

MARCO TEÓRICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA GEOLOCALIZACIÓN EN REDES LPWAN

Daniel Alejandro Sierra Perera¹, Gabriela Milián Teijeiro², Msc. Iván Quesada Hernández³, Ing. Lisandra Pérez Roche⁴, Msc. Pedro Manuel Perera Miniet⁵

^{1,2,4} Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, Calle 114 #11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, ³IMR TELECOMMUNICATIONS LLC, 9701 Nw 26th Ave, FL 33147, ⁵División Comercial de Telecomunicaciones, Videos y Sistemas, Corporación Copextel, OSDE GELECT.

¹e-mail: daniesieper@tele.cujae.edu.cu

²e-mail: gabrimiltei@tele.cujae.edu.cu

³e-mail: quesadahdez690421@gmail.com

⁴e-mail: lperezr@cime.cujae.edu.cu

⁵e-mail: pedro@tvs.copextel.com.cu

RESUMEN

El presente estudio, establece el marco teórico-científico para la futura implementación de sistemas de geolocalización en redes LPWAN, con énfasis fundamental en la localización georreferencial de dispositivos IoT que utilizan la tecnología LoRaWAN. El mismo se enfocará en la exposición teórica de los principios esenciales que deben considerarse para la instauración de sistemas de geolocalización en entornos de dos dimensiones, realizando una breve descripción de los parámetros físicos principales que caracterizan a las señales de radio en estos entornos de trabajo. A la vez que se resaltan las principales técnicas que se emplean, se abordan los algoritmos de estimación de posición más conocidos y empleados en la actualidad, así como sus principios de funcionamiento. De esta manera, se pretende establecer un contexto teórico para la explicación de los diferentes métodos de posicionamiento que permiten una correcta implementación de estos algoritmos. Además se utiliza como un sondeo de las diversas tecnologías inalámbricas que permiten su implementación en sistemas de geolocalización en interior y exterior. En síntesis, se sientan los cimientos teórico-científicos sobre los fundamentos, algoritmos, métodos y tecnologías claves a considerar en el desarrollo de sistemas de geolocalización eficientes, seguros y de bajo consumo de energía tan necesarios en un mundo cada vez más interconectado.

PALABRAS CLAVES: Algoritmos de posicionamiento, Geolocalización, IoT, Métodos de estimación de posición, Tecnologías Inalámbricas.

THEORETICAL FRAMEWORK FOR THE IMPLEMENTATION OF A GEOLOCATION IN LPWAN NETWORKS

ABSTRACT

The present study establishes the theoretical-scientific framework for the future implementation of geolocation systems in LPWAN networks, with a fundamental emphasis on the georeferential localization of IoT devices using LoRaWAN technology. It will focus on the theoretical exposition of the essential principles for establishing geolocation systems in two-dimensional environments, briefly describing the main physical parameters that characterize radio signals in these work environments. While highlighting the primary techniques employed, it addresses the most well-known and utilized position estimation algorithms and their operating principles. In this way, the intention is to set a theoretical context for explaining the different positioning methods that allow for the correct implementation of these algorithms, along with an exploration of the various wireless technologies enabling their implementation in geolocation systems indoors and outdoors. In summary, it establishes the theoretical-scientific foundations regarding the principles, algorithms, methods, and key technologies to be considered in developing efficient, secure, and energy-efficient geolocation systems, which are increasingly essential in an interconnected world.

INDEX TERMS: Positioning Algorithms, Geolocation, IoT, Position Estimation Methods, Wireless Technologies.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de localización gozan de una gran popularidad, ya que consisten en la localización por radiofrecuencia de cualquier dispositivo, ya sea en un plano bidimensional o tridimensional, de un recinto o cualquier espacio exterior [1]. En la actualidad, existen muchas soluciones que admiten la estimación de la posición por satélite de objetos o individuos. A menudo, estas están implementadas en dispositivos móviles, pero cuando se trata de dispositivos especializados para la geolocalización, como son los dispositivos GPS (por las siglas del inglés *Global Positioning System*) para la conducción o tecnología para el seguimiento de cargas, resulta complicado garantizar un suministro de energía que satisfaga el alto consumo energético que estos presentan, lo cual limita su uso en grandes proyectos que requieran una gran cantidad de dispositivos localizadores.

En la actualidad, Cuba se apoya significativamente en diversas tecnologías extranjeras para la implementación de sistemas de geolocalización, generando costos considerables en importación y mantenimiento. En este sentido, resulta imperativo optimizar la utilización de los equipos ya desplegados, permitiéndoles ofrecer información adicional de interés, como, por ejemplo, su localización.

Debido a esta limitación la División Comercial de Telecomunicaciones, Video y Sistemas (TVS) de la corporación Copextel S.A en conjunto con la Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, se han propuesto el desarrollo de un proyecto que tenga en cuenta estas características y permita la creación de un sistema de localización que sea asequible y se adapte a las necesidades de grandes proyectos en los cuales intervenga de forma directa la geolocalización. Este trabajo forma parte del proyecto “Sistema para el desarrollo de red LoRaWAN” presentado por la División Comercial TVS y aprobado por el CITMA con código de proyecto NA215LH500-010. Este proyecto se orienta hacia el propósito de conferir un valor adicional a los dispositivos IoT desplegados en diversos contextos institucionales, con el objetivo de maximizar su utilidad en el ámbito de la geolocalización, a pesar de no haber sido diseñados originalmente con este propósito.

Basándose en esta premisa, la investigación actual se centra en la exposición teórica de los principios esenciales que deben considerarse para la instauración de sistemas de geolocalización en un entorno de dos dimensiones que explote las potencialidades que ofrecen estas tecnologías IoT. Dicho esto, en la Sección 2 se hace una descripción de los parámetros físicos que caracterizan a una señal de radio, a la vez que se resaltan las principales técnicas que emplean estas variables para localizar el origen de la señal de radio a la cual pertenecen. En la Sección 3 se abordan los algoritmos de estimación de posición más conocidos y empleados en la actualidad, así como su principio de funcionamiento. De esta manera, se pretende establecer un contexto para la explicación de los diferentes métodos de posicionamiento que permiten una correcta implementación de estos algoritmos, en la Sección 4. La Sección 5 refleja un sondeo de las diversas tecnologías inalámbricas que permiten su implementación en sistemas de geolocalización, ya sea en interiores o exteriores.

2. PARÁMETROS FÍSICOS QUE PERMITEN LA CARACTERIZACIÓN DE UNA SEÑAL DE RADIO.

Inicialmente se partiría de la ecuación de una señal de radio:

$$x(t) = \text{Re}[|A(t)|e^{j\omega t}]$$

$$x(t) = |A(t)| \cos[2\pi(f_0 + f_D)t + \phi(t) + \phi_0] \quad (1)$$

Donde,

$|A(t)|$: Módulo de la amplitud o envolvente de la señal en función del tiempo (modulación de amplitud).

f_0 : Frecuencia portadora

f_D : Frecuencia Doppler (puede tomar valores positivos o negativos)

$\phi(t)$: Fase de la señal en función del tiempo (modulación de fase)

ϕ_0 : Fase inicial

Por ejemplo, usando la amplitud de la señal se puede determinar la posición de la estación base de transmisión mediante el empleo del *Adcock Watson-Watt Direction Finder*, propuesto por el físico Robert Alexander Watson-Watt en 1935. Se basa en el uso de la dirección de llegada (DoA) de señales de radio para determinar la posición de un objetivo [1].

La frecuencia Doppler es también importante en la geolocalización mediante el empleo del Efecto Doppler. Este se utiliza para determinar la velocidad y dirección de movimiento de un dispositivo al medir el cambio en la frecuencia de la señal recibida en comparación con la frecuencia emitida [2]. A su vez, se pueden utilizar técnicas de interferometría y análisis de fase para determinar la posición de la estación base de transmisión; esta se basa en la comparación de la fase de las señales recibidas en diferentes puntos, permitiendo inferir la posición del transmisor a partir de la diferencia de fase entre las señales [3]. A partir de estas componentes de la señal de una onda, se desarrollaron diferentes métodos de estimación de posición, los cuales son fundamentales para determinar la posición de un dispositivo o persona, siendo de esta forma herramientas indispensables en un amplio número de aplicaciones que van desde la navegación hasta logística y marketing.

3. ALGORITMOS DE ESTIMACIÓN DE DISTANCIA

Las medidas de distancia para la localización de un dispositivo pueden estimarse mediante diferentes algoritmos, denominados algoritmos de estimación de distancia. El sistema, mediante dichos procedimientos, empleará medidas de tiempos, de ángulos o de la intensidad de la señal de radio recibida, según el cálculo de localización que se aplique, para estimar la distancia de cada baliza receptora hasta el nodo a localizar [1].

Ángulo de Arribo (AoA)

El Ángulo de Arribo (AoA por las siglas en inglés *Angle of Arrival*) se basa en medir las direcciones angulares (azimut¹ y elevación) desde un dispositivo situado en un lugar conocido. Por ángulo se entiende el ángulo en el que la señal incide con respecto al receptor. El ángulo se mide calculando la fase de las señales radiorreceptoras[4]. Aunque el AoA puede proporcionar una estimación precisa, cuando la distancia transmisor-receptor es pequeña, requiere un hardware más complejo y una calibración cuidadosa. Mientras que su precisión se deteriora con el aumento de la distancia transmisor-receptor donde un pequeño error en el cálculo del ángulo de llegada se traduce en un gran error en la estimación de la ubicación actual [5].

Intensidad de la señal recibida (RSSI)

La localización basada en Intensidad de la señal recibida (RSSI por las siglas del inglés *Received Signal Strength Indicator*) funciona estimando la distancia entre dos nodos a través de la medición de la intensidad de su señal de radio recibida [6]. Las mediciones pueden utilizarse de dos maneras en los métodos de posicionamiento para convertir esa señal RSSI en distancia: los modelos de espacio libre y los modelos log-normal. Los modelos de espacio libre son sencillos, pero no tienen en cuenta los obstáculos entre receptores y transmisores, por lo que suelen estar limitados en las aplicaciones reales. Los modelos log-normales son más adecuados para distintas aplicaciones por su flexibilidad [7].

Desde la perspectiva del bajo coste en requisitos de hardware y baja complejidad computacional, el método basado en RSSI es uno de los más sencillos para entornos interiores debido a la facilidad de medición del valor RSSI [8]. Las técnicas basadas en RSSI ofrecen varias ventajas en términos de localización ya que estas no requieren el uso de un dispositivo de hardware de posicionamiento adicional al propio que se desea localizar, además de que, en la recepción de cualquier señal de radio, entre los parámetros recibidos, casi siempre se obtiene la intensidad de la señal recibida. Este tipo de técnicas han suscitado mucho interés debido a la cierta precisión que alcanzan, su relativo bajo coste y su eficiencia energética. Sin embargo, no están exentas de inconvenientes, ya que estas enfrentan a una fluctuación de los valores RSSI debido a cambios ambientales u obstáculos, lo cual la hace deficiente en exteriores, pero una solución más que atractiva en sistema de localización en interiores [9].

Diferencia de Frecuencia de Arribo (FDoA)

La Diferencia de Frecuencia de Arribo (FDoA por las siglas del inglés *Frequency Difference of Arrival*) es una técnica de geolocalización basada en la diferencia de frecuencia entre las señales de radio recibidas por varios receptores. Básicamente este calcula la diferencia de frecuencia debido a la diferencia en velocidad entre el receptor principal y los receptores adyacentes, basado en el Doppler diferencial. [10]. FDOA es utilizado principalmente en aplicaciones militares y de seguridad, debido a que se requieren varios receptores para medir la diferencia de frecuencia [11].

¹ Ángulo que con el meridiano forma el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste o del globo terráqueo

Tiempo de Arribo (ToA)

El Tiempo de Arribo (ToA por las siglas del inglés *Time of Arrival*) es un algoritmo de localización que estima la ubicación de un dispositivo basándose en el tiempo de propagación de una señal de radio emitida desde este hasta una baliza receptora [12]. Por ejemplo, las ondas sonoras viajan a una velocidad aproximada de 344 m/s, así, un pulso de ultrasonido enviado por un nodo y que llega a otros 14,5 milisegundos después, permite concluir que la distancia entre ellos es de 5 metros [14]. El principal inconveniente de este método es que se requiere una perfecta sincronización entre los elementos receptores y emisores de la red, lo cual no es posible en todos los casos [13].

Diferencia de tiempo de arribo (TDoA)

Diferencia de tiempo de arribo (TDoA por las siglas del inglés *Time Difference of Arrival*) es un algoritmo que funciona midiendo la diferencia de tiempo de una señal recibida por dos o más ubicaciones diferentes y luego usa esa información para determinar la posición del dispositivo transmisor. TDoA se basa en que, aunque las ondas de radio tienen una frecuencia más baja que la luz visible, pertenecen al mismo espectro electromagnético, por lo que pueden viajar a la misma velocidad y que el tiempo que tarda una señal de radio en viajar desde el transmisor hasta cada receptor puede ser medido con precisión. Es comúnmente utilizado en aplicaciones militares y civiles como la comunicación inalámbrica, la navegación y la vigilancia [14].

La tecnología TDoA difiere de los estrictos requisitos de sincronización horaria de ToA, ya que este utiliza la diferencia de tiempo cuando múltiples estaciones base reciben señales de radio para determinar la localización de los terminales. Así, el posicionamiento TDoA no requiere que la estación base y el transmisor estén en sincronía, siempre que los receptores puedan sincronizarse entre sí, y la ubicación de la estación base sea fija. Al utilizar la varianza de la diferencia de tiempo, la tecnología TDoA evita los problemas de ambigüedad de fase y la influencia del acoplamiento mutuo entre antenas [15].

Ventajas de TDoA para la estimación de posición en exteriores

Tras un análisis de los diferentes algoritmos, los autores consideran que es TDoA el más eficiente en términos de estimación de posición en exteriores con respecto a los algoritmos antes expuestos. Las técnicas de estimación de posición basadas en AoA y FDoA pueden tener problemas de ambigüedad, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas donde las señales de radio pueden rebotar en edificios y otros objetos [15]. Esto puede dificultar la determinación de la verdadera dirección de llegada o la frecuencia de la señal de radio. TDoA, por otro lado, no tiene problemas de ambigüedad, ya que la medición del tiempo es más directa y menos susceptible a la interferencia de la señal de radio.

TDoA es más escalable que otras técnicas de estimación de posición; esto se debe a que no requiere un gran número de antenas o receptores para funcionar, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones en las que la cantidad de hardware es limitada. Además, es más preciso que otros algoritmos debido a que la medición del tiempo es mucho más exacta que la medición de la intensidad de la señal de radio o la dirección de llegada [16]. Sin embargo, es importante tener en cuenta a la hora de seleccionar el hardware, que el *gateway*² empleado para realizar este algoritmo debe proporcionar el *fine-timestamp*³.

En la Fig. 1 se ilustra una situación típica empleando TDoA donde se trazaron una serie de hipérbolas, las cuales son producto de la resolución de diferentes sistemas de ecuaciones, donde AP_1 , AP_2 y AP_3 serían las balizas receptoras y MP el dispositivo a localizar. El presente ejemplo es válido solamente en el caso en el que las balizas receptoras y el punto MP se encuentren en un mismo plano. Este ejemplo ha sido seleccionado como ilustración paradigmática debido a su correspondencia con la problemática tangible inherente al proyecto en cuestión, pero cabe señalar que en un gran número de aplicaciones el objetivo a localizar no se encontrará en un plano común con las balizas.

² Se refiere a un dispositivo que actúa como intermediario entre diferentes redes, permitiendo la interoperabilidad y la transferencia de datos entre ellas. Su función principal es traducir y facilitar la comunicación entre dos sistemas que utilizan protocolos o tecnologías diferentes

³ Se refiere a una marca de tiempo que indica el momento exacto en que se ha registrado o creado un evento, una acción o un registro de datos

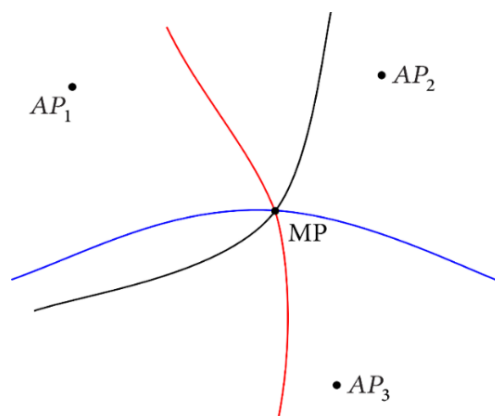


Figura 1: Modelo de estimación de posición empleando TDoA [16].

4. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE POSICIÓN

Los métodos de estimación de posición se utilizan para estimar las coordenadas físicas de un objetivo utilizando variables medidas o valores de tipo muy específico, como lo pueden ser la distancia o el tiempo. La trilateración, triangulación y multilateración, son algunos de los más utilizados actualmente en redes inalámbricas. Los sistemas de localización modernos, los utilizan individualmente o combinados y cuando se parte de las variables, tiempos de llegada o diferencias de tiempo de llegada, se utilizan los algoritmos de multilateración y trilateración, por otro lado, cuando las variables de entrada disponibles, son los ángulos de llegada, la diferencia de fases, o la amplitud de la señal de radio, entonces se utiliza el algoritmo conocido como triangulación [17].

Triangulación

La triangulación es un método de estimación de posición que emplea los ángulos para determinar la posición de un nodo [18]. Se requieren dos ángulos y la distancia entre dos puntos de referencia en un entorno bidimensional. Para tres dimensiones son necesarios dos ángulos, la distancia entre dos nodos de referencia y un azimut para especificar una posición precisa [19]. Los sistemas de localización basados en la triangulación ofrecen una gran precisión de localización en entornos exteriores, pero suelen fallar en entornos interiores debido a la existencia de paredes y obstáculos [20]. Este método requiere múltiples mediciones utilizando múltiples sensores. Se usa a menudo en el algoritmo de Angulo de Arriba (AoA) porque más de un dispositivo puede triangular la posición de las unidades por ángulo [9].

Metodología para estimar la posición de un objetivo a través de la triangulación

Suponiendo que se desea conocer la posición de un objetivo que se encuentra a cierta distancia de un plano, formado por dos receptores, cuyas distancias hasta el objetivo forman, con respecto al plano, los ángulos α y β como se muestra en la Fig. 2.

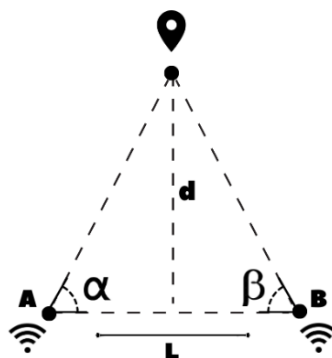


Figura 2: Estimación de posición mediante triangulación.

El primer paso consiste en calcular la distancia mínima del plano al objetivo, la cual forma una recta perpendicular respecto a este, formando dos triángulos rectángulos. En trigonometría es conocido que:

$$\tan \sigma = \frac{\text{Cateto Opuesto}}{\text{Cateto Adyacente}} \quad (2)$$

De este modo se tendría que la longitud del plano donde se encuentran los dos dispositivos receptores se puede representar mediante

$$L = \frac{d}{\tan \alpha} + \frac{d}{\tan \beta} \quad (3)$$

Donde L es la longitud del plano en que se encuentran los receptores y d es la distancia mínima desde el objetivo al plano. Recordando las entidades trigonométricas plasmadas en las ecuaciones

$$\tan \sigma = \frac{\sin \sigma}{\cos \sigma} \quad (4)$$

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha * \cos \beta + \cos \alpha * \sin \beta \quad (5)$$

Se sustituye (4) y posteriormente (5) en (3) para poder arribar a

$$L = \frac{d \cos \alpha}{\sin \alpha} + \frac{d \cos \beta}{\sin \beta}$$

$$L = \frac{d \cos \alpha \sin \beta + d \cos \beta \sin \alpha}{\sin \alpha * \sin \beta}$$

$$L = \frac{d * \sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha * \sin \beta} \quad (6)$$

Despejando d se puede obtener:

$$d = \frac{L * \sin \alpha * \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (7)$$

Teniendo en cuenta este resultado y realizando un poco de algebra se puede determinar la distancia del receptor “A” al objetivo, así como la distancia del receptor “B” al objetivo. Una vez obtenidos estos valores no resulta complejo determinar la posición del objetivo.

Trilateración

El método de trilateración calcula la posición final del usuario a través de la intersección entre formas geométricas como círculos o hipérbolas definidas por la distancia entre el objetivo y los diferentes puntos de referencia. Dado que las distancias medidas en circunstancias reales podrían contener errores debido a diferentes factores como reflexiones o bloqueos, dichas distancias no se interceptan en un punto si no que generan un área de incertidumbre que es donde se encuentra la solución del problema. Por ello, posteriormente se deberá aplicar un método iterativo para hallar la solución óptima a este problema reduciendo el error hasta obtener el mínimo posible [21].

Con el fin de dar una estimación en un escenario bidimensional, se necesitan al menos tres puntos de referencia [4]. Suele utilizarse junto con los algoritmos de RSSI y ToA, en cuyo caso los elementos pertenecientes a la red deben estar sincronizados [22].

Metodología para estimar la posición de un objetivo a través de la trilateración

Para enfocar correctamente la metodología a emplear para determinar la posición de un objetivo mediante este método es fundamental abordar inicialmente la formulación de las ecuaciones de las superficies de posición utilizadas, que en este caso corresponden a ecuaciones de esferas:

$$(x_i - x_{0i})^2 + (y_i - y_{0i})^2 + (z_i - z_{0i})^2 = R_i^2, \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

donde, x_{0i} , y_{0i} y z_{0i} , son las coordenadas, cartesianas o geográficas, de las balizas receptoras. La solución de este sistema de ecuaciones cuadráticas permite obtener las coordenadas del objeto que se desea geolocalizar.

El siguiente ejemplo parte de una situación en la que se necesita conocer la ubicación de un objeto y se poseen las coordenadas (latitud y longitud) de tres balizas receptoras, así como la distancia de las mismas hasta el objetivo que se desea geolocalizar. La situación descrita se muestra en la Fig. 3. La misma parte desde el punto de vista de que las balizas receptoras y el objetivo, se encuentran en un mismo plano, lo cual está en concordancia con la problemática que pretende resolver el proyecto en cuestión.

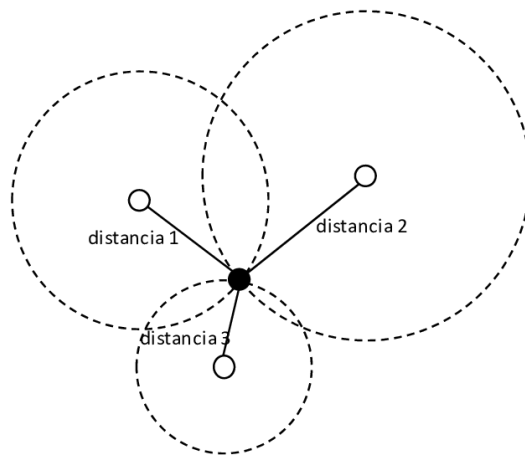


Figura 3: Método de Trilateración [23].

Haciendo uso de un poco de geometría analítica y empleando la fórmula de distancia entre dos puntos, se podría plasmar los datos que se poseen:

$$(x - 5)^2 + (y - 4)^2 = 25 \quad (9)$$

$$(x - 4)^2 + (y + 3)^2 = 25 \quad (10)$$

$$(x + 4)^2 + (y - 13)^2 = 169 \quad (11)$$

Donde, las coordenadas del primer receptor serían (5,4) y la distancia hasta el objetivo sería de 5 unidades; las coordenadas del segundo receptor serían (4,-3) y la distancia hasta el objetivo sería de 5 unidades; las coordenadas del tercer receptor serían (-4,13) y la distancia hasta el objetivo sería de 13 unidades. Pero con conocer esta información no sería suficiente, ya que, aunque se conocen las distancias, se desconoce la dirección en que se encuentra el objeto. Sin embargo, estas ecuaciones pueden ser representadas gráficamente mediante circunferencias para, posteriormente, calcular la intersección de las mismas y de esta forma poder determinar las coordenadas físicas exactas del objetivo.

Multilateración

Es una extensión de la trilateración que utiliza más de tres balizas receptoras para localizar los nodos sensores. La multilateración minimiza el margen de error debido al elevado número de balizas y al empleo de cálculos matemáticos más desarrollados [24], [25]. Puede complementarse con el algoritmo Diferencia de Tiempo de Arribo (TDoA), el cual tiene mayor precisión que ToA [22]. También es bastante empleado con RSSI, sobre todo para soluciones en interiores. La técnica de multilateración se ilustra en la Fig. 4 donde se aprecia un modelo muy parecido al de la trilateración, pero empleando un *gateway* adicional con el fin de alcanzar una mayor exactitud de la ubicación deseada.

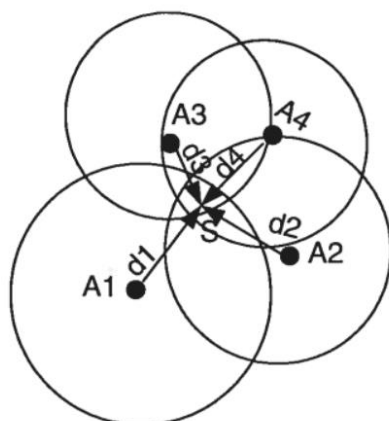


Figura 4: Método de Multilateración [24].

Aspectos a tener en cuenta sobre la trilateración y multilateración para la estimación de posición

Tras un análisis de los diferentes métodos, los autores consideran que la multilateración y trilateración son más eficiente que la triangulación en la gran mayoría de aplicaciones, debido a una serie de aspectos. En primer lugar, a diferencia de la triangulación, estas no dependen de los ángulos de llegada de las señales de radio a los receptores; la medición de ángulos es más propensa a errores sistemáticos y aleatorios causados por obstáculos y reflexiones de la señal de radio, lo que puede reducir la precisión de la localización. En contraste, la multilateración y trilateración se basan únicamente en la medición de tiempo o distancia, que son menos susceptibles a estos errores.

En segundo lugar, en estas los errores de tiempo o distancia tienden a compensarse entre sí cuando se combinan múltiples receptores, lo que resulta en una estimación de posición más precisa. Sin embargo, en la trilateración pequeños errores de distancia pueden resultar en grandes discrepancias en cuanto a la posición estimada.

Por último, pero no menos importante, la trilateración y multilateración son más escalables y flexibles ya que permiten agregar fácilmente más receptores para aumentar la cobertura y la precisión. Además, estos métodos funcionan con una amplia gama de frecuencias y tecnologías de comunicación, lo que los hace aptos para una variedad de aplicaciones. Resulta muy importante mencionar que estos pueden emplearse siempre y cuando las balizas receptoras no se encuentren ubicadas colinealmente, como se muestra en la Fig. 5. Una configuración de antenas se considera colineal si las antenas se encuentran ubicadas en una misma línea recta, como se ilustra en la Fig. 6.

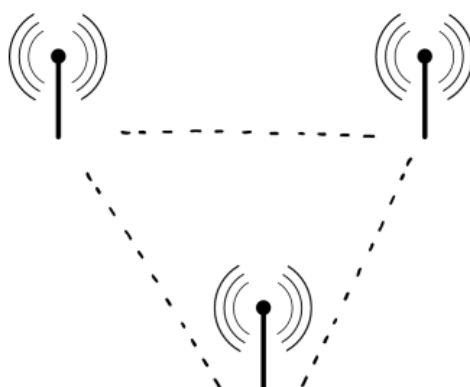


Figura 5: Antenas No Colineales.

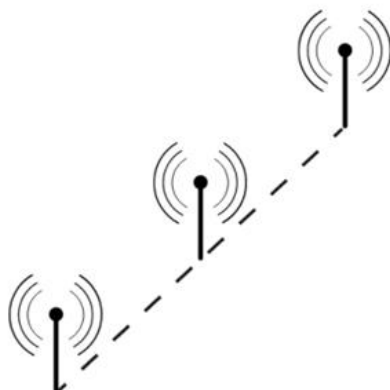


Figura 6: Antenas Colineales.

5. TECNOLOGÍAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE GEOLOCALIZACIÓN

El posicionamiento en interiores y exteriores de dispositivos IoT es fundamental en aplicaciones que intervienen en prácticamente todos los aspectos de la vida cotidiana. Por ejemplo, en la detección de personal en un local para propiciar una mejor logística; para la protección de la fauna en entornos inteligentes identificando su posición mediante collares de seguimiento; en los productos existentes en almacenes para un mejor control de inventario, entre otras aplicaciones. Pero resulta de gran importancia tener bien claros las especificidades de cada problemática a la hora de escoger la tecnología a emplear en la solución a desarrollar, con el fin de explotar al máximo las capacidades de las mismas. Si la problemática consiste en la implementación de un sistema de corto alcance, la mejor opción es emplear tecnologías inalámbricas como pueden ser Wi-Fi o RFID, pero si se requiere un intercambio de datos de largo alcance una excelente opción podrían ser las redes de área amplia de baja potencia (LPWAN)⁴.

Principales tecnologías inalámbricas que admiten su implementación en sistemas de estimación de posición en interiores

Es posible implementar un sistema de estimación de posición por medio de diferentes tecnologías inalámbricas, utilizando los *gateway* del sistema como centros bases para transmitir y recibir las señales de interés. Algunas de las tecnologías inalámbricas más utilizadas para estos propósitos incluyen *Bluetooth Low Energy* (BLE), Wi-Fi, ZigBee, RFID, UWB (*Ultra-Wideband*), entre otras. Cada una de estas tecnologías tiene sus propias ventajas y desventajas en términos de alcance, velocidad de transmisión, consumo de energía y costo, por lo que es importante elegir la tecnología adecuada en función de las necesidades específicas de cada proyecto.

Bluetooth Low Energy (BLE)

Bluetooth Low Energy es una tecnología de comunicación inalámbrica de bajo consumo que puede utilizarse para comunicaciones de corto alcance. BLE se utiliza para establecer una experiencia sin fisuras a través de dispositivos inalámbricos inteligentes utilizados todos los días como celulares, relojes inteligentes, auriculares inalámbricos, ordenadores, etc. La tecnología BLE es muy recomendada para el diseño de sistemas IoT, ya que esta brinda un excelente rendimiento de energía. Además, es ideal para aplicaciones de corto alcance en interiores donde los rangos de detección son inferiores a 60 m [26].

Entre las mayores bondades que brinda esta tecnología es que admite la integración de algoritmos, como, por ejemplo, para integrar estrechamente las mediciones RSSI directamente en el algoritmo TDoA, ya que utiliza las mediciones RSSI para restringir el espacio de solución TDoA parametrizado mediante la estimación de la máxima distancia a la que el objetivo puede estar de las balizas [27]. Esta combinación de algoritmos de estimación de posición se denomina algoritmos híbridos.

⁴ Grupo de tecnologías inalámbricas utilizadas para ofrecer eficientemente conectividad IoT a bajo coste en amplias áreas geográficas.

Wi-Fi

Wi-Fi es una red de área local inalámbrica basada en la norma IEEE802.11b. El objetivo del posicionamiento Wi-Fi es permitir, a través de esta la detección y seguimiento de la posición en entornos complejos utilizando una red de área local inalámbrica compuesta por puntos de acceso inalámbricos (incluidos routers). Utiliza una combinación de pruebas empíricas y modelos de propagación de señales para localizar los dispositivos móviles conectados a partir de la información de localización de los nodos de la red [28]. Con el desarrollo de las redes de área local, los dispositivos Wi-Fi se han convertido en dispositivos de red que pueden verse, sobre todo, en espacios interiores. El uso de señales Wi-Fi en interiores como tecnología de localización tiene la ventaja de un bajo coste, alta precisión, gran cobertura de posicionamiento, alta penetración en interiores y alta capacidad de comunicación [29].

ZigBee

ZigBee es una tecnología inalámbrica desarrollada como un estándar global abierto para abordar las necesidades únicas de redes *Machine to Machine* (M2M)⁵ inalámbricas de bajo coste y bajo consumo. El estándar ZigBee se basa en la especificación física IEEE 802.15.4 y opera en bandas sin licencia de 2,4 GHz, 900 MHz y 868 MHz [30]. El estándar ZigBee proporciona algunas propiedades de la señal que pueden utilizarse para el algoritmo de localización RSSI [31]. ZigBee admite distintos tipos de topologías, como árbol, estrella y malla. Es ideal para aplicaciones y dispositivos que requieren un bajo consumo de datos, larga duración de la batería y alta seguridad. El alcance de la señal de ZigBee en un entorno interior es de entre 20 y 30 metros [9].

Radio Frequency Identification (RFID)

Los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID) utilizan una antena conectada a un lector que emite impulsos de frecuencia recibidos por etiquetas RFID. Esta funciona a frecuencias bajas (LF), altas (HF) o ultra altas (UHF). Las tecnologías RFID son populares debido al bajo coste de las etiquetas pasivas. Las principales ventajas de la RFID UHF son el rendimiento en condiciones sin línea de visión (NLoS)⁶ y que no interfieren con las señales Wi-Fi o BLE al utilizar una banda diferente. Una limitación crítica de la RFID en entornos industriales es que los objetos metálicos y los líquidos pueden reducir en gran medida el alcance de lectura de las etiquetas, así como los efectos multirayecto en la señal y su consiguiente fluctuación, las cuales afectan directamente a la estimación de la ubicación. Además, el hardware no es habitual en muchos entornos, ni está integrado en dispositivos móviles [32].

Ultra-Wideband (UWB)

Hoy en día, una de las tecnologías de localización más utilizadas es la UWB, que se basa en la transmisión de pulsos de energía de duración extremadamente corta (normalmente del orden de nanosegundos o picosegundos) y con una ocupación espectral muy amplia. Un dispositivo UWB genera una señal de radiofrecuencia que ocupa una porción del espectro de frecuencias superior al 20% (hasta el 110%) de la frecuencia portadora central o tiene un ancho de banda superior a 500 MHz (hasta 7,5 GHz). El gran ancho de banda confiere a las antenas la capacidad de transmitir grandes cantidades de datos con un bajo consumo de energía [33]. La presencia de estas características permite obtener ventajas como la capacidad de penetrar a través de obstáculos, alta inmunidad a las interferencias y efectos multirayectoria [34].

Principales tecnologías inalámbricas que admiten su implementación en sistemas de estimación de posición en exteriores

Los despliegues a gran escala de IoT se adoptan para mejorar el rendimiento y reducir costos en varios dominios de aplicación de la sociedad. Las redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) se han convertido en una solución atractiva para la localización en exteriores y han recibido una atención significativa de la comunidad de investigación debido a su comunicación de bajo consumo de energía, bajo costo y larga distancia. Además, sus señales se pueden utilizar tanto para la comunicación como para la localización simultáneamente. Algunas de las redes LPWAN más importantes a ser empleadas en sistemas de localización en interiores son: Sigfox, NB-IoT (*Narrowband IoT*), LTE-M (*Long Term Evolution for Machines*) y LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*).

⁵ Se refiere a cualquier tecnología que facilite el intercambio de información entre dispositivos conectados de forma directa y autónoma sin requerir la intervención de un humano.

⁶ Non Line of Sight, (NLOS) se usa para describir un trayecto parcialmente obstruido entre la ubicación del transmisor de la señal y la ubicación del receptor de la misma.

Sigfox

Sigfox es un operador de red global francés. Su protocolo de capa PHY también es propietario y opera en una banda sin licencia de radio por debajo de 1 GHz. Es apto para dispositivos de bajo consumo energético y comprende estaciones base con radios definidas por software (SDR) de base cognitiva y servidores de red basados en IP. Utiliza técnicas de modulación BPSK y bandas ultra estrechas (UNB) de 100 Hz para señales portadoras y mejora de la eficiencia espectral. Presenta ventajas como la mejora de la sensibilidad del receptor, el largo alcance, el consumo reducido de energía y el alto índice de penetración a través de un único objeto, lo que la hace adecuada para su despliegue en terrenos subterráneos o de topografía accidentada. En un entorno rural o de espacio abierto la conectividad, el alcance es superior a 40 km. Sin embargo, a través de Sigfox sólo pueden comunicarse 140 mensajes de enlace ascendente con una carga útil de 12 bytes y hasta 4 mensajes de enlace descendente con una carga útil de 8 bytes cada uno al día. La fiabilidad de la red Sigfox puede mejorarse utilizando una estrategia de variación de tiempo y frecuencia con transmisiones múltiples [35]. Una red Sigfox consta principalmente de nodos de dispositivos conectados que permiten transmitir datos, los cuales son recopilados por estaciones base Sigfox, que actúan como enlaces entre los dispositivos y la nube, permitiendo la transmisión eficiente de información en aplicaciones de Internet de las cosas (IoT). La arquitectura de una red Sigfox se muestra representado en la Fig. 7.

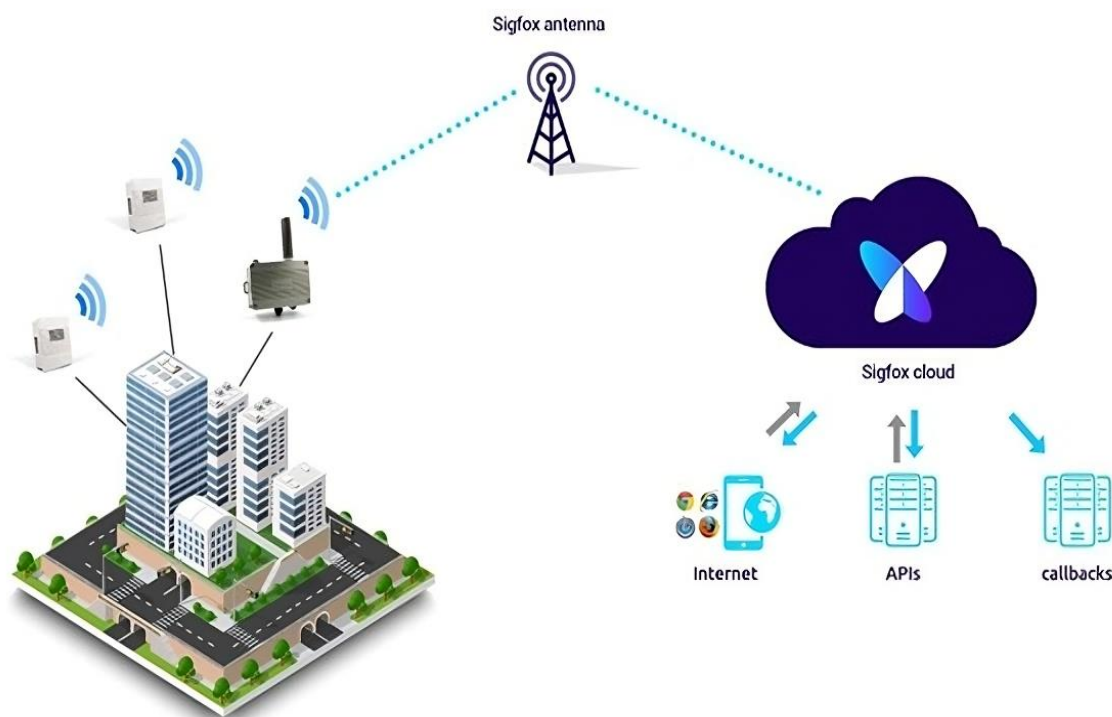


Figura 7: Arquitectura de una red SigFox [36].

NB-IoT

NB-IoT es un acceso inalámbrico 3GPP o 4GPP como tecnología LPWAN de banda estrecha que puede colaborar en LTE o GSM bajo bandas de frecuencia con licencia para lograr un rendimiento excelente. NB-IoT utiliza una técnica de modulación QPSK y domina un ancho de banda de frecuencia de 180 kHz con velocidades de aproximadamente 100 kbps para la comunicación de enlace descendente y ascendente [9], y su protocolo se basa en el protocolo de comunicación LTE. Así, varios conceptos y unidades de construcción de las capas física y de protocolo superior de LTE son reprocesados por las capas física y de protocolo superior de NB-IoT. En LTE M (*Cat M1*), el dispositivo recibe una parte de la portadora LTE, así como los dispositivos que se multiplexan a través de la portadora LTE, y el dispositivo aprovecha toda la capacidad de aprovechamiento de la portadora LTE de banda ancha.

Los dispositivos NB-IoT tienen estas características en contraste con la CatM1: una portadora NB-IoT está presente, la cual da capacidad compartida a todos los dispositivos NB-IoT, y la capacidad puede escalarse añadiendo portadoras NB-IoT adicionales [37]. El aspecto fundamental que convierte a esta tecnología en una opción atractiva para su implementación en un sistema de localización es que estos dispositivos pueden integrarse en objetos o activos, y así enviar periódicamente su ubicación a través de la red NB-IoT. Lo que permite monitorear y rastrear su posición en

tiempo real. A pesar de la enorme influencia que tiene LTE sobre NB-IoT, la arquitectura de red de este último difiere en algunos aspectos de la del primero.

NB-IoT hace uso, al igual que LTE, de una arquitectura EPC (por las siglas del inglés *Evolved Packet Core*) de la que se sirve para transmitir sus datos a otras redes externas. No obstante, tanto la forma de acceso a la red como los elementos que la componen, están adecuados de acuerdo con los requisitos de esta tecnología [38]. En la Fig. 8 se muestra la arquitectura de red antes descrita

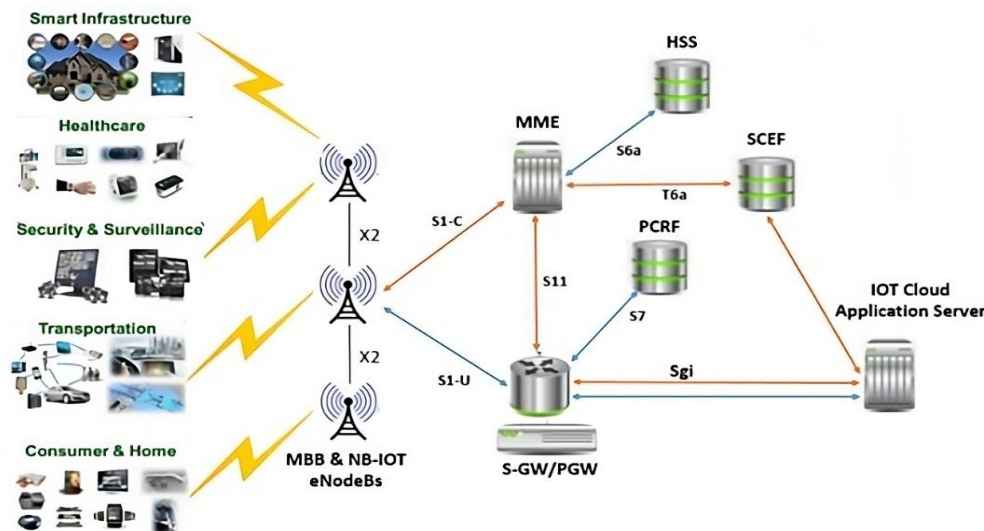


Figura 8: Arquitectura de una red NB-IoT [38].

LTE-M

LTE-M (*Long Term Evolution for Machines*) es una tecnología de red móvil que reutiliza la red existente LTE, es decir, 4G. Es una tecnología complementaria de fácil implementación en dispositivos 2G, 3G y 4G. Actualmente la red LTE-M permite la transmisión de imágenes, de texto y voz. LTE-M fue estandarizado en 2016 por el 3GPP en la Rel13 al igual que NB-IoT. Se refiere especialmente a LTE CatM1, adecuado para el IoT. Todo lo anterior, permite una fácil implantación a un coste muy bajo y también, una herencia de las ventajas de 4G como seguridad y privacidad. Además, está soportado por todos los fabricantes de redes móviles, chips y módulos de comunicación [37]. En la Fig. 9 se muestra de forma simplificada la arquitectura completa del sistema LTE.

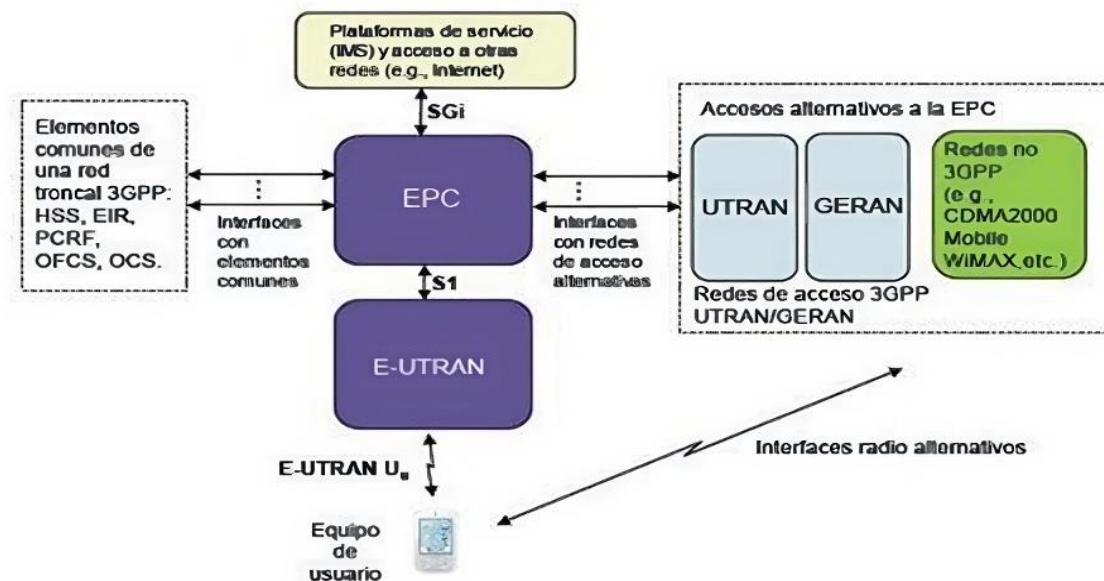


Figura 9: Arquitectura de una red LTE [39].

LoRa / LoRaWAN

LoRa es una modulación de espectro esparcido, que permite una buena comunicación de largo alcance y robustez ante interferencias, a expensas de una razón de bits baja, cuyo valor se encuentra entre 300bps y los 11kbps, representando de esta forma la capa física que emplea LoRaWAN para comunicarse con otros dispositivos. LoRaWAN es el estándar que define la estructura de los paquetes de datos y define la forma en que estos son procesados por el servidor de red. LoRaWAN proporciona la posibilidad de implementaciones de red privadas al trabajar en un espectro sin licencia y con sus especificaciones de acceso abierto [40].

Una red LoRaWAN, cuenta con una topología conocida como: Estrella de Estrellas (*Star of Stars*), compuesta por cuatro elementos principales: dispositivos finales (nodos), *gateways*, servidor de red y un servidor de aplicación [41]. Los dispositivos finales generalmente, se encuentran conformados por sensores o actuadores, los cuales comparten con el *gateway* la información adquirida, haciendo uso de la capa física LoRa mediante nodos. Por su parte, el *gateway* se encarga de recibir dicha información y compartirla con el servidor mediante una comunicación *backhaul*, como lo son las redes Wi-Fi, *Ethernet* o redes móviles celulares [42].

El servidor de red recibe la información enviada en forma de paquetes desde los nodos, los decodifica y aplica protocolos de seguridad, de manera que cada una de las aplicaciones puedan recibir los datos del servidor de red, usando a su conveniencia dicha información. Este protocolo cuenta con características que permiten recopilar datos en un solo *gateway* desde varios nodos ubicados a diferentes distancias, incluso kilómetros, mediante una comunicación unidireccional. Sin embargo, en algunos casos se ha optado por la comunicación bidireccional entre nodo y *gateway*. Finalmente, los datos son enviados hacia el servidor de aplicaciones, que es el encargado procesar la carga útil. En la Fig. 10 se muestra la arquitectura de red antes descrita.

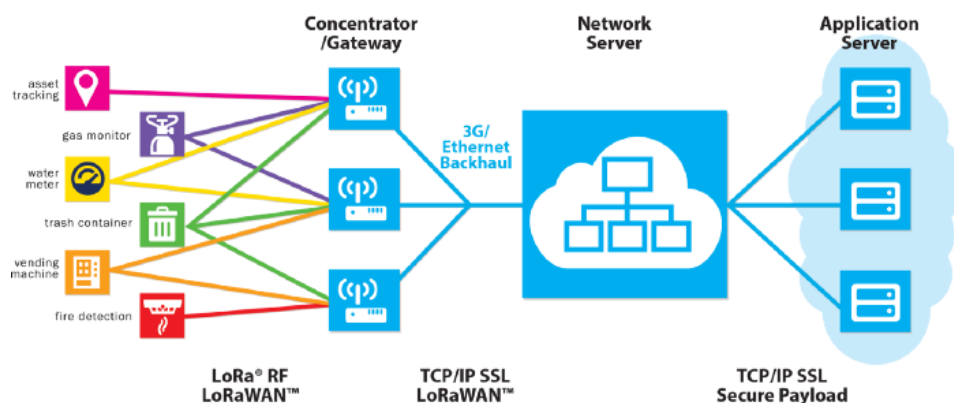


Figura 10: Arquitectura de una Red LoRaWAN [43].

LoRaWAN define tres clases de dispositivos finales: Clase A, Clase B y Clase C. La Clase A se emplea cuando un nodo final necesita enviar datos (Enlace ascendente), selecciona un canal al azar. Luego, los nodos finales envían paquetes a través de la técnica ALOHA⁷ (*Advocates of Linux Open-source Hawaii Association*). Para habilitar la comunicación bidireccional, la transmisión de enlace ascendente es seguida por dos paquetes cortos del servidor de red LoRaWAN (Enlace descendente). La Clase A es útil para dispositivos IoT con limitaciones de energía y bajos datos de enlace descendente porque el nodo final estará en modo de suspensión la mayor parte del tiempo.

La Clase B es útil para dispositivos IoT con más datos de enlace descendente y limitaciones de energía. La transmisión de enlace ascendente es la misma que en la Clase A, pero los nodos finales abrirán ventanas de recepción adicionales en horarios programados para recibir transmisiones de enlace descendente. El nodo final y la pasarela LoRaWAN establecen un parámetro. Este parámetro se utiliza para calcular el intervalo de ping. A través de la determinación del intervalo de ping, el dispositivo final sabe cuándo debe despertarse y esperar un enlace descendente. Además, el servidor sabe cuándo los nodos finales están escuchando el medio. La Clase C no es útil para dispositivos con

⁷ Es un protocolo de acceso múltiple para la transmisión de datos a través de un canal de red compartido. Funciona en la subcapa de control de acceso al medio (subcapa MAC) del modelo de interconexión de sistemas abiertos (OSI).

limitaciones de energía. En esta clase, los dispositivos IoT están continuamente escuchando el canal y están abiertos para la transmisión de enlace descendente [40].

6. CONCLUSIONES

En el presente estudio se asientan las bases teóricas que posibilitan la implementación de un sistema de geolocalización en un entorno bidimensional. Se destaca la existencia de diversos métodos y algoritmos que permiten estimar la posición de un objetivo, cada uno con sus ventajas y desventajas. La trilateración y la multilateración resultan especialmente útiles al depender solo de mediciones de distancia o diferencia de tiempos de llegada de señal. Esto las hace más precisas y menos susceptibles a errores que otros métodos como la triangulación.

Se realizó un bosquejo de los algoritmos de localización más populares, como RSSI, el cual ofrece una buena relación entre simplicidad, bajo costo y precisión aceptable, por lo que es muy utilizado en localización en interiores. Por otra parte, TDoA resulta el más preciso para exteriores al no tener problemas de ambigüedad de fase y ser más robusto a variaciones en la intensidad de señal.

Se planteó que el correcto funcionamiento de los sistemas de geolocalización depende en gran medida de la selección apropiada de la tecnología inalámbrica según los requerimientos de cada aplicación, ya sea en términos de consumo energético, alcance o precisión. Bluetooth, Wi-Fi, RFID, UWB y redes LPWAN como LoRaWAN se posicionan como soluciones atractivas y versátiles para una amplia gama de casos de uso.

REFERENCIAS

- [1] S. X. Wei Du, «Mutual Coupling Analysis of Adcock Watson Watt Direction Finding System Based on the Receiving Mutual Impedance», *IEEE*, 2012.
- [2] A. Rodríguez Jordán, «Sistema de localización de robots basado en efecto Doppler», 2021, Accedido: 12 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/24783>
- [3] G. A. P. Escamilla, D. I. S. García, J. L. Flores, y Y. Otani, «DESENVOLVIMIENTO DE FASE TEMPORAL PARA INTERFEROMETRÍA DINÁMICA EMPLEANDO UN SISTEMA POLARIMÉTRICO PIXELADO», *Miscelánea Científica En México*, p. 187, 2020.
- [4] R. Romero Justiniano, «Diseño de antena Leaky-Wave con escaneo frecuencial en la banda de 6 GHz a 9 GHz para sistemas Ultra-Wideband», *Design of Frequency-Beam Scanning Leaky-Wave antennas for Ultra-Wide Band systems in the 6 GHz to 9 GHz band*, sep. 2022, Accedido: 12 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/handle/10317/11628>
- [5] S. G. D. K. D. R. S. Kumar, «Accurate indoor localization with zero start-up cost,» in *Proceedings of the 20th annual international conference on Mobile computing and networking.*, ACM, pp. 483-494, 2014.
- [6] H. Rizk, A. Elmogy, y H. Yamaguchi, «A Robust and Accurate Indoor Localization Using Learning-Based Fusion of Wi-Fi RTT and RSSI», *Sensors*, vol. 22, n.º 7, Art. n.º 7, ene. 2022, doi: 10.3390/s22072700.
- [7] P. Sarcevic, D. Csik, y A. Odry, «Indoor 2D Positioning Method for Mobile Robots Based on the Fusion of RSSI and Magnetometer Fingerprints», *Sensors*, vol. 23, n.º 4, Art. n.º 4, ene. 2023, doi: 10.3390/s23041855.
- [8] J. Zhu, P. Hou, K. Nagayama, Y. Hou, S. Denno, y R. Ferdian, «Two-Dimensional RSSI-Based Indoor Localization Using Multiple Leaky Coaxial Cables With a Probabilistic Neural Network», *IEEE Access*, vol. 10, pp. 21109-21119, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3153083.
- [9] S. M. Asaad y H. S. Maghdid, «A Comprehensive Review of Indoor/Outdoor Localization Solutions in IoT era: Research Challenges and Future Perspectives», *Comput. Netw.*, vol. 212, p. 109041, jul. 2022, doi: 10.1016/j.comnet.2022.109041.
- [10] «3GPP, Technical Specification», vol. V9.0.1, n.º 9, 2010.
- [11] S. Pande, «Frequency/Time Selective Compressive Sensing for TDOA/FDOA Estimation», PhD Thesis, State University of New York at Binghamton, 2022.
- [12] T. Fujioka, «Investigation of TOA/TDOA localization in the presence of receiver sensor position error». Accedido: 14 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://essay.utwente.nl/92058/>
- [13] C. Villien, N. Deparis, V. Mannoni, y S. De Rivaz, «Prediction of TOA-Based Localization Accuracy Using CRLB and 3D Buildings with Field Trial Validation», en *2022 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, jun. 2022, pp. 261-266. doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit54941.2022.9815596.
- [14] J. Gotthans, T. Gotthans, y D. Novak, «Improving TDOA Radar Performance in Jammed Areas through Neural Network-Based Signal Processing», *Sensors*, vol. 23, n.º 6, Art. n.º 6, ene. 2023, doi: 10.3390/s23062889.

- [15] C. S. H. L. Z. L. H. W. C. J. C. Kun Zhang, «Direction of Arrival Estimation and Robust Adaptive Beamforming With Unfolded Augmented Coprime Array», vol. 8, pp. 314-323, 2020.
- [16] Z. Han, Z. Wang, H. Huang, L. Zhao, y C. Su, «WiFi-Based Indoor Positioning and Communication: Empirical Model and Theoretical Analysis», *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2022, p. e2364803, jun. 2022, doi: 10.1155/2022/2364803.
- [17] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, y J. Liu, «Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems», *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 37, n.º 6, pp. 1067-1080, nov. 2007, doi: 10.1109/TSMCC.2007.905750.
- [18] E. N. Ganesh y D. VISTAS, «Estimation and Optimization of Sensor Node Positioning in WSN Network using Multilateration RSSI Algorithm».
- [19] VM Salas Pacheco, «Trilateration-Based Localization in Known Environments with Object Detection», University of South Florida, 2021. Accedido: 13 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://digitalcommons.usf.edu/etd/9224/>
- [20] T. Alhmiedat, «Fingerprint-Based Localization Approach for WSN Using Machine Learning Models», *Appl. Sci.*, vol. 13, n.º 5, Art. n.º 5, ene. 2023, doi: 10.3390/app13053037.
- [21] C. S. Álvarez-Merino, H. Q. Luo Chen, J. Llanes Michel, E. J. Khatib, y R. Barco-Moreno, «Caracterización de UWB y WiFi FTM en obras», sep. 2022, Accedido: 12 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/25259>
- [22] J. Alcuña Alepuz, «Desarrollo de un dispositivo de seguimiento de obras de arte para el campus de la UPV», Proyecto/Trabajo fin de carrera/grado, Universitat Politècnica de València, 2022. Accedido: 12 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/187350>
- [23] García, Eva, «Técnicas de Localización en Redes Inalámbricas de Sensores», abr. 2017, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228705728_Tecnicas_de_Localizacion_en_Redres_Inalambricas_de_Sensores
- [24] M. Laouafy, F. Lakrami, O. Labouidya, y N. Elkamoun, «An experimental evaluation of localization methods used in wireless sensor networks», *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 25, n.º 3, pp. 1518-1528, 2022.
- [25] B. Jaimes Amador, A. A. Hernández Vanegas, y I. J. L. Hernández Márquez, «Implementación de un algoritmo para la detección del ataque wormhole a partir de características topológicas», ene. 2023, Accedido: 12 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/RepoFi/18233>
- [26] M. W. P. Maduranga y R. Abeysekera, «Bluetooth low energy (ble) and feed forward neural network (ffnn) based indoor positioning for location-based iot applications», *Int. J. Wirel. Microw. Technol. IJWMT*, vol. 12, n.º 2, pp. 33-39, 2022.
- [27] G. Fischer *et al.*, «Multimodal Indoor Localization: Fusion Possibilities of Ultrasonic and Bluetooth Low-Energy Data», *IEEE Sens. J.*, vol. 22, n.º 6, pp. 5857-5868, mar. 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3148529.
- [28] S. Shang y L. Wang, «Overview of WiFi fingerprinting-based indoor positioning», *IET Commun.*, vol. 16, n.º 7, pp. 725-733, 2022, doi: 10.1049/cmu2.12386.
- [29] H. Ye y J. Peng, «Robot Indoor Positioning and Navigation Based on Improved WiFi Location Fingerprint Positioning Algorithm», *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2022, p. e8274455, ene. 2022, doi: 10.1155/2022/8274455.
- [30] M. P. Lakshminarayanan, S. Prasanth, R. Rikesh, y R. Chandramouli, «Rssi Based Trilateration for Outdoor Localization in Zigbee Based On Smart Helmet», ene. 2023.
- [31] D. J. Suroso, F. Y. M. Adiyatma, P. Cherntanomwong, y P. Sooraksa, «Fingerprint Database Enhancement by Applying Interpolation and Regression Techniques for IoT-based Indoor Localization», *Emerg. Sci. J.*, vol. 4, pp. 167-189, 2022.
- [32] S. J. Hayward, K. van Lopik, C. Hinde, y A. A. West, «A Survey of Indoor Location Technologies, Techniques and Applications in Industry», *Internet Things*, vol. 20, p. 100608, nov. 2022, doi: 10.1016/j.iot.2022.100608.
- [33] G. Cerro, L. Ferrigno, M. Laracca, G. Miele, F. Milano, y V. Pingerna, «UWB-Based Indoor Localization: How to Optimally Design the Operating Setup?», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1-12, 2022, doi: 10.1109/TIM.2022.3194924.
- [34] G. G. Francisco Crizul, «Localización en interiores utilizando infraestructura de Internet de las Cosas.», 2021.
- [35] E. U. Ogbodo, A. M. Abu-Mahfouz, y A. M. Kurien, «A Survey on 5G and LPWAN-IoT for Improved Smart Cities and Remote Area Applications: From the Aspect of Architecture and Security», *Sensors*, vol. 22, n.º 16, Art. n.º 16, ene. 2022, doi: 10.3390/s22166313.
- [36] «¿Qué es sigfox? – SIGFOX». Accedido: 16 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://sigfox.com.py/que-es-sigfox/>

- [37] M. A. M. Almuahaya, W. A. Jabbar, N. Sulaiman, y S. Abdulmalek, «A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions», *Electronics*, vol. 11, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2022, doi: 10.3390/electronics11010164.
- [38] A. de Julián Martín, «Detección instantánea de incidencias en carreteras mediante Internet de las Cosas (IoT)». Accedido: 18 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91916/descargar_fichero/TFG-1916-DE+JULIAN.pdf
- [39] C. A. S. Jiménez y F. R. M. Rizo, «Arquitectura general del sistema LTE», *Telemática*, vol. 12, n.º 2, Art. n.º 2, jul. 2013.
- [40] A. Moradbeikie, A. Keshavarz, H. Rostami, S. Paiva, y S. I. Lopes, «GNSS-free outdoor localization techniques for resource-constrained IoT architectures: A literature review», *Appl. Sci.*, vol. 11, n.º 22, p. 10793, 2021.
- [41] P. Locatelli, P. Spadaccino, y F. Cuomo, «Ruling Out IoT Devices in LoRaWAN», en *IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, may 2022, pp. 1-2. doi: 10.1109/INFOCOMWKSHPS54753.2022.9798063.
- [42] W. Chanwattanapong, S. Hongdumnuen, B. Kumkhet, S. Junon, y P. Sangmahamad, «LoRa Network Based Multi-Wireless Sensor Nodes and LoRa Gateway for Agriculture Application», en *2021 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovation Electricals and Electronics (RI2C)*, sep. 2021, pp. 133-136. doi: 10.1109/RI2C51727.2021.9559804.
- [43] J. Rivas, «Arquitectura de red en LoRaWAN - LoRa», LoRa Panamá. Accedido: 18 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://lora-panama.com/arquitectura-de-red/>

SOBRE LOS AUTORES

- **Daniel Alejandro Sierra Perera:** Actualmente estudiante de cuarto año de la Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica de la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8451-4491>.
- **Gabriela Milián Teijeiro:** Actualmente estudiante de cuarto año de la Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica de la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9832-3405>.
- **Msc. Iván Quesada Hernández:** Título de Maestría en el ISPJAE. Especialista en sistemas de comunicaciones inalámbricas, análisis y estudio de protocolos de comunicación, análisis de señales radioeléctricas. Jefe de Operaciones de IMR *Telecommunications*. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6983-4284>.
- **Ing. Lisandra Pérez Roche:** Ingeniera en Telecomunicaciones y Electrónica en la CUJAE, La Habana, Cuba. Actualmente es Profesora de la Facultad de Telecomunicaciones y Electrónica de la CUJAE, ha impartido asignaturas como Electrónica Analógica e Instrumentación Virtual. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6957-6110>.
- **Msc. Pedro Manuel Perera Miniét:** Título de Maestría en el ISPJAE. Gerente general de la División Comercial de Telecomunicaciones, Videos y Sistemas (TVS), perteneciente a la Corporación Copextel, OSDE GELECT. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1971-8058>.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- **Daniel Alejandro Sierra Perera:** Conceptualización, preparación, creación, organización del estudio, desarrollo del artículo, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo y aprobación de la versión final a publicar.
- **Gabriela Milián Teijeiro:** Preparación, creación, organización del estudio, desarrollo del artículo y aprobación de la versión final a publicar.
- **Msc. Iván Quesada Hernández:** Conceptualización, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo, sugerencias acertadas para la conformación del mismo y aprobación de la versión final a publicar.
- **Ing. Lisandra Pérez Roche:** Organización del estudio, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo, sugerencias acertadas para la conformación del mismo y aprobación de la versión final a publicar.
- **Msc. Pedro Manuel Perera Miniét:** Revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo, sugerencias acertadas para la conformación del mismo y aprobación de la versión final a publicar.

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

