

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Informe Final del Proyecto de *Mención de Titulación* ~~Habilitación Profesional~~

**Diseño e implementación de un sistema de tracking
BLE para interiores de múltiples tags con múltiples
antenas**

Jocsan Magdiel Vergara Blanco

Profesor Miguel Ernesto Figueroa Toro
Profesor Sergio Kendrick Sobarzo Guzmán
Profesor Mario Rubén Medina Carrasco

Concepción, Julio de 2022

Aprender a escribir usando frases cortas

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN	4
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1.	INTRODUCCIÓN	5
2.1.1	POSICIONAMIENTO EN INTERIORES	5
2.1.2	TÉCNICAS DE POSICIONAMIENTO	8
2.1.3	REDES NEURONALES	8
2.2.	TRABAJOS PREVIOS	10
2.2.1	RSSI	10
2.2.2	AOA	12
2.3.	DISCUSIÓN	13
3.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	14
3.1.	INTRODUCCIÓN	14
3.2.	HIPÓTESIS DE TRABAJO	14
3.3.	OBJETIVOS	14
3.3.1	<i>Objetivo General</i>	14
3.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	15
3.4.	ALCANCES Y LIMITACIONES	15
3.5.	METODOLOGÍA	15
4.	AVANCES EN EL TEMA	16
4.1.	INTRODUCCIÓN	16
4.2.	TEORÍA	16
4.2.1	<i>De los Modelos</i>	18
4.3.	SIMULACIÓN	20
4.4.	EXPERIMENTACIÓN	20
5.	CONCLUSIONES	35
5.1.	SUMARIO	35
5.2.	CONCLUSIONES	35
5.3.	TRABAJO FUTURO	35

Abreviaciones

Mayúsculas

GPS	: Sistema de posicionamiento global - Global Positioning System
RFID	: Identificador por radio frecuencia - Radio Frequency Identification
UWB	: Banda ultra ancha - ultra-wideband
WLAN	: Red de área local inalámbrica – Wireless local area network
BLE	: Bluetooth de baja energía - Bluetooth low Energy
AoA	: Angulo de llegada - Angle of arrival
AoD	: Angulo de salida - Angle of departure
IPS	: Sistema de posicionamiento en interiores - Indoor Positioning Systems
IoT	: Internet de las cosas – Internet of Things
GNSS	: Sistema global de navegación por satélite – Global Navigation Satellite System
GLONASS	: Global Navigation Satellite System
ISM	: Banda de radio industrial, científico y médico
CTE	: Extensión de tono constante – Constant Tone Extension
IQ	: Muestreo en fase y en cuadratura – In-Phase and Quadrature
RSSI	: Indicador de intensidad de la señal recibida - Received Signal Strength Indication
CRC	: Verificación por redundancia cíclica – Cyclic redundancy check
RNN	: Red neuronal recurrente -Recurrent Neural Network
GRU	: Unidad recurrente cerrada – Gated Recurrent Unit

Minúsculas

ms	: milisegundos
dBm	: decibelio-milivatio

1. Introducción

El poder conocer la ubicación de determinados objetos y personas es importante, a su vez existen casos donde es vital el poder encontrarlos dentro de un espacio cerrado, como podría serlo el caso de uso en hospitales, centros comerciales o en el sector de industria. En ambos ejemplos podemos vernos enfrentados al siguiente escenario, en donde se mueve de un lugar a otro un objeto y finalmente con el tiempo no sea posible ubicar, en estos casos y otros más se puede resolver destinando un gran número de personas para vigilar, resguardar y organizar el inventario, sin embargo en muchos casos una solución inviable.

Durante varios años comenzó una carrera por resolver el problema de ubicar un objeto en espacios cerrados con una precisión inferior a la de un metro, como es el caso de la ubicación por GPS el cual cumple estas características, pero en el exterior, en interiores pierde precisión e incluso siendo incapaz de determinar la posición de objetivo, actualmente se implementan variadas soluciones para el caso de lugares cerrados como es el caso de RFID, UWB, WLAN y BLE por nombrar algunos ejemplos.

Siendo esta última escogida debido a su bajo consumo energético y costo, a través de la radiogoniometría Bluetooth y una característica implementada en la revisión de Bluetooth 5.1, la tecnología AoA, la cual consiste en calcular el ángulo de llegada o también denominado ángulo de incidencia sobre un arreglo de antenas fijas, esta señal es enviada desde una etiqueta móvil o tag, permitiendo determinar la ubicación del objetivo en interiores, con una precisión menor al de un metro de distancia.

Muy confuso.
Producto de nuevo

2. Revisión Bibliográfica

2.1. Introducción

El poder localizar la posición de un objetivo es sumamente importante. Como se mencionó anteriormente en la introducción, se cuenta con un campo de aplicación bastante amplio, en [2] tenemos una revisión importante de las posibles aplicaciones y desafíos de la tecnología BLE en las ciudades inteligente, dando a entender que el aumento e interés por las empresas en el desarrollo y aplicación de la tecnologías para la transferencia de información y en especial el caso de Bluetooth de bajo consumo es debido a la demanda de los mismos y a las posibilidades de resolución de las aplicaciones anteriormente mencionadas sobre todo para los de IoT. “El consumo de energía y la capacidad de calculo por parte de los Beacon es importante además que deben ser compactos y simples. En el apartado de firmware los parámetros importantes son la potencia de transmisión en dBm y el intervalo de publicidad que se expresa en ms, uno de los problemas es la disminución de la intensidad de la señal, en el caso de los intervalos de publicidad es importante que no sea ni muy largo puede aumentar la interferencia y tampoco sea muy corto siendo incapaz de resolver la aplicación, sin olvidar que con un intervalo corto de 100 ms agota más rápido las baterías y siendo por ejemplo de 1000 ms no posea la precisión suficiente para la tarea determinada”

2.1.1 Posicionamiento en interiores

En esta sección se presentan los diferentes sistemas de posicionamiento y técnicas que se pueden usar en el posicionamiento de interiores además de analizar son suma atención el protocolo BLE 5.1

GNSS

Consiste en un conjunto de satélites que son utilizados para determinar el posicionamiento y localización en cualquier parte de la tierra de un objetivo determinado, para poder calcular la posición de el objetivo se necesita medir la distancia de este objetivo con respecto a tres satélites cuya posición debe ser conocida, en el caso de querer determinar la altitud del mismo objetivo es necesario un cuarto satélite, en este proceso es clave la sincronización de los satélites para determinar con precisión el objeto, el sistema GNSS consiste en encontrar la intersección entre 3 círculos cuyo radio es la distancia más pequeña al objetivo, este método se denomina trilateración el cual se explicará en detalle en la siguiente subsección.

Actualmente contamos con diferentes GNSS en operación

- GPS¹: corresponde al sistema de satélites creados por Estados Unidos.
- GLONASS²: es el sistema de navegación y satélites pertenecientes a Rusia.
- BeiDou-2³: es el sistema de navegación desarrollado por China.
- Galileo⁴: Pertenece al sistema creado por la Unión Europea.

BLE

Es una tecnología de redes inalámbricas que opera dentro de rango de frecuencia ISM de 2,4 Ghz siendo una banda de uso de radiofrecuencia para fines científicos, médicos y industriales para telecomunicaciones. Hasta antes de la integración de las especificaciones de Bluetooth 5.1 los sistemas de IPS que se podían implementar estaban limitados al uso de la intensidad de la señal, RSSI, para estimar la distancia.[2],[2] En la especificación de Bluetooth 5.1 se añaden dos funciones de Radiogoniometría, la cual consiste en sistema electrónico capaz de determinar la dirección de donde viene una señal de radio. Uno de ellos determina el ángulo de llegada AoA y el otro determina el ángulo de Salida AoD. En ambos es necesario un arreglo de antenas, no obstante, en el caso de AoA es el receptor quien debe tener el arreglo de las antenas y en el AoD debe ser el transmisor quien posea el arreglo de antenas.

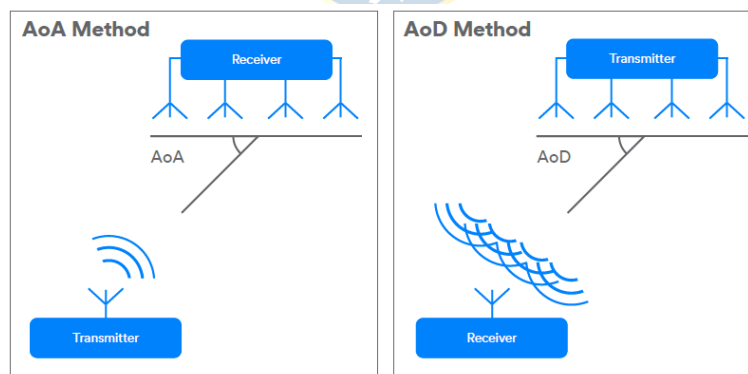


Fig. 2.1 Representación de un sistema a) AoA y b) AoD. [2] Derechos de autor 2020 por Bluetooth Special Interest Group.

Para poder realizar estas funciones de radiogoniometría es necesario utilizar el muestreo de fase y en cuadratura (IQ), a medida que la señal transmitida cruza el conjunto de antenas, el dispositivo receptor se mide la diferencia entre las fases de la señal que incide sobre cada una de las antenas y sabiendo la

¹ <https://www.gps.gov/>

² <https://www.glonass-iac.ru/>

³ <http://en.beidou.gov.cn/>

⁴ <https://www.usegalileo.eu/>

* No use el ancho de banda sino hay condiciones.

7

diferencia entre cada antena es posible, en el caso de AoA el proceso de muestreo se realiza a cada antena del arreglo y en determinada secuencia dependiendo del diseño implementado, estos datos se almacenan en forma de pila o ~~stack~~ para finalmente aplicar el algoritmo que le permite calcular la distancia, para poder implementar estas operaciones se modifica la capa de enlace del protocolo de comunicación bluetooth, añadiendo información para poder realizar esta operación, se denomina CTE o Extensión de tono constante.

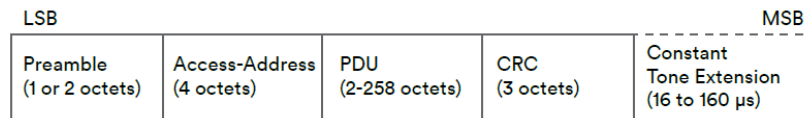


Fig. 2.2 Extensión de tono constante. [2] Derechos de autor 2020 por Bluetooth Special Interest Group

Esta extensión tiene por objetivo proporcionar una frecuencia constante y longitud de onda para el muestreo IQ, esto se debe a que, dentro de un canal de radio Bluetooth se usan dos frecuencias diferentes, una para representar el 0 y otra para representar un 1 lógico, estas dos frecuencias se determinan sumar o restar un valor de desviación de frecuencia con la frecuencia del canal central, cambiar la frecuencia implica un cambio en la longitud de onda, pero esta es importante para el cálculo de dirección, es por esto que CTE sólo se transmite con 1 lógicos, teniendo una longitud de onda constante. No es considerada CTE en el cálculo de error que podría tener la señal. Desde Bluetooth 5.0, la banda de destinada para publicidad serían los canales 37, 38 y 39 estos son usados de tal forma que siguen un orden ascendente desde el canal 37 en adelante y con el fin de disminuir las posibilidades de colisiones de paquetes enviados es que define un tiempo aleatorio entre 0 y 10 ms para enviar paquetes con este retaso.

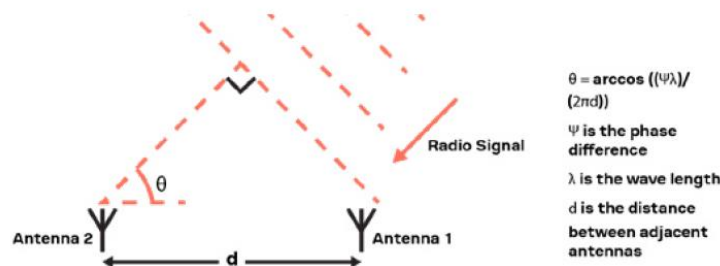


Fig. 2.3 Representación de un arreglo de antena donde llega la señal de Radio. [3] Derechos de autor 2021 por U-Blox

Como podemos ver en la Fig. 2.3 por medio de la diferencia de fase y sabiendo la distancia entre las antenas es que podemos calcular el ángulo de llegada.

2.1.2 Técnicas de posicionamiento

RSSI

Este método consiste en la medición de la intensidad de la señal que ingresa por medio de esta medida podemos aproximar la distancia aproximada entre el receptor y el transmisor de la señal. Este tipo de técnicas funciona muy bien cuando no existen interferencias y/o objetos en la línea de trayectoria de ésta. También existe una pérdida de la señal debido a la propagación de ésta por el medio, además de las múltiples trayectorias que puede tomar la señal.

La ecuación 2.1, nos dice como obtener el valor de RSSI

$$RSSI = -(10n \log_{10} d + A) \quad (2.1)$$

Siendo $RSSI$ es la medida de la intensidad de la señal medida en el receptor, n es el exponente de pérdida de trayectorias, este depende del entorno y debe calcularse para cada configuración, d es la distancia entre el transmisor y el receptor y A corresponde a la potencia absoluta medida en dBm, usualmente se suele realizar la medición de RSSI a 1m de distancia y se le asigna al valor de A .

En [5] se menciona que en espacios libre el valor de n entre antenas isotrópicas se comporta de forma proporcional al cuadrado de la distancia con la siguiente ecuación

$$n = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (2.2)$$

También se habla de que la reflexión del suelo hace variar su valor entre 2 y 4, siendo en el caso ideal el valor de 2 para un espacio libre.

Trilateración

Se usa para determinar las posiciones relativas del objetivo, se estima la distancia de un nodo objetivo desde tres nodos cuya posición sea conocida, es el método empleado en GNSS y también en el caso de los IPS, se puede usar RSSI para medir la distancia entre los nodos, esta distancia se convierte en el radio de la circunferencia que tiene como punto de origen el nodo conocido. Al encontrar la intersección de tres círculos, esferas en el caso de tener un cuarto nodo conocido, alrededor de los nodos conocidos es que podemos determinar la posición del nodo desconocido.

En un punto de vista...

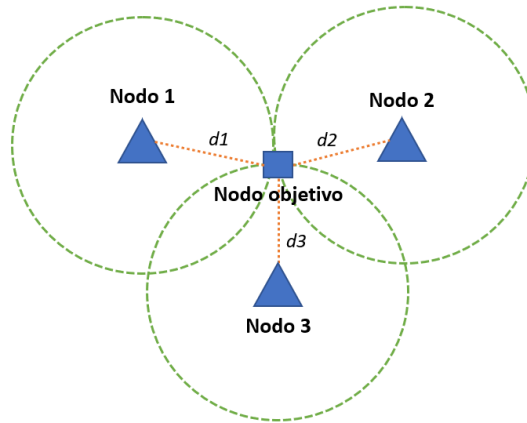


Fig. 2.4 Ilustración de la trilateración.

Lo podemos expresar con un sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} (x_1 - x_e)^2 + (y_1 - y_e)^2 \\ (x_2 - x_e)^2 + (y_2 - y_e)^2 \\ (x_3 - x_e)^2 + (y_3 - y_e)^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_1^2 \\ d_2^2 \\ d_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Es aquí donde nuestro objetivo es obtener el valor de x_e y y_e siendo necesario resolver el sistema de ecuaciones, no obstante, es posible que los puntos obtenidos no se intercepten. En [2] se menciona que finalmente se busca el resultado que genere un menor error, convirtiendo el problema en uno de optimización.

Posibles errores en la medición o la precisión de la misma, siendo este el debilitamiento de la intensidad de la señal, variaciones en la potencia de salida de la señal, retardos por parte del hardware, ya sea en la interpretación de la señal, la comunicación con el equipo encargado del cálculo, errores en las variables que se permite el cálculo de RSSI, las múltiples trayectorias de la señal, dispersión y los reflejos de las señales transmitidas, el error de este método se reduce mucho cuando tenemos trayectorias libres de objetos y los nodos se encuentran un líneas de visión.

Triangulación

Es un método de posicionamiento que hace uso de la ley de seno, es necesario colocar dos nodos cuya distancia entre ellos este fija y sea conocida, luego se mide la dirección de la señal desde el objetivo

$$\frac{A}{\sin(\alpha)} = \frac{B}{\sin(\beta)} = \frac{C}{\sin(\gamma)}$$

Considerando la figura 2.5

(2.4)

Más grande

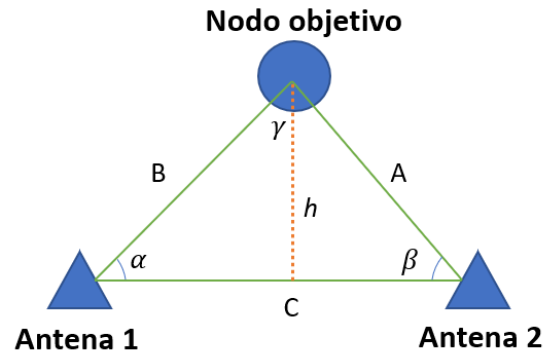


Fig. 2.5 Ilustración de la trilateración.

Tenemos que la distancia A y B se pueden obtener por medio de las ecuaciones 2.5 y 2.6

$$A = \frac{C \sin(\alpha)}{\sin(\gamma)} \quad (2.5)$$

$$B = \frac{C \sin(\beta)}{\sin(\gamma)} \quad (2.6)$$

Y la altura del triángulo se obtiene con la ecuación de 2.7

$$h = \frac{C \sin(\beta) \sin(\alpha)}{\sin(\beta + \alpha)} \quad (2.7)$$



2.2. Trabajos Previos

En esta sección se realizará la revisión bibliográfica y se clasificarán en los siguientes subtemas, trabajos realizados con RSSI y trabajos realizados con AoA.

2.2.1 RSSI

- ♣ M. Ji, J. Kim, J. Jeon and Y. Cho, "Analysis of positioning accuracy corresponding to the number of BLE beacons in indoor positioning system," 2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2015, pp. 92-95, doi: 10.1109/ICACT.2015.7224764, [2].

En este trabajo se presenta la siguiente metodología de trabajo con señales BLE y Wi-Fi para medir RSSI, de estas señales a determinadas distancias, a 1m metro de distancia hasta llegar a los 13 metros, en cada punto de referencia se tomaron los valores durante un minuto y después al cambiar

de punto se esperan dos minutos para recabar los datos, también se menciona una línea de visión despejada, se utilizaron 4 Beacons para las pruebas y dos módulos Wifi-AP. Obteniendo el error en metros y también realizan simulaciones para ver si la estimación del error justificaría un aumento de Beacons llegando a la conclusión de que existen un punto donde el error disminuye de forma no tan significativa, pudiendo ser el caso de que no justifique la infraestructura a implementar.

- ♣ A. Noertjahyana, I. A. Wijayanto and J. Andjarwirawan, "Development of Mobile Indoor Positioning System Application Using Android and Bluetooth Low Energy with Trilateration Method," 2017 International Conference on Soft Computing, Intelligent System and Information Technology (ICSIT), 2017, pp. 185-189, doi: 10.1109/ICSIT.2017.64, [2].

En este trabajo tenemos el uso de la trilateración para el calculo de la distancia y posición de objetivo, cabe resaltar que se utilizar un Smartphone con sistema operativo Android, el cual cuenta con GPS, en su conjunto la aplicación que ellos implementan es que por medio de la señal Bluetooth infieren la posición en el interior de un edificio y con ayuda del GPS determinan las coordenadas, esta información es subida a un servidor a una base de Dato MySQL para su posterior recuperación, dentro de las mediciones obtienen los valores de RSSI sin obstáculos y con una puerta de madera.

- ♣ Y. Shi, Y. Long, F. Lu, Z. Xu, X. Xiao and S. Shi, "Indoor RSSI Trilateral Algorithm Considering Piecewise and Space-Scene," 2017 IEEE International Conference on Smart Cloud (SmartCloud), 2017, pp. 278-282, doi: 10.1109/SmartCloud.2017.52. [2].

En este trabajo se ve un primer paso en la optimización de los parámetros que determinan el valor de distancia en función del RSSI, las condiciones donde se realizaron la obtención de los datos es un espacio de ancho 3,5 m y una longitud de 30m, en este lugar se realizaron las medición en función de 50 cm distancia sucesivamente , una vez se obtienen los valores se busca obtener los coeficientes para la ecuación 2.1, siendo optimizado con las herramientas de Matlab para poder interpolar los datos de la medición y obtener finalmente una función por parte, se realizan pruebas en un espacio de 3.5m por 9m obteniendo una error de entre 0.9-1.5m, siendo una mejora que en el caso de solo usar la ecuación original, como en los documentos anteriormente citados se realiza trilateración para medir la distancia.

2.2.2 AOA

- ♣ P. Andersson and L. Persson, "Evaluation of Bluetooth 5.1 as an Indoor Positioning System," Dissertation, 2020 [2].

En este trabajo se realiza la medición de distancia por medio de la medida de los ángulos y se utiliza la triangulación, para ellos se utiliza el LAUCNHXL-CC2640R2F que es un kit de desarrollado, dos antenas BOOSTXL-AOA y un módulo IMU ADXL343, fabricado por Texas Instruments Inc. Estas hacen uso de la tecnología Bluetooth 5.1, y la comunicación utilizada es UART. Se realizan las pruebas sin y con el filtro EKF el cual se suele utilizar en sistemas cuyos sensores presentan ruido de tipo gaussiano, permitiendo corregir por medio de la retroalimentación de este filtro predictivo. El enfoque analizado en este documento es el tiempo de respuesta, eficiencia energética y la precisión en el tiempo.

- ♣ P. Sambu and M. Won, "An Experimental Study on Direction Finding of Bluetooth 5.1: Indoor vs Outdoor," 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2022, pp. 1934-1939, doi: 10.1109/WCNC51071.2022.9771930.[2].

En este trabajo se realizaron pruebas con dos TI transmisores Bluetooth CC26X2R LaunchPad y dos antenas BOOSTXL-AOA ambos fabricados por Texas Instruments Inc. se hace uso de los ángulos de llegada para determinar la distancia, además el enfoque de este trabajo es analizar las diferencias con respecto a los ángulos y a la distancia obtenida con la que corresponde, tanto en interiores como en el exterior. Los resultados obtenidos hablan de una mayor precisión en el exterior frente a las mediciones tomadas en el interior un 73% mejores mediciones en el exterior, el error lo define con la distancia euclidiana. De igual forma se menciona que en el caso de ángulos pequeños cercanos a 0° presentan una mayor desviación estándar que para ángulos mayores a 35° asumiendo que se debe a los problemas de retardo de fase, tomando ángulos mayores a 15° para evitar ese error. En los resultados obtenidos el error angular medio para el entorno exterior es de 0.48° con una desviación estándar de 0.28 y para interiores tenemos un del ángulo medio de 1.83° con la desviación estándar de 0.48° . Igualmente, el error en posición 2D (eje x e y) es de 36,5cm para interiores y 22cm para exteriores, esta prueba y mediciones se obtuvieron al generar una cuadrícula de 5 subdivisiones de 2mx2m cada una.

- ♣ P. Sambu and M. Won, "An Experimental Study on Direction Finding of Bluetooth 5.1: Indoor vs Outdoor," 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2022, pp. 1934-1939, doi: 10.1109/WCNC51071.2022.9771930.[2].

En este trabajo propone el uso de red neuronal recurrente (RNN) para mejorar la estimación de AoA, se considera este problema como un problema de continuidad temporal, siendo necesario una red neuronal capaz de tomar decisiones en base a los datos obtenidos anteriormente, también se usa una unidad recurrente cerrada debido a las exigencias del problema a la hora de determinar la posición en el tiempo de un objetivo en movimiento y motivados también por el costo computacional. Cabe resaltar el uso de PDDA para el análisis las características del espectro a través de los canales. También es importante señalar que para el entrenamiento de la RNN se usa un software de simulación RayRracing, Aktair WinProp simulando con cuatro antenas a una potencia de +4dBm.

2.3. Discusión

En el caso de [2]. EKF no es muy efectivo en sistemas que posean dinámica muy grande, más aún si la no lineal es muy grande, esto debido a que se linealiza en torno a un punto. El costo computación es alto debido a la necesidad de calcular el Jacobiano en cada paso además de la matriz inversa que está involucrada, la cual podría en algunos casos ser imposible de resolver, hablando en el tiempo de ejecución. El tiempo de respuesta aplicando el EKF aumenta tres veces en relación con el calculado sin él, también es posible que no se pueda suprimir la señal de ruido de las multi trayectorias en todos los casos, la existencia de datos deficientes aumentando la desviación estándar por estas perturbaciones. La precisión obtenida con RSSI es menor en relación con la obtenida con AoA y es más sensible a las perturbaciones.

En el caso de [10] tenemos una puerta a seguir experimentado con Redes Neuronales, en búsqueda de la solución a el problema de la propagación por trayectorias múltiples, en nuestro caso, queremos añadir la intensidad de la señal RSSI a la solución del problema, esto debido a que Bluetooth trabaja a alta frecuencia, es una señal altamente direccional, al cambiar de dirección la potencia de la misma señal desciende, podemos utilizarla en conjunto para obtener excelentes resultados.

3. Definición del Problema

3.1. Introducción

Lo que buscamos es poder determinar la posición de un objetivo en movimiento en un espacio cerrado, en el interior de una habitación la cual contiene elementos que impiden un campo de visión libre para que el transmisor envíe la señal a los arreglos de antenas dispuestos dentro de la misma habitación, por lo presentado a lo largo de este documento las múltiples trayectorias afectan la medición de la distancia producto de la refracción de la señal y su inminente cambio de dirección, afectando de igual manera la intensidad de la señal RSSI.

3.2. Hipótesis de Trabajo

Como se vio a lo largo de la revisión bibliográfica, el uso de ~~solamente~~ ^{sólo} la intensidad de la señal no es suficiente para determinar la distancia, ~~en~~ ^{en} el caso de la implementación de las características añadidas en Bluetooth 5.1 se pueden obtener mejores resultados pero en presencia de objetos que obstaculicen el campo de visión se obtienen resultados incorrectos en un cierto número de grados, es aquí donde la implementación de redes neuronales es una posible solución a lo planteado, corrigiendo las desviaciones tomando en consideración tiempos anteriores, nuestra idea es poder implementar una RNN debido a su propiedad de tomar decisiones en base a valores pasados, pero también se busca añadir como valor de entrada la intensidad de la señal RSSI siendo un indicador de cuanto se ve afectada la señal.

3.3. Objetivos

3.3.1 Objetivo General

El objetivo de esta memoria de título es poder evaluar y obtener mejoras en la medición de los ángulos y por ende la distancia del objetivo pues es obtenida a través de esta, haciendo que el sistema de posicionamiento de interiores (IPS) basado en el ángulo de llegada de Bluetooth mejore significativamente su precisión sin perder de vista la velocidad a la que realiza la corrección. Para obtener los objetivos, se busca implementar una RNN que tome en cuenta los ángulos obtenidos por los tres canales de publicidad Bluetooth y la intensidad de la señal ~~RSSI~~ ^{RSSI}, generando de esta forma los respectivos pesos para luego realizar las inferencias, ~~se considerar~~ ^{que} el movimiento de la persona

es caminando, siendo importante para el número de valores previos a utilizar.

3.3.2 Objetivos Específicos

- Encontrar la posición de un tag en un espacio cerrado, sin y con objetos en su interior utilizando el kit XPLR-AOA-1 de U-Blox.
- Se busca obtener una relación entre precisión vs tiempo de la corrección de los ángulos donde no es aceptable que el tiempo sea mayor a 10 min.
- Realizar la RNN que nos permita corregir los ángulos en presencia de objetos que generen desviaciones de la señal.
- Desarrollar el Software que sea capaz de visualizar la posición de tag.

3.4. Alcances y Limitaciones

El equipo que se utilizará es XPLR-AOA-1

Se buscará obtener la localización de 1 tag.

El número de arreglo de antenas del que dispongo es de dos permitiendo solo implementar trilateración.

El lugar donde se realizarán las pruebas es en las dependencias del alumno, también se solicitará la posibilidad de realizarlo en algún laboratorio disponible en las dependencias de la universidad.

3.5. Metodología

La implementación se desarrolla en Python, tanto la RNN como el software de visualización de los datos, esto debido a su gran versatilidad, además de contar con las librerías para trabajar con comunicación serial, programación paralela, redes neuronales, además de las librerías matemáticas, se explicará a lo largo del capítulo de avance en el tema las implementaciones realizadas, los fundamentos teóricos que permitieron el desarrollo de esta.

bibliotecas

4. Avances en el Tema

4.1. Introducción

Se desarrollo el programa en el lenguaje de programación Python capaz de obtener los datos entregados por la antena, también se desarrollo una rutina capaz de calcular las distancia desde las antenas hasta el nodo objetivo.

4.2. Teoría

La tecnología AoA consiste en colocar múltiples antenas receptoras, estas se ubican una al lado de la otra a una determinada distancia, es un transmisor el que emitirá una señal bluetooth que llegan a las distintas antenas, al estar a determinadas distancias se puede obtener distintas fases. A partir de estas diferencias de fase se puede calcular la dirección de donde provienen las ondas de radio con los ángulos de incidencia.

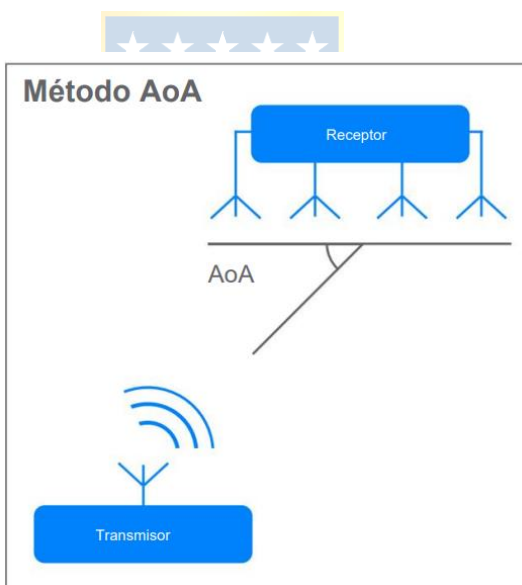


Figura 2.6 representación del metodo AoA

El modulo XPLR-AOA-1 fabricado por U-blox determina y nos entrega por medio del puerto serial los angulos de elevacion y Azimuth como se muestra en la Fig 2.7

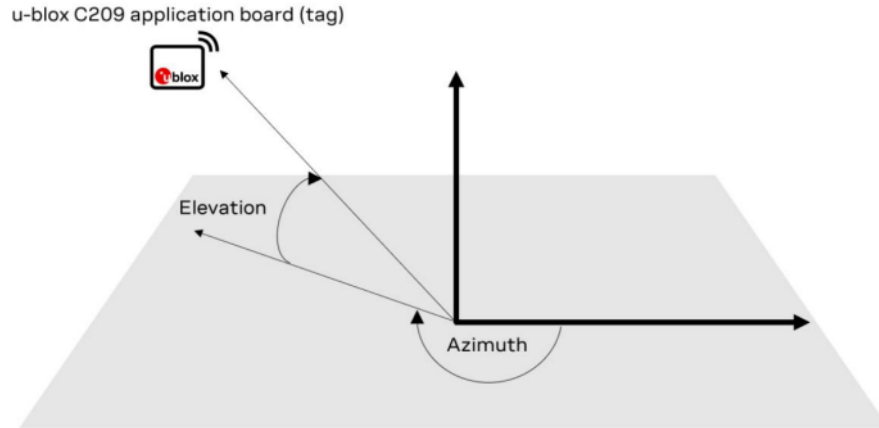


Figura 2.7 Angulo de Elevación y Azimuth

La idea por implementar en esta etapa del proyecto es usar trigonometría, por medio de ambas antenas fijas en un determinado punto, sabiendo la distancia entre ellas las antenas, además de los ángulos que se proyectan, podemos determinar la posición del objeto. Aplicando la ley de los senos tenemos

$$\frac{A}{\sin(\alpha)} = \frac{B}{\sin(\beta)} = \frac{C}{\sin(\gamma)} \quad (2.1)$$

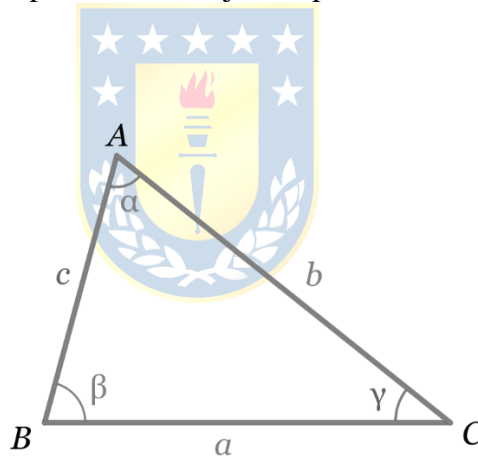


Figura 2.8 Ilustración del triángulo

Asumiendo que en las puntas B y C se encuentran las antenas y que en la punta A se encuentra el tag, tenemos la información de β, γ y la distancia a, que es la distancia entre las antenas. Ya con esto obtener la distancia c y b se obtiene por medio de las ecuaciones.

$$c = a * \frac{\sin(\gamma)}{\sin(\alpha)} \quad (2.2)$$

$$b = a * \frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha)} \quad (2.3)$$

Y siendo finalmente la recta perpendicular desde la base a hasta el vértice A igual a

$$l = a * \frac{\sin(\beta)\sin(\gamma)}{\sin(\beta+\gamma)} \quad (2.3)$$

4.2.1 De los Modelos

La información entregada por el módulo XPLR-AOA-1 mencionada anteriormente de los ángulos de Azimuth va comprendida desde -90° hasta 90° como se ve en la fig. 2.9, siendo necesario analizar todos los casos para poder obtener el valor en el sistema usual de 0° a 180° e implementar las respectivas operaciones matemáticas.

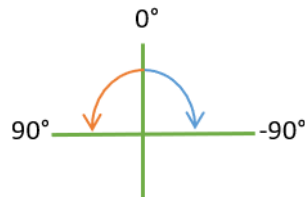


Figura 2.9 Ángulos de Azimuth entregados por la antena U-Blox

Sabiendo esto lo primero que podríamos pensar es que debemos sumarle 90° y se corregiría la diferencia, no obstante, existen situaciones donde el añadir 90° no solo no corrige el problema sino que nos entrega un ángulo completamente equivocado. Con esto en mente se pueden observar cinco situaciones y según corresponda es que se deben o no añadir algún grado a la solución.

En la Figura 2.10 podemos observar el caso donde el nodo objetivo está entre las dos antenas, en este caso ρ y φ son los valores entregados por las antenas, pero no son los ángulos que nos permiten obtener la distancia, para ellos sabemos que φ toma un valor positivo, por lo que para obtener β debemos a 90° restarle φ , en el caso de ρ su valor es negativo por lo que debemos sumarle 90° para obtener α .

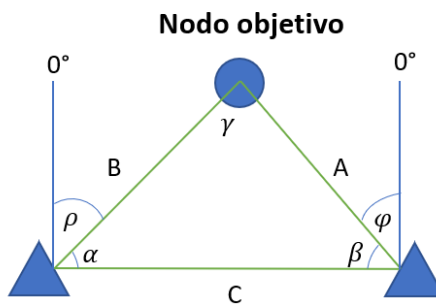


Figura 2.10 Primer caso, Tag objetivo en el centro de las antenas.

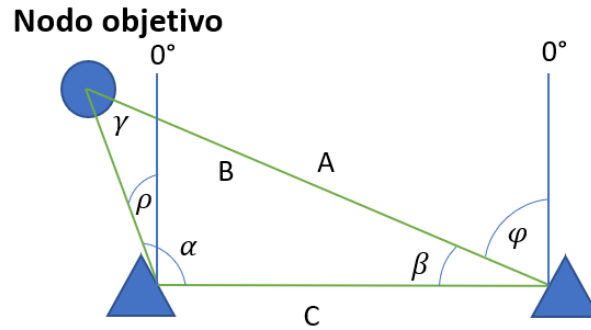


Figura 2.11 Segundo caso, Tag objetivo a la izquierda de todo.

En el caso de la Fig. 2.11 el nodo objetivo se encuentra a la izquierda, φ y ρ toman valores positivos, por lo que para obtener el ángulo α debemos sumarle 90° a ρ y para obtener β a 90° debemos restarle φ .

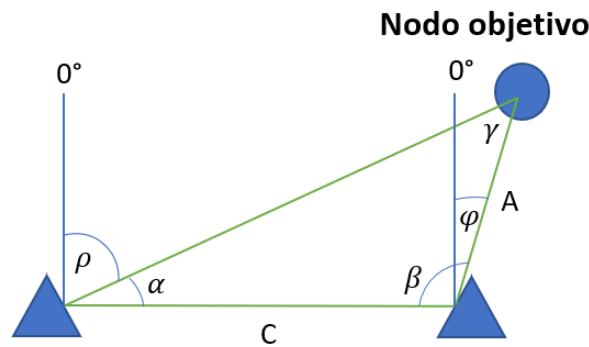


Figura 2.12 Tercer caso, Tag objetivo se encuentra a la derecha de todo.

En la Fig. 2.12 tenemos el caso donde el nodo objetivo se encuentra a la derecha de todo, en este caso φ y ρ toman valores negativos, por lo que para obtener el ángulo α debemos sumarle 90° a ρ y para obtener β a 90° debemos restarle φ .

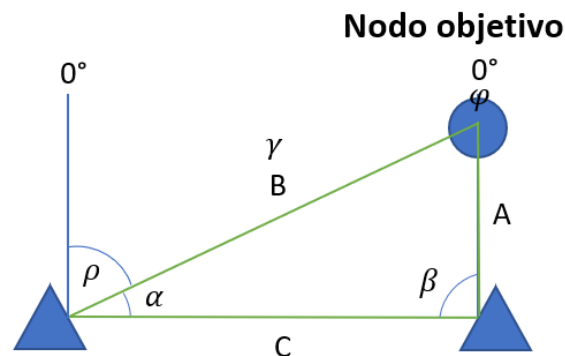


Figura 2.13 Cuarto caso, Tag objetivo perpendicular a la antena ubicada a la derecha.

En el caso de la Fig. 2.13 tenemos el caso donde el nodo objetivo se encuentra perpendicular a la antena situada a la derecha, en este caso φ toma el valor de 0° y ρ toman valores negativos, por lo que para obtener el ángulo α debemos sumarle 90° a ρ y β tiene el valor de 90° .

Nodo objetivo

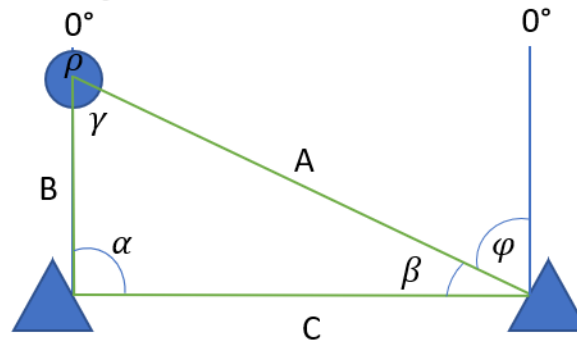


Figura 2.14 Quinto caso, Tag objetivo perpendicular a la antena ubicada a la izquierda.

En el caso de la Fig. 2.14 tenemos el caso donde el nodo objetivo se encuentra perpendicular a la antena situada a la izquierda, en este caso φ toma el valor positivos y ρ toma el valor 0° , por lo que para obtener el ángulo β debemos a 90° restarle φ y α tiene el valor de 90° .

4.3. Simulación

4.4. Experimentación

. Las pruebas fueron realizadas en la habitación mostrada en la Figura 3.1, en esta se pueden ver los círculos de color violeta señaladas desde P1 hasta P6, en esas posiciones se colocó el tag para la posterior toma de muestras, tenemos también que la antena se ubica entre ella a 70 [cm], en la tabla 3.1 podemos ver las distancias desde las antenas a los puntos de interés, estas fueron medidas con un cinta métrica los ángulos son inferidos en base a las distancias obtenidas, es importante señalar que la precisión en grados por parte de las antenas es de 1 grado, siéndole imposible representar los ángulos en su totalidad, al tomar un valor fraccionario. Las antenas se colocaron en una posición horizontal a la superficie de la mesa y para el caso de la prueba especial que se realizó a P4 debido a problemas en la medición se en la Figura 3.14, se detalla más adelante el motivo del fallo en la medición y la corrección de esta, siendo esta fuente de información importante para los resultados obtenidos respecto de los límites de esta posición complicada de las antenas y en el caso de colocarla sobre altura a que altura es recomendado hacerlo.

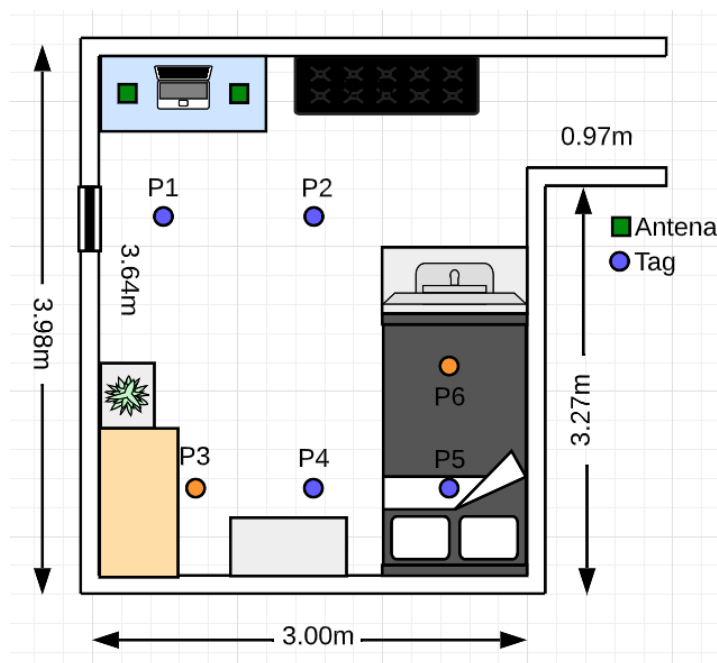


Figura 3.1 Habitación con los puntos de las pruebas

Punto	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Angulo Ant.1 [°]	66,3	126,2	85,4	104,6	119,9	130,2
Angulo Ant.2 [°]	64,8	32,4	80,5	63,0	50,5	39,5
Dist. entre Ant. [cm]	70	70	70	70	70	70
Dist. entre Ant.1 y el tag [cm]	84	155	285	315	365	300
Dist. entre Ant.2 y el tag [cm]	85	103	282	290	325	250

Tabla 3.1 Valores correctos de las mediciones a realizar.

Para la realización de las pruebas se tomo un tiempo de 12 minutos por cada punto de prueba, considerando que al tener que activar el programa para que recoja datos, estaría interfiriendo las pruebas, por lo tanto se considero que se descartarían alrededor de un minuto de muestras para poder recoger los datos en este caso en estado estático, el número de muestras recogidas en un minuto es de alrededor de 250 muestras, por lo que se descartaron 330 del comienzo y el final para obtener los resultados. Tambien es necesario explicar que se tomaron las mediciones dos veces, una sin realizar algun tipo de operación matemática en el programa y la segunda se realizo un promedio de 15 muestras con la intencion de ver si es posible reducir en algún modo los errores en la muestra. Ese numero fue decidido de forma arbitraria. Se expondrá la información obtenida en cada uno de los puntos de prueba en 3.2 y 3.3 y en las conclusiones se concluirán los resultados.

1.1. Estáticos

El cálculo para todas las pruebas fue de 5001 muestras, a las cuales se les calculó la frecuencia relativa, el error absoluto y la desviación estándar. De ahora en adelante a cada prueba se usará la nomenclatura vista en la Figura 3.1.

P1 sin promedio

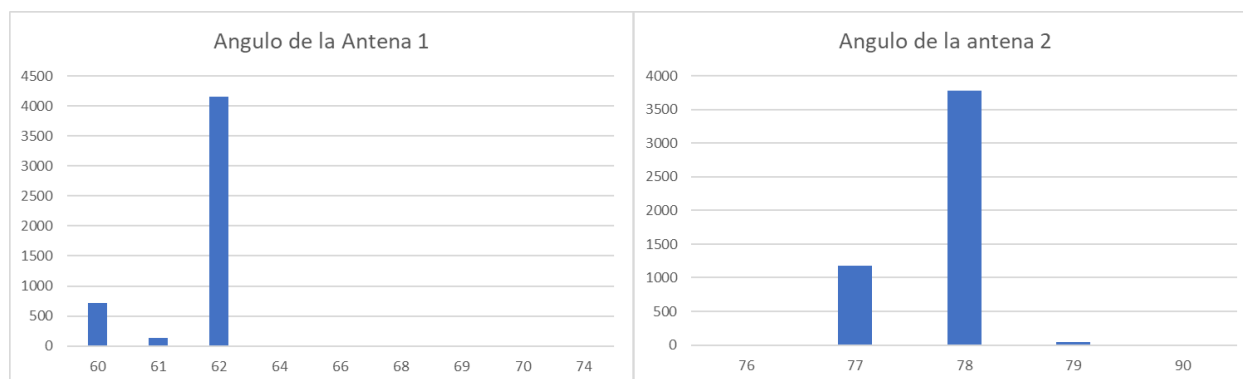


Figura 3.2 El número de veces que se obtuvo el ángulo en P1, a) en la Antena 1 b) en la antena 2.

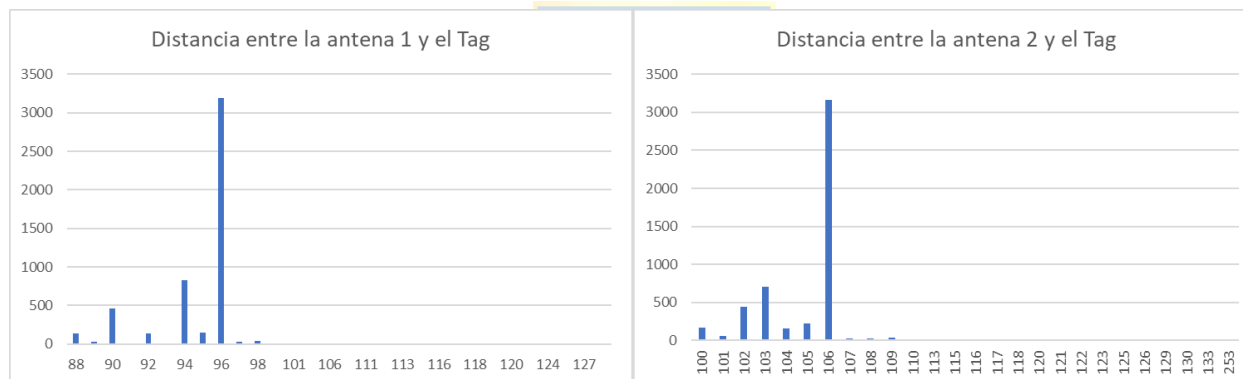


Figura 3.3 El número de veces que se obtuvo en P1 la distancia del tag hacia, a) la Antena 1 b) la antena 2.

La imprecisión absoluta con respecto a la medida que se consideró correcta y con respecto al promedio.

Imprecisión Absoluta	Error respecto al valor medido como correcto	Con el promedio de los datos	Desviación estándar
Angulo entregado por Ant.1	4,6°	6,15x10 ⁻¹⁴ °	0,7°
Angulo entregado por Ant.2	5,2°	2,59x10 ⁻¹⁴ °	0,4°
Distancia entre Ant.1 y Ant.2	0	0	0
Distancia entre Ant.1 y Tag	10,9[cm]	0,108[cm]	2,1[cm]
Distancia entre Ant.2 y Tag	20,8[cm]	0,3[cm]	1,8[cm]

Tabla 3.2 Tabla con los datos de Imprecisión Absoluta y la desviación estandar de P1 sin promedio

P2 sin promedio

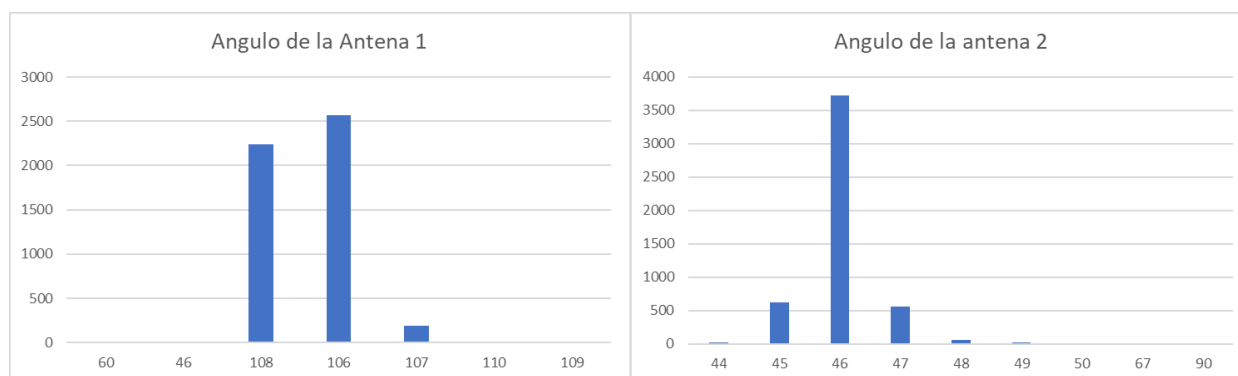


Figura 3.4 El número de veces que se obtuvo el ángulo en P2, a) en la Antena 1 b) en la antena 2.

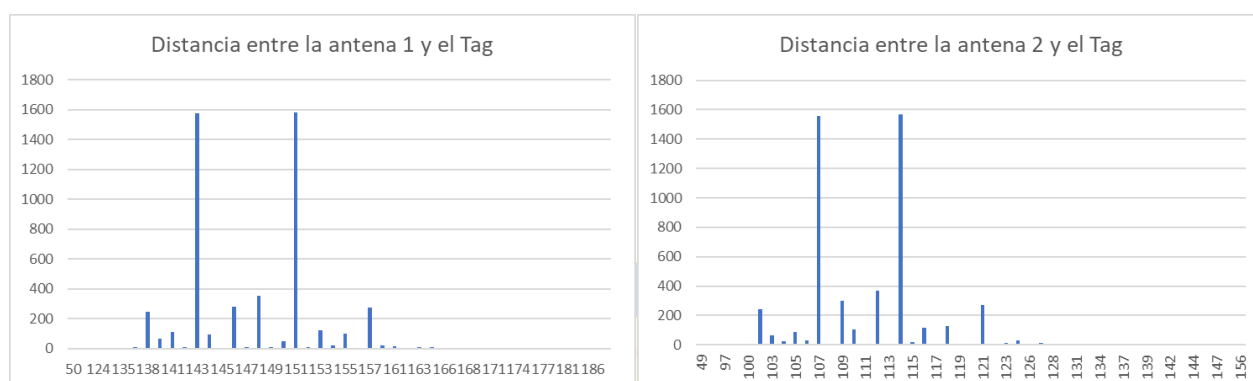


Figura 3.5 El número de veces que se obtuvo en P2 la distancia del tag hacia, a) la Antena 1 b) la antena 2.

La imprecisión absoluta con respecto a la medida que se consideró correcta y con respecto al promedio.

Imprecisión Absoluto	Error respecto al valor medido como correcto	Con el promedio de los datos	Desviación estándar
Angulo entregado por Ant.1	19,2°	2,48x10 ⁻¹⁴ °	1°
Angulo entregado por Ant.2	13,6°	3,98x10 ⁻¹⁴ °	0,6°
Distancia entre Ant.1 y Ant.2	0	0	0
Distancia entre Ant.1 y Tag	7,0[cm]	0,228[cm]	5,4[cm]
Distancia entre Ant.2 y Tag	8,5[cm]	0,014[cm]	5,2[cm]

Tabla 3.3 Tabla con los datos de Imprecisión Absoluta y la desviación estandar de P2 sin promedio

P3 sin promedio

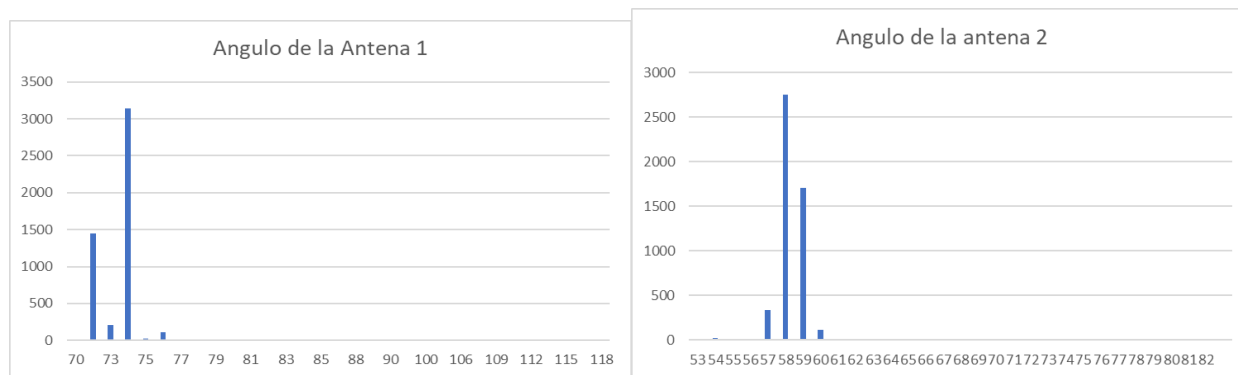


Figura 3.6 El número de veces que se obtuvo el ángulo en P3, a) en la Antena 1 b) en la antena 2.

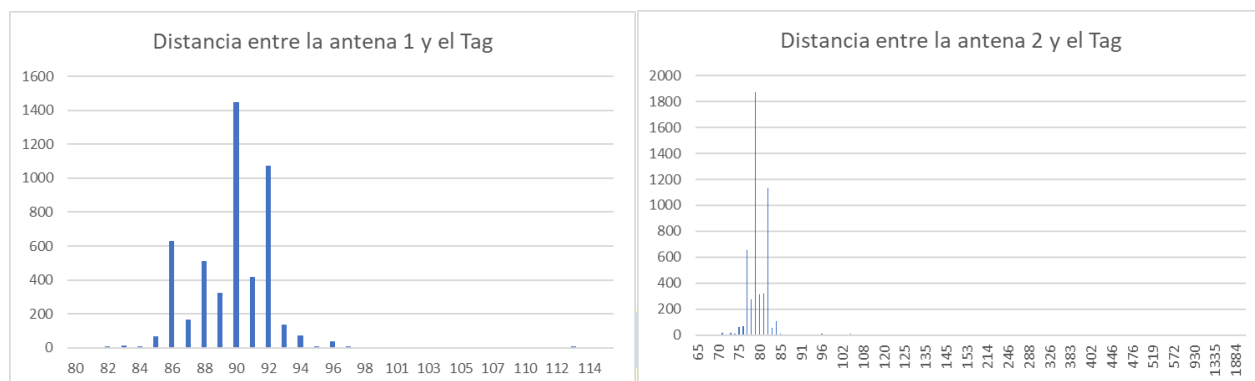


Figura 3.7 El número de veces que se obtuvo en P3 la distancia del tag hacia, a) la Antena 1 b) la antena 2.

La imprecisión absoluta con respecto a la medida que se consideró correcta y con respecto al promedio.

Imprecisión Absoluto	Error respecto al valor medido como correcto	Con el promedio de los datos	Desviación estándar
Angulo entregado por Ant.1	11,8°	$2,0 \times 10^{15}^\circ$	1,4°
Angulo entregado por Ant.2	10,5°	$2,93 \times 10^{14}^\circ$	2,5°
Distancia entre Ant.1 y Ant.2	0	0	0
Distancia entre Ant.1 y Tag	193,6[cm]	0,130[cm]	17,1[cm]
Distancia entre Ant.2 y Tag	200,7[cm]	0,010[cm]	18,2[cm]

Tabla 3.4 Tabla con los datos de Imprecisión Absoluta y la desviación estandar de P3 sin promedio P4 sin promedio

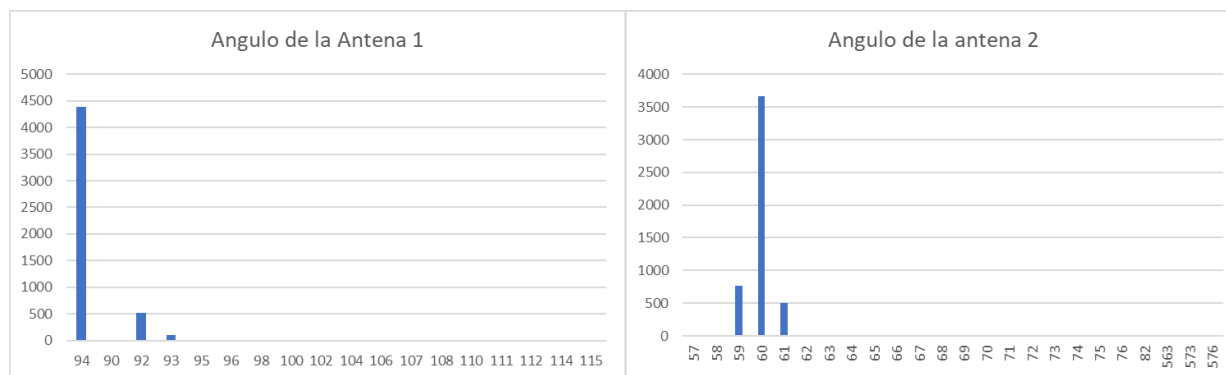


Figura 3.8 El número de veces que se obtuvo el ángulo en P4, a) en la Antena 1 b) en la antena 2.

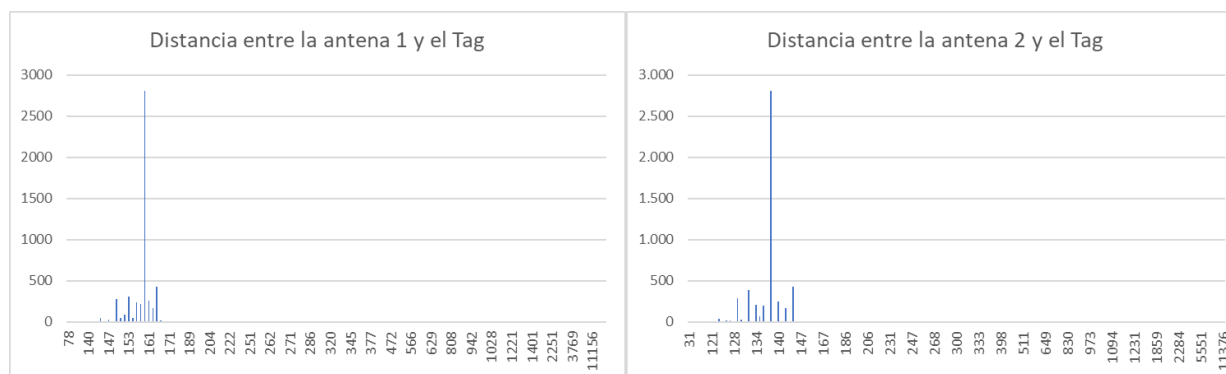


Figura 3.9 El número de veces que se obtuvo en P4 la distancia del tag hacia, a) la Antena 1 b) la antena 2.

La imprecisión absoluta con respecto a la medida que se consideró correcta y con respecto al promedio.

Imprecisión Absoluta	Error respecto al valor medido como correcto	Con el promedio de los datos	Desviación estándar
Angulo entregado por Ant.1	10,8°	$3,8 \times 10^{15}^\circ$	0,6°
Angulo entregado por Ant.2	7,0°	$2,24 \times 10^{14}^\circ$	20,5°
Distancia entre Ant.1 y Ant.2	0	0	0
Distancia entre Ant.1 y Tag	156,3[cm]	0,197[cm]	11,1[cm]
Distancia entre Ant.2 y Tag	152,2[cm]	0,191[cm]	11,7[cm]

Tabla 3.5 Tabla con los datos de Imprecisión Absoluta y la desviación estandar de P4 sin promedio

P5 sin promedio

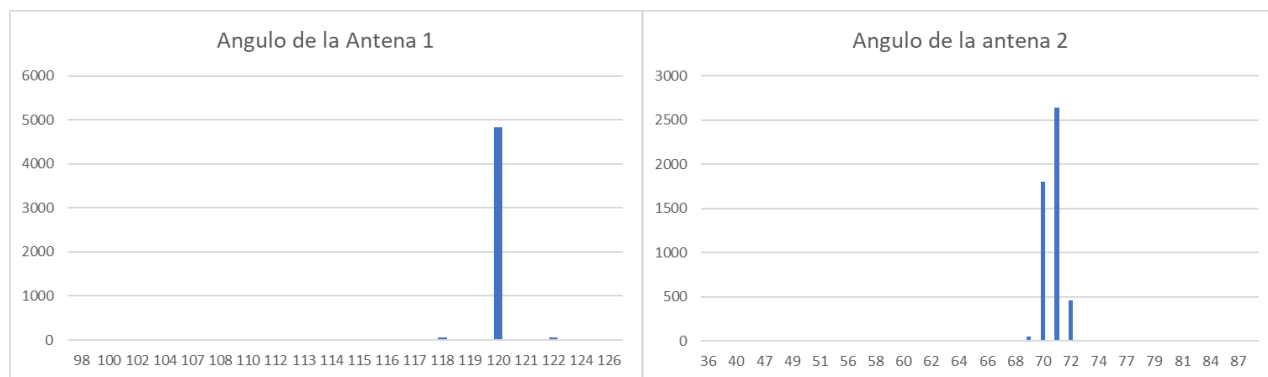


Figura 3.10 El número de veces que se obtuvo el ángulo en P5, a) en la Antena 1 b) en la antena 2.

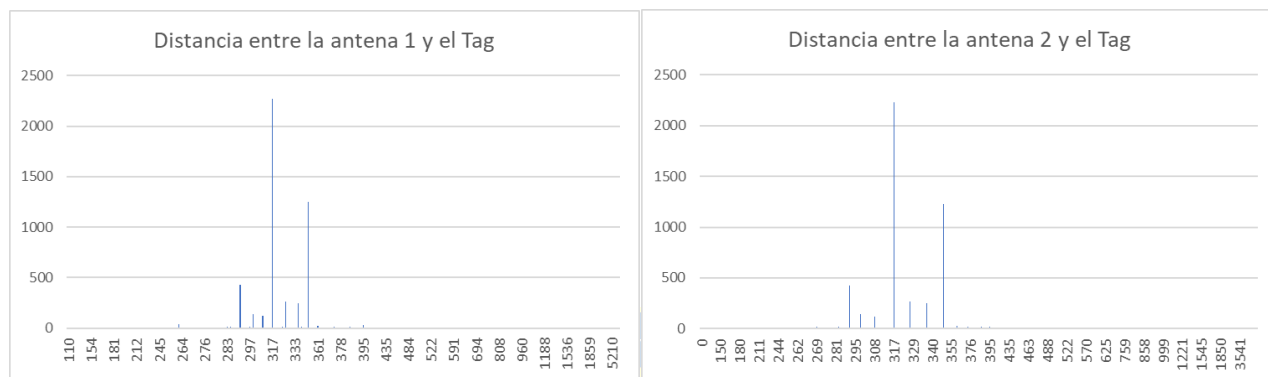


Figura 3.11 El número de veces que se obtuvo en P5 la distancia del tag hacia, a) la Antena 1 b) la antena 2.

La imprecisión absoluta con respecto a la medida que se consideró correcta y con respecto al promedio.

Imprecisión Absoluta	Error respecto al valor medido como correcto	Con el promedio de los datos	Desviación estándar
Angulo entregado por Ant.1	0,1°	4,1x10 ¹⁵ °	0,3°
Angulo entregado por Ant.2	19,5°	2,24x10 ¹⁴ °	1,9°
Distancia entre Ant.1 y Ant.2	0	0	0
Distancia entre Ant.1 y Tag	26,0[cm]	0,16[cm]	274,2[cm]
Distancia entre Ant.2 y Tag	14,0[cm]	0,16[cm]	274,2[cm]

Tabla 3.6 Tabla con los datos de Imprecisión Absoluta y la desviación estandar de P5 sin promedio

P6 sin promedio

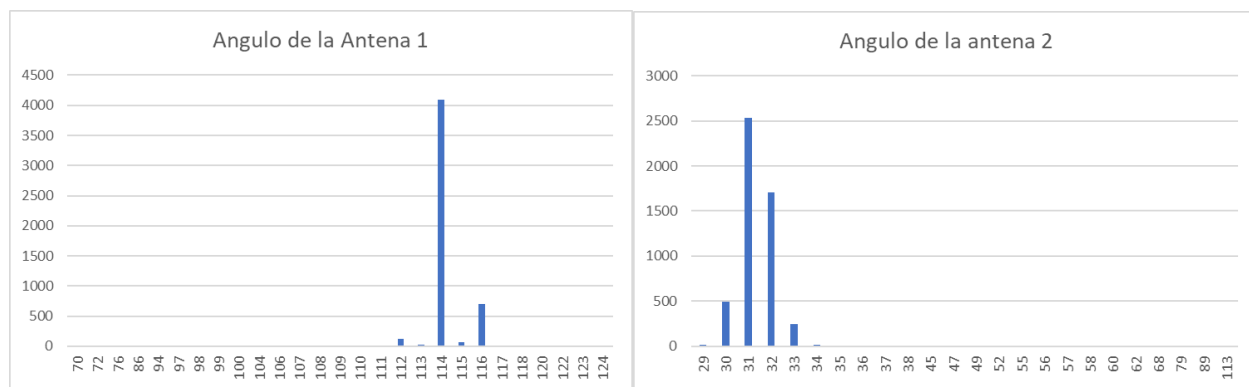


Figura 3.12 El número de veces que se obtuvo en P6 el ángulo, a) en la Antena 1 b) en la antena 2.

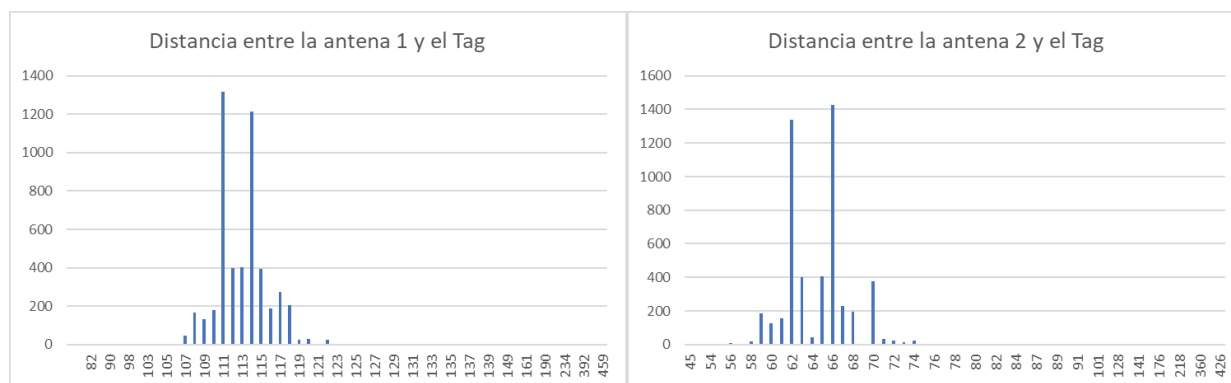


Figura 3.13 El número de veces que se obtuvo en P6 la distancia hacia, a) la Antena 1 b) la antena 2.

La imprecisión absoluta con respecto a la medida que se considero correcta y con respecto al promedio.

Imprecisión Absoluto	Error respecto al valor medido como correcto	Con el promedio de los datos	Desviación estándar
Angulo entregado por Ant.1	16,0°	2,08x10 ¹⁴ °	0,8°
Angulo entregado por Ant.2	30,5°	3,39x10 ¹⁴ °	0,7°
Distancia entre Ant.1 y Ant.2	0	0	0
Distancia entre Ant.1 y Tag	186,8[cm]	0,228[cm]	2,6[cm]
Distancia entre Ant.2 y Tag	185,0[cm]	0,014[cm]	2,8[cm]

Tabla 3.7 Tabla con los datos de Imprecisión Absoluta y la desviación estandar de P6 sin promedio

Entre los resultados visto observamos algo curioso en el caso del punto P4, debido a que la línea de visión esta libre de objetivos que se crucen pero tenemos un resultado que se ve demasiado grande, ante esta situación se realizaron nuevamente la pruebas y los resultados eran los mismos, pero al realizarlos una tercera vez y cambiando el ángulo de la antena los resultados son como los esperados reduciendo mucho la desviación de la distancia y del ángulo, se adjuntan los resultados

obtenidos y se adjunta la imagen de la posición de la antena en la figura 3.14

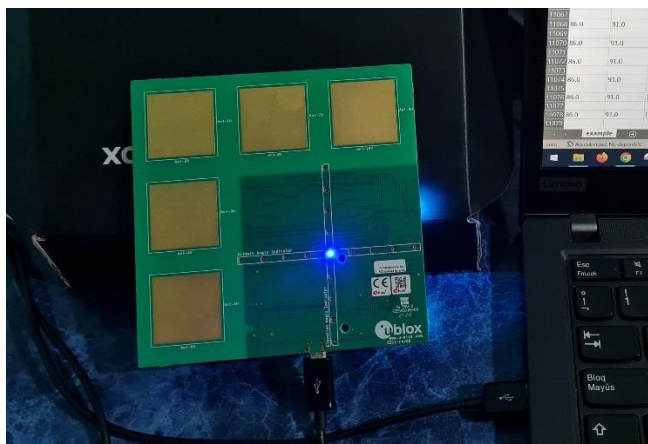


Figura 3.14 Se le añade un ángulo a ambas antenas con un objeto detrás de el P4 sin promedio, datos obtenidos en la repetición de las pruebas

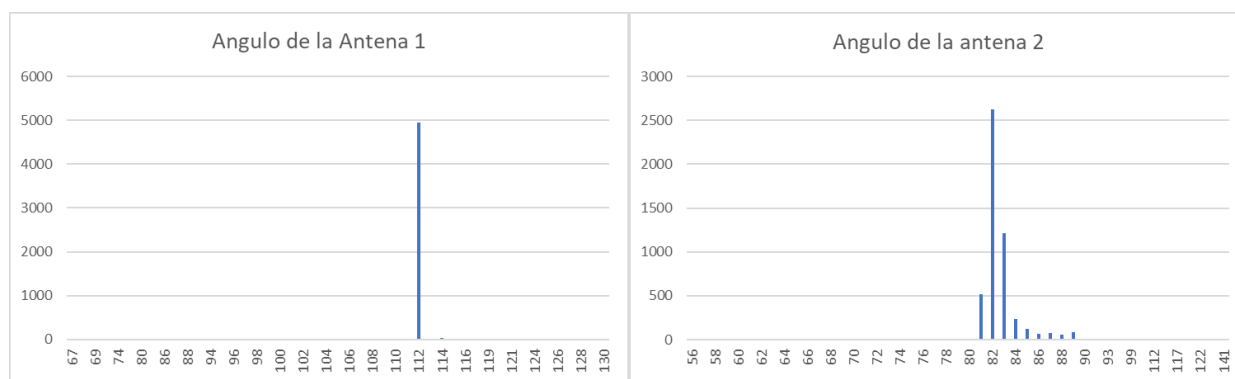


Figura 3.15 El número de veces que se obtuvo el ángulo en P4, a) en la Antena 1 b) en la antena 2.

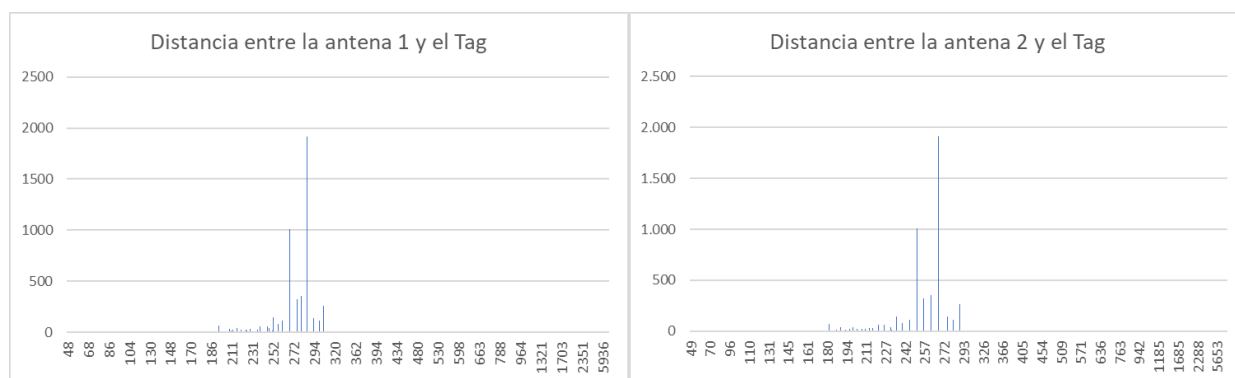


Figura 3.16 El número de veces que se obtuvo en P4 la distancia del tag hacia, a) la Antena 1 b) la antena 2.

La imprecisión absoluta con respecto a la medida que se consideró correcta y con respecto al promedio.

Imprecisión Absoluto	Error respecto al valor medido como correcto	Con el promedio de los datos	Desviación estándar
Angulo entregado por Ant.1	7,3°	3,8x10 ¹⁵ °	0,2°

Angulo entregado por Ant.2	7,0°	2,24x10 ¹⁴ °	1,5°
Distancia entre Ant.1 y Ant.2	0	0	0
Distancia entre Ant.1 y Tag	40,3[cm]	0,06[cm]	22,1[cm]
Distancia entre Ant.2 y Tag	33,3[cm]	0,10[cm]	21,3[cm]

Tabla 3.8 Tabla con los datos de Imprecisión Absoluta y la desviación estandar de P4 sin promedio

1.2. Dinámicos

Para el caso de las pruebas en estado Dinámico se consideraron las primeras 330 muestras descartadas para ver el comportamiento de los datos.

P1 sin promedio

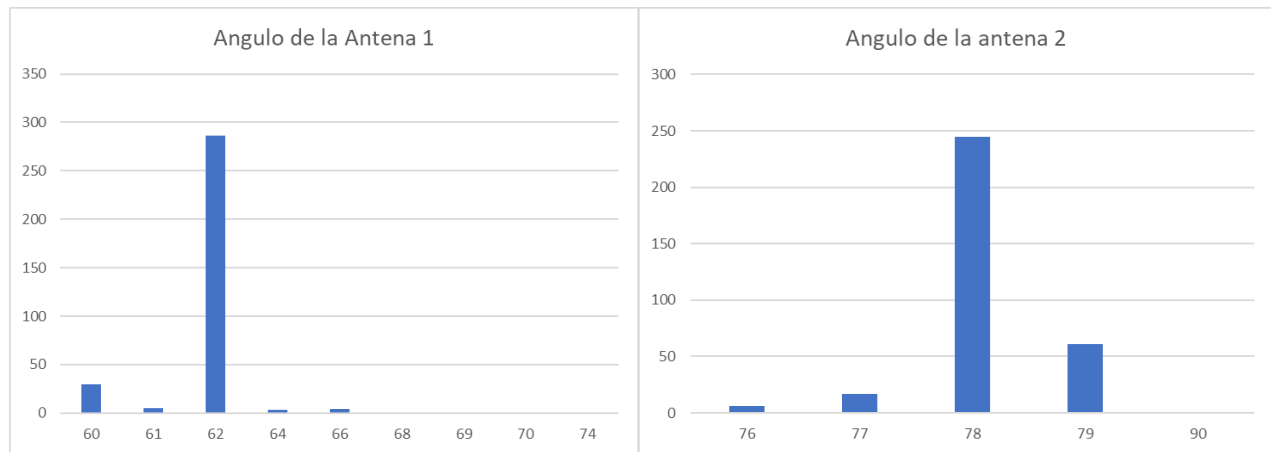


Figura 3.17 El número de veces que se obtuvo el angulo en P1, a) en la Antena 1 b) en la antena 2.

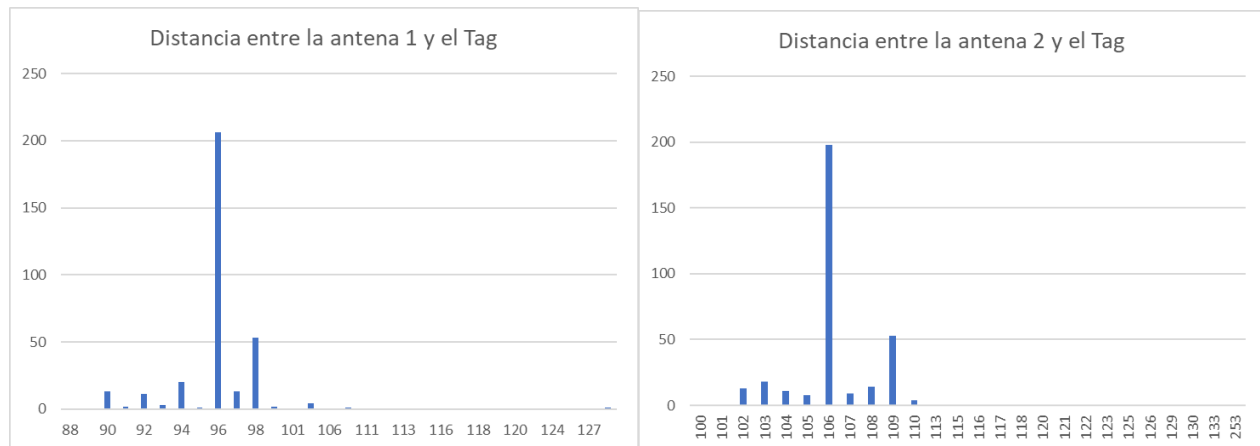


Figura 3.18 El número de veces que se obtuvo en P1 la distancia del tag hacia, a) la Antena 1 b) la antena 2.

La imprecisión absoluta con respecto a la medida que se consideró correcta y con respecto al promedio.

Imprecisión Absoluto	Error respecto al valor medido como correcto	Con el promedio de los datos	Desviación estándar
Angulo entregado por Ant.1	4,3°	1,62x10 ¹⁴ °	1,0°
Angulo entregado por Ant.2	13,4°	0,38x10 ¹⁴ °	0,9°
Distancia entre Ant.1 y Ant.2	0	0	0
Distancia entre Ant.1 y Tag	12,5[cm]	0,112[cm]	8,4[cm]
Distancia entre Ant.2 y Tag	22,4[cm]	0,225[cm]	8,3[cm]

Tabla 3.9 Tabla con los datos de Imprecisión Absoluta y la desviación estandar de P1 sin promedio P2 sin promedio

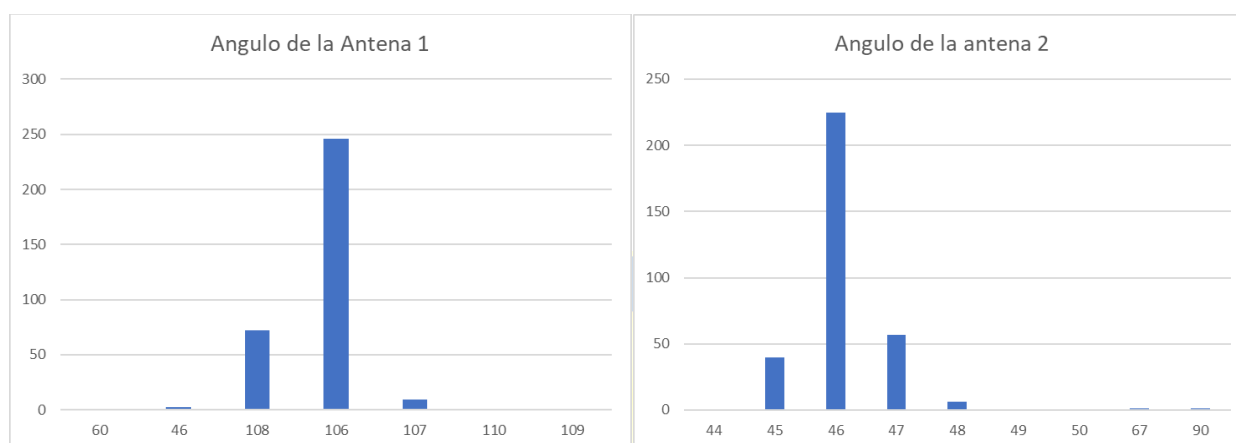


Figura 3.19 El número de veces que se obtuvo el angulo en P2, a) en la Antena 1 b) en la antena 2.

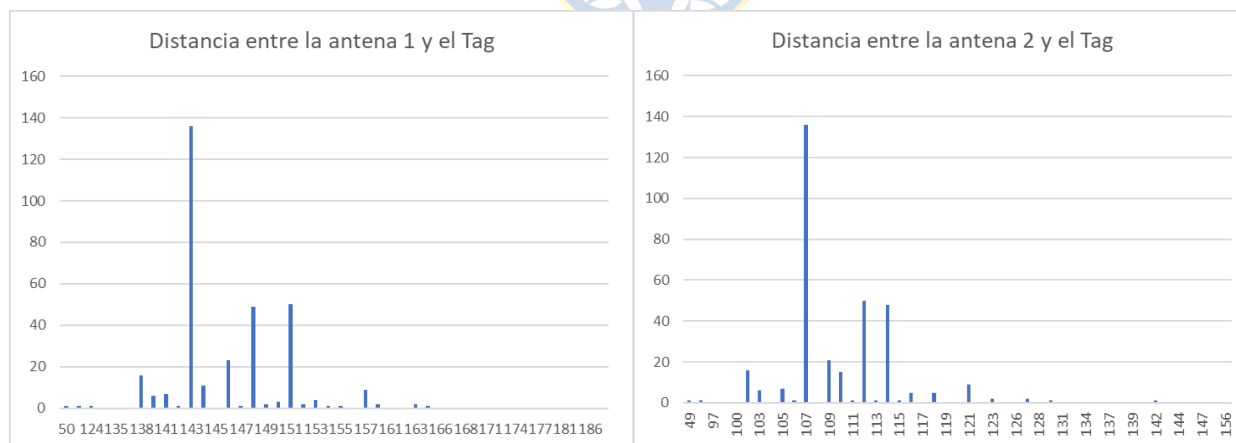


Figura 3.20 El número de veces que se obtuvo en P2 la distancia del tag hacia, a) la Antena 1 b) la antena 2.

La imprecisión absoluta con respecto a la medida que se consideró correcta y con respecto al promedio.

Imprecisión Absoluto	Error respecto al valor medido como correcto	Con el promedio de los datos	Desviación estándar
----------------------	--	------------------------------	---------------------

Angulo entregado por Ant.1	20,2°	$2,70 \times 10^{-14}^\circ$	5,4°
Angulo entregado por Ant.2	13,9°	$0,22 \times 10^{-14}^\circ$	2,7°
Distancia entre Ant.1 y Ant.2	0	0	0
Distancia entre Ant.1 y Tag	9,3[cm]	0,095[cm]	8,7[cm]
Distancia entre Ant.2 y Tag	6,9[cm]	0,062[cm]	6,4[cm]

Tabla 3.10 Tabla con los datos de Imprecisión Absoluta y la desviación estandar de P2 sin promedio

P3 sin promedio

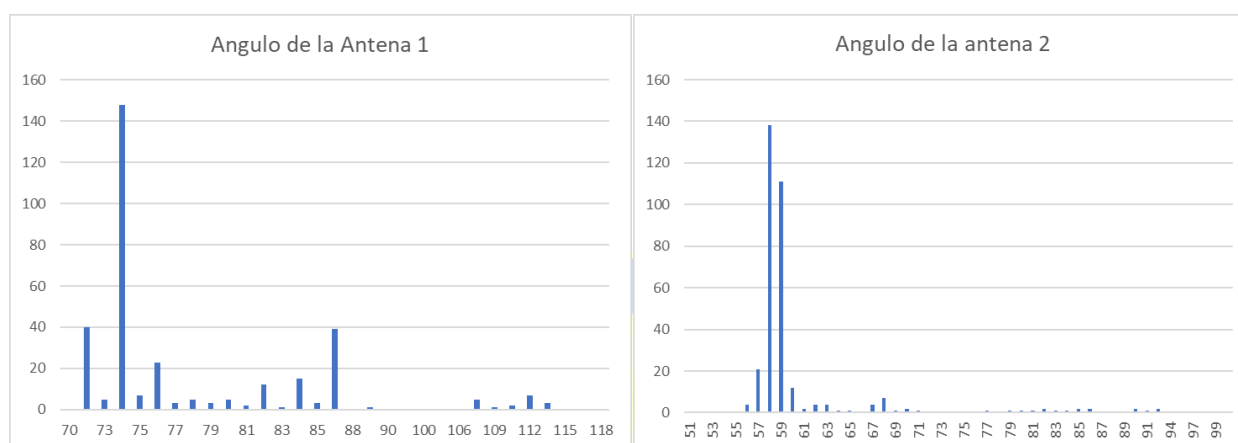


Figura 3.21 El número de veces que se obtuvo el angulo en P3, a) en la Antena 1 b) en la antena 2.

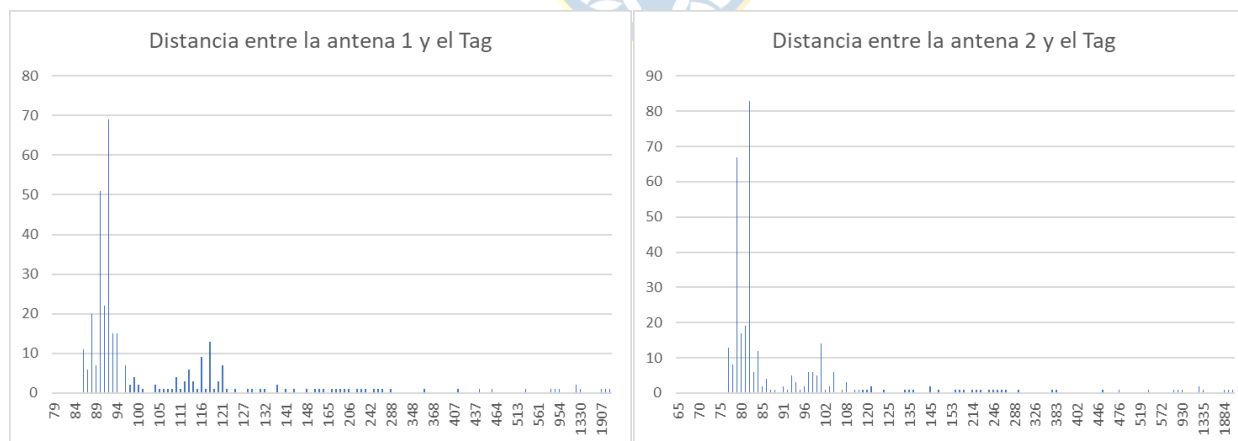


Figura 3.22 El número de veces que se obtuvo en P3 la distancia del tag hacia, a) la Antena 1 b) la antena 2.

La imprecisión absoluta con respecto a la medida que se consideró correcta y con respecto al promedio.

Imprecisión Absoluto	Error respecto al valor medido como correcto	Con el promedio de los datos	Desviación estándar

Angulo entregado por Ant.1	6,8°	$2,66 \times 10^{-14}^\circ$	9,1°
Angulo entregado por Ant.2	20,0°	$6,9 \times 10^{-15}^\circ$	6,4°
Distancia entre Ant.1 y Ant.2	0	0	0
Distancia entre Ant.1 y Tag	101,9[cm]	0,083[cm]	716,0[cm]
Distancia entre Ant.2 y Tag	109,6[cm]	0,034[cm]	715,8[cm]

Tabla 3.11 Tabla con los datos de Imprecisión Absoluta y la desviación estandar de P3 sin promedio P4 sin promedio

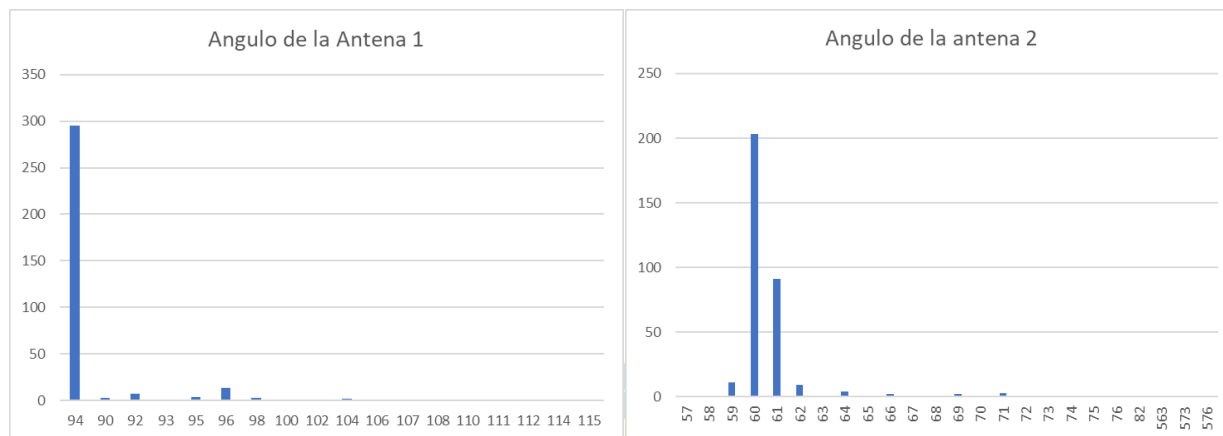


Figura 3.23 El número de veces que se obtuvo el angulo en P4, a) en la Antena 1 b) en la antena 2.

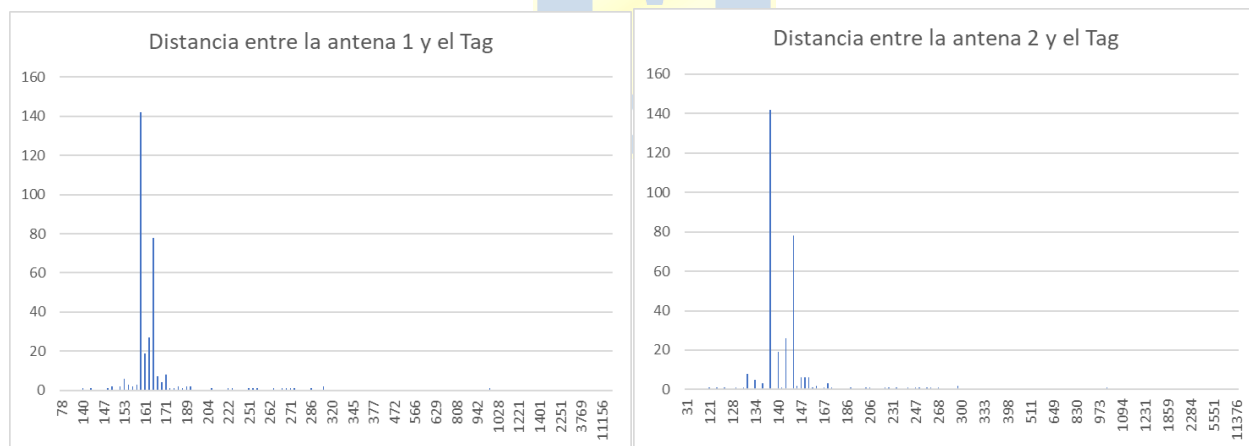


Figura 3.24 El número de veces que se obtuvo en P4 la distancia del tag hacia, a) la Antena 1 b) la antena 2.

La imprecisión absoluta con respecto a la medida que se consideró correcta y con respecto al promedio.

Imprecisión Absoluta	Error respecto al valor medido como correcto	Con el promedio de los datos	Desviación estándar
Angulo entregado por Ant.1	10,4°	$3,01 \times 10^{-15}^\circ$	1,2°
Angulo entregado por Ant.2	2,2°	$1,25 \times 10^{-15}^\circ$	2,0°

Distancia entre Ant.1 y Ant.2	0	0	0
Distancia entre Ant.1 y Tag	146,3[cm]	0,217[cm]	50,8[cm]
Distancia entre Ant.2 y Tag	141,8[cm]	0,082[cm]	51,6[cm]

Tabla 3.12 Tabla con los datos de Imprecisión Absoluta y la desviación estandar de P4 sin promedio

P5 sin promedio

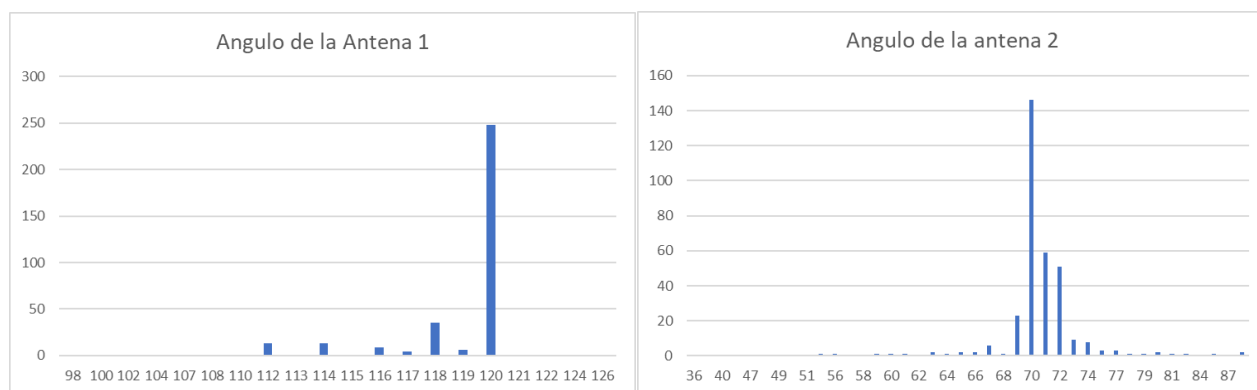


Figura 3.25 El número de veces que se obtuvo el ángulo en P5, a) en la Antena 1 b) en la antena 2.

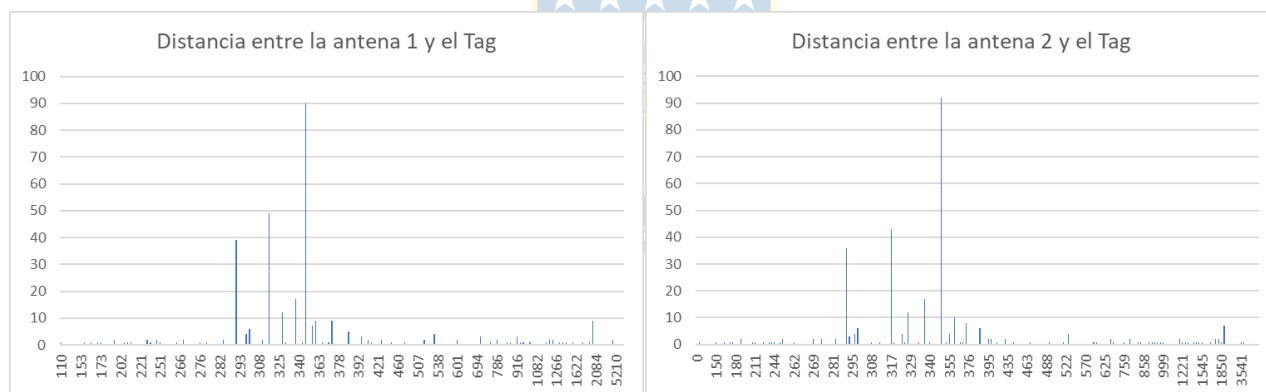


Figura 3.26 El número de veces que se obtuvo en P5 la distancia del tag hacia, a) la Antena 1 b) la antena 2.

La imprecisión absoluta con respecto a la medida que se consideró correcta y con respecto al promedio.

Imprecisión Absoluto	Error respecto al valor medido como correcto	Con el promedio de los datos	Desviación estándar
Angulo entregado por Ant.1	0,8°	$4,0 \times 10^{-13}^\circ$	2,0°
Angulo entregado por Ant.2	20,3°	$4,1 \times 10^{-13}^\circ$	3,2°
Distancia entre Ant.1 y Ant.2	0	0	0
Distancia entre Ant.1 y Tag	86,0[cm]	0,097[cm]	409,0[cm]
Distancia entre Ant.2 y Tag	126,3[cm]	0,080[cm]	409,2[cm]

Tabla 3.13 Tabla con los datos de Imprecisión Absoluta y la desviación estandar de P5 sin promedio

P6 sin promedio

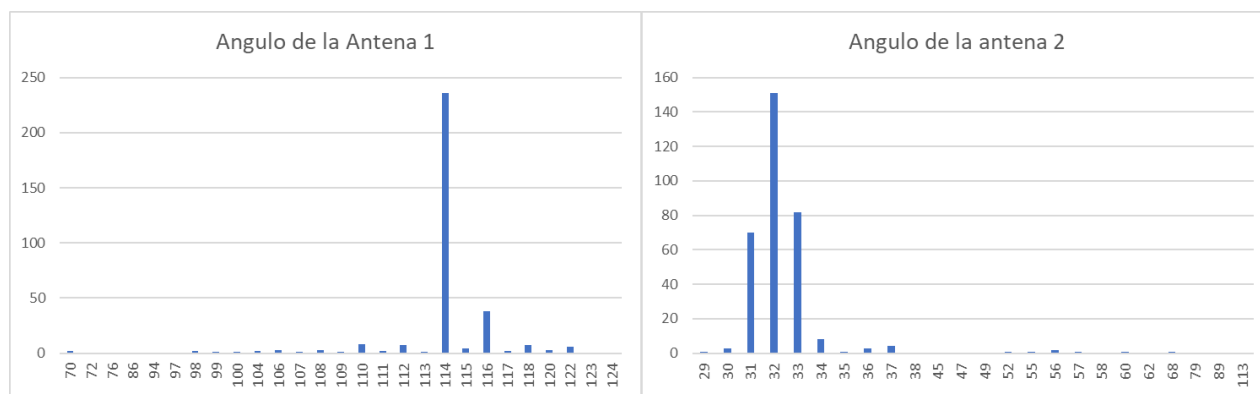


Figura 3.27 El número de veces que se obtuvo el angulo, a) en la Antena 1 b) en la antena 2.

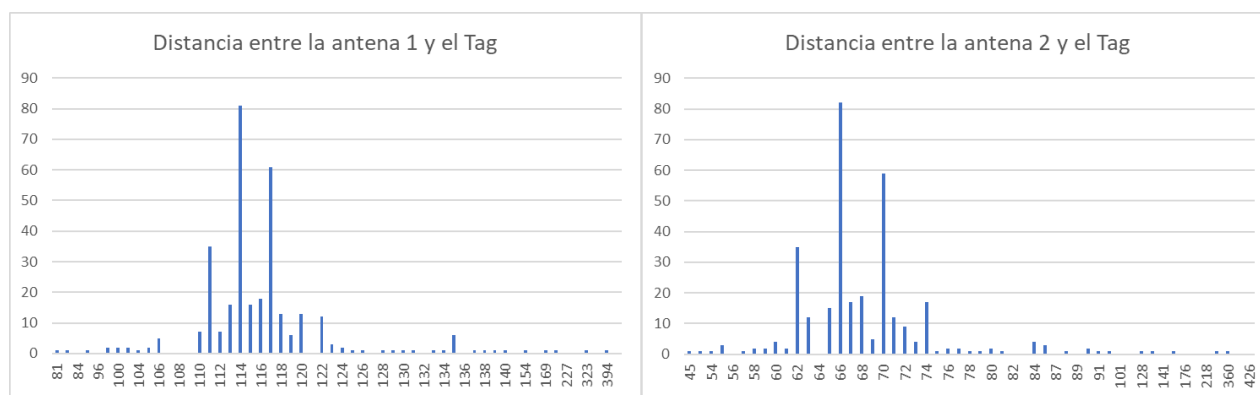


Figura 3.28 El número de veces que se obtuvo la distancia hacia, a) la Antena 1 b) la antena 2.

Imprecisión Absoluta	Error respecto al valor medido como correcto	Con el promedio de los datos	Desviación estándar
Angulo entregado por Ant.1	16,4°	0,3°	4,4°
Angulo entregado por Ant.2	6,6°	0,1°	3,9°
Distancia entre Ant.1 y Ant.2	0	0	0
Distancia entre Ant.1 y Tag	181,8[cm]	0,102[cm]	20,8[cm]
Distancia entre Ant.2 y Tag	178,9[cm]	0,164[cm]	22,6[cm]

Tabla 3.14 Tabla con los datos de Imprecisión Absoluta y la desviación estandar de P6 sin promedio

Conclusiones

4.5. Sumario

El tag objetivo estaba fijo en una posición, sobre un trípode, también es importante señalar que a pesar de poder obtener el ángulo de elevación no se consideró en las pruebas. No hay que olvidar que el objetivo perseguido por las pruebas era determinar en una situación complicada, los errores en las mediciones máximas.

4.6. Conclusiones

Es importante señalar si existe algún objeto en el ángulo de visión, la medición pierde precisión, esto debido a trabajar con frecuencias altas, una solución a esto sería la posición de las antenas es a mayor altura, pero esta no debe pasar de los 3,5[m].

Siendo en el caso de las primeras pruebas la antena colocada en posición paralela al piso en horizontal es una de las condiciones más complicadas.

Como se ve también en el caso de P3 y P6 son las condiciones más problemáticas, en ambos casos el tener un objeto que cruce la línea de visión impide una correcta interpretación de la dirección del ángulo de medición, también se debe recordar que las mediciones fueron realizadas inmóviles, esperando un tiempo a que se normalice la señal ante cualquier variación presente.

Finalmente, se puede observar en las mediciones que al realizar un promedio en el programa se genera un menor error en ambos ángulos, pero en el caso de la distancia obtenida el valor excede por mucho el resultado esperado, esto es debido a tener una distancia de 70 cm entre las antenas, la cual es bastante pequeña y producto de esto, una variación pequeña en el ángulo altera enormemente la distancia desde las antenas a al tag.

4.7. Trabajo Futuro

Este proyecto se puede llevar a obtener las mediciones, pero en este caso en movimiento, buscando corregir los posibles obstáculos y por ende variaciones de los ángulos por medio del uso de Machine Learning o Redes Neuronales en especial las RNN debido a que es posible seguir una continuidad de los datos y poder realizar correcciones a las mediciones.

Bibliografía

- [1] P. Spachos and K. Plataniotis, "BLE Beacons in the Smart City: Applications, Challenges, and Research Opportunities," in *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 3, no. 1, pp. 14-18, Mar. 2020, doi: 10.1109/IOTM.0001.1900073.
- [2] M. Woolley. "Bluetooth Core Specification v5.1, Feature Overview," *Bluetooth Special Interest Group*, version 1.0.1, Dec. 2020.
- [3] P. Karlsson. "Getting started with Bluetooth for high precision indoor positioning", *U-blox AG*, Sep. 2021.
- [4] M. Woolley. "Bluetooth Direction Finding, A Technical Overview," *Bluetooth Special Interest Group*, version 1.0.3, Oct. 2021.
- [5] M. Amer and K. Atteya. "Indoor Positioning Bluetooth Angle of Arrival," M.S thesis, Department of Electrical and Information Technology, Lund University, Sweden, 2019
- [6] M. Ji, J. Kim, J. Jeon and Y. Cho, "Analysis of positioning accuracy corresponding to the number of BLE beacons in indoor positioning system," 2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2015, pp. 92-95, doi: 10.1109/ICACT.2015.7224764.
- [7] A. Noertjahyana, I. A. Wijayanto and J. Andjarwirawan, "Development of Mobile Indoor Positioning System Application Using Android and Bluetooth Low Energy with Trilateration Method," 2017 International Conference on Soft Computing, Intelligent System and Information Technology (ICSIT), 2017, pp. 185-189, doi: 10.1109/ICSIT.2017.64.
- [8] P. Andersson and L. Persson, "Evaluation of Bluetooth 5.1 as an Indoor Positioning System," Dissertation, 2020.
- [9] P. Sambu and M. Won, "An Experimental Study on Direction Finding of Bluetooth 5.1: Indoor vs Outdoor," 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2022, pp. 1934-1939, doi: 10.1109/WCNC51071.2022.9771930.
- [10] P. Babakhani, T. Merk, M. Mahlig, I. Sarris, D. Kalogiros and P. Karlsson, "Bluetooth Direction Finding using Recurrent Neural Network," 2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/IPIN51156.2021.9662611.