

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**GRADO EN INGENIERÍA DE
TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS DE
TELECOMUNICACIÓN**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO DE APLICACIÓN PARA
SIMULACIÓN DE TÉCNICAS DE
POSICIONAMIENTO CON FRECUENCIAS
5G EN INTERIORES**

DANIEL RUIZ PÉREZ

2024

GRADO EN TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Título: Diseño de aplicación para simulación de técnicas de posicionamiento con frecuencias 5G en interiores.

Autor: D. Daniel Ruiz Pérez

Tutor: D. José Manuel Riera Salís

Ponente: D.

Departamento: Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Presidente: D.

Vocal: D.

Secretario: D.

Suplente: D.

Los miembros del tribunal arriba nombrados acuerdan otorgar la calificación de:
.....

Madrid, a de de 2024

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y
SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO DE APLICACIÓN PARA SIMULACIÓN
DE TÉCNICAS DE POSICIONAMIENTO CON
FRECUENCIAS 5G EN INTERIORES**

DANIEL RUIZ PÉREZ

2024

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) se enmarca en el ámbito de las tecnologías de posicionamiento, que permiten determinar la ubicación de un objeto o una persona en un entorno determinado. En concreto, se centra en el uso de las frecuencias 5G, que son las últimas generaciones de redes móviles que ofrecen una mayor capacidad, velocidad y fiabilidad de transmisión de datos.

El objetivo principal de este TFG es diseñar una aplicación para simular técnicas de posicionamiento con frecuencias 5G en interiores, donde otras tecnologías como el GPS tienen dificultades para proporcionar una localización precisa y robusta. La aplicación se desarrolló en Matlab, un lenguaje de programación y entorno de cálculo científico muy utilizado en ingeniería.

Para ello, se ha realizado un estudio teórico de los conceptos básicos del posicionamiento con frecuencias 5G, así como de las principales técnicas que se pueden emplear para estimar la posición de un dispositivo móvil. Estas técnicas son: Tiempo Diferencial de Llegada (TDoA), Ángulo de Llegada (AoA), Tiempo de Vuelo (ToF) y Potencia de señal recibida (RSS). Se hizo un análisis de las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas, así como los factores que pueden afectar a su rendimiento, como el ruido, la interferencia o los obstáculos físicos.

A continuación, se implementó una simulación de la técnica TDoA, que consiste en medir la diferencia de tiempo que tardan las señales emitidas por el dispositivo móvil en llegar a varias estaciones base. La simulación tendrá en cuenta las características de las frecuencias 5G, así como las condiciones del entorno interior, como el número y la disposición de las estaciones base, la presencia de paredes, muebles u otros objetos, o el rango de frecuencias a utilizar. La aplicación permitirá modificar estos parámetros y obtener los resultados de la estimación de posición, así como las posibles fuentes de error.

Finalmente, se evaluó el funcionamiento de la aplicación y se extrajeron conclusiones sobre la viabilidad y la precisión del posicionamiento con frecuencias 5G en interiores. Se propusieron también posibles mejoras y líneas de trabajo futuro para ampliar y optimizar la simulación y el diseño de la aplicación.

SUMMARY

In this thesis is framed within the field of positioning technologies, which enable the determination of the location of an object or a person in a given environment. Specifically, it focuses on the use of 5G frequencies, which are the latest generations of mobile networks that offer greater capacity, speed, and reliability in data transmission.

The main objective of this thesis is to design an application to simulate positioning techniques with 5G frequencies indoors, where other technologies such as GPS have difficulties in providing precise and robust localization. The application was developed in Matlab, a programming language and scientific computing environment widely used in engineering.

To achieve this, a theoretical study has been conducted on the basic concepts of positioning with 5G frequencies, as well as on the main techniques that can be used to estimate the position of a mobile device. These techniques are Time Difference of Arrival (TDoA), Angle of Arrival (AoA), Time of Flight (ToF), and Received Signal Strength (RSS). The advantages and disadvantages of each technique has been analyzed, as well as the factors that can affect their performance, such as noise, interference, or physical obstacles.

Next, a simulation of the TDoA technique implemented took place, which involved measuring the time difference it takes for signals emitted by the mobile device to reach several base stations. The simulation considers the characteristics of 5G frequencies, as well as the conditions of the indoor environment, such as the number and arrangement of base stations, the presence of walls, furniture, or other objects, or the range of frequencies to be used. The application allows modification of these parameters and provides the results of the position estimation, as well as potential sources of error.

Finally, the performance of the application has been evaluated, and conclusions has been drawn about the feasibility and accuracy of positioning with 5G frequencies indoors. Possible improvements and future work directions were also proposed to expand and optimize the simulation and application design.

PALABRAS CLAVE

Posicionamiento 5G, técnicas de posicionamiento, frecuencias 5G, simulación, aplicación en Matlab, entornos interiores, diferencia de tiempo de llegada, obstáculos físicos, errores en estimación de posición, precisión.

KEYWORDS

5G positioning, positioning techniques, 5G frequencies, simulation, Matlab application, indoor environments, time difference of arrival, physical obstacles, position estimation errors, accuracy.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estructura de la memoria.....	4
2. TÉCNICAS DE POSICIONAMIENTO	5
2.1. Contexto	5
2.2. Ángulo de llegada	7
2.3. Tiempo de vuelo	8
2.4. Potencia de señal recibida.....	9
2.5. Diferencia de tiempos de llegada.....	11
3. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN PARA SIMULACIÓN.....	13
3.1. Aplicación de simulación	13
3.2. Generar un espacio y un punto transmisor	15
3.3. Reflexiones y módulo de los haces	16
3.4. Receptor y cálculo del ToA.....	17
3.5. Transmisores y cálculo de TDoA.....	18
3.6. Botones y luces.....	19
3.7. Simulación de frecuencias 5G	20
3.8. Pérdidas por reflexión	23
3.9. Múltiples transmisores	25
3.10. Calcular posición.....	27
3.11. Obstáculos. modelo 1	28
3.12. Obstáculos modelo 2	29
4. SIMULACIONES.....	31
4.1. Resultados.....	31
4.1.1. Frecuencias de trabajo	31
4.1.2. Parámetros de la simulación: f: 5.8 GHz Amplitud de Tx: 2 Amplitud de Rx: 0.2.....	32
4.1.3. Modificación del espacio con obstáculos.....	34
4.1.4. Modificar el valor de la apertura de las antenas transmisoras.....	39
4.1.5. Modificar el valor del tamaño DEL RECEPTOR	39
4.1.6. Parámetros de la simulación: f: 5.8 GHz Amplitud de Tx: 4 Amplitud de Rx: 0.05... 41	
5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	43
5.1. Conclusiones.....	43
5.2. Líneas futuras.....	44
6. BIBLIOGRAFÍA	46

ANEXO A: ASPECTOS ÉTICOS, ECONÓMICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES	48
A.1 INTRODUCCIÓN	48
A.2 DESCRIPCIÓN DE IMPACTOS RELEVANTES RELACIONADOS CON EL PROYECTO	48
A.3 ANÁLISIS DETALLADO DE ALGUNO DE LOS PRINCIPALES IMPACTOS	49
A.4 CONCLUSIONES	50
ANEXO B: PRESUPUESTO ECONÓMICO	51

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente se utilizan múltiples sistemas y equipos tecnológicos para localizar un objetivo. El más extendido hoy en día es el GPS (*Global Positioning System*) basado en el sistema de navegación GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), que ofrece una precisión de ubicación de unos pocos metros. Sin embargo, no es necesario recurrir a satélites para hallar la posición de un objetivo. Se pueden utilizar estaciones base de posición conocida y establecer un enlace radio con el objetivo.

A medida que las tecnologías de posicionamiento en interiores han avanzado, también lo han hecho los requisitos para las empresas que desean aprovecharlas. Antes, simplemente estimar la ubicación de un usuario con una precisión de 10 metros ya era bastante complicado. Ahora, tecnologías como Bluetooth y 5G están incrementando continuamente lo que posibilita en cuanto a precisión de localización y más empresas se preguntan si es viable seguir con precisión a un dispositivo o usuario [1].

La tecnología 5G es la red móvil de quinta generación y evolución de la tecnología 4G. Es un estándar global para la conectividad inalámbrica y ofrece varias mejoras significativas con respecto a las generaciones anteriores. Una de las características distintivas del 5G es la capacidad de ofrecer velocidades más rápidas, hasta 10 Gbps en condiciones óptimas. Además, 5G puede reducir la latencia. Esta reducción es fundamental para aplicaciones en tiempo real. Otro beneficio significativo es la mayor capacidad de las redes 5G para soportar más dispositivos conectados a la vez, fundamental en entornos poblados, grandes ciudades y grandes eventos. 5G también ofrece conexiones más estables y confiables gracias a mejoras en la tecnología de antenas y la gestión del espectro. Utilizando la tecnología MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), que mejora la eficiencia del espectro y la capacidad de la red al permitir que múltiples antenas transmitan y reciban más datos simultáneamente. Otra característica importante del 5G es su uso de diferentes bandas de frecuencia, incluidas las bandas sub-6 GHz y las ondas milimétricas (*mmWave*). Estas bandas ofrecen diferentes combinaciones de alcance y velocidad, siendo las ondas milimétricas capaces de proporcionar velocidades extremadamente altas, aunque con un alcance más corto y una menor efectividad para atravesar obstáculos. El 5G facilita el desarrollo de nuevas aplicaciones y tecnologías emergentes. Esto incluye el Internet de las Cosas (IoT), las ciudades inteligentes, la telemedicina y las redes de vehículos autónomos.

La tecnología 5G puede ser la tecnología utilizada para un sistema de posicionamiento en interiores, IPS (*Indoor Positioning Systems*), principalmente por la precisión de menos de un metro que puede lograr. Esto es una mejora significativa en comparación con muchas otras tecnologías en el ámbito de los IPS. Sin embargo, los mismos inconvenientes que se aplican al uso de 5G también se aplican a un IPS. Las ondas milimétricas del 5G tienen dificultades para atravesar obstáculos, y la tecnología (tanto transmisores como receptores) sigue siendo

considerablemente más cara y menos común que tecnologías como Bluetooth. Es decir, para tener una IPS efectiva basada en 5G, el lugar en cuestión necesitaría una topografía densa de transmisores, y cada elemento que se desee rastrear tendría que estar equipado con un dispositivo compatible con 5G (lo cual no es el caso de todos los teléfonos inteligentes). Estos factores pueden suponer un incremento de los costes, pero también una mejora de la precisión y velocidad de localización. [1]

Los IPS son sistemas que únicamente consideran los ambientes cubiertos o limitados a espacios locales y obtienen la ubicación del usuario o del dispositivo que puede ser medido en tiempo real en una PN (*Personal Network*) en un interior, como puede ser una oficina, escuela, hotel, etc. [2] Los IPS se pueden clasificar según el tipo de tecnología que utilizan, la forma en que miden la posición y la información que proporcionan. Algunas de las tecnologías más comunes son el WiFi, el Bluetooth, el RFID (*Radio Frequency Identification Device*), el UWB (*Ultra Wideband*) y el 5G, como se ha mencionado anteriormente. Cada una de ellas tiene sus ventajas y desventajas en términos de precisión, coste, disponibilidad y consumo de energía. Por ejemplo, el WiFi es una tecnología muy extendida y accesible, pero su precisión depende de la densidad y ubicación de los puntos de acceso, así como de las interferencias y atenuaciones de la señal. El Bluetooth es una tecnología de bajo consumo y bajo coste, que puede aprovechar los dispositivos móviles de los usuarios para estimar su posición. Sin embargo, su precisión también se ve afectada por las condiciones del entorno y la calidad de los sensores. El RFID es una tecnología que permite identificar objetos mediante etiquetas que emiten una respuesta a una señal de radiofrecuencia. Su precisión puede ser muy alta, pero requiere de una infraestructura específica y un alto número de etiquetas. El UWB es una tecnología que utiliza pulsos de radio de banda ultra ancha para medir la distancia entre dos dispositivos. Su precisión puede alcanzar el nivel de centímetros, pero su coste y consumo de energía son elevados. El 5G es una tecnología emergente que promete velocidades muy altas y latencias muy bajas, así como una mayor capacidad de conexión. Su precisión puede ser menor de un metro, pero su implementación aún es limitada y costosa. [3]

En cuanto a la forma de medir la posición, existen diferentes métodos que se basan en distintos parámetros de la señal de radio, como el tiempo, la frecuencia, la fase o la potencia. Algunos de los métodos más usados son el AoA (*Angle of Arrival*), el ToF (*Time of Flight*), el RToF (*Return Time of Flight*), el TDoA (*Time Difference of Arrival*) y el RSS (*Received Signal Strength*). El AoA consiste en medir el ángulo de llegada de la señal de radio desde el transmisor al receptor, lo que permite determinar la dirección del objetivo. Su precisión depende de la resolución angular de las antenas y de la presencia de reflexiones y difracciones. El ToF consiste en medir el tiempo que tarda la señal de radio en recorrer la distancia entre el transmisor y el receptor, lo que permite calcular la distancia al objetivo. Su precisión depende de la sincronización de relojes y de la estabilidad de la frecuencia. El RToF consiste en medir el tiempo que tarda la señal de radio en ir y volver entre el transmisor y el receptor, lo que permite eliminar el problema de la sincronización. Su precisión depende de la velocidad de procesamiento de la señal y de la resolución temporal. El TDoA consiste en medir la diferencia de tiempo de llegada de la señal de radio a dos o más receptores, lo que permite estimar la posición del objetivo mediante la intersección de hipérbolas. Su precisión depende de la sincronización de relojes y de la geometría de los receptores. El RSS consiste en medir la potencia de la señal de radio recibida, lo que permite inferir la distancia al objetivo mediante una función de atenuación. Su precisión depende de la calibración de la función de atenuación y de las variaciones de la potencia debido a las condiciones del entorno. [4]

Por último, en cuanto a la información que proporcionan, los IPS se pueden clasificar en tres categorías: absolutos, relativos y simbólicos. Los IPS absolutos son aquellos que estiman la posición del objetivo en un sistema de coordenadas predefinido, como el cartesiano o el polar. Los IPS relativos son aquellos que estiman la posición del objetivo en relación con otro punto de referencia, como el transmisor o el receptor. Los IPS simbólicos son aquellos que asignan la posición del objetivo a una zona o región semántica, como una habitación o un pasillo. Cada categoría tiene sus aplicaciones y requisitos específicos, dependiendo del nivel de detalle y precisión que se necesite. [5]

1.2. OBJETIVOS

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es llevar a cabo el desarrollo de una aplicación en Matlab que simule un IPS para un espacio interior como fábricas, oficinas, talleres o locales y mediante el método de Diferencia de Tiempo de Llegada, mencionado anteriormente para definir con precisión la posición de un objetivo. La aplicación permitirá al usuario interactuar con ella con la posibilidad de modificar valores como el entorno, el número de transmisores o la frecuencia de las señales. Además, el usuario podrá obtener datos relacionados con los enlaces radio y el error que se comete respecto a su posición real. Por último, se extraerán datos de diferentes simulaciones para su análisis y se expondrán las conclusiones.

Para lograr este objetivo, se realizará una búsqueda bibliográfica y un estudio de las diferentes técnicas de posicionamiento por radiofrecuencia, haciendo especial énfasis en el método de TDoA y sus variantes.

Posteriormente, diseñar e implementar un algoritmo de TDoA en Matlab que sea capaz de estimar la posición de un objetivo en el espacio, utilizando como entradas las diferencias de tiempo de llegada de la señal a cuatro receptores conocidos. Se desarrollará una interfaz gráfica de usuario (GUI) en Matlab que permita visualizar el entorno, los transmisores y el objetivo, así como introducir y modificar los parámetros de la simulación, como la frecuencia de trabajo, obstáculos en el escenario o características del receptor y de los transmisores. Se calculará y mostrará el error de posicionamiento, es decir, la diferencia entre la posición estimada y la posición real del objetivo.

Con la aplicación finalizada se realizarán varias simulaciones con distintos escenarios y condiciones, variando los parámetros de la señal, el entorno y el objetivo, y analizar los resultados obtenidos. Finalmente se redactará la memoria del trabajo, explicando el desarrollo de la aplicación de simulación y presentar las conclusiones y las posibles líneas de mejora o ampliación futuras.

1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria del trabajo consiste en un documento que expone el desarrollo y los resultados de una aplicación de simulación en Matlab para el posicionamiento por radiofrecuencia mediante el método de TDoA. El documento se divide en los siguientes apartados:

En primer lugar, se introduce el tema del trabajo, situando el contexto y la motivación que lo han originado. Se plantean los objetivos que se pretenden alcanzar con la aplicación de simulación, y se describe la estructura de la memoria, indicando el contenido de cada apartado.

A continuación, se realiza un estudio de las técnicas de posicionamiento por radiofrecuencia, centrándose en el método de TDoA y sus variantes. Se explica en qué consiste este método, qué ventajas y desventajas tiene respecto a otras técnicas, y qué algoritmos se pueden emplear para resolver el problema de la multilateración, que consiste en estimar la posición de un objetivo a partir de las diferencias de tiempo de llegada de una señal a varios sensores.

Después, se describe el diseño e implementación de la aplicación de simulación en Matlab, que permite realizar pruebas de posicionamiento por TDoA con diferentes parámetros y condiciones. Se detalla la interfaz gráfica de usuario que facilita el uso de la aplicación, las funciones y opciones que se pueden configurar para la simulación, y el algoritmo que se utiliza para calcular la posición del objetivo a partir de las medidas de TDoA.

A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos con la aplicación de simulación, mostrando el error de posicionamiento en distintos escenarios y situaciones. Se evalúa el rendimiento de la aplicación y se comparan los algoritmos de multilateración utilizados.

Por último, se extraen las conclusiones y aportaciones del trabajo, destacando los aspectos más relevantes y las dificultades encontradas. Se proponen también algunas líneas de mejora o ampliación para trabajos futuros.

2. TÉCNICAS DE POSICIONAMIENTO

2.1. CONTEXTO

La multilateración es un método de posicionamiento que utiliza la distancia desde múltiples puntos conocidos hasta un punto desconocido para determinar la ubicación del punto desconocido. Normalmente, esto se hace calculando la distancia o distancia relativa entre dos puntos utilizando el tiempo de propagación medido en términos del tiempo de llegada de la señal (ToA). Esta es la base de muchos servicios de localización modernos, como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). También se puede utilizar para determinar la ubicación de fuentes de radiofrecuencia (RF) en ubicaciones desconocidas. Esta área ha sido un área activa de investigación desde al menos la década de 1960, con importantes avances en la década de 1970 con el desarrollo del GPS y en la década de 1990 con la proliferación de los teléfonos móviles y la capacidad de los servicios de emergencia para localizar las necesidades de las personas que llaman. En el siglo XXI el énfasis está en el posicionamiento pasivo y los radares multiestáticos. [6]

Con el tiempo, se han desarrollado tres categorías de métodos para resolver el problema de posicionamiento por tiempo de llegada. Los primeros métodos eran iterativos, que son métodos relativamente simples para resolver ecuaciones no lineales, pero tienen tiempos de cálculo largos y es posible que no converjan a la solución correcta. Luego, en la década de 1980, surgieron métodos que manipulaban sistemas de ecuaciones para producir una única ecuación cuadrática en una variable, que luego producía dos soluciones, una de las cuales era correcta. A mediados de la década de 1990, se introdujeron métodos lineales para resolver sistemas de ecuaciones. Estos ofrecen una solución única, aunque a costa de requerir al menos una medición más que los métodos no lineales. [6]

Una de las ventajas de las ecuaciones lineales es que se pueden ampliar fácilmente para incluir medidas adicionales. Las mediciones adicionales pueden ser más mediciones ToA o cualquier otra medición relevante para el problema utilizando ecuaciones lineales. Esta flexibilidad permite el desarrollo de algoritmos de posicionamiento que emplean ángulo de llegada (AoA), diferencia de frecuencia de llegada (FDoA), intensidad de la señal recibida (RSS) y dirección de llegada (DoA). La introducción de métodos lineales para resolver ecuaciones de posicionamiento también condujo a una proliferación de algoritmos. Durante esta proliferación, muchos artículos derivaron sus propias versiones de algoritmos de multilateración lineal. Cada uno de estos algoritmos tiene ventajas y desventajas. Estas a menudo surgen de cómo se derivan las ecuaciones que emplean. La mayoría de las derivaciones comienzan con un modelo de medición con ruido e intentan derivar un estimador de máxima verosimilitud a partir de eso. Al hacerlo, las soluciones generalmente corresponden a una de las pocas soluciones del problema de localización sin ruido. La conexión con la solución simple generalmente se pierde en un mar de símbolos, a veces enterrada bajo muchas capas de sustituciones, hasta el punto de que la solución ya no tiene una conexión clara con el problema físico subyacente, o con los otros algoritmos que utilizan ecuaciones similares. [6]

Entre los métodos iterativos, uno de los más conocidos es el algoritmo de Newton-Raphson, que utiliza la derivada de las ecuaciones no lineales para aproximar iterativamente la solución. Sin embargo, este método requiere una buena estimación inicial y puede converger a un mínimo local en lugar de a la solución global. Otro método iterativo es el algoritmo de Levenberg-Marquardt, que combina el método de Newton-Raphson con el método de descenso de gradiente para mejorar la robustez y la velocidad de convergencia. Este método también requiere una estimación inicial y puede ser sensible al ruido y a la elección de los parámetros. [7]

Entre los métodos que producen una ecuación cuadrática, uno de los más populares es el algoritmo de Bancroft, que aprovecha la propiedad de los determinantes para reducir el sistema de ecuaciones a una forma estándar. Este método tiene la ventaja de que no requiere una estimación inicial y puede resolver el problema con solo cuatro mediciones ToA. Sin embargo, este método puede sufrir de inestabilidad numérica cuando las mediciones son ruidosas o hay errores en las posiciones de los sensores. Además, este método no se puede extender fácilmente para incluir otras medidas como AoA o FDoA. [8]

Entre los métodos lineales, uno de los primeros fue el algoritmo de Taylor, que utiliza una serie de Taylor de primer orden para aproximar las ecuaciones no lineales por ecuaciones lineales. Este método requiere al menos cinco mediciones ToA y produce una solución única y cerrada. Sin embargo, este método puede tener un gran error si las mediciones son ruidosas o están muy correlacionadas. Otro método lineal es el algoritmo de Chan, que utiliza una transformación de variables para eliminar el término no lineal de las ecuaciones. Este método también requiere al menos cinco mediciones ToA y produce una solución única y cerrada. Este método tiene un mejor rendimiento que el método de Taylor, pero puede tener un error significativo si las posiciones de los sensores son colineales o coplanares. [9]

Las técnicas de posicionamiento basadas en el ángulo de llegada tienen diversas aplicaciones, tanto civiles como militares. Por ejemplo, se pueden usar para localizar fuentes de señales de radio, teléfonos móviles, vehículos aéreos no tripulados, radares o satélites. También se pueden usar para mejorar la precisión de los sistemas de navegación por satélite, como el GPS, el GLONASS o el Galileo, mediante la corrección de los errores inducidos por la ionosfera, la troposfera o las reflexiones multipropagación. [10] Para implementar las técnicas de ángulo de llegada, se requiere un sistema de antenas capaz de medir el ángulo de incidencia de la señal recibida. Estas antenas pueden ser de dos tipos: direccionales o de array. Las antenas direccionales tienen un patrón de radiación que se concentra en una dirección preferente, y pueden rotar para determinar la dirección de máxima ganancia. Las antenas de array consisten en un conjunto de elementos radiantes distribuidos espacialmente, y pueden estimar el ángulo de llegada mediante el procesamiento de la fase y la amplitud de las señales recibidas por cada elemento. [11]

Las técnicas de posicionamiento basadas en la potencia de las señales como RSS (*Received Signal Strength*) consiste en estimar la distancia entre un emisor y varios receptores a partir de la potencia de la señal recibida por cada receptor. Esta potencia depende de varios factores, como la potencia transmitida por el emisor, la ganancia de las antenas, la pérdida de señal debido al medio de propagación y el ruido. Si se conoce cómo varía la potencia con la distancia, se puede usar una fórmula que relaciona ambas variables. Esta fórmula tiene un parámetro que indica cuánto se atenúa la señal por cada metro que recorre. Para localizar el emisor, se necesitan al menos tres receptores en dos dimensiones o cuatro receptores en tres dimensiones, que forman un sistema de ecuaciones basado en la fórmula de la potencia. Este sistema es no lineal y se puede resolver por diferentes métodos, algunos más simples y otros más precisos.

2.2. ÁNGULO DE LLEGADA

La técnica Ángulo de Llegada (*Angle of Arrival, AoA*) es también conocida como Dirección de Llegada (*Direction of Arrival, DoA*). Existen tres modos de utilización para localizar un objetivo; mediante el azimut, el ángulo de elevación o ambos. [6] Típicamente se emplean ambos ángulos como se muestra en la figura 1.

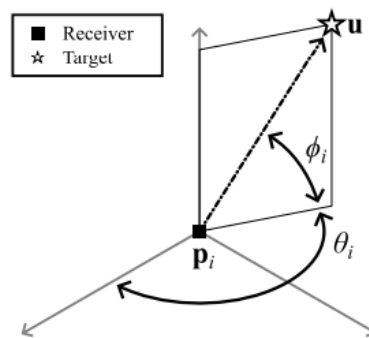


Figura 1: Ilustración de las medidas de azimut y elevación [6]

Dado un ángulo θ_i respecto a un receptor situado en p_i se obtiene la siguiente ecuación:

$$\tan \theta_i = \frac{\text{sen} \theta_i}{\text{cos} \theta_i} = \frac{y_u - y_i}{x_u - x_i} \quad (1)$$

Que si se reordena para que sea lineal queda de la forma:

$$x_u \text{sen} \theta_i - y_u \text{cos} \theta_i = x_i \text{sen} \theta_i - y_i \text{cos} \theta_i \quad (2)$$

De (2) se obtiene un plano vertical que pasa por el punto P con el mismo ángulo θ_i .

Usando en conjunto los ángulos de elevación y de azimut, se deduce la ecuación:

$$\tan \phi_i = \frac{\text{sen} \phi_i}{\text{cos} \phi_i} = \frac{z_u - z_i}{(x_u - x_i) \text{cos} \theta_i + (y_u - y_i) \text{sen} \theta_i} \quad (3)$$

Reordenándola:

$$x_u \text{cos} \theta_i \text{sen} \phi_i + y_u \text{sen} \theta_i \text{sen} \phi_i - z_u \text{cos} \phi_i = x_i \text{cos} \theta_i \text{sen} \phi_i + y_i \text{sen} \theta_i \text{sen} \phi_i - z_i \text{cos} \phi_i \quad (4)$$

Esto nos da un plano que contiene el origen y que es perpendicular al plano vertical descrito en (2) y rotado un ángulo ϕ_i respecto al plano XY. La intersección de ambos planos dará una recta que pasa por el origen, posición conocida del transmisor y el punto en el que se encuentra el objetivo.

Por lo tanto, utilizando múltiples transmisores se podrá obtener con precisión la posición exacta del objetivo que estará en la intersección de las diferentes rectas que se forman.

2.3. TIEMPO DE VUELO

Este método es similar al que se utiliza con la tecnología GPS. La diferencia es que GPS los satélites están sincronizados con relojes atómicos. Es por eso por lo que en Tiempo de Vuelo (*Time of Flight*, ToF) se necesitan hacer cuatro medidas de tiempo y calcular retardos. Para calcular el ToF entre dos estaciones A y B, el transmisor de A envía el tiempo de salida de la señal t_1 y el receptor de B calcula el tiempo de llegada t_2 y después de un retardo del orden de docenas de microsegundos el transmisor de B responde con el tiempo de salida de la señal de respuesta t_3 y finalmente la señal llega al receptor de A en t_4 . Entonces $(t_4 - t_1)$ es el tiempo total del trayecto (ida y vuelta) y $(t_3 - t_2)$ es tiempo de proceso. Este proceso se representa en la figura 2. [12]

$$ToF = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} \quad (5)$$

Una vez se tiene calculado el ToF se multiplica por la velocidad de la luz para obtener la distancia que hay entre las estaciones A y B.

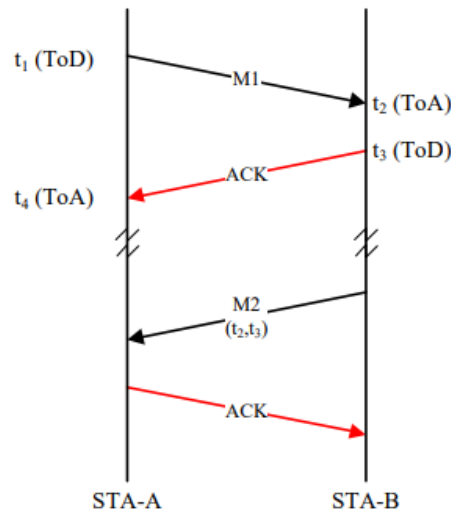


Figura 2: Protocolo ToF [12]

$$d_i = c \cdot ToF_i \quad (6)$$

Para conocer con exactitud la posición de un sistema se precisan de múltiples estaciones de posición conocida para así con las distancias calculadas poder triangular la posición del sistema.

2.4. POTENCIA DE SEÑAL RECIBIDA

La Potencia de Señal Recibida (*Received Signal Strength*, RSS) es una técnica de posicionamiento que se basa en la relación entre la potencia de la señal transmitida y la potencia de la señal recibida para estimar la distancia entre el transmisor y el receptor. Esta relación depende del modelo de propagación de la señal, que a su vez está influenciado por diversos factores como el entorno, los obstáculos, las reflexiones o el ruido.

Para entornos interiores, el modelo de propagación de radio LDPLM (*Log-Distance Path Loss Model*) se adopta ampliamente. LDPLM calcula la distancia desde un AP hasta una intensidad de señal recibida (RSSI) de la siguiente manera [13]:

$$PL = PL_0 + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (7)$$

Donde d representa la distancia entre el punto de acceso (AP) y el receptor, d_0 es una distancia de referencia predefinida, PL y PL_0 son los RSSI medidos a las distancias d y d_0 , respectivamente, y n es un exponente de pérdida de trayectoria. El exponente de pérdida de trayectoria n se determina en función del entorno espacial del área de medición. Típicamente, se sabe que n es óptimo en el rango de 2–3 para un espacio sin obstáculos y de 4–6 para un espacio con muchos obstáculos [13][14].

La Ecuación (4) se reorganiza para d de la siguiente manera:

$$d = 10^{\frac{PL-PL_0}{10n}} \cdot d_0 \quad (8)$$

Para determinar la posición de un dispositivo desconocido, se necesitan al menos tres puntos de referencia con posiciones conocidas y sus respectivas potencias de señal recibidas. Así, se pueden trazar círculos centrados en los puntos de referencia y con radios proporcionales a las distancias calculadas. La posición del dispositivo desconocido será el punto de intersección de los círculos, como se ilustra en la figura 3.

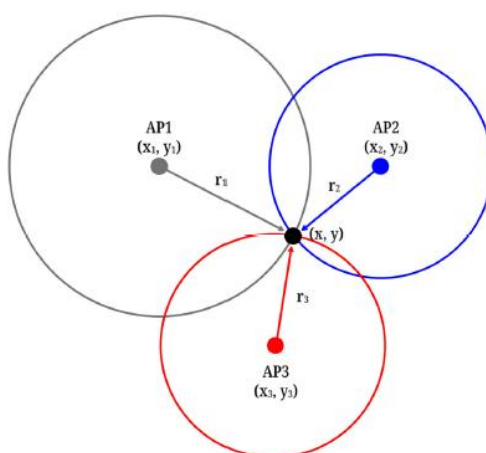


Figura 3: Trilateration example [13]

La ventaja de esta técnica es que no requiere sincronización entre el transmisor y el receptor, y que utiliza información fácilmente disponible en la mayoría de los dispositivos inalámbricos. Sin embargo, también presenta algunos desafíos, como la dificultad de obtener un modelo de propagación preciso y robusto, la influencia de las condiciones ambientales y los fenómenos de sombra y multitrayecto, y la posible presencia de errores de medición o de calibración.

2.5. DIFERENCIA DE TIEMPOS DE LLEGADA

La Diferencia de Tiempos de Llegada (*Time Difference of Arrival*, TDoA) también llamado multilateración es un enfoque de localización que utiliza distancias desde varios puntos conocidos a un punto desconocido para determinar la ubicación de ese punto desconocido. Esto se hace normalmente utilizando el tiempo de propagación, medido a partir de un tiempo de llegada de la señal (ToA), para calcular la distancia o la distancia relativa entre dos puntos. [6]

Parte de la estimación de tiempo de llegada, otra técnica de posicionamiento que permite medir la distancia, estableciendo así la ubicación. Existen varios puntos de posición conocida que se usarán como puntos de referencia (PR) y uno o varios puntos cuya ubicación desconocemos y queremos calcular (U).

En un espacio bidimensional sería suficiente con tres PR para medir tres ToA y localizar el U. Los PR se encuentran en el centro de una circunferencia de radio R_i que es proporcional al ToA_i . U se encontrará en la intersección de las tres circunferencias. Sin embargo, en un espacio tridimensional, sería necesario el uso de cuatro PR para definir la posición de U siendo ahora el punto de intersección de cuatro esferas de radio R_i .

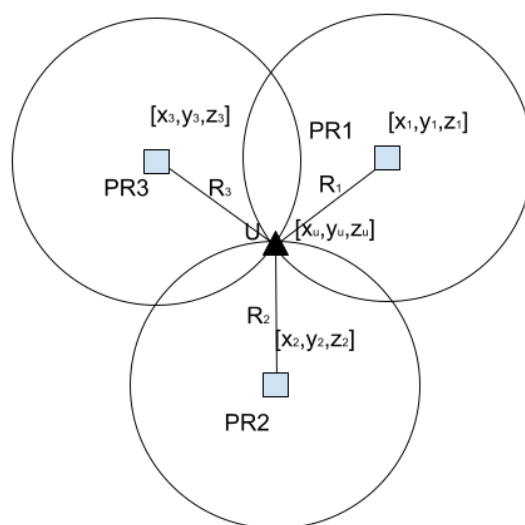


Figura 4: Representación ToA

La distancia entre un punto de posición conocida p_i y otro punto que queremos determinar p_u se describe respecto a sus coordenadas cartesianas en el espacio según la ecuación:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} \quad (9)$$

Donde (9) es también el tiempo de propagación por la velocidad.

$$x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - d_i^2 = 2x_ix_u + 2y_iy_u + 2z_iz_u - x_u^2 - y_u^2 - z_u^2 \quad (10)$$

Los PR y U deben estar sincronizados para evitar errores en el cálculo de la distancia. De igual manera la posición del objetivo se podrá calcular con precisión en caso de condiciones de línea de visión directa (*Line of Sight*, LOS) en el enlace radio. En caso contrario (*Non Line of Sight*, NLOS) la señal tomará un trayecto más largo hasta llegar al U y el ToA medido será entonces mayor que en el caso de LOS.

La estimación en la Diferencia del Tiempo de Llegada requiere la medición de la diferencia en el tiempo entre las señales entrantes hacía dos PR. Al igual que en ToA, este método asume que las posiciones de los PR son conocidas y geoméricamente puede representarse mediante hipérbolas. [15] Al igual que sucede en ToA, bastan tres PR y el cálculo de 2 TDoA para ubicar al objetivo en un espacio de dos dimensiones o coplanar mientras que para un espacio no-coplanar se necesitan 4 NR y calcular tres TDoA para hallar la ubicación del objetivo. Con varios PR y calculando sus respectivos ToA, se procede a definir los TDoA. Para ello se establece uno de los ToA como referencia.

$$TD_{0A_{i,1}} = T_{0A_i} - T_{0A_1} \quad (11)$$

$$TD_{0A_{i,1}} = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \quad (12)$$

En ausencia de error, los hiperboloides serían superficies planas cuya intersección se daría en un solo punto en el espacio donde se ubicaría el objetivo.

3. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN PARA SIMULACIÓN

3.1. APLICACIÓN DE SIMULACIÓN

En este apartado, se describe la interfaz de la aplicación que permite realizar la simulación, indicando la función y el significado de cada uno de los elementos que la componen:

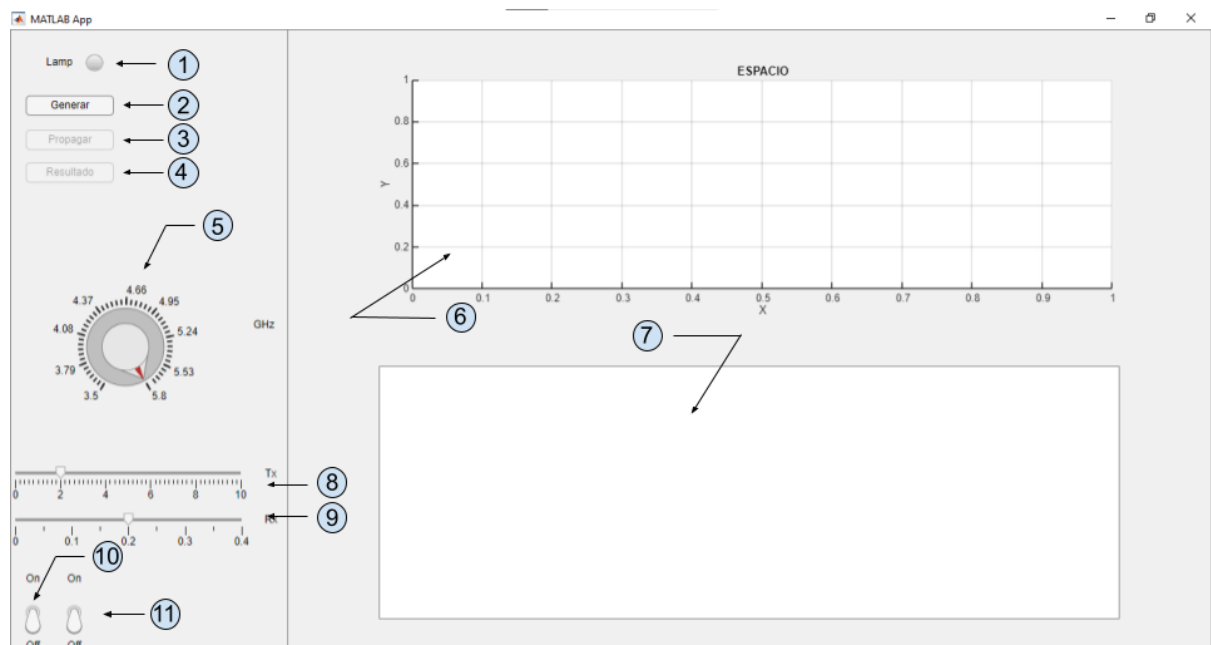


Figura 5: Interfaz de la aplicación

1. Led de información

Este led tiene cuatro estados: {Apagado, Naranja, Verde, Rojo}.

Se encontrará apagado mientras el usuario ajusta los parámetros de la simulación. Lucirá de color naranja una vez pulsado el botón “Propagar” y se inicie la simulación.

Lucirá de color verde una vez haya finalizado la simulación y se halla localizado al objetivo.

Lucirá de color rojo una vez haya finalizado la simulación y no se halla localizado al objetivo.

2. Botón Generar

Botón que genera el espacio de simulación. Crea el receptor y le asigna una posición aleatoria dentro del espacio.

3. Botón Propagar

Botón que inicia el proceso de simulación una vez se hayan establecido los parámetros. Al pulsar este botón el **Led de información** lucirá de color naranja.

4. Botón Resultado

Cuando el **Led de información** luzca de color verde, si el usuario pulsa el **Botón Resultado** mostrará en el **Panel de información** los resultados obtenidos.

5. Rueda de frecuencias

Rueda ajustable por el usuario que selecciona el parámetro de la frecuencia de la simulación.

6. Pantalla de simulación

Pantalla que muestra el espacio de simulación y donde se representa la ubicación de los transmisores y del objetivo.

7. Panel de información

Pantalla que muestra los resultados obtenidos una vez se ha finalizado el proceso de simulación y el usuario pulsa el **Botón Resultado**.

8. Control de transmisores

Control ajustable por el usuario que selecciona el valor del parámetro referido a la apertura de las antenas transmisoras.

9. Control de receptor

Control ajustable por el usuario que selecciona el valor del parámetro referido a la apertura de la antena del receptor.

10. Interruptor obstáculo 1

Interruptor que el usuario puede encender para modificar el espacio de simulación antes de generarlo. Crea una pared que cruza el espacio.

11. Interruptor obstáculo 2

Interruptor que el usuario puede encender para modificar el espacio de simulación antes de generarlo. Crea una pared que cruza el espacio.

3.2. GENERAR UN ESPACIO Y UN PUNTO TRANSMISOR

La aplicación se desarrollará en *Matlab App Designer*. Lo primero es definir un espacio donde se realizarán las pruebas. El primero que se utilizará es muy básico, sin obstáculos. Una sala de cinco metros de ancho, ocho metros de profundidad y tres metros de altura. Definimos el espacio en coordenadas cartesianas (x, y, z) que se representará en la aplicación.

Se establece un punto de origen donde se ubicará el transmisor, este estará ubicado en el techo de la sala, en el centro de esta. Lo siguiente es simular la transmisión de la señal mediante la creación de un número considerable de vectores, controlado por un valor variable llamado “Ancho”. Dichos vectores tendrán cada uno una dirección diferente y un módulo considerablemente pequeño, que se crean aleatoriamente cada vez que se ejecute la aplicación. Al principio nos interesa que la señal se propague de forma omnidireccional (más tarde se modificará) hacia el suelo, es decir, la componente Z de los vectores que indica la altura deberá ser negativa.

Por ahora nos interesa que los distintos vectores, que de ahora en adelante llamaremos haz o haces, se propaguen por el espacio hasta que lleguen o bien a una pared o al suelo. Para ello se realiza lo siguiente para todos los haces:

Se parte del “punto actual” que es el de origen y se suma reiteradamente la dirección asignada a cada haz, obteniendo así el “siguiente punto” del haz. Cada vez que se calcule el “siguiente punto”, se hace la comprobación de si el haz seguirá o no dentro del espacio. Esto es si alguna de las componentes del punto se encuentra fuera de los límites del espacio.

En caso de que siga dentro del espacio de pruebas, se considera el “siguiente punto” como el nuevo “punto actual”. Simulando así la propagación del haz hasta que llegue a una pared o el suelo del espacio. En esta situación en la que el haz ya no se propagaría más, se dibuja la trayectoria completa del haz y se realiza el mismo procedimiento con el siguiente.

La primera funcionalidad se representa en la siguiente Figura 6:

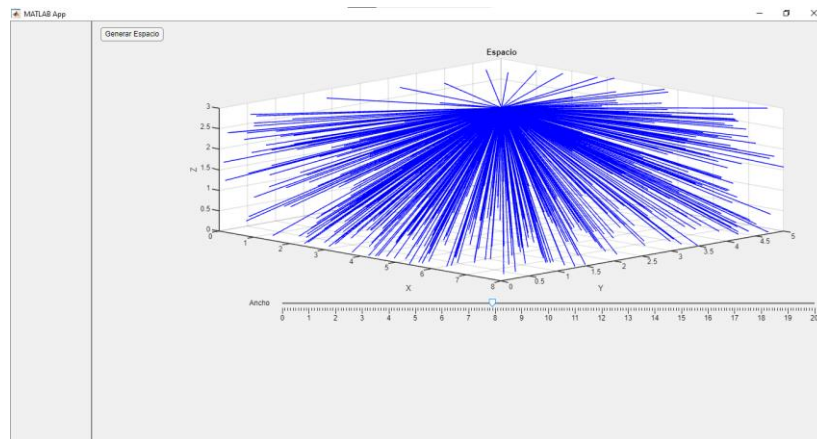


Figura 6: Propagación de los haces

3.3. REFLEXIONES Y MÓDULO DE LOS HACES

El próximo objetivo es que se propaguen los haces y cuando estos llegan a una pared, se modifica su dirección en función de a qué obstáculo haya llegado, simulando así el efecto de la reflexión de la señal. En un apartado posterior se analizarán las pérdidas por reflexión. Se desarrolla para ello la función “Propagarse” que como parámetros necesita un punto de origen, una dirección, el módulo que tiene acumulado al iniciarse, los límites del espacio de simulación y el espacio de simulación para la representación de los haces.

La función “Propagarse” incluye el funcionamiento de propagación de la funcionalidad anterior con algunas mejoras que se explicarán a continuación. Una gran ventaja de crear esta función es que puede llamarse desde el código principal de la aplicación y usarla por diferentes transmisores. La principal mejora es que, en caso de llegar a un límite del espacio, se comprueba qué componente (x , y , z) del haz ha superado los límites del espacio de pruebas y se modifica la dirección que tiene asignada el haz cambiándole el signo a la componente que llegase al límite. Con la dirección modificada, se prosigue como hasta entonces la propagación del haz, siendo ahora el punto donde chocó el nuevo “punto actual” consiguiendo así el efecto de rebote en las paredes.

Anteriormente cuando un haz chocaba con el suelo o una pared, se daba por finalizada la propagación, se representaba la trayectoria del haz desde el origen hasta el punto donde chocó y se repetía la operación con el próximo haz. Ahora, para evitar que un haz esté eternamente “rebotando” dentro del espacio, se establece también un límite de longitud que si se supera se termina de propagar. Para esto se define una variable “módulo acumulado” que registra la longitud total que recorre el haz, siendo esta la suma de los “módulos” que recorre un haz entre su punto de origen y donde alcanza un obstáculo. Esto es necesario para representar en el espacio cada haz, ya que, como solo se pueden representar líneas rectas, descomponemos la trayectoria total del haz en sus propagaciones entre rebotes.

En resumen, ahora un haz se propagará hasta que su “módulo acumulado” supere un valor establecido, como si esta fuese la máxima distancia que cada haz puede recorrer antes de que por causas de pérdidas por propagación se disipe como se ve en la Figura 7.

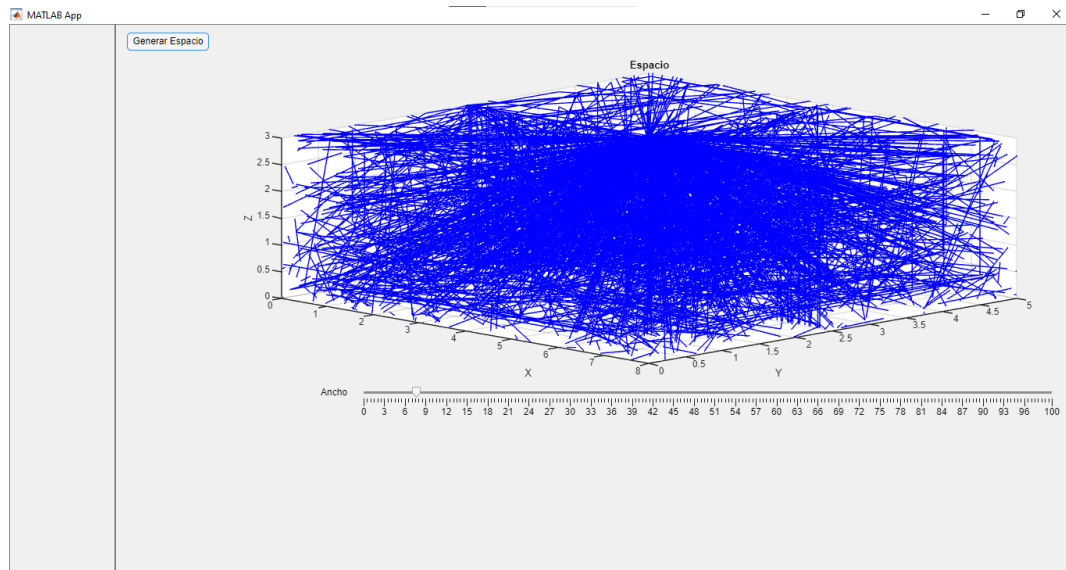


Figura 7: Reflexión de los haces

3.4. RECEPTOR Y CÁLCULO DEL TOA

Introducimos ahora el receptor, para ello se modifica la función “Propagarse”, incluyendo ahora los parámetros posición del receptor y su dimensión. “Propagarse” ahora necesita de otra nueva función llamada “Receptor”, encargada de comprobar si el siguiente punto en el que estará un haz que se está propagando es captado por el receptor. La nueva función necesita como parámetros algunos de los que utiliza la propia función “Propagarse”, pues esta es llamada dentro de “Propagarse”. Por lo tanto, cada vez que un haz modifica su posición, se llama a la nueva función.

“Receptor” comprueba si un haz ha llegado a un punto en el espacio que lo detecte el receptor según su posición y dimensión. La función devuelve *true* si un haz es detectado y *false* en caso contrario. Si se detecta, se interrumpe la propagación del haz. Ahora un haz se propagará hasta alcanzar una longitud máxima (módulo acumulado) o si este es detectado por el receptor.

En caso de que un haz sea detectado por el receptor, la función “Propagarse” devolverá el valor “trayecto” que es el “módulo acumulado” del haz cuando alcanzó al receptor. Se espera que múltiples haces alcancen al receptor tanto por camino directo como los que llegan mediante reflexiones en las paredes. Nos interesa el valor mínimo de “trayecto” ya que en caso de LOS, este valor será la distancia en metros entre transmisor y receptor al ser este el camino directo.

Finalmente, como solo disponemos de un receptor y un transmisor, calculamos cual sería el ToA del enlace:

$$ToA[ns] = \frac{\text{trayecto}[m]}{c\left[\frac{m}{ns}\right]} \quad (13)$$

Dividiendo el menor de los módulos de los haces que alcanzan al receptor entre $c = 0.3$ [m/ns] para así obtener ToA en nanosegundos.

Si se pulsa el botón “Generar” se crea el espacio como hasta ahora, y un punto aleatorio que será el receptor. Pulsando el botón “Resultado” se ejecuta el programa y muestra en la aplicación el ToA del enlace. Para la simulación se omite dibujar los haces, ya que consumen recursos al ejecutar la aplicación y su función era la de visualizar la propagación de los haces para comprobar las funcionalidades anteriores. Para tener una noción espacial sí que se representan en el espacio el transmisor en color verde y el receptor en color rojo (ver figura 8).

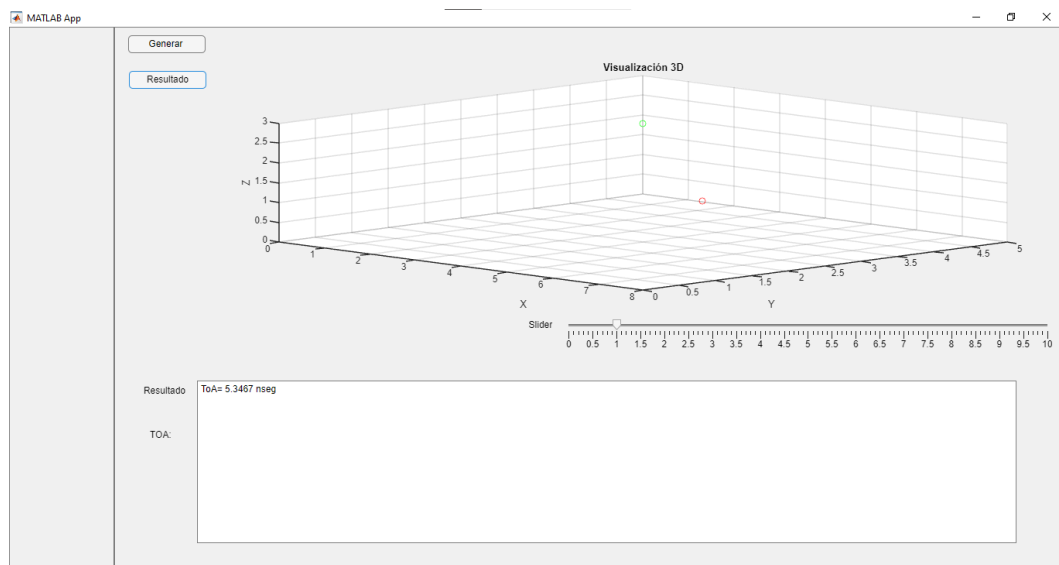


Figura 8: Receptor y ToA

3.5. TRANSMISORES Y CÁLCULO DE TDOA

Para intentar cubrir mejor el espacio se utilizarán cuatro transmisores en vez de uno solo. Los transmisores se ubicarán en el techo repartidos de forma simétrica. Además, se modifica el número de haces que emergen de cada transmisor. Previamente eran 500 multiplicados por un valor que el usuario escogía con el *Slider* de la aplicación.

Ahora, los valores de las componentes x e y de los vectores dirección de los transmisores irá desde el valor seleccionado en negativo hasta el valor seleccionado en positivo en saltos de 0.01. Mientras que la componente z se mantendrá en el valor negativo -0.2. Gracias a esta modificación se logra cubrir mucho mejor el espacio de cobertura de los transmisores. Ya que antes la creación de las direcciones que tomaba cada haz era aleatoria y en bastantes ocasiones ningún haz era capaz de alcanzar al receptor y era imposible calcular el valor del ToA. El valor que se define como “huella” sirve para que el usuario pueda modificar la apertura de haz de las antenas transmisoras. Sin embargo, este cambio trae consigo una desventaja frente a como era anteriormente: Al aumentar considerablemente el número de haces que se transmiten, aumenta el número de cálculos que la aplicación debe realizar y, por lo tanto, el tiempo en el que se ejecuta la simulación es mayor.

De forma análoga a como se calculaba el ToA del enlace de un único transmisor-receptor, se realiza para los cuatro transmisores. Se hace una llamada a la función “Propagarse” para cada uno de los transmisores y se obtienen los valores mínimos “trayecto” para después calcular los ToAn como se muestra en (11).

A continuación, se comprueba que se haya logrado calcular todos los ToA, en caso negativo la aplicación mostrará el mensaje “Blanco no encontrado”. Si se tienen todos los ToA, se almacenan en una matriz (“matriz_ToA”) y se ordenan de menor a mayor, para así utilizar el menor de los ToA como referencia, como se explica en el apartado 2.4 en la fórmula (9). Una vez calculados los 3 TDoA estos se pasan junto con la posición conocida de cada transmisor a una nueva función llamada “Calcular_Posición” encargada de resolver el siguiente sistema de ecuaciones (14):

$$\begin{cases} TD_0A_{2,1} = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} - \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \\ TD_0A_{3,1} = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} - \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \\ TD_0A_{4,1} = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2} - \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \end{cases} \quad (14)$$

Donde (x, y, z) son las incógnitas que equivalen a las coordenadas cartesianas en el espacio del receptor, (x_i, y_i, z_i) las diferentes coordenadas de los transmisores y $TD_0A_{i,1}$ las diferentes diferencias de tiempo de llegada calculadas anteriormente.

Una vez calculada la posición, la aplicación muestra el mensaje: “La posición del blanco es X= (coordenada x), Y= (coordenada y), Z= (coordenada z).”

3.6. BOTONES Y LUCES

Las siguientes modificaciones tienen como objetivo que la aplicación sea atractiva y fácil de usar para el usuario. Para ello se modifica la funcionalidad de los botones; “Generar” crea el espacio y posiciona el receptor en una ubicación aleatoria. A continuación, el usuario podrá o bien pulsar de nuevo el botón “Generar” y así crear una nueva área de pruebas o bien pulsar el botón “Propagar” que iniciará el proceso de simulación de propagación de las señales

y el cálculo aproximado de la posición donde se encuentra el receptor. Una vez finalizado este proceso, se mostrará por pantalla el mensaje de “Resultados Listos” o en su defecto, “Blanco no encontrado”. En la situación en la que se han obtenido resultados el usuario podrá entonces pulsar el botón “Resultado” y se mostrará por pantalla (ejemplo):

La posición calculada del blanco es $X=2.479$, $Y=2.6239$, $Z=0.45459$.

La posición real del blanco es $X=2.4897$, $Y=2.6427$, $Z=0.49695$

El error cometido es de: 4.7536cm

El error cometido es el cálculo del módulo de la diferencia entre la posición calculada y la posición real del blanco. Se añade también un led que en un inicio está apagado, después de que el usuario haya pulsado “Generar” y a continuación “Propagar”, el led se encenderá de color naranja. Así se le indica al usuario que se está produciendo la simulación de la propagación, ya que es un proceso que puede tardar unos minutos en finalizar. Una vez finalizado, el led lucirá de color verde en caso de que se haya encontrado al blanco y se puedan ver los resultados o de color rojo en el caso de que no se haya encontrado el blanco.

3.7. SIMULACIÓN DE FRECUENCIAS 5G

En la aplicación, el uso de la banda de frecuencias utilizadas en 5G afectará a la máxima distancia a la que se podrá propagar la señal antes de que el efecto de las pérdidas por propagación haga que dicha señal emitida por el transmisor no supere la sensibilidad del receptor.

Para el estudio de distintos modelos de propagación semi-empíricos más utilizados para ambientes interiores aplicables para las frecuencias de 2,4 GHz y 5,8 GHz que se hizo en el artículo [15], en el modelo *Log-Distance*, desarrollado para ambientes interiores y exteriores, es uno de los modelos más clásicos. Está basado en la ley potencial de variación con la distancia, según la cual las pérdidas de propagación (en dB) aumentan con el logaritmo (de base 10) de la distancia.

Representado como se explica en [16]:

$$L(\text{dB}) = L(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + x_\sigma \quad (15)$$

Donde:

d = Distancia transmisor-receptor (km)

$L(d_0)$ = Pérdidas de propagación (dB) a una distancia d_0

d_0 = Distancia de referencia (km) (para ambientes interiores, generalmente es igual a 0,001km)

$X\sigma$ = Variable aleatoria (gaussiana o normal), en dB, con media igual a cero y desviación estándar igual a “ σ ”, también en dB. Esta variable describe el comportamiento estadístico de las pérdidas de propagación para distancias mayores a d_0 .

Las pérdidas $L(d_0)$ se calculan utilizando el modelo de pérdidas en el espacio libre o a través de mediciones de campo realizadas a la distancia d_0 . En todo caso, el modelo de propagación de espacio libre es representado por [16]:

$$L(\text{dB}) = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d \quad (16)$$

Siendo f la frecuencia en GHz y d la distancia en Km.

El exponente de pérdidas n y la desviación estándar σ , dependen de la frecuencia de operación e implícitamente de las características físicas (tipos de entornos interiores, disposición de los elementos físicos presentes en esos entornos, etc.) inherentes al camino o ruta de medición. En el texto [17] se presentan valores n , que varían de 1,6 a 3,3. Asimismo, de [17] se pueden obtener los valores de σ , los cuales varían desde 5,2 dB hasta 14,1 dB. Para la aplicación asignaremos los valores $n=2.1$ y $\sigma=7\text{dB}$. Valores utilizados para una fábrica textil/química.

<i>Building</i>	<i>Freq (MHz)</i>	<i>n</i>	<i>σ dB</i>
<i>Retail stores</i>	914	2.2	8.7
<i>Grocery store</i>	914	1.8	5.2
<i>Office, hard partition</i>	1500	3.0	7.0
<i>Office, soft partition</i>	900	2.4	9.6
<i>Office, soft partition</i>	1900	2.6	14.1
<i>Factory LOS</i>			
<i>Textile/chemical</i>	1300	2.0	3.0
<i>Textile/chemical</i>	4000	2.1	7.0
<i>Paper/cereals</i>	1300	1.8	6.0
<i>Metalworking</i>	1300	1.6	5.8
<i>Suburban home</i>			
<i>Indoor to street</i>	900	3.0	7.0
<i>Factory OBS</i>			
<i>Textile/chemical</i>	4000	2.1	9.7
<i>Metalworking</i>	1300	3.3	6.8

Figura 9: Exponente de pérdida de camino y duración estándar medidos en diferentes edificios. [17]

Para el desarrollo de los modelos de propagación en, los transmisores emiten a una potencia de 20 dBm o 30 dBm para frecuencias de 2.4 GHz y 5.8 GHz respectivamente. [16] El estándar actual contempla 3 tipos de bandas nativas para 5G: 700 MHz, 3.5GHz y 26 GHz. [18] Por ello, y para adaptarnos al modelo de propagación *Log-Distance* utilizaremos frecuencias comprendidas entre 3.5 GHz y 5.8 GHz y un valor de potencia de transmisión de 25 dBm.

Por último, para poder calcular el valor de las distancias máximas de propagación, necesitamos asignar un valor de sensibilidad de potencia para los receptores. La sensibilidad de los receptores 5G oscilan entre valores de -85 dBm, -105 dBm y -120 dBm dependiendo de la frecuencia que se utilice. [19] En la herramienta online “5G Tools for RF Wireless” considerando cierto ruido térmico, figura de ruido y ganancia del receptor, estima una sensibilidad de -112.4 dBm.

Resolviendo:

$$P_{Rx}(\text{dBm}) = P_{Tx}(\text{dBm}) - L_{tt}(\text{dB}) + G_{Tx}(\text{dB}) - L(\text{dB}) + G_{Rx}(\text{dB}) - L_{tr}(\text{dB}) \quad (17)$$

Donde:

P_{Tx} =Potencia transmitida (dBm)

P_{Rx} =Sensibilidad del receptor (dBm)

L_{tt} =Pérdidas de conexión en transmisor (dB)

L_{tr} =Pérdidas de conexión en receptor (dB)

G_{Tx} =Ganancia de antena transmisora (dB)

G_{Rx} =Ganancia de antena receptora (dB)

L =Pérdidas de propagación (dB)

Supondremos despreciables las pérdidas en las conexiones y que la sensibilidad del receptor y la potencia de transmisión ya incluyen sus respectivas ganancias de antena.

Obtenemos el valor de las pérdidas por propagación y despejando la distancia de (15) obtenemos que la distancia de cobertura del sistema será de 133.12 metros para las frecuencias de 3.5 GHz y de 104.05 metros para las frecuencias de 5.8 GHz. Sin embargo, para que el tiempo de simulación no sea muy extendido, ya que en caso de que un haz transmitido no alcance al receptor, este se propagará hasta alcanzar estas distancias máximas. Es por ello, con el fin de acotar tiempo de ejecución y cálculos innecesarios se van a modificar los valores de P_{TX} y P_{RX} para hacerlos más acordes a esta simulación y a este entorno. Los valores utilizados serán: $P_{TX} = 20$ dBm y $P_{RX} = -100$ dBm, con lo que se obtienen distancias de propagación máximas de 50 y 39 metros para las frecuencias de 3.5 GHz y 5.8 GHz respectivamente.

3.8. PÉRDIDAS POR REFLEXIÓN

Las pérdidas por reflexión se producen cuando un haz que se propaga choca con una superficie que no es totalmente absorbente y parte de la energía se refleja. Estas pérdidas dependen del ángulo de incidencia, de las características del material reflector y de la polarización de la onda. En general, cuanto mayor sea el ángulo de incidencia y más conductor sea el material, mayor será la pérdida por reflexión. [20]

La tecnología 5G utiliza frecuencias más altas que las generaciones anteriores, lo que implica que los haces sean más estrechos y susceptibles de sufrir atenuación por los obstáculos del entorno. Además, las frecuencias 5G son más sensibles a las pérdidas por reflexión, ya que se reflejan menos energía que las frecuencias más bajas. Por ejemplo, un estudio muestra que para un ángulo de incidencia de 40° y una superficie de hormigón, la pérdida por reflexión es de unos 8.9 dB. [21]

Para añadir el efecto de las pérdidas por reflexión en la aplicación de simulación, se utilizará el cálculo electromagnético teórico que relaciona la pérdida con el ángulo de incidencia y el material. En el estudio [21] se propone el siguiente modelo para materiales no magnéticos, el coeficiente de reflexión de Fresnel para la onda polarizada en paralelo se muestra como:

$$|\Gamma_{||}| = \left| \frac{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \cos \theta_i - \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} - \text{sen}^2 \theta_i}}{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \cos \theta_i + \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} - \text{sen}^2 \theta_i}} \right| \quad (18)$$

Donde θ_i es el ángulo de incidencia, ϵ_{r1} y ϵ_{r2} denotan la permitividad relativa del medio incidente y del medio reflectante respectivamente. Generalmente, el medio incidente es aire ($\epsilon_{r1}=1$), por lo que la relación ϵ_{r2} a ϵ_{r1} , ϵ_r es igual a ϵ_{r2} . Quedando entonces el cálculo del coeficiente de reflexión:

$$|\Gamma_{||}| = \left| \frac{\epsilon_r \cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \text{sen}^2 \theta_i}}{\epsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \text{sen}^2 \theta_i}} \right| \quad (19)$$

La potencia recibida después de la reflexión puede considerarse como el valor de LOS para la longitud del camino desplegado multiplicado por $|\Gamma|^2$, suponiendo que el tamaño de la frontera reflectante es mucho mayor que la distancia total recorrida por el haz, y que el área de la superficie es mucho mayor que la parte iluminada. [22]

Por lo tanto, la ecuación (15) se modifica añadiendo las pérdidas producidas por la reflexión en las superficies, quedando así la ecuación (20):

$$L(\text{dB}) = L(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + x_\sigma + \Sigma |\Gamma|^2 \quad (20)$$

Donde:

d = Distancia transmisor-receptor (km)

$L(d_o)$ = Pérdidas de propagación (dB) a una distancia d_o

d_o = Distancia de referencia (km) (para ambientes interiores, generalmente es igual a 0,001km)

$X\sigma$ = Variable aleatoria (gaussiana o normal), en dB, con media igual a cero y desviación estándar igual a “ σ ”, también en dB. Esta variable describe el comportamiento estadístico de las pérdidas de propagación para distancias mayores a d_o .

$\Sigma |\Gamma|^2$ = Sumatorio de las pérdidas que se producen cada vez que un haz alcanza un obstáculo.

En la aplicación por lo tanto se va a modificar la función “Propagarse” para incluir la mejora. Lo primero es conocer la permitividad relativa del medio incidente y el ángulo de incidencia para poder aplicar la fórmula (19). En el documento [21] nos aportan valores aproximados de la permitividad relativa de varios materiales como se ve en la figura 10.

Material	ϵ_{rR}	ϵ_{rE}	h_{rms} (μm)	MMSE_{ave}
Wood	1.60–1.89	1.75–1.92	76.4–80.0	$3.79 \times e^{-4}$
Plexiglass	2.581–2.602	2.56–2.69	8.2–14.5	$3.04 \times e^{-4}$
Drywall	2.595–2.602	2.51–2.69	96.4–99.2	$5.47 \times e^{-4}$
Concrete	6.2–7.0	5.94–6.26	264.3–269.0	$7.25 \times e^{-4}$
Red brick	3.75	3.49–3.76	321.3–325.0	$6.43 \times e^{-4}$

Figura 10: Collection of estimated parameters [21]

En la simulación utilizaremos siempre un valor de ϵ_r igual a 6.2 suponiendo que las paredes del espacio están hechas de cemento. Pues para este material su permeabilidad es de 6.2-7.0 en el rango de frecuencias de 1 a 95.5 GHz. [21] Por lo tanto, habría que calcular a continuación el ángulo con el que un haz incide contra el obstáculo. Utilizando el producto escalar del vector dirección del haz con la normal del plano se puede obtener el ángulo que se forma entre los dos vectores. (21)

$$\cos \theta = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|} \quad (21)$$

Sin embargo, lo que nos interesa es el ángulo de incidencia α , que es el ángulo suplementario del ángulo que forman los dos vectores como se representa en la Figura 11.

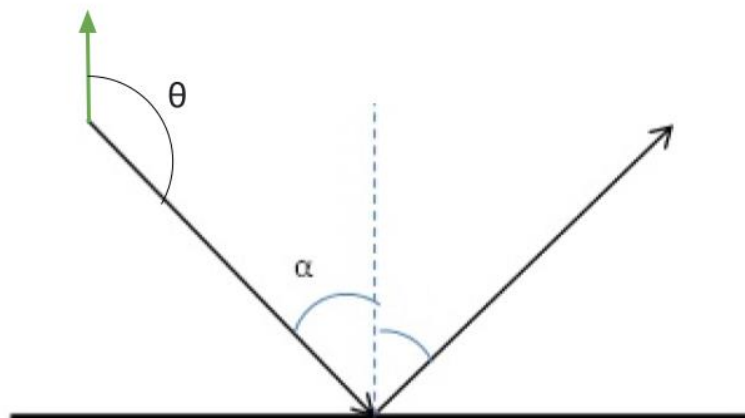


Figura 11: Ángulo de incidencia y ángulo que forma el haz con la normal del plano

Por último, para lograr los efectos de pérdidas por reflexión, las cuales afectarán a la máxima distancia que los haces de propagarán, se calculan las pérdidas por reflexión cada vez que se produzca un rebote con su correspondiente ángulo de incidencia. Se modifica el valor de la distancia máxima de propagación de un haz considerando la nueva atenuación calculada.

3.9. MÚLTIPLES TRANSMISORES

Se ha comprobado hasta ahora mediante numerosas pruebas de la aplicación que utilizar solamente cuatro transmisores para localizar el objetivo no es suficiente. Es cierto que con que haya cuatro medidas de tiempos de propagación es condición suficiente para poder calcular la posición del blanco. Sin embargo, son extrañas las ocasiones en las que esto ocurre, ya que un blanco de dimensiones tan pequeñas no siempre está iluminado por todos los transmisores y los haces que le alcanzan son fruto de las diversas reflexiones lo que afecta negativamente a la precisión del cálculo de la ubicación del objetivo.

Es por ello por lo que, aunque no sea realista, con el fin de solventar el problema se decidió modificar la aplicación de modo que haya muchos transmisores, pues la ausencia de LOS es el principal inconveniente para el desarrollo del posicionamiento. El objetivo es ubicar una cuadrícula de transmisores separados un metro entre sí como muestra la siguiente figura 12:

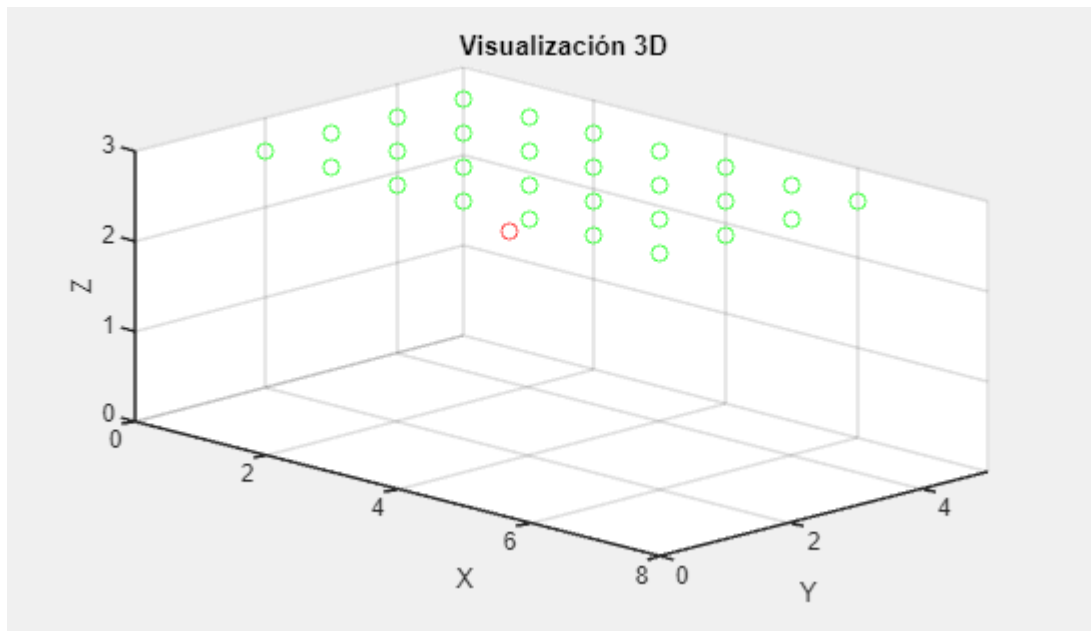


Figura 12: Representación de los transmisores

Para la simulación, se ha modificado el funcionamiento que se seguía cuando se generaba el espacio. Hasta ahora se creaban cuatro transmisores de manera independiente y ahora se crean veintiocho que se almacenan en la matriz “matriz_Tx”. También se eliminan las variables que tenían cada transmisor asignado; “Recepciones_i” que acumulaban las distancias de los diferentes trayectos de los haces para posteriormente elegir entre ellas la menor (supuesto camino LOS). En su lugar, se unificará en la matriz “matriz_recepciones” que almacena la información del trayecto recorrido y de las coordenadas del transmisor correspondiente.

Previamente se realizaba la llamada a la función “Propagarse” para cada haz de un transmisor de forma separada para cada uno de los cuatro transmisores. Ahora, al estar todo en el mismo registro, se puede realizar en un bucle anidado. Otra modificación es que ahora ya no se almacenan todos los valores de se obtienen de la función “Propagarse” pues el objetivo es encontrar el más corto de ellos y los demás se desechan, por lo que acumularlos supone un uso ineficiente de memoria que afecta al desarrollo de la simulación. Es por ello por lo que cada vez que se calcule uno, se realiza una comparación con el valor ya almacenado y en caso de ser menor y no nulo, se almacenaría este último.

Con estas modificaciones se consigue el objetivo que se buscaba, pues ahora por norma general más de cuatro transmisores logran iluminar al objetivo. Antes, si solo un transmisor no lograba el objetivo, era imposible calcular la posición. Ahora bien, como para calcular la posición se requieren cuatro transmisores, se ordena la matriz “matriz_recepciones” de menor a mayor para utilizar los cuatro mejores resultados para calcular la posición empleando como hasta ahora la función “Calcular_Posicion”.

3.10. CALCULAR POSICIÓN

A raíz de la modificación anterior, la implementación de muchos más transmisores beneficia al cálculo de la posición. Pues la función “Calcular_Posicion” resuelve el sistema de ecuaciones que calcula la posición del blanco a partir de los distintos valores de diferencia de tiempo de llegada y la posición conocida de los transmisores que contribuyen a la mencionada medida de diferencia de tiempos.

Con el aumento del número de transmisores, se pueden utilizar un número de ecuaciones igual a la cantidad de TDoAs que se hayan podido calcular. Esto depende de cuántas antenas transmisoras hayan encontrado al blanco.

$$\text{número de valores TDoA} = \text{número de valores ToA} - 1 \quad (22)$$

Esto es así porque se utiliza una medida ToA como referencia para calcular el resto de TDoAs. Ahora bien, el número de transmisores que alcanzan al objetivo (número de valores ToA) es variable. Depende de la posición del blanco y por lo tanto en cada simulación esta cambiará. Una vez obtenida la matriz “matriz_recepciones”, ordenamos los valores de ToA de menor a mayor y filtramos aquellas filas que satisfacen la condición de haber alcanzado al blanco, obteniendo así la matriz “matriz_ToA”. Los valores almacenados en “matriz_ToA” nos sirven para el cálculo de los TDoAs como se muestra a continuación en (23):

$$\left\{ \begin{array}{l} TDoA1 = ToA(2,1) - ToA(1,1) \\ TDoA2 = ToA(3,1) - ToA(1,1) \\ TDoA3 = ToA(4,1) - ToA(1,1) \\ TDoAi = ToA(i + 1,1) - ToA(1,1) \end{array} \right. \quad (23)$$

La función “Calcular_Posicion” también se tiene que modificar para poder funcionar con los nuevos registros de datos de longitud variable. Ahora se trata de un sistema de i ecuaciones, siendo i el número de valores TDoA:

$$\left\{ \begin{array}{l} TDoAi = \frac{1}{c} \sqrt{(x - ToA(i + 1,2))^2 + (y - ToA(i + 1,3))^2 + (z - ToA(i + 1,4))^2} - \\ \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \end{array} \right. \quad (24)$$

Donde (x, y, z) son las incógnitas que equivalen a las coordenadas cartesianas en el espacio del receptor, (x_1, y_1, z_1) las diferentes coordenadas del transmisor utilizado como referencia y $TDoAi$ las diferentes diferencias de tiempo de llegada calculadas anteriormente.

Una vez calculada la posición, si el usuario pulsa el botón “Resultado” la aplicación muestra el mensaje por pantalla (ejemplo):

Parámetros de la simulación:

Frecuencia: 5.8 GHz

Amplitud de Tx: 2.

Amplitud de Rx: 0.2.

Resultados de la simulación:

Número de Tx que han alcanzado al blanco=12.

La posición calculada del blanco es $X=3.9311$, $Y=2.3769$, $Z=1.0272$.

La posición real del blanco es $X=3.9269$, $Y=2.4463$, $Z=1.0132$

El error cometido es de: 7.0909 cm

3.11. OBSTÁCULOS. MODELO 1

El objetivo ahora es modificar el espacio de simulación, para ello se va a crear una pared con un hueco del tamaño de una puerta. Esta pared se ubicará de tal forma que divida el espacio en dos y dificulte la posibilidad de que exista línea de visión directa entre los transmisores y el receptor. (Ver figura 13) La falta de visión directa hará que el receptor detecte rayos que hayan sufrido reflexiones y por consiguiente el cálculo de ToA y por lo tanto de los TDoA sea diferente y la posición calculada sea errónea.

Para crear la pared se utiliza un interruptor en la interfaz de la aplicación, que al activarlo modifica el espacio de simulación añadiendo el nuevo obstáculo. La pared se define como un conjunto de planos que tienen un valor constante de X, Y o Z, dependiendo de su orientación. Estos planos se limitan según unas dimensiones que se ajustan al espacio original, de modo que la pared tenga forma rectangular con un hueco central. La pared se representa en el espacio de simulación con un color diferente al del resto de las paredes, para distinguirla mejor.

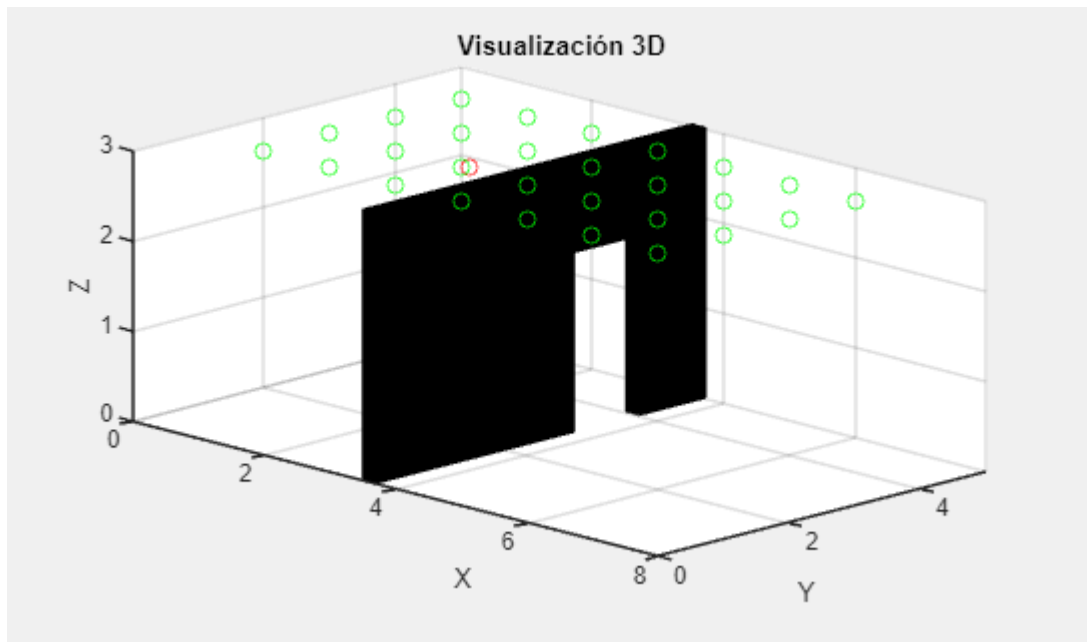


Figura 13: Espacio con obstáculo 1

El nuevo obstáculo con forma de pared debe realizar la misma función que las paredes que definen el espacio, es decir, también tienen que producirse el efecto de reflexión de los haces de propagación cuando estos alcancen el obstáculo. Para ello se desarrolla una función específica que se llama “PropagarseConObstaculo”, que es similar a la función “Propagarse” pero que incluye además los datos necesarios para tener en cuenta la pared. Estos datos consisten en las coordenadas (x, y, z) de los planos que forman la pared, que se almacenan previamente en una matriz. De este modo se puede acceder a los valores que indican los límites de cada plano y conocer el valor de su parámetro constante. Estos valores se utilizan en la función “PropagarseConObstaculo” para verificar si un haz alcanza el nuevo obstáculo, y en caso afirmativo, calcular el punto de reflexión y el nuevo ángulo de propagación del haz.

3.12. OBSTÁCULOS MODELO 2

Para complicar aún más el escenario, se va a crear otra pared con las mismas características que la anterior, pero que esté orientada de forma perpendicular a esta. Así, la nueva pared tendrá un valor constante de Y en lugar de X, y dividirá el espacio en dos partes según el eje Y. (Ver Figura 14) Las dos paredes se podrán crear de manera alterna o simultánea, formando así cuatro posibles espacios para la simulación, dos ya vistos anteriormente y dos nuevos. (Ver Figura 15)

Esta segunda pared se controlará mediante otro interruptor en la interfaz de la aplicación, que permitirá activarla o desactivarla independientemente de la primera. De este modo, se pueden combinar las dos paredes de diferentes formas, creando cuatro posibles configuraciones: sin ninguna pared, con la pared del eje Y, con la pared del eje X, o con ambas paredes. Estas configuraciones afectarán al cálculo de la posición del objetivo, ya que modificarán las condiciones de visión directa y las reflexiones de los haces de propagación.

Para implementar la segunda pared se sigue el mismo procedimiento que para la primera, pero se cambian los valores de las coordenadas de los planos que la componen. Además, se modifica la función “PropagarseConObstaculo” para que tenga en cuenta la posibilidad de que haya dos obstáculos en el espacio, y se compruebe si un haz alcanza alguno de ellos o ambos. En caso de que un haz llegue a cualquiera de las dos paredes, se calcularán los puntos de reflexión y las nuevas direcciones de propagación en cada una de ellas, teniendo en cuenta el orden en el que se producen las reflexiones.

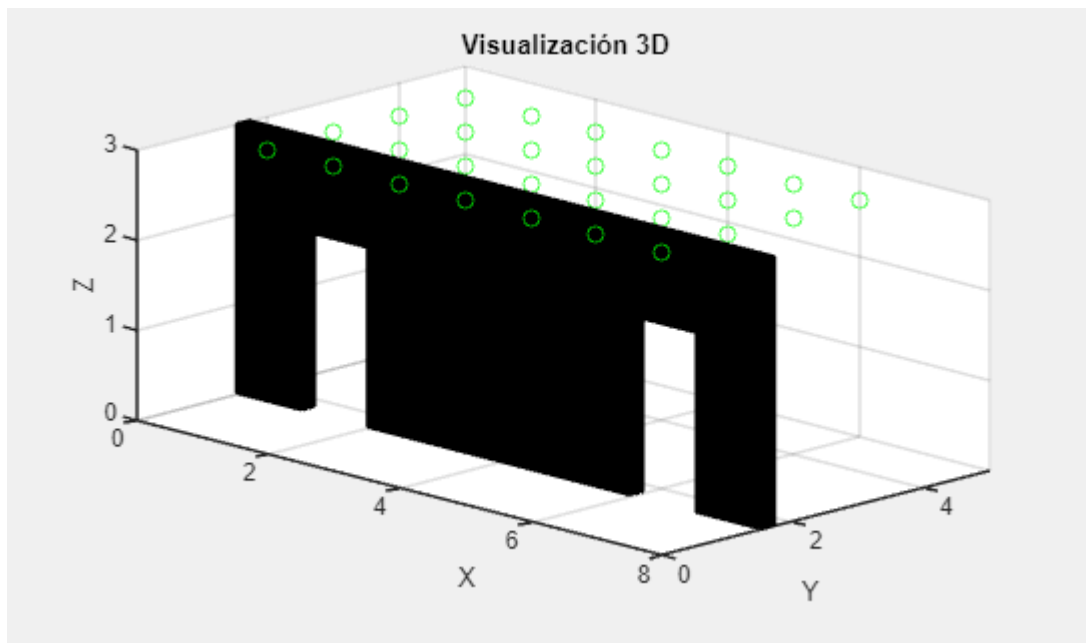


Figura 14: Espacio con obstáculo 2

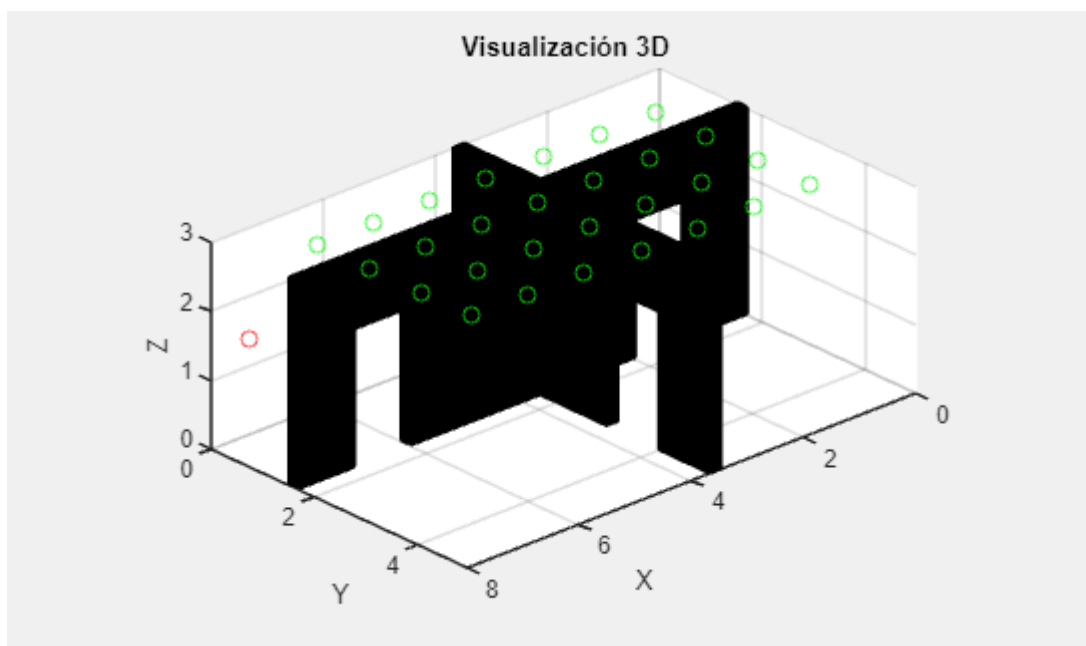


Figura 15: Espacio con obstáculos 1 y 2

4. SIMULACIONES

4.1. RESULTADOS

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos de un conjunto de simulaciones que se han realizado en la aplicación. Estas simulaciones permiten evaluar el comportamiento del sistema de posicionamiento ante diferentes escenarios y condiciones. Los resultados se mostrarán en forma de gráficos y tablas, y se acompañarán de un análisis y una interpretación de los mismos.

4.1.1. FRECUENCIAS DE TRABAJO

Cabe mencionar un hecho importante de la aplicación, se ha considerado la diferencia entre propagaciones a diferentes frecuencias, sin embargo, a efectos prácticos de la simulación estos no causaban ninguna diferencia. Pues las diferencias entre utilizar unas frecuencias u otras se verían reflejadas en la longitud de cobertura de los transmisores y en las reflexiones de los haces.

Sin embargo, dadas las dimensiones del espacio de simulación, estas longitudes no suponían nunca un impedimento en el desarrollo de esta. Además, como se ha mencionado anteriormente, con el material elegido para las paredes de la simulación, su coeficiente de permitividad relativa no varía dentro del rango de frecuencias de trabajo. Por lo que las reflexiones dependen de los ángulos de incidencia de los haces.

Es por ello, y con el objetivo de ahorrar cálculos innecesarios y excesivos tiempos de ejecución de la aplicación, que se ha asignado un valor constante fijo para la propagación de los haces. De este modo se reduce el tiempo de ejecución y se obtienen los mismos resultados que se obtendrían con cualquiera de las frecuencias de la aplicación. Esta simplificación no afecta a la validez ni a la precisión de la simulación, ya que el objetivo es comparar el posicionamiento obtenido con el real, y no el comportamiento de las ondas electromagnéticas en distintos medios. Además, se ha comprobado que el error introducido por esta simplificación es despreciable, y que no influye en el cálculo de la posición del objetivo.

4.1.2. PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN: F: 5.8 GHZ AMPLITUD DE TX: 2 AMPLITUD DE RX: 0.2

Tabla 1: Resultados de Simulación 1

POSICION REAL			POSICION CALCULADA			Error (cm)	Nº de ToA
X	Y	Z	X	Y	Z		
2,079	4,0003	1,2942					0
6,9543	2,8985	1,6496	6,8163	2,7771	1,7391	20,4521	6
1,1596	4,2652	1,8662					
2,8076	2,5662	1,2054	2,8349	2,4204	1,3877	23,505	9
0,60773	1,1996	0,36996	0,7136	1,2853	0,29393	15,6021	6
1,4713	1,1998	1,2518	1,4827	1,3178	1,5328	30,4997	4
0,39724	4,5136	2,8344					
3,9269	2,4463	1,0132	3,9311	2,3769	1,0272	7,0909	12
7,2004	1,8462	0,33361	7,2454	1,8173	0,70644	104,1427	6
6,242	1,9487	0,7207	6,2815	1,9348	0,09174	82,331	9
3,2313	0,48227	0,39592	3,2219	0,48862	0,080228	47,6283	8
7,5364	4,7807	1,7256					
6,5696	0,077017	0,12907	6,5447	0,029521	0,16833	30,2195	4
1,3519	3,2456	2,1952	1,4005	3,2519	3	80,6324	4
5,182	2,2546	1,641	5,3262	2,3653	2,0718	46,7621	6
2,3706	3,7235	0,56687	2,379	3,7386	0,22263	34,4669	12
5,4942	0,91756	1,1055	5,4923	1,197	1,8357	78,1865	8
5,0049	3,9011	0,24338	5	3,9209	0,512	26,9396	9
6,2057	2,434	1,3076	6,177	2,601	1,6785	40,7836	9
3,5743	1,5317	1,5255	3,5457	1,5176	1,8514	32,741	4
4,0862	4,0881	2,3845					
5,1545	1,893	2,4347					
7,0075	2,7508	1,8674	7,1426	2,6575	2,1077	29,0999	4
1,5581	1,1296	0,51212	1,6333	1,1178	0,61124	12,4952	8
1,8213	2,1785	0,93331	1,7926	2,2074	0,19798	73,6457	9
7,387	2,151	0,55445	7,1419	2,0745	0,61376	26,3548	7
7,239	4,8987	1,3166					
4,7592	1,3111	1,8085	4,658	1,3846	2,1421	35,628	4
5,6897	1,1087	0,35225	5,6798	1,0648	0,079	27,6349	
2,3734	1,5939	1,2725	2,4003	1,5426	1,7898	52,0521	9
4,0629	0,42758	0,78745	4,0762	0,066204	0,03561	83,4283	6
6,4081	0,1461	2,7866					1
5,8426	2,443	1,7356	5,6787	2,4719	2,2611	55,1269	6
1,8983	2,2942	2,8893					
4,3744	2,6057	0,69478	4,351	2,607	0,31782	37,77	16
6,3695	0,49356	0,78561	6,3873	0,45493	0,35014	43,7545	6
2,6829	3,3986	0,40966	2,6918	3,4108	0,1026	30,7432	12
5,9526	2,5001	1,4398	5,9437	2,5006	0,86523	57,4582	6
6,4026	2,269	1,2972	6,5189	2,2734	1,6718	39,2253	9
2,153	2,1142	1,6436	2,2783	2,2082	1,7784	20,6687	9

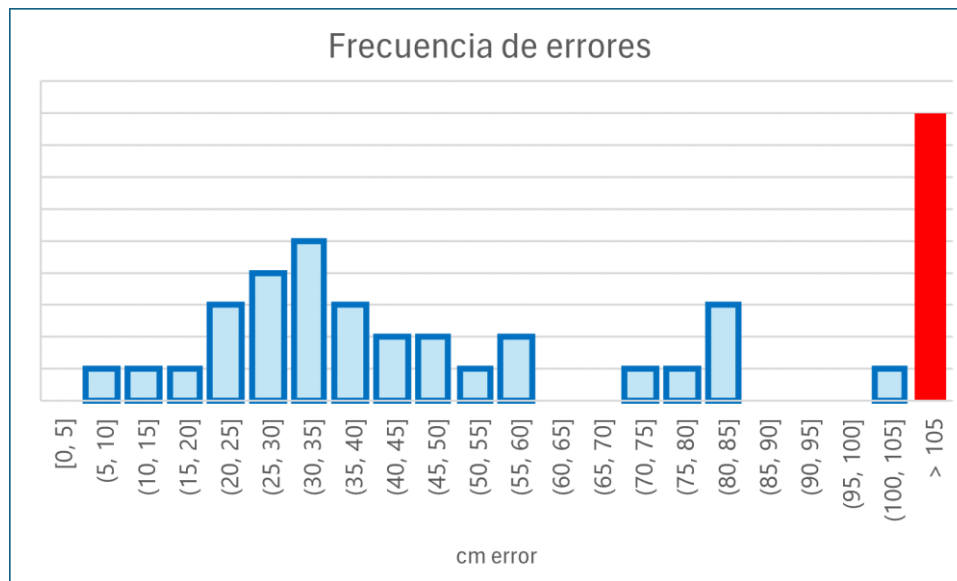


Figura 16: Frecuencia de errores. Simulación 1

En este apartado se presenta el primer análisis de los resultados obtenidos a partir de las diferentes simulaciones realizadas para evaluar el error que se comete al estimar la posición del blanco en función de su ubicación real en cada instante. (Tabla 1) Al analizar los datos se aprecia en la Figura 16 que la mayor parte de las veces el error de medida no excede el valor de 60 centímetros y que la mayor frecuencia de error se sitúa en un intervalo entre 30 y 35 centímetros. El promedio de la medida del error es de unos 43 centímetros.

Se han detectado algunos casos en los que el error supera el valor de los 70 centímetros, y tras examinar los resultados se deduce que estos valores se corresponden con situaciones en las que el blanco se encuentra relativamente cerca de una pared y su estimación de posición se ha basado en una medida de ToA que no se corresponde con la línea de visión directa entre el blanco y el transmisor. Por otra parte, se ha observado que una parte de las simulaciones no han podido finalizar correctamente debido a que no se ha conseguido obtener cuatro medidas de TDoA para el cálculo de la posición (Resultados en color rojo). Este último problema se produce cuando el objetivo se sitúa a pocos centímetros de una pared y debido a la disposición de los transmisores, no se logra que cuatro de ellos le envíen señales. También ocurre cuando el objetivo está muy próximo al techo, lo que implica que solo pueda establecer enlace con el transmisor que tenga más cerca.

4.1.3. MODIFICACIÓN DEL ESPACIO CON OBSTÁCULOS

El espacio de simulación se puede alterar con los diferentes obstáculos y sus combinaciones. La Figura 17 representa un plano cenital del espacio cuando se el número de obstáculos es máximo:

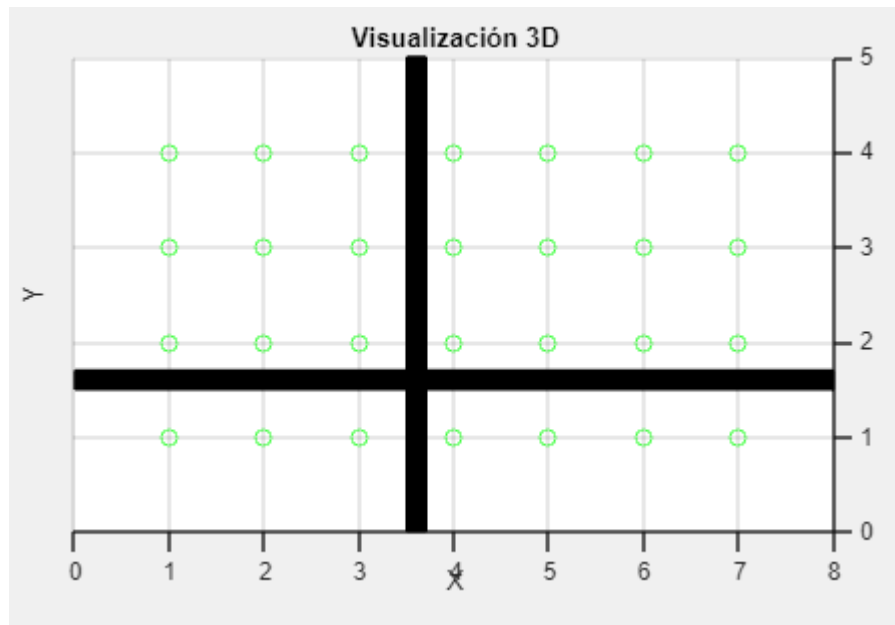


Figura 17: Plano cenital del espacio

Vemos que las paredes dividen el espacio de simulación en cuatro partes, aislando en cada una de ellas un número diferente de transmisores (color verde). A cada una de estas partes en las que se ha dividido el espacio las llamaremos “salas” numerándolas según se observa en la figura 17. Sala 1 (superior izquierda), Sala 2 (superior derecha), Sala 3 (inferior izquierda) y Sala 4 (inferior derecha). Observaremos qué diferencias ocurren cuando el blanco se sitúe en cada uno de ellos y se modifica el número de obstáculos que se utilizan.

Blanco en Sala 1:

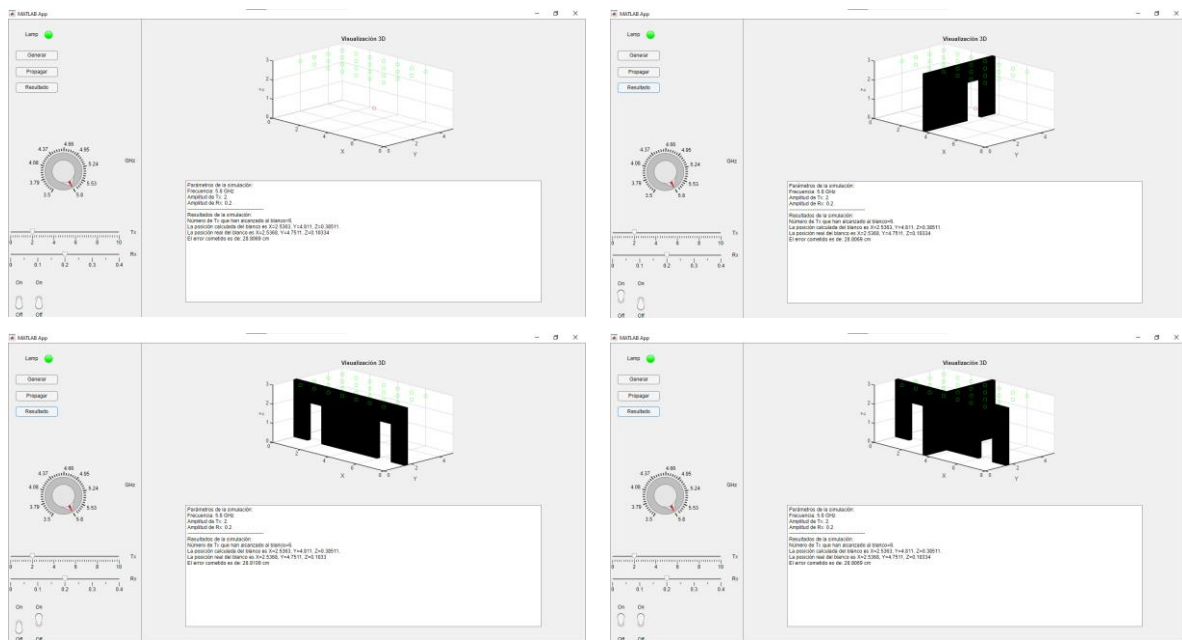


Figura 18: Resultados de simulación en Sala 1

En esta situación, independientemente de los obstáculos, el blanco siempre será detectado por un número de transmisores que posibilitan el cálculo de la posición. De hecho, se observa que la precisión es la misma para las cuatro posibilidades, es decir, el blanco siempre comparte el espacio con los transmisores que mejores resultados de ToA aportan. Pues en el peor de los casos, cuando el receptor está en la sala 1, aún tiene nueve transmisores que pueden realizar el enlace mediante LOS.

Blanco en Sala 2:

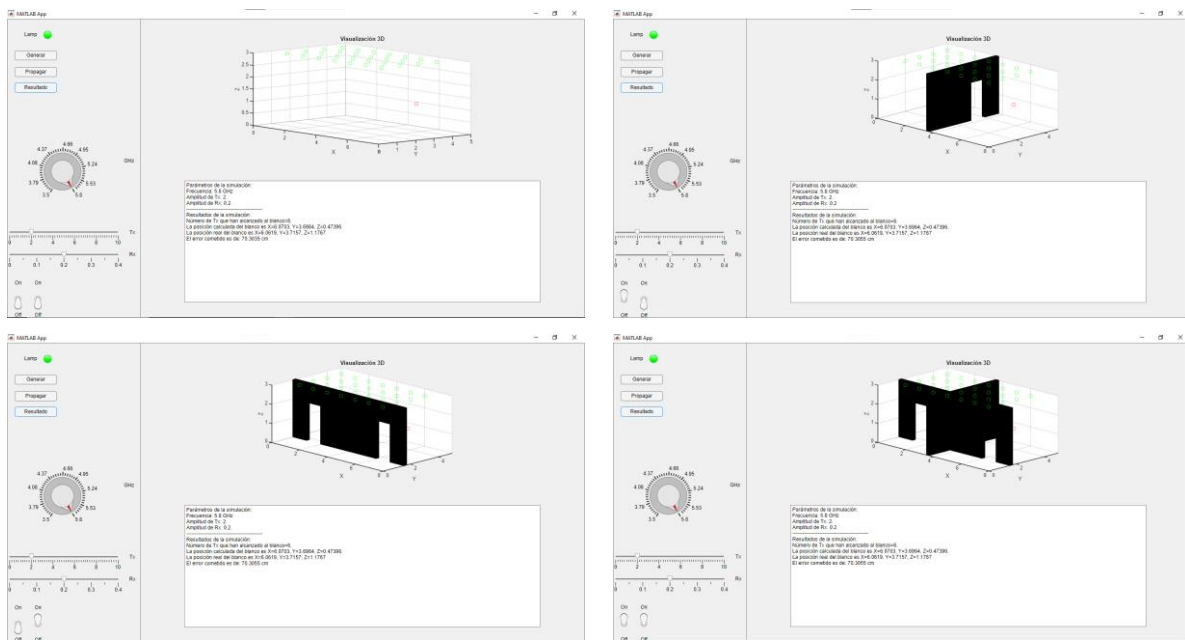


Figura 19: Resultados de simulación en Sala 2

Al igual que en la situación anterior, independientemente de los obstáculos, el blanco siempre será detectado por un número de transmisores que posibilitan el cálculo de la posición. Se observa también que la precisión es la misma para las cuatro posibilidades, es decir, el blanco siempre comparte el espacio con los transmisores que mejores resultados de ToA aportan. Pues en el peor de los casos, cuando el receptor está en la sala 2, aún tiene doce transmisores que pueden realizar el enlace mediante LOS. Esto implica que la sala 2 es la más favorable para la localización del blanco, ya que ofrece una mayor cobertura y una menor probabilidad de que se produzcan interferencias o reflexiones que alteren las medidas de ToA.

Blanco en Sala 3:

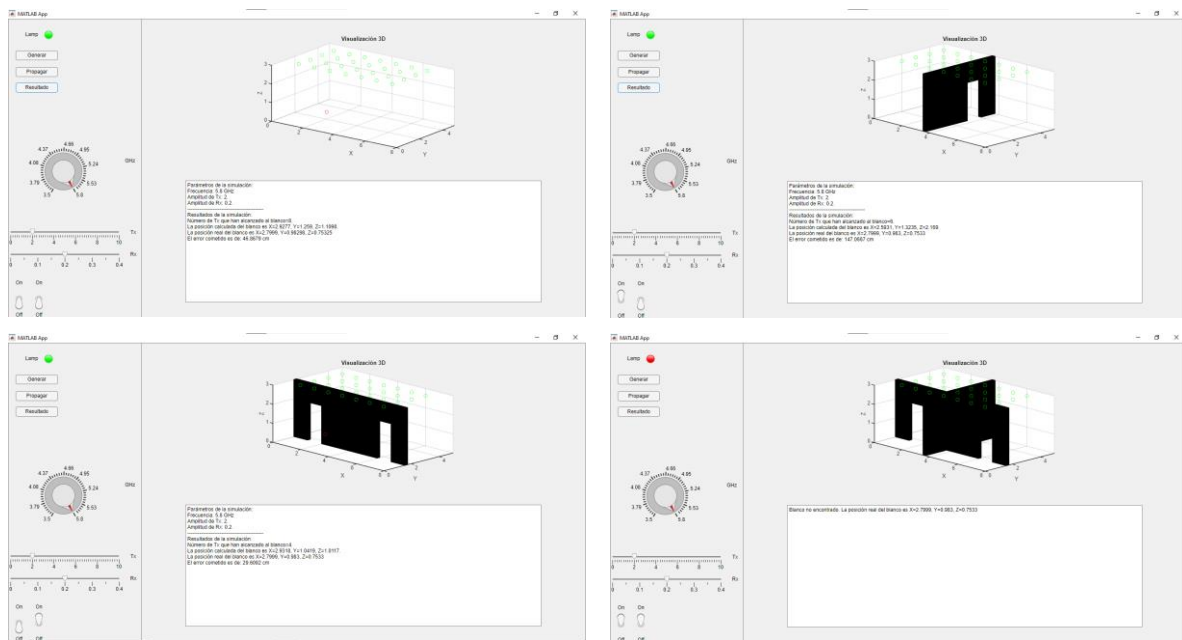


Figura 20: Resultados de simulación en Sala 3

A diferencia de los casos anteriores, aquí sí se observan notables diferencias en los resultados de la simulación cuando se emplea según qué obstáculo. En el caso de que no haya obstáculo, el blanco es alcanzado con una cierta precisión. Cuando se añade el primer obstáculo, se aísla el receptor de los transmisores que se usaban previamente, lo que resulta en una estimación de la posición peor que antes a pesar de que sí se detecte al blanco. Siguiendo con las variaciones del espacio, si se emplea el segundo obstáculo, observamos que se alcanza el objetivo y que además se mejora la precisión. De lo que se deduce que, en el espacio abierto, a pesar de que más transmisores alcancen al blanco, es probable que estos enlaces se produzcan mediante reflexiones y no por rayo directo, lo que influye negativamente al cálculo de la precisión.

Por último, cuando se emplean ambos obstáculos, se obtiene un resultado esperado. Como se muestra en la Figura 17, la Sala 3 solamente cuenta con tres transmisores y aísla al receptor del resto de ellos. Como no son número suficiente para estimar la ubicación, la aplicación no puede encontrar el blanco.

Blanco en Sala 4:

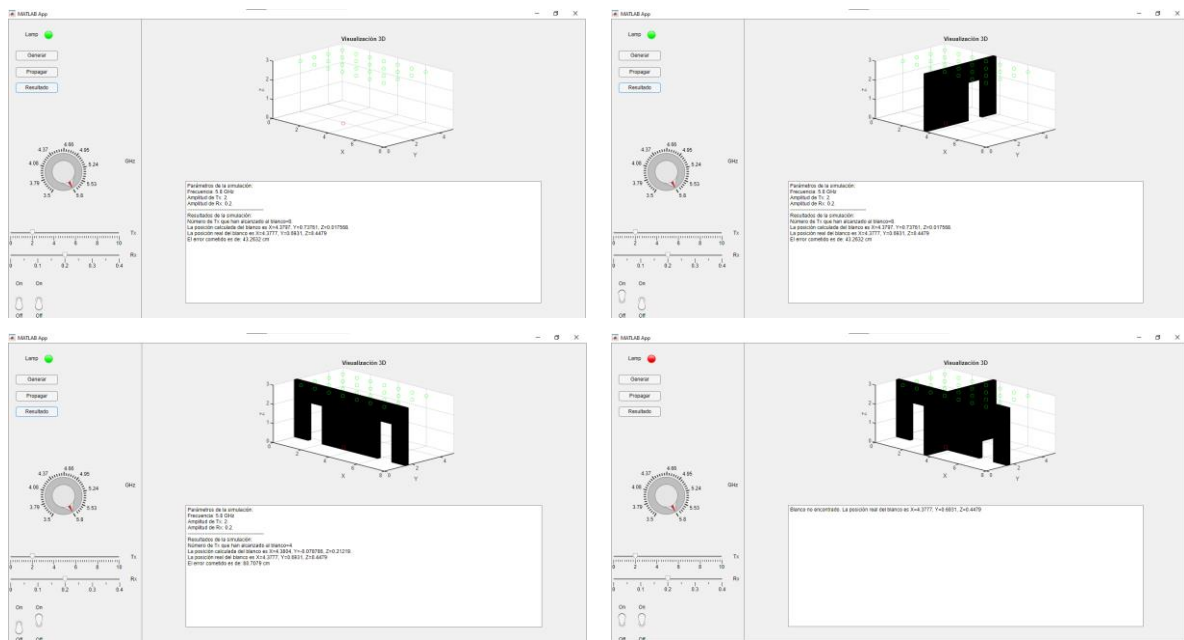


Figura 21: Resultados de simulación en Sala 4

En esta sala, los resultados de la simulación dependen mucho del tipo y la posición de los obstáculos que se utilicen. Cuando no hay ningún obstáculo, el blanco es detectado por cuatro transmisores, lo que permite estimar su posición con una precisión aceptable. Sin embargo, cuando se introduce el primer obstáculo, el blanco queda oculto detrás de él y solamente es alcanzado por un transmisor, lo que impide realizar la localización. Lo mismo ocurre cuando se usa el segundo obstáculo, que bloquea la señal de tres transmisores y deja al blanco fuera del alcance. Finalmente, cuando se emplean ambos obstáculos, el blanco vuelve a ser detectado por cuatro transmisores, pero con una precisión menor que en el caso sin obstáculos, debido a que algunos de los enlaces se realizan por reflexión y no por rayo directo. Esto demuestra que la sala 4 es la menos favorable para la localización del blanco, ya que ofrece una menor cobertura y una mayor probabilidad de que se produzcan interferencias o reflexiones que alteren las medidas de ToA.

4.1.4. MODIFICAR EL VALOR DE LA APERTURA DE LAS ANTENAS TRANSMISORAS

Para la siguiente prueba se van a observar los efectos que se producen al modificar la apertura de las antenas transmisoras. Manteniendo fija la frecuencia, el tamaño del receptor y la posición del blanco. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados de Simulación 2

Amplitud Tx	POSICION REAL			POSICION CALCULADA			Error (cm)	Nº ToA
	X	Y	Z	X	Y	Z		
1	2,8076	2,5662	1,2054	2,8349	2,4204	1,3877	23,505	9
2	2,8076	2,5662	1,2054	2,8349	2,4204	1,3877	23,5041	9
4	2,8076	2,5662	1,2054	2,7951	2,5651	0,94722	25,8488	20
6	2,8076	2,5662	1,2054	2,7971	2,565	0,97407	23,1575	20
8	2,8076	2,5662	1,2054	2,804	2,5688	0,96726	23,8179	20
10	2,8076	2,5662	1,2054	2,7843	2,5686	0,98034	22,6274	20

En este experimento se ha observado cómo varían los resultados de la localización al cambiar la amplitud de los transmisores, es decir, la apertura angular que determina el área de iluminación por rayo directo de cada transmisor. Se ha comprobado que, a medida que se aumenta la amplitud de los transmisores, el número de transmisores que alcanzan al objetivo con sus señales también se incrementa. Esto implica que el error que se comete al estimar la posición del blanco se reduce. La razón de esta mejora es que, al tener áreas de iluminación más grandes, hay más probabilidades de que los haces que llegan al receptor desde una misma antena sean rayos directos y no rayos que se han reflejado en alguna superficie.

4.1.5. MODIFICAR EL VALOR DEL TAMAÑO DEL RECEPTOR

En esta prueba, similar a la anterior, se van a observar los efectos que se producen al modificar el tamaño del receptor. Manteniendo fija la frecuencia, la apertura de las antenas transmisoras y la posición del blanco se plasman los resultados en la Tabla 3. El valor (en metros) del tamaño del receptor equivale a la mitad del valor del lado de un cubo. En el centro de este volumen se encuentra el receptor, ya que este es un punto situado en el espacio, es similar al volumen que tendría el blanco. O de forma análoga se puede considerar este parámetro de la simulación como un margen respecto a la anchura real que tienen los haces de propagación, en vez de ser líneas infinitamente estrechas.

Tabla 3: Resultados de Simulación 3

Tamaño Rx (m)	POSICION REAL			POSICION CALCULADA			Error (cm)	Nº ToA
	X	Y	Z	X	Y	Z		
0,05	2,8076	2,5662	1,2054	2,8069	2,5647	1,1556	4,981	20
0,1	2,8076	2,5662	1,2054	2,7995	2,5593	1,1064	9,9561	20
0,15	2,8076	2,5662	1,2054	2,8	2,5652	1,0148	19,0753	20
0,2	2,8076	2,5662	1,2054	2,7951	2,5651	0,94722	25,8488	20
0,25	2,8076	2,5662	1,2054	2,791	2,5543	0,85764	34,8359	20
0,3	2,8076	2,5662	1,2054	2,7854	2,5563	0,74639	45,9653	20
0,35	2,8076	2,5662	1,2054	2,7822	2,5561	0,63634	56,971	20
0,4	2,8076	2,5662	1,2054	2,7735	2,5594	0,52262	68,3667	20

En este ejemplo en el que con un valor pequeño se consigue ubicar al objetivo, observamos que el tamaño del receptor es un parámetro crucial para la precisión del blanco. Ya que, si se logra el enlace, los cálculos de ToA serán más finos y por lo tanto la ubicación será mucho más precisa. Si este valor tendiese a ser nulo y aún mantuviese enlace con suficientes transmisores, el error que se produce a la hora de estimar la ubicación sería inexistente.

4.1.6. PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN: F: 5.8 GHZ AMPLITUD DE TX: 4 AMPLITUD DE RX: 0.05

Por último, se van a analizar los resultados de diversas simulaciones empleando como parámetros los valores que mejoran la precisión de la ubicación, obteniendo así los siguientes resultados recogidos en la Tabla 4:

Tabla 4: Resultados de Simulación 4

X	Y	Z	X	Y	Z	Error (cm)	Columna2
5,6749	3,7734	0,82808	5,6725	3,7776	0,7549	7,1746	12
7,307	3,1618	0,29262	7,3262	3,1719	0,14139	15,2782	6
3,1378	3,2774	0,51356	3,1474	3,2858	0,45981	5,5246	11
5,6484	0,15916	0,83077	5,6512	0,139	0,78535	4,9777	7
0,27557	2,1937	1,1447	0,29867	2,1909	1,0975	5,2607	8
6,1241	3,976	0,56062	6,1274	3,9622	0,51082	5,1758	9
3,9181	2,2279	1,9389	3,9182	2,2315	1,8746	6,4457	9
0,36937	0,48566	2,4704					
5,4376	3,2755	0,48784	5,4332	3,2838	0,41616	7,2286	12
0,95198	2,4918	2,8792					
2,7231	2,9263	0,67144	2,7196	2,9193	0,61309	5,8868	15
6,0101	1,2755	1,5179	6,0191	1,2833	1,4854	3,4566	12
5,5926	4,4545	2,8779					
4,3777	0,69312	0,44788	4,3633	0,68592	0,38905	6,1	7
2,0601	4,2036	0,76285	2,0593	4,1869	0,72604	4,0406	10
6,5143	1,2176	2,7878					
2,7999	0,98298	0,75325	2,7974	0,9924	0,70136	5,2795	12
4,9284	2,3664	1,055	4,9306	2,3671	1,0101	4,4985	20
6,6466	2,9263	1,6492	6,6164	2,9417	1,7015	6,2334	12
7,3375	1,4292	2,2716					

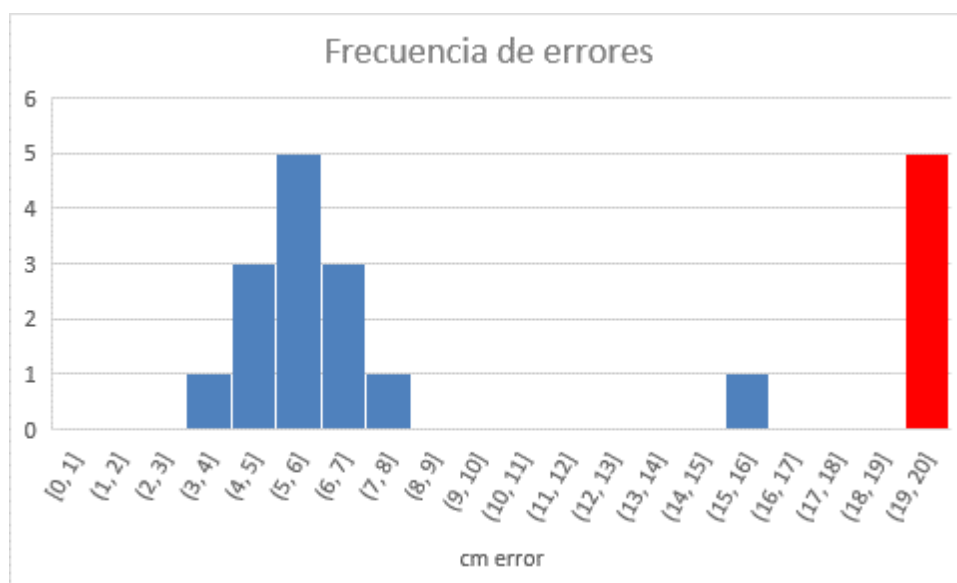


Figura 22: Frecuencia de errores: Simulación 2

Este experimento muestra que la aplicación puede alcanzar una precisión de unos cinco centímetros en la localización del blanco, lo cual es un resultado excelente. No obstante, este alto nivel de precisión implica un mayor riesgo de fallar en la detección del blanco (resultados en rojo). Por lo tanto, se trata de un compromiso entre precisión y fiabilidad, ya que en el primer experimento la precisión era menor pero la probabilidad de éxito era mayor.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que la aplicación es capaz de localizar un blanco con una precisión de unos cinco centímetros, utilizando el método TDoA para estimar su posición a partir de las diferencias de tiempo entre las señales que llegan a los receptores. Esta precisión es muy alta y demuestra la utilidad de la aplicación para aplicaciones que requieran una localización precisa y rápida de un objeto o persona. Sin embargo, también se observa que el método TDoA tiene el inconveniente de que puede fallar en la detección del blanco cuando las señales están afectadas por rebotes. Por lo tanto, el método TDoA no es infalible, y se debe tener en cuenta el nivel de confianza que ofrece en cada caso, y combinarlo con otros métodos o fuentes de información si es necesario.

Además, el hecho de que el método TDoA precise de cuatro enlaces transmisor-receptor, hace que en las situaciones en las que los obstáculos interfieren en dichos enlaces sea imposible el cálculo de la ubicación del blanco. De igual manera, este método es sensible al multitrayecto de los haces, pues se ha comprobado que en caso de LOS el cálculo de la posición es siempre más preciso.

Un aspecto que no se ha podido analizar en profundidad es el efecto de la frecuencia de las señales sobre la propagación y la precisión de la localización. Debido al tamaño reducido del espacio de la simulación, el uso de distintas frecuencias no ha supuesto una diferencia significativa en el resultado final. De la misma manera que al no poder variar el material con el que están contruidos los obstáculos, no se ha podido observar el efecto de las reflexiones en distintos materiales y a distintas frecuencias. Sin embargo, hubiese sido interesante para el estudio observar cómo afecta la frecuencia al comportamiento de las ondas electromagnéticas en distintos medios y cómo se podría aprovechar esta información para mejorar la estimación de la posición. No obstante, hay que recordar que el objetivo principal del proyecto era la precisión de posicionamiento de la simulación y no el estudio detallado de las propiedades de las ondas electromagnéticas.

Por lo tanto, se podría concluir que la aplicación que simula un IPS funciona correctamente, pudiendo lograr precisiones muy satisfactorias en la localización del blanco. Sin embargo, un inconveniente de la aplicación es que una simulación requiere una cantidad muy elevada de cálculos, lo que implica un tiempo de espera considerable entre que se inicia la simulación y hasta que se obtienen los resultados. Este tiempo de espera puede variar según el número de transmisores, receptores y obstáculos que se utilicen, pero en general se sitúa en torno a los diez minutos. Esto se debe a que se simula la propagación de cada haz de manera individual, siendo muchos los haces que provienen de un único transmisor y como se ha visto en el desarrollo, se emplean múltiples transmisores. Todo esto se traduce en un alto consumo de recursos computacionales, que podría limitar el uso de la aplicación en situaciones que requieran una respuesta rápida o una actualización continua de la posición. Actualmente entre que arranca la simulación y se obtienen los resultados, el tiempo requerido es de unos diez minutos aproximadamente (más si se añaden los obstáculos).

5.2. LÍNEAS FUTURAS

La aplicación desarrollada para la localización de un blanco mediante señales radio tiene un gran potencial de mejora y ampliación, ya que se pueden incorporar nuevas funcionalidades y opciones que la hagan más versátil y precisa. Algunas de estas posibles modificaciones son las siguientes:

-Una de las modificaciones consiste en fijar un número mínimo de transmisores que deben enviar señales al blanco para poder estimar su posición, y alertar al usuario cuando este número no se cumpla. Esto permitiría garantizar que se dispone de suficiente información para realizar una localización fiable, y evitar posibles errores o inconsistencias en los resultados.

-Hasta ahora el blanco siempre permanece inmóvil por lo tanto se podría incorporar un modelo de movimiento del blanco, basado en su velocidad y aceleración, para poder predecir su posición cuando no se disponga de suficientes medidas o cuando estas sean erróneas. Este modelo se podría implementar una combinación de las medidas obtenidas con las predicciones del modelo, y actualizaría el estado del blanco de forma óptima.

-También se podría variar el tamaño y la forma del espacio en el que se realiza la localización, para adaptarse a diferentes escenarios y condiciones. Por ejemplo, se podría utilizar un espacio rectangular, circular, elíptico o irregular, según la geometría del lugar donde se quiera realizar la localización. Asimismo, se podría ajustar el tamaño del espacio según la distancia máxima a la que se quiera localizar el blanco.

-Otra opción interesante sería poder variar el método de posicionamiento que se emplea, entre ToA, TDoA o una combinación de ambos, según la disponibilidad y la calidad de las señales. El método ToA utiliza el tiempo que tarda la señal en llegar desde el transmisor al receptor, y requiere que ambos estén sincronizados. El método TDoA utiliza la diferencia de tiempo entre la llegada de la señal procedente de dos transmisores, y no requiere sincronización. Ambos métodos tienen ventajas e inconvenientes, y se podrían combinar para obtener una mejor estimación de la posición.

-Otra implementación podría ser la creación de varios blancos, y de esta manera añadir complejidad a la aplicación introduciendo interferencias entre ellos, el uso de modulaciones en las señales para evitar dichas interferencias, o la posibilidad de asignar distintos transmisores a cada blanco. Esto permitiría simular situaciones más realistas, en las que se quiera localizar a varios objetos o personas al mismo tiempo y se deba tener en cuenta la influencia mutua que ejercen entre sí. Por ejemplo, se podría simular el caso de un sistema de seguridad que rastrea a varios intrusos en un edificio.

-Asimismo, para mejorar la versión actual y poder hacer un uso eficaz de las frecuencias de trabajo, se podría modificar la naturaleza de los obstáculos/límites del espacio. Ya que actualmente se consideran pérdidas por reflexión que se producen cuando un haz rebota

con un obstáculo. En posibles futuras versiones sería conveniente poder modificar los materiales de los que están hechos los obstáculos. De esta manera se podría observar el comportamiento de los haces cuando alcanzan un obstáculo dependiendo de la frecuencia y de los coeficientes de dichos materiales. Con esto, el empleo de las distintas frecuencias sí que afectarían a los resultados de la simulación.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cheng, E., "The impact of 5G on location technology: what's real and what's hype?" , Enero 2023 [En línea]. Available: <https://www.pointr.tech/blog/5g-indoor-positioning>
- [2] N. Samama, "Indoor Positioning Technologies and performance, New Jersey, New Jersey": IEEE PRESS, 2019.
- [3] K. Liu, X. Liu, and X. Li, "Guoguo: Enabling Fine-grained Indoor Localization via Smartphone," in Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, ser. MobiSys '12. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2012, p. 235–248.
- [4] A. H. Sayed, A. Tarighat, and N. Khajehnouri, "Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, pp. 24–40, July 2005, doi: 10.1109/MSP.2005.1458286.
- [5] L. Pei, J. Liu, R. Guinness, Y. Chen, H. Kuusniemi, and R. Chen, "Human behavior cognition using smartphone sensors," *Sensors*, vol. 13, no. 2, pp. 1402–1424, 2013, doi: 10.3390/s130201402.
- [6] E. Widdison and D. G. Long, "A Review of Linear Multilateration Techniques and Applications" , *IEEE Access*, vol. 12, pp. 26251–26266, Feb. 2024
- [7] Ranganathan, A. "The levenberg-marquardt algorithm. Tutorial on LM algorithm", 11(1), pp. 101–110, 2004
- [8] S. Bancroft, "An algebraic solution of the GPS equations," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-21, no. 7, pp. 56–59, Jan. 1985.
- [9] Y. T. Chan and K. C. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 42, no. 8, pp. 1905–1915, Aug. 1994.
- [10] S. Kay, "Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory," Prentice Hall, 1993.
- [11] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 34, no. 3, pp. 276–280, Mar. 1986.
- [12] L. Banin, U. Schatzberg, Y. Amizur, "Next Generation Indoor Positioning System Based on WiFi Time of Flight"—26th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Nashville TN Intel Corp., Sep. 2013
- [13] Yoon, J.-h.; Kim, H.-j.; Kwon, S.-k. "Proximity-Based Adaptive Indoor Positioning Method Using Received Signal Strength Indicator." , *Appl. Sci.* 2024, 14, 3319.
- [14] Robesaat, J.; Zhang, P.; Abdelaal, M.; Theel, O. An improved BLE indoor localization with Kalman-based fusion: An experimental study. *Sensors* 2017, 17, 951.
- [15] García, A.F., Gómez, C., Sánchez, T., Redondo, A.D., Betancur, L., Hincapié, R.C. "Algoritmos de Radiolocalización basados en ToA, TDoA y AoA" de *Revista Ingeniería y Región*, 2015
- [16] Juan M. Torres , Ángel Pinto-Mangones, Mario R. Macea A. , Nelson A. Pérez-García y Leidy Marian Rujano, "Modelo para la estimación de las pérdidas de propagación en redes WLAN operando en 2,4 GHz y 5,8 GHz, para ambientes interiores de edificios comerciales"- *Universidad, Ciencia y Tecnología*, Marzo 2016

- [17] J.B. Andersen, T.S. Rappaport, and S. Yoshida, "Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channel", IEEE Communication Magazine, pp. 42-49 Enero 1995
- [18] «Movistar» "Frecuencias 5G: ¿Qué son y por qué son importantes?" [En línea]. Available: <https://www.movistar.es/blog/5g/frecuencias-5g-que-son-y-por-que-son-importantes/>
- [19] «Huawei» "Cuál es la sensibilidad del receptor" [En línea]. Available: <https://forum.huawei.com/enterprise/es/%C2%BFcu%C3%A1-es-la-sensibilidad-del-receptor/thread/667219389814030337-667212883622244352>
- [20] J. D. Parsons, The Mobile Radio Propagation Channel, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2000.
- [21] Wang, M.; Wang, Y.; Li, W.; Ding, J.; Bian, C.; Wang, X.; Wang, C.; Li, C.; Zhong, Z.; Yu, J. Reflection Characteristics Measurements of Indoor Wireless Link in D-Band. Sensors 2022, 22, 6908. <https://doi.org/10.3390/s22186908> Academic Editor: Jan M. Kelner Received: 14 August 2022 Accepted: 8 September 2022 Published: 13 September 2022
- [22] Landron, O.; Feuerstein, M.J.; Rappaport, T.S. A comparison of theoretical and empirical reflection coefficients for typical exterior wall surfaces in a mobile radio environment. IEEE Trans. Antennas Propag. 1996, 44, 341–351

Otras referencias consultadas:

V. Moreno Quintana (2017) "Desarrollo de un simulador de sistemas de multilateración para vigilancia aérea en TMA", Universidad Politécnica de Valencia, Valencia

«5G Tools for RF Wireless» [En línea]. Available: <https://5g-tools.com/5g-nr-ssb-sss-epre-power-calculator/>

Quijano Cocom, Diango Emmanuel (2019) "Sistemas de posicionamiento en interiores, tecnologías, aplicaciones y evolución", Universidad Autónoma del estado de Quintana Roo, Chetumal, México

<https://www.mathworks.com/>

ANEXO A: ASPECTOS ÉTICOS, ECONÓMICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES

A.1 INTRODUCCIÓN

El proyecto consiste en el desarrollo de una aplicación que simula un sistema de posicionamiento en interiores empleando la técnica de diferencia de tiempo de llegada. Esta técnica utiliza la diferencia entre los tiempos en que las señales de radio emitidas por varios emisores llegan a un receptor para estimar la posición del emisor. El objetivo es evaluar el rendimiento de esta técnica, que puede ser útil para localizar personas o dispositivos en entornos donde el GPS no funciona, como edificios, túneles o minas. El proyecto pretende cubrir la necesidad de mejorar la seguridad y la eficiencia de las operaciones en estos entornos, así como facilitar la navegación y la orientación de los usuarios. El proyecto se relaciona con los temas sociales, económicos, éticos, legales y ambientales que afectan al sector de las comunicaciones inalámbricas, tales como la protección de la privacidad de los datos, el uso responsable del espectro radioeléctrico, el impacto económico de las pérdidas o robos de dispositivos, o la reducción del consumo energético.

A.2 DESCRIPCIÓN DE IMPACTOS RELEVANTES RELACIONADOS CON EL PROYECTO

Para seleccionar y describir los impactos relevantes relacionados con el proyecto, se ha seguido el método de análisis multicriterio (MCA), que consiste en identificar los criterios de sostenibilidad, ponderar su importancia relativa, evaluar las alternativas posibles y calcular el valor agregado de cada una. Los criterios de sostenibilidad se han clasificado en cuatro dimensiones: social, económica, ética y ambiental. Los grupos de interés se han definido como las personas o entidades que pueden afectar o ser afectadas por el proyecto, tanto de forma directa como indirecta. Los principales grupos de interés identificados son: los usuarios finales, los proveedores, los competidores, los reguladores, la sociedad y el medio ambiente.

A partir del análisis MCA, se ha concluido que los asuntos más relevantes relacionados con la sostenibilidad del proyecto son los siguientes:

- La seguridad y el bienestar de los usuarios finales, que se benefician de una mayor precisión y fiabilidad en la localización de dispositivos en entornos interiores.
- El valor económico generado por el proyecto, que supone una ventaja competitiva y una oportunidad de mercado para los proveedores y un ahorro de costes para los usuarios al poder usar un software de simulación con el fin de comprobar el funcionamiento.
- La privacidad y la dignidad de las personas, que pueden verse comprometidas por el uso indebido o no autorizado de los datos de localización.
- El uso responsable del espectro radioeléctrico, que implica respetar la normativa legal y evitar interferencias con otros servicios de comunicación.
- El impacto ambiental del proyecto no consta que afecte ni modifique el consumo energético ni las emisiones de CO₂ asociadas a transporte o logística. Se emplean señales de radio que no suponen un riesgo para la salud ni para el medio ambiente. Además, el proyecto fomenta el

ahorro de energía al permitir ajustar el consumo de los dispositivos en función de su posición y necesidades.

A.3 ANÁLISIS DETALLADO DE ALGUNO DE LOS PRINCIPALES IMPACTOS

El uso y el tratamiento de los datos de localización de los usuarios finales puede tener un importante impacto ético relacionado con la privacidad y la dignidad de las personas, que puede verse afectado por el uso indebido o no autorizado de dichos datos.

Puede surgir un problema ético cuando los datos de localización de los usuarios finales son recogidos, almacenados, procesados o compartidos sin su conocimiento o consentimiento, lo que vulnera su derecho a la autodeterminación informativa y puede poner en riesgo su seguridad, intimidad o reputación. Por ejemplo, si los datos de localización de un empleado son usados por su empleador para controlar su productividad, o si los datos de localización de un cliente son vendidos a terceros para fines comerciales o publicitarios, se estaría incurriendo en una práctica éticamente cuestionable.

Por un lado, el interés de los proveedores del sistema de posicionamiento en interiores es obtener beneficios económicos y ventajas competitivas mediante el uso y la explotación de los datos de localización. Por otro lado, está el principio de respeto a la privacidad y la dignidad de las personas, que implica reconocer su derecho a decidir libremente sobre el uso de sus datos personales y a proteger su identidad, integridad y libertad. Además, el principio de responsabilidad, que implica asumir las consecuencias de las acciones realizadas en el desarrollo y la implementación del proyecto, así como adoptar medidas preventivas y correctivas para evitar o minimizar los posibles daños que puedan causar a los usuarios u otros grupos de interés.

Existen diferentes alternativas con diferentes implicaciones como, por ejemplo, no tomar ninguna medida para garantizar la privacidad y la dignidad de las personas. Esta opción tendría un impacto negativo en la dimensión ética del proyecto, ya que supondría ignorar o despreciar los derechos y los intereses de los usuarios finales, así como asumir el riesgo de enfrentarse a posibles reclamaciones legales o sanciones administrativas por incumplir la normativa vigente sobre protección de datos. Otra alternativa consistiría en cumplir con la normativa legal aplicable en materia de protección de datos, que establece los principios, los derechos y las obligaciones que deben respetar los responsables y los encargados del tratamiento de datos personales. Esta opción tendría un impacto positivo en la dimensión ética del proyecto, ya que supondría actuar conforme a la ley y a los estándares mínimos de protección de la privacidad y la dignidad de las personas. Sin embargo, esta opción podría no ser suficiente para garantizar un nivel óptimo de respeto a los principios e intereses en conflicto, ya que la normativa legal puede estar desactualizada o ser insuficiente para regular las nuevas tecnologías y aplicaciones. Otra opción consiste en aplicar buenas prácticas y códigos de conducta voluntarios que establezcan criterios y recomendaciones para el tratamiento ético de los datos de localización. Esta opción tendría un impacto positivo en la dimensión ética del proyecto, ya que supondría ir más allá del cumplimiento legal y adoptar medidas preventivas para proteger la privacidad y la dignidad de las personas. Algunas de estas medidas podrían ser: informar a los usuarios finales sobre el uso y el tratamiento de sus datos de localización,

solicitar su consentimiento expreso e informado, cifrar los datos, limitar el acceso y la transferencia de los datos a terceros, implementar mecanismos de control, o establecer protocolos de actuación en caso de brechas de seguridad o violaciones de derechos. Esta última es la que mejor respeta y equilibra los principios e intereses en conflicto, al garantizar el derecho a la privacidad y la dignidad de las personas y al asumir la responsabilidad por el uso y el tratamiento de los datos de localización. Además, esta alternativa también puede tener beneficios económicos y sociales para el proyecto, al generar confianza y satisfacción entre los usuarios finales, mejorar la reputación y la imagen de los proveedores, y contribuir al desarrollo sostenible de la sociedad y el medio ambiente.

A.4 CONCLUSIONES

El proyecto de simulación de un sistema de posicionamiento en interiores basado en TDoA tiene un impacto ético, social y económico significativo, que se ha analizado siguiendo los criterios de sostenibilidad establecidos por la ETSIT-UPM. Algunas de las conclusiones a las que se ha llegado son las siguientes:

-El proyecto contribuye a mejorar la seguridad y el bienestar de las personas que trabajan o transitan en entornos donde el GPS no es operativo, como bomberos, mineros o personal sanitario. También facilita la gestión y el control de los recursos materiales, evitando posibles pérdidas o robos. Estos aspectos tienen una repercusión positiva en la dimensión social del proyecto.

-El proyecto genera un valor económico al ofrecer una solución innovadora y competitiva para el mercado de las comunicaciones inalámbricas, que tiene un gran potencial de crecimiento y demanda. Además, el proyecto permite optimizar el uso de los recursos energéticos y reducir los costes operativos asociados a la localización de dispositivos. Estos aspectos tienen una repercusión positiva en la dimensión económica del proyecto.

-El proyecto respeta la privacidad y la dignidad de las personas, garantizando que los datos de localización solo se usen con fines legítimos y con el consentimiento de los usuarios. Asimismo, el proyecto cumple con la normativa vigente sobre el uso del espectro radioeléctrico, evitando interferencias o congestiones con otros servicios. Estos aspectos tienen una repercusión positiva en la dimensión ética del proyecto.

-El proyecto minimiza el impacto ambiental al emplear señales de radio que no suponen un riesgo para la salud ni para el medio ambiente. Además, el proyecto fomenta el ahorro de energía al permitir ajustar el consumo de los dispositivos en función de su posición y necesidades. Estos aspectos tienen una repercusión positiva en la dimensión ambiental del proyecto.

Se puede concluir que el uso de criterios de sostenibilidad ha aportado un valor añadido al proyecto, ya que ha permitido identificar y evaluar los impactos relevantes que se derivan del mismo, así como proponer medidas de mejora o mitigación.

ANEXO B: PRESUPUESTO ECONÓMICO

COSTE DE MANO DE OBRA (coste directo)

Horas	Precio/hora	Total
310	10 €	3.100 €

COSTE DE RECURSOS MATERIALES (coste directo)

	Precio de compra	Uso en meses	Amortización (en años)	Total
MATLAB and Simulink Student Suite License	69,00 €	6	1	34,50 €

COSTE TOTAL DE RECURSOS MATERIALES

34,50 €

GASTOS GENERALES (costes indirectos)

15%

sobre CD

470,10 €

BENEFICIO INDUSTRIAL

6%

sobre CD+CI

216,28 €

SUBTOTAL PRESUPUESTO

3820,88 €

IVA APLICABLE

21%

802,38 €

TOTAL PRESUPUESTO

4623,26 €