

UNA REVISIÓN SOBRE LOS SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN DE ROBOTS EN ENTORNOS INTERIORES: TÉCNICAS, TECNOLOGÍAS Y ALGORITMOS

A REVIEW ON ROBOT LOCATION SYSTEMS IN INDOOR ENVIRONMENTS: TECHNIQUES, TECHNOLOGIES AND ALGORITHMS

Gedeão Nunes de Oliveira Santos

Universidad de Quintana Roo, México
gedeaosanttos@gmail.com

Homero Toral Cruz

Universidad de Quintana Roo, México
htoral@uqroo.edu.mx

Freddy Ignacio Chan Puc

Universidad de Quintana Roo, México
freddy@uqroo.edu.mx

José Antonio León Borges

Universidad de Quintana Roo, México
jleon@uqroo.edu.mx

Julio Cesar Ramírez Pacheco

Universidad de Quintana Roo, México
juliocr@uqroo.edu.mx

José Raúl García Segura

Universidad de Quintana Roo, México
raulgarcia@uqroo.edu.mx

Recepción: 28/septiembre/2021

Aceptación: 30/noviembre/2021

Resumen

El tema de posicionamiento en interiores es un desafío muy importante en la robótica. Dado que el Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System - GPS) no está disponible en interiores, se deben considerar otros enfoques para localizar objetos en estos entornos. El objetivo de este trabajo es presentar una revisión de las principales técnicas, tecnologías y algoritmos utilizados en los

Sistemas de Localización en Interiores (Indoor Positioning Systems - ISP). Actualmente existe con un amplio abanico de técnicas, tecnologías y algoritmos para estimar la posición de un objeto en entornos interiores.

Después de revisar la literatura se propone una Red de Sensores Inalámbricos (Wireless Sensor Network - WSN) basada en la tecnología Bluetooth de bajo consumo de energía (Bluetooth Low Energy – BLE) y algoritmos de Multilateración (Multilateration - MLAT) para la localización en tiempo real de robots en movimiento. Las principales ventajas de los sensores BLE son el bajo costo implementación y consumo de energía; además, los algoritmos MLAT se distinguen por la eficiente implementación bajo diferentes tecnologías.

Palabras Claves: Sistemas de Localización en Interiores, Sistema de Posicionamiento Global, Bluetooth de Bajo Consumo de Energía, Indicador de Fuerza de la Señal Recibida, Multilateración.

Abstract

The indoor positioning issue is a very important challenge in robotics. Since the Global Positioning System (GPS) is not available indoors, other approaches for object location should be considered in these environments. The aim of this paper is to present a review of the main techniques, technologies, and algorithms used in the Indoor Positioning Systems (IPS). Currently, there is a wide range of techniques, technologies, and algorithms to estimate the position of an object in indoor environments.

After reviewing the literature, a Wireless Sensor Network (WSN) based on Bluetooth Low Energy (BLE) technology and Multilateration algorithms (MLAT) are proposed for the real-time location of robots in motion.

The main advantages of BLE sensors are the low implementation cost and energy consumption; besides, MLAT algorithms are distinguished by the efficient implementation under different technologies.

Keywords: *Indoor Positioning System, Global Positioning System, Bluetooth Low Energy, Received Signal Strength Indicator, Multilateration.*

1. Introducción

Actualmente, los sistemas IPS representan un reto importante en el despliegue de diversas aplicaciones, debido a la baja precisión de los métodos utilizados en la localización de objetos o por la falta de estandarización [1] [2] [3]. Las posibilidades para mitigar tales desafíos se manifiestan en muchas direcciones, ya que tenemos una amplia gama de técnicas y tecnologías bajo investigación [4] [5] [6] [7]; sin embargo, todavía no se ha logrado el desarrollo de un sistema unificado que proporcione alta precisión en el posicionamiento en interiores como los sistemas GPS utilizados para los servicios de navegación en áreas abiertas [1] [8] [9].

Una de las aplicaciones potenciales que requieren del funcionamiento eficiente de los sistemas de localización en interiores es la robótica, la cual ha evolucionado de brazos o estructuras estáticas a robots humanoides, *rovers*, péndulos móviles con ruedas, entre otros [10], los cuales se desplazan dentro de fábricas u hogares [11] [12]. En consecuencia, es fundamental contar con un sistema robusto que proporcione altos niveles de seguridad, control y precisión en la localización de robots en movimiento en entornos interiores.

Para realizar la localización de robots en entornos interiores, se necesita una red de sensores [2] [11], una técnica de localización y una tecnología de posicionamiento que permitan estimar una coordenada en un plano. En la literatura se han reportado diferentes técnicas de localización; tales como, información del estado del canal (Channel State Information - CSI), análisis de escena (Fingerprinting), ángulo de arribo (Angle of Arrival - AoA), tiempo de arribo (Time of Arrival - ToA), diferencia de tiempo de arribo (Time Difference of Arrival - TDoA), tiempo de retorno de vuelo (Return Time of Flight - RTof), fase de arribo (Phase of Arrival - PoA) e indicador de fuerza de la señal recibida (Received Signal Strength Indicator - RSSI); basadas en diversas tecnologías de comunicación por radio, luz visible y acústica: Wireless Fidelity (WiFi), Bluetooth de bajo consumo de energía (Bluetooth Low Energy – BLE), Zigbee, identificación de dispositivos por radio frecuencia (Radio Frequency Identification Device - RFID), banda ultra ancha (Ultra Wideband - UWB), luz visible, señal acústica y ultrasonido. Los sistemas de localización basados en la tecnología de redes de sensores BLE son ampliamente usados en el ámbito comercial por su

bajo costo de implementación y sus ventajas técnicas como reducido consumo energético, presencia ubicua e inmunidad al caos electromagnético debido a su espectro ensanchado por salto de frecuencia (Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS) [13] [14]. Por otro lado, en la literatura existen muchos estudios sobre la familia de algoritmos de localización conocida como MLAT; en los cuales se presenta como un método favorable y prometedor [3], debido a sus diversas aplicaciones en aeropuertos para favorecer el control de aeronaves y vehículos [15] [16] [17] y en el ámbito de la localización en interiores, como museos, edificios o fábricas [18]. Otro factor relevante de los sistemas de localización en interiores basados en la familia de algoritmos MLAT es su eficiente implementación bajo diversas tecnologías como Wi-Fi (Wireless Fidelity) [1] [19] o sonoras [20].

Con base a los puntos mencionados anteriormente, en este artículo se presenta una revisión general de las principales técnicas, tecnologías y algoritmos de localización en entornos interiores y se propone el uso de una WSN basada en la tecnología BLE y algoritmos MLAT.

Localización en Entornos Interiores

Con el fin de comprender mejor los desafíos que enfrenta la consolidación de la navegación en los espacios interiores, tomaremos como referencia el Sistema Global de Navegación por Satélite (Global Navigation Satellite System - GNSS), que ha obtenido gran éxito en la navegación en espacios exteriores; sin embargo, es necesario entender por qué no es factible en interiores. GNSS funciona utilizando la emisión de ondas electromagnéticas, provenientes de satélites que, mediante la técnica de trilateración, permiten identificar y posicionar con precisión un punto en la superficie del planeta [8].

También cabe destacar que estos sistemas se basan en un funcionamiento que favorecen la privacidad del dispositivo monitorizado, como vemos en la figura 1, donde a través de la emisión de señales de tres satélites diferentes (A, B, C) que están sobre la atmósfera terrestre, cuya órbita ya se conoce, emiten las señales de onda y el punto P representa al receptor que las absorbe y él mismo se encarga de ubicarse geográficamente [1] [3].

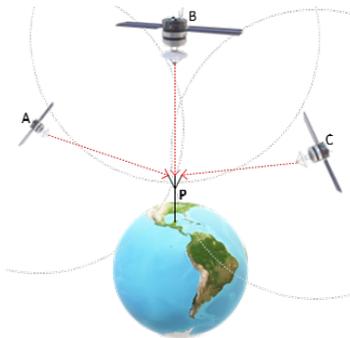


Figura 1 Funcionamiento del Sistema GNSS [6].

El funcionamiento de los sistemas GNSS se basa en el análisis de la distancia con respecto al tiempo, en este sentido mediante la técnica de ToA se puede estimar la distancia en función del tiempo de emisión y recepción de la onda, la cual se mueve a una velocidad constante en la atmósfera. Sin embargo, es importante considerar que estas mismas ondas electromagnéticas sufren interferencias del entorno, por ejemplo, al atravesar paredes, techos, o diferentes materiales, cambian su tiempo de recorrido, haciendo confusos los datos de propagación para obtener la misma precisión cuando se trata de espacios interiores. Identificamos aquí uno de los primeros grandes desafíos, pues en los espacios interiores la diversidad de configuraciones existentes hace complejo su análisis, el uso de técnicas de propagación de ondas enfrenta innumerables obstáculos como muebles, personas, estructura, puertas y ventanas que pueden dar paso libre en unas veces y otras no, son tantas las posibilidades que pueden existir que el sistema necesitaría considerar para seguir trabajando con precisión [8]. Los factores mencionados anteriormente conforman las principales limitantes en el uso de técnicas y tecnologías ya desarrolladas para la localización de objetos, las cuales abordaremos en las siguientes secciones. También, proporcionan un acercamiento inicial y contextualizan los retos a enfrentar en el desarrollo de un sistema estandarizado y preciso que solucione el problema de la navegación en interiores

Técnicas de Localización

En esta sección se describen las principales técnicas de localización utilizadas para ubicar un objeto en espacios interiores.

Indicador de Fuerza de la Señal Recibida (RSSI)

Esta técnica adquiere los datos para su análisis midiendo la intensidad de la señal recibida, de esta forma es capaz de obtener valores de distancia existentes entre el punto de envío (emisor) y el punto de recepción (receptor) (Figura 2).

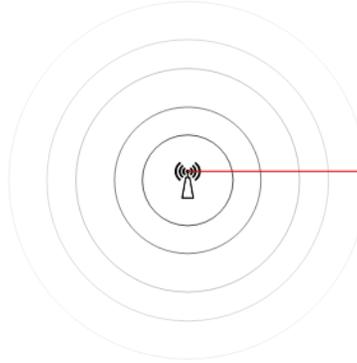


Figura 2 Atenuación de la Señal Transmitida en Función de la Distancia del Receptor [1].

Para adquirir dichos datos se utilizan medidas referidas a decibel-milivatios (mW), con estos valores es posible estimar la distancia entre el transmisor y el receptor, cuanto más fuerte es la señal, más cerca estás de la fuente. Utilizando la técnica de localización RSSI, la distancia entre el tag y la estación receptora puede ser estimada mediante la ecuación 1 [6] [7].

$$RSSI = -(10 \cdot n) \log_{10}(d) + A \quad (1)$$

Donde, $RSSI$ es el indicador de fuerza de la señal recibida (dB), d es la distancia que se desea estimar entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx), A es el valor RSSI a una distancia de referencia del receptor y n es el exponente de Path Loss, el cual varía entre 2 en el espacio libre a 4 en espacios interiores [1].

Información del Estado del Canal (CSI)

Las técnicas basadas en RSSI mencionadas anteriormente pueden sufrir interferencias o efectos de reflexión o difracción de la señal, conocido como multitrayectoria. Una técnica más compleja, que puede hacer frente a tales problemas es CSI. En donde, las diferencias entre el ancho de banda de coherencia y el ancho de banda de la señal de algunos sistemas inalámbricos como IEEE

802.11 y UWB proporcionan distintas amplitudes y comportamientos de la fase debido a la diferencia de frecuencias. Para obtener la información se usa la representación matemática en forma (Ecuación 2).

$$H(f) = |H(f)|e^{j\angle H(f)} \quad (2)$$

Donde $|H(f_i)|$ es la respuesta de amplitud o magnitud y $\angle H(f_i)$ la respuesta de fase de frecuencia f_i del canal [7]. Esta técnica permite obtener información referente a la amplitud y de las diferentes frecuencias, obteniendo así una información más completa y favoreciendo medidas más precisas.

Análisis de Escena (Fingerprinting)

Esta técnica se centra en el análisis del entorno donde se pretenden obtener los datos de ubicación. Esta información se puede obtener mediante el uso de sensores, utilizando las técnicas mencionadas anteriormente (RSSI o CSI), de esta manera se realiza una lectura del espacio en cuestión previamente (*offline phase*), después de obtener los datos se almacenan (*online phase*) y mediante el uso de algoritmos computacionales se realiza una lectura en tiempo real, haciendo una comparación entre la lectura anterior y la lectura actual. Para este análisis se pueden utilizar diferentes métodos tales como [6] [21]:

- Método Probabilístico
- Redes Neuronales Artificiales (Artificial Neural Networks - ANNs)
- k-Vecino más Cercano (k-Nearest Neighbor - kNN)
- Máquinas de Vectores de Soporte (Support Vector Machine - SVM)

En términos análogos podemos considerar una malla imaginaria sobre el espacio a estudiar, donde cada pequeño cuadrado corresponde a un punto de ubicación, siendo posible obtener una probabilidad de la ubicación del punto en cuestión, al comparar la lectura anterior y posterior del entorno. La densidad de esta malla es proporcional a la precisión. Un aspecto para tener en cuenta es que, debido a la necesidad de realizar mediciones previas y posteriores, esta técnica se ve fuertemente afectada por cambios en la configuración del espacio analizado [1].

Ángulo de Arribo (AoA)

Esta técnica hace uso de diferentes antenas en el dispositivo receptor; así, con la llegada de la señal se evalúa la diferencia de tiempo entre las antenas y se estima el ángulo de arribo, como se puede ver en la figura 3. Las diferentes antenas permiten analizar el *seno* del ángulo, obtener el tiempo de llegada de la señal y consecuentemente su distancia [22].

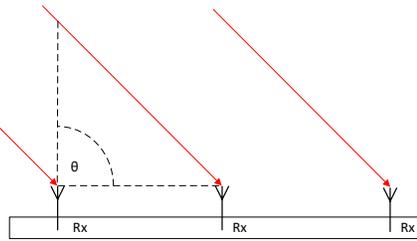


Figura 3 Representación de la Técnica AoA [7].

En esta técnica, la precisión en distancias cortas se considera óptima, pero a medida que se aleja del punto emisor, es más probable que tenga errores de lectura. Otro factor que considerar es la necesidad de emplear hardware más complejo y una perfecta calibración del dispositivo, ya que un pequeño error en este proceso puede proporcionar un error considerable del punto a localizar [6].

Tiempo de Arribo (ToA)

El tiempo de llegada de la señal es una técnica también implementada por los sistemas GPS, que analiza el tiempo de viaje de la señal desde el emisor al receptor. Para este análisis se utiliza una ecuación donde se analiza el tiempo de propagación de la onda para determinar la distancia (d_{ij}), ecuación 3.

$$d_{ij} = (t_2 - t_1) \cdot v \quad (3)$$

Sea t_1 el tiempo cuando el transmisor Tx_i envía un mensaje al receptor Rx_j , el cual lo recibe en el tiempo t_2 , donde $t_2 = t_1 + t_p$, t_p es el tiempo que toma la señal para moverse de Tx a Rx y v es la velocidad de propagación [23]. Para obtener los datos correctamente mediante esta técnica, se necesita sincronización entre los relojes del transmisor y receptor [6].

Diferencia de Tiempo de Arribo (TDoA)

Este método presenta algunas similitudes con el anterior (ToA), sin embargo, se diferencia en que evalúa la diferencia del tiempo de arribo de la señal entre diferentes transmisores. Para obtener la ubicación con cierta precisión es necesario utilizar un mínimo de tres transmisores, como podemos ver en figura 4.



Figura 4 Punto de Intersección de Transmisores Sincronizados [22].

Para obtener los valores de distancia $L_{D(i,j)}$, multiplicamos las diferencias de tiempo de arribo $T_{D(i,j)}$ por la velocidad de la luz c ($L_{D(i,j)} = c \cdot T_{D(i,j)}$) de los transmisores i y j . Teniendo en cuenta estos valores, podemos localizar la hipérbola de cada transmisor utilizando la ecuación 4 [7].

$$L_{D(i,j)} = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i + z)^2} - \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2 + (Z_j + z)^2} \quad (4)$$

Donde, los valores (X_i, Y_i, Z_i) son las coordenadas del transmisor o nodo de referencia i , y los valores (x, y, z) son las coordenadas del receptor o usuario. Una característica para considerar en esta configuración con respecto al método ToA es la necesidad de sincronización entre los transmisores [22].

Fase de Arribo (PoA)

PoA se caracteriza por el análisis del tiempo mediante la diferencia de fase de la señal portadora, pudiendo determinar de esta manera la distancia entre el transmisor y el receptor. Este método se puede utilizar en conjunto con otros

métodos como RSSI, ToF y TDoA, incrementando la precisión de la estimación, sin embargo, carece de una línea de visión recta, lo que a menudo es raro en ambientes interiores debido a su configuración [7].

Existen diferentes formas de obtener los valores de fase de la onda mediante la técnica de PoA, una de las cuales es considerar que existe un retraso en la recepción de onda entre diferentes antenas receptoras, donde la onda cae sobre una fase ligeramente diferente para cada uno de estos, figura 5. Un punto por considerar es que, para obtener valores correctos y mayor precisión, se requiere una línea de envío limpia y recta entre transmisores y receptores, algo que muchas veces es incierto considerando su uso en interiores.

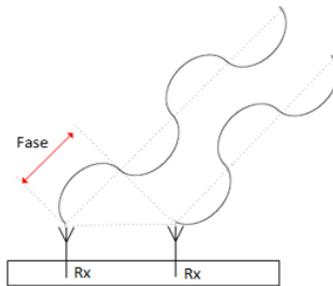


Figura 5 Fase de Arribo de la Señal [7].

Tiempo de Retorno de Vuelo (RToF)

Esta técnica tiene como característica principal la medición del tiempo de viaje de la onda (transmisor-receptor-transmisor), considerando el tiempo de propagación de la señal y obteniendo así la distancia entre ellos. Un factor para considerar es la necesidad de sincronización entre los relojes del transmisor y el receptor, similar a la técnica ToA.

Su implementación en espacios interiores presenta algunos problemas que la limitan, como el factor de análisis de la onda de retorno, que es diferente al ToA, ya que debemos considerar dos viajes (ida y regreso) y el error en este doble análisis puede aumentar considerablemente. Otro punto es que para completar el análisis se requiere evaluar el tiempo de retorno de la onda, en ese punto tenemos que considerar que dependiendo del tipo de equipo (receptor-transmisor), ese puede influir en el análisis, como el tipo de *hardware* y su electrónica involucrada.

Para obtener los valores del recorrido de la onda considerando la ida y el regreso, podemos usar la ecuación 5.

$$dist_{ij} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} \cdot v \quad (5)$$

Sea el tiempo t_1 el momento en el que el transmisor Tx_i envía un mensaje al receptor Rx_i , el cual lo recibe en el tiempo t_2 , donde $t_2 = t_1 + t_p$. Posteriormente en el tiempo t_3 , Rx_i transmite una señal de regreso a Tx_i , el cual lo recibe en el tiempo t_4 y v es la velocidad de propagación [23].

2. Métodos

Tecnologías de Localización

En esta sección se describen las principales tecnologías utilizadas para la localización de objeto en espacios interiores; sin embargo, es importante mencionar que existen otras en estudio, como el uso del campo magnético terrestre, que, a pesar de sus procesos cambiantes e inciertos, sigue siendo un campo de investigación, o incluso el uso de sensores como giroscopios, osciloscopios, entre otros, para proporcionar datos más puntuales en el proceso de localización.

Uno de los principales retos de las tecnologías a abordar es la estandarización, tomando en consideración que cada tecnología tiene limitaciones y diferentes procesos de implementación. Además, se encuentran dispersas en muchos campos ya desarrollados, y proporcionan cierto nivel de precisión en función del hardware y software utilizado [1].

Cámaras / Imágenes

Con un margen de precisión bueno, que puede ir desde 0.1 mm en adelante, este tipo de análisis utiliza la medida del ángulo formado por las imágenes u objetos monitorizados como principio de obtención de datos.

Muy utilizado en campo para aplicaciones que requieren medidas exactas o también para la navegación de un robot, tiene un margen de cobertura de hasta 10 m, que en general sería el rango visual de la cámara.

Luz Visible o no Visible

El uso de la luz para obtener datos de medicación puede darse de dos formas, con espectros de luz invisible, como el uso de infrarrojos, obteniendo valores de distancia o datos térmicos, favoreciendo la detección de personas o conduciendo dispositivos robóticos.

Otro punto prometedor para el uso de ondas de radiación electromagnética se encuentra en el campo de la luz visible; donde, por medio de una cámara se puede obtener lectura de la frecuencia de funcionamiento de las lámparas, aunque este parpadeo no es visible para el ojo humano, las cámaras lo detectan fácilmente, como en el caso de los LED. De esta manera, se pueden asignar códigos únicos a cada lámpara para tener un registro de su ubicación y facilitar la navegación (Figura 6) [4] [24].

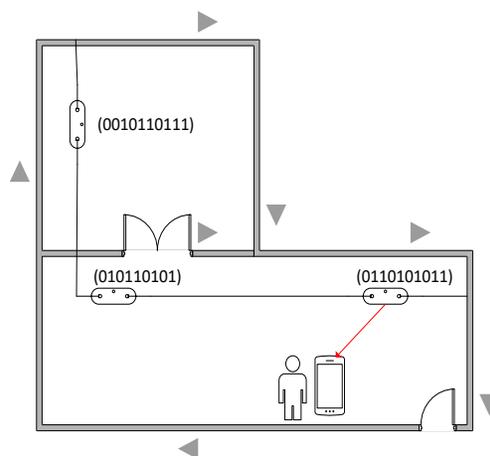


Figura 6 Navegación basada en Luz Visible [4].

Ondas Sonoras

En este campo encontraremos sensores ultrasónicos, que pueden utilizar la emisión de ondas y la recepción de eco para estimar la distancias en el proceso de localización. Estos sistemas pueden operar en un rango de 2 cm y hasta 10 metros, aunque pueden sufrir muchas interferencias del entorno, provocando lecturas inexactas. A menudo se implementan técnicas como ToF para la estimación, tomando en cuenta el tiempo de vuelo y retorno de la señal, considerando también que, al tratarse de una onda mecánica, puede regresar debido al encuentro de algún cuerpo en el camino. Un ejemplo muy utilizado para este tipo de sistemas es el uso

del micrófono de los teléfonos inteligentes, para ubicar dichos dispositivos dentro de un espacio determinado [7] [20].

WLAN / WiFi / Bluetooth

Dentro de este campo tenemos muchas tecnologías prometedoras que ya se utilizan en muchas aplicaciones. El uso de las ondas electromagnéticas en la localización permite operar en un rango de más de 50 metros y en estas tecnologías podemos implementar diferentes técnicas para la obtención de los datos, tales como el uso de redes neuronales o algoritmos que incrementen la precisión.

El uso de WLAN y tecnologías relacionadas como WiFi y bluetooth son muy prometedoras, especialmente debido a la posibilidad de implementación con pocos o ningún cambio en la infraestructura existente.

Estas tecnologías son aceptables con numerosas técnicas para obtener un valor de distancia (RSSI, ToA, TDoA, AoA), y actualmente tenemos implementados muchos dispositivos comercialmente populares que también utilizan la emisión de ondas de radio.

En esta tecnología, existe la necesidad de reconocimiento y detección de cada onda emitida; por tanto, se produce un aumento en el consumo de energía, dando lugar a la búsqueda de un equilibrio entre el consumo y el retardo de posicionamiento [22]. Aun así, sigue siendo una de las posibilidades más prometedoras para satisfacer las necesidades de un sistema de navegación en entornos interiores.

Dentro de estas tecnologías, cabe destacar la presencia de los dispositivos Bluetooth de bajo consumo de energía.

BLE

Los dispositivos BLE funcionan en una banda de 2.4 GHz y se basan en radiofrecuencia (RF). A pesar de ser muy similar al Bluetooth común, podemos considerar al BLE como una nueva tecnología, muy particular en ciertos puntos y que logró ganancias considerables sobre el bluetooth de la versión anterior, ya que a partir de la versión v4.0, cuando fue implementado, obtuvieron mejoras que favorecieron ganancias significativas en su rendimiento [25] [13].

La tecnología BLE utiliza una carga de baja energía para funcionar, lo que se diferencia mucho de sus versiones anteriores de Bluetooth. De esta forma pueden permanecer en funcionamiento durante largos periodos con un bajo consumo energético, esto hizo que se empleara masivamente en dispositivos relacionados con Internet de las cosas, aplicaciones automotrices, en estructuras domóticas y ha sido utilizado y estudiado con buenas perspectivas en sistemas de localización de objetos o personas en espacios interiores [13].

Es importante aclarar algunos conceptos sobre la tecnología BLE; por ejemplo, su empleabilidad puede darse de dos formas, como dispositivos centrales o periféricos como se puede ver en figura 7. Los dispositivos centrales se caracterizan por gestionar la comunicación, cuentan con software que permite controlar la interacción entre ellas; a diferencia de los dispositivos periféricos, que transmiten señales y tienen su propia referencia de transmisión, lo cual los hace únicos.

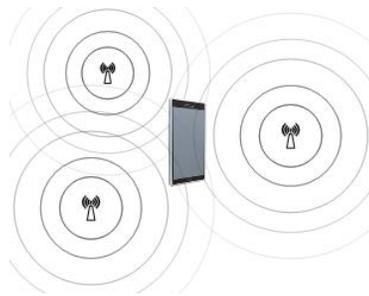


Figura 7 Representación de Dispositivos BLE Periféricos y Centrales.

Estos dispositivos se caracterizan por la transmisión de una onda electromagnética, que viaja a la velocidad de la luz y mediante el análisis de la señal transmitida es posible determinar la distancia. Una forma es mediante el análisis de la intensidad de la recepción de la señal (RSSI), de esta manera es posible implementar un sistema de localización, combinando la técnica y tecnología mencionadas [8].

Algoritmos MLAT

Los algoritmos de la familia MLAT son un conjunto de códigos que emplean diferentes estructuras y funciones matemáticas que se puede utilizar para determinar una posición espacial en un plano cartesiano.

En términos generales podemos clasificar estos algoritmos estructurados en tres grupos: estadísticos, algebraicos y numéricos; donde, la relación de la geometría del sistema y el tipo de las ecuaciones aplicadas para resolver el problema definen el tipo de algoritmo [17] [26]. Estos grupos de algoritmos se encuentran dentro de dos grandes familias, algoritmos abiertos o cerrados. En la primera familia encontramos algoritmos estadísticos y en la segunda familia tenemos los algoritmos numéricos y algebraicos.

Algoritmo de la Serie de Taylor

Inicialmente, la literatura muestra que solo se aplicó el algoritmo de la serie de Taylor utilizando un modelo de datos algebraicos, sin embargo, posteriormente se analizó dentro del mismo problema, pero con procedimientos estadísticos. Por lo tanto, en términos generales, podemos tener la expresión de un algoritmo de la serie de Taylor que expresa TDoA como se muestra en la ecuación 6.

$$m_{i,1} \equiv cTDOA_{i,1} = (f_i(x, y, z) - f_1(x, y, z)) + n_{i,1} \quad (6)$$

Donde tendremos la presencia del ruido expresada por $n_{i,1}$ y apunta al radio de diferencia de medida entre n estaciones y una de referencia.

Para el procedimiento de análisis de estos valores, el procedimiento interactivo viene dado por el hecho de que analiza una diferencia euclidiana comparativa; donde, cuando la diferencia presentada es pequeña el algoritmo detiene el refinamiento o si es grande, continúa el procedimiento de refinamiento. Los algoritmos de la serie Taylor necesitan tomar como referencia un punto de partida; por ejemplo, en ambientes exteriores como superficies de aeropuerto se toma la parte central. Sin embargo, para espacios cerrados, este punto se puede considerar a partir de la ejecución previa del algoritmo en su forma cerrada [16] [17].

Algoritmo Schmidt (Plano de intersección)

Este algoritmo toma como análisis el estudio entre 3 estaciones con posiciones conocidas donde, mediante una forma cónica, establece una posible posición de la ubicación desconocida. Hace uso de una manipulación algebraica para que, mediante el uso de varias ecuaciones, pueda determinar el punto en cuestión, para

resolver el problema lineal inverso, no utiliza ninguna forma estadística o numérica. Un factor favorable en este tipo de procedimiento es que el requerimiento computacional es relativamente muy bajo [27].

Algoritmo de Abel y Smith (interpolación esférica)

En este tipo de algoritmo tenemos la resolución aplicada entre la interacción de al menos dos puntos de referencia (balizas), convergiendo el punto desconocido mediante el análisis de un punto de referencia, donde la interacción entre ellos determina un posible punto en cuestión. Considerando el análisis de ubicación en dos dimensiones 2D, este tipo de algoritmo solo requiere el uso de 2 balizas y para el análisis 3D se necesitan 4 balizas, teniendo un enfoque numérico y como factor favorable, requiere un bajo costo computacional para la resolución [17].

Friedlander (interpolación esférica)

Muy similar al algoritmo presentado previamente (Abel y Smith), este utiliza una interpolación esférica para señalar dos posibles posiciones para el punto a ubicar, el factor diferencial es que Friedlander opta por eliminar una de estas dos posibles posiciones desconocidas haciendo uso de los parámetros del modelo de datos empleado. Como base, este algoritmo tiene un enfoque numérico y tiene un bajo costo computacional para resolver el problema [17].

Schau e Robinson (intersección esférica)

Este algoritmo se enfoca en el uso de una intersección esférica, donde la distancia viene dada por el radio de los emisores en posiciones conocidas, el centro del radio denota su posición de envío y la intersección de estas la posible posición a encontrar. El algoritmo presenta dos posibles soluciones para resolver el problema, y es necesario implementar un procedimiento para elegir dicha solución. El algoritmo está estructurado en un modelo de datos numéricos y un punto diferencial respecto a los algoritmos de Abel y Smith y Friedlander; tiene un costo computacional más alto que los anteriores, pero aún se considera relativamente bajo [17] [26].

Chan y Ho (interpolación esférica con corrección cuadrática)

Este algoritmo es similar a otros ya presentados en secciones anteriores, hace uso de un principio de interpolación esférica (Abel y Smith), este modelo presentado por Chan y Ho presenta una mejora con respecto a los anteriores, la cual está dada por una corrección numérica, aplica la resolución del problema inverso, y no precisamente a un nuevo punto de ubicación. Cabe señalar que esta corrección muchas veces apunta a valores que son inversos a los buscados, y cuando converge a lo deseado (la ubicación real) presenta mejoras, sin embargo, al aplicar esta corrección cuadrática, puede presentar alta inexactitud. Su modelo de datos es numérico y tiene un costo computacional superior a los algoritmos presentados anteriormente [15] [16].

Bancroft

Este algorítmico tiene ciertas características que difieren de los modelos presentados hasta ahora, como por ejemplo utilizar un análisis basado en la técnica ToA e inicialmente este fue desarrollado para aplicaciones GPS. Tiene un enfoque en el modelo de datos algebraicos y no puede asumir un factor numérico o estadístico. El factor principal de este modelo de algoritmo es hacer uso de ecuaciones basadas en el método ToA y consecuentemente en ocasiones puede ser necesario trabajar con números complejos, haciendo que se extraiga la parte real de estos números. Un punto relevante es que su costo computacional es bastante bajo [17] [26].

3. Resultados

El tema de localización de robots en entornos interiores presenta diversos retos en función de las variables a utilizar en el desarrollo de un sistema de esta naturaleza: técnicas, tecnologías y algoritmos. En esta sección se presentan diversos esquemas que permiten clasificar, comparar, evaluar y describir dichas variables.

La tabla 1 presenta las ventajas y desventajas de las principales técnicas de localización utilizadas para ubicar un objeto en espacios interiores [1] [7].

Tabla 1 Técnicas de Localización: Ventajas y Desventajas [7].

Técnica	Ventajas	Desventajas
RSSI	Fácil de implementar, costo financiero competitivo y se puede utilizar con muchas tecnologías.	Propenso a trayectos múltiples y al ruido ambiental, menor precisión de localización, puede requerir fingerprinting
CSI	Más robusto al ruido interior y a la multitrayectoria.	No está fácilmente disponible en la tarjeta de interfaz de red estándar.
AoA	Puede proporcionar una alta precisión de ubicación y no requiere fingerprinting.	Puede requerir antenas direccionales y hardware complejo, requiere algoritmos comparativamente complejos y el rendimiento se deteriora con el aumento de la distancia entre el transmisor y el receptor.
ToF	Proporcionar una alta precisión de ubicación y no requiere fingerprinting.	Requiere sincronización entre los transmisores y los receptores, puede requerir marcas de tiempo y múltiples antenas en el transmisor y el receptor. La línea de visión es obligatoria para un rendimiento preciso.
TDoA	No requiere ningún fingerprinting, no requiere sincronización de reloj entre los dispositivos Tx y Rx .	Requiere sincronización entre dispositivos transmisores, puede requerir marcas de tiempo, requiere mayor ancho de banda.
RTof	No requiere ninguno fingerprinting, puede proporcionar una alta precisión de localización.	Requiere sincronización de reloj, el retraso de procesamiento puede afectar el rendimiento en mediciones de rango corto.
PoA	Se puede utilizar junto con RSS, ToA, TDoA para mejorar la localización general.	Rendimiento degradado en ausencia de línea de visión.
Fingerprinting	Bastante fácil de usar.	Se requiere fingerprinting cuando hay cualquier variación en el espacio.

Por otro lado, es importante mencionar que las tecnologías de localización determinan cómo se emplearán las técnicas mencionadas en la tabla 1. También es notable, que la mayoría de las tecnologías se basan en el uso de ondas electromagnéticas u ondas mecánicas [20] [25]. La combinación de varias tecnologías es un camino viable, permitiendo cubrir una gama más amplia de características o requisitos importantes en el desarrollo de los sistemas de localización. La Figura 8 muestra un conjunto de requisitos que dificultan la combinación de tecnologías en la búsqueda de procesos más estandarizados.



Figura 8 Requisitos que Dificultan La Combinación de Tecnologías [17].

La tabla 2 presenta las principales tecnologías, sus características a considerar en la implementación de sistemas de localización en interiores y aplicaciones más comunes de cada tecnología.

Tabla 2 Características y Aplicaciones de las Tecnologías de Localización [4].

Tecnología	Precisión	Cobertura (m)	Principios de medición	Posibles aplicaciones
Cámaras	0.1 mm-dm	1-10	Medidas de ángulos a partir de imágenes	Metrología, navegación para robots
Infrarojo	cm - m	1 – 5	Imágenes térmicas, balizas activas	Detección de personas, seguimiento
Sistemas táctiles o polares	µm – mm	3 – 2000	Mecánico - interferometría	Automotriz, metrología
Sonido	cm	2 - 10	Distancia desde la hora de llegada	Hospitales, seguimiento
WLAN/WiFi	m	20 – 50	<i>Fingerprinting</i>	Navegación peatonal, servicios basados en localización.
RFID	dm – m	1 – 50	Detección de proximidad, <i>Fingerprinting</i>	Navegación peatonal
Ultra-Wideband	cm - m	1 - 50	Reflexión corporal y hora de llegada.	Robótica, automatización
GNSS de alta sensibilidad	10 m	“Global”	Correlación paralela, GPS asistente	Servicios basados en localización
Pseudolitos	cm - dm	10 - 1000	Rango de fase portadora	GNSS para minas al aire libre
Otra radiofrecuencia	m	10 - 1000	Proximidad y <i>Fingerprinting</i>	Seguimiento de persona
Navegación inercial	1%	10 - 100	estimacion	navegación peatonal
Sistemas magnéticos	mm - cm	1 - 20	<i>Fingerprinting</i> y rango	Hospitales y minas
Sistemas de infraestructura	cm - m	Edificio	<i>Fingerprinting</i> y capacidad	Ambientes Asistidos

Para seleccionar alguna tecnología, es importantes determinar cuál es más viable en función de sus características. Por ejemplo, en algunas aplicaciones la precisión del sistema no es lo más importante; sin embargo, el tipo de hardware a usar puede ser un factor que defina la factibilidad en relación con el costo de implementación. El desarrollo de un sistema estandarizado tiene como principal barrera el costo de implementación, debido a que este factor puede estar vinculado a cambios estructurales importantes en el lugar a implementar [4].

La figura 9 muestra una descripción gráfica de la relación entre la precisión y cobertura que ofrecen algunas tecnologías de localización. De esta manera, podemos identificar los principales retos que enfrenta un sistema unificado y estándar, en función de la precisión y cobertura.

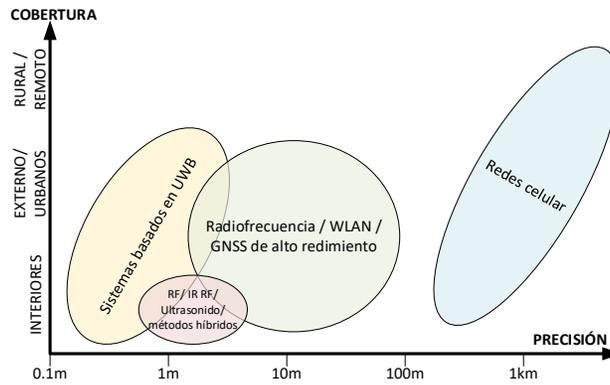


Figura 9 Relación entre Cobertura y Precisión de las Tecnologías de Localización [4] [1].

La literatura tiene un fuerte enfoque en los sistemas basados en WLAN, especialmente por su presencia comercial en muchos equipos y también porque tienen buena cobertura considerando su aplicación para espacios interiores. Adicionalmente a lo anterior, el bajo consumo de energía de los sensores BLE, les permite permanecer en funcionamiento durante largos periodos de tiempo y ser usados masivamente en dispositivos relacionados con Internet de las cosas, aplicaciones automotrices, estructuras domóticas, convirtiéndolos en una tecnología potencial para la implementación de sistemas de localización en entornos interiores [14] [25].

Una técnica ampliamente usada en los sistemas de monitoreo aeroportuaria y que resulta prometedora para la navegación en interiores es TDoA, sobre todo porque no se necesita sincronismo entre transmisor y receptor, solo es importante el sincronismo entre los nodos transmisores. Por lo tanto, ofrece autonomía para que cualquier dispositivo asistido utilice el sistema con solo ingresar a su campo de cobertura. En la figura 10 podemos ver la representación de una arquitectura haciendo uso del despliegue de sensores BLE, y un dispositivo robótico que, mediante la técnica TDoA, se ubica en ese espacio. Cabe señalar que, en esta arquitectura, debido a la técnica implementada, es necesario contar con un mínimo de 3 o más sensores para permitir una ubicación en 2 dimensiones (2D), incluso si se trata de un espacio pequeño.

Diversos estudios en la literatura recomiendan la utilización de los algoritmos de la familia MLAT por la eficiente implementación bajo diferentes tecnologías.



Figura 10 Localización de un Robot mediante Sensores BLE y TDoA.

Los algoritmos MLAT se clasifican en estadísticos, algebraicos y numéricos. Para determinar la posición espacial en un plano cartesiano es importante considerar la interacción de dos factores de los algoritmos MLAT: modelo de datos y tipo de algoritmo numérico [26].

El modelo de datos se considera cuando convertimos el elemento escalar a una forma vector-matriz, con el fin de manejar la relación de N_s puntos de datos (beacons), definiendo así el modelo que puede tener un enfoque estadístico, algebraico o numérico. En la tabla 3 se presentan los principales algoritmos de multilateración, mencionando algunas características de cada uno de ellos [17].

Tabla 3 Algoritmos MLAT [17].

Algoritmo	Modelo de datos	Tipo	Ruidos
Schmidt	Algebraico	Direto	Cúbico lineal
Taylor	Estadístico	Indireto	Linear
Smith and Abel	Numérico	Direto	Cuadrático
Friedlander	Numérico	Direto	Cuadrático
Schau and Robinson	Numérico	Direto	Cuadrático
Chan and Ho	Numérico	Direto	Cuadrático
Bancroft	Algebraico	Direto	Linear Cuadrático

Las principales características que los definen y ayudan a clasificarlos son las siguientes: el modelo de datos (algebraico, estadístico o numérico), el tipo de interacción (directa o indirecta) y finalmente el problema de linealización (ruido).

Profundizando en cada uno de estos tipos, tendremos dos grandes grupos, el primero relacionado con los algoritmos de "forma abierta" y luego con los algoritmos de "forma cerrada".

En los algoritmos de forma abierta (Open Form Algorithms), esta definición se relaciona con el problema de la linealización, donde este tipo de algoritmos generalmente tienen procedimientos interactivos y necesitan definir un punto de partida o referencia. En este grupo se encuentra el algoritmo de la serie Taylor.

Por otro lado, tenemos un conjunto de algoritmos llamados forma cerrada (Closed Form Algorithms), que se define por la relación cuadrática entre la diferencia de medición m y la posición desconocida θ . Una característica interesante de este grupo de algoritmos es que no necesita un punto de partida para encontrar la solución al problema. Dentro de este grupo tenemos los siguientes algoritmos [17] [26]: Schimidt, Smith and Abel, Friedlander, Schau and Robinson, Chan and Ho, y Bancroft.

4. Discusión y conclusiones

El este artículo se presenta una revisión de las principales variables (técnicas, tecnologías y algoritmos) a utilizar en la localización de objetos en entornos interiores. Existen muchas opciones de combinar dichas variables para la implementación de un sistema de localización; sin embargo, cada opción representa retos específicos. Los sistemas de localización basados en la tecnología de redes de sensores BLE y algoritmos de la familia MLAT presentan un compromiso equilibrado entre la precisión y la complejidad computacional. Diversos estudios también recomiendan analizar implementaciones con métodos estadísticos, técnicas de regularización (Tikhonov y SVD) y Machine Learning (ML) [7], para incrementar la precisión de la estimación [26] [17]; sin embargo, es importante considerar el incremento de la complejidad computacional [28].

5. Bibliografía y Referencias

- [1] R. Mautz, Indoor positioning technologies, Zurich: ETH Zurich Research Collection, 2012.
- [2] R. N. a. M. I. Zahid Farid, «Recent Advances in Wireless Indoor Localization Techniques and System,» Journal of Computer Networks and Communications, nº Article ID 185138, p. 12, 2013.

- [3] J.-Y. P. Santosh Subedi, «A Survey of Smartphone-Based Indoor Positioning,» *Sensors*, vol. 7230, n° doi:10.3390/s2024723, p. 20, 2020.
- [4] P. & P. R. Davidson, "A Survey of selected Indoor Positioning Methods for Smartphones," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016.
- [5] A. K. M. M. Hossain, *An Indoor Positioning System Based on Robust Location Fingerprint for Wi-Fi and Bluetooth*, Singapore,: 2009, 2009.
- [6] J. P. G.-V. C. E. G.-T. D. M.-R. C. V.-R. a. J. F. J. Ramon F. Brena, «Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey,» *Journal of Sensors*, n° Article ID 2630413, p. 21, 2017.
- [7] S. A. G. K. K. L. Faheem Zafari, «A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, n° DOI 10.1109/COMST.2019.2911558, p. 32, 2019.
- [8] N. Samama, *Indoor Positioning - Technologies and performance*, Hoboken, New Jersey: JohnWiley & Sons, Inc, 2019.
- [9] S. H. & G. Chan, «Wi-Fi Fingerprint-based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons.,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials.*, n° DOI 10.1109/COMST.2015.2464084, 2015.
- [10] J. Angeles, *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems*, Montreal, QC, Canada: Springer International Publishing Switzerland, 2014.
- [11] L. Jaulin, *Mobile Robotics*, Published by ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2019.
- [12] «Boston Dynamics,» [En línea]. Available: <https://www.bostondynamics.com/stretch>. [Último acceso: 27 06 2021].
- [13] F. T. M. S. R. S. D. F. Jacopo Tosi, «Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy:,» *Sensors*, vol. 2898, n° doi:10.3390/s17122898, p. 17, 2017.
- [14] R. Heydon, *Bluetooth Low Energy - The Developer's Handbook*, New Jersey.: Pearson Education, Inc., 2013.
- [15] M. L. a. G. G. Adolf Mathias, «An Efficient Multilateration Algorithm,» de *Proceedings of ESAV'08*, Capri, Italy, 2008.
- [16] I. A. M. Gaviria, *New Strategies to improve multilateration systems in the air traffic control*, Valencia, Spain: Universitat Politècnica de Valencia, 2013.

- [17] A. M. a. G. G. Mauro Leonardi, «Two efficient localization algorithms for multilateration,» *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, n° doi:10.1017/S1759078709000245, pp. 223-229, 2009.
- [18] L. M. A. L. P. B. a. M. D. C. Alberto Fornaser, «Self-Weighted Multilateration for Indoor positioning systems,» *Sensors*, vol. 872, n° 19, 2019.
- [19] Y. L. G. Y. M. Z. a. Z. W. Shixiong Xia, «Indoor Fingerprint Positioning Based on Wi-Fi: An Overview,» *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 135, n° doi:10.3390/ijgi6050135, p. 6, 2017.
- [20] C. G. G. P. Srd̄ an Kitic´, «A Comparative Study of Multilateration Methods for Single-Source Localization in Distributed Audio,» de To appear at IWIS - The 1st International Workshop on the Internet of Sounds, Cesson-Sévigné, France, 2020.
- [21] R. M. Ó. B. a. J. T.-S. Emilio Sansano, «Indoor Positioning and Fingerprinting: The R Package ipft,» *The R Journal*, vol. 11, 2019.
- [22] Y. N. M. A. A. A.-D. R. L. C. Y. R. R. a. E. A. Ali Yassin, «Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications,» *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, vol. 19, n° 2, 2017.
- [23] W. D. a. C. Poellabauer, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks - Theory and Practice*, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2010.
- [24] T. L. Y. W. A B M Mohaimenur Rahman, «Recent Advances in Indoor Localization via Visible Lights: A Survey,» *Sensors*, vol. 20, 2020.
- [25] H. Espeland, *Navigation using Bluetooth Low Energy Beacons.*, Trondheim, Noruega: Norwegian University of Science and Technology, 2018.
- [26] M. L. G. G. a. J. V. B.-T. Ivan A. Mantilla-Gaviria, «Localization algorithms for multilateration (MLAT) systems in airport surface surveillance,» Springer-Verlag, n° DOI 10.1007/s11760-013-0608-1, 2014.
- [27] R. O. SCHMIDT, «A Nevv Approach to Geometry of Range Difference Location,» *IEEE Interstate Electronics Corporation*, vol. 8, n° 6, 1972.
- [28] R. M. a. M. F. Benoit Figueet, «Combined Multilateration with Machine Learning for Enhanced Aircraft Localization,» *Proceedings*, vol. 2, n° doi:10.3390, p. 59, 2020.