma de generar más información más precisa del entorno en el que se encontraba.

Un IPS (Indoor Positions System) es un sistema que únicamente considera los ambientes cubiertos o limitados a espacios locales y obtiene la ubicación del usuario o del dispositivo que puede ser medido en tiempo real en una PN (Personal Network) en un interior, como puede ser una oficina, escuela, hotel, etc. [1]

Un IPS entrega información de posición actualizada del objetivo cubierto, estima las posiciones dentro de un retardo de tiempo máximo y proporciona cobertura del área en la que el usuario planea hacer uso del IPS. Un IPS puede proporcionar diferentes tipos de información de acuerdo a lo solicitado por el usuario. Previamente el mapa del área cubierta por el IPS debe encontrarse en el sistema precargado para que este pueda hacer uso de él. [19]

Por ejemplo en el caso de la tecnología móvil estas estructuras podían proporcionar la posición dentro de su propio sistema, los UE mantenían una conexión constante con las BS y a su vez el CN podía saber dónde estaba cada celda, con esto en consideración se llegó a la interrogante de si conociendo esta información era posible extrapolarlo a una interpretación y estandarización al mismo nivel que el posicionamiento global, es decir interpretable por todos y aplicable a múltiples áreas de oportunidad sin importar los consensos locales ni el nivel de abstracción del problema. [18]

Generalmente, la información de posición absoluta con respecto al mapa de un área de cobertura se ofrece mediante el seguimiento por el IPS, porque el seguimiento y los servicios de orientación necesitan las posiciones exactas de los objetivos, la información de posición relativa se trata de otro tipo de resultados ofrecidos por los IPS, que miden el movimiento de diferentes partes de un objetivo con respecto a otro, el tercer tipo de información de posición es la información de ubicación de proximidad, que especifica el lugar donde está un objetivo A veces, los IPS no necesitan proporcionar información de posición absoluta o relativa.

El posicionamiento en interiores ha sido abordado desde la perspectiva del posicionamiento global, a través de los satélites, sin embargo, no se tiene una respuesta



satisfactoria pues aún no cumple con ningún estándar establecido. Es necesario tener en cuenta lo siguiente cuando se quiere conseguir un funcional IPS o sistema de posicionamiento en interiores: el costo de la tecnología envuelta, facilidad de uso, disponibilidad de la tecnología, rendimiento, etc., precisamente por ello, la tecnología más popular para usar como soporte son los móviles y los dispositivos basados en señales de radio que usan WLAN, Bluetooth y otros ya que prácticamente cualquiera puede poseer uno móvil y su cobertura es grande, pero no siendo las únicas tecnologías tomadas en cuenta.

### 2.1.1 AREAS DE OPORTUNIDAD PARA EL POSICIONAMIENTO EN INTERIORES.

Mientras la mayoría de las tecnologías surgen como resultado de un problema, en este caso las herramientas existentes generaron una necesidad que no se había considerado hasta el momento en el que se crearon. El posicionamiento en interiores tiene áreas tan amplias y tan variadas que cada herramienta o problema tiene una tiene un enfoque propio, es decir no todas deben mantener un estatus constate de disponibilidad, si nos enfocamos en la ubicación de un vehículo en un estacionamiento no necesitaríamos un monitoreo que actualizara la posición constantemente como si se tratara por ejemplo de un peatón recorriendo un edificio, tampoco se usaría el mismo tipo de tecnología, mientras uno es un objeto inerte al que se pueden hacer las instalaciones adecuadas, el peatón por otra parte está constreñido por la propia capacidad de carga del mismo, el nivel económico para adquirir la tecnología requerida y la atención o dificultad para manejarla, y otros factores externos, algunas tendrán alta prioridad, como la ubicación de un herido en un ambiente cerrado por marcar algunos casos de ejemplo.

En el caso del posicionamiento local al no existir una estandarización del problema, la adquisición de precisión es alcanzada por la cantidad de tecnología usada, mayor cantidad de sensores en el vehículo ejemplificado puede suponer un exceso para el fin que se quiere lograr, mientras que, para el peatón, pueden ser insuficientes y una carga y costo mayor.

En el capítulo anterior ya se describió superficialmente un ejemplo del posicionamiento local, específicamente a través de la identificación de las celdas donde los equipos móviles se conectan. Otros tópicos especiales como el software de

entretenimiento y la asistencia en el hogar son donde se ha podido ver un mayor crecimiento aplicado real del IPS.

## *2.2 CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO EN INTERIORES*

Un problema con el posicionamiento en interiores tiene que ver con los múltiples parámetros a consideración con la tecnología usada, así como con el uso de ciertas técnicas, todo se combinan de tal forma que casi es imperceptible los límites de cada uno.

Dependiendo de los parámetros que se tomen en cuenta pueden surgir múltiples formas de clasificar los sistemas. Una forma de clasificarlos se basa en si el IPS cuenta con una estructura de red inalámbrica establecida para medir la posición del objeto o no, es decir, se pueden agrupar como enfoque basado en red y no basados en red. La de enfoque en red aprovecha la infraestructura existente de una red establecida, y no se necesita de hardware adicional más que el existe esta es preferida por la otra por motivos de coste. La de enfoque no basado en red usa una infraestructura dedicada al posicionamiento y además permite la libertad de establecer el diseño físico más adecuado y que garantice la mejor precisión.

Otra forma de clasificar los IPS es acorde a la arquitectura del sistema. Hay tres tipos: arquitectura de posicionamiento automático, arquitectura de posicionamiento de infraestructura y de arquitectura de infraestructura asistida auto orientada. La arquitectura de posicionamiento automático calcula las posiciones desde los mismos objetivos y aprovecha las infraestructuras de los sistemas de posicionamiento lo que se traduce en seguridad y privacidad. La arquitectura de posicionamiento de infraestructura estima las posiciones de los objetivos utilizando la propia infraestructura, que pueden auto descubrirse si están en el área de posicionamiento de cobertura. En la arquitectura de infraestructura asistida auto orientado, un objetivo rastreado envía una solicitud al sistema de posicionamiento para que comience la estimación de su posición y luego obtiene su información de ubicación del sistema. El punto clave de la tercera arquitectura es que a menos que el dispositivo permite que un sistema de posicionamiento lo rastree no es posible que se genere el descubrimiento del dispositivo en el propio sistema.

También se puede hacer esta distinción o clasificación de acuerdo al medio principal que el sistema utiliza para llegar a este fin las cuales son: Señales infrarrojas, ultrasonido, radiofrecuencia, ondas electromagnéticas, análisis basado en imágenes y sonido.

### 2.2.1 PARÁMETROS PARA LA CLASIFICACIÓN

Es posible considerar una gran cantidad de parámetros, pero según N. Samama [1] los veinte parámetros mencionados a continuación parecen ser los más importantes además, dichos parámetros se pueden clasificar en cuatro categorías; dependiendo del hardware: complejidad de la infraestructura, madurez de la infraestructura, costo estimado del hardware, complejidad terminal, madurez terminal, costo terminal; parámetros relacionados con el tipo y las prestaciones del sistema: tipo de posicionamiento, precisión, fiabilidad, rango, modo de posicionamiento, viabilidad de la entrada-salida del posicionamiento; parámetros relacionados con la implementación real del sistema: disponibilidad en teléfonos inteligentes, sensibilidad a las condiciones ambientales, necesidad de calibración, complejidad de la calibración si existiese; parámetros relacionados con los aspectos físicos del sistema: tipo de mediciones físicas realizadas, algoritmo de procesamiento de señal utilizado, la forma en que se calcula la posición, cuantificación física asociada con la medición.

## 2.3 LIMITACIONES EN EL POSICIONAMIENTO EN INTERIORES

Como se define en 2.2 no hay un criterio estándar para definir un IPS universal o alguna estándar idea para cada desafío, dependiendo de que IPS sea utilizado y en qué ambiente, se definirá sus limitaciones acordes a las preferencias del usuario, el tipo de necesidad a cubrir, etc. Aquellos aspectos que son tomados en cuenta al momento de evaluar los límites pueden ser los siguientes:

### 2.3.1 SEGURIDAD Y PRIVACIDAD DE LOS USUARIOS

Dependiendo de qué método sea usado para la implementación del IPS así como la estructura que sea usada debido a que todo lo relacionado con el IPS se centra en las necesidades de los usuarios en sus actividades privadas y sociales y debido toda la información casi siempre se trata de aspectos personales del usuario como el historial

de ubicaciones, al usuario le importa si alguien rastrea y obtiene todo lo anterior sin su consentimiento, por ello el controlar la distribución y acceso a la información de ubicación depende enteramente de la robustez del IPS usado, algunos sistemas manejan mejores medidas de seguridad y privacidad desde el lado del software y del lado de la arquitectura del sistema por ejemplo, la arquitectura del sistema de posición auto posicionado puede garantizar la privacidad al realizar estimaciones de ubicación en el dispositivo de destino pero siempre que el dispositivo objetivo proporcione su información de ubicación a este, nadie puede acceder a la información.

### 2.3.2 COSTO Y DISPONIBILIDAD COMERCIAL

El costo de un IPS es un total de varias partes: el costo de los componentes de infraestructura, el costo de un posicionamiento dispositivo para cada usuario y el costo de instalación del sistema y mantenimiento. Algunos IPS los sistemas de posicionamiento existentes para ahorrar en alguno de los rubros, por ello las infraestructuras como WLAN son más rentables, porque no hay costos adicionales por la infraestructura de IPS. Además, debemos considerar que, dependiendo de la infraestructura se deben adquirir ciertos dispositivos que podrían no estar disponibles en nuestra área e importarlos podría repercutir en el costo.

### 2.3.3 RENDIMIENTO, ROBUSTEZ Y TOLERANCIA A FALLAS

La exactitud y la precisión son dos principales parámetros de rendimiento para evaluar un IPS, donde la exactitud significa la distancia de error promedio y la precisión se define como la probabilidad de éxito de las estimaciones de posición con respecto a la exactitud predefinida, el retardo de un IPS es otro aspecto de rendimiento, el cual es la suma del retardo al medir, calcular de las posiciones del objetivo estimado y reenviar información de al solicitante. Hay dos razones: una es que el objetivo puede moverse rápido; otro es que los ambientes interiores cambian dinámicamente. La escalabilidad, se define como la cantidad de dispositivos que el IPS puede rastrear dentro de su área efectiva y forma parte del rendimiento total del IPS. El rendimiento de un IPS debe evaluarse para examinar si cumple con los requisitos de la ubicación servicios y

aplicaciones en PN o no. Un sistema que tiene mayor rendimiento también tiene mayor costo.

Un IPS robusto debería poder seguir operando incluso en algunos casos graves como que algunos dispositivos del sistema no funcionan correctamente o el dispositivo móvil se queda sin energía de la batería. Dependiendo de qué tipo de sistema se quiera implementar, este sería una de las limitantes que más impacto tendrían y por ello se debe tomar más en cuenta junto con la que sigue.

#### 2.3.4 LIMITACIONES FÍSICAS O DEL MEDIO

Debido a la tecnología del sistema o de los dispositivos utilizados en el IP, una de las limitaciones fundamentales es el medio utilizado en la detección de posición que dependerá en gran medida del hardware, y de si existen otros sistemas funcionando en paralelo en el mismo ambiente. Es decir, si el IPS está basado o funciona en base a dispositivos WLAN y existen otros dispositivos que usen la misma banda, entonces podría causar alguna interferencia o ruido no deseado. También dependiendo de la técnica utilizada para el posicionamiento. Por ejemplo si la técnica usada se trata de ToA/TDoA requiere al menos la utilización de tres bases, a su vez AoA requiere que no exista tanta interferencia generada por las señales multi trayectoria causadas por interferencias físicas.

### 2.4 GAMA DE TECNOLOGIAS DISPONIBLES

Una vista rápida a las tecnologías útiles cuya aplicación puede ser enfocada en el rubro del posicionamiento local e interior.

- Redes de telecomunicaciones móviles (4G, 5G, etc.)
- Sensores adicionales (odómetro, acelerómetro, giroscopio, magnetómetros, etc.)
- Redes de área local inalámbricas (WLAN: Bluetooth, WiFi, UWB, etc.)
- Basado en imágenes (coincidencia de patrones, procesamiento de imágenes, etc.)
- Basado en GNSS (pseudo-satelites, repetidores, etc.)

### 3 TÉCNICAS Y TECNOLOGÍAS DE POSICIONAMIENTO

El posicionamiento en interiores ha ganado un terreno particular en el interés general, con la aparición de tecnologías como los dispositivos “smart” y el IoT (Internet of Things) , diversas técnicas y tecnologías han surgido y se han dado a conocer, técnicas como AoA( Angle of Arrival ), ToF (Time of Flight), RTOF( Return Time of Flight ), y RSS (Received Signal Strength); y algunas basadas en el WiFi, RFID (Radio Frequency Identification Device), UWB (Ultra Wideband), Bluetooth y algunos otros ejemplos citados más adelante.

Con la gran cantidad de dispositivos que aparecen con funciones más avanzadas cada vez, y muchos más servicios han surgido a los que se les ha dado la importancia y la aplicación de dichas técnicas, entre estos el posicionamiento en interiores, el posicionamiento en interiores es el proceso de obtener la localización de un dispositivo o usuario en ubicación en un ambiente interior.

#### 3.1 PROPIEDADES DE LA SEÑAL

No todos los sistemas funcionan de la misma forma, cada involucra el uso de ciertas técnicas para poder funcionar, utilizando los dispositivos ya existentes. Un ejemplo de ello son aquellos sistemas inalámbricos que usan la banda 2.4 GHz, la señal pasa por varios pasos antes de enviarse la señal que necesita ser comunicada desde un transmisor a un receptor. Para una señal digital se envía un flujo de bits. La señal al enviarse se codifica, modula y se transmite a través de una portadora que es mandada por una antena.

Los sistemas de comunicación modernos generalmente amplifican la señal de banda base antes de insertarlo en la portadora. La amplificación se realiza para mitigar la distorsión de frecuencia, señales multitrayectoria, etc. generalmente presente en un canal, posterior la codificación es utilizada para pulir las imperfecciones y ruidos generados en el canal de comunicación, entre ellos los principales son: error de ráfaga corta, desvanecimiento, difusión de balance DC (codificación 8B/10B).

Existen múltiples tipos de codificación: block, convolución, turbo, LDPC (Low Density Parity Check). La idea principal es utilizar más bits de los necesarios para transmitir los datos, dichos bits se pueden usar para transmitir información adicional que

permita reconstruir la señal y manejar un control de errores, luego la modulación ocurre que no es más que un método para insertar una señal de frecuencia más baja sobre una señal de frecuencia más alta llamada onda portadora, habiendo tres tipos de modulación, de fase, de amplitud y de frecuencia por último la difusión se realiza a través de la antena, dos técnicas de difusión ampliamente utilizadas son FHSS (frequency hopping spread spectrum) DSSS (direct sequence spread spectrum). En DSSS, una señal de frecuencia más alta de difusión multiplica la señal modulada. La señal de difusión es también conocida como chip y puede ser muchas veces más alto que la señal de banda base. La velocidad de la señal de propagación se conoce como velocidad de chip. DSSS proporciona protección contra interferencia de banda estrecha y multitrayectoria. Para recuperar la señal en el receptor, la señal de propagación se multiplica por la señal de difusión. Esta multiplicación tiene la propiedad de difuminar cualquier señal, sin afectar la señal original y al mismo tiempo reduciendo el ruido o interferencia.

Aprovechándose del proceso y de las características al momento de propagar una señal, surgieron ciertas técnicas para poder ser utilizados en los IPS.

### 3.1.1 ANGLE OF ARRIVAL (AOA)

AOA es el ángulo y la distancia calculados en relación con dos o múltiples puntos de referencia a través de una intersección de líneas de dirección entre los puntos de referencia. El cálculo del ángulo y la distancia se usa para estimar y determinar la posición de un transmisor, y la información se utiliza para el posicionamiento o para fines de navegación. Con AOA, una posición puede ser determinada con pocos sensores para posicionamiento bidimensional (2D) o tridimensional (3D) como su principal ventaja, una desventaja es que el hardware utilizado tiende a ser complejo y caro para su adquisición

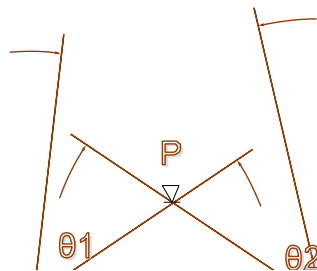


Imagen 3-1 Posicionamiento basado en la medición de AOA

y manipulación, es afectada por efectos de señal multitrayecto y la línea de visión entre dispositivos no debe estar afectada por ningún obstáculo [20].

### 3.1.2 TIME OF ARRIVAL(TOA)

Mientras que la medición de AOA se basa en el ángulo, la medición de TOA se basa principalmente en la distancia. TOA recibe en ocasiones el nombre de TOF(Time of flight). Esto es porque TOA es el tiempo que toma una señal para 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 difundirse de un transmisor a un receptor, con el receptor como punto de referencia, por lo tanto, podría afirmarse que en cuestiones de resultados TOA y TOF son iguales porque el tiempo en ambos casos resulta ser el mismo, el único cambio significativo es la referencia fija [19].

Además, TOA utiliza el tiempo absoluto de llegada al receptor en lugar de la diferencia de tiempo al salir de un transmisor y llegar al receptor, por lo tanto, la distancia entre el transmisor y el receptor puede ser directamente calculado a partir del TOA, y la posición puede determinarse con la información. TOA proporciona una alta precisión pero a un costo mayor en complejidad de hardware.

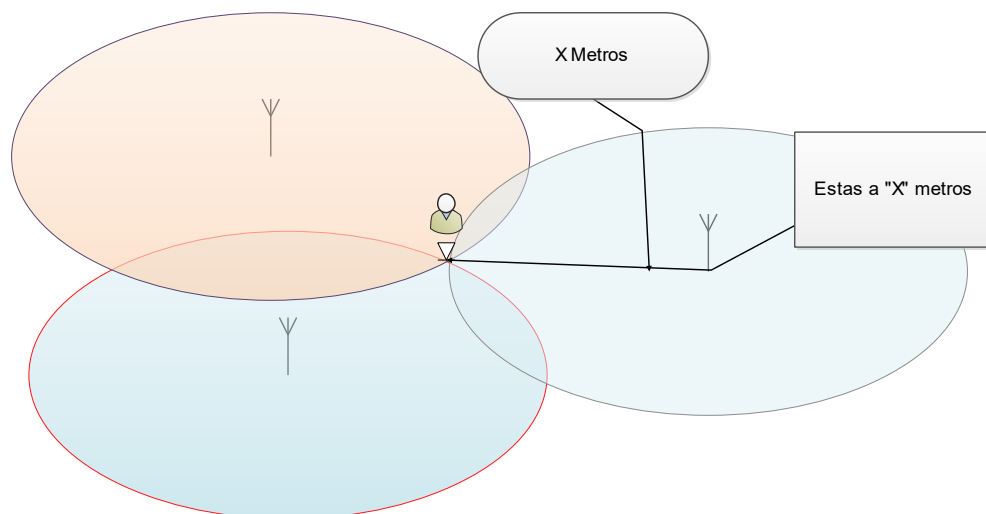
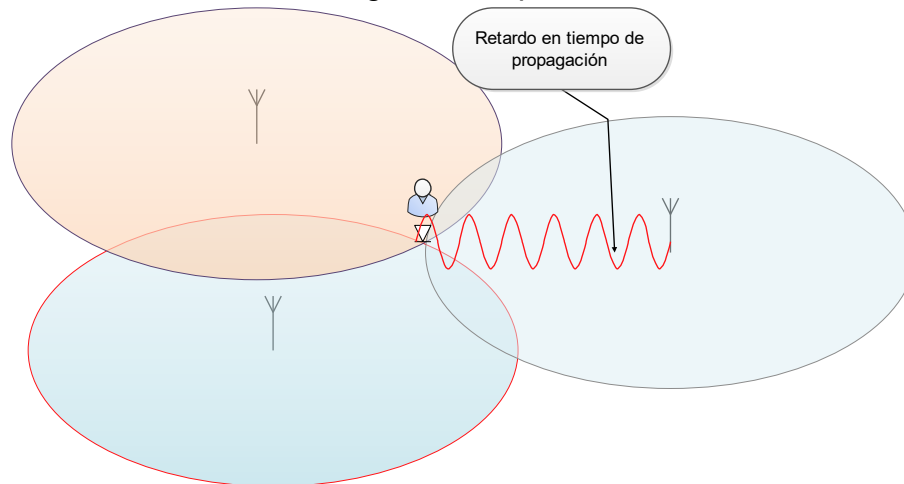


Imagen 3-2 Posicionamiento basado en ToA



### 3.1.3 TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA)

Al igual que TOA, TDOA también se basa en la distancia. TDOA determina la posición relativa de un móvil transmisor basado en la diferencia en el tiempo de propagación de llegada del transmisor y múltiple puntos de referencia o 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. Cuando la posición del transmisor móvil es conocida, el seguimiento puede realizarse con esta información.



*Imagen 3-3 Posicionamiento basado en TDoA*

Como una mejora en TOA, TDOA elimina la modificación del transmisor para el tiempo de llegada y, por lo tanto, reduce su complejidad. Además, TDOA proporciona una alta precisión [21].

### 3.1.4 RECEIVED SIGNAL STRENGTH IDENTIFICATION (RSSI)

A diferencia de las métricas angulares y basadas en la distancia, RSSI es una medida del nivel de potencia recibido través de la intensidad de la señal en una infraestructura de radio que puede usarse para estimar la distancia entre dispositivos. El RSSI mide la atenuación de las señales transmitidas, para calcular la intensidad en función de su reducción o pérdida debido a la propagación, por lo tanto, se puede estimar la distancia entre dispositivos móviles, y además se puede adquirir información de su posición. Cuanto mayor sea el RSSI, mejor será la calidad de la señal, sin embargo, en ambientes interiores donde es difícil obtener la LOS, el RSSI y el posicionamiento pueden

verse afectado por señales multitrayectoria y sombras, traduciéndose en disminución de la precisión [19].

## 3.2 ALGORITMOS DE POSICIONAMIENTO

Los algoritmos se pueden tomar como una traducción de las propiedades y cualidades de las señales para calcular las posiciones de objetos. En otras palabras, estos algoritmos traducen las propiedades de la señal grabada en distancias y ángulos, y luego calcula la posición real de un objeto objetivo. Tanto las propiedades de la señal como el algoritmo de posicionamiento trabajan juntos para determinar la posición de un objetivo, los diversos algoritmos de posicionamiento mejoran la precisión de una posición determinada. La precisión de la información recopilada en el puesto depende de la exactitud del valor de la propiedad de la señal. Además, los algoritmos de posicionamiento tienen ventajas únicas y desventajas, por lo tanto, usar más de un tipo de algoritmo de posicionamiento al mismo tiempo mejorar la precisión de la posición y el rendimiento, existen varias técnicas para determinar la posición utilizando información de rumbo, alcance o proximidad basada en la medición de señal, Sin embargo, las principales técnicas algorítmicas utilizadas en el posicionamiento son la triangulación, trilateración, proximidad y análisis de escena / huellas digitales, y las diversas propiedades de señal son aplicado dentro de los algoritmos de posicionamiento correspondientes [19].

### 3.2.1 TRIANGULACIÓN

La triangulación (o angulación) usa las propiedades geométricas de los triángulos para estimar la posición de un objetivo calculando las medidas angulares relativas a dos puntos de referencia conocidos. En otras palabras, la posición del objeto objetivo se encuentra en la intersección de dos pares de líneas de dirección angular, un método conocido como búsqueda de dirección AOA se utiliza para calcular la distancia entre líneas de dirección o puntos fijos para ubicar el objeto. La posición del objeto está determinada por calcular la posición de un transmisor en función del ángulo y la distancia con respecto a la referencia puntos. Además, cuando se usan dos o tres puntos de referencia para determinar la posición, resulta en un sistema simple y de bajo. Sin

embargo, cuando el área de cobertura es más amplia con múltiples puntos de referencia, determinación de posición puede contener algunos errores que pueden resultar en una disminución de la precisión. Además, el hardware para un área de cobertura amplia tiende a ser complejo y costoso [22].

### 3.2.2 TRILATERACIÓN

Al igual que la triangulación, también usa las propiedades geométricas de los triángulos para estimar la posición de un objeto. Sin embargo, en este caso, las mediciones de distancia relativas a tres puntos de referencia conocidos se utilizan para determinar la posición calculando la atenuación de la señal transmitida.

Del mismo modo, la multilateración que es similar a la trilateración utiliza cuatro o más referencias [20].

### 3.2.3 PROXIMIDAD

A diferencia de la triangulación y la trilateración, la proximidad no da una posición absoluta o estimación relativa, porque solo proporciona información de posición. Para proporcionar la información, se utiliza una cuadrícula de antenas con posiciones conocidas para determinar la posición. Cuando se detecta un dispositivo 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. La posición del dispositivo móvil se determina usando RSSI, que generalmente se usa en proximidad para estimar la distancia entre dispositivos móviles con el fin de adquirir la posición del dispositivo. Obtener la posición del dispositivo es beneficioso en los servicios basados en la ubicación y aplicaciones como seguimiento y navegación. Además, se aplica proximidad en sistemas que usan IR, RFID y Bluetooth, y aun así requiere poco esfuerzo de calibración. Sin embargo, existe la necesidad de una mayor difusión de escáneres para lograr un área de cobertura más amplia. Esta gran concentración de escáneres podría conducir a la complejidad y alto costo [20].

### 3.2.4 ANALISIS DE ESCENA Y HUELLAS DIGITALES

Las técnicas de localización basadas en análisis de escena generalmente requieren una revisión del entorno para categorizar huellas digitales o características del mismo donde se utilizará el sistema de localización. Inicialmente, se recopilan diferentes mediciones RSSI durante una fase fuera de línea. Una vez que se implementa el sistema, se comparan las mediciones en línea (obtenidas en tiempo real) con las mediciones fuera de línea para estimar la ubicación del usuario. Por lo general, las huellas digitales o las características se recopilan en forma de RSSI o CSI. Hay varios algoritmos disponibles que se puede usar para hacer coincidir las mediciones sin conexión con las en línea medición, algunos de los cuales se analizan a continuación [20].

## 3.3 TECNOLOGÍAS DE POSICIONAMIENTO EN INTERIORES

Varias tecnologías existentes que tienen se ha utilizado para proporcionar servicios de localización interior algunas ya se han visto en capítulos anteriores, tecnologías de radiocomunicación, tales como IEEE 802.11, Bluetooth, Zigbee, RFID y Ultra-Wideband (UWB), se presentará primero, seguido de tecnologías basadas en luz y acústica. Se tomarán en cuenta aquellas que cuentan con una mejor cobertura y/o implementación con una infraestructura menos compleja y costosa [20].

### 3.3.1 IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA

Los sistemas de posicionamiento de RF son una tecnología de posicionamiento que utiliza señales e infraestructuras de RF para determinar la posición de una persona u objeto para fines de rastreo y navegación. Los sistemas de RF tienen los beneficios de que su señal puede penetrar paredes y obstáculos que conducen a una mayor área de cobertura, así como la reutilización de las infraestructuras de RF existentes, lo que resulta en una reducción de costos relativos.

Estos sistemas hacen uso de las técnicas de triangulación, trilateración o huellas digitales. Sin embargo, existen limitaciones debido a la complicada naturaleza de los espacios interiores. Los sistemas de posicionamiento RF se clasifican en Bluetooth,

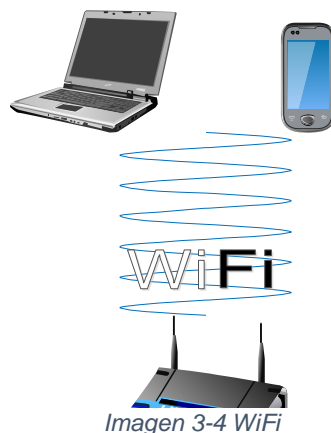
Banda ultra ancha (UWB), Red inalámbrica de sensores (WSN), Red inalámbrica de área local (WLAN), Identificación por radiofrecuencia (RFID) y comunicación de

campo cercano (NFC). Los diversos sistemas de posicionamiento de RF tienen características únicas, fortalezas, limitaciones, y las subsecciones siguientes las resaltan [20].

### 3.3.2 WIFI

El estándar IEEE 802.11x, comúnmente conocido como WiFi, opera en la banda ISM y se usa principalmente para proporcionar capacidades de red y conexión a Internet a diferentes dispositivos en privado, público y ambientes comerciales. Inicialmente, WiFi tenía una recepción o alcance de unos 100 metros que ahora ha aumentado a aproximadamente 1 kilómetro (km) en IEEE 802.11ah (principalmente optimizado para servicios IoT) para comprender mejor el desarrollo, el capítulo 1.1.7 describe los antecedentes, así como los datos técnicos claves.

La mayoría de los teléfonos inteligentes, computadoras portátiles y otros dispositivos portátiles actuales están habilitados para WiFi, lo que hace que WiFi sea candidato ideal para la localización en interiores. En cuestiones de WiFi, los puntos de acceso también se pueden usar como puntos de referencia para cálculos de posición, sistemas básicos de localización (que pueden lograr precisión de localización razonable) se puede construir sin la necesidad de infraestructura adicional. Sin embargo, las redes WiFi existentes normalmente se implementan para comunicación (es decir, para maximizar el rendimiento de datos y la red de cobertura) en lugar de fines de localización y, por lo tanto, aunque novedoso, se requieren algoritmos eficientes para mejorar su localización exacta. Además, la interferencia en la banda ISM afecta la precisión de localización. Las técnicas RSS, CSI, ToF y AoA mencionadas anteriormente (y cualquier



combinación de ellos, es decir, métodos híbridos) pueden ser mezclados con el WIFI para aumentar su eficacia [16].

### 3.3.3 BLUETOOTH

Bluetooth (o IEEE 802.15.1) Es un protocolo que funciona en la capa física y la capa MAC que permite conectar diferentes dispositivos inalámbricos dentro de cierto espacio personal. La última versión de Bluetooth, es decir, Bluetooth Low Energy (BLE), también conocido como Bluetooth Smart, puede proporcionar datos mejorados, tasa de 24Mbps y rango de cobertura de 70-100 metros con mayor eficiencia energética, en comparación con las versiones anteriores según el capítulo 1.1.7. Mientras que BLE se puede usar con diferentes técnicas de localización como RSSI, AoA y ToF, etc. Aunque BLE en su la forma original se puede usar para la localización (debido a su rango, bajo costo y consumo de energía), surgieron dos protocolos basados en BLE, iBeacons (por Apple Inc.) y Eddystone (por Google Inc.), cuyo propósito principalmente es funcionar para el contexto servicios basados en proximidad. El protocolo es específicamente diseñado para detección y servicios basados en proximidad. El protocolo permite a un dispositivo habilitado para BLE (también conocido como iBeacon o baliza) transmitir balizas o señales periódicamente. La baliza consta de un byte obligatorio de 16 Identificador universalmente único (UUID) 4 y 2 bytes de valores opcionales. Cualquier dispositivo habilitado para BLE que tenga una aplicación patentada para escuchar las balizas recoge el mensaje de baliza y utiliza RSSI para estimar la proximidad entre el dispositivo iBeacon y el usuario. Basado en la fuerza del RSSI. Se clasifican en inmediato (<1 m), cercano (1- 3 m), lejos (> 3 m) y regiones desconocidas. Se representa el esquema de una arquitectura de baliza típica. Después de recibir un mensaje de iBeacon, el dispositivo del usuario puede consultar un servidor o la nube para identificar la acción asociada a la baliza recibida. La acción podría ser enviar un cupón de descuento para ser recibido por el dispositivo del usuario, para abrir una puerta o para mostrar contenido interactivo en un monitor, según la proximidad del usuario a alguna baliza u otra entidad, etc. Una restricción fundamental de iBeacons (impuesta por Apple) es que solo el valor RSSI promedio se informa al dispositivo del usuario cada segundo, a pesar de que las

balizas se transmiten a intervalos de 50 ms. Esto es para tener en cuenta las variaciones en los valores RSS instantáneos en el dispositivo del usuario. Sin embargo, este

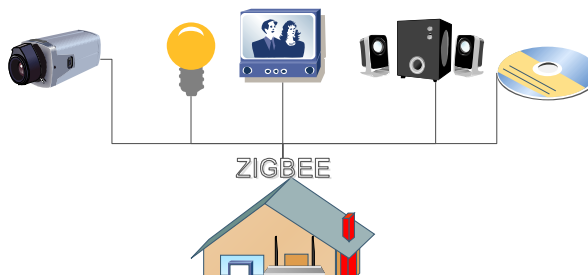


promedio de RSS y la demora en los informes pueden imponer desafíos para la localización en tiempo real [20] [23].

*Imagen 3-5 Dispositivos Bluetooth*

### 3.3.4 ZIGBEE

Zigbee se basa en el estándar IEEE 802.15.4 que utiliza las capas físicas y MAC, tiene bajo costo, baja velocidad de datos y redes de área personal energéticamente eficiente. Zigbee define los niveles más altos de la pila de protocolos y es básicamente utilizado en redes inalámbricas de sensores. La capa de red Zigbee es responsable del enrutamiento multihop y de la organización de la red mientras que la capa de aplicación es responsable de la comunicación distribuida y desarrollo de aplicación. Si bien Zigbee es favorable para la localización de sensores en una red inalámbrica de sensores, no está disponible en la mayoría de los dispositivos de usuario, por lo tanto no es favorable para la localización de usuarios en interiores ya que involucraría hardware adicional por usuario a localizar [1].



*Imagen 3-6 Zigbee control total del hogar*

### 3.3.5 OPTICA O VISIÓN

El posicionamiento basado en la visión es una forma de rastrear las ubicaciones e identificar personas o dispositivos en un entorno interior complejo. El posicionamiento basado en la visión no necesita a la persona rastreada portando o usando cualquier dispositivo. Y la visión puede proporcionar fácilmente información basada en la ubicación y acción que esté realizando. Las técnicas de localización basadas en la visión pueden capturar el movimiento de los objetivos con datos desde una sola perspectiva o múltiples perspectivas. Los sistemas Easy Living (creado por Microsoft) utilizan la perspectiva múltiple técnica de localización basada en la visión con dos cámaras cubriendo toda el área de medición. La estimación de ubicación en el área se realiza utilizando el color y la profundidad proporcionada por ambas cámaras. En resumen, una cámara de bajo precio puede cubrir un área grande. Los usuarios no necesitan llevar ningún dispositivo, y pueden ser localizados por el IPS basado en visión. Sin embargo, estos sistemas todavía tienen algunos inconvenientes. En primer lugar, la privacidad de las personas no es tomada en cuenta cuando se realiza el posicionamiento. En segundo lugar, el sistema no es confiable en un cambio dinámico del medio ambiente. Dado que las estimaciones de posición se basan en la información de visión guardada en una base de datos, que debe ser actualizado debido a los cambios en el entorno, como cambiando el lugar de su escritorio en su oficina. La visión basada en el posicionamiento está influenciado por muchas fuentes de interferencia como el clima, la luz, etc. Por ejemplo, el encendido y apagado de una luz en una habitación reduce la precisión del seguimiento de una persona en movimiento. Además, el seguimiento de varias personas moviéndose en lo mismo sigue siendo un desafío para el posicionamiento basado en la visión, que necesita una mayor capacidad computacional del sistema de posicionamiento [19].

### 3.3.6 GEOMAGNETISMO

El uso de señales magnéticas es una forma antigua y clásica de medir y rastrear la posición. Los sistemas de posicionamiento magnético ofrecen una alta precisión y no sufren los problemas de la línea de visión (LOS), donde las posiciones se miden en caso



de un obstáculo entre los transmisores y los receptores. Como ejemplo de su funcionamiento se encuentra MotionStar.

MotionStar Wireless es un sistema de seguimiento de movimiento que utiliza pulsaciones de campos magnéticos de DC para localizar simultáneamente sensores dentro de un área de cobertura de 3m. MotionStar Wireless es una versión mejorada del sistema original de seguimiento de movimiento con cable llamado MotionStar diseñado por Ascension Technology Corporation. Al modificar el diseño de la versión anterior, MotionStar, no hay cable entre una persona rastreada y una estación base que rastrea el movimiento de la persona. El sistema inalámbrico MotionStar proporciona un seguimiento preciso del movimiento del cuerpo al medir numerosos sensores montados en las diferentes partes de una persona. Por lo tanto, la información de posición de los sensores determinada por el sistema MotionStar Wireless puede ser utilizada por diversas aplicaciones, como Animación, Biomecánica, realidad virtual, etc. El sistema inalámbrico MotionStar rastrea múltiples objetivos (hasta 120 sensores) al mismo tiempo y en tiempo real. Los sistemas consisten en un transmisor y controlador, una estación base, sensores montados y transmisores de RF. La parte del transmisor y controlador envía pulsos magnéticos a los sensores montados en el cuerpo. Luego, cada sensor montado en una parte del cuerpo particular recibe pulsos magnéticos del transmisor y el controlador. Los sensores están conectados a través de cables al transmisor de RF, que es transportado por la persona rastreada. El transmisor de RF puede conectar hasta 20 sensores y transmite los datos medidos a la estación base. Finalmente, la estación base calcula la posición y orientación de los sensores y transfiere los datos medidos a la computadora del usuario a través de la interfaz RS232 o Ethernet. Estos datos estimados se pueden usar para aplicaciones de animación y seguimiento. El rango de error de la estimación de la posición estática es de aproximadamente 1 cm. La tasa de actualización de las mediciones de posición es de hasta 120 mediciones por segundo. Los sensores que transporta una persona rastreada son pequeños (2,54 cm × 2,54 cm × 2,03 cm) y livianos (21 g), que son dispositivos portátiles y cómodos de usar. Estos sensores montados están conectados a través de cables con el transmisor RF de la mochila. Sin embargo, la desventaja del sistema Motion Star es que los seguidores magnéticos son bastante caros. El tiempo de vida de la batería para el seguimiento de

movimiento continuo es de alrededor de 1 hora o 2 horas, que es un período corto para las estimaciones diarias de posición. Y el rendimiento del sistema Motion Star está influenciado por la presencia de elementos metálicos en el área de estimación de posicionamiento. Además, el rango de cobertura de cada transmisor está limitado a 3 m, lo que no es escalable para grandes aplicaciones y servicios públicos en interiores. Resumen de los sistemas de posicionamiento magnético: los sensores magnéticos son de tamaño pequeño, robusto y económico, lo que brinda beneficios para las estimaciones de posicionamiento en ambientes interiores. Los sistemas de posicionamiento basados en imanes pueden ofrecer una mayor precisión y permitir el seguimiento de múltiples posiciones al mismo tiempo. Sin embargo, el rango de cobertura limitado es un inconveniente para el rendimiento de los IPS magnéticos. Por lo tanto, aumentar el rango de cobertura de cada transceptor magnético o usar varias infraestructuras magnéticas para cubrir suficiente área para uso en interiores necesita más estudio, diseño y desarrollo [24].

### 3.3.7 ULTRA WIDE BAND (UWB)

UWB es una tecnología de radio de alta velocidad y corto alcance para la comunicación inalámbrica con la capacidad de tener una resistencia robusta a la falta de línea de vista y a los efectos de las señales multitrayectoria. Una variedad de aplicaciones y tecnologías de posicionamiento ha implementado esta tecnología debido a su alto ancho de banda. El sistema de posicionamiento basado en UWB se puede clasificar en pasivo y activo. El sistema de posicionamiento basado en UWB pasivo es un sistema que utiliza reflexión de señal, y no una etiqueta UWB adjunta, para determinar la posición de una persona u objeto mediante el principio del radar. Cuando una persona se mueve dentro de una habitación con posiciones conocidas de transmisores y receptores UWB instalados, el cuerpo de la persona refleja las señales emitidas por los transmisores. Los receptores detectan las señales reflejadas, y la posición de la persona se estima utilizando técnicas de TOA, TDOA y trilateración. Por otro lado, el sistema de posicionamiento activo basado en UWB hace uso de una etiqueta UWB alimentada por batería [20].

El sistema de posicionamiento activo basado en UWB consta de sensores UWB (fijos), etiquetas UWB activas (móviles), controlador de software central y WLAN. El sistema localiza y rastrea objetos y personas dentro de un edificio mediante la transmisión de pulsos UWB ultracortos desde las etiquetas UWB activas rastreadas a los sensores UWB fijos y en red. Los sensores envían la información recopilada a través de WLAN a la plataforma de software, que luego analiza, computa y muestra la posición de las etiquetas UWB en tiempo real. Además, las etiquetas transmiten señales y se localizan utilizando las técnicas TOA, TDOA y trilateración. La aplicación de UWB en ambientes interiores tiene las ventajas de una batería de larga duración para etiquetas UWB, flexibilidad robusta, altas tasas de datos, alta potencia de penetración, bajo consumo de energía y transmisión, buena precisión de posicionamiento y rendimiento, y poca o ninguna interferencia a efectos multitrayecto. El uso de más sensores UWB y su ubicación estratégica podría resultar en un área de cobertura más amplia, seguimiento en tiempo real, mejor precisión de posicionamiento y reducción del efecto de las deficiencias de la señal. Sin embargo, UWB hace uso de tecnologías que no están en línea con los estándares existentes; por lo tanto, su uso público no es seguro. UWB es costoso de escalar debido a la necesidad de implementar más sensores UWB en un área de cobertura amplia para mejorar el rendimiento [20].

### 3.3.8 ULTRASONIDO O SONIDO

Al igual que el sistema de posicionamiento IR, el sistema de posicionamiento por ultrasonido tiene una alta precisión a nivel de habitación. Algunos sistemas de posicionamiento por ultrasonido usan señales de banda estrecha o de banda ancha que han mostrado un nivel de alta precisión durante la implementación. Los sistemas de posicionamiento por ultrasonido implican el uso de etiquetas o nodos ultrasónicos en usuarios y objetos. Estas etiquetas o nodos sirven como receptores o transmisores; cuando uno está parado o fijo, el otro estará en movimiento. Los sistemas de posicionamiento de ultrasonido ampliamente conocidos incluyen el Active Bat, el sistema Cricket y el sistema Dolphin [20].

### 3.3.9 LUZ VISIBLE

El sistema de posicionamiento de luz visible (VL) utiliza la tecnología de comunicación de luz visible (VLC). VLC es una tecnología de comunicación inalámbrica óptica (OWC) de espacio libre de corto alcance que utiliza luz visible para transmitir datos a 380 - 780 nm de longitud de onda. VLC utiliza lámparas fluorescentes compactas (CFL) y lámparas LED blancas para transmitir señales a 10 kbps y 500 Mbps respectivamente. El doble propósito de estas lámparas como herramientas de iluminación y comunicación ha atraído a investigadores. Además, la tecnología VLC ha existido desde el siglo XIX, sin embargo su popularidad y uso aumentaron en el siglo XX. Esto condujo al descubrimiento del LED blanco para aplicaciones en interiores. El LED blanco tiene ventajas sobre las lámparas incandescentes y fluorescentes existentes que incluyen una vida útil más larga, eficiencia energética, alta tolerancia a la humedad, mínima generación de calor y modulación de datos. Debido a que el LED se está volviendo cada vez más popular, está ganando popularidad en la investigación de posicionamiento en interiores. Por lo tanto, es una alternativa emergente a las inhibiciones existentes de la tecnología RF porque el ancho de banda de la luz visible es mucho mayor que la de RF, estas inhibiciones de RF se eliminan mediante el uso de métodos como el esquema de modulación on-off-keying (OOK) en los sistemas de posicionamiento de LED. El sistema de posicionamiento VL es una tecnología de posicionamiento que utiliza luz visible para determinar la posición de un objeto (generalmente dispositivo móvil, robot o vehículo) para fines de seguimiento y navegación. Generalmente se basa en el esquema de modulación de intensidad y de detección directa. El sistema de posicionamiento VL consiste en una fuente de origen o estación base (transmisor), un terminal móvil o un sensor de imagen (receptor) y un canal de comunicación LOS. En este sistema, las fuentes de luz se montan en el techo de una habitación para transmitir su información de posición conocida, o en la pared lateral como estaciones. El terminal móvil o el sensor de imagen recibe y demodula la información desde una posición desconocida. La posición desconocida se calcula utilizando esta información. Si bien se han realizado varias investigaciones utilizando luz visible, la operación de trabajo es la misma, aunque consisten en hardware, arquitectura y técnicas diferentes pero similares aplicadas algunos investigadores desarrollaron un sistema de

posicionamiento LED basado en Carrier Allocation VLC (CA-VLC) para aliviar las interferencias entre células, utilizando la técnica de trilateración [19].

### 3.3.10 PEDESTRIAN DEAD RECKONING (PDR)

PDR es Dead Reckoning (DR) para peatones. DR es el proceso de estimar la posición actual de uno usando una posición previamente conocida y el tiempo en que se obtuvo, y prediciendo una posición futura basada en la dirección y velocidad conocidas durante un periodo. DR funciona incluso cuando la navegación por radio como el GPS falla y el mal tiempo hace que las técnicas visuales sean imposibles. Puede proporcionar información precisa sobre la posición, pero está sujeto a errores acumulativos durante un largo período. Sin embargo, su precisión se puede aumentar significativamente mediante el uso de métodos más confiables en híbrido para obtener una nueva posición. Por lo tanto, se usa en INS a través de PDR debido a la precisión en la información direccional proporcionada por PDR, también se emplea en algunos dispositivos de navegación electromecánicos, como los sistemas micro electromecánicos (MEMS), que han permitido desarrollar INSs pequeños, de bajo costo y ligeros. INS es un sistema de navegación que utiliza un dispositivo informático con sensores inerciales, desde un punto de partida conocido, para estimar la posición, orientación, aceleración y velocidad de un objeto en movimiento sin la necesidad de puntos de referencia externo. Esto se realiza calculando con sensores inerciales como acelerómetro (para detección de movimiento traslacional), giroscopio (para detección de movimiento rotacional) y magnetómetro (para orientación con respecto al campo magnético de la Tierra) para lograr un buen rendimiento. El INS no depende de la transmisión o recepción de señales de una fuente externa, sino del conocimiento preciso de la posición inicial. Sin embargo, su posición inicial se puede obtener de fuentes externas como un receptor de satélite GPS. Por lo tanto, se utiliza en robots, vehículos, barcos, aviones, submarinos, misiles guiados y naves espaciales para obtener estimaciones muy precisas de posicionamiento. En los últimos años, debido a que los sensores inerciales ahora están integrados en los teléfonos inteligentes y dispositivos móviles modernos dispositivos, INS se ha aplicado en interiores en un proceso conocido como navegación peatonal con PDR. PDR es un

sistema de posicionamiento que se transformó de los principios de DR y se aplica en los INS [19].

## 4 APLICACIONES

### 4.1 *GESTIÓN Y RECUPERACIÓN DE DESASTRES*

La tecnología puede facilitar la gestión de desastres y ayudar en la recuperación después de cualquier desastre natural (como tornados, terremotos, tormentas e inundaciones, etc.) o desastres causados por humanos (ataques terroristas, etc.). La localización también puede ayudar en la gestión eficiente de desastres y acelerar el proceso de recuperación. Uno de los desafíos fundamentales de los desastres generalmente es obtener información sobre los seres humanos, si están seguros o no y cuál es su ubicación en el área afectada por el desastre.

La localización puede ayudar en tales escenarios al proporcionar la ubicación precisa de las personas desaparecidas y brindarles ayuda médica en escenarios extremos, como el usuario atrapado en los escombros después de un terremoto. Del mismo modo, en caso de incendio o cualquier otra calamidad en un ambiente interior, el equipo de rescate puede obtener las ubicaciones de los usuarios a través del sistema de localización que luego se pueden utilizar para operaciones específicas en la ubicación afectada [22].

### 4.2 *SEGURIDAD*

La localización puede mejorar en gran medida las condiciones de seguridad alrededor del mundo. Se pueden usar patrones de movilidad e interacción del usuario para identificar posibles amenazas que puedan presentar riesgos de seguridad.

Del mismo modo, en el campo de batalla o zonas de guerra, los militares pueden rastrear sus activos y tropas a través de un sistema de localización que mejore el funcionamiento general y aumente las posibilidades de operación exitosa. El soldado en tierra también puede beneficiarse desde un sistema de localización robusto para navegar en áreas no conocidas por ellos. Esta es una ventaja estratégica ya que los soldados pueden prestar atención a su funcionamiento y no preocuparse por los caminos tomar

para seguir adelante. Usando la localización, el central comando puede diseñar mejores estrategias y planes, que entonces puede proporcionar a los soldados en el suelo [22].

### 4.3 ROBÓTICA

La robótica es una de las principales aplicaciones de localización en interiores. Se han llevado a cabo muchas investigaciones y desarrollos para implementar aplicaciones de sistemas móviles con múltiples robots. El movimiento de robots en escenarios interiores realmente grandes donde se requiere la cooperación entre ellos es un tema crítico. Por ejemplo, la cooperación entre los equipos de robots mejora los resultados de la misión en aplicaciones como vigilancia, exploración de zonas desconocidas, orientación o mantenimiento de conectividad. El proyecto URUS (Ubiquitous Networking Robotics in Urban Settings) es un excelente ejemplo de localización para la evacuación en caso de emergencia, donde los robots llevan a las personas a un área segura a través de caminos seguros en caso de incendio.

Además, en robótica se consideran los obstáculos y las restricciones dinámicas y cinemáticas para lograr un sistema de navegación completo. Del mismo modo, el trabajo utilizó la idea de las fuerzas entre los robots para evitar obstáculos. Se ve otra aplicación en la que un sistema de navegación multi-robot tiene en cuenta todas las restricciones (dinámicas) del robot y calcula una función para toda la formación para realizar la navegación del robot con evitación segura de colisiones.

SLaM (Simultaneous Localization and Mapping) es muy interesante al aplicarse a la robótica. Se traduce en llevar a cabo las tareas por un robot de forma autónoma sin la conciencia de su posición circundante y propia. SLaM es útil en la construcción de robots autónomos. Sin embargo, requiere altos recursos de procesamiento para llevar a cabo SLaM en tiempo real, para tomar medidas contra eso C-SLAM crea las pautas y resuelve el problema al construir el mapa del entorno basado en la colaboración entre múltiples robots. Se obtiene un mapa global en C-SLAM fusionando mapas individuales obtenidos por múltiples robots. Además, la navegación precisa del robot móvil en ambientes interiores se logra a través de un sistema de navegación UWB. El sistema de navegación consta de dos subsistemas: el sistema de control del robot y el sistema de localización. La navegación autónoma del robot se logra en este sistema a través de una

técnica de localización basada en TDoA, la implementación digital del transmisor y el receptor y la combinación de ambos subsistemas [22].

#### 4.4 LOCATION BASED SERVICES (LBS)

Los servicios basados en la ubicación (LBS) se definen generalmente como un servicio que supera las capacidades GIS (Geographic Information System) o la información espacial para los usuarios finales a través de redes inalámbricas y / o Internet. Sin embargo, las aplicaciones LBS pueden ofrecer el contexto y la conectividad necesarios para asociar dinámicamente la posición de un usuario a la información sensible al contexto sobre los entornos actuales; mientras que las aplicaciones GIS convencionales se concentran en información geográfica para la planificación y gestión de la tierra. Por lo tanto, se logra un alto nivel de personalización con aplicaciones LBS que simplifican la capacidad de hacer de cada usuario el centro de su universo.

LBS envía datos dependientes del contexto y a los que accede un dispositivo móvil al conocer la ubicación geográfica. Se requiere el servicio LBS para ambientes interiores y exteriores. Por ejemplo, los LBS interiores incluyen aplicaciones para obtener información de seguridad o datos actualizados sobre cines, eventos o conciertos en las cercanías. Otras aplicaciones de este tipo incluyen una aplicación de navegación utilizada para dirigir a un usuario a la tienda de destino en un edificio público. Además, los LBS se utilizan para publicidad, facturación y navegación personal para guiar a los invitados de las ferias a la cabina de exposición específica. Además, las aplicaciones LBS se pueden usar en las estaciones de autobús o tren para navegar hasta la parada de autobús. Asimismo, los LBS se utilizan para notificaciones basadas en proximidad, tareas automatizadas de inicio / cierre de sesión en instituciones y la coincidencia de perfiles.

##### 4.4.1 TECNOLOGÍA INALÁMBRICA UTILIZADA EN MBL.

**MBL basado en WiFi:** RADAR, que es uno de los pioneros que utiliza los valores RSSI del dispositivo del usuario para obtener una estimación de la ubicación del usuario. Durante la fase fuera de línea, los AP recopilan valores RSSI del dispositivo del usuario



que se utilizan para construir un mapa de radio. En la fase en línea, los valores RSSI obtenidos se cuadran con los valores RSSI fuera de línea para inferir la ubicación del usuario. RADAR logra una precisión de localización media de 2,94 metros (m) El filtro Kalman aplicado mejora la precisión de localización de un sistema que utiliza RSSI de los puntos de acceso WiFi. Se usan las huellas digitales RSSI en la fase fuera de línea para inferir sobre la posición usando el RSSI en la fase en línea. El sistema basado en móvil también se compara con el filtro de Kalman se alcanza una precisión media de 2.5 m.

Chronos que es un sistema MBL basado en un único punto de acceso WiFi (AP). Chronos usa ToF para una localización precisa. El AP recibe ciertos mensajes de la baliza del dispositivo del usuario que se utilizan para calcular el ToF. Dado que la localización precisa requiere una estimación precisa de ToF (orden de nanosegundos), Chronos emplea la relación inversa entre el ancho de banda y el tiempo para emular un sistema de banda ancha. Tanto el transmisor como el receptor saltan entre diferentes bandas de frecuencia de WiFi, lo que resulta en diferentes medidas de canal. La información obtenida se combina para obtener una estimación precisa de ToF. Una vez que los ToF se calculan con precisión en el AP, se resuelven en distancias entre cada par de antenas en el AP y el dispositivo del usuario (por lo tanto, tanto el AP como el cliente deben ser dispositivos MIMO). Las distancias medidas se utilizan para obtener las ubicaciones 2D relativas al AP a través de un proceso de minimización de errores (error entre distancias medidas y esperadas) que está sujeto a restricciones geométricas impuestas por la ubicación de la antena en cada dispositivo. Si bien Chronos alcanza una precisión media de 0,65 metros, no es escalable y parece consumir mucha energía para barrer a través de diferentes frecuencias.

SpotFi que utiliza CSI(Channel State Information) y RSSI para obtener una estimación precisa de AoA y ToF, utilizado para obtener la ubicación del usuario. SpotFi logra una precisión de localización media de 40 cm utilizando una tarjeta WiFi estándar sin la necesidad de ningún componente de hardware costoso o huellas dactilares. Las señales emitidas desde el dispositivo del usuario hacia el AP se utilizan para obtener una estimación precisa del AoA utilizando solo un número limitado de antenas en el AP. Una observación importante de SpotFi es que la ruta múltiple no solo afecta el AoA de la señal

a través de varias antenas, sino también el CSI a través de diferentes subportadoras WiFi (debido a diferentes ToF). Para dar cuenta de esto, SpotFi utiliza algoritmos conjuntos de estimación de AoA y ToF empleando la información CSI. Si bien el sistema alcanza una alta precisión utilizando puntos de acceso WiFi, no es adecuado para MBL en tiempo real porque no puede calcular la estimación de posición con un número limitado de señales.

ArrayTrack, que se basa en un cálculo preciso de AoA en el AP WiFi para estimar la posición del usuario. Requiere un número comparativamente mayor de antenas que SpotFi, alcanza una precisión de localización mediana mejorada de 23 cm. ArrayTrack detecta los paquetes en el AP desde diferentes dispositivos móviles de usuario, sin embargo, necesita escuchar un pequeño número de cuadros que pueden ser cuadros de control o cuadros de datos (se usan 10 muestras que en el dominio del tiempo representan 250 nanosegundos de un paquete muestras) Actualmente utiliza símbolos cortos de entrenamiento del preámbulo de WiFi para fines de detección. ArrayTrack sintetiza datos de AoA independientes de los pares de antenas. Para una generación precisa del espectro AoA, ArrayTrack utiliza una versión modificada del algoritmo MUSIC (Multiple Signal Classification) propuesto. Como el algoritmo MUSIC sin ninguna modificación daría como resultado espectros AoA altamente distorsionados, ArrayTrack utiliza suavizado espacial que promedia las señales entrantes a través de diferentes antenas en el AP. Para suprimir los efectos de trayectos múltiples, ArrayTrack se basa en el hecho de que el componente LOS directo no varía drásticamente entre las diferentes muestras recolectadas, mientras que los picos falsos o las señales de trayectos múltiples lo hacen. El espectro de AoA obtenido se utiliza para estimar la ubicación del usuario / dispositivo. Si bien ArrayTrack alcanza una alta precisión de localización en tiempo real y es escalable, el requisito de un mayor número de antenas es una de sus limitaciones fundamentales. Además, aún está por verse si el enfoque propuesto puede funcionar con los puntos de acceso WiFi estándar disponibles. Phaser es una extensión de ArrayTrack que funciona con WiFi de productos básicos y utiliza AoA para la localización en interiores. Phaser utiliza dos NIC Intel 5300 802.11, cada una con tres antenas, mientras que una antena se comparte entre las dos NIC, lo que da como resultado un total de 5 antenas. Para compartir la antena, Phaser sincroniza

eficientemente las dos NIC. Phaser logra una precisión media de 1-2 metros, que no satisface la precisión del submedidor requerida para la localización en interiores. ToneTrack utiliza datos ToF para obtener una estimación en tiempo real de la ubicación del usuario con una precisión media de 0,9 metros. ToneTrack combina los datos ToF obtenidos del canal o salto de frecuencia del dispositivo del usuario. El algoritmo de combinación de canales ayuda a combinar la información de diferentes canales, lo que ayuda a lograr una resolución de tiempo adecuada para la localización en interiores. Para tener en cuenta los efectos de múltiples rutas y la ausencia de rutas LoS, ToneTrack utiliza un nuevo algoritmo de identificación de espectro que ayuda a identificar si el espectro obtenido contiene información valiosa para la localización. Además, al utilizar la desigualdad triangular, ToneTrack descarta aquellas mediciones obtenidas del WiFi AP que no tienen una ruta LOS al dispositivo del usuario. Los resultados numéricos muestran que ToneTrack puede proporcionar mediciones bastante precisas y en tiempo real. En términos de los principios básicos, Chronos y ToneTrack se basan en el mismo principio subyacente de combinar información de diferentes canales. ToneTrack se prueba con hardware patentado y aún está por verse si puede funcionar con las tarjetas WiFi existentes. Los autores proponen un sistema de huellas dactilares CSI para interiores basado en el aprendizaje profundo utilizan una fase de entrenamiento fuera de línea para entrenar una red neuronal profunda. En la fase en línea, el método probabilístico se usa para estimar la ubicación del usuario. Se obtiene un error de localización promedio de tan solo 0.9 metros.

Pallas que se basa en la recopilación pasiva de valores RSSI en puntos de acceso Wi-Fi para obtener la ubicación del usuario. El sistema prospera construyendo pasivamente la base de datos de Wi-Fi. Inicialmente, Pallas obtiene puntos de referencia presentes en las huellas RSS de Wi-Fi, que cuando se combinan con el plano de planta interior y la ubicación de los puntos de acceso de Wi-Fi se utilizan para asignar los valores RSS recopilados a las rutas interiores.

Se propone un enfoque basado en el aprendizaje discriminatorio que combina la huella digital WiFi con lecturas de campo magnético para lograr la detección a nivel de sala. Luego, la detección de puntos de referencia se combina con modelos de localización basados en rangos y un estado del sistema discretizado basado en gráficos

para refinar el rendimiento de localización del sistema que resulta en un error de localización tan bajo como 1: 44m.

**2) MBL basado en UWB:** Ubisense es uno de los sistemas MBL basados en UWB ampliamente conocidos. Ubisense alcanza una precisión de hasta 15 cm, por lo que es ampliamente utilizado en industrias y como solución comercial. Sin embargo, el costo es una de las principales limitaciones de Ubisense. Krishnan y col. Proponer un sistema MBL basado en infrarrojos UWB para robots que también puedan ser utilizados por otras entidades. Los lectores UWB se colocan en ubicaciones conocidas y el transmisor UWB conectado al robot transmite pulsos UWB, que luego son recogidos por los lectores UWB. TDoA se utiliza para obtener una estimación de la ubicación del robot. El sistema rastrea con precisión a un usuario con un error de raíz cuadrática media (RMS) de 15 cm. Shen y col. utiliza tecnología UWB para MBL de diferentes objetos. Los receptores y el transmisor están sincronizados en el tiempo, por lo que el sistema depende de ToF en lugar de TDoA. Los autores suponen que el error de rango sigue una distribución gaussiana. Para MBL, los autores confían en un algoritmo basado en dos pasos, maximización de expectativas (TSEM) que alcanza el límite inferior Cramer-Rao para los algoritmos ToF. La eficiencia del algoritmo se verifica mediante simulaciones que muestran que la varianza del error es aproximadamente 30 dB menor que los enfoques basados en TDoA existentes. Xu y col. usan TDoA y UWB para localizar diferentes nodos ciegos o usuarios en un entorno interior. Los autores tienen en cuenta las mediciones de LoS y NLoS y utilizan un algoritmo de minimización de errores TDoA para estimar la ubicación del usuario con respecto a los RN fijos.

**3) MBL basado en acústica:** Mandal et al. Presentan Beep, que es un sistema 3D MBL basado en señal acústica. Se colocan diferentes sensores acústicos en un ambiente interior. Los sensores acústicos están conectados a un servidor central a través de la red WiFi. El dispositivo de usuario que desea obtener su posición solicita servicios de posición. Tras la solicitud, el dispositivo se sincroniza con los sensores a través de la red WiFi y transmite una señal acústica predefinida. Los sensores usan la señal acústica para calcular el ToF y luego mapear en distancia. Luego, las distancias desde todos los nodos de los sensores se informan a un servidor que aplica la latencia múltiple en 3D para obtener una estimación de la ubicación del usuario que luego se informa al usuario

que utiliza la red WiFi. El sistema propuesto alcanza una precisión de aproximadamente 0,9 m en el 95% de los experimentos. Si bien el sistema propuesto es preciso y parece escalable, es necesario evaluar su eficiencia energética y latencia.

Peng y col. proponen BeepBeep que es un sistema de rango basado en señal acústica. El sistema propuesto se puede usar para el sistema de detección de proximidad en lugar del seguimiento, ya que los autores solo lo han utilizado para el rango. La novedad de BeepBeep es que no requiere ningún hardware patentado y se basa en un software para permitir que dos dispositivos comerciales listos para estimar su proximidad. Ambos dispositivos emiten señales especiales llamadas "pitidos" mientras que simultáneamente graban sonidos a través de su micrófono. La grabación contiene la señal acústica de sí mismo y del otro dispositivo. Se cuenta el número de muestras entre las señales sonoras y se intercambia la información de duración de tiempo, que luego se utiliza para el ToF bidireccional. Esto da como resultado un ToF altamente preciso y proporciona una buena estimación de la proximidad entre los dos dispositivos. El rango de recepción de BeepBeep puede ser un problema importante en espacios grandes. Además, aún no se ha explorado para la localización.

4) MBL basado en RFID: Ni et al. Proponen LANDMARC que utiliza RFID activas para rastrear la ubicación del usuario. Se colocan diferentes etiquetas RFID en un entorno interior que sirven como RN. El objeto a rastrear, como un dispositivo de usuario, está equipado con una etiqueta de seguimiento mientras el RN mide las señales transmitidas por la etiqueta de seguimiento. Los RN también están equipados con la tarjeta IEEE 802.11b (Wi-Fi) para comunicarse con un servidor MBL. Los RN miden la intensidad de la señal del dispositivo de seguimiento para estimar la ubicación del dispositivo. Si bien LANDMARC es energéticamente eficiente y tiene un largo alcance, tiene una latencia de seguimiento más alta y una precisión media de 1 metro. LANDMARC también es computacionalmente menos eficiente y requiere una mayor densidad de implementación para lograr un mejor rendimiento de localización. Para abordar estos dos problemas, Jin et al. Proponer un mecanismo de localización interior eficiente y más preciso que explique las debilidades de LANDMARC. En lugar de depender de las mediciones entre todas las etiquetas de referencia y la etiqueta de seguimiento, los autores solo eligen un subconjunto de etiquetas de referencia en función

de cierto umbral de intensidad de señal. Esto reduce la complejidad y mejora la precisión de localización.

Wang y col. Proponen RF-Compass que utiliza RFID en un robot para rastrear la ubicación de diferentes objetos que tienen RFID unidos a ellos. RF-Compass se basa en un nuevo algoritmo de optimización de particiones espaciales para localizar el objetivo. El número de etiquetas RFID en el robot refleja el número de particiones espaciales, por lo tanto, un aumento en el número de etiquetas RFID ciertamente restringiría el objetivo a una región pequeña, mejorando así la precisión de localización. Además, el mayor número de RFID en el robot también ayuda a calcular la orientación del dispositivo. RF-Compass tiene una precisión de localización media de 2,76 cm. Wang y col. También proponen PinIt que utiliza el perfil de múltiples rutas de etiquetas RFID para ubicarlas. PinIt puede funcionar de manera eficiente incluso en ausencia de LoS y la presencia de diferentes rutas múltiples. Las etiquetas RFID de referencia sirven como RNs mientras que el perfil de múltiples rutas se construye emulando una matriz de antenas a través del movimiento de la antena. PinIt funciona como un sistema de detección de proximidad que consulta la etiqueta RFID deseada (adjunta al objeto de interés) y sus etiquetas circundantes para localizarla. Si bien se alcanza una precisión media de 11 cm, PinIt no se puede desplegar ampliamente debido a la ausencia de RFID en la mayoría de los dispositivos de usuario. Además, no se puede usar para sistemas MBL típicos.

5) MBL basado en BLE: Gonzalez et al. presentan una red de ubicación de Bluetooth (BLN) que utiliza Bluetooth RN para rastrear la ubicación de un usuario en un entorno interior. El dispositivo de usuario con Bluetooth se comunica con los RN de Bluetooth, que luego transmiten la información de ubicación del usuario a un nodo maestro. El nodo maestro está conectado a los servidores de servicio. El sistema BLN está inspirado en las redes celulares típicas y alcanza una precisión a nivel de sala, es decir, es más adecuado para servicios basados en proximidad. El sistema tiene un tiempo de respuesta de aproximadamente 11 segundos, lo que hace que no sea en tiempo real.

Bruno y col. presentan un sistema de localización basado en Bluetooth llamado Sistema de Posicionamiento Interior Bluetooth (BIPS). El sistema propuesto tiene un alcance corto (menos de 10 m) y es energéticamente eficiente. Un dispositivo de usuario

habilitado para Bluetooth se comunica con RN Bluetooth fijo que luego usan un servidor BIPS para obtener una estimación de la ubicación del usuario. Todos los RN están interconectados a través de una red para que puedan comunicarse entre sí. Las tareas principales de los RN son a) actuar como nodos maestros y detectar el esclavo (dispositivos de usuario) dentro de su vecindad b) transferir datos entre los usuarios y el RN. BIPS puede obtener la posición de los usuarios estacionarios o de movimiento lento en un entorno interior. Los autores comentan sobre la latencia y el retraso del sistema, sin embargo, los resultados no comentan sobre la precisión de la localización. En términos de latencia, el sistema BIPS no es factible para el seguimiento en tiempo real.

Díaz y col. presentan un sistema MBL para interiores basado en Bluetooth llamado Bluepass que utiliza valores RSSI de los dispositivos del usuario para calcular la distancia entre el dispositivo y los receptores Bluetooth distribuidos fijos. Bluepass consta de un servidor central, un servidor local, un dispositivo de detección Bluetooth y una aplicación de dispositivo de usuario. El usuario debe tener la aplicación instalada en el dispositivo y debe iniciar sesión para utilizar el sistema MBL. El servidor local es para un solo mapa, mientras que el servidor central tiene la intención de vincular diferentes mapas. Se obtiene un error cuadrático medio (MSE) tan bajo como 2,33 m.

Zafari y col. utilizan iBeacons para servicios de localización en interiores. Los valores RSSI se recopilan de diferentes iBeacons en un dispositivo de usuario, que reenvía los valores a un servidor que ejecuta diferentes algoritmos de localización. En el lado del servidor, el filtro de partículas (PF) y los nuevos enfoques en cascada del uso de Kalman Filter-Particle Filter (KF-PF) y Particle Filter-Extended Kalman Filter (PF-EKF) se utilizan para mejorar la precisión de localización del sistema. Los resultados experimentales muestran que, en promedio, PF, KF-PF y PF-EKF obtienen una precisión de 1.441 m, 1.03 m y 0.95 m respectivamente. Si bien el sistema es energéticamente eficiente y preciso, incurre en un retraso considerable y requiere el despliegue de iBeacons, lo que conlleva un costo adicional. Ayyalasomayajula y col. Proponen un sistema de localización basado en CSI con tecnología BLE, que según nuestro conocimiento es el primer trabajo que lo hace. Dado que la naturaleza de BLE dificulta el uso de CSI, los autores han propuesto algoritmos compatibles con BLE para abordar diferentes desafíos. Se alcanza una precisión de hasta 86 cm. Islam et al. Proponer un

nuevo algoritmo de creación de perfiles de múltiples rutas para rastrear cualquier etiqueta BLE en un entorno interior. La técnica propuesta tiene un error de alcance de aproximadamente 2,4 m.

6) Ultrasonido MBL: Ashokaraj et al. Proponen un enfoque determinista llamado análisis de intervalos para utilizar sensores ultrasónicos presentes en un robot para su localización y navegación en un entorno bidimensional (2D). El enfoque propuesto supone que el mapa ya está disponible. Si bien los métodos como los filtros Kalman (KF) o los filtros Kalman extendidos (EKF) se usan ampliamente para la localización de robots, el paso de asociación de datos de dichos métodos es muy complejo y generalmente requiere linealización. El método propuesto omite el paso de asociación de datos y no requiere ninguna linealización. Los autores proporcionan resultados basados en simulación. Además, el documento no comenta sobre la precisión de la localización, la latencia y la escalabilidad del enfoque propuesto. También vale la pena mencionar que el enfoque propuesto se basa en la predicción o estimación del movimiento y la velocidad del robot.

El sistema BAT MBL para interiores propuesto y evaluado experimentalmente utiliza señales ultrasónicas para la localización en interiores. Debido a la menor velocidad de las ondas de sonido en el aire (330 m / s), la precisión del sistema de localización mejora significativamente en comparación con otras tecnologías. En un sistema BAT, los dispositivos a rastrear se proporcionan con transmisores propietarios. Los receptores, cuyas posiciones son fijas y conocidas, reciben la señal transmitida y la usan para estimar la ubicación del usuario. BAT requiere que los transmisores y receptores estén sincronizados. BAT recibe una precisión de hasta 3 cm en un espacio 3D, sin embargo, debido al uso de ultrasonido, su precisión es muy sensible a la colocación de sensores. Además, requiere muchos nodos de anclaje dedicados que es costoso.

El sistema de localización en interiores de Cricket utiliza una combinación de señales de RF y ultrasónicas para la localización en interiores. Es complementario al sistema Bat, ya que utiliza la señal de radio solo para sincronizar los receptores. Cricket no requiere ninguna sincronización entre el receptor y el transmisor. Alcanza una precisión de 10 cm, sin embargo, requiere hardware dedicado y su alcance es limitado debido al uso de tecnología ultrasónica. Vale la pena mencionar aquí que los sistemas



MBL modernos dependen en gran medida de tecnologías ubicuas como WiFi, BLE y luz visible porque están fácilmente disponibles. Sin embargo, la mayoría de los dispositivos de los usuarios carecen de la capacidad de producir señales ultrasónicas, por lo que existen sistemas MBL basados en ultrasonidos menores.

7) MBL basado en luz visible: Di Lascio et al. Proponen *LocaLight* que utiliza luz visible para MBL. Se colocan diferentes sensores RFID en el piso que detectan la disminución de la intensidad de la luz debido a la sombra del usuario. Los sensores RFID tienen fotodiodos, por lo que el sistema no depende de ninguna batería o fuente de alimentación. Bajo configuraciones específicas, es decir, la altura de los LED, el radio de la zona de luz y la altura de las personas, el sistema alcanza una precisión de 50 cm. Sin embargo, como los sensores RFID necesitan recolectar energía, el sistema no puede funcionar en tiempo real. Del mismo modo, el sistema es más adecuado para la detección de proximidad que para la MBL real, ya que el sistema no tiene información sobre el usuario, pero detecta si algún individuo está cerca de la luz. Vale la pena mencionar aquí que los sistemas de localización basados en luz visible son atractivos. Sin embargo, es muy poco probable debido a las limitaciones de energía y hardware que el dispositivo del usuario pueda transmitir luz visible para MBL.

#### *4.5 INTELIGENCIA AMBIENTAL O VIDA ASISTIDA POR EL ENTORNO*

La localización en interiores es uno de los componentes útiles en las herramientas AAL. Los entornos AAL se generan a partir de la "inteligencia ambiental", que es una herramienta avanzada que realiza interacciones creativas entre máquinas y humanos. Por ejemplo, las herramientas AAL tienen como objetivo mejorar el estado de salud de los adultos mayores al hacer que puedan controlar sus condiciones de salud. Las personas mayores hacen uso de tales aplicaciones con el propósito de monitorear, rastrear y otras aplicaciones basadas en la ubicación. Además, nos damos cuenta de la importancia de tales aplicaciones en escenarios interiores donde las señales GPS son inútiles. Algunos de los sistemas de localización en interiores basados en aplicaciones AAL son "tecnología de piso inteligente" para notar la existencia de personas y "sensores de infrarrojos pasivos (PIR)" para notar el movimiento de las personas. Actualmente, el posicionamiento en interiores es central en el despliegue de servicios de respuesta de

emergencia sin interrupciones, como E911 en los EE. UU., Obstaculizado por la falta de puntos de referencia y plataformas comunes. Esto ha empujado recientemente a diferentes entidades de investigación en todo el mundo a proponer soluciones avanzadas y más avanzadas en este campo con aplicaciones que varían desde la vida asistida en ambientes, apoyo a personas mayores, casos de emergencia, etc. Aquí, debemos mencionar el trabajo del proyecto SALICE, que propuso una solución basada en la combinación heterogénea entre localización satelital y sistemas de comunicaciones para proporcionar servicios de emergencia. El proyecto se basa principalmente en la combinación de técnicas de diversidad de retardos y la combinación de la relación máxima entre satélites y sitios terrestres. El despliegue de rellenos de huecos (utilizados como relés) en el borde del área de emergencia es otra propuesta del proyecto para aumentar la diversidad de señal alternando entre condiciones LOS y NLOS.

Paralelamente, los organismos de normalización también reconocieron el papel fundamental de la información de ubicación, y están trabajando activamente en estándares relacionados con la recuperación de información de ubicación, el Grupo de Trabajo de Ubicación dentro de Open Mobile Alliance y la especificación técnica TS23.271 del 3GPP. siendo ejemplos notables, así como la próxima norma 18305 de la Organización Internacional de Normalización y la Comisión Electrotécnica Internacional, cuyo subcomité conjunto JTC1 / SC31 incluye un grupo de trabajo sobre posicionamiento. Por último, pero no menos importante, las compañías de hardware también están buscando el diseño de sistemas y chips para un posicionamiento preciso en interiores, por ejemplo, basados en IEEE 802.11ac o IEEE 802.15.4. Las investigaciones en escenarios interiores en UWB para la localización del cuerpo humano se realizan a través de métodos numéricos y analíticos colocando sensores compactos portátiles en la parte superior del cuerpo. Este trabajo logró realizar la localización en 3D utilizando tales sensores. Además, la tecnología UWB es apropiada para redes de sensores inalámbricos portátiles, y se logra una precisión de localización 3D de 2 cm a 3 cm; por lo tanto, un sistema con esta precisión puede ser aplicable para monitorear pacientes, rastrear y aplicaciones para capturar movimiento.

Otras aplicaciones también se basan en la tecnología UWB donde se implementa la cirugía ortopédica asistida por computadora, así como su integración con herramientas

quirúrgicas inteligentes, como la sonda inalámbrica para la exploración de huesos en tiempo real. El sistema de posicionamiento UWB está probado para lograr una precisión dinámica 3D en tiempo real de 5,24 mm a 6,37 mm. Por lo tanto, esta precisión dinámica implica el potencial de precisión milimétrica. Esta precisión satisface el requisito de precisión 3D de 1 mm a 2 mm para los sistemas de navegación quirúrgica ortopédica.

## 4.6 REDES 5G

La información de ubicación se puede utilizar para abordar muchos desafíos en las redes 5G. Se mejoró la precisión de la estimación de ubicación de cientos a decenas de metros utilizando la localización de ID de celda en 2G, la localización basada en el tiempo a través de señales de sincronización en 3G y señales de referencia dedicadas para localización en 4G. Además, las tecnologías de localización pueden ser utilizadas por numerosos dispositivos en 5G para lograr una precisión de estimación de ubicación en el rango de centímetro. Básicamente, en las redes 5G, se espera que use una estimación de ubicación precisa a través de todas las capas de la pila de protocolos de comunicación. Este hecho se debe a varios aspectos. Uno de estos aspectos es la proporcionalidad inversa entre SNR (Signal-to-Noise Ratio) y la distancia debido a la pérdida de ruta; por lo tanto, la distancia se convierte en un indicador del nivel de interferencia y la potencia recibida. Por lo tanto, la mejor ruta de múltiples saltos entre el origen y el destino en una red densa se convierte en la ruta más corta en términos de distancia al descuidar el factor de sombreado. A continuación, se reconocen diferencias notables en el poder localizado debido al efecto de sombreado. Además, se pueden usar terminales cercanas para proporcionar información de los canales locales debido al hecho de que el sombreado a menudo revela distancias de correlación más grandes que la incertidumbre de localización. Por lo tanto, el uso de información precisa de ubicación por las redes 5G en todas las capas de la pila de protocolos de comunicación se debe a la predicción de la mayoría de los terminales de usuario 5G en sus patrones de movilidad sabiendo que estos terminales estarán asociados con unidades o personas fijas o controlables. Por último, pero no menos importante, la localización no solo es necesaria para los servicios basados en la ubicación, sino también para varios trabajos en sistemas ciber físicos, como sistemas inteligentes de transporte y robótica en redes

5G. Además, los métodos para la asignación de recursos basados en el conocimiento de la ubicación pueden disminuir los retrasos y los gastos generales, ya que pueden predecir la calidad del canal más allá de las escalas de tiempo habituales. Este es de hecho uno de los objetivos técnicos de las tecnologías 5G.

## 5 EVOLUCIÓN Y TENDENCIAS TECNOLÓGICAS DE LOS IPS

### 5.1 EVOLUCIÓN DE LOS IPS

En la práctica, la evolución de las tecnologías subyacentes ha tenido un impacto muy positivo en la evolución de los sistemas de posicionamiento en interiores. Nos dimos cuenta de que los cambios en las versiones posteriores de los estándares en una tecnología dada pueden reducir algunas tareas en el sistema de posicionamiento o incluso resolver algunas limitaciones. Por ejemplo, los sistemas de posicionamiento que usan Bluetooth versión 1.0 deben establecer primero la comunicación entre dispositivos para medir la intensidad de la señal recibida, pero en versiones posteriores del estándar (versión 1.2) este proceso ya no es necesario porque el protocolo tiene un mecanismo de descubrimiento de dispositivos. Esto evita al usuario intervención para establecer conexión y reduce el tiempo de respuesta del sistema (latencia). Más adelante, la versión 4 de Bluetooth redujo drásticamente el consumo de energía, haciendo que los dispositivos portátiles con Bluetooth sean mucho más prácticos. Además, la aparición de nuevas tecnologías brinda la oportunidad de desarrollar sistemas de posicionamiento en interiores basados en estas tecnologías. El método, la tecnología y también los detalles de implementación afectan la precisión del sistema. El método comúnmente utilizado es la triangulación; dos sistemas diferentes presentados usan este método, pero con diferentes tecnologías. Por ejemplo, usan Bluetooth y afirman una precisión de 2.08 metros, mientras que usan VLC y afirman una precisión muy superior de 10 centímetros. Esto también se puede apreciar utilizando la misma tecnología con diferentes métodos. Por ejemplo, el sistema BluePos usa Bluetooth y el método de huella digital; El sistema afirma una precisión de 2.5 metros. El sistema presentado por Feldmann usa Bluetooth con triangulación, y el sistema afirma una mejor precisión, 2.08 metros. Además, el impacto de los detalles de implementación podría apreciarse al examinar los resultados

de la competencia antes mencionada, ya que tecnologías y técnicas son muy similares, como dos equipos que usan Wi-Fi y huellas digitales, obtienen errores de ubicación tan diferentes como 1.56m y 5.23 m. Todavía no existe una solución satisfactoria general para el problema de IPS. O las soluciones muy precisas son muy caras, o no en tiempo real, o las propuestas baratas son demasiado inexactas. Si tomamos un problema estándar para IPS como ubicar mercancías en estanterías mientras camina, no sola una tecnología única o la combinación de tecnologías es factible y satisfactoria.

## 5.2 DESAFIOS Y PROBLEMAS ABIERTOS

Las futuras direcciones de investigación que se centran en los parámetros de rendimiento, lo cual es necesario para que las técnicas de posicionamiento en interiores estén disponibles comercialmente.

La medida de rendimiento principal de las técnicas de posicionamiento en interiores es la precisión. Hasta ahora, los investigadores han mejorado la precisión del posicionamiento en interiores al complementar los problemas de un área de la técnica o al aplicar otras áreas de la tecnología. Las técnicas recientes mejoran la precisión del posicionamiento en interiores al combinar dos técnicas diferentes. DeepFi es la técnica de posicionamiento en interiores basada en huellas dactilares de aprendizaje profundo con información de estado del canal (CSI). DeepFi compone en dos fases lo mismo que la técnica de huella digital original, la fase de entrenamiento fuera de línea y la fase de estimación de ubicación en línea. DeepFi se basa en las tres hipótesis sobre CSI, diferentes con las fases originales. En la fase de capacitación fuera de línea, el aprendizaje profundo se utiliza para aprender todos aspectos de la red profunda como por ejemplo huellas digitales. Además, el algoritmo de entrenamiento codicioso se usa para entrenar los pesos capa por capa para reducir la complejidad. En la fase de estimación de ubicación en línea, el método probabilístico basado en la función de base radial se utiliza para obtener la ubicación estimada. Al igual que DeepFi, es posible mejorar la precisión al combinar diferentes técnicas. Mejora la precisión del posicionamiento en interiores explotando WiGig. WiGig es una tecnología que admite transmisiones inalámbricas de varios gigabits utilizando una banda sin licencia de 60 GHz. El pulso de 60 GHz tiene un período muy corto, que está libre de retraso causado

por la propagación por trayectos múltiples. Por lo tanto, es posible un posicionamiento interior preciso basado en esto. Se han diseñado varios estudios de posicionamiento en interiores basados en WiGig.

El tiempo de cálculo también es un parámetro importante del posicionamiento en interiores. Al usar otras técnicas o dispositivos juntos para mejorar la precisión, pueden seguir diferentes estándares. A menudo causa el aumento del tiempo de cálculo, lo que conduce a una degradación de la técnica general. La comunicación técnica cruzada (CTC) es una técnica importante para el intercambio directo de información entre estándares heterogéneos. Los trabajos existentes permiten CTC explotando un canal lateral como frecuencia, amplitud o modulación temporal. Sin embargo, tienen un rendimiento limitado bajo el ruido del canal. WiZig es la técnica CTC que utiliza técnicas de modulación en dimensiones de amplitud y tiempo para optimizar el rendimiento de los canales de ruido. Primero, se establece el modelo teórico del canal de comunicación de energía para comprender la capacidad del canal. Se diseña un algoritmo de adaptación de velocidad en línea para ajustar la estrategia de modulación de acuerdo con la condición del canal. Posteriormente, para optimizar el rendimiento de CTC, WiZig controla con precisión el número de amplitudes de energía codificadas y la longitud de una ventana de recepción según el modelo teórico. WiZig muestra menos del 1% de tasa de error de interpretación en el entorno real.

La mayoría de las técnicas muestran una baja tasa de error en el paso de evaluación. Sin embargo, algunos resultados limitan de antemano la forma o el tipo de entorno de medición. Estas restricciones evitan que las técnicas se usen universalmente, lo que significa que no tiene versatilidad y robustez. Por lo tanto, los investigadores estudian técnicas de propósito general que pueden rastrearse sin la limitación de la ubicación. La evaluación no se fija en un solo lugar, pero se usa un lugar con diferente tamaño y estructura por este motivo. SemanticSLAM es un buen ejemplo de tales técnicas. SemanticSLAM es una técnica de posicionamiento en interiores que realiza el posicionamiento con el algoritmo SLAM a través de dos tipos de puntos de referencia. SemanticSLAM selecciona los puntos de referencia en un entorno interior con los datos transmitidos, que el dispositivo del usuario mide con sensores internos, como giroscopios y acelerómetros. Los puntos de referencia se clasifican en dos tipos. Un tipo es el punto

de referencia fijo, que está determinado por la estructura del edificio medida desde el sensor interno del dispositivo del usuario. Los puntos de referencia fijos no varían según el usuario. El otro es un hito fluctuante, que se determina de acuerdo con la señal inalámbrica interior medida desde el dispositivo del usuario. Los puntos de referencia fluctuantes pueden variar de un usuario a otro, ya que las medidas varían de un dispositivo móvil a otro. Después de definir los puntos de referencia, SemanticSLAM calcula el algoritmo SLAM con puntos de referencia. SemanticSLAM realiza el posicionamiento en interiores con puntos de referencia basados en el dispositivo del usuario, no se ve afectado por la estructura o el tipo del edificio.

Las técnicas de posicionamiento en interiores deben utilizar la información de ubicación de los usuarios, que es una privacidad importante. Por lo tanto, la seguridad es uno de los requisitos importantes de las técnicas de rastreo de ubicación en interiores. Existen muchos modelos de privacidad para proteger la información de ubicación del usuario de los ataques externos como k-anonymity, t-closeness y l-diversity. Recientemente, una técnica llamada respuesta ordinal agregada aleatoria para preservar la privacidad (RAPPOR) ha llamado la atención. RAPPOR es el modelo de privacidad que hace que la información del usuario sea confidencial y hace que estén disponibles. El algoritmo RAPPOR consta de cuatro pasos con los valores y parámetros de ubicación reales del usuario. Se realizan en local y los datos generados se envían al servidor. Primero, los datos de posición se resumen en el filtro B de Bloom. Además, pasamos el  $i^{\text{th}}$  bit de B en la ecuación especial como una respuesta aleatoria con el parámetro  $f$ , que es un parámetro de designación que controla el nivel de privacidad. Después de la ecuación, los datos de posición en el bit  $i^{\text{th}}$  de B se convierten en un nuevo valor que se identifica como  $B'$ . Con los datos  $i^{\text{th}}$  de S, que es un conjunto de  $B'$ , se establece como 1 o 0 según la probabilidad. La P resultante, el conjunto de resultados 1 y 0, se envía al servidor. Otras técnicas, como el anonimato K, pueden generar datos utilizando los datos originales para identificar los datos, pero en el caso de RAPPOR, es imposible identificar los datos porque se generan a través de dos hashes. Incluso si alguna técnica de localización es precisa y computacionalmente rápida, si causa el alto consumo de energía del dispositivo móvil, no puede usarse durante mucho tiempo. Un ejemplo representativo es el GPS. El GPS tiene la mayor precisión y

confiabilidad de los sistemas de rastreo al aire libre. Sin embargo, en proporción a esto, el consumo de energía del GPS es muy alto. El sistema de posicionamiento adaptativo de velocidad (RAPS) se ha estudiado para utilizar eficazmente el GPS con un consumo eficiente de energía. RAPS determina inteligentemente cuándo activar el GPS utilizando una colección de técnicas. En detalle, RAPS utiliza el historial de ubicación-hora del usuario para estimar la velocidad del usuario y solo activa el GPS de manera apropiada si la incertidumbre de la ubicación estimada excede el umbral de precisión. Además, RAPS estima el movimiento del usuario con un acelerómetro de ciclo de trabajo y usa la comunicación Bluetooth para reducir la incertidumbre de posición entre los dispositivos vecinos. Finalmente, RAPS detecta el GPS donde no podemos usar el GPS con la lista negra de RSS de la torre celular y no activa el GPS en estos casos. Cuando se usa RAPS, la vida útil del área de dispositivos móviles aumentó 3.8 veces en comparación con cuando el GPS se encendió continuamente. Es necesario considerar cómo gestionar el consumo de energía de manera eficiente cuando las técnicas de posicionamiento en interiores se utilizan prácticamente. Los datos obtenidos del sistema de posicionamiento en interiores que satisface las propiedades anteriores se pueden aplicar en varios lugares. Por ejemplo, los datos de localización en interiores se pueden utilizar para el transporte de energía de radiofrecuencia inalámbrica (RF) con 60 GHz para redes inalámbricas de sensores industriales. El transporte inalámbrico de energía de RF es la forma efectiva de alimentar pequeños sensores inalámbricos en redes inalámbricas de sensores industriales (WISN). Los sensores reciben energía del dispositivo llamado al nodo de sumidero, que está equipado con una antena de bocina. Sin embargo, cuando el sensor se encuentra detrás del obstáculo, la transferencia de energía se vuelve difícil. La solución a este problema es utilizar la formación de haz reflectante. Un nodo de sumidero refleja la señal a un elemento como un techo y lo envía a los sensores. Esto crea una línea de visión entre el nodo de sumidero y el sensor, al pasar obstáculos. Aquí, el uso de datos de localización para la formación de haces de radio. Utilizamos el sistema de posicionamiento para localizar el sensor en detalle e instalar una antena reflectora adecuada. Esto permite una transferencia de energía más eficiente. Un ejemplo más es que podemos usar datos de localización en interiores para rescate o evacuación en caso de emergencia. El posicionamiento en interiores desempeña un papel importante en el



Sistema de Apoyo a la Evacuación de Rescate de Emergencia (ERESS) al ubicar a las personas dentro del edificio y guiar a las personas a un lugar más seguro. Además, cuando ERESS se utiliza para evacuar, la infraestructura interior puede romperse debido a un desastre. Por esta razón, no se espera que la técnica de huellas digitales logre la precisión en situaciones de emergencia. Al diseñar el sistema de posicionamiento en interiores, debemos considerar reducir la dependencia excesiva de la infraestructura en interiores.

#### A. Efectos multirruta y ruido

Un desafío fundamental de la localización en interiores es la presencia de efectos multitrectoria. Debido a la naturaleza inherente de las señales, pueden reflejarse, refractarse y difractarse de las paredes, metales y, en algunos casos, incluso seres humanos. Esto afecta drásticamente el comportamiento de las señales. Los enfoques como RSSI, ToF, TDoA, AoA se basan en estas señales del RN o del dispositivo del usuario para estimar la ubicación del usuario. Sin embargo, en presencia de efectos multitrectoria, es muy poco probable que obtenga una sola señal. El receptor generalmente recibe una cantidad de diferentes versiones de fase retardada y atenuada de potencia de la misma señal, lo que hace difícil obtener la señal LoS directa y estimar la distancia real entre el transmisor y el receptor. Esto tiene una consecuencia significativa en la localización en interiores, especialmente la precisión. Para obtener una estimación precisa de la ubicación, existe la necesidad de técnicas complejas de procesamiento de señales que puedan identificar la señal LoS (si la hay) y minimizar / eliminar los efectos de la trayectoria múltiple señales Aunque recientemente la literatura ha propuesto algunos algoritmos novedosos y efectivos de supresión de ruido y multitrectoria, su adopción y utilización a gran escala parece altamente improbable ya que dichos algoritmos son complejos y principalmente factibles para MBL (ya que MBL está en RN, que generalmente tiene una mayor capacidad de procesamiento y no es limitado en términos de poder). Sin embargo, para DBL, estos algoritmos complejos podrían no ser útiles ya que la mayoría de los dispositivos de usuario carecen de la energía y la potencia de procesamiento para ejecutar dichos algoritmos. Por lo tanto, existe la necesidad de algoritmos de supresión de ruido y multitryectos optimizados,

energéticamente eficientes y efectivos que puedan ayudar a emplear las señales para una localización precisa

#### B. Ambiente de radio

La localización en interiores depende en gran medida de las características del entorno interior. El rendimiento del sistema varía mucho con la variación en la dinámica del entorno, como de qué están compuestos los muros y techos, cómo

Son diferentes entidades que actúan como obstáculos colocados y cuántas personas hay en el espacio interior. Todos estos factores deben tenerse en cuenta al diseñar cualquier sistema de localización preciso. La mayoría de los sistemas existentes se prueban en un entorno controlado y no necesariamente replican las características de un entorno interior del mundo real. En la mayoría de los sistemas propuestos se supone que debe haber al menos una ruta LOS entre el usuario y los RN. Sin embargo, en grandes centros comerciales u oficinas pequeñas, es muy probable que no haya una ruta LOS entre el dispositivo del usuario y los RN. Por lo tanto, es necesario modelar con precisión las características del ambiente interior. El modelo debe tener en cuenta todas las variaciones en el medio ambiente, particularmente el impacto de los seres humanos durante las horas pico y fuera de horas pico de operación.

#### Eficiencia energética

La eficiencia energética de los sistemas de localización es muy importante para su adopción ubicua. A partir de ahora, la mayoría de los sistemas de localización existentes utilizan relativamente más energía para proporcionar una mayor precisión y un mejor rango. Particularmente para los sistemas de localización, es extremadamente difícil obtener una alta precisión sin agotar la batería del dispositivo. Esto se debe a que para mejorar el rendimiento de localización, el dispositivo del usuario tiene que escuchar periódicamente señales o mensajes de baliza específicos. Esto requiere que el dispositivo monitoree activamente el canal inalámbrico y capte diferentes señales. Si bien esto es factible en términos de rendimiento, no es ideal en términos de eficiencia energética. Como la localización es la tarea secundaria de la mayoría de los dispositivos del usuario, el drenaje de la batería del dispositivo puede provocar la insatisfacción del usuario. Por lo tanto, existe la necesidad de optimizar el consumo de energía del sistema de localización. Si bien la investigación actual se centra en mejorar el rendimiento de

localización en términos de precisión, en el futuro también es necesario optimizar el consumo de energía de los sistemas. El uso de supresión de ruido altamente efectiva pero algoritmos de localización menos complejos ayudaría a mantener bajo el costo de consumo de energía. En el caso de DBL, el dispositivo del usuario puede descargar el aspecto computacional de la localización a algún servidor local o basado en la nube que generalmente tiene un alto poder de procesamiento y un suministro continuo de energía. En tales casos, la latencia o el tiempo de respuesta también deben optimizarse, ya que el objetivo es proporcionar actualizaciones de ubicación en tiempo real al usuario.

#### D. Privacidad y seguridad

El desafío fundamental para la adopción de servicios de localización a gran escala es la privacidad. La mayoría de los suscriptores o usuarios no están dispuestos a compartir datos relacionados con su ubicación. Esto se debe a que la ubicación del usuario es información muy confidencial que puede poner en peligro la privacidad y seguridad del usuario. Actualmente, los sistemas de localización existentes no tienen en cuenta las preocupaciones de privacidad y se refieren principalmente a la localización interior precisa y efectiva. Sin embargo, con los desafíos cada vez mayores de seguridad cibernética y la falta de un mecanismo de privacidad subyacente para la localización en interiores, la privacidad es un desafío importante que los investigadores deben abordar. ¿Cómo garantizamos que un usuario que utiliza servicios de localización no tendrá problemas de privacidad y los datos del usuario se mantendrán seguros, confidenciales y solo se utilizarán para fines específicos, como marketing dirigido, etc.? Además, ¿cómo puede el usuario confiar en el sistema y el proveedor del servicio de localización? Estas son preguntas fundamentales que deben abordarse para abordar los problemas de privacidad de la localización. El déficit de confianza entre los usuarios y los proveedores de servicios y los desafíos de seguridad que pueden surgir como resultado de la violación de la privacidad debe abordarse a fondo para permitir que los servicios de localización prosperen. Además, el sistema necesita autenticar que el nuevo usuario que desea utilizar los servicios de localización no es un nodo malicioso, sino un cliente que pretende beneficiarse de los servicios prestados. Si el mecanismo de autenticación es débil, un nodo malicioso puede infiltrarse en el sistema y llevar a cabo un ataque sistemático contra el sistema de localización que ciertamente afectará el rendimiento general del

sistema. Deben establecerse nuevos mecanismos optimizados de seguridad y protección de la privacidad para garantizar la seguridad del usuario y la mejora de los servicios. El uso del complejo tradicional y el procesamiento de sistemas extensivos basados en claves centralizadas o distribuidas no funcionarán con los dispositivos con restricción de energía. Existe la necesidad de un mecanismo de privacidad y seguridad, que sea seguro, eficiente desde el punto de vista energético y que no requiera una gran potencia informática. Si bien estas restricciones son ortogonales entre sí y requieren un equilibrio entre la complejidad del procesamiento y la privacidad y seguridad, es probable que se pueda alcanzar un punto óptimo de compensación. Otra posible solución es diseñar el sistema como un sistema de soporte de ubicación en lugar de un sistema de seguimiento de ubicación. Un sistema de soporte de ubicación permite al usuario obtener su ubicación con respecto a los puntos de anclaje, pero le brinda la libertad de descubrir servicios basados en su ubicación en lugar de anunciar su posición al sistema y dejar que el sistema brinde los servicios. Por lo tanto, es importante investigar más a fondo los problemas de privacidad y seguridad de la localización.

#### E. costo

El costo es otro desafío importante para la adopción de la localización en interiores. Los sistemas de localización pueden requerir infraestructura adicional y nodos de anclaje que requieren una inversión adicional. Además, la localización a gran escala es un desafío y puede requerir servidores dedicados, bases de datos y algún software propietario. Este es un costo adicional y ciertamente causaría que la mayoría de los clientes / proveedores de servicios eviten el uso de servicios de localización. Si bien el costo es un desafío importante ahora, se puede superar mediante el uso de la infraestructura existente, como WiFi, redes celulares o una combinación de ambos.

#### F. Falta de estandarización

Actualmente, no existe un conjunto de especificaciones / reglas estándar o gobernante que pueda servir como guía para diseñar técnicas de localización y proximidad. No existe una tecnología inalámbrica única que sea ampliamente aceptada como la tecnología principal para futuros sistemas de localización. Como se desprende

de nuestra discusión sobre los sistemas propuestos en las secciones anteriores, se han utilizado varias tecnologías y técnicas diferentes para este propósito. Sin embargo, la mayoría de los sistemas son disjuntos y no existe un sistema ubicuo que exista actualmente. Esto plantea desafíos importantes. Por lo tanto, creemos que existe la necesidad de una estandarización adecuada de la localización. A través de la estandarización, podemos establecer las especificaciones y también reducir las tecnologías y técnicas que pueden satisfacer las métricas de evaluación antes mencionadas. También creemos que las tecnologías de comunicación futuras como 5G también deberían considerar la importancia de la localización. Además, existe la necesidad de crear un mecanismo de evaluación comparativa universal para evaluar un sistema de localización en interiores.

#### G. Impacto negativo en la tecnología utilizada

Dado que el objetivo es obtener un sistema de localización que se base en la infraestructura existente, como los puntos de acceso WiFi para proporcionar sus servicios, es importante limitar su impacto negativo en el propósito básico de la tecnología utilizada, es decir, proporcionar conectividad a los usuarios. WiFi y otras tecnologías en su diseño, a partir de ahora, no consideran la localización. Esto significa que el uso de tales tecnologías para la localización afectará otros aspectos de estas tecnologías. Por lo tanto, creemos que los sistemas de localización deben diseñarse de manera óptima para que la funcionalidad principal de las tecnologías no se vea afectada. Esto podría requerir la modificación de los estándares existentes para considerar la localización para que puedan proporcionar la localización como servicio en interiores (ILPaaS).

#### Entregas

Debido al uso a gran escala de diferentes tecnologías como WiFi, celular, Bluetooth, UWB, RFID, etc., creemos que las redes futuras serán altamente heterogéneas. Por lo tanto, es muy probable que el sistema de localización sea un sistema híbrido que pueda depender de una serie de tecnologías. Para obtener un rendimiento mejorado, puede ser necesario el traspaso vertical entre los RN que utilizan diferentes tecnologías. Esto puede deberse a que puede resultar un cierto RN en el LOS que mejora la precisión. Incluso si el sistema se basa en una sola tecnología, el rango

limitado de la tecnología podría requerir el traspaso horizontal entre diferentes RN ya que, en ausencia de traspasos, el sistema no funcionará si los RN y el dispositivo del usuario están fuera del rango de los demás. Si bien los traspasos se han estudiado ampliamente, la latencia estricta y los recursos limitados de localización plantean desafíos adicionales. El traspaso debe realizarse rápidamente para permitir que el sistema funcione de manera eficiente sin que el usuario se enfrente a ningún problema. Se requieren nuevos algoritmos y procedimientos de transferencia que sean menos complejos (para reducir el consumo de energía) y que puedan satisfacer las demandas del sistema. La Tabla VI resume los desafíos antes mencionados para la localización junto con las soluciones propuestas.

Como se desprende de la discusión anterior, la localización tendrá un papel importante en el futuro, particularmente después del advenimiento de IoT y el uso a gran escala de dispositivos de comunicación. Sin embargo, para que eso suceda, es necesario optimizar las redes existentes desde la perspectiva de la localización. Las diferentes tecnologías deben tener en cuenta la localización como un servicio importante. Por ejemplo, al darse cuenta de la importancia de la comunicación de tipo de máquina e IoT, la estandarización 3GPP ahora tiene portadores dedicados para dicha comunicación. Creemos que la localización también debe tenerse en cuenta de esa manera. Como ejemplo, si se va a usar WiFi para la localización, se necesitan mecanismos específicos para que los AP WiFi se puedan usar para la localización sin poner en peligro su propósito principal de conectar diferentes entidades.

## *5.3 TENDENCIAS TECNOLÓGICAS E INVESTIGACIONES FUTURAS*

### **6.3.1 CONSTRUIR UN MAPA DE HUELLAS DIGITALES POR RADIO CON MENOS PARTICIPACIÓN HUMANA**

Aunque el enfoque basado en las huellas digitales proporciona una precisión satisfactoria, a menudo hay que reconstruir o actualizar el mapa de huellas digitales para capturar las características de un nuevo entorno (por ejemplo, cuando se instalan nuevos sensores), lo que consume mucho tiempo. Además, la complejidad de los enfoques

basados en la toma de huellas digitales es proporcional al número de derechos que uno quiere localizar. Por ejemplo, para ubicar una computadora portátil y un teléfono inteligente, necesitamos construir un mapa de huellas digitales para cada uno de ellos debido a la heterogeneidad de estos dispositivos. Entonces, el principal desafío para abordar aquí es tener un marco unificado para mapas de huellas digitales de radio independientemente de los derechos.

### 6.3.2 COMBINANDO VARIAS TÉCNICAS NO RADIALES

El uso de tecnologías que no son de radio (IMU, sensores visuales) puede compensar los errores de la tecnología de posicionamiento inalámbrico existente. La precisión mejorada se logra mediante la instalación de sensores e infraestructura a veces costosa; por lo tanto, investigar un sistema de posicionamiento inalámbrico rentable sigue siendo una dirección prometedora.

### 6.3.3 INTEGRACIÓN DE VARIAS SOLUCIONES DE POSICIONAMIENTO INALÁMBRICO

Se puede utilizar una variedad de sensores inalámbricos para servicios de posicionamiento. Diferentes sensores están trabajando con diferentes principios físicos. La combinación de las mediciones de diferentes sistemas de posicionamiento puede mejorar el rendimiento de la solución general.

### 6.3.4 SEGURIDAD Y PRIVACIDAD

Los factores de seguridad y privacidad se consideran importantes materias a tomarse en cuenta cuando de sistemas de posicionamiento en interiores (IPS) dentro de la red personal se trata, donde los usuarios colocan personas y objetos en su hogar. Al usuario le importa si está siendo rastreado y alguien conoce sus actividades. Los IPS típicos tienen amenazas en el entorno WLAN-IPS. Por ejemplo, el sistema de posicionamiento basado en mediciones RSS amenaza la seguridad ya que el dispositivo

móvil recopila las mediciones de todos los dispositivos AP y los datos personales, como la ID AP, se envían al servidor IPS. La privacidad en los IPS se puede mejorar a través de un acceso controlado a la distribución de información y la información de ubicación. Además, la seguridad y la privacidad se pueden mejorar en los IPS desde las perspectivas de la arquitectura del sistema y el software. Por ejemplo, la arquitectura del sistema de posición que se ocupa de la auto-localización puede garantizar un alto grado de privacidad y seguridad para los usuarios cuando la estimación de la posición se realiza en el dispositivo objetivo. Por lo tanto, nadie puede acceder a la información de ubicación en Redes personales (PN) si el dispositivo de destino no se la proporciona a una entidad.

### 6.3.5 ESCALABILIDAD

Un sistema de posicionamiento escalable significa que funciona correctamente cuando su alcance se incrementa. Por lo general, el rendimiento de la localización se reduce con el aumento de la distancia entre el transmisor y el receptor. Un sistema de posicionamiento puede requerir escala en 2 ejes, densidad y geografía. La escala geográfica representa la cobertura de un área o volumen, mientras que la escala de densidad representa el número de unidades posicionadas por unidad de espacio geográfico o área por período de tiempo. Los canales de señal inalámbrica pueden estar congestionados a medida que se cubre más área o las unidades en dicha área están abarrotadas; por lo tanto, se puede requerir una mayor infraestructura de computación o comunicación para realizar la localización. Además, la dimensión de un sistema es otra métrica para la escalabilidad. Un sistema de posicionamiento puede ubicar objetos en el espacio 2D, el espacio 3D o en ambos. Hasta ahora, la mayoría de las técnicas propuestas están relacionadas con 2D, mientras que las recomendaciones recientes de diferentes comités de estandarización requieren información 3D con alta precisión (recomendación de la FCC, por ejemplo). Este es entonces otro aspecto importante que debe abordarse en el futuro.

### 6.3.6 COMPLEJIDAD

Los sistemas de posicionamiento tienen complejidad en términos de software, hardware y factores de operación. Específicamente, la complejidad del software



representa la complejidad de los cálculos en un algoritmo de posicionamiento. Si un servidor centralizado maneja los cálculos, la estimación de ubicación se realiza rápidamente debido a la existencia de una fuente de alimentación adecuada y una gran capacidad de procesamiento. Sin embargo, si los cálculos se realizan en el usuario móvil, la complejidad se hace evidente ya que los usuarios móviles tienen una potencia de procesamiento débil y una batería de corta duración; así, se prefieren las técnicas de posicionamiento con baja complejidad en este caso. Además, representar la complejidad de varias técnicas de posicionamiento a través de una fórmula analíticamente es realmente una tarea difícil; por lo tanto, se debe considerar el tiempo dedicado a los cálculos. Además, la tasa de ubicación se utiliza como un indicador de complejidad. Por el contrario, tenemos un retraso de ubicación que representa el retraso entre el movimiento de un usuario móvil a una nueva posición y el informe de esta nueva posición por parte del sistema.

### 6.3.7 PRECISIÓN VS COSTO EFECTIVO

Se logran diferentes niveles de precisión con diferentes sistemas de posicionamiento. Por ejemplo, con RADAR se logra una precisión de 2m a 3m. Por otro lado, la precisión de 2 cm se logra con un sistema de cricket basado en señales ultrasónicas y por otra parte también el sistema de posicionamiento basado en WLAN utiliza las infraestructuras WLAN existentes para la localización; por lo tanto, la precisión de posicionamiento depende en gran medida de los entornos y ubicaciones de los nodos y sensores inalámbricos.

Otros sistemas de posicionamiento generalmente requieren la instalación previa de balizas en el entorno. Por lo tanto, en la práctica, es muy difícil cumplir con el requisito de precisión y, al mismo tiempo, mantenerse dentro del número mínimo de balizas y costos de dispositivos móviles. La compensación entre precisión y costo consiste en un desafío de capital en un escenario interior ya que desde un lado; la precisión adolece de la existencia de obstáculos y transmisión de múltiples rutas, mientras que el costo es bastante asequible debido a la disponibilidad de señales (como WLAN) a un costo reducido.

### 6.3.8 APLICACIONES Y PRECISIÓN

La precisión de las técnicas de localización depende en gran medida de las aplicaciones. Si bien algunas técnicas funcionan perfectamente en escenarios interiores, por ejemplo, podrían usarse en aplicaciones médicas como las redes inalámbricas de área corporal debido al requisito de precisión (en mm). Este es un desafío general que debe abordarse en cualquier aplicación y entorno. Particularmente, en mmWave, un candidato prometedor para redes 5G, la precisión y los medios de localización siguen siendo cuestiones de investigación abiertas que deben resolverse. Sin embargo, la importancia de la alta precisión es primordial en este entorno.

## 6 CONCLUSIONES

Cuando el problema del posicionamiento global surgió, los grandes científicos y matemáticos dieron diferentes soluciones que solo a través de los años, de pruebas y errores y tras la evolución de diferentes tecnologías se pudo alcanzar, y finalmente llegó a un consenso que incluso aún se sigue desarrollando aún más, para el caso del Posicionamiento en Interiores como vertiente de ese largo camino evolutivo aún falta posiblemente un descubrimiento mayor que haga plausible la unificación o estandarización de los sistemas, o a una interpretación en entendimiento general que no dependa de la subjetividad y sometida a un ambiente en particular en el que se implementa la infraestructura. En este documento se abordaron los temas claves más importantes, y como prueba lo más sobresaliente fue la subjetividad a la que termina sometido cada caso, dependiendo en muchos casos del servicio en particular. En ocasiones la limitante termina siendo los costos exorbitantes que demandarían una precisión proporcional al GPS pero aplicado a los IPS y en otros casos la tecnología aún no ha evolucionado lo suficiente para soportar las opciones necesarias para hacer la diferencia. Parcialmente o temporalmente se ha optado por usar técnicas que aprovechen más las ventajas de los medios y dispositivos aunque no se hayan pensado para ello, y ha dado resultados muy buenos, pero al existir tantas formas de usar una misma herramienta, la necesidad de una comprensión del problema desde diferentes ángulos es muy necesaria si se desea optimizar los resultados.

El revuelo causado por los dispositivos inalámbricos abrió el camino a un apresurado avance que ha visto muchos cambios en cuestión de décadas, no estamos tan distanciados de aquel desarrollo soñado compatible adaptativo que tanto se desea en el posicionamiento en interiores y de costo aceptable o equivalente a lo que se necesita.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Samama, *Indoor Positioning Technologies and performance*, New Jersey, New Jersey: IEEE PRESS, 2019.
- [2] A. Kushki, *WLAN Positioning Systems: Principles and Applications in Location-Based Services*, New York: Cambridge University Press, 2012, p. 160.
- [3] J. M. BEUKERS, «Windfinding Using the Loran-C and Omega,» *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE ELECTRONICS*, Vols. %1 de %2GE-6, nº 3, pp. 143-151, 1968.
- [4] U.S. Coast Guard Navigation Center, «<https://www.navcen.uscg.gov/>,» 8 Junio 2012. [En línea]. Available: <https://www.navcen.uscg.gov/?pageName=loranMain>. [Último acceso: 3 Noviembre 2019].
- [5] U.S. Coast Guard Navigation Center, «<https://www.navcen.uscg.gov/>,» 17 Marzo 2011. [En línea]. Available: <https://www.navcen.uscg.gov/?pageName=loranSignalSpec>. [Último acceso: 3 Noviembre 2019].
- [6] J. F. D. a. A. R. TUPPEN, «Low Cost Navigation Processing for LORAN-C and OMEGA,» de *Navigation: Journal of The Institute of Navigation*, Washington, D.C.: Journal of The Institute of Navigation, 1975, pp. 112-127.
- [7] F. Register, «igned Federal Register Notice (1-4-2010), Docket No. USCG-2009-0299,» 998 Federal Register, Washington, 2010.
- [8] «Terminations, Reductions, and Savings: Budget of the U.S. Government Fiscal Year 2010,» Office of Management and Budget, Washington, 2009.
- [9] M. B. Gerard Maral, *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*, 5 ed., John Wiley & Son Ltd, 2010, p. 743.

- [10] C. J. H. Elliott D. Kaplan, *Understanding GPS/GNSS Principles and Applications*, Tercera ed., Boston: Artech House, 2017.
- [11] V. A. Anil K. Maini, *Satellite technology : principles and applications*, 3 ed., Reino Unido: John Wiley & Sons Ltd, 2014.
- [12] S. Tan, *GNSS Systems and Engineering The Chinese Beidou Navigation and Position Location Satellite*, Beijing: National Defense Industry Press, JohnWiley & Sons, Inc, 2018.
- [13] A. El-Rabbany, *Introduction to GPS The Global Positioning System*, Norwood: ARTECH HOUSE, INC., 2002.
- [14] W. MARQUIS, «Increased Navigation Performance,» *Journal of The Znstitute of Navigation*, vol. 50, nº 4, pp. 219-233, 2003.
- [15] A. R. Mishra, *ADVANCEDCELLULAR NETWORK PLANNING AND OPTIMISATION 2G/2.5G/3G. . .EVOLUTION TO 4G*, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- [16] H. Bidgoli, *HANDBOOK OF COMPUTER NETWORKS LANs, MANs, WANs, The Internet, and Global, Cellular, and Wireless Networks*, vol. 2, Hoboken, Ney Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [17] F. L. Piccolo, *A New Cooperative Localization Method for UMTS Cellular Networks*, New Orleans: IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), 2008.
- [18] M. Sauter, *From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*, Chichester, West Sussex: John Wiley and Sons Ltd, 2017.
- [19] A. L. I. N. Yanying Gu, «A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks,» *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, vol. 11, nº 1, pp. 13-31, 2009.
- [20] M. A.-O. ,. N. B. M. Wilson Sakperea, «A state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies,» *South African Computer Journal*, vol. 3, nº 29, pp. 145-197, 2017.

- [21] A. G. K. K. L. Faheem Zafari, A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019.
- [22] Y. N. M. A. A. A.-D. R. L. C. Y. R. R. E. A. Ali Yassin, «Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications,» *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, vol. 19, nº 2, pp. 1-32, 2017.
- [23] N. Gupta, Inside Bluetooth Low Energy, Artech House, 2016.
- [24] Y. Ai, M. Peng y K. Zhang, «Edge computing technologies for Internet of Things: a primer,» ELSEVIER, USA, 2017.
- [25] A. Küpper, Location-Based Services., Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
- [26] B. J. a. H. Kim, Indoor Positioning Technologies Without Offline Fingerprinting Map: A Survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019.
- [27] J. P. G.-V. C. E. G.-T. D. M.-R. C. V.-R. J. F. J. Ramon F. Brena, Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey, 2007.
- [28] S. Goswami, Indoor Location Technologies, New York: Springer, 2013.