

SISTEMA DE BÚSQUEDA DE OBJETOS CON UHF RFID EN BODEGAS
DE ALMACENAMIENTO, PARA MEJORAR LOS PROCESOS LOGÍSTICOS
EN EL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO

Por:

Francisco Javier Puerta Herrera

Francisco Puerta H.

Ingeniero Electrónico

TESIS PRESENTADA PARA OPTAR EL TÍTULO DE MAGÍSTER EN
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Director de Tesis:

Ph.D. Juan Carlos Vélez Díaz



Universidad del Norte

Barranquilla, Atlántico, Colombia

2022

RESUMEN

La implementación de los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID) UHF ha estado incrementando en los últimos años. Estos sistemas son considerados tecnología de alto impacto en aplicaciones del sector logístico, particularmente en la gestión, seguimiento y control de inventarios. Perder productos durante el almacenamiento retrasa los procesos logísticos, incrementan los tiempos de entrega, genera molestia en los clientes, sobrecostos en la utilización del talento humano y pérdidas en la utilidad de la empresa. En esta investigación se propone un método empírico simple que permite buscar objetos etiquetados con RFID en bodegas de almacenamiento, utilizando variables como el indicador de señal recibido (RSSI - Received Signal Strength Indicator) y la tasa de lectura (TL). Con la implementación del método se logró determinar la dirección de la etiqueta en el plano de azimuth y elevación de la antena. Con la variable RSSI se logró un error en la dirección de la etiqueta de 9.1° en azimuth y 9.9° en elevación. Por otro lado, con la TL se logró una precisión de 13.1° en azimuth y 13.8° en elevación. En el trabajo también se desarrolló una plataforma stand-alone que en conjunto con el método propuesto, permite mejorar las tareas de búsqueda de objetos perdidos en bodegas de micros, pequeñas, medianas y grandes empresas. Los resultados indican que del total de búsquedas realizadas en el laboratorio de Logística del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad del Norte, el 96% de las etiquetas fueron encontradas. Con la detección de la etiqueta, el sistema realiza el proceso de búsqueda en 4.99 minutos con la variable RSSI y 7.77 minutos con TL.

AGRADECIMIENTOS

Sobran palabras para agradecer a Dios por su inmensa misericordia y favor. En medio de la enfermedad, dificultad y problema me levantó con su mano. Coloco en mi sabiduría y perseverancia. Esta meta es para su Gloria y honra. Gracias Dios por haberme bendecido con Lisbeth Acosta, mi futura esposa, quien dio su vida por cuidarme y apoyarme en los momentos difíciles, esa mujer que con palabras de vida y amor me inspiraban en cada momento para seguir y no desfallecer. A mis hijos David e Isaías, los motivos de luchar y trabajar intensamente. Este logro es para ellos. Gracias a mi tutor de Tesis, el Ingeniero Juan Carlos Vélez, hombre sabio y paciente, entrego su sabiduría para el desarrollo adecuado de la investigación, sus palabras de aliento me motivaban cada día más en culminar el proyecto. A mis padres, hermanos y demás familiares que me apoyaron en este proceso, muchas gracias.

Gracias a Minciencias por su apoyo con la beca 809 del departamento del Atlántico y contribuir con el desarrollo del capital humano.

Hoy soy testigo de que Dios tienes planes maravillosos para cada uno de nosotros, uno de ellos termina con la presentación de esta investigación e iniciar nuevos y mejores planes en mi vida.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	11
2	PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	13
2.1	Antecedentes	13
2.2	Planteamiento del problema	16
2.3	Justificación	18
2.3.1	Impacto científico y tecnológico.....	19
2.3.2	Impacto ambiental y social	19
2.3.3	Impacto en la productividad y competitividad	19
2.4	Objetivos de la investigación.....	20
2.4.1	Objetivo general	20
2.4.2	Objetivos específicos.....	20
2.5	Alcances y limitaciones	21
2.5.1	Alcances.....	21
2.5.2	Limitaciones	21
3	MARCO TEÓRICO.....	22
3.1	Sistemas RFID.....	22
3.2	Componentes de un sistema RFID	23
3.2.1	Lector RFID.....	23
3.2.2	Antena.....	26
3.2.3	Tag RFID.....	28
3.2.4	Host.....	30
3.3	Clasificación de los sistemas RFID	31
3.4	Sistemas de campo cercano y lejano	32

3.5	Especificaciones de los sistemas RFID UHD.....	35
3.5.1	Capa física	36
3.5.2	Capa de identificación	36
3.5.3	Mecanismo anticolidión de sistemas RFID UHF	36
3.6	Estado del arte.....	38
4	SISTEMA DE BÚSQUEDA DE OBJETOS CON RFID UHF.....	45
4.1	Caracterización de variables de RF y Lectura	45
4.1.1	Correlación entre variables.....	45
4.1.2	Tasa de lectura (TL) VS RSSI	48
4.1.3	Hipótesis.....	56
4.2	Método Propuesto.....	66
4.2.1	Etapa A: Configuración del lector.	66
4.2.2	Etapa B: Indicación del tag ID objetivo y variable respuesta a utilizar	66
4.2.3	Etapa C: Actividades del proceso de búsqueda	67
4.2.4	Etapa D: Muestreo a 360° en azimuth.....	67
4.2.5	Etapa E: Detección del TAG.....	69
4.2.6	Etapa F: Toma de muestras sobre el área de interés	70
4.2.7	Etapa G: Estimación de la dirección de la etiqueta objetivo en el plano de azimuth.....	71
4.2.8	Etapa H: Estimación de la dirección de la etiqueta objetivo en el plano de elevación.	71
4.3	Plataforma Stand-Alone	73
5	Planteamiento y Desarrollo de experimentos	76
5.1	Diseño de experimentos	76
5.2	Planteamiento de hipótesis	79

5.3	Análisis de resultados	86
6	Conclusiones	87
7	Trabajo futuro	88
8	Bibliografía.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1. SISTEMA RFID GENERAL, ADAPTADO DE [34]	23
FIG. 2. LECTOR RFID UHF UTILIZADO EN LOS EXPERIMENTOS	23
FIG. 3. PATRÓN DE RADIACIÓN DE UNA ANTENA DIRECCIONAL, ADAPTADO DE [38].....	26
FIG. 4. ANTENA RFID UHF UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN	27
FIG. 5. TAGS RFID UHF PASIVOS	28
FIG. 6. ETAPAS Y RESPUESTA DE UN TAG PASIVO, ADAPTADO DE [40]	29
FIG. 7. ETAPAS Y RESPUESTA DE UN TAG SEMIPASIVO, ADAPTADO DE [40]	29
FIG. 8. ETAPAS Y RESPUESTA DE UN TAG ACTIVO, ADAPTADO DE [40]	30
FIG. 9. ARDUINO MEGA 2560	30
FIG. 10. ACOPLAMIENTO EN CAMPO LEJANO, ADAPTADO DE [44]	33
FIG. 11. ANGULO DE INCIDENCIA, REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN, AJUSTADO DE [46]	34
FIG. 12. SEÑALES MULTITRAYECTO	35
FIG. 13. PROCESO DE LECTURA EXITOSA EN UNA ETIQUETA	37
FIG. 14. LECTURA DE ETIQUETAS EN COLISIÓN	37
FIG. 15. EXPERIMENTO 1: ESTUDIO DE CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES.....	46
FIG. 16. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE VARIABLES.....	47
FIG. 17. EXPERIMENTO 2: RESPUESTA DE LA TL Y RSSI EN RELACIÓN CON LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN, DISTANCIA Y DIRECCIÓN ENTRE ANTENA Y TAG.....	49
FIG. 18. TL VS ANG PARA UNA DISTANCIA ENTRE ANTENA Y TAG DE UN METRO	50
FIG. 19. TL VS ANG PARA UNA DISTANCIA ENTRE ANTENA Y TAG DE DOS METROS	50
FIG. 20. TL VS ANG PARA UNA DISTANCIA ENTRE ANTENA Y TAG DE TRES METROS	51
FIG. 21. RSSI VS ANG PARA UNA DISTANCIA ENTRE ANTENA Y TAG DE UN METRO.....	53
FIG. 22. RSSI VS ANG PARA UNA DISTANCIA ENTRE ANTENA Y TAG DE 2 METROS.....	53
FIG. 23. RSSI VS ANG PARA UNA DISTANCIA ENTRE ANTENA Y TAG DE TRES METROS.....	54
FIG. 24. DISTRIBUCIÓN DE 14 ETIQUETAS VECINAS	57
FIG. 25. AUTOCORRELACIONES DE LA TL A 2 METROS.....	58
FIG. 26. AUTOCORRELACIONES DE LA TL A 3 METROS.....	59
FIG. 27. COMPARACIÓN DE MEDIAS CON INTERVALOS DE CONFIANZA DE TUKEY HSD	60
FIG. 28. GIRO DE LA ANTENA EN PASOS DE 1° EN AZIMUTH.....	61
FIG. 29. AUTOCORRELACIONES DE LA TL PARA DATOS DE 10 POSICIONES	64
FIG. 30. COMPARACIÓN DE MEDIAS CON INTERVALOS DE CONFIANZA DE TUKEY HSD	65
FIG. 31. MÉTODO PROPUESTO: BÚSQUEDA DE ETIQUETAS RFID UHF	66
FIG. 32. BANCO DE MEMORIAS DE UNA ETIQUETA RFID UHF	67

FIG. 33. MUESTREO A 360°	68
FIG. 34. POSICIÓN DE LA ANTENA EN EL PLANO DE ELEVACIÓN Y AZIMUTH	68
FIG. 35. ERROR EN EL PROCESO DE DETECCIÓN DE LA ETIQUETA	69
FIG. 36. DETECCIÓN DE LA ETIQUETA PARA UN MUESTREO A 360°	70
FIG. 37. ÁNGULO DE ACTIVACIÓN Y DESACTIVACIÓN DE UN TAG RFID UHF	70
FIG. 38. POSICIÓN INICIAL Y FINAL DE LA ANTENA EN EL PLANO DE ELEVACIÓN.	72
FIG. 39. SISTEMA DE DIRECCIONAMIENTO DE LA ANTENA Y MÉTODOS DE MEDICIÓN DE ÁNGULOS. .	73
FIG. 40. ESQUEMA DE CONEXIÓN DE LA PLATAFORMA STAND-ALONE.....	74
FIG. 41. SISTEMA DE BÚSQUEDA DE ETIQUETAS RFID – UHF	74
FIG. 42. LABORATORIO DE LOGÍSTICA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL.	76
FIG. 43. PLANTEAMIENTO DE EXPERIMENTOS EN LABORATORIO DE LOGÍSTICA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DEL NORTE	77
FIG. 44. BÚSQUEDA DE ETIQUETAS RFID UHF	78
FIG. 45. CÓDIGO QR PARA VERIFICAR ID Y MEDICIÓN DE ÁNGULOS EN AZIMUTH Y ELEVACIÓN DE LA ETIQUETA OBJETIVO	79
FIG. 46. TEST DE NORMALIDAD PARA AZIMUTH Y ELEVACIÓN CON LA VARIABLE RSSI	80
FIG. 47. TEST DE NORMALIDAD PARA AZIMUTH Y ELEVACIÓN CON LA VARIABLE TL.....	81
FIG. 48. AUTOCORRELACIONES DEL ERROR EN ÁNGULO DE AZIMUTH Y ELEVACIÓN PARA LA VARIABLE RSSI	81
FIG. 49. COMPARACIÓN DEL ERROR EN AZIMUTH PARA RSSI Y TL	82
FIG. 50. COMPARACIÓN DEL ERROR EN ELEVACIÓN PARA RSSI Y TL	83
FIG. 51. AUTOCORRELACIÓN PARA TIEMPO DE BÚSQUEDA CON RSSI Y TL.....	84
FIG. 52. COMPARACIÓN DE LOS TIEMPOS DE BÚSQUEDA CON RSSI Y TL.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL LECTOR RFID M6E-NANO [37]	24
TABLA 2. DATOS ADICIONALES ENTREGADOS EN EL PROCESO DE LECTURA POR EL LECTOR	25
TABLA 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE ANTENA UHF RFID	27
TABLA 4. TAG SMARTRAC DOGBONE [42].....	28
TABLA 5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE ARDUINO MEGA [45].....	31
TABLA 6. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS RFID	32
TABLA 7. RESUMEN DEL ESTADO DEL ARTE (COMPARACIÓN).....	44
TABLA 8. RESUMEN GENERAL PARA TL EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA Y POTENCIA DE TRANSMISIÓN DE LA ANTENA.....	52
TABLA 9. RESUMEN GENERAL PARA RSSI EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA Y POTENCIA DE TRANSMISIÓN DE LA ANTENA.....	54
TABLA 10. PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	58
TABLA 11. PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV PARA DATOS DE 90° A 80°	62
TABLA 12. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS DISPOSITIVOS UTILIZADOS EN LOS EXPERIMENTOS ..	75
TABLA 13. SUPUESTO DE NORMALIDAD PARA AZIMUT Y ELEVACIÓN CON LA VARIABLE RSSI Y TL.....	80
TABLA 14. AUTOCORRELACIONES DEL ERROR EN ÁNGULO DE AZIMUTH Y ELEVACIÓN PARA LA VARIABLE TL.....	82
TABLA 15. SUPUESTO DE NORMALIDAD PARA LOS TIEMPOS CON LA VARIABLE RSSI Y TL	84
TABLA 16. RELACIÓN DE EXPERIMENTOS POR ÁREA	85

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

RFID	Identificación por Radiofrecuencia
RSSI	Indicador de intensidad de la señal recibida
RSP	Fase de la Señal Recibida
KNN	K vecinos más cercanos
EPC	Código Electrónico de Producto
LF	Baja Frecuencia
HF	Alta Frecuencia
UHF	Ultra Alta Frecuencia
DSB-ASK	Modulación por desplazamiento de amplitud de doble banda lateral
SSB-ASK	Modulación por desplazamiento de amplitud de banda lateral única
PR-ASK	Modulación por Desplazamiento de Amplitud con Inversión de Fase
PSK	Modulación por Desplazamiento de Fase
SVM	Máquina de Soporte Vectorial
AoAct	Ángulo de activación
TL	Tasa de lectura

1 INTRODUCCIÓN

La logística se considera como el proceso de administrar la cadena de suministro, desde la fabricación de los productos hacia el uso del consumidor final [1]. Se compone de varios subsistemas, dentro de ellos, la gestión de almacenes. Su objetivo es maximizar los espacios, ubicar estratégicamente los productos de alta rotación, facilitar el acceso de la mercancía, llevar control de las existencias, entre otros [2].

La alta competitividad en el mercado y las exigencias del cliente, llevan a las pequeñas, medianas y grandes empresas a optimizar sus procesos y mejorar su economía. Bogotá, Antioquia, Santander, Risaralda y Atlántico se destacaron según el IDC (Índice Departamental de Competitividad) como los cinco departamentos más competitivos de la nación con relación a condiciones habilitantes, capital humano, eficiencia de los mercados y ecosistema innovador [3]. Sin embargo, se registra que los costos en los procesos logísticos del departamento del Atlántico son de 2,2 puntos porcentuales, mayor al promedio nacional (13.5%) [4]. El Atlántico a pesar de tener buenos resultados a nivel de competitividad, muestra debilidades en sus procesos logísticos. Con esta investigación se propone un sistema que aporte valor a un nicho particular en los procesos logísticos, como lo es la gestión de almacenes.

Para cumplir con la entrega de un producto se requiere de los siguientes pasos: a) Solicitud del producto por parte del usuario, b) Determinar posición en almacén o bodega, c) Buscar producto objetivo, d) Reconocer y extraer, e) Empacar y alistar pedido solicitado. Este método es conocido como Picking [5]. En la gestión de almacenes se utiliza la recolección manual (Picking list), picking con radiofrecuencia, picking por voz, picking to light, picking to visión, equipos eléctricos para picking y vehículos de picking auto guiados [6]. El método de picking requiere que los productos se encuentren en ubicaciones determinadas.

Con el avance tecnológico y la implementación de aplicaciones de escritorio, aplicaciones web, apps y sistemas de identificación por código de barras e

identificación por radiofrecuencia (RFID - Radio Frequency Identification), se ha logrado acceder a la información de manera clara y precisa [7], [8]. Los códigos de barras son ampliamente utilizados en el sector comercial e industrial. En los últimos años la tecnología RFID ha tomado fuerza, siendo más costosa y a la vez más efectiva que los códigos de barra, ya que permite identificar productos en un campo cercano y lejano (Desde pocos centímetros hasta 10 metros o más) [9]. Se ha venido utilizando en aplicaciones para el control de inventario en bodegas, cobro de peajes, administración de libros, monitoreo de animales, seguridad en supermercados, control de acceso, seguimiento a equipos de laboratorio, entre otros [10], [11]. Por otro lado, se ha visto como complemento a la localización por GPS (Global Position System) en espacio de interiores [12].

La búsqueda de productos a través del código de barras o técnicas manuales no es una tarea fácil, ya que requiere de controles rigurosos durante el proceso de almacenaje. Las condiciones que rompen el proceso de picking y logística convencional es la pérdida de productos. Bajo estas condiciones las tareas de búsqueda afectan el proceso de despacho, los tiempos de entrega y la utilidad de la empresa.

Esta investigación tiene como objetivo implementar un método de búsqueda con RFID. Siendo el RSSI y la TL variables claves para el desarrollo del método. A través de la experimentación, se compara el método planteado con lo expuesto en el estado del arte. El prototipo final se desarrolla con productos de software y hardware libre, mejorando los costos de inversión y el interés de las micros, pequeñas y medianas empresas en utilizarlo.

2 PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Antecedentes

La gestión de almacenes como eslabón de la cadena de suministros, lleva a cabo las tareas de controlar el ingreso y salida de la mercancía. Permite llevar un inventario que relacione cantidades, ubicación y estado de los productos [13]. Pequeñas, medianas y grandes empresas luchan por mantener una bodega organizada y al día, pero la realidad es otra. En el proceso de despacho los productos relacionados no logran ser encontrados, generando pérdida de tiempo y afectando los tiempos de entrega.

Esta problemática ha sido abordada con técnicas de picking [14], método que se realiza de forma manual, automatizada y con tecnologías de punta. El Grupo Familia es una empresa dedicada a la comercialización de productos de higiene. Se destaca entre las mejores de América Latina y el Caribe. Como caso de éxito en la administración de sus almacenes, reporta la implementación de un sistema de recolección por voz (Picking por voz), a través de la tecnología Vocollect. Los indicadores muestran que con esta implementación los costos en mano de obra y equipos se redujeron en un 40% [15].

Copservir LTDA es una empresa dedicada al suministro y distribución de medicamentos. Con el fin de mejorar los procesos de despacho implementó la tecnología Vocollect, incrementando su productividad y disminuyendo los errores en la recolección en un 30% [16].

La empresa de cosméticos Natura usa para sus centros de distribución (CEDIS) en Brasil, Argentina y México el sistema de recolección picking to light, además cuenta con una infraestructura totalmente automatizada. Debido a la alta demanda, la integración del sistema permitió triplicar la capacidad de respuesta [17].

En [18] se propone el método COI (Cube Per Orden Index) y ABC con el fin de reestructurar la ubicación de los productos de alta rotación. La simulación arrojó un incremento en la producción del 52% y un decremento en los costos operativos del 31%.

La tecnología de voice Picking, Picking to light y Picking manual en conjunto a los sistemas WMS (Warehouse Management System), han hecho que los almacenes mejoren los procesos de búsqueda y recolección de mercancía, el inventario se mantenga actualizado, la carga de los operarios disminuya y los tiempos de entrega mejoren. Para la implementación de estos sistemas, la ubicación del inventario existente es conocido. En el caso de productos extraviados, se requiere de otros métodos.

Los sistemas RFID son utilizados hoy día para la localización de objetos en interiores. En este contexto, las señales de RF transmitidas por el lector y etiqueta sufren atenuaciones, reflexiones y dispersión debido a la presencia de obstáculos en el medio como paredes, estantería metálica, madera, papel, cartón entre otros [19]. Estos efectos deben tenerse en cuenta al momento de estimar la ubicación de productos. En [20] podemos destacar una serie de técnicas de localización utilizadas en los sistemas RFID. El primer grupo se caracteriza por la estimación de distancia, involucra variables como: RSSI y fase de la señal recibida (Received Signal Phase). En [21] se propone un sistema de localización de un lector a través de la técnica de triangulación. Con la ayuda de un compás electrónico se obtienen el ángulo de detección de por lo menos dos etiquetas. Los experimentos se desarrollaron con una separación entre etiqueta y lector de 100 y 150 cm. El error obtenido es de 15 y 20 cm respectivamente.

Por otro lado, tenemos como análisis de escenas el algoritmo K vecino más cercano (K-nearest neighbors ó Knn), este método se caracteriza por utilizar tags de referencia. En [22] se implementa el método con un conjunto de etiquetas pasivas (Tags de referencia) y tags objetivos. El algoritmo permitió clasificar los niveles de RSSI de las etiquetas desconocidas en función de las

etiquetas de referencia. El error promedio fue de 32.3 cm. Los resultados se obtuvieron para una distancia entre la antena y el tag de 121 a 281 cm con pasos de 20 cm.

Technology Solution UK LTD y Zebra Technologies, son empresas que ofrecen soluciones móviles y fijas para la identificación de productos con tecnología RFID. Sus equipos tienen la capacidad de buscar etiquetas a través de señales audiovisuales que aumentan gradualmente en la medida en que el lector RFID se acerca al objetivo. En las tareas de búsqueda solo utilizan como variable de decisión el nivel RSSI.

Los métodos de Picking por voz y Picking to Light requieren de una bodega totalmente organizada. Las grandes empresas cuentan con la infraestructura y recursos para lograrlo, pero las micro, pequeñas y medianas empresas, no cuentan con los recursos de inversión, además por la dimensión de sus almacenes las tecnologías utilizadas para Picking no son necesarias.

En la literatura se reportan sistemas de búsqueda automatizados y bajo supervisión [23]. Sin embargo, requieren de una alta inversión e implementación compleja. En el mercado existen lectores RFID portátiles que solo indican el nivel RSSI del tag objetivo [24]. Con lo encontrado en la literatura es posible desarrollar métodos más sencillos y con sistemas de bajo costo para que las micro, pequeñas y medianas empresas puedan utilizar.

2.2 Planteamiento del problema

La gestión de almacenes permite llevar un control a la mercancía disponible, clasificándola según su contenido, costo y rotación. Con estas características los productos son ubicados estratégicamente en el almacén, garantizando altas probabilidades de ser encontrados durante el proceso de búsqueda [25].

En el marco internacional, el banco mundial mide el índice de desempeño logístico (LPI) en una escala de uno a cinco. Esta métrica describe las habilidades de las empresas para llevar a cabo los procesos de transporte y distribución, tiempos de entrega, almacenamiento de los productos, capacidad de minimizar los costos en los envíos, entre otras. En el 2018, Colombia obtuvo a nivel mundial un LPI de 2.94, ubicándose en el puesto 58 de 160 países [26].

En el marco nacional, a través de una encuesta realizada a 848.986 empresas en Colombia, se encontró que el 7.2% utiliza codificación por código de barras, el 1.1% identificación RFID, el 64.4% no utiliza ningún tipo de tecnología y el 27.3% utilizan tecnologías de rastreo y seguimiento, facturación electrónica, sistemas WMS, entre otras [27].

En el marco local, sobre la productividad de las empresas en relación con las herramientas tecnológicas implementadas en los procesos logísticos del departamento del Atlántico, se encontró que el 28% del total de empresas menciona tener niveles regulares de productividad. Esto, haciendo uso de herramientas tecnológicas implementadas en los procesos de la empresa como: Un 24.7% para aplicaciones de internet, 20.8% para software de gestión contable, 17,5% para aplicaciones de trabajo colaborativo, 11% para aplicaciones de gestión de procesos, 10.4% para software de control de inventario y el 15.6% en otras aplicaciones [28]. Según [29], el mantenimiento y manejo de los inventarios representan junto con el sistema de almacenamiento entre un 15 y 30% los costos totales de logística, concluyendo que, aumentando los niveles de control en los productos almacenados se puede mejorar el nivel de productividad.

En los procesos de inventario y almacenamiento de micros, pequeñas y medianas empresas, se indica que una vez la empresa recibe el activo, este se registra en un software de inventario por medio de alguna tecnología de identificación como el código de barras, sistemas RFID e incluso de forma manual. Con el registro del producto, se procede a su almacenamiento teniendo en cuenta los siguientes criterios: El primero y muy usado es la **ubicación aleatoria**, el cual permite agilizar el proceso de almacenar por baches alrededor de toda la bodega. Esta técnica puede generar que los procesos de búsqueda se demoren más de lo normal, ya que los productos se encuentran en diferentes sectores. Por otro lado, se tiene la **ubicación estática** como método que asigna a cada artículo un espacio propio en el almacén. Ventajoso al momento de localizar, pero improductivo en el desaprovechamiento del espacio [29].

Empresas de logística con mucha demanda de mercancía es susceptible a pérdida de productos debido a un almacenamiento incorrecto, obstaculización por otros productos, entre otros. En estas condiciones, buscar la mercancía se convierte en una tarea tediosa e improductiva. El tiempo y personal invertido para las tareas de búsqueda se transforman en pérdidas económicas por el mal uso de las horas hombre disponibles.

De esta manera surge la siguiente pregunta de investigación: **¿Es posible crear un método simple basado en señales RFID y la utilización de una sola antena para la búsqueda de elementos en bodegas y mejorar los procesos logísticos en el departamento del Atlántico?**

2.3 Justificación

Según datos tomados del ministerio del trabajo, las MiPymes en Colombia representan el 90% de la productividad de la nación. Además, son las responsables en la generación del 80% del empleo en el país, cifras que nos muestran la importancia de las pequeñas y medianas empresas [30]. Por tanto, mejorar los procesos logísticos en la gestión de almacenes contribuye en la generación de mejores índices de productividad para la nación.

La presente investigación surge de la necesidad de contar con un sistema de identificación que permita mejorar las actividades de búsqueda en el menor tiempo posible y sin afectar las actividades que se estén desarrollando al tiempo.

Para la búsqueda de productos, se propone la implementación de sistemas UHF RFID. Esta tecnología no requiere que exista línea de vista, como la identificación por código de barras. Con estos sistemas se requiere mejorar la probabilidad de éxito en el proceso de búsqueda. Para ello se requiere de la implementación de métodos que permitan, a partir de un análisis de las variables, determinar la localización de las etiquetas.

Existen investigaciones que implementan técnicas para estimar la distancia entre el lector y el tag RFID (Modelos empíricos). Otros utilizan etiquetas de referencia para determinar la posición de la etiqueta de interés (Técnicas de KNN). En el mercado se encontraron lectores portátiles utilizados para identificar etiquetas. Estos dispositivos utilizan el RSSI como indicador de aproximación [24] [31]. El personal de las bodegas busca los objetos con los niveles de señal recibidos. En el estado del arte se evidencia la implementación de robots para encontrar objetos a través de la variable RSSI.

La presente investigación propone un método que utiliza RSSI o tasa de lectura como variables de interés durante el proceso de búsqueda de objetos perdidos en bodegas. Es un método económico, costo efectivo, pensado para Pymes y MiPymes.

2.3.1 Impacto científico y tecnológico

La presente investigación aporta al estado del arte un método simple de búsqueda de objetos en bodegas, basado en RFID. Además, muestra la comparación entre el RSSI y tasa de lectura de los sistemas RFID UHF durante el proceso de búsqueda de objetos perdidos. El prototipo presentado genera un impacto tecnológico en la comunidad científica y empresarial, ya que se puede implementar en la industria, centros de distribución, comercialización y campus educativo.

2.3.2 Impacto ambiental y social

Con la implementación del sistema, se aporta a la reducción de residuos generados por el desembalaje de productos no identificados. Se agrega valor a técnicas de búsqueda convencionales en caso de extraviarse artículos previamente identificados y se brinda tranquilidad a las empresas de encontrar productos perdidos en bodegas de almacenamiento.

2.3.3 Impacto en la productividad y competitividad

La investigación permite a través del sistema stand-alone mejorar los tiempos de búsqueda de productos perdidos en bodegas de almacenamiento. Se reduce las horas hombre asignadas para esta labor, se mejoran los tiempos de respuesta al cliente y/o usuarios y se mejora la utilidad de la empresa. La implementación de estos métodos y sistemas llevan a la empresa a mejorar su competitividad e ir fortaleciéndose en tecnologías de punta utilizadas con mayor frecuencia en la cadena de suministro y bodegaje.

2.4 Objetivos de la investigación

2.4.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema que permita buscar objetos con UHF RFID en bodegas de almacenamiento, para mejorar los procesos logísticos en el departamento del Atlántico.

2.4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las variables de radiofrecuencia que permitan estimar el nivel de cercanía de objetos etiquetados con RFID.
- Implementar un método de búsqueda de objetos etiquetados con RFID basado en la detección de las variables independientes RSSI o tasa de lectura.
- Evaluar y comprobar el rendimiento del método propuesto para cada una de las variables.
- Montar y validar el funcionamiento del método de búsqueda desarrollado en una plataforma standalone.

2.5 Alcances y limitaciones

2.5.1 Alcances

- El sistema utiliza una sola antena
- La antena del sistema es capaz de girar en el plano de azimuth y elevación, para buscar el blanco.
- Para el uso del sistema, no se requiere de personal experto.

2.5.2 Limitaciones

- La búsqueda se limita al uso de etiquetas pasivas y que funcionen en la banda de frecuencia UHF.
- El sistema se encuentra montado sobre un trípode. Para trasladarse de un punto a otro se requiere que una persona lo haga.
- En el proceso de búsqueda no se mide distancia entre la antena y el tag.
- La superficie de los productos a buscar debe ser de cartón, plástico, tela o papel.
- La búsqueda de etiquetas sobre productos metálicos está por fuera del alcance de esta investigación.
- El consumo de energía del sistema propuesto no es calificado como métrica a comparar entre otros sistemas.

3 MARCO TEÓRICO

Los sistemas de identificación automática se han venido desarrollando e implementando desde el siglo XX. Con la necesidad de automatizar y mejorar los procesos logísticos en las empresas, nacen las tecnologías de identificación por código de barras, códigos de barra en 2D, tarjetas magnéticas, tarjetas con chip prepago, CD-ROMs, Diskets y sistemas de identificación por radiofrecuencia [32].

En la presente investigación se hace uso de los sistemas RFID como tecnología de búsqueda de objetos perdidos en bodegas de almacenamiento.

3.1 Sistemas RFID

En los últimos años, los sistemas RFID han tomado gran participación en aplicaciones relacionadas con la logística, seguridad, seguimiento y control [33]. El principio de funcionamiento de los sistemas RFID se debe al origen de los sistemas de radares, cuyo objetivo es identificar la presencia y dirección de objetivos [34]. Los sistemas RFID se desarrollaron como tecnología de identificación por radiofrecuencia entre un emisor (lector) y receptor (etiquetas). El lector inicia el proceso de consulta a través de señales de RF. El tag como respuesta a la solicitud del lector responde con un EPC (Electronic Product Code), código que contiene información de identificación, fabricación y control de errores [35]. La información llega al Host y usuario final, ver Fig. 1. Los sistemas RFID son utilizados con el fin de mejorar los procesos logísticos en empresas de comercialización, distribución y almacenaje de mercancía para el control de inventario, identificación de mercancía, trazabilidad, control de acceso, seguridad de productos, identificación de animales, entre otros.

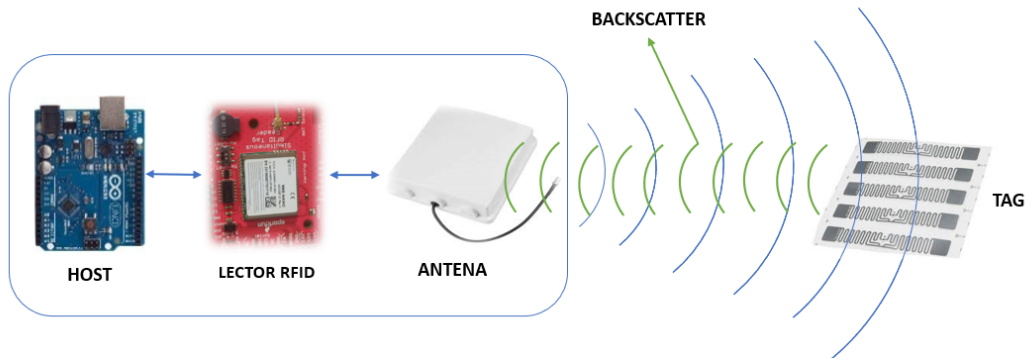


Fig. 1. Sistema RFID general, adaptado de [35]

3.2 Componentes de un sistema RFID

Los sistemas RFID se componen de tres partes fundamentales: Lector RFID, etiqueta (tag) y Host, ver Fig. 1.

3.2.1 Lector RFID

El lector RFID permite establecer una comunicación con las etiquetas cercanas y facilitar la transferencia de datos [36]. Con la respuesta del tag, el lector decodifica la señal recibida y la envía al Host.

Los lectores RFID son diseñados según su frecuencia de operación, potencia de transmisión, cantidad de puertos de comunicación, número de antenas que se pueden conectar, capacidad de comunicación con otros lectores, entre otros [32].



Fig. 2. Lector RFID UHF utilizado en los experimentos

El lector RFID UHF de la Fig. 2 presenta las siguientes características técnicas:

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL LECTOR RFID M6E-NANO [37]

Dimensions	22 mm L x 26 mm W x 3.0 mm H
RFID Protocol Support	EPCglobal Gen2 2V2 (ISO 1800-63)
Antenna Connector	Single 50 Ω connection (board-edge)
RF Power Output	Separate read and write levels, command-adjustable from 0 dBm to +27 dBm in 0.01 dB steps
Regulatory	Pre-configured for the following regions: FCC (NA, SA) 917.4 a 927.2 MHz ETSI (EU) 865.6 a 867.6 MHz TRAI (India) 865 a 867 MHz KCC (Korea) 917 a 923.5 MHz ACMA (Australia) 920 a 926 MHz SRRC-MII (P.R. China) 920.1 a 924.9 MHz MIC (Japan) 916.8 a 922.2 MHz Open (859 a 873, 915 a 930 MHz)
Baude rate	9600 bps; 115200 bps
Backscatter Link Frequency	250 (kHz)
Encoding	Miller (M=8, 4,2)
Modulation Scheme	PR-ASK
Control/Data Interfaces	UART; 3.3V logic levels 9.6 to 921.6 kbps
GPIO Sensors and Indicators	Four 3.3V bidirectional ports configurable as input (sensor) ports or output (indicator) ports
API support	C#/.NET, Java, C
DC Power Required	DC Voltage: 3.3 to 5.5 V for +25 dBm out; 3.7 to 5.5 V for +27 dBm out DC power consumption @ RF level: 3.2 W @ 5 VDC for +27 dBm out*, 2.9 W @ 5 VDC for +25 dBm out, 1.5 W @ 5 VDC for 0 dBm out
Idle Power Saving Options	Ready: 0.84 W Sleep: 0.015 W Shutdown: 0.00025 W
Operating Temperature	-40°C to +60°C (case temperature)
Max Read Rate	Up to 200 tags/second
Max Tag Read Distance	Over 4.5 meters (15 feet) with 6 dBi antenna (33 dBm EIRP)

El Chip M6E-NANO tiene la capacidad de entregar información adicional al código EPC. Indicando cuando, donde y como es leída la etiqueta. En la TABLA 2 se relaciona cada uno de los datos adjuntos a la lectura de la etiqueta.

TABLA 2. DATOS ADICIONALES ENTREGADOS EN EL PROCESO DE LECTURA POR EL LECTOR M6E-NANO [38]

Dato	Descripción
Antenna ID	Antena en la cual el tag es leído. Para el chip M6e-Nano solo se tiene un solo puerto.
Read Count	Número de veces que el tag es leído
Timestamp	Tiempo registrado durante la lectura del tag en milisegundos
Tag Data	Código EPC. Máximo de 68 bytes.
Frecuency	Canal de frecuencia utilizado para leer el tag. Expresado en Hz. El lector fue programado según las regulaciones de la FCC (Federal Communications Commission) con un rango de frecuencias de 917400 Hz a 927200 Hz. Para un total de 50 canales con cuantización de 200000 Hz. La selección del canal de frecuencia es elegida por el lector de forma pseudoaleatorio.
Tag Phase	No soportado en el chip M6e-Nano. Sin embargo, es posible obtenerlo. Se entrega en grados y con pasos de 3°. Posee un rango de lectura de 0 a 180°.
RSSI	Receive Signal Strength Indicator. Expresado en dBm.

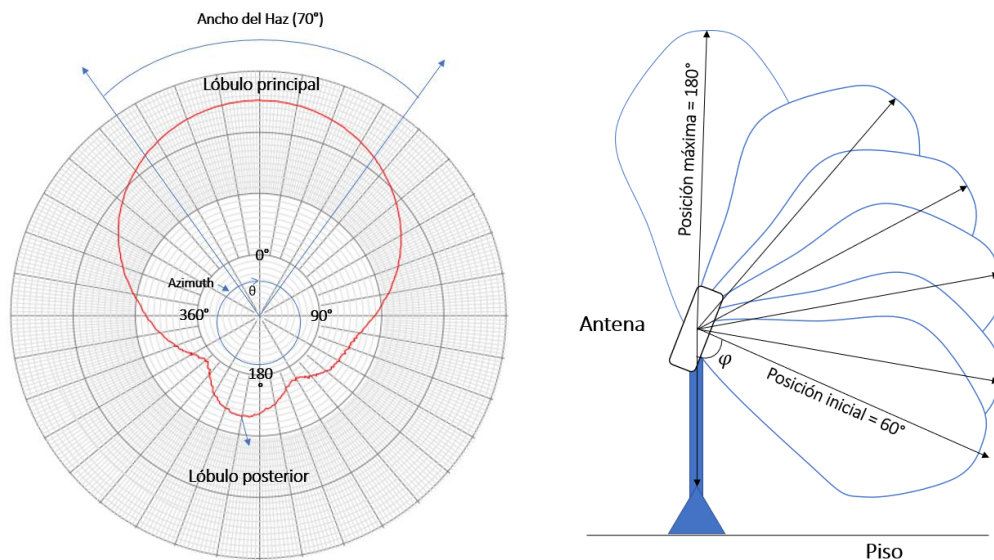
3.2.2 Antena

Las antenas son dispositivos diseñados para transmitir y recibir señales de radio provenientes del espacio libre. Las antenas pueden clasificarse según su polarización (Orientación del campo eléctrico) en: Polarización lineal (Vertical, horizontal), elíptica o circular [39].

Las antenas con polarización circular han mostrado ventajas sobre las de polarización lineal, ya que permite reducir las interferencias generadas por los efectos de desvanecimiento y multitrayecto, reduce las pérdidas por efectos de la rotación de Faraday presentada en la ionosfera y su eficiencia no es afectada abruptamente por la orientación del receptor [40].

Son utilizadas ampliamente en sistemas de comunicación satelital, telemetría espacial, RFID UHF, redes inalámbricas de área local, entre otras [40].

El patrón de radiación de una antena muestra la distribución de potencia en el espacio, el cual puede ser graficado en función de la potencia irradiada vs ángulo de azimut (θ) ó de elevación (φ).



a) Plano en azimut (θ) (S9028PCRJ) b) Plano de elevación (φ), orientativo.

Fig. 3. Patrón de radiación de una antena direccional, adaptado de [41]

Una antena puede ser direccional, isotrónica (Antena ideal) u omnidireccional. La antena utilizada en la investigación es direccional ver Fig. 4. El patrón de radiación en el plano de azimuth es mostrado en la Fig. 3.a. El patrón de elevación mostrado en la Fig. 3.b es de carácter ilustrativo, pues las especificaciones de la antena no lo precisan [41].



Fig. 4. Antena RFID UHF utilizada en la investigación

Las especificaciones técnicas de la antena de la Fig. 4 se resumen en la siguiente tabla.

TABLA 3. ESPECIFICACIONES TECNICAS DE ANTENA UHF RFID [41]

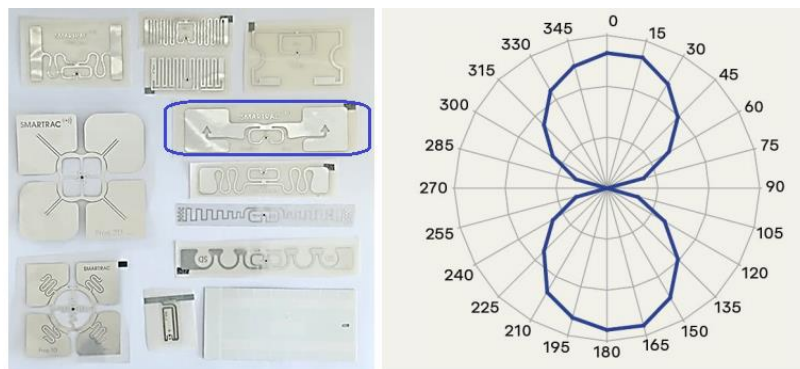
Antenna Part Number	S9028PCRJ
Frequency Range	902 - 928 MHz
Gain	8,5 dBic
3 dB Beamwidth - Azimuth	70°
Polarization	Circular Right or Left
Maximun input power	10 Watts
Input impedance	50 OMS
Weight	1,04 Kg
Mechanical size	10,2"x10,2"x1,32"
Antenna Connection	96" coaxial Pigtail, Rev TNC Male
Temperature Operational	-25°C to 70°C
Enviromental Rating	IP 54

3.2.3 Tag RFID

Las etiquetas RFID se utilizan para la identificación de objetos, su diseño y costo depende de la aplicación [42]. Se clasifican según su alimentación como: Pasiva, semipasiva y activa.

Las etiquetas pasivas no requieren del uso de baterías para su operación. Las señales de RF emitidas por el lector inducen en la etiqueta energía que activa el CI (Circuito Integrado).

Con la intención de mejorar la sensibilidad del tag, fabricantes han desarrollado antenas de diferentes formas y tamaños ver Fig. 5.



a. Tags pasivos

b. Patrón de radiación del tag DogBone [43]

Fig. 5. Tags RFID UHF pasivos [43]

La etiqueta utilizada en el desarrollo de los experimentos es la encerrada en el rectángulo de color azul, ver Fig. 5.a . La Fig. 5.b muestra el patrón de radiación de la etiqueta utilizada (Smartrac DogBone). Las especificaciones técnicas de la etiqueta se muestran a continuación.

TABLA 4. TAG SMARTRAC DOGBONE [43]

Chip	Impinj Monza 4D
EPC and User Memory	128-bit and 32-bit
TID Memory	96-bit / 48-bit unique serial number
Die-Cut Dimension	97 x 27 mm / 3.819 x 1.06 in 9
Operating Temperature	-40 °C to 85 °C / -40 °F to 185 °F
Frequency Band	UHF 860 - 960 MHz
International Standard	ISO 18000-6C, EPC Class 1 Gen 2

Para activar un tag pasivo se requiere de un circuito rectificador que convierta la señal RF generada por el lector en voltaje DC. Paralelo al rectificador se cuenta con un filtro que tiene funciones de detección de envolvente. Según sea el requerimiento del lector, la etiqueta responde a través del modulador, ver Fig. 6.

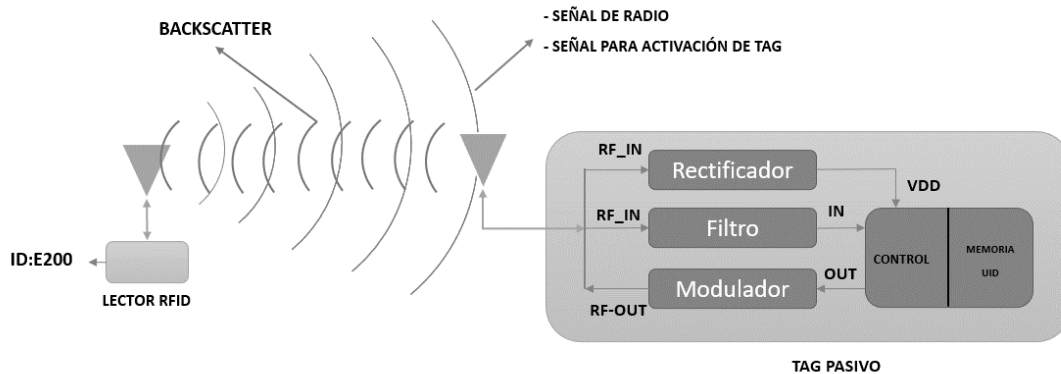


Fig. 6. Etapas y respuesta de un tag pasivo, adaptado de [44]

Las etiquetas semipasivas cuentan con una fuente de batería interna. Sin embargo, igual que las etiquetas pasivas responden a las solicitudes del lector con una señal de retrodispersión (Uplink – Enlace de subida). Las etiquetas activas requieren para su funcionamiento el uso de una fuente de energía (Batería) [44], ver Fig. 8.

El tag semipasivo no cuenta con el circuito rectificador, ya que el CI es alimentado con la batería interna, ver Fig. 7.

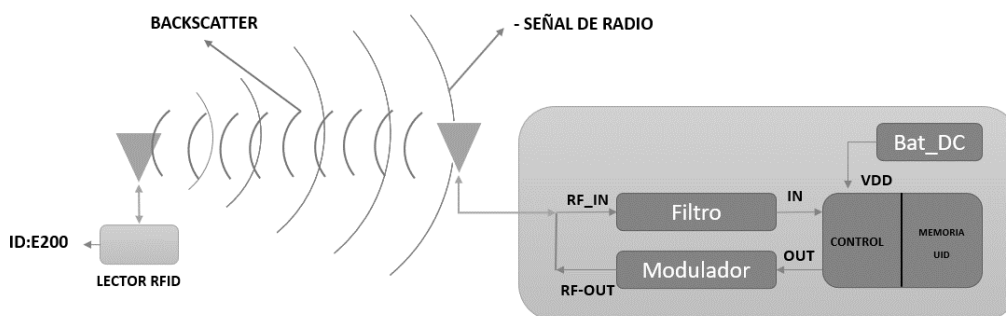


Fig. 7. Etapas y respuesta de un tag semipasivo, adaptado de [44]

Las etiquetas activas pueden mantener una comunicación bidireccional con el lector debido a que cuentan con un transmisor convencional, ver Fig. 8

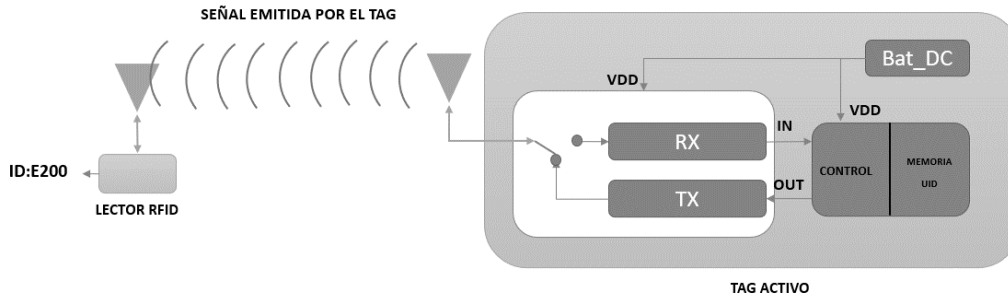


Fig. 8. Etapas y respuesta de un tag activo, adaptado de [44]

3.2.4 Host

La función principal del Host es servir como interprete entre el lector RFID y el usuario. Con el apoyo de aplicaciones móviles, de escritorio y web, el usuario envía ordenes de lectura o escritura al Host. Este a su vez se comunica con el lector según los criterios de comunicación definidos por el fabricante (Puerto de comunicación) y estándares de cumplimiento a nivel mundial. La información entregada al usuario corresponde a un ID de uno o varios tags, esta información es utilizada por el usuario para la creación de inventarios, identificación de productos, trazabilidad entre otras [45].

Para el control del lector RFID se hace uso de la plataforma de desarrollo Arduino Mega, ver Fig. 9.

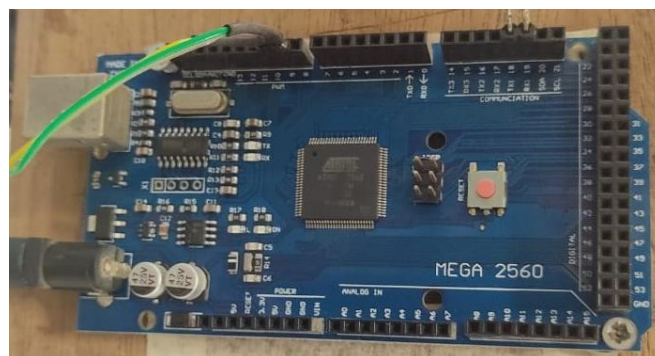


Fig. 9. Arduino Mega 2560

Las especificaciones técnicas se muestran a continuación.

TABLA 5. ESPECIFICACIONES TECNICAS DE ARDUINO MEGA [46]

Referencia	Arduino Mega
Microcontrolador	ATmega2560
Puertos de entrada y salida	54 entradas/salidas digitales - 15 pueden ser usadas como salidas PWM - 16 entradas analógicas - 4 UARTs
Cristal	16 Mhz
Puerto de comunicación	USB

3.3 Clasificación de los sistemas RFID

Los sistemas RFID pueden ser utilizados en múltiples aplicaciones, partiendo de la lectura de tarjetas para control de acceso (Pocos centímetros), hasta la identificación de etiquetas en el rango de tres a treinta metros. Según su frecuencia de operación, podemos clasificar los sistemas RFID en: Baja Frecuencia – Low Frequency (LF), Alta Frecuencia – High Frequency (HF), Ultra Alta Frecuencia – Ultra High Frequency (UHF) y microondas – microwaves (uW).

En la TABLA 6 se resumen las características de los sistemas RFID que existen, indicando sus ventajas y desventajas frente a diferentes aplicaciones [10], [36], [44], [47].

TABLA 6. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS RFID SEGÚN SU FRECUENCIA DE OPERACIÓN Y ALIMENTACIÓN DE LA ETIQUETA.

Frecuencia de operación	Baja Frecuencia Low Frecuencia (LF) 100 kHz a 500 kHz	Alta Frecuencia High Frecuencia (HF) 10 MHz a 15 MHz	Ultra Alta Frecuencia Ultra High Frecuencia (UHF) 400 MHz a 950 MHz	Microondas Microwaves (uW) 2,4 GHz a 6,8 GHz
Frecuencia utilizada en sistemas RFID	125 kHz; 135 kHz	13,56 MHz	FCC (917,4 MHz a 927.2 MHz) EUROPA (865,6 MHz a 867.6 MHz) INDIA (865 MHz a 867 MHz) KOREA (917 MHz a 923,5 MHz) JAPON (916,8 MHz a 923,4 MHz) AUSTRALIA (920 MHz a 926 MHz) CHINA (920,1 MHz a 924,9 MHz)	2,4 GHz
Estándar RFID	ISO 14223; ISO 11785; ISO 11784; ISO 18000 - 2	ISO 18092; EPC HF1; ISO 15693; ISO 14443; ISO 18000-3	EPC UHF 1; EPC UHF 0; ISO 18000-6 (EPC Global Gen2)	ISO 18000-4
Costo	Alto	Bajo	Bajo	Alto
Superficies que afectan su rendimiento	Poco susceptible	Agua y superficies metálicas	Agua y superficies metálicas	Agua y superficies metálicas
Tipo de etiqueta	Pasiva	Pasiva	Pasiva / Activa	Pasiva / Activa
Distancia de detección	0,6 metros	0,6 metros	4 a 30 metros (Dependiendo del tipo de etiqueta)	10 metros
Aplicaciones	-Identificación de animales -Administración de artículos -Control de acceso - Identificación de vehículos.	-Chip Card (Control de acceso) - Administración de artículos	- Administración de artículos - Supply Chain - Portales para control de artículos - Control de acceso - Control de inventarios - Seguridad - Aplicaciones de la ISM	- Administración de artículos - Seguridad - Control de acceso - Localización en tiempo real
Tasa de lectura	Baja	Buena	Alta	Muy alta

La presente investigación se limita a la implementación de los sistemas RFID UHF para la búsqueda de etiquetas pasivas.

3.4 Sistemas de campo cercano y lejano

Para que una etiqueta pueda responder a las solicitudes del lector, es necesario que exista un acoplamiento entre la antena del lector y el tag, según sea el tipo de acoplamiento, podemos categorizar los sistemas RFID como propagación de campo cercano y lejano [48].

El acoplamiento de campo cercano se presenta en sistemas RFID que operen en la banda de LF y HF. Para su correcto funcionamiento, es indispensable que la distancia entre la antena del lector y etiqueta sean cortas, alrededor de los cinco centímetros [49].

Por otro lado, el acoplamiento de campo lejano se presenta en los sistemas RFID UHF y microondas, característico de sistemas que funcionan a largas distancias, bajo estas condiciones el campo magnético y eléctrico se separan

de la antena, propagándose por el espacio libre ortogonalmente [49], ver Fig. 10.

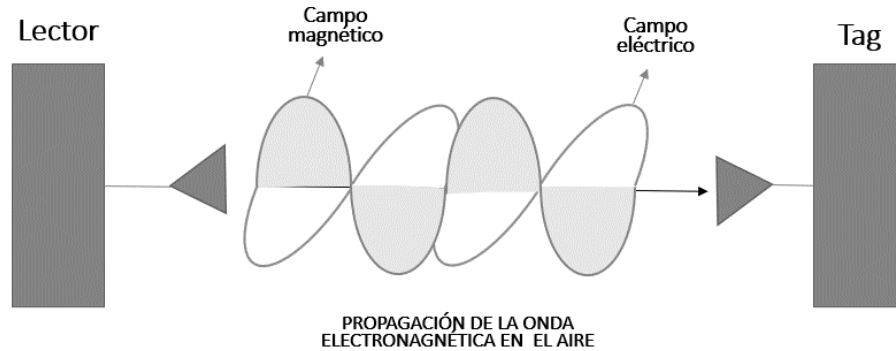


Fig. 10. Acoplamiento en campo lejano, adaptado de [49]

El rango de lectura de una etiqueta RFID UHF puede ser expresado a través de la ecuación de transmisión de FRIIS [50]. Sin embargo, la presencia de obstáculos en ambientes interiores ocasiona que las señales emitidas por la antena del lector y la etiqueta se reflejen, generando señales multi-trayecto con diferencia en su amplitud, fase e incluso con distorsión y ruido, ver Fig. 12.

En [51], las pérdidas por trayectos múltiples, es definido como:

$$L_P(dB) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left| 1 + \sum_{n=1}^N \Gamma_n \frac{d}{d_n} e^{-jk(d_n-d)} \right|^2, \text{ con } k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1)$$

Donde:

λ = Longitud de onda de la señal transmitida

d = La distancia entre el Lector y el Tag con línea de vista (LOS)

d_n = Es la distancia de la señales multitrayecto

N = Es el numero de señales reflejadas

Γ_n = Es el coeficiente de reflexión compleja

Γ_n es definido en [51], como la relación existente entre el ángulo de incidencia θ_i , reflexión θ_r y transmisión θ_t .

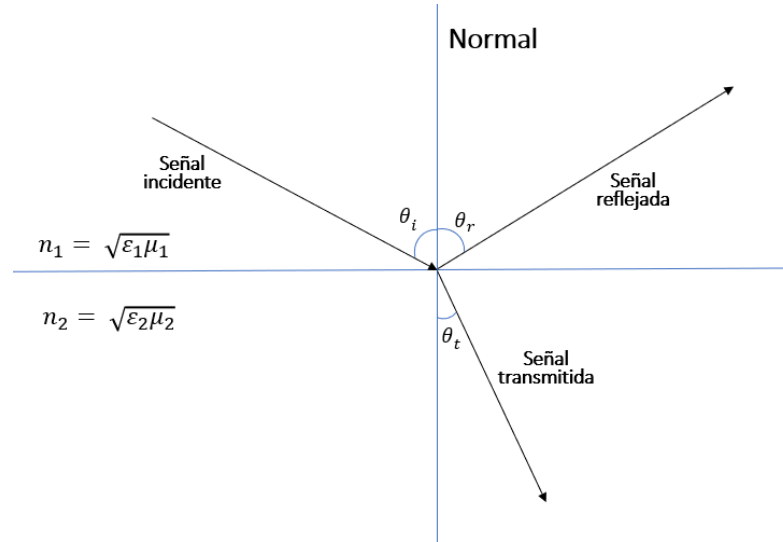


Fig. 11 Angulo de incidencia, reflexión y transmisión, ajustado de [51]

De la Fig. 11, n_1 y n_2 son el índice de refracción del medio de propagación. ϵ_n y μ_n corresponde al grado de permeabilidad y permitividad. Además, es posible concluir que:

$$\theta_i = \theta_r \quad (2)$$

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (3)$$

El coeficiente de reflexión para antenas con polarización vertical (Γ_{TE}) es:

$$\Gamma_{TE} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad (4)$$

Para antenas con polarización horizontal (Γ_{TM}) es:

$$\Gamma_{TM} = \frac{n_2 \cos \theta_t - n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_t + n_1 \cos \theta_i} \quad (5)$$

Para antenas con polarización circular (Γ_{circ}), tenemos:

$$\Gamma_{Circ} = \frac{\Gamma_{TE} + \Gamma_{TM}}{2} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 1, es posible definir la potencia recibida en el tag como:

$$PRx_{Tag}(dBm) = P_{Lector}(dBm) + G_{Lector}(dB) + G_{Tag}(dB) + L_P(dB) \quad (7)$$

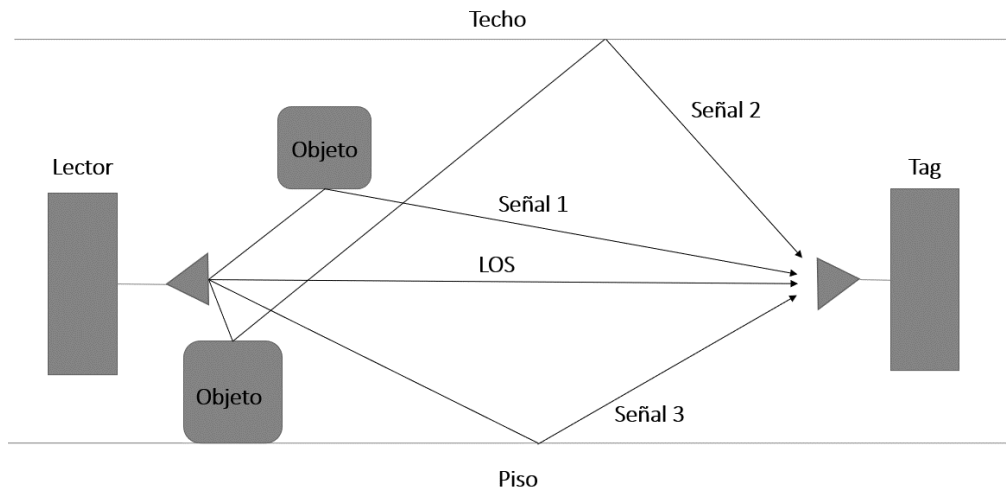


Fig. 12. Señales multitrayecto

3.5 Especificaciones de los sistemas RFID UHF

Los sistemas RFID UHF se desarrollan bajo el estándar EPC Radio Frequency Identification Gen 2 . El cual entrega una serie de especificaciones que permiten la comunicación inalámbrica entre el lector y etiquetas que funcionan en la banda de 860 MHz a 960 MHz. Desarrollado bajo las normas GS1 EPC Global, ISO/IEC 15961, ISO/IEC 15962, ISO/IEC 15963, ISO/IEC 18000-1, ISO/IEC 18000-63, ISO/IEC 19762 e ISO/IEC 29167-1 [52].

Para una comunicación transparente entre el lector y la etiqueta de un sistema RFID UHF se requiere que los comandos utilizados, los métodos de modulación y demodulación, las técnicas de codificación, decodificación, y control de errores se encuentren definidos bajo criterios del protocolo. La comunicación inicia bajo el concepto de que el lector habla primero (Interrogators Talk's First). El protocolo se desarrolla en dos capas, que son: Capa física y de identificación del tag [53].

3.5.1 Capa física

Para una comunicación entre el lector y el tag se utilizan tres tipos de modulación: a) Double sideband amplitude shift keying (DSB-ASK), single sideband amplitude shift keying (SSB-ASK) y phase-reversal amplitude shift keying (PR-ASK).

El formato de codificación utilizado es codificación por intervalos de pulso – Pulse Interval Encoding (PIE).

Con la activación del tag, este responde con una señal de retrodispersión (Backscattering). El tag utiliza como formato de codificación FM0 ó Miller modulated subcarrier. El tipo de modulación utilizado es DSB-ASK ó PSK [52].

3.5.2 Capa de identificación

El lector puede realizar tres tipos de acciones para identificar un conjunto de etiquetas, las cuales son:

Seleccionar: Con esta acción el lector permite comunicarse con un grupo particular de etiquetas.

Inventario: Permite acceder al EPC de todas las etiquetas que logren comunicarse con el lector.

Acceso: Permite leer o escribir sobre una etiqueta en particular [54].

3.5.3 Mecanismo anticolisión de sistemas RFID UHF

El método utilizado por el estándar EPC Gen2 C es conocido como algoritmo Q, considerado como una derivación del DFSA (Dynamic Frame Slotted Aloha).

La comunicación entre el Lector y las etiquetas se resume de la siguiente forma:

- El lector inicia el proceso de lectura con el comando Query, este tiene incluido una trama de 4 bits (Valor Q).
- Con el valor de Q, las etiquetas generan un numero aleatorio en un intervalo de 0 a $2^Q - 1$ (Turno de respuesta de la etiqueta).

- En el Slot 0 de la Fig. 13 no se encuentran etiquetas con turno = 0, por ello el Lector genera una nueva solicitud con el comando QueryRep.
- En el Slot 1, después de la solicitud del lector la etiqueta con turno = 1 responde. Con el reconocimiento del turno, el lector responde con el comando ACK, solicitando a la etiqueta su código EPC.
- La etiqueta responde con su EPC, si el lector no reconoce el EPC envía un comando NAK, solicitando nuevamente el código EPC. Si el EPC es reconocido por el lector, este responde con el comando QueryRep y la etiqueta se coloca en estado Ready, esperando el próximo ciclo de lectura. Cabe resaltar que cada ciclo está conformado por un total de $2^Q - 1$ slots.
- En la Fig. 14, puede presentarse que dos o más etiquetas hallan generado el mismo turno. Este escenario es reconocido por el lector, generando un nuevo comando Query. Los contadores de las etiquetas en colisión se reinician, evitando así su participación durante el ciclo de lectura [52], [55] .

LECTOR	Slot 0		Slot 1				
	Query	QueryRep	ACK	NAK	QueryRep		
TAG 1		TURNO = 2					
TAG 2		TURNO = 1		EPC		EPC	Tag OK
TAG 3		TURNO = 2					

Fig. 13. Proceso de lectura exitosa en una etiqueta

Slot 2		Slot 0	
QueryRep	Query		
Colisión (TURNO = 2)		TURNO = 8	
		TURNO = 48	
Colisión (TURNO = 2)		TURNO = 17	

Fig. 14. Lectura de etiquetas en colisión

3.6 Estado del arte

Durante el último siglo, los sistemas RFID han tomado un papel importante en los procesos logísticos de la cadena de suministros, particularmente en la gestión de almacenes y bodegaje. Mantener un control en la disponibilidad, ubicación y rotación de la mercancía ha despertado el interés de las empresas y sector educativo en implementar técnicas y métodos que permitan localizar productos perdidos en bodegas y almacenes. A continuación, se describen investigaciones que proponen técnicas y métodos para la localización de etiquetas con RFID UHF. Se aportan pautas para verificar y mejorar futuras investigaciones.

Este apartado inicia con la propuesta de Travis Deyle et al. [23]. Su implementación se basa en un sistema autónomo (Robot PR2) que utiliza la tecnología RFID UHF para buscar objetos perdidos. El método propuesto consta de tres etapas, búsqueda global, selección del mejor ángulo, acercamiento y optimización del robot frente al tag objetivo. En la primera etapa el robot toma muestras en el área de búsqueda, almacenando los niveles RSSI de cada etiqueta y ubicándose en la posición donde obtuvo mejores niveles de RSSI. En la segunda etapa se estima la dirección del tag con el RSSI máximo. Por último, con la técnica del gradiente y el uso de dos antenas se optimiza la dirección de movimiento del robot. Los resultados muestran un error promedio de 36 cm y un error en la dirección de la etiqueta de 23,2°. Las desviaciones para cada variable fueron de 33 cm y 19° respectivamente. Esta implementación es costosa y se limita superficies totalmente planas.

Sheng Huang et al. [56] utilizaron los sistemas UHF RFID y un modelo de clustering para localizar objetos en zonas de un estante metálico. Las variables de radiofrecuencia utilizadas fueron el RSSI (Received Signal Strength Indicator) y RSP (Received Signal Phase). Estas fueron utilizadas como entrada a un modelo de clustering (Support vector machine) con el fin de clasificar la posición de los tags en una de las 4 zonas definidas en el estante.

La implementación de una máquina de soporte de vectores requiere para su implementación un host con alta capacidad de procesamiento.

Ahmad Fali Oklilas et al. [57] utilizaron el método LANDMARK y el algoritmo adaptativo K-NN para estimar la distancia entre la antena y el tag de un sistema RFID. En el desarrollo experimental se ubicaron varios tags de referencia en línea recta y a diferentes distancias de la antena del lector. Posteriormente se ubicaron 4 tags en diferentes posiciones y bajo dos escenarios (Con y sin obstáculos). La variable de RF utilizada fue el RSSI promedio de las etiquetas de referencia y objetivo. La métrica utilizada fue el error porcentual de la distancia real vs la estimada. Los resultados mostraron para el escenario uno 2,47% y en el escenario dos de 7,43%. La implementación de etiquetas de referencia incrementa la complejidad del sistema, además la precisión del sistema depende de la cantidad de etiquetas instaladas. Por otro lado, este tipo de implementaciones requiere de un mantenimiento periódico.

Markus Cremer et al. [58] utilizaron las técnicas de AoAct (Angle of activation) y triangulación para localizar etiquetas RFID en el plano azimutal. El método implementado consta de tres fases: Aumento de la potencia de radiación, identificación del ángulo de activación y localización de la etiqueta por triangulación (Intercepto entre la línea de visión de dos antenas). Este método fue implementado en tres ambientes diferentes (Cámara anecoica, balcón de la universidad y sala de máquinas). Los resultados obtenidos, muestran un error en el ángulo de activación para cada experimento de 1.2°, 1.9° y 2.5° respectivamente. En un ambiente industrial, se logró una precisión promedio de 14 cm con desviación estándar de 7 cm. Con la implementación de este sistema, se requiere de por lo menos dos estructuras diseñadas para soportar las antenas, incrementando complejidad y manejo frente a los usuarios que lo utilizan.

Yuki Sato et al. [59] implementaron un sistema de localización interior con sistemas RFID UHF y un teléfono móvil. El método de localización se compone de dos algoritmos. El primer algoritmo determina la ubicación del móvil y

dirección de la antena con técnicas de realidad aumentada (ARCore). El segundo algoritmo permite localizar la ubicación de etiquetas RFID con solo identificar su ID. Los resultados muestran que las etiquetas son localizadas en un 84 %. Para su implementación requiere de un Host y servidor con capacidad de procesamiento alta. Además, se limita a un ambiente diseñado con imágenes y datos de lectura de etiquetas sobre ubicaciones particulares.

Yuan Zhang et al. [60] propusieron un método de localización denominado 3DLoc. Este método implica el uso de la técnica del ángulo de llegada (AoA) y etiquetado de cubos con RFID en tres de sus seis caras. Con el desarrollo de modelos matemáticos se estimó el centroide del cubo (punto centro del cubo), ubicación en el eje x,y,z de la antena y distancia ente el centro del cubo y la antena RFID. Los resultados mostraron un error promedio en la distancia entre la antena y el centroide de 8 cm. Esta implementación requiere de mucho trabajo e implementación, ya que se necesita del análisis de por lo menos tres etiquetas por objeto. Además, identificar todas las etiquetas en ambientes con alta densidad de mercancía puede ser un problema.

Jun Wang et al. [61] utilizaron los métodos de AoA y PoA (Phase of Arrival) para estimar la ubicación en el plano XY de una etiqueta RFID UHF. Con el sistema propuesto se logró determinar la ubicación de la etiqueta con un error medio de 23 cm y dirección de la etiqueta en el plano de azimuth de 11°. Se considera una implementación sencilla, sin embargo, se limita al plano XY.

S. D ´Avella et al. [62] implementaron bajo la plataforma de simulación en 3D (GAZEBO) y el sistema operativo para robots (ROS) un ambiente para simular la búsqueda de etiquetas RFID UHF. Como técnica de localización se utilizó un algoritmo de intersección de hipérbolas de las mediciones de fase de la señal recibida (Trilateración). Los resultados obtenidos, muestran un error máximo en la localización de 4 cm. La simulación del ambiente indoor puede sumar errores en la ubicación de la etiqueta por aspectos relacionados con los efectos multitrayecto. Ya que estos no son tenidos en cuenta. Por otro lado, la técnica implementada reporta resultados solo en el plano XY.

Thi-Hao Dao et al. [63] proponen un sistema de localización de etiquetas RFID UHF con técnicas de triangulación (Tres antenas), como variable de interés se hace uso del RSSI. Los resultados obtenidos indican un error en la localización de 24 cm. Su implementación puede ser compleja, ya que requiere de tres estructuras para las antenas.

Lanxin Qiu et al. [64] proponen un sistema de localización de etiquetas en 3D con la técnica InSAR (Interferometría radar de apertura sintética) que permite a través de la fase de la señal de retrodispersión y el desplazamiento de una antena en dos direcciones determinar la ubicación de la etiqueta en el espacio 3D. Los resultados indican errores en la localización de 14 a 53 cm. Su implementación requiere del uso de un Host con alta capacidad de procesamiento.

Zheng Liu et al. [65] toman el valor de fase de etiquetas de referencia e implementan el método INSAR – SAR para estimar la trayectoria del dispositivo robótico y determinar con el método SAR la ubicación de etiquetas desconocidas. El error en la localización de la etiqueta es de 15 cm para trayectorias en línea recta. Su implementación requiere de un Host con alta capacidad de procesamiento y de una superficie totalmente plana.

Emidio DiGiampaolo et al. [66] utilizan un sistema RFID UHF integrado sobre un robot que se desplaza paralelamente a un estante metálico. El robot toma muestras de fase cada tres segundos de todas las etiquetas contenidas en el estante. Los resultados de fase obtenidos de la etiqueta objetivo se comparan con los resultados de fase de las etiquetas de referencia. El error de localización estimado es de 12 y 18 cm para x y z respectivamente. Para su implementación requiere de una superficie totalmente plana.

Chenglong Li et al. [67] desarrollaron e implementaron el método ReLoc 2.0 bajo el funcionamiento de un sistema RFID montado sobre un dron, el cual hace uso del RSSI, fase de la señal y número de lecturas para determinar el orden lateral y nivel en el que se encuentran las etiquetas detectadas en

estantes. El sistema alcanzo un rendimiento del 96.7% para ordenar correctamente las etiquetas de forma lateral con un error en la localización de 50 cm. Además de obtener un rendimiento en la distinción del nivel en el que se encuentran las etiquetas del 95.8%. Su implementación es costosa y aplica a bodegas con alturas considerables. Su diseño se limita a la capacidad de carga del drone.

Lingfei Mo et al. [68] proponen un método que permite determinar la ubicación de una etiqueta a través de tags de referencia. El nivel RSSI y fase de la señal son variables utilizadas para minimizar errores generados por condiciones multi-trayecto y utilizadas como medidas de similitud para estimar la posición de una etiqueta desconocida. El error en la localización para un 90% de los resultados obtenidos es de 10 cm en promedio. Su implementación puede ser compleja por la cantidad de etiquetas de referencia. Requiere del mantenimiento de la infraestructura instalada.

Tianci Liu et al. [69] proponen un sistema de localización de etiquetas a través de la medición de fase de la señal de cuatro antenas. La ubicación de la etiqueta se estima con el intercepto de por lo menos dos antenas, obteniendo un error en la localización de 12.8 cm. Su implementación es compleja y costosa. Puede incrementar los tiempos de búsqueda.

Marija Agatonovic et al. [70] han implementado un modelo de regresión con una red neuronal artificial. Las entradas de la red son el RSSI y fase de dos etiquetas conjuntas. Los resultados indican un error en la ubicación de 7.31 cm. Con la implementación de una ANN, se requiere de un Host con alta capacidad de procesamiento. El modelo obtenido corresponde a un sitio en particular y no es general.

Changzhi Wang et al. [71] combinan para la localización de etiquetas una red neuronal artificial y la técnica de optimización por enjambre de partículas. Con la implementación de etiquetas de referencia y antenas fijas se obtienen

errores en la localización de 64.8 cm. Esta implementación requiere de un Host con alta capacidad de procesamiento.

Wendy Navarro et al. [72] proponen un método para la mitigación de interferencias de etiquetas RFID sobre superficies metálicas con la caracterización de variables de RF como el RSSI, PoA y frecuencia Doppler. Con los resultados obtenidos se logró mitigar interferencias con valores superiores a un 90%. Por otro lado, Y. D. J. Ternera et al. [73] proponen un método que permite identificar a través de la fase de la señal y tasa de lectura etiquetas interferentes y objetivos en objetos metálicos. Los experimentos se desarrollaron en dos escenarios, cancha de microfútbol y corredor abierto. La precisión del algoritmo fue de 99.45% y 96.43% respectivamente. Sin embargo, estas dos ultima investigaciones se limitan a la mitigación de interferencias e identificación de etiquetas interferentes. No se proponen métodos de búsqueda de etiquetas RFID.

TABLA 7. RESUMEN DEL ESTADO DEL ARTE (COMPARACIÓN)

Referencia	Condiciones experimentales	Método	Objeto	Métrica	Error	Implementación
[23]	- Lector M5e UHF RFID - 2 antenas Laird Technologies S9025P - Robot PR2 - Ruta prediseñada en zigzag - Área de búsqueda 9 x 5 metros - Resolución de búsqueda 1.5 metros	RSSI máximo	Búsqueda de etiquetas perdidas	- Error de localización - Error en la dirección	- 0,36 m - 23,2°	- Muy Costoso - Limitado a superficies totalmente planas, de complejidad alta.
[56]	- Impinj Speedway Revolution - 1 antena (No identifica referencia) - Estante de 1510 x 600 x 2020 mm - Distancia entre antena y tag de 1000 mm - Altura antena : 2200 mm	SVM	Localización de objetos en 4 áreas del estante	No reporta	No reporta	- Costo medio y complejidad media, no reporta resultados.
[57]	- Impinj Speedway Revolution R420 - 1 antena Laird Technologies S9028PCL	K-NN	Estimación de distancia con y sin obstáculos	Error % máximo escenario 1 Error % máximo escenario 1	- 7,43 % de 3,35 mt - 2,47 % de 3,35 mt	- Costo medio, sencillo de implementar, se estima la distancia mas no la dirección de la etiqueta.
[58]	- Unidad de lectura con micro sistema AS991 - Matrix de tres antenas con polarización circular - Altura del la antena: 1500 mm	AOAct	Ubicar la etiqueta en la intersección de la dirección de dos antenas	Error en la dirección de la etiqueta	- El 89% de las mediciones están por debajo de 4°	- Costo medio, sencillo de implementar
[59]	- JRM2030 from Shenzhen Juray Tech - Teléfono móvil, no reporta referencia - Base de datos MySQL	Computer visión y realidad aumentada	Localizar etiquetas en una librería	Estimación correcta	84% de 80 etiquetas	- Costo medio, complejo de implementar, ya que se requiere modelar el entorno con una base de datos de imágenes y una base de datos de identificación de las etiquetas.
[60]	- Impinj Speedway R420 - 1 antena Laird S9028 - Controlador de movimiento en 3D para la antena - La antena y tag se colocaron a una altura de 80 cm del piso	3DLoc : AoA	Determinar la ubicación de etiquetas en 3D	Error promedio	8 cm	- Costo medio, limitado a superficies totalmente planas
[61]	- Se utilizó el lector QM100 FPC MB - Una antena plateada de polarización lineal y ganancia de 12 dB - Experimentos realizados en un cuarto de 5x10 metros	AoA (Máximo RSS), PoA	Estimar distancia y dirección de una etiqueta en el plano de azimut	Error promedio en la distancia y dirección.	23 cm y hasta 11°	- la estimación de la distancia de la etiqueta es en 2 D.
[62]	- Se plantea un entorno de simulación con la plataforma GAZEBO y ROS Noetic - Ambiente prediseñado - Se utilizó robot Pioneer P3-AT	Algoritmo de intersección de hipérbolas: RSSI, PoA	Estimar la ubicación del robot con SLAM y determinar la ubicación de la etiqueta	Error promedio	4 cm	- la estimación de la distancia de la etiqueta es en 2 D. - Los resultados son simulados, sería importante validar experimentalmente con el ambiente planteado.
[63]	- Lector ThingMagic 6e - Tres antenas 242025/TRH/A con 7,7 dBi - Las antenas se colocaron en los vértices de un triángulo equilátero con lado de 2 mt - Las antenas se colocaron a una altura de 1,14 mt	Triangulación con RSSI	Determinar la ubicación de la etiqueta con la intersección de las tres antenas	Error promedio	24 cm	- La detección de la etiqueta se limita a una distancia de 2 metros. - Bajo costo - Requiere de tres antenas, por lo que requiere de mayor recurso.
[64]	- Impinj R420 - Una antena marca Alien con ganancia de 5,5 dBi - Ambiente interior de 3x3x2 mt - Algoritmo implementado en Python - Corrido sobre un PC Lenovo Core i5, CPU de 2,6 GHz.	3DinSAR: PoA	Determinar la ubicación de la etiqueta con el holograma generado	Error promedio	14 a 53 cm	- La detección de la etiqueta se limita a una distancia de 3 metros. - Bajo costo - Se requiere de un HOST con alta capacidad de procesamiento.
[65]	- Impinj Speedway - Una antena linealmente polarizada - Robot Turtlebot3 Waffle Pi - Raspberry Pi - Sensor LIDAR - Trayectoria de 3 metros lineales	ISAR-SAR	Estimar trayectoria del robot y localizar tags objetivos con tags de referencia	Error promedio	15 cm	- Costo medio, limitado a superficies totalmente planas - No muy complejo de implementar. - Requiere de un HOST con alta capacidad de procesamiento. - Experimentos realizados con alcance de hasta 2 metros
[66]	- Lector Trimble M6e - Una antena linealmente polarizada con 6 dBi - Robot móvil (No especifica referencia) - Altura de la antena respecto al suelo de 45 cm - La inclinación de la antena es de 45° - Trayectoria de 3 metros lineales	PoA	Estimar trayectoria del robot y localizar tags objetivos con tags de referencia	Error promedio en x, y	12 y 18 cm	- Costo medio, limitado a superficies totalmente planas - No muy complejo de implementar. - La distancia de separación de la antena con el rack es de 1 metro, la altura del rack es de 2 metros
[67]	- ThingMagic M6E-Micro - Dos antenas COST - Drone Matrix Yacab - Modulo Wifi - Sensor de altitud	Reloc 2.0	Estimar distancia y orden de las etiquetas	Error promedio, Precisión en el orden de las etiquetas lateralmente, Precisión en definir el nivel en el que se encuentra la etiqueta	50 cm 96,7% 95,8%	- Costo medio - No muy complejo de implementar - El peso de los accesorios es un factor a mejorar
[68]	- Impinj R420 - Cuatro antenas BROADRADIO BRA-02 - Las antenas se localizaron sobre el techo a distancias de dos metros en forma de cuadrado - El tag se localizo por debajo de las antenas 1,5 metros	Virtual reference Tags: RSSI, PoA	Estimar ubicación de la etiqueta en 2D	Error promedio	10 cm	- Costo medio, limitado sobre áreas de búsqueda de 2 x 2 mt. - Se implementa en un espacio ideal y sin obstáculos.
[69]	- Impinj R420 - Cuatro Antenas - La altura de las antenas respecto al suelo es de 138,1 cm - Las antenas se ubicaron linealmente y separadas 40 cm	BackPos: PoA, Posición hiperbólica	Estimar ubicación de la etiqueta en 2D	Error promedio	12,8 cm	- Costo medio, incrementado por el uso de varias antenas. - Se implementa en un espacio ideal y sin obstáculos.
[70]	- Lector M6e ThingMagic - Una antena con polarización circular ubicada a 1 mt de altura respecto el suelo - La pruebas se realizaron en un laboratorio con varios objetos metálicos - Las mediciones se realizaron entre 1 a 2,5 mt	ANN: RSSI, PoA	Estimación de la distancia de la etiqueta	Error promedio	7,31 cm	- Bajo costo - Se requiere de un HOST con alta capacidad de procesamiento.
[71]	- Experimentos realizados con simulación - Se instalaron 50 tags de referencia - Se ubicaron 3 tags objetivos - Se instalaron 4 antenas - Dimensiones del espacio (No se detalla)	ANN y Optimización por enjambre de partículas: RSSI	Estimación de la ubicación de la etiqueta en el plano 2D	Error promedio	64,8 cm	- Bajo costo - Se requiere de un HOST con alta capacidad de procesamiento.
[72]	- Speedway Revolution R420 - una antena externa PAL90209H de LAIRD Tecnología	Caracterización de variables de RF: RSSI, PoA, frecuencia Doppler	Mitigación de interferencias de etiquetas sobre superficies metálicas.	Rendimiento	90%	- Bajo costo - Su objeto se enfoca más a la mitigación de interferencia para la detección de etiquetas sobre superficies metálicas que a la localización de etiquetas.
[73]	- Speedway Revolution R420 - Una antena Laird Technologies - Las mediciones se realizaron en un alcance de hasta 3,5 mt	PoA, TLN	Identificación de etiquetas interferentes y objetivos	Rendimiento, escenario 1 y 2	99,45% 96,43%	- Bajo costo - Su objeto se enfoca más a la identificación de etiquetas interferentes que a la búsqueda de objetos o estimación de distancia.

4 SISTEMA DE BÚSQUEDA DE OBJETOS CON RFID UHF

En este capítulo se propone un estudio de correlación y caracterización de las variables de interés. Con los resultados obtenidos se presenta un método de búsqueda y una plataforma stand alone capaz de realizar de forma semiautomática las tareas del método propuesto.

4.1 Caracterización de variables de RF y Lectura

Para el desarrollo de los experimentos se utilizaron los siguientes equipos:

A) Lector RFID M6e-Nano.

- Configurado para establecer una comunicación serial con la plataforma de desarrollo Arduino mega de 115200 bps.
- El lector se configura en un rango de frecuencia estrecho (917.4 MHz a 927.2 MHz), para un total de 50 canales con ancho de banda de 200 KHz. Los parámetros establecidos cumplen con las regulaciones establecidas por la FCC.

B) Antena con polarización circular S9028PCRJ

C) Tag SMARTRAC dogbone

D) Computador portátil ASUS X507U Intel CORE i5 8th Gen

Los equipos descritos con anterioridad a excepción del computador se describen en el capítulo 3.

4.1.1 Correlación entre variables

En el estado del arte se han planteado métodos de búsqueda con RSSI. En esta investigación se propone el uso del RSSI y otra variable que presente correlación significativa con la dirección de la etiqueta objetivo. Para determinar el grado de correlación, se propone el uso del coeficiente de correlación de Pearson.

Las variables utilizadas se describen en el capítulo 3.2.1 y se resumen como: Tasa de lectura (TL): El lector la identifica como Read count. Se define como el número de veces que una etiqueta es identificada en un segundo [38].

- a) RSSI
- b) Canal de frecuencia (CF)
- c) Time stamp (TS): Es un marcador de tiempo asignado a cada lectura.
- d) RSP (Received Signal Phase): Es entregada por el lector como tag phase.
- e) Ángulo (ANG): Hace referencia al ángulo de azimuth utilizado en el experimento.
- f) Distancia (DIS): Corresponde a la distancia entre la antena y el tag durante el experimento.

Para el estudio de correlación se realizó el experimento de la Fig. 15. Las consideraciones que se tuvieron en cuenta son:

- Los experimentos se realizaron en un ambiente interior.
- La potencia de transmisión utilizada fue de 27 dBm.
- No se encontraban obstáculos entre la antena y etiqueta.
- La antena y etiqueta se colocaron a una altura de 1.35 metros respecto al suelo.
- La etiqueta se colocó a una distancia (DIS) de separación con la antena de 1, 2, y 3 metros.
- El tag se encontraba ubicado en la dirección de 90° .
- El ángulo de elevación entre la etiqueta y la antena es de 0°
- Para la toma de muestras. la antena se giraba en el plano de azimuth cada 10° . Desde 90° a 60° .
- El número de muestras por tratamiento fue de 39.

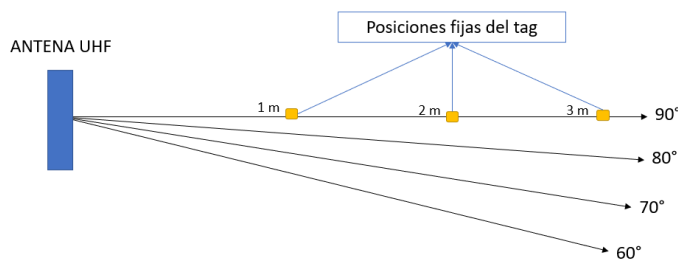


Fig. 15. Experimento 1: Estudio de correlación entre variables

En [74], clasifican el coeficiente de correlación de Pearson como: Correlación nula para $0.00 \leq |r_{XY}| < 0.10$, correlación débil para $0.10 \leq |r_{XY}| < 0.30$, correlación moderada para $0.30 \leq |r_{XY}| < 0.50$ y correlación fuerte para $0.50 \leq |r_{XY}| < 1.00$.

La siguiente figura muestra el coeficiente de correlación entre las variables descritas con anterioridad.



Fig. 16. Coeficiente de correlación de Pearson entre variables

De los resultados obtenidos, podemos concluir lo siguiente:

- Existe correlación moderada entre TL y RSSI
- Existe correlación fuerte entre la TL y ANG.
- Existe correlación moderada entre RSSI y ANG.
- Como era de esperarse existe correlación fuerte entre RSSI y DIS.
- El canal de frecuencia (CF) utilizado para leer las etiquetas, no presenta correlación con ninguna variable. Se corrobora que el canal de frecuencia es una variable independiente y totalmente aleatoria. Este resultado es consistente con el manual de programación del dispositivo, ya que el lector elige el canal de frecuencia de manera pseudoaleatorio.

- No existe correlación entre la fase y las demás variables de estudio. El lector utiliza la fase como método de decodificación. Indicando la cantidad de fase que requiere el lector para que la fase de la portadora saliente coincida con la señal de retorno. Esta se mide de 0 a 180°, con una resolución de 3°.

Con los resultados obtenidos en el análisis de correlación, se toma la decisión de utilizar el RSSI y TL como variable respuesta al método propuesto.

A continuación, se presentan experimentos que permiten describir el comportamiento de la TL y RSSI vs la dirección del tag.

4.1.2 Tasa de lectura (TL) VS RSSI

Con la caracterización de la tasa de lectura y RSSI se pueden tomar decisiones que permitan al sistema propuesto estimar la dirección de una etiqueta objetivo. Con el desarrollo del siguiente experimento se puede describir el comportamiento de la tasa de lectura y RSSI en relación con la dirección de la etiqueta.

El experimento se desarrolló teniendo en cuenta los siguientes aspectos y configuraciones:

- La potencia de transmisión es ajustada a 27, 25, 23, 21, 19 y 17 dBm.
- La antena es ubicada a una altura respecto al suelo de 1.35 metros.
- La separación entre la antena y el tag es de 1, 2 y 3 metros.
- El tag es ubicado en el ángulo de azimuth de 90°.
- La antena se giró a 130°, 125°, 120°, 115°, 110°, 105°, 100°, 95°, 90°, 85°, 80°, 75°, 70°, 65°, 60°, 55° y 50°.
- Para cada conjunto de factores y niveles se tomaron 39 muestras de la tasa de lectura y nivel RSSI.
- El experimento fue desarrollado en un ambiente interior

En la siguiente imagen se observa el planteamiento del experimento desarrollado.

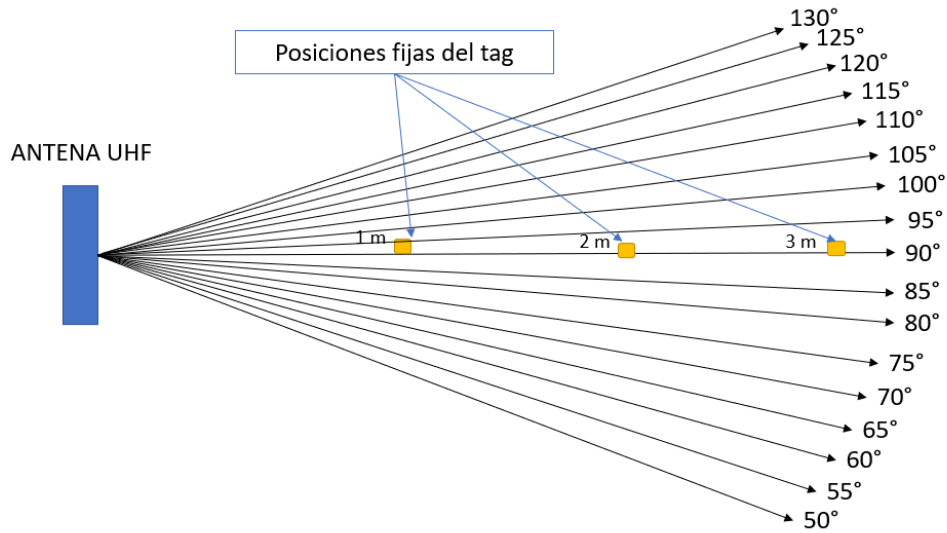


Fig. 17. Experimento 2: Respuesta de la TL y RSSI en relación con la potencia de transmisión, distancia y dirección entre antena y tag

Posterior a la toma de muestras se eliminan los datos atípicos con el rango intercuartílico (IQR) [75]. Para su implementación es necesario ordenar de forma ascendente los datos obtenidos y determinar los valores de Q_1 (Primer cuartil) y Q_3 (Tercer cuartil) teniendo en cuenta la siguiente expresión:

$$Q_1 = \text{Datos_ordenados}[\text{Posición } Q_1 [(n - 1) * 0.25) + 1]] \quad (8)$$

$$Q_3 = \text{Datos_ordenados}[\text{Posición } Q_3 [(n - 1) * 0.75) + 1]] \quad (9)$$

El valor de IQR se obtiene como:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (10)$$

Los criterios utilizados para rechazar datos atípicos, se define a continuación:

$$\text{Datos atípicos} > Q_3 + 1.5 * IQR \quad (11)$$

$$\text{Datos atípicos} < Q_1 - 1.5 * IQR \quad (12)$$

Con la eliminación de los datos atípicos, se calcula el promedio en nanovatios.

En la Fig. 18 se muestran los resultados obtenidos de la TL de un tag para cada conjunto de factores y niveles a una distancia de un metro de la antena.

Para potencias de transmisión de 27, 25, 23, 21, 19 y 17 dBm la TL es superior a 71 lecturas/ segundos en el rango de 50° a 130°.

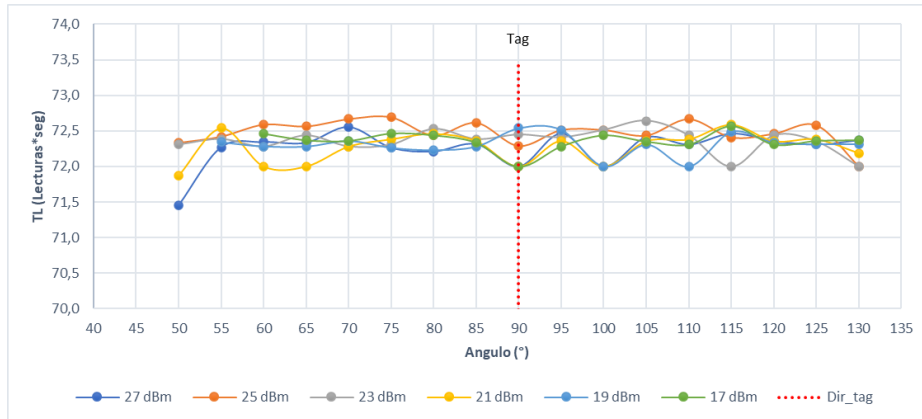


Fig. 18. TL vs Ang para una distancia entre Antena y tag de un metro

En la Fig. 19 se observa que la cobertura de detección del tag disminuye al disminuir la potencia de transmisión del lector.

Se observa que la TL mínima detectada se encuentra entre 4 y 10 lecturas * segundo.

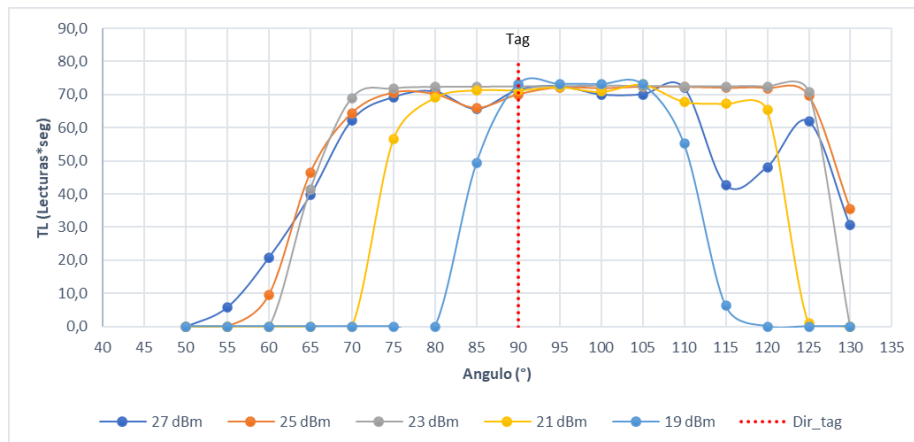


Fig. 19. TL vs Ang para una distancia entre Antena y tag de dos metros

Para una distancia de tres metros, se obtienen resultados en la TL que permiten estimar con mayor precisión la ubicación del tag objetivo, ver Fig. 20.

Bajo estas condiciones se obtuvieron máximos para un PTx de 27, 25, 23 y 21 dBm en 90°, 95°, 90° y 100° respectivamente.

Se observa que la TL mínima detectada se encuentra entre 4 y 10 lecturas * segundo.

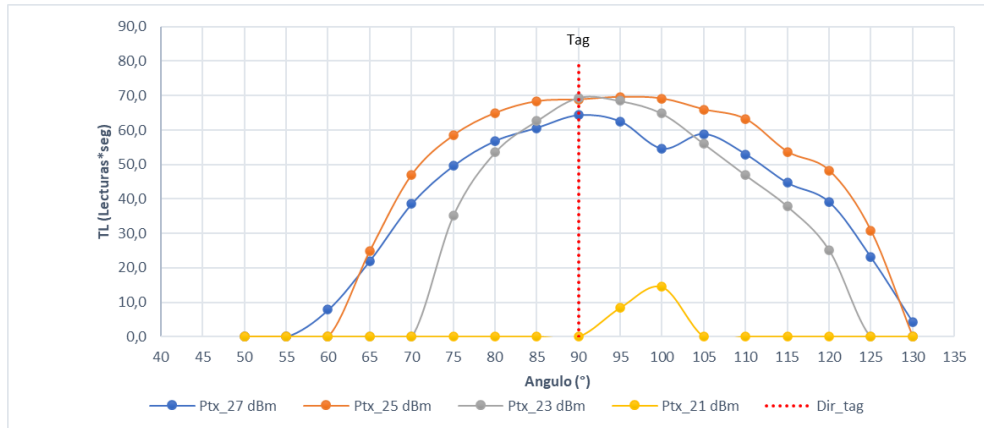


Fig. 20. TL vs Ang para una distancia entre Antena y tag de tres metros

La TABLA 8 resume el comportamiento de la TL frente a los diferentes niveles de potencia configurados en el lector y distancia entre el tag y la antena.

Para comprender los resultados de la tabla, aclaramos las siguientes denominaciones:

- En la columna de **Ang TL máximo** se indica el ángulo en el cual se logró un TL máximo.
- Los valores obtenidos en la columna **Error (°)** se calcularon con la siguiente ecuación:

$$Error (°) = Ang TL máximo - 90° \quad (13)$$

En la ecuación 13, 90° corresponde a la ubicación real de la etiqueta. Los valores con signo positivo y negativo indican una desviación de la antena frente a la ubicación del tag hacia la derecha o izquierda respectivamente.

- Los valores obtenidos en la columna **cobertura (°)** indican el ángulo de identificación de la etiqueta. Ángulo que se encuentra delimitado en el

rango de 50° a 130°, ver Fig. 17. El ángulo de cobertura es definido como:

$$\theta_{cobertura} = \theta_{desact} - \theta_{act} \quad (14)$$

Donde θ_{act} (Ángulo de activación) corresponde al ángulo en el cual la etiqueta es detectada y θ_{desact} (Ángulo de desactivación) corresponde al ángulo en el cual la etiqueta deja de ser identificada.

TABLA 8. RESUMEN GENERAL PARA TL EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA Y POTENCIA DE TRANSMISIÓN DE LA ANTENA

PTx (dBm)	Distancia (mt)	TL máximo (Lecturas* seg)	Ang TL máximo (°)	Error (°)	Cobertura (°)
27	1	72,55	70	-20	80
	2	72,50	95	5	75
	3	64,29	90	0	70
25	1	72,69	110; 75; 70	20; -15; -20	80
	2	72,32	105	15	70
	3	69,63	95	5	65
23	1	72,64	105	15	80
	2	72,62	100	10	60
	3	69,43	90	0	45
21	1	72,59	115	25	80
	2	73,05	105	15	50
	3	14,50	100	10	5
19	1	72,54	50	-40	75
	2	73,28	95; 100	5; 10	30
	3	Tag no detectado			
17	1	72,56	115	25	70
	2	Tag no detectado			
	3	Tag no detectado			

A continuación, se describe el comportamiento de la del RSSI frente a la dirección de la etiqueta y distancia entre antena y tag.

En la Fig. 21, para una ptx de 27, 25, 23, 21, 19 y 17 dBm se determinaron máximos en 100°, 95°, 100°, 95°, 100° y 90° respectivamente.

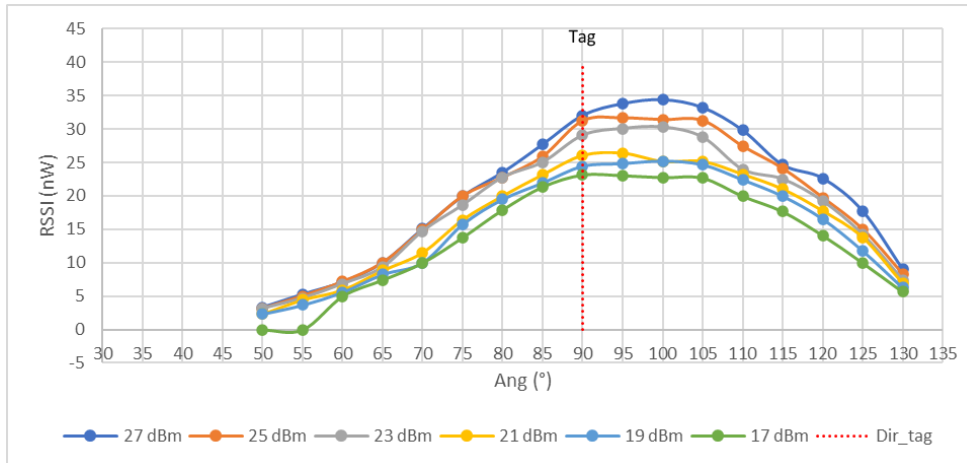


Fig. 21. RSSI vs Ang para una distancia entre Antena y tag de un metro.

En la Fig. 22, para una ptx de 27, 25, 23, 21 y 19 dBm se determinaron máximos de 95° a 100°, 95°, 95°, 95° y entre 80° a 115° respectivamente. Se observa que para un ptx de 17 dBm el haz de radiación de la antena no alcanza a cubrir o activar el tag objetivo.

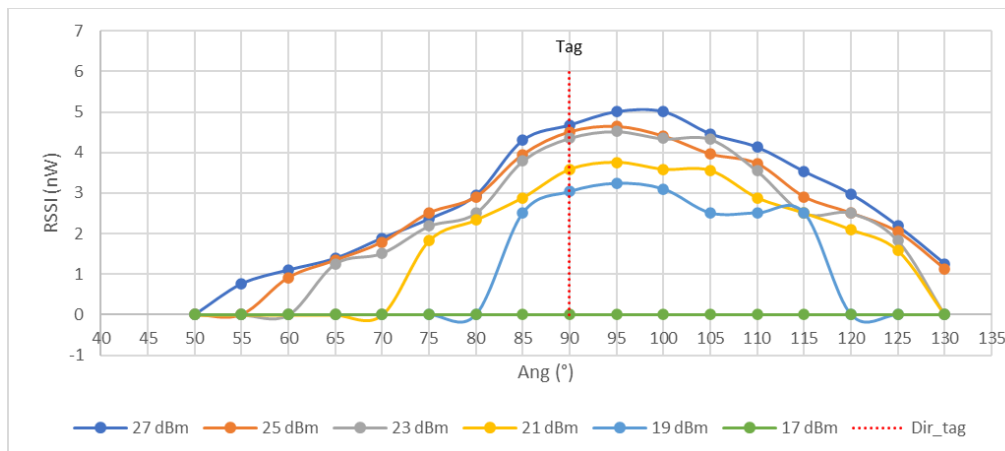


Fig. 22. RSSI vs Ang para una distancia entre antena y tag de 2 metros.

En la Fig. 23 se observa que, para una ptx de 27, 25, 23 y 21 dBm se determinaron máximos en 95°, 100°, 95° y 100° respectivamente.

Para una ptx de 19 y 17 dBm el haz de radiación de la antena no alcanzó a activar el TAG objetivo.

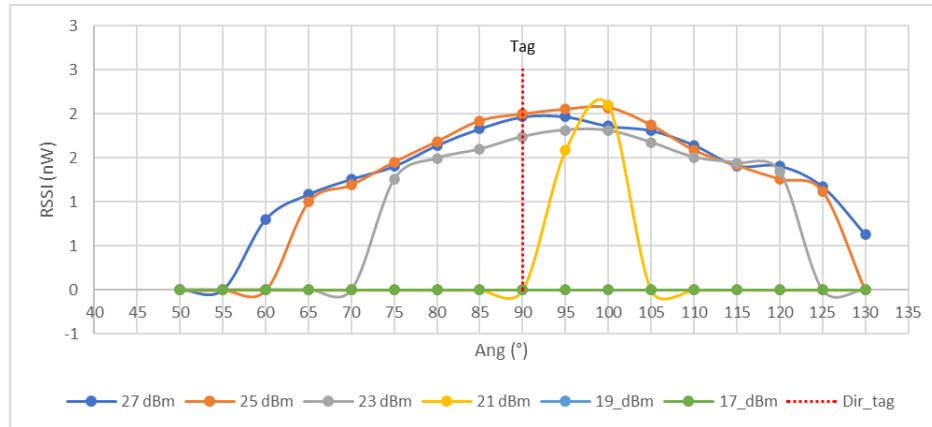


Fig. 23. RSSI vs Ang para una distancia entre antena y tag de tres metros.

La TABLA 9 resume el comportamiento del RSSI frente a los diferentes niveles de potencia configurados en el lector y distancia entre el tag y la antena.

TABLA 9. RESUMEN GENERAL PARA RSSI EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA Y POTENCIA DE TRANSMISIÓN DE LA ANTENA

Ptx (dBm)	Distancia (mt)	RSSI máximo (nW)	Ang RSSI máximo (°)	Error (°)	Cobertura (°)
27	1	34,36	100	10	80
	2	5,01	100	10	75
	3	1,97	95	5	70
25	1	31,64	95	5	80
	2	4,65	95	5	70
	3	2,07	100	10	60
23	1	30,25	100	10	80
	2	4,52	95	5	60
	3	1,82	95	5	45
21	1	26,36	95	5	80
	2	3,76	95	5	50
	3	2,10	100	10	5
19	1	25,21	100	10	80
	2	3,24	95	5	30
	3	Tag no detectado			
17	1	23,13	90	0	70
	2	Tag no detectado			
	3	Tag no detectado			

De los resultados obtenidos podemos concluir que el RSSI entrega una curva característica mejor definida con relación a la ubicación real del tag a uno, dos y tres metros.

A un metro la TL se mantiene por encima de 71 lecturas por segundo durante el barrido de 50° a 130° . Bajo estas condiciones, no es recomendable utilizar la TL para estimar la ubicación del tag objetivo.

De las gráficas podemos observar una desviación hacia la derecha de la ubicación de la etiqueta de 7.5° y 6.9° para TL y RSSI respectivamente. Estos valores se determinaron con el promedio del error en dos y tres metros. El error obtenido podría asociarse a un error sistemático debido a la precisión del servomotor utilizado, dado que cada paso equivale a 5 grados. También la fricción de materiales en el montaje de la antena y el mismo ancho del lóbulo principal de la antena en azimuth.

4.1.3 Hipótesis

El método propuesto con la variable TL se desarrolló con base al planteamiento de las siguientes Hipótesis.

Hipótesis 1: La tasa de lectura de un tag es afectado por la presencia de otros tags interferentes.

Dado que la TL es una variable clave para el desarrollo del método, es necesario verificar si una etiqueta es afectada por la presencia de otras. Este escenario es real, ya que, en empresas de comercialización, almacenamiento y distribución de mercancía, los artículos son ubicados uno al lado de otro.

El lector utilizado permite a través del protocolo EPC Gen 2, filtrar la respuesta del TAG objetivo. Con el fin de validar esta teoría, procedemos en diseñar un experimento de la forma 2^k , donde k es igual a dos (Distancia y # de tags) y 2 corresponde al número de niveles para cada variable. Para este experimento los niveles del factor distancia son 2 y 3 metros y para el factor correspondiente a número de tags sus niveles son 0 y 14 tags. El experimento se desarrolla de la siguiente forma:

- a) la antena y los tags se ajustan a una altura de 1.2 metros respecto al piso.
- b) la distribución de tags vecinos se muestra en la Fig. 14.
- c) La potencia de lectura se ajusta a 27 dBm.
- d) El número de repeticiones por tratamiento fue de 7. Cada repetición corresponde al promedio de 33 muestras.

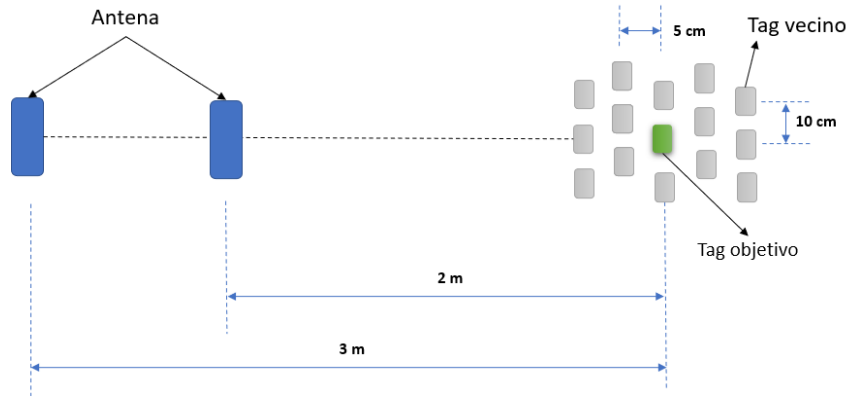


Fig. 24. Distribución de 14 etiquetas vecinas

Cada conjunto de factores y niveles es una población, es decir:

$$\mu_1 = \mu_{TL_2mt_1\ tag} \text{ (TL promedio de un tag a 2 mt de la antena)}$$

$$\mu_2 = \mu_{TL_3mt_1\ tag} \text{ (TL promedio de un tag a 3 mt de la antena)}$$

$\mu_3 = \mu_{TL_2mt_14\ tags}$ (TL promedio de un tag a 2 mt de la antena y 14 tags vecinos)

$\mu_4 = \mu_{TL_3mt_14\ tags}$ (TL promedio de un tag a 3 mt de la antena y 14 tags vecinos)

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la siguiente hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_3 \text{ y } H_0: \mu_2 = \mu_4$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_3 \text{ y } H_1: \mu_2 \neq \mu_4$$

Expresado de otra forma tenemos:

H0: La tasa de lectura promedio de un tag es la misma en presencia de otras etiquetas interferentes.

H1: La tasa de lectura promedio de un tag es diferente en presencia de otras etiquetas interferentes.

Los resultados obtenidos son comparados con intervalos de confianza. Por ello es necesario verificar si los datos obtenidos cumplen con el supuesto de normalidad e independencia.

La prueba de normalidad se realizó sobre el promedio de datos de TL obtenidos a dos y tres metros.

TABLA 10. PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

Prueba de Kolmogorov-Smirnov		
Distancia (mt)	2	3
Valor-P	0,953	0,998

Los resultados de la TABLA 10 indican que no se puede rechazar la hipótesis con un nivel de confianza del 95% de que los datos provengan de una distribución normal, ya que el valor-P en cada caso es mayor a 0.05.

El estudio de correlación de la Fig. 25 y Fig. 26 se obtiene de los 7 datos de TL obtenidos a dos y tres metros, pero con y sin tags vecinos. Los resultados indican que los valores de autocorrelación no superan los límites de probabilidad del 95% (Líneas de color rojo). Por lo que ninguno es estadísticamente significativo.

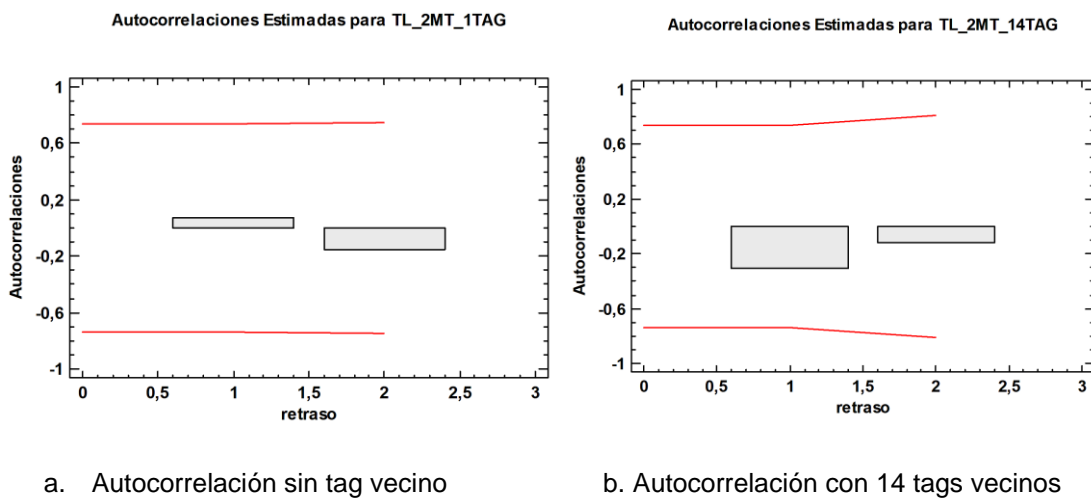
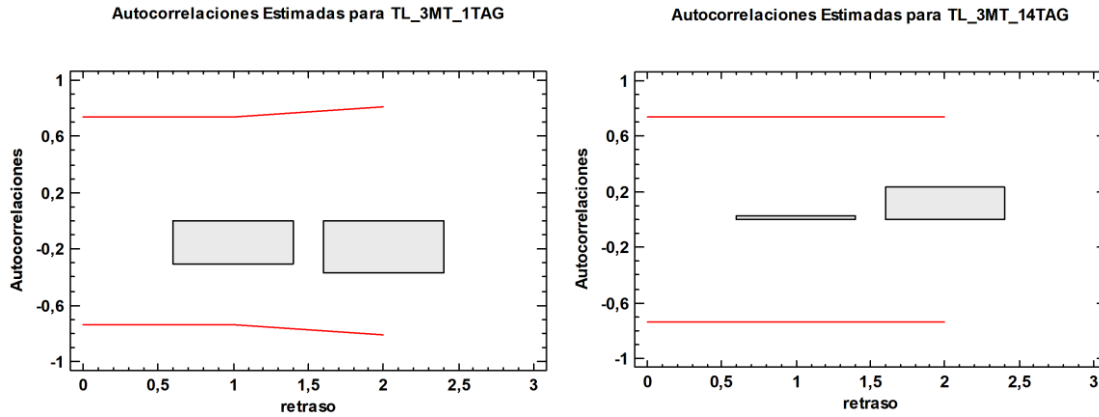


Fig. 25. Autocorrelaciones de la TL a 2 metros



a. Autocorrelación sin tag vecino

b. Autocorrelación con 14 tags vecinos

Fig. 26. Autocorrelaciones de la TL a 3 metros

Verificando el cumplimiento del supuesto de normalidad e independencia, procederemos en comparar las medias con intervalos de confianza de Tukey HSD.

En la Fig. 27 es importante aclarar que en el plano “cod” se muestran las poblaciones a comparar, las cuales se representan por los siguientes códigos:

- a) 2-0: Indica la población de la TL tomada de una etiqueta a 2 metros y sin tags vecinos.
- b) 2-14: Indica la población de la TL tomada de una etiqueta a 2 metros y con 14 tags vecinos.
- c) 3-0: Indica la población de la TL tomada de una etiqueta a 3 metros y sin tags vecinos.
- d) 3-14: Indica la población de la TL tomada de una etiqueta a 3 metros y con 14 tags vecinos.

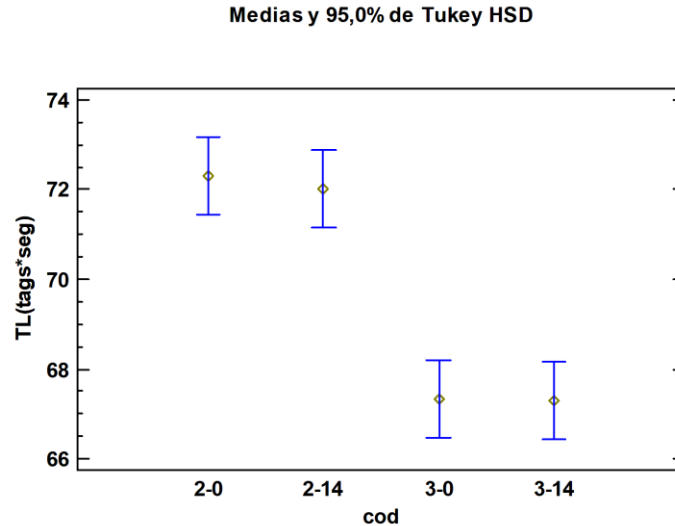


Fig. 27. Comparación de medias con intervalos de confianza de Tukey HSD

Con los resultados obtenidos no se encontró evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de que la TL de un tag es la misma en presencia de otras etiquetas interferentes. Sin embargo, es posible inferir y corroborar que la TL disminuye al aumentar la distancia entre la etiqueta y antena de dos a tres metros.

Hipótesis 2: La TL a 90° , 89° , 88° , 87° , 86° , 85° , 84° , 83° , 82° , 81° y 80° es igual para todos los casos.

Con la hipótesis planteada es posible proponer los pasos que requiere el sistema durante el proceso de muestreo. Tomar muestras cada 1° puede agotar recursos de software, ya que el hardware utilizado es limitado en memoria. Además, los tiempos de búsqueda se pueden extender.

Con el objetivo de validar la hipótesis y determinar los grados de giro del sistema, se propone el siguiente experimento:

- a) Ubicamos la antena y el tag a una altura respecto al piso de 1,2 metros.
- b) El ángulo de elevación es igual a cero. Solo se gira en azimuth.
- c) Ubicamos el tag a una distancia de la antena de tres metros
- d) Las pruebas se realizan en un ambiente indoor y sin la presencia de obstáculos entre la antena y el tag.

- e) La antena se gira desde 90° a 80° , con pasos de 1° . Para cada posición se toman 31 muestras por segundo de la TL.
- f) La potencia de transmisión es de 27 dBm.

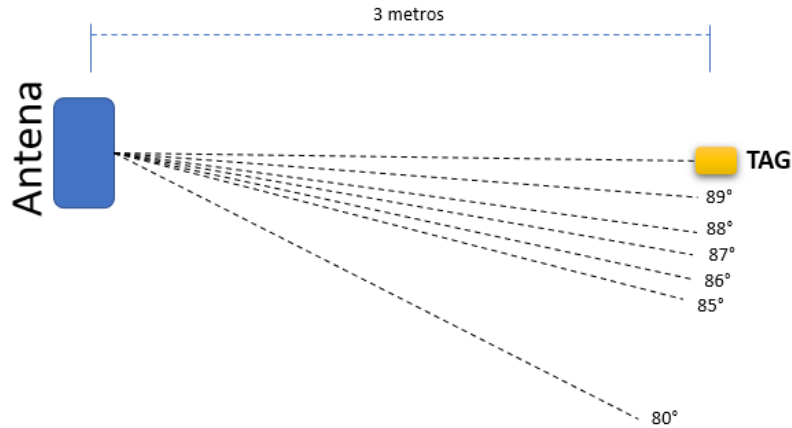


Fig. 28. Giro de la antena en pasos de 1° en azimut

Cada conjunto de factores y niveles es una población, es decir:

$$\mu_1 = \mu_{TL\ 90^\circ} \text{ (TL promedio a } 90^\circ\text{); } \mu_2 = \mu_{TL\ 89^\circ} \text{ (TL promedio a } 89^\circ\text{)}$$

$$\mu_3 = \mu_{TL\ 88^\circ} \text{ (TL promedio a } 88^\circ\text{); } \mu_4 = \mu_{TL\ 87^\circ} \text{ (TL promedio a } 87^\circ\text{)}$$

$$\mu_5 = \mu_{TL\ 86^\circ} \text{ (TL promedio a } 86^\circ\text{); } \mu_6 = \mu_{TL\ 85^\circ} \text{ (TL promedio a } 85^\circ\text{)}$$

$$\mu_7 = \mu_{TL\ 84^\circ} \text{ (TL promedio a } 84^\circ\text{); } \mu_8 = \mu_{TL\ 83^\circ} \text{ (TL promedio a } 83^\circ\text{)}$$

$$\mu_9 = \mu_{TL\ 82^\circ} \text{ (TL promedio a } 82^\circ\text{); } \mu_{10} = \mu_{TL\ 81^\circ} \text{ (TL promedio a } 81^\circ\text{)}$$

$$\mu_{11} = \mu_{TL\ 80^\circ} \text{ (TL promedio a } 80^\circ\text{)}$$

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la siguiente hipótesis:

$$H_0: \mu_i = \mu_j, \text{ para } i \neq j$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j, \text{ Para por lo menos un } i \neq j$$

Expresado de otra forma tenemos:

H0: La TL de un tag es igual para ángulos de azimut desde 80° a 90° con pasos de 1°.

H1: La TL de un tag no es igual para ángulos de azimut desde 80° a 90° con pasos de 1°.

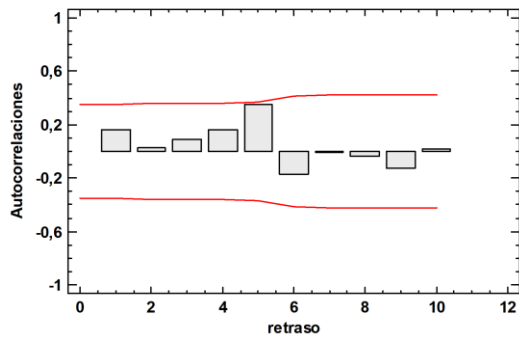
Las medias de cada población se compararán con intervalos de confianza. Por tanto, es necesario verificar si los datos obtenidos cumplen con el supuesto de normalidad e independencia.

TABLA 11. PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV PARA DATOS DE 90° A 80°

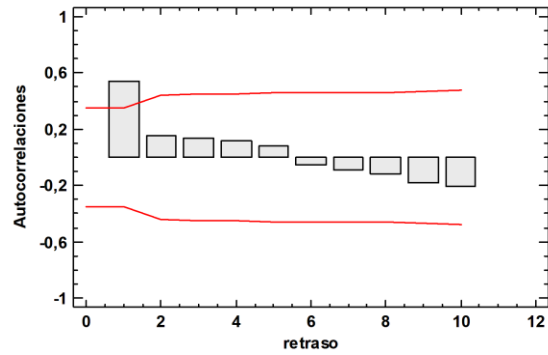
Prueba de Kolmogorov-Smirnov	
Descripción	Valor-P
TL a 90°	0,458
TL a 89°	0,925
TL a 88°	0,298
TL a 87°	0,904
TL a 86°	0,799
TL a 85°	0,971
TL a 84°	0,436
TL a 83°	0,83
TL a 82°	0,572
TL a 81°	0,796
TL a 80°	0,708

Con la prueba de Bondad de Ajuste de Kolmogorov-Smirnov se obtiene para los casos de la Tabla 11 un Valor-P mayor a 0.05. Con estos resultados no se puede rechazar la hipótesis con un nivel de confianza del 95% de que los datos provienen de una distribución normal.

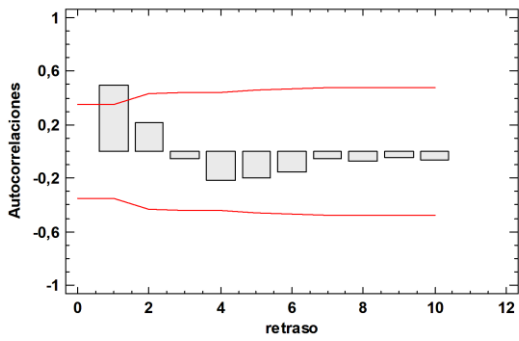
Autocorrelaciones Estimadas para TL_90



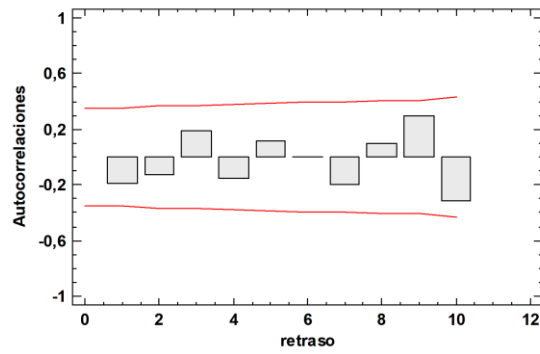
Autocorrelaciones Estimadas para TL_89



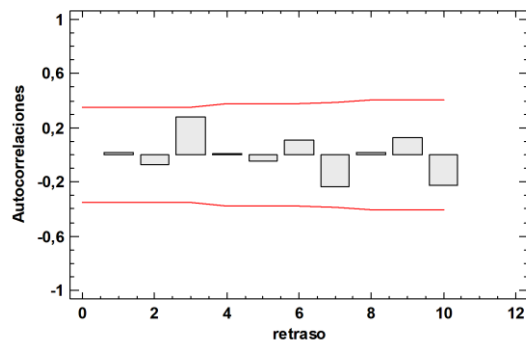
Autocorrelaciones Estimadas para TL_88



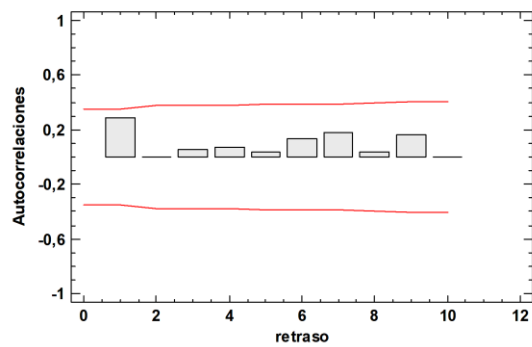
Autocorrelaciones Estimadas para TL_87



Autocorrelaciones Estimadas para TL_86



Autocorrelaciones Estimadas para TL_85



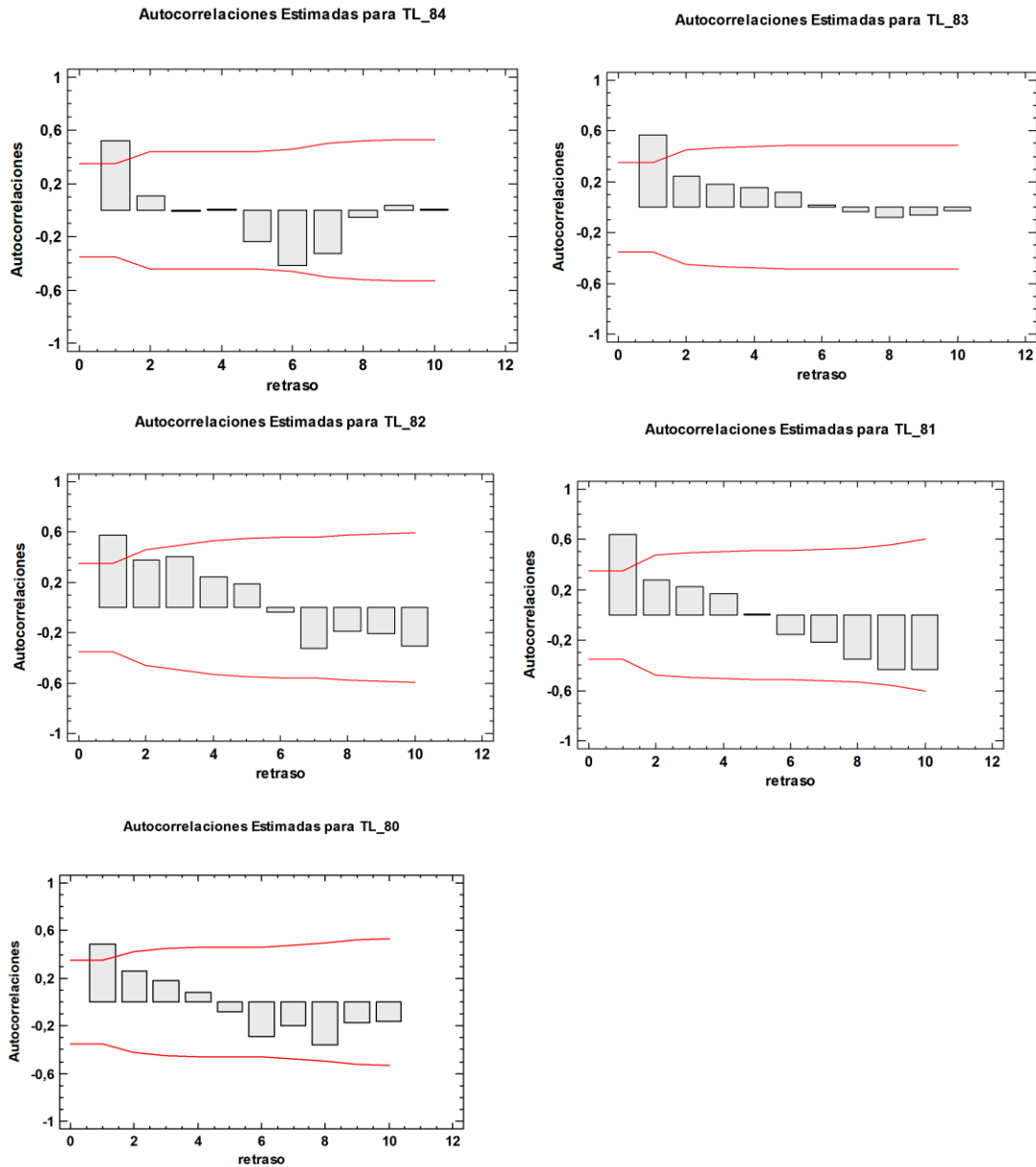


Fig. 29. Autocorrelaciones de la TL para datos de 10 posiciones

Los resultados de la Fig. 29 indican independencia en los datos para ángulos de 90° , 87° , 86° y 85° . Para el resto de los ángulos se observa que los datos no son del todo independientes, ya que se tienen algunas autocorrelaciones por fuera de los límites de probabilidad del 95% (Líneas de color rojo).

A continuación, se muestra la comparación con intervalos de confianza de las diferentes poblaciones.

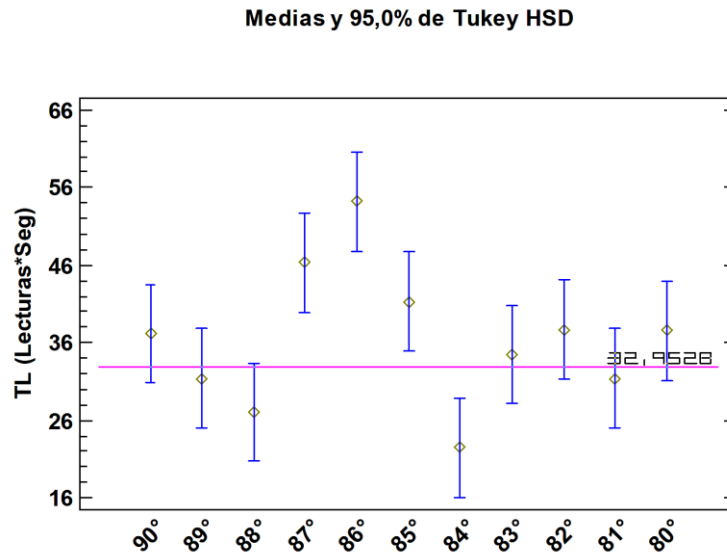


Fig. 30. Comparación de medias con intervalos de confianza de Tukey HSD

Según los resultados de la Fig. 30, se rechaza la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95% de que la TL de un tag es igual para ángulos de azimut desde 80° a 90° con pasos de 1°.

En la gráfica se observan que los ángulos de 90°, 89°, 88°, 83°, 82°, 81° y 80° no presentan diferencia estadística significativa. Sin embargo, se observa en 87°, 86° y 85° promedios por encima de los otros ángulos. Estos resultados corroboran una desviación hacia la derecha de aproximadamente 4°.

Al comparar los promedios de TL de 86° a 80° observamos que la TL presenta diferencia estadística alrededor de 5° a 6°. Con este resultado es posible definir durante el proceso de muestreo pasos de 5°.

4.2 Método Propuesto

Con la caracterización de las variables de RF, Hipótesis planteadas y literatura estudiada, se propone un método de búsqueda de etiquetas RFID pasivas en la banda de frecuencias UHF. El método se desarrolló con la implementación de dos variables de naturaleza diferente y de forma independiente, estas son la TL y RSSI. La Fig. 31 describe las etapas del método.

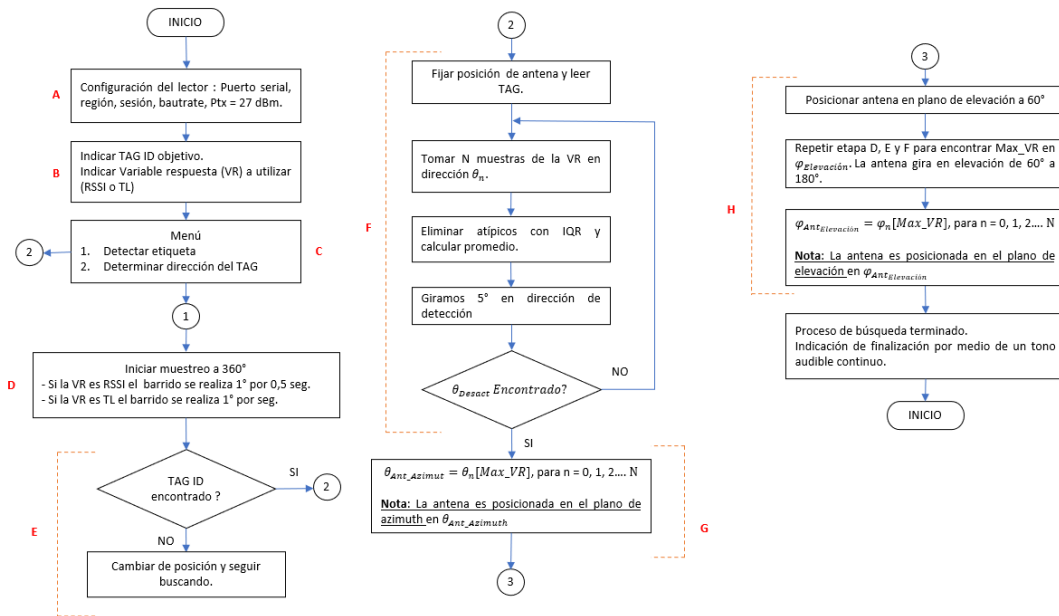


Fig. 31. Método propuesto: búsqueda de etiquetas RFID UHF

4.2.1 Etapa A: Configuración del lector.

En el capítulo 4.1 y 4.2 se indican las configuraciones realizadas al lector RFID y plataforma de desarrollo Arduino.

4.2.2 Etapa B: Indicación del tag ID objetivo y variable respuesta a utilizar

Para iniciar el proceso de búsqueda se define el ID de la etiqueta objetivo y variable respuesta a utilizar (RSSI o TL). El protocolo EPC Gen2 permite desactivar la respuesta de las etiquetas que no sean de interés. El filtro se realiza sobre el banco 1 de la memoria de la etiqueta, específicamente en la dirección dos, la cual corresponde al EPC ID, ver Fig. 32 [76]. Con la implementación del filtro se evita que la tasa de lectura de la etiqueta objetivo

se vea afectada por etiquetas vecinas. Este escenario fue analizado en la hipótesis 1. Esta etapa es de suma importancia cuando la variable utilizada en el método propuesto es la TL.

The image shows a configuration interface for an RFID UHF tag's memory banks. It is divided into four sections:

- Reserved Memory Bank (0):** Purpose: Kill Password, Access Password, Additional Memory. Value (Hex): 00 00 00 00, 00 00 00 00, 00 00 04 A0 0C FE. Word Address (Dec): 0, 2, 4.
- EPC Memory Bank (1):** Purpose: CRC, PC, EPC ID, Extended EPC Memory. Value (Hex): FD 1B, 08 00, 12 35, 00 00 00. Value: ASCII Reverse Base 36, 5. Word Address (Dec): 0, 1, 2, 3.
- TID Memory Bank (2):** Purpose: ClsID, Vendor ID, Model ID, Unique ID. Value (Hex): E2, 801, 100, 20 00 59 0B 21 8F 01 63. Meaning: Impinj, Monza 4D. Word Address (Dec): 0, 2.
- User Memory Bank (3):** Purpose: User Data. Value (Hex): 00 00 00 00.

Fig. 32. Banco de memorias de una etiqueta RFID UHF

4.2.3 Etapa C: Actividades del proceso de búsqueda

En el proceso de búsqueda se describen dos acciones. Detectar tag o determinar dirección del tag. Para el primer caso, se desconoce completamente la ubicación de la etiqueta a buscar, bajo estas condiciones se requiere ejecutar las etapas D en adelante. En el caso de haber detectado la etiqueta, procedemos desde la etapa F.

4.2.4 Etapa D: Muestreo a 360° en azimuth

Esta etapa consiste en realizar un barrido a 360° sobre el área y ruta definida por el usuario. El sistema se encuentra limitado con giros parciales a 180° en el plano de azimuth, ya que el servomotor utilizado solo gira 180°. Para realizar un barrido a 360° el usuario debe girar el sistema y complementar los grados faltantes. Teniendo en cuenta la variable utilizada y con el fin de mejorar los tiempos de búsqueda, el barrido se realiza girando la antena 1° cada 500

milisegundos si utilizamos RSSI. Si utilizamos la TL, el barrido se realiza girando la antena 1° por segundo. Si en el muestreo no se logra detectar la etiqueta, el usuario debe ir moviendo el sistema en posiciones estratégicas. Teniendo en cuenta la cobertura del sistema de la Fig. 33. El tag debería ser detectado en la posición 3.

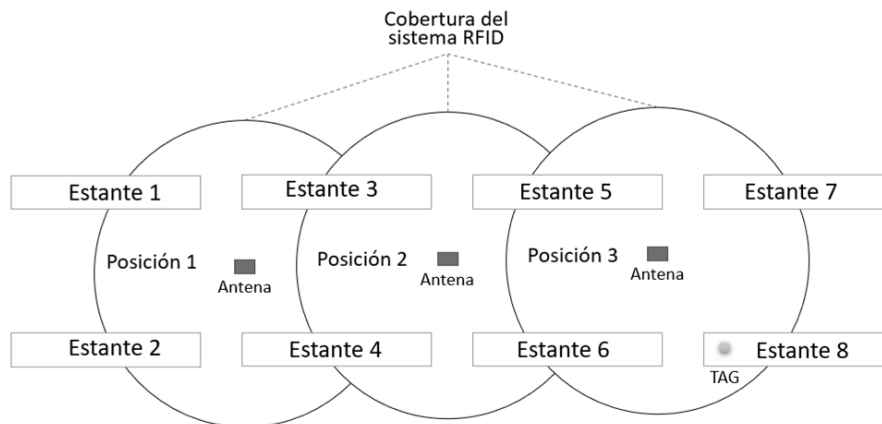


Fig. 33. Muestreo a 360°

El proceso de detección se posiciona la antena en dirección paralela a la superficie del suelo, ver Fig. 34 a. El barrido se realiza en el plano de azimuth, ver Fig. 34 b.

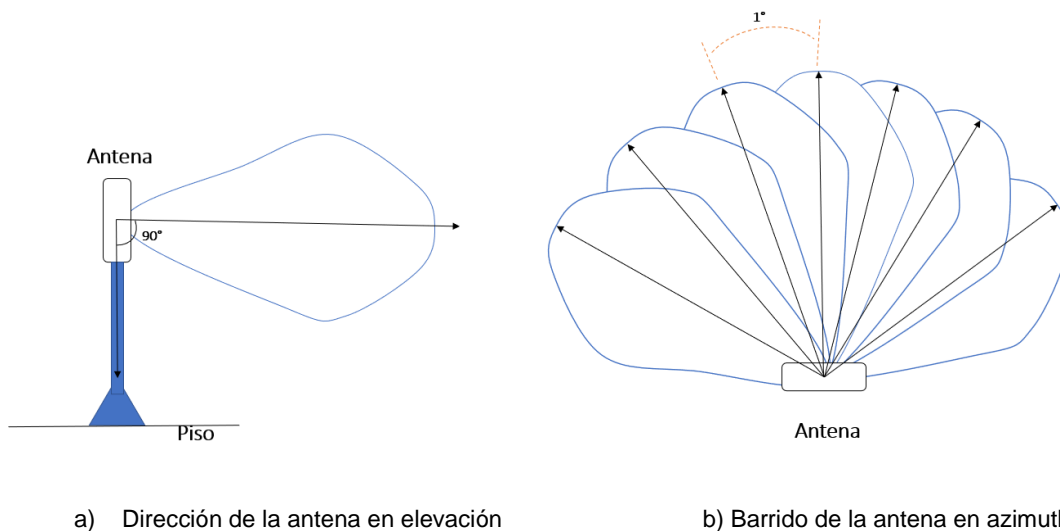


Fig. 34. Posición de la antena en el plano de elevación y azimuth

4.2.5 Etapa E: Detección del TAG

En el método propuesto, el criterio de detección de la etiqueta RFID para la variable RSSI es:

El TAG es detectado si el RSSI ≥ -60 dBm y TL ≥ 5

Para la TL el criterio de detección es:

El TAG es detectado si TL ≥ 5

El nivel de RSSI definido como criterio de detección corresponde al valor mínimo en dBm reportado por el lector, y el valor de la TL corresponde a resultados experimentales obtenidos de la Fig. 19 y Fig. 20. La TL se utilizó en la etapa de detección de la etiqueta en conjunto al RSSI con el objetivo de filtrar señales de backscatter generadas como respuesta a posibles señales multitrayecto. En la práctica, definir el nivel RSSI como único criterio de detección generaba frente a una sola respuesta de la etiqueta errores en la estimación de la dirección. En la Fig. 35.a se observa que la etiqueta es detectada con solo una respuesta, por otro lado, en la Fig. 35.b se observa que al girar 5° con el fin de buscar un RSSI máximo, la etiqueta no logró ser detectada. Bajo estas condiciones la dirección indicada por la antena no es confiable.

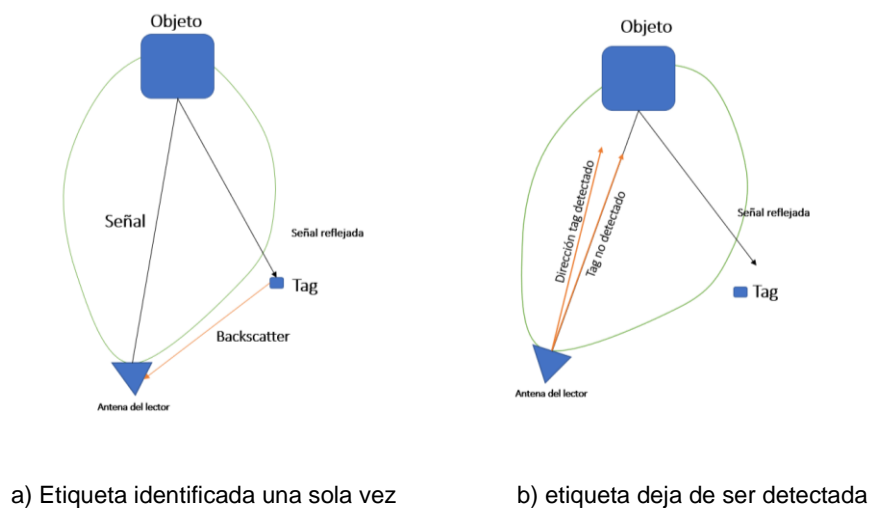


Fig. 35. Error en el proceso de detección de la etiqueta

La Fig. 36 muestra la detección de la etiqueta en la dirección 5. En esta etapa finaliza el proceso de búsqueda e inicia la estimación de la dirección del tag objetivo.

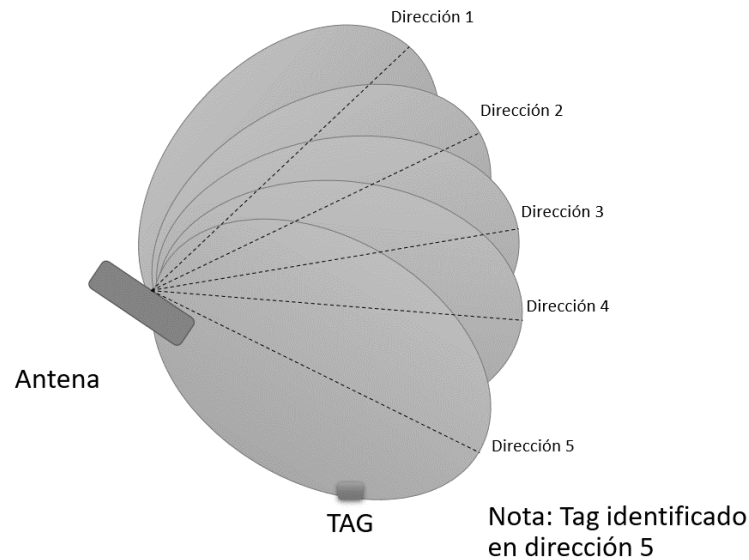


Fig. 36. Detección de la etiqueta para un muestreo a 360°

4.2.6 Etapa F: Toma de muestras sobre el área de interés

Con la detección de la etiqueta, es posible definir el ángulo de activación (θ_{act}) como se muestra en Fig. 37 a.

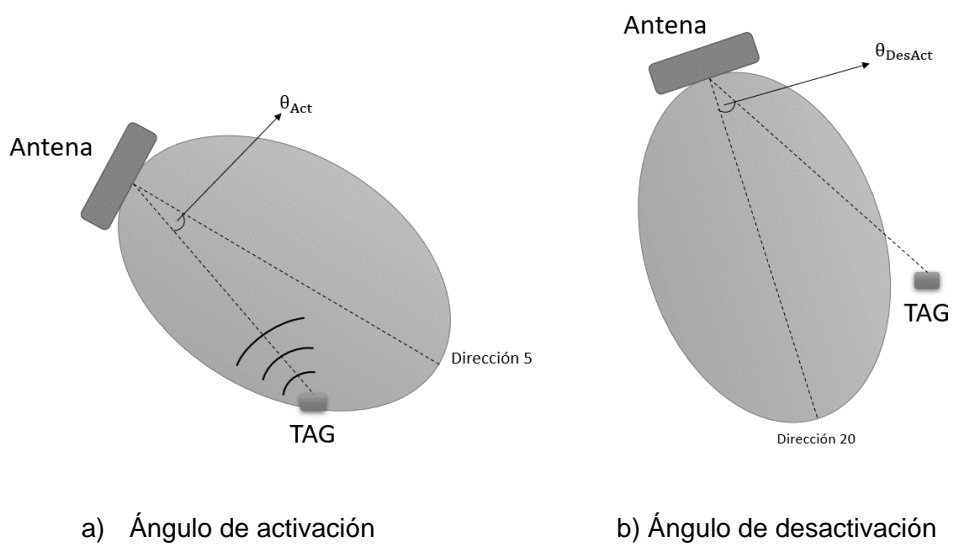


Fig. 37. Ángulo de activación y desactivación de un TAG RFID UHF

Definido el ángulo de activación inicia el proceso de muestreo en el área de interés. En esta etapa se toman 30 muestras cada 5° de la variable respuesta utilizada. Si se utiliza el RSSI las muestras son tomadas cada 0.5 segundos. El RSSI de la etiqueta es entregada en dBm. Para efectos operacionales y limitaciones de procesamiento de la placa Arduino, los datos son transformados y tratados en nanovatios (nW).

En caso de utilizar la TL como variable respuesta, las muestras se toman cada segundo.

Para el conjunto de datos de cada posición, se eliminan los datos atípicos con el rango intercuartílico (IQR) [75] y se calcula el promedio en nanovatios si se utiliza el RSSI y lecturas por segundos si se utiliza la TL. El promedio se realiza para cada posición de muestreo (Cada 5°).

Una vez la etiqueta deja de ser detectada, finaliza la etapa de muestreo. El ángulo encontrado se define como ángulo de desactivación (θ_{desact}), ver Fig. 37b. Esta etapa finaliza con un vector de posiciones θ_n y un vector de promedios de RSSI en nW.

4.2.7 Etapa G: Estimación de la dirección de la etiqueta objetivo en el plano de azimuth.

La dirección en el plano azimuthal de la etiqueta objetivo se estima teniendo en cuenta la siguiente expresión:

$$\theta_{Ant_Azimut} = \theta_n[Max_VR], \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

Con los resultados obtenidos en la ecuación 15, la antena del sistema es direccionada en el plano de azimuth hacia la posición donde la variable respuesta obtuvo su valor máximo.

4.2.8 Etapa H: Estimación de la dirección de la etiqueta objetivo en el plano de elevación.

Para estimar la dirección de la etiqueta en el plano de elevación, se procede en repetir los pasos de la etapa D, E y F. Para estas nuevas condiciones, la

antena inicia en 60° y puede lograr un ángulo máximo en el proceso de muestreo de 180° , ver Fig. 38.

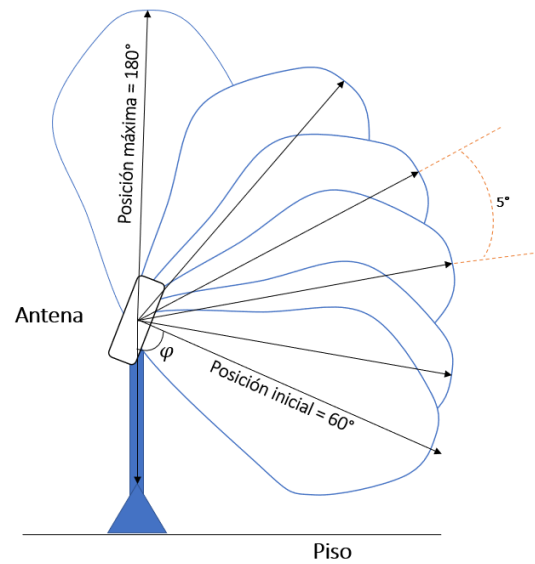


Fig. 38. Posición inicial y final de la antena en el plano de elevación.

La dirección de la antena en el plano de elevación se obtiene de la siguiente expresión:

$$\varphi_{Ant_{Elevación}} = \varphi_n[Max_VR], \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

Una vez el proceso de muestreo finaliza, el sistema genera un tono audible y continuo.

4.3 Plataforma Stand-Alone

El prototipo propuesto se desarrolló con el lector RFID M6e-Nano, el cual dispone de un solo puerto de RF para una antena. El lector se comunica con la plataforma de desarrollo Arduino Mega a través del protocolo de comunicación serial RS232. Los comandos y librerías utilizadas por Arduino fueron diseñadas por la empresa thingMagic, los cuales cumplen con los estándares del protocolo EPC Gen2. La antena utilizada en el sistema cuenta con una ganancia de 8 dBic. Diseñada para funcionar en las frecuencias de 902 - 928 MHz. La antena es instalada en un perfil de aluminio en forma de U, permitiendo así la instalación de dos servomotores, uno para el movimiento en azimuth y otro para el movimiento en elevación. La antena cuenta con la instalación de un transportador en la parte superior y lateral, los cuales son utilizados para medir el ángulo en azimuth y elevación entre la antena y la etiqueta, ver Fig. 39.

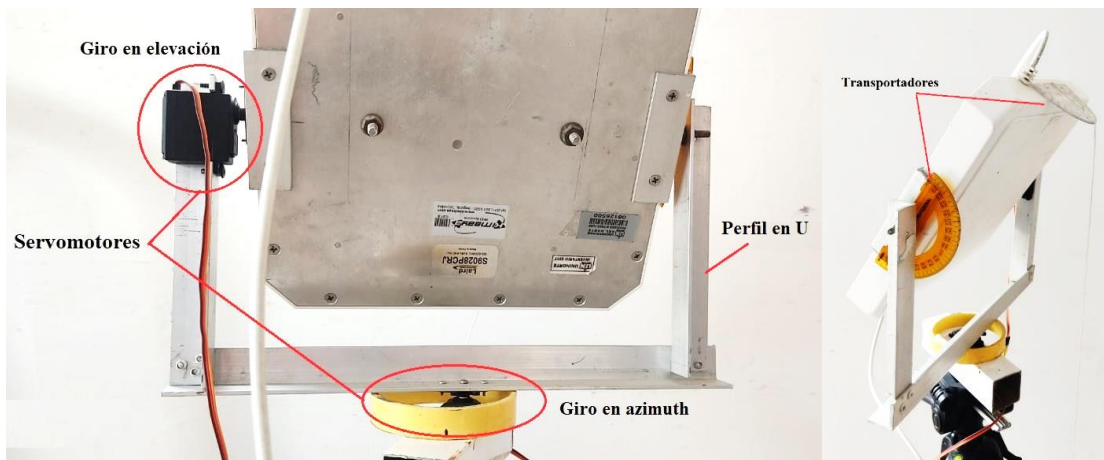


Fig. 39. Sistema de direccionamiento de la antena y métodos de medición de ángulos.

Los servomotores, lector RFID y Arduino funcionan con un nivel de tensión de 5 VDC, el cual es suministrado por una fuente de poder externo (Cargador). El esquema de conexión del sistema propuesto se muestra en la Fig. 40.

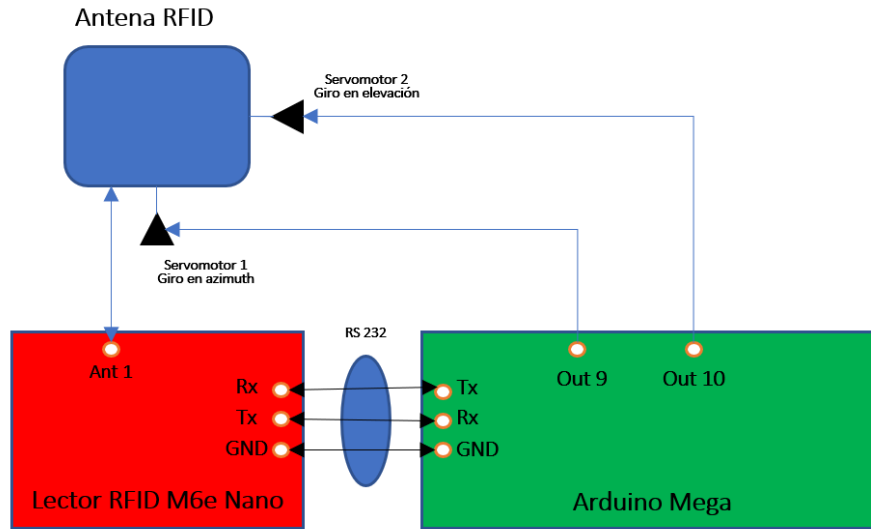


Fig. 40. Esquema de conexión de la plataforma Stand-Alone

Los componentes del sistema son instalados en un trípode de aluminio, el cual permite estabilidad y facilidad de transporte. El sistema de la Fig. 41 fue desarrollado con el objetivo de verificar los métodos propuestos en el apartado anterior, los cuales permiten realizar tareas de búsqueda de etiquetas perdidas en bodegas y almacenes de forma semiautomática.



Fig. 41. Sistema de búsqueda de etiquetas RFID – UHF

Los componentes del sistema se relacionan en la TABLA 12.

TABLA 12. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS DISPOSITIVOS UTILIZADOS EN LOS EXPERIMENTOS

Componente	Especificaciones técnicas	
Host	Plataforma	Arduino Mega 2560
	Microcontrolador	Atmega 2560
	Dimensiones	(101.52 mm; 53.3 mm: Largo; Ancho)
	Voltaje de operación	5 VDC
Lector RFID	Referencia	M6E-NANO
	Protocolo	EPCglobal Gen2 2V2 (ISO 1800-63)
	PTx	0 dBm a 27 dBm, pasos de 0,01 dBm
	Frecuencia	FCC (917.4 - 927.2 MHz)
	Voltaje de operación	3.7 a 5.5 VDC para 27 dBm
Antena	Referencia	S9028PCRJ
	Frecuencia	902 - 928 MHz
	Polarización	Circular
	Ganancia	8,5 dBic
	Impedancia	50 ohmios
Tag	Referencia	Smartrac DOGBONE
	Protocolo de comunicación	ISO 18000-6C, EPC Class 1 Gen 2
	Chip	Impinj Monza 4D
	Frecuencia de operación	UHF 860 - 960 MHz
	Tipo	Pasivo
Servomotor	Referencia	MG995R
	Voltaje de operación	4.8 a 7.2 VDC
	Torque (4,8 VDC; 6.0 VDC)	10.5 Kg*cm; 13Kg*cm
	Peso	55 g
	Dimensiones	40.7 x 19.7 x 42.9 mm

5 Planteamiento y Desarrollo de experimentos

En este capítulo se presentan una serie de experimentos que permiten verificar y comparar el rendimiento y precisión del método propuesto. Los experimentos se desarrollaron con la plataforma Stand-Alone de la Fig. 41.

5.1 Diseño de experimentos

Los experimentos se desarrollaron en el laboratorio de Logística del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad del Norte, Barranquilla, ver Fig. 42.



Fig. 42. Laboratorio de logística del departamento de ingeniería industrial.

La disposición del espacio, ubicación y cantidad de etiquetas vecinas y de interés se describen a continuación:

- El laboratorio se dividió en 12 áreas de interés.
- En las áreas de interés se realizó una distribución de 34 etiquetas pasivas.
- Las etiquetas se colocaron en cajas plásticas de color amarillo, azul y rojo.
- Para el proceso de búsqueda de las etiquetas perdidas, se definieron 6 posiciones. Con estas posiciones y sistema propuesto se asume la posibilidad de cubrir las 12 áreas de búsqueda, ya que se requiere un alcance mínimo de 3 metros en la cobertura de la antena.

- Del total de etiquetas distribuidas, se seleccionaron 8 etiquetas ubicadas en áreas diferentes y de forma aleatoria.
- El número de repeticiones por ubicación fue de 9, para un total de 72 experimentos.
- En cada búsqueda, se solicitó a un estudiante del laboratorio reemplazar la etiqueta objetivo por cualquier etiqueta en el escenario.
- Para efectos prácticos las etiquetas instaladas fueron acompañadas de un código QR. El objetivo es verificar si la etiqueta a la cual la antena estaba indicando corresponde al tag objetivo. Por otro lado, se garantiza no mover la etiqueta y sumar errores al momento de realizar la medición en azimuth y elevación.
- Para cada experimento se implementó el método con RSSI y TL.

La distribución de etiquetas, áreas (Espacios delimitados en color rojo) y ruta establecida se muestra en el siguiente plano en 2D. Cabe resaltar que los valores acotados en plano se encuentran en metros.

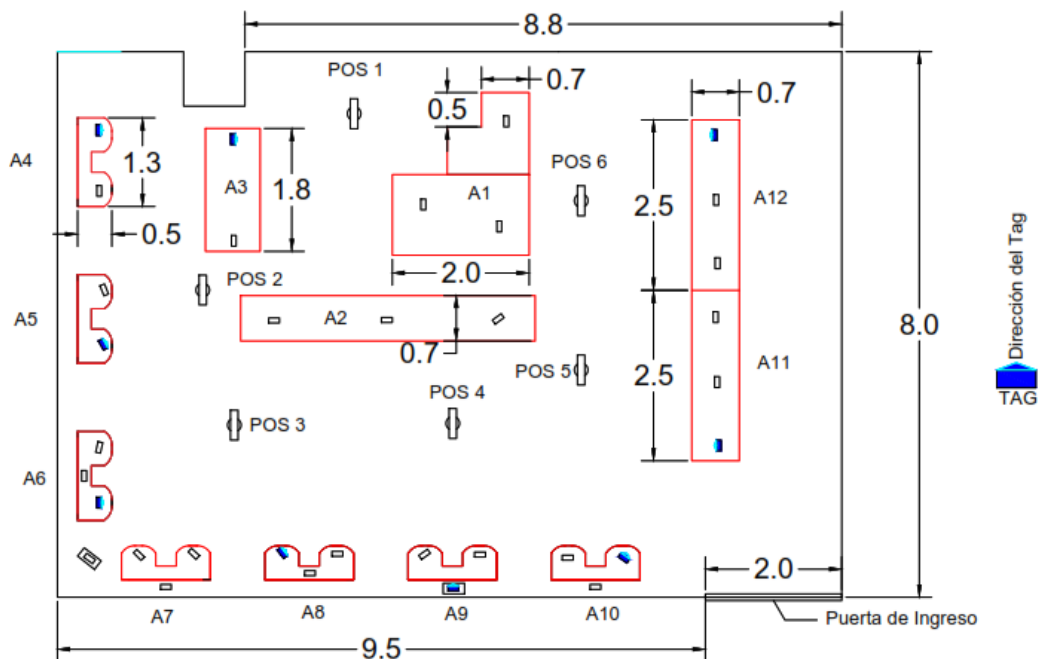


Fig. 43. Planteamiento de experimentos en laboratorio de logística del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad del Norte

El proceso de búsqueda de la etiqueta RFID inicia con la ubicación del lector en la posición número 1 (POS 1), ver Fig. 43. El sistema inicia con el registro del ID de la etiqueta objetivo y muestreo a 360°. Si la etiqueta no es detectada en la POS1, el usuario procede en trasladar el sistema hacia la posición 2 (POS2). Si la etiqueta no es detectada. El procedimiento se repite hasta llegar a la posición 6 (POS 6), ver Fig. 43. Si en la última posición la etiqueta no es detectada. El experimento se reinicia y la etiqueta se reubica en otra posición y se cuenta como no detectada.

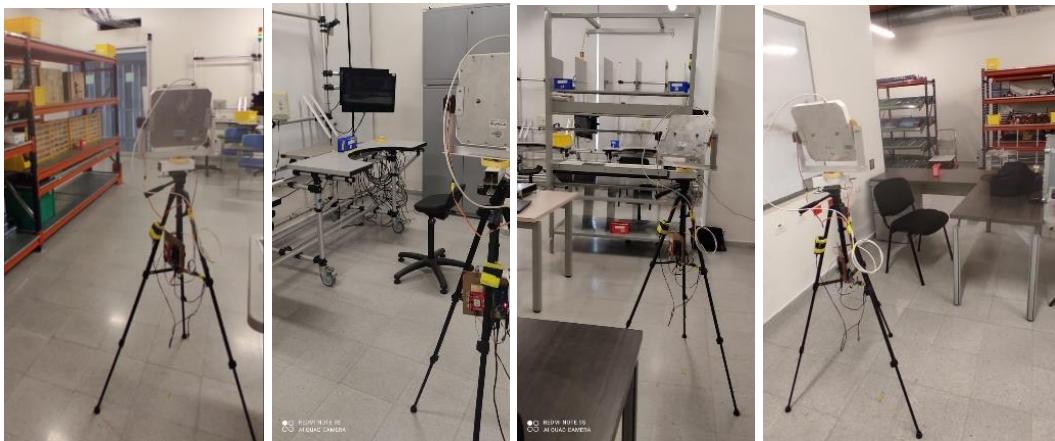


Fig. 44. Búsqueda de etiquetas RFID UHF

En el caso de detectar la etiqueta, el sistema inicia un muestreo cada 5° en el plano de azimuth. El muestreo finaliza cuando la etiqueta deja de ser identificada y direcciona la antena hacia el punto donde se obtuvo el valor máximo de la variable utilizada (RSSI o TL). Este procedimiento se repite en el plano de elevación. El sistema finaliza con la indicación de un tono audible y direccionamiento de la antena hacia la posible ubicación del tag objetivo.

En esta etapa verificamos con la ayuda de un código QR que acompaña la etiqueta, la confirmación del ID objetivo. El código QR se utilizó como mecanismo de verificación del ID de la etiqueta, evitando así tener que mover el objeto y sumar errores al momento de realizar la medición de ángulos. Una vez identificado la etiqueta objetivo, hacemos uso de dos transportadores y una

madeja de nylon para medir el ángulo en azimuth y elevación entre la antena del lector y la etiqueta objetivo, ver Fig. 45.

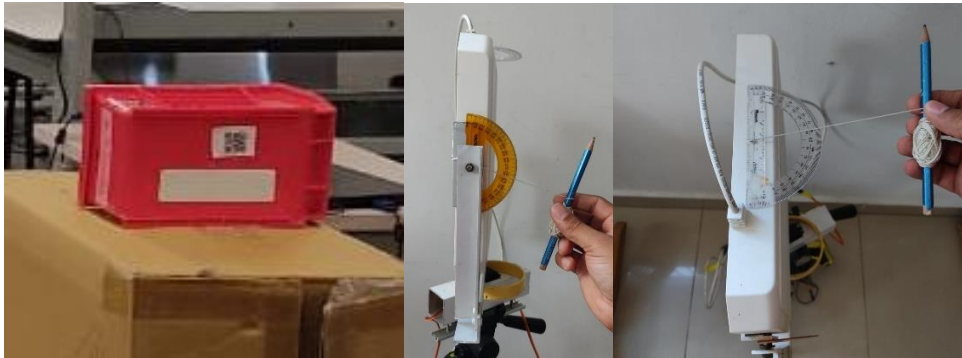


Fig. 45, Código QR para verificar ID y medición de ángulos en azimuth y elevación de la etiqueta objetivo

De los experimentos realizados, se registraron los siguientes datos: ángulo de azimuth, ángulo de elevación y tiempo de ejecución del algoritmo.

Los datos registrados se tomaron para las dos variables respuestas (RSSI y TL). A continuación, se analizan y comparan los resultados obtenidos.

5.2 Planteamiento de hipótesis

Con el desarrollo de los experimentos de la sección anterior se plantean las siguientes hipótesis.

Hipótesis 3: El error en la dirección del tag objetivo es igual para la variable RSSI y TL en el plano de azimuth.

Hipótesis 4: El error en la dirección del tag objetivo es igual para la variable RSSI y TL en el plano de elevación.

De las hipótesis planteadas se definen las siguientes poblaciones:

- $\mu_1 = \text{Error promedio en azimuth con la variable RSSI}$
- $\mu_2 = \text{Error promedio en azimuth con la variable TL}$
- $\mu_3 = \text{Error promedio en elevación con la variable RSSI}$
- $\mu_4 = \text{Error promedio en elevación con la variable TL}$

Matemáticamente tenemos:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \text{ y } H_0: \mu_3 = \mu_4$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \text{ y } H_1: \mu_3 \neq \mu_4$$

Los resultados de cada población serán comparados con intervalos de confianza. Por ello es necesario verificar si los datos obtenidos cumplen con el supuesto de normalidad e independencia. Aclaremos que los datos utilizados para la verificación de los supuestos no incluyen valores atípicos.

TABLA 13. SUPUESTO DE NORMALIDAD PARA AZIMUT Y ELEVACIÓN CON LA VARIABLE RSSI Y TL

Pruebas de Bondad-de-Ajuste (Kolmogorov-Smirnov) para azimuth y elevación del método propuesto				
Variable del Método	RSSI Máximo		RR Máximo	
Ángulo (°)	Azimuth	Elevación	Azimuth	Elevación
Valor-P	0,0505	0,3334	0,1503	0,2451

Los resultados de la TABLA 13 muestran que no se puede rechazar la hipótesis de que los datos provienen de una distribución normal, ya que el Valor-P es mayor a 0.05, con nivel de confianza del 95%.

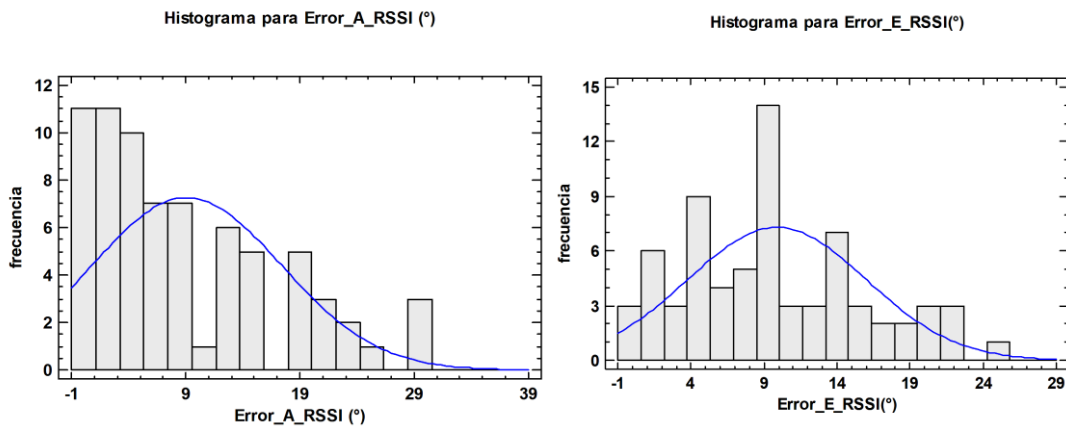


Fig. 46. Test de normalidad para azimuth y elevación con la variable RSSI

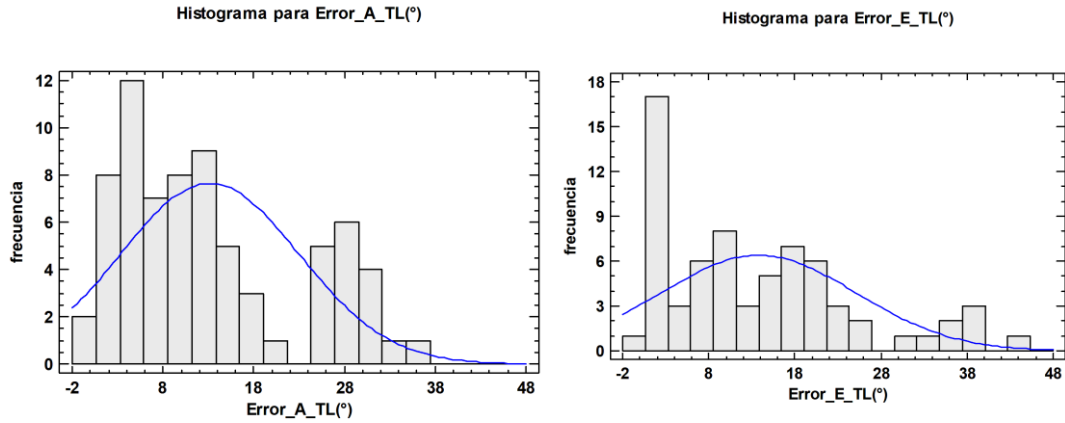


Fig. 47. Test de normalidad para azimuth y elevación con la variable TL

El estudio de correlación de la Fig. 48 y Fig. 49 indican que los valores de autocorrelación no superan los límites de probabilidad del 95% (Líneas de color rojo). Se concluye que los datos correspondientes al error en azimuth y elevación son independientes.

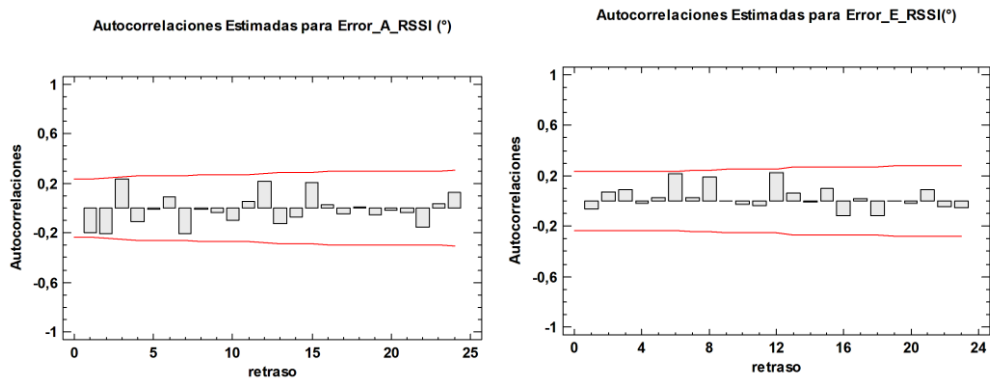


Fig. 48. Autocorrelaciones del error en ángulo de azimuth y elevación para la variable RSSI

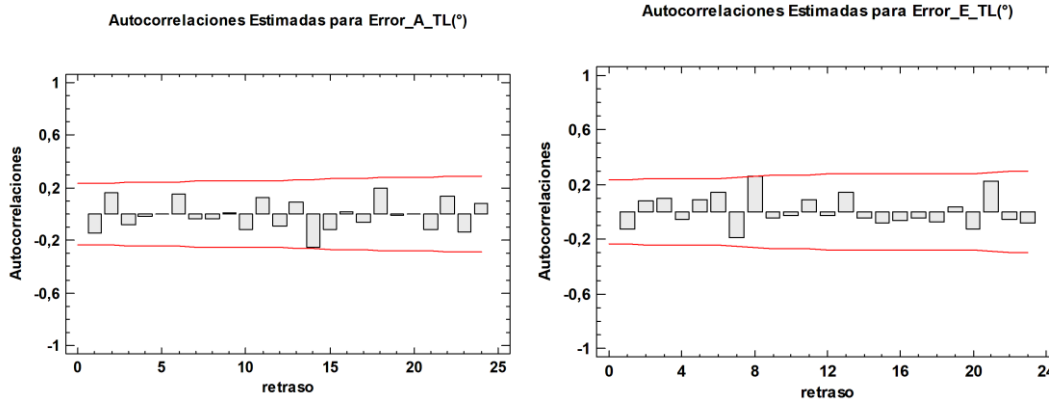


Tabla 14. Autocorrelaciones del error en ángulo de azimuth y elevación para la variable TL

En la Fig. 49 se comparan el error en azimuth entre la variable RSSI y TL. Concluyendo de la hipótesis 3, rechazar la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95% de que las medias en azimuth para la variable RSSI y TL son iguales. Se observa que con la variable RSSI se obtiene mejor precisión en azimuth.

Medias y 95,0% de Tukey HSD

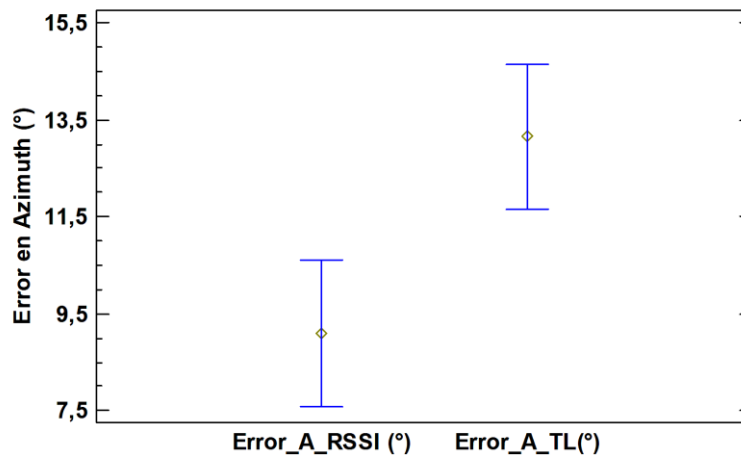


Fig. 49. Comparación del error en azimuth para RSSI y TL

En la Fig. 50 se compara el error en elevación entre la variable RSSI y TL. Concluyendo de la hipótesis 4, rechazar la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95% de que las medias en elevación para la variable RSSI y TL

son iguales. Se observa que con la variable RSSI se obtiene mejor precisión en elevación.

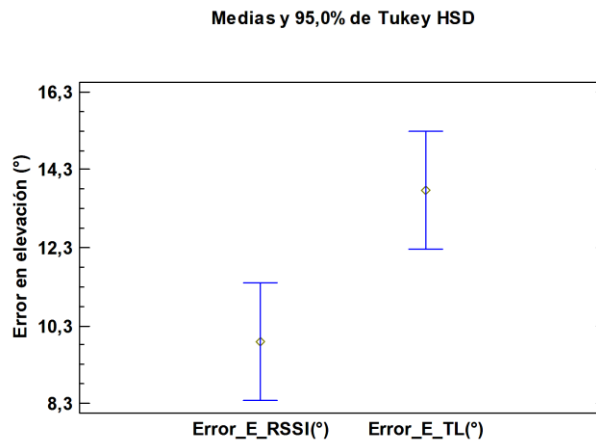


Fig. 50. Comparación del error en elevación para RSSI y TL

Durante la implementación del Método se registraron los tiempos de búsqueda para las variables RSSI y TL. Este inicia con la detección del tag objetivo y finaliza con el direccionamiento de la antena en azimuth y elevación. Con el fin de comparar el rendimiento en los tiempos de busque del método para la variable seleccionadas se plantea la siguiente hipótesis.

Hipótesis 5: Los tiempos de búsqueda con RSSI y TL son iguales.

De la hipótesis planteada se definen las siguientes poblaciones:

- $\mu_1 = \text{Tiempo de búsqueda con la variable RSSI}$
- $\mu_2 = \text{Tiempo de búsqueda con la variable TL}$

Matemáticamente tenemos:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Los resultados de cada población son comparados con intervalos de confianza. Por ello es necesario verificar si los datos obtenidos cumplen con el supuesto de normalidad e independencia. Aclaremos que los datos utilizados para la verificación de los supuestos no incluyen valores atípicos.

TABLA 15. SUPUESTO DE NORMALIDAD PARA LOS TIEMPOS DE BÚSQUEDA CON LA VARIABLE RSSI Y TL

Prueba de Kolmogorov-Smirnov	
Variable	Valor-P
RSSI	0,1351
TL	0,0705

Los resultados de la TABLA 15 muestran que no se puede rechazar la hipótesis de que los datos provienen de una distribución normal, ya que el Valor-P es mayor a 0.05, con nivel de confianza del 95%.

El estudio de correlación de la Fig. 51 indican que los valores de autocorrelación no superan los límites de probabilidad del 95% (Líneas de color rojo). Se concluye que los datos correspondientes al error en azimuth y elevación son independientes.

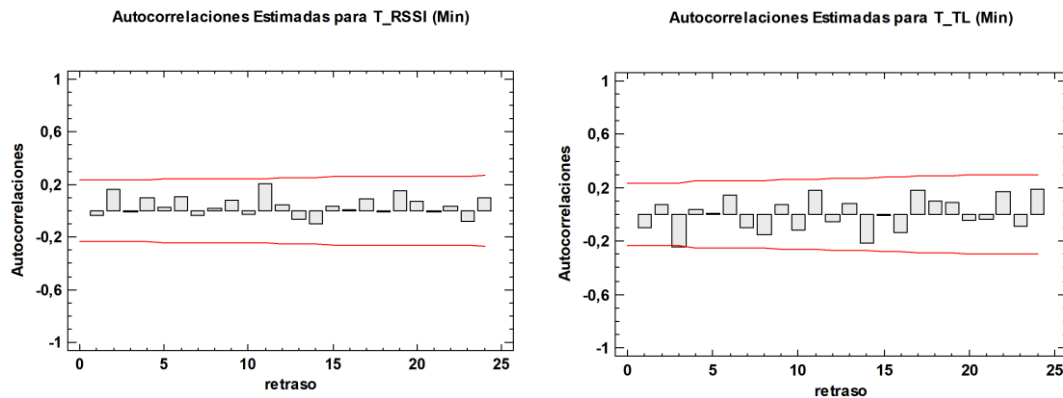


Fig. 51. Autocorrelación para tiempo de búsqueda con RSSI y TL

En la Fig. 52 se compara el tiempo de búsqueda de las etiquetas entre la variable RSSI y TL. Concluyendo de la hipótesis 5, rechazar la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95% de que las medias en el tiempo de búsqueda para la variable RSSI y TL son iguales. Los resultados indican que con la variable RSSI se buscan las etiquetas en menor tiempo. Los resultados son consistentes, ya que el muestreo con RSSI se realiza en la mitad del tiempo que TL.

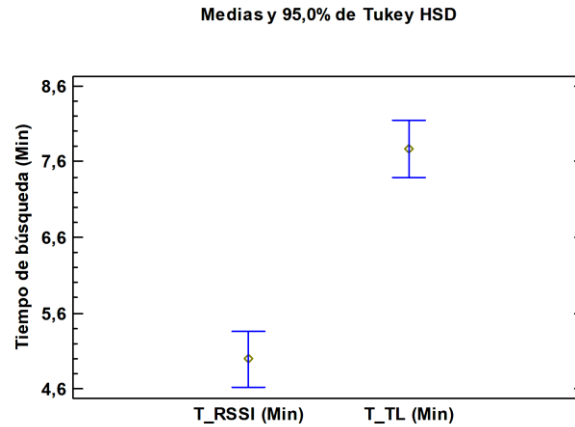


Fig. 52. Comparación de los tiempos de búsqueda con RSSI y TL

Durante el proceso de detección no se logró identificar una etiqueta en el área 4, una etiqueta en el área 6 y una etiqueta en el área 9. Para lograr aparejar la cantidad de muestras en las áreas no identificadas se realizaron experimentos adicionales. Los cuales se resumen en la Tabla 16 .

Tabla 16. Relación de experimentos por área

Área	# de experimentos por área	# de experimentos exitosos
3	9	9
4	10	9
6	10	9
8	9	9
9	10	9
10	9	9
11	9	9
12	9	9
Total de experimentos	75	72

El sistema propuesto es evaluado teniendo en cuenta la siguiente expresión:

$$Busquedas\ positivas(\%) = \frac{\# De\ etiquetas\ encontradas}{\# Total\ de\ etiquetas\ a\ buscar} * 100\% \quad (17)$$

Del total de etiquetas a buscar, $72/75$ etiquetas fueron encontradas satisfactoriamente, es decir un 96%.

5.3 Análisis de resultados

En el estudio de correlación presentado en el capítulo 4.1 se observa que la variable RSSI presente correlación moderada (0.34) con la dirección de la etiqueta objetivo. Sin embargo, la TL presenta correlación fuerte (0.53).

En la caracterización de las variables de RSSI y TL del capítulo 4.1 se observa que, a distancias de un metro e implementación de la TL como variable respuesta, el error en la ubicación de la etiqueta objetivo incrementa. En la Fig. 18 se observa que en el rango de 55° a 130° , la TL se mantiene. Por otro lado, el RSSI como variable respuesta entrega resultados concluyentes a 1, 2 y 3 metros.

Con el método propuesto y variable RSSI se logró detectar, buscar y estimar la dirección de una etiqueta RFID con un error en el ángulo de azimuth de 9.1° y 9.9° en el plano de elevación. Con la TL el error obtenido fue de 13.1° y 13.8° para azimuth y elevación respectivamente. Al comparar la precisión de las variables utilizadas con intervalos de confianza, se observa que con RSSI el error en la ubicación de la etiqueta es menor que con TL.

Al comparar el tiempo de búsqueda del método propuesto con las variables RSSI y TL, se observa que con RSSI el algoritmo completa el proceso de búsqueda en un tiempo promedio de 4.99 minutos. Con TL el tiempo promedio es de 7.77 minutos. La desviación estándar para cada variable es de 1.9 y 2.67 minutos respectivamente.

6 Conclusiones

La presente investigación permitió proponer un método empírico simple, con una sola antena, para búsqueda de objetos en una bodega, utilizando variables como el RSSI y la tasa de lectura.

Con el registro de los tiempos de búsqueda del sistema desarrollado. Aportamos al estado del arte una nueva variable a comparar.

Se creó una plataforma Stand-Alone en donde se verificó, afinó y validó el método. Los procesos de búsqueda con dicha plataforma, no requiere de conocimiento experto para buscar objetos perdidos en bodegas de almacenamiento. Solo se requiere de capacitación y un manual de usuario.

El método y sistema propuesto permitió detectar y encontrar el 96% de las etiquetas escondidas en el laboratorio de Logística del Departamento de ingeniería Industrial de la Universidad del Norte.

El sistema desarrollado se puede implementar en cualquier plataforma de desarrollo, no requiere de capacidad de procesamiento alta, es escalable a cualquier bodega, no requiere de datos de entrenamiento o data grande (Miles de datos) para tomar decisiones, permite direccionar a la etiqueta objetivo en el plano de azimuth y elevación, es de bajo costo, fácil de usar y no se limita a superficies totalmente planas.

Con el desarrollo de la plataforma Stand-Alone y resultados obtenidos, entregamos una herramienta que puede ser utilizada por las pequeñas, medianas y grandes empresas en las tareas de búsqueda de objetos perdidos. Esto con el fin de mejorar los procesos logísticos e indicadores de competitividad del departamento del Atlántico y la Nación.

7 Trabajo futuro

Implementar el método propuesto con lectores RFID de mayor precisión y con capacidad de instalar más de una antena. Incluir dentro de las variables de interés la fase de la señal recibida, ya que el lector utilizado en esta investigación mide la fase de 0° a 180° y con una resolución de 3° . Se recomienda utilizar servomotores más sofisticados.

Para mejorar la precisión del sistema, es de gran importancia Implementar o diseñar una antena con mayor ganancia y patrón de radiación más angosto que el de la antena utilizada.

Los métodos propuestos en conjunto a técnicas de inteligencia artificial son un área amplia de estudio e implementación. Sin embargo, se requiere de un host con alta capacidad de procesamiento.

8 Bibliografía

- [1] S. Flamarique, Manual de gestión de almacenes, Valencia: Marge Books, 2019.
- [2] S. Flamarique, Gestión de existencias en el almacén, Valencia: MARGE BOOKS, 2018.
- [3] Consejo Privado de Competitividad, «Índice departamental de competitividad 2022,» Universidad del Rosario, [En línea]. Available: <https://compite.com.co/indice-departamental-de-competitividad/>. [Último acceso: 16 05 2022].
- [4] Departamento Nacional de Planeación, «Encuesta Nacional Logística 2018,» Observatorio Nacional de Logística, 30 11 2018. [En línea]. Available: <https://onl.dnp.gov.co/es/Publicaciones/SiteAssets/Paginas/Forms/AllItems/Presentaci%C3%B3n%20Encuesta%20Nacional%20Log%C3%A1stica%202018.pdf>. [Último acceso: 22 02 2021].
- [5] U. Aitor, Manual Básico de Logística Integral, Madrid: Ediciones Díaz de Santos S.A, 2013.
- [6] J. Sánchez Ganivet, UF0929 - Gestión de pedidos y stock, España: Editorial Elearning S.L, 2015.
- [7] D. A. Barón Santamaría, *Sistema de monitorización basado en RFID para dispositivos médicos del servicio de cirugía oftalmológica de una institución prestadora de servicios de salud de alta complejidad*, Bucaramanga: Universidad Autónoma de Bucaramanga, 2020.
- [8] Corella, *Prototipo de un sistema automático de facturación con tecnología RFID y una aplicación ANDROID para agilizar el proceso de*

pago en las cajas de un supermercado, Quito: Universidad Tecnológica de Israel, 2018.

- [9] F. Byondi y Y. Chung, «Longest-Range UHF RFID Sensor Tag Antenna for IoT Applied for Metal and Non-Metal Objects,» *Sensors*, vol. 19, nº 24, pp. 1-13, 2019.
- [10] E. Jones y C. Chung, *RFID in Logistic: A Practical Introduction*, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008.
- [11] G. Kumbhakarna y R. Chaudhari, «RFID basedlab inventory management system,» de *International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC)*, Indore, 2018.
- [12] L. Mainetti, L. Patrono y I. Sergi, «A survey on indoor positioning systems,» de *22nd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, Split, 2014.
- [13] P. Brenes, *Técnicas de almacén*, Madrid: Editex, 2015.
- [14] A. Mora y L. Garcia, *Gestión logística en centros de distribución , bodegas y almacenes*, Bogotá: Ecoe Ediciones, 2011.
- [15] El espectador, «Familia Sancela pone en marcha Distribución por Voz,» 10 09 2008. [En línea]. Available: <https://www.elespectador.com/noticias/economia/familia-sancela-pone-en-marcha-distribucion-por-voz/>. [Último acceso: 23 02 2021].
- [16] L. G. Uribe Cruz, *Mejoramiento de los procesos de aprovisionamiento, gestión de inventarios y almacenamiento de la cooperativa multiactiva de servicios solidarios copservir LTDA, sucursal Bucaramanga.*, Bucaramanga: Universidad industrial de Santander, 2015.
- [17] G. Rivera, «La tecnología que mueve el nuevo cedis de Natura,» *Manufactura*, 15 Agosto 2019. [En línea]. Available:

<https://manufactura.mx/quimica-y-farmaceutica/2019/08/15/la-tecnologia-que-mueve-el-nuevo-cedis-de-natura>. [Último acceso: 18 Febrero 2021].

- [18] S. A. Prada Rey y A. B. Rios Rincon, *Propuesta de mejoramiento para la operación de picking en la empresa cintas y botones*, Bogota: Pontificia Universidad Javeriana, 2013.
- [19] S. Sadowski y S. Petros, «RSSI-Based Indoor Localization With the Internet of Things,» *IEEE Access*, vol. 6, nº 10, pp. 30149 - 30161, 2018.
- [20] B. Mathieu y d. S. A. L., «RFID tags: Positioning principles and localization techniques,» de *1st IFIP Wireless Days*, Dubai, 2008.
- [21] B. Dokor, J. Thidarat y C. Panarat, «Indoor Localization Technique using Passive RFID Tags,» *IEEE*, 2009.
- [22] T. H. Dao, Q. C. Nguyen, V. D. Ngo y M. Thuy, «Indoor Localization System Based on Passive RFID Tags,» *IEEE*, 2014.
- [23] T. Deyle, M. Reynolds y C. Kemp, «Finding and Navigating to Household Objects with UHF RFID Tags by Optimizing RF Signal Strength,» de *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, 2014.
- [24] Z. Technologies, «Lectores y Escaneres De Mano,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.zebra.com/us/en/support-downloads/rfid/rfid-handhelds/mc3190-z.html>. [Último acceso: 8 1 2020].
- [25] S. Flamarique, «Gestión de existencias en el almacén,» 2018. [En línea]. Available: <https://books.google.es/books?id=CDd8DwAAQBAJ>. [Último acceso: 21 11 2019].
- [26] C. N. D. Competitividad, «Índice de Desempeño Logístico 2018,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.competitividad.org.do/wp->

content/uploads/2018/07/Índice-de-Desempeño-Logístico-2018-Final.pdf. [Último acceso: 22 11 2019].

- [27] D. N. d. Planeación, «Encuesta Nacional Logística 2018,» Punto aparte, Bogota, 2018.
- [28] C. D. C. D. Barranquilla, «Análisis Del Perfil De Empresas MIPYMES En El Departamento Del Atlantico En El 2016,» Barranquilla, 2016.
- [29] C. J. Vidal Holguín, Fundamentos De Control Y Gestion De Inventarios, Cali: Universidad del valle programa editorial, 2010.
- [30] Mintrabajo, «MiPymes representan más de 90% del sector productivo nacional y generan el 80% del empleo en Colombia,» 26 9 2019. [En línea]. Available: <https://www.mintrabajo.gov.co/prensa/comunicados/2019/septiembre/mipymes-representan-mas-de-90-del-sector-productivo-nacional-y-generan-el-80-del-empleo-en-colombia-ministra-alicia-arango>. [Último acceso: 17 05 2022].
- [31] Technology Solutions UkLtd, «Technology Solutions,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.tsl.com/platform/all-readers/>. [Último acceso: 8 1 2020].
- [32] H. Lehpamer, RFID Design Principles, Norwood: ARTECHHOUSE, 2008.
- [33] J. Zhou y J. Shi, «RFID localization algorithms and applications—a review,» *Springer*, pp. 695 - 707, 2007.
- [34] T. Aleong y K. Fai Pun, «Advancing the Ultra High Frequency RFID in Industrial Applications: A Review,» *The West Indian Journal of Engineering*, vol. 44, nº 1, pp. 40 - 52, 2021.

- [35] M. Bolic, D. Simplot-Ryl y I. Stojmenovic, RFID SYSTEMS RESEARCH TRENDS AND CHALLENGES, Chennai, India: John Wiley and Sons, 2010.
- [36] F. Dowla, Handbook of RF and Wireless Technologies, Burlington: Elsevier, 2004.
- [37] JADAK, «ThingMagic Nano,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.mouser.com/pdfDocs/Nano-Product-Spec-Sheet-09052018.pdf>. [Último acceso: 17 8 2022].
- [38] Thing Magic, «ThingMagic Nano Design Guide,» [En línea]. Available: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ID/Nano_Design_Guide_rev01E.pdf. [Último acceso: 12 10 2021].
- [39] W. Tomasi, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, México: PEARSON, 2003.
- [40] S. Gao, Q. Luo y F. Zhu, Circularly Polarized Antennas, Chennai: John Wiley & Sons, 2014.
- [41] RFMAX, «Circular Polarity RFID Panel Antenna - S9028PCLJ,» [En línea]. Available: https://rfid4ustore.com/content/data_sheet/S9028PCRJ96RTN-specsheet.pdf. [Último acceso: 15 10 2022].
- [42] N. Chandra Karmakar, R. Koswatta, P. Kalansuriya y R. E-Azim, Chipless RFID Reader Architecture, Boston: Artech House, 2013.
- [43] Dipole RFID, «Tags RFID,» [En línea]. Available: <https://www.dipolerfid.es/producto/tag-rfid-smartrac-dogbone-impinj-monza-4d>. [Último acceso: 15 08 2022].

- [44] D. Dobkin, *The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice*, Burlington: ELSEVIER, 2008.
- [45] S. Soo Park, «An IoT application service using mobile RFID technology,» de *2018 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, Honolulu, HI, USA, 2018.
- [46] ARDUINO, «Arduino Mega 2560,» [En línea]. Available: <https://arduino.cl/arduino-mega-2560/>. [Último acceso: 15 08 2022].
- [47] K. Fujimoto y J. James, *Mobile antenna system Handbook*, Norwood: Artech House, 2008.
- [48] A. Moraru, C. Ursachi y E. Helerea, «Near and Far Field Measurements in Industrial Environment of Passive UHF RFID Tags,» de *2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania, 2019.
- [49] «UHF RFID Reader Antenna for Near-Field and Far-Field Operations,» *IEEE*, vol. 10, nº 12381582, pp. 1274-1277, 2011.
- [50] E. Hatem, B. El-Hassan, J.-M. Laheurte, S. Abou-Chakra, E. Colin y C. Marechal, «Study the Estimated Distance Error in Indoor Localization using UHF-RFID,» de *IEEE Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM)*, Jounieh, Lebanon, 2018.
- [51] M. Cremer y A. Pervez, «An Improved Channel Model for Passive UHF RFID Systems,» de *IEEE International Conference on RFID Technologies and Applications*, Malaysia, 2013.
- [52] GS1, «EPC Radio-Frequency Identity Protocols,» 1 07 2018. [En línea]. Available: https://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/gs1-epc-gen2v2-uhf-airinterface_i21_r_2018-09-04.pdf. [Último acceso: 30 05 2022].

- [53] H. Landaluce, A. r. Pe rallo y I. Angulo, «Herramienta de Simulación del Protocolo EPC GEN2 Class1 de RFID,» *Computer Science and Engineering*, pp. 40 - 46, 2012.
- [54] V. Bueno Delgado, J. Vales Alonso, J. González Castaño, E. Egea López y J. García Haro, «Análisis de Mecanismos Anticolisión en Sistemas RFID Pasivos UHF,» 2008.
- [55] J. Rodriguez-Rodriguez, J. Masuch y M. Delgado-Restituto, «An EPC Class-1 Generation-2 baseband processor for passive UHF RFID tag,» de *Research in Microelectronics and Electronics*, Cork, Ireland, 2009.
- [56] S. Huang, O. G. Peen, S. Jose y M. Li, «Localization for Industrial Warehouse Storage Rack Using Passive UHF RFID System,» de *22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Limassol, 2018.
- [57] A. . Fali Oklilas, F. . Halim Ahmad y R. Firsandaya Malik, «Implementation of Landmarc Method with Adaptive K-NN Algorithm on Distance Determination Program in UHF RFID System,» de *International Conference on Data and Software Engineering (ICoDSE)*, Palembang, 2017.
- [58] M. Cremer, U. Dettmar, C. Hudasch, R. Kronberger, R. Lerche y A. Pervez, «Localization of Passive UHF RFID Tags Using the AoAct Transmitter Beamforming Technique,» *IEEE Sensors Journal* , vol. 16, nº 6, pp. 1762 - 1771, 2015.
- [59] Y. Sato, M. Noreikis y Y. Xiao, «Low-Cost Mapping of RFID Tags Using Reader-Equipped Smartphones,» de *2018 IEEE 15th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*, Chengdu, 2018.

- [60] Y. Zhang, L. Xie, Y. Bu, Y. Wang, J. Wu y S. Lu, «3-Dimensional Localization via RFID Tag Array,» de *2017 IEEE 14th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*, Orlando, FL, USA, 2017.
- [61] J. Wang, Y. Wang y X. Guan, «An indoor localization system based on backscatter RFID tag,» de *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Doha, Qatar, 2016.
- [62] S. D'Avella, M. Unetti y P. Tripicchio, «RFID Gazebo-Based Simulator With RSSI and Phase Signals for UHF Tags Localization and Tracking,» *IEEE*, vol. 10, pp. 22150 - 22160, 2022.
- [63] T.-H. Dao, M.-T. Le y Q.-C. Nguyen, «Indoor Localization System using Passive UHF RFID Tag and Multi-Antennas,» de *International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC'14)*, Hanoi, Vietnam, 2014.
- [64] L. Qiu, Z. Huang, N. Wirström y T. Voigt, «3DinSAR: Object 3D localization for indoor RFID applications,» de *IEEE International Conference on RFID (RFID)*, Orlando, FL, USA, 2016.
- [65] Z. Liu, Z. Fu, T. Li, I. H. White y R. V. Penty, «An ISAR-SAR Based Method for Indoor Localization Using Passive UHF RFID System With Mobile Robotic Platform,» *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 5, nº 4, pp. 407 - 416, 2021.
- [66] E. DiGiampaolo y F. Martinelli, «A Robotic System for Localization of Passive UHF-RFID Tagged Objects on Shelves,» *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, nº 20, pp. 8558 - 8568, 2018.
- [67] C. Li, E. Tanghe, P. Suanet, D. Plets, J. Hoebeke y E. D. Poorter, «ReLoc 2.0: UHF-RFID Relative Localization for Drone-Based Inventory

- Management,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1557-9662, 2021.
- [68] L. Mo y C. Li, «Passive UHF-RFID Localization Based on the Similarity Measurement of Virtual Reference Tags,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, nº 8, pp. 2926 - 2933, 2019.
- [69] T. Liu, L. Yang, Q. Lin, Y. Guo y Y. Liu, «Anchor-free backscatter positioning for RFID tags with high accuracy,» de *IEEE INFOCOM 2014 - IEEE Conference on Computer Communications*, Toronto, ON, Canada, 2014.
- [70] M. Agatonovic, E. Di Giampaolo, P. Tognolatti y B. Milovanovic, «Artificial Neural Networks for ranging of passive UHF RFID tags,» de *2013 11th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS)*, Nis, Serbia, 2013.
- [71] C. Wang, Z. Shi, F. Wu y J. Zhang, «An RFID indoor positioning system by using Particle Swarm Optimization-based Artificial Neural Network,» de *International Conference on Audio, Language and Image Processing (ICALIP)*, Shanghai, China, 2016.
- [72] W. Navarro y J. C. Velez, *Mitigación de Interferencias en Sistemas RFID UHF Pasivos durante la Identificación de Objetos Metálicos en Movimiento*, Barranquilla: UNINORTE, 2015.
- [73] Y. d. J. Ternerá, J. C. Velez, M. G. Calle y L. A. Torres, «Algorithm for Detection of Unwanted Tag Reads in Passive UHF RFID Systems for Static Metallic Objects,» *IEEE*, vol. 15, nº 11, pp. 2084 - 2089, 2017.

- [74] J. Hernández y E. Peñaloza, «On the proper use of the Pearson correlation coefficient: definitions, properties and assumptions,» AVFT, Cúcuta , 2018.
- [75] A. Sabadías, Estadística Descriptiva e inferencial, Murcia: COMPOBELL, 1995.
- [76] JADAK , «ThingMagic® Mercury API Programmer Guide v.1.27.3,» 02 2016. [En línea]. Available: https://www.jadaktech.com/wp-content/uploads/2022/08/MercuryAPI_ProgrammerGuide_for_v1.27.3-1.pdf. [Último acceso: 10 10 2022].
- [77] H. Lehpamer, RFID Design Principles, Norwood: ARTECHHOUSE, INC., 2008.
- [78] J. Arvis, L. Ojala, C. Wiederer, B. Shepherd, A. Raj, K. Dairabayeva y T. Kiiski, «Connecting to Compete 2018 Trade Logistics in the Global Economy,» The World Bank Group, Washington, 2018.
- [79] G. Yu. B y S. D. A, «RFID indoor positioning system based on read rate measurment information,» *IEEE*, pp. 546-548, 2013.
- [80] L. Qiongzhen, D. Chunhui, Y. Lei y L. Yunhao, «Revisiting Reading Rate with Mobility: Rate-Adaptive Reading of COTS RFID Systems,» *IEEE*, pp. 1631-1646, 2019.
- [81] N. Chandra, P. Kalansuriya, R. Azim y K. Randika, Chipless Radio Frecuecny Identification Reader Signal Processing., New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- [82] J. A. Hernández Rueda, Antenas: Principios básicos, análisis y diseño, California: UABC, 1998.

