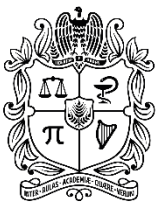


UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Diseño de antenas monopulso para aplicaciones de RFID en sistemas ITS

Carolina Alcaraz Rojas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Ingenierías, Departamento de Eléctrica y Electrónica

Bogotá, Colombia

2021

Diseño de antenas monopulso para aplicaciones de RFID en sistemas ITS

Carolina Alcaraz Rojas

Tesis como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Electrónica

Director (a):

Ph.D. Cesar Pedraza

Codirector (a):

Ph.D. Juan Vicente Balbastre
Ph.D. Felix Vega Stavro

Línea de Investigación:

Telecomunicaciones, Antenas y Propagación

Grupo de Investigación:

Compatibilidad Electromagnética (EMC-UN)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Ingenierías, Departamento de Eléctrica y Electrónica

Bogotá, Colombia

2021

Dedicatoria:

En memoria de mi abuela, Alicia, por su amor eterno e incondicional.

(1926-2019)

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

_____

Carolina Alcaraz Rojas

Fecha 02/09/2021

Ciudad Cartago, Valle.

Agradecimientos

Al grupo de investigación en Compatibilidad Electromagnética (EMC-UN) de la Universidad Nacional de Colombia, cuya investigación previa sobre Sistemas Inteligentes de Transporte e Identificación por Radio Frecuencia (RFID), condujo al planteamiento de este trabajo.

Al profesor Juan Vicente Balbastre por su apoyo, guía y enseñanzas para sacar adelante el desarrollo de esta tesis. Al profesor Félix Vega Stavro y al profesor Cesar Pedraza por sus enseñanzas y por darme la oportunidad de trabajar y desarrollar este trabajo bajo su tutoría.

A mi familia Rojas, por su fuerza y apoyo incondicional en todos los aspectos de mi vida.

Resumen

Diseño de Antenas Monopulso para Aplicaciones de RFID en Sistemas ITS

En este trabajo se presenta un sistema de lectura RFID para la detección y determinación de la dirección de movimiento de etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID) instaladas en vehículos. Este sistema se centra en la adaptación de tecnología de radares secundarios, específicamente, la aplicación de técnicas monopulso utilizados en SSR (Radar Secundario de Vigilancia), a la antena de lectura. La antena monopulso se integra en los lectores RFID pasivos que funcionan en la banda ISM de 915 MHz (Industrial, Scientific and Medical) para aplicaciones de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS).

El sistema proporciona la dirección de movimiento de un objeto que cuenta con una etiqueta RFID instalada, así como la lectura del código único de la etiqueta, por medio de una única antena monopulso e interrogador RFID y un sistema de detección de fase que filtra las señales recibidas por la antena e identifica el cambio de polaridad en el voltaje de la señal lo que permite determinar el sentido de movimiento de la etiqueta.

El sistema se propone para aplicaciones de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), de igual manera puede ser de utilidad en procesos de control de inventarios, logística, sistemas de seguridad y control de acceso.

Palabras Clave: Antena monopulso, RFID, ITS, Detector de fase.

Abstract

Desing of Monopulse Antennas for RFID Applications in ITS Systems

This paper presents an RFID reading system for detecting and determining the direction of movement of radio frequency identification (RFID) tags installed in vehicles. This system focuses on the adaptation of secondary radar technology, specifically, the application of monopulse techniques used in SSR (Secondary Surveillance Radar), to the reading antenna. The monopulse antenna is integrated into passive RFID readers that operate in the 915 MHz ISM band (Industrial, Scientific and Medical) for Intelligent Transport Systems (ITS) applications.

The system provides the direction of movement of an object that has an RFID tag installed, as well as the reading of the unique code of the tag, by means of a single monopulse antenna and RFID interrogator and a phase detection system that filters the signals received by the antenna and identifies the polarity change in the signal voltage which allows determining the direction of movement of the tag.

The system is proposed for applications of Intelligent Transport Systems (ITS), similarly it can be useful in processes of inventory control, logistics, security systems and access control

Keywords: Antenna monopulse, RFID, ITS, Phase detector

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Lista de figuras ..... **XII**

Lista de tablas ..... **XIV**

Lista de Símbolos y abreviaturas ..... **XV**

Introducción **1**

1. Objetivos **5**
1.1 Objetivo General 5
1.2 Objetivos Específicos 5

2. Estado del Arte **6**
2.1 Sistemas RFID 6
2.2 Antenas en Aplicaciones RFID 12
2.3 Antenas Micriostrip 14

3. Sistema Monopulso **16**
3.1 Antenas Tipo Parche 17
3.2 Antena Tipo Caja Resonante 18
3.3 Acoplador Direccional 23
3.4 Antena Monopulso 26
3.5 Modelo Determinista Basado en la Ecuación de Friis 32

4. Sistema de Detección Direccional de Vehículos con Tecnología RFID **37**

5. Validación del Sistema **42**
5.1 Caracterización de Cables de Conexión 43
5.2 Prueba del Detector de Fase 44
5.3 Validación de Voltajes en los Puntos de Conexión 48
5.4 Validación del Sistema Completo 49

6. Conclusiones y recomendaciones **52**

Bibliografía **55**

Lista de figuras

Pág.

Figura 2-1: Componentes de un Sistema RFID. 7
Figura 2-2: Tipos de etiquetas RFID. 8
Figura 2-3: Arquitectura del proyecto PCIV. 11
Figura 2-4: Antena hélice con el plano de tierra en la parte superior y reflector en la parte inferior. 12
Figura 2-5: Arreglo de antena cuasi-Yagi antena hélice con el plano de tierra en la parte superior y reflector en la parte inferior 13
Figura 2-6: Estructura de una antena microstrip rectangular. 13
Figura 2-7: Patrón de radiación característico de una antena microstrip, a) campo eléctrico E y b) campo magnético H 14
Figura 2-8: Tipos de alimentación típicos para antena microstrip a) Alimentación por línea microstrip, b) Alimentación por sonda coaxial 15
Figura 3-1: Diseño de antena tipo parche resonante a 915MHz 17
Figura 3-2: Pérdidas por retorno de antena parche 18
Figura 3-3: Diseño básico de una caja resonante con 2 ranuras 19
Figura 3-4: Optimización del ancho de ranuras con base en la directividad a 915MHz 19
Figura 3-5: Pérdidas por retorno de antena parche 20
Figura 3-6: Pruebas de optimización en la disposición de los puertos de alimentación 21
Figura 3-7: Configuración definitiva de alimentación en los dos pares de ranuras 22
Figura 3-8: Patrón de radiación y relación axial de la antena tipo caja resonante de 4 ranuras cruzadas 22
Figura 3-9: Esquema de sistema monopulso basado en antena caja resonante 23
Figura 3-10: Acoplador estándar Branch-line 23
Figura 3-11: Diseño de acoplador híbrido de 180° 24
Figura 3-12: Pérdidas por retorno del híbrido de 180° 25
Figura 3-13: Isolación del híbrido de 180° 25
Figura 3-14: Pérdidas por inserción en canales 13 y 14 26
Figura 3-15: Pérdidas por inserción en canales 23 y 24 26
Figura 3-16: Esquema de la Antena Monopulso 27
Figura 3-17: Patrones de radicación de la antena monopulso 28
Figura 3-18: Prototipo de Antena Monopulso 28
Figura 3-19: Pérdidas por retorno en el canal ∑ 30

Figura 3-20: Pérdidas por retorno en el canal Δ 30
Figura 3-21: Patrón de radiación de ganancia por el canal ∑ 31
Figura 3-22: Patrón de radiación de ganancia por el canal Δ 31
Figura 3-23: Escenario de simulación del modelo determinista 32
Figura 3-24: Resultados del modelo determinista en el canal ∑ 33
Figura 3-25: Resultados del modelo determinista en el canal Δ 34
Figura 3-26: Resultados del modelo con separación constante y diferentes velocidades para el canal ∑ 34
Figura 3-27: Resultados del modelo con separación constante y diferentes velocidades para el canal Δ 35
Figura 3-28: Probabilidad de detección para un tag pasando a una distancia de separación “y” de 2m a 50 km/h y para varios valores de umbrales de etiquetas. 36
Figura 4-1: Esquema del sistema de detección de dirección vehicular. 37
Figura 4-2: Esquema del sistema de detección de dirección vehicular. 38
Figura 4-3: Esquema del sistema de detección por módulos 39
Figura 4-4: Esquema del módulo de detección de polaridad 39
Figura 4-5: Esquema de funcionamiento del sistema de detección de dirección vehicular 41
Figura 5-1: Esquema para la validación de módulo de detección de fase 45
Figura 5-2: Señal nominal y de sintonización de tensión del VCO 46
Figura 5-3: Señal de salida del mezclador (58.19MHz) y señal de salida del VCO (857.53MHz) 46
Figura 5-4: Cambio de polarización del voltaje a la salida del detector de fase 47
Figura 5-5: Señal a la salida del detector de fase en un cambio de polarización 47
Figura 5-6: Esquema del sistema de detección de dirección de etiquetas RFID 48
Figura 5-7: Circuito de conexión del sistema completo 48
Figura 5-8: Prueba de lectura a 3m de distancia 50
Figura 5-9: Interferencias en la salida del detector de fase al paso de la etiqueta (Izquierda - Derecha, Derecha - Izquierda) 50
Figura 5-10: Interferencias en la salida del detector de fase al paso de la etiqueta ... 50

Lista de tablas

Pág.

Tabla 5-1: Componentes utilizados en el sistema. 43
Tabla 5-2: Pérdidas insertadas por los cables de conexión utilizados 44
Tabla 5-3: Prueba inicial, distancias de lectura efectivas variando frecuencia y potencia de antena de transmisión Tx 47
Tabla 5-4: Prueba de verificación de voltaje en puntos de conexión de dispositivos ... 49
Tabla 5-5: Resultados de lectura y detección de fase a diferentes distancias de la etiqueta. 51
Tabla 5-6: Valores máximos de voltaje a la salida del detector de fase. 51

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
W	Ancho	m	
L	Largo	m	
t	Grosor del metal	m	
h	Ancho de sustrato dieléctrico	m	
E	Campo Eléctrico	N/C	
H	Campo Magnético	$^{N}/_{Am}$	
F	Frecuencia	Hz	1/T
D	Directividad	dBi	
G	Ganancia	dBi	
$P_{r,tag}$	Potencia recibida por la etiqueta	dBm	Ec. 3.1
P_r	Potencia recibida por el lector	dBm	Ec. 3.2 y 3.3
V_Δ	Tensión recibida en el canal Δ	V	Ec. 3.4
n	Serie de interrogatorio de etiquetas	1	Ec. 3.5
t_{ob}	Tiempo de observación de etiqueta	s	
$P_{d,C}$	Probabilidad acumulada de detección	%	Ec. 3.6

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
ε_r	Permitividad relativa	1	
$\sum$	Canal Suma	1	
Δ	Canal Diferencia	1	
λ	Longitud de onda	1	c/F

Abreviaturas

Abreviatura	Término
EPC	Código de Producto Electrónico (*Electronic Product Code)*
ITS	Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transportation Systems*)
PD	Detector de Fase (Fase Detector)
PSR	Radares Primarios de Vigilancia (*Primary Surveillance Radar*)
RFID	Identificación por Radio Frecuencia (*Radio Frequency Identification*)
SSR	Radares Secundarios de Vigilancia (*Secondary Surveillance Radar*)
VCO	Oscilador Controlado por Tensión (Voltage-Controlled Oscillator)

Introducción

La implementación de diferentes tecnologías en aras del conocimiento del flujo vehicular en una ciudad es la base de los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS por sus siglas en inglés, Intelligent Transport Systems) urbanos. Estos han mejorado el control y seguimiento de los medios de transporte, permitiendo conocer el flujo de circulación en una ciudad y generar estadísticas para que sirvan como base en la toma de decisiones estratégicas sobre la regulación de tráfico. Esta información puede ser recopilada de diferentes maneras: usando bucles inductivos enterrados, cámaras con software de reconocimiento, o incluso manualmente. Los bucles enterrados pueden proveer información acerca del sentido, la velocidad e incluso la categoría del vehículo cruzando sobre él, pero estos son sistemas invasivos y se ven frecuentemente afectados debido al deterioro de las capas externas del pavimento de la carretera [1, 2]. Por otra parte, las cámaras que operan bajo cualquier tipo de clima pueden ser demasiado costosas, especialmente si se utiliza con propósitos de identificación de placas vehiculares [3].

La tecnología de Identificación por Radio Frecuencia (RFID) está siendo cada vez más utilizada en ITS. Las etiquetas y lectores RFID suelen utilizarse en aplicaciones de tráfico para limitar el acceso a áreas restringidas a residentes, en sistemas de transporte público y en sistemas de pago de peajes para evitar congestiones [4, 5]. Por lo tanto, estas etiquetas podrían también proveer información acerca del flujo vehicular a subsistemas de gestión vehicular.

Un sistema RFID pasivo convencional con una sola antena puede detectar y registrar el Código del Producto Electrónico (EPC por sus siglas en inglés) de una etiqueta pegada en algún lugar del vehículo, pero la dirección del movimiento del vehículo no se puede determinar con facilidad, a menos que se empleen sistemas complementarios como sensores o se instalen lectores ubicados en diferentes lugares o con dos antenas de lectura.

En el 2008, Wisanmongkol propuso un sistema para detectar la entrada o salida de vehículos de transporte de aves de corral a puntos de control animal con el uso de parejas de sensores separadas 12 metros de distancia, correspondiente a la longitud promedio de los vehículos de transporte de dicho animal [6]. Al activarse la primera pareja de sensores simultáneamente, se originaba la lectura RFID y se desactivaba al pasar por la segunda pareja, de esta manera el sistema también lograba proporcionar la dirección de movimiento del vehículo. Este sistema disminuía el consumo energético en las lecturas, pero no arrojaba un porcentaje de 100% de eficiencia debido a los errores que introducían los vehículos que no alcanzaban la longitud promedio de 12 metros o que tenían espacios a la altura de los sensores impidiendo que la señal retornara.

Los sistemas RFID con doble antena se han utilizado también en aplicaciones de inventarios. Oikawa (2009) desarrolló una metodología para un sistema RFID de dos antenas separadas que estimaba la dirección de movimiento, entrada o salida, de una etiqueta instalada en un objeto para aplicaciones de inventarios, utilizando la diferencia de tiempo en las lecturas realizadas por las dos antenas. La metodología utilizada en este trabajo fue calculada y comprobada en mediciones experimentales, demostrando su viabilidad [7]. Este método es capaz de juzgar la dirección de movimiento de las etiquetas individualmente y dar una buena precisión si se utiliza el algoritmo propuesto.

Por tal razón, se busca la implementación de un sistema de lectura RFID que simplifique la complejidad del sistema para la detección del sentido de movimiento de la etiqueta con el uso de una única antena. Para esto, se considera la aplicación de técnicas monopulso utilizadas en Radares Secundarios de Vigilancia (SSR por sus siglas en inglés).

Las antenas monopulsos se emplean ampliamente en aplicaciones donde las características físicas como tamaño y peso, así como, los factores de rendimiento y la facilidad de fabricación de las antenas son de vital importancia. Por lo cual, se han realizado varias propuestas de diseños de sistemas monopulso recientemente [8, 9], donde se proponen antenas de bajo costo con estructuras simples de fabricación alimentando bidireccionalmente antenas microstrip (parche) y lograr así, el patrón suma y diferencia. Este tipo de antenas son comúnmente usadas en aplicaciones de control de tráfico aéreo [10], seguimiento de misiles y de vehículos aéreos no tripulados [11].

Diferentes diseños de antenas se han optimizado en otras aplicaciones para lograr minimizar su tamaño y facilidad de fabricación.

En el 2014, se diseñó una antena monopulso basándose en un arreglo de cuatro antenas Yagui acopladas a un anillo híbrido de 180°, produciendo los patrones de radiación suma y diferencia, en la frecuencia de trabajo de 10 GHz [12]. Esta antena presentó una excelente ganancia y una estructura compacta. También se han realizado diseños de antenas monopulso con arreglos de parches radiantes de fabricación simple; en el 2003 Kim y Chang, fabricaron una antena que consistía de un arreglo de 1x8 parches acoplados a un anillo hibrido de 180°, presentando una ganancia de 13 dBi en la frecuencia de trabajo de 30 GHz [8].

Considerando lo anterior, se propone la integración de una antena monopulso en lectores de radiofrecuencia para su implementación en Sistemas Inteligentes de Transporte, lo cual, permitirá detectar e identificar el vehículo a través del canal suma, como en los sistemas RFID convencionales, mientras que la polaridad de la señal recibida a través del canal diferencia puede ser utilizada para determinar el sentido del movimiento del vehículo con respecto a la ubicación de la antena.

Los sistemas de detección de movimiento basados en RFID usan comúnmente tecnologías complementarias o duplican el número de antenas para lograr la identificación de la dirección de movimiento del objeto. Con el uso de una única antena optimizada con técnicas de radar bien establecidas y de tamaño reducido, el sistema de antena monopulso integrado en un lector RFID pasivo, podría tener diferentes aplicaciones como en el inventariado de objetos, la habilitación de la entrada o salida a áreas restringidas y en aplicaciones ITS para obtener estadísticas, hacer cumplir la ley en cuanto a la dirección permitida de circulación y actualizar las políticas de tráfico en un área determinada

En el 2015, la proponente de esta tesis publicó un abstract para congreso internacional donde se proponía el mejoramiento de aplicaciones ITS de tecnología RFID mediante técnicas de radar [13]. Adicionalmente, presentó un artículo en una conferencia nacional, sobre el diseño y fabricación de un sistema monopulso para aplicaciones RFID [14]. Posteriormente, se dedicó un artículo de conferencia internacional a la publicación de las medidas y resultados obtenidos con el prototipo del sistema [15]. Finalmente, en el 2018

se presenta un artículo en Boston, EEUU, acerca de una antena tipo caja resonante para aplicaciones SIT [16]. Todo este trabajo investigativo fue presentado en el 2019 como trabajo de fin de máster para la doble titulación del Master en Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universitat Politècnica de València [17] y la Maestría en Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia.

Este trabajo presenta el estado del arte de sistemas RFID y de las antenas utilizadas en dichas aplicaciones. Posteriormente, se presenta la metodología para el diseño de la antena monopulso y el modelo determinista que evalúa el funcionamiento de la antena acoplada a un sistema RFID. Después, se presenta el funcionamiento del sistema propuesto para la detección de dirección de movimiento de vehículos. Finalmente, se presenta el acoplamiento de los módulos y la validación del sistema completo de detección.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar y verificar el sistema para la detección de la dirección de movimiento de etiquetas RFID pasivas por medio de una antena monopulso integrada en un sistema de lectura RFID para aplicaciones ITS.

1.2 Objetivos Específicos

- Diseñar una antena monopulso con una frecuencia de trabajo de 915MHz y que genere los patrones de radiación suma y diferencia.

- Diseñar un prototipo de hardware que permita la detección de fase de las señales suma y diferencia, entregadas por la antena.

- Realizar la integración de la antena monopulso, el sistema de detección de fase y el sistema de lectura RFID.

- Validar el funcionamiento del sistema por medio de pruebas de laboratorio.

2. Estado del Arte

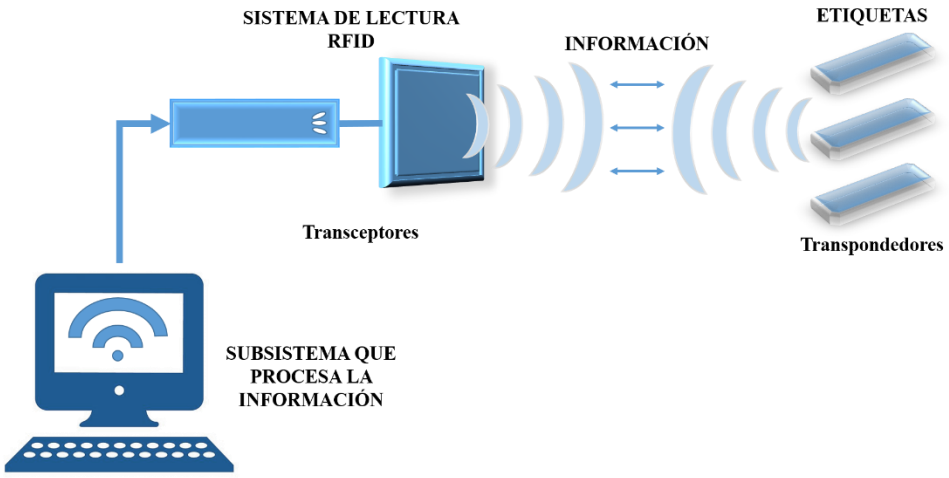
2.1 Sistemas RFID

El propósito fundamental de los sistemas que trabajan con tecnología RFID es transmitir la identidad del objeto que tiene un Tag o etiqueta RFID instalada, mediante la lectura del Código Electrónico del Producto (EPC por sus siglas en inglés). Este código es un número único asignado a cualquier objeto electrónico con el objetivo de realizar una identificación y seguimiento de este. La identificación del EPC es posible gracias a la retro dispersión o reflexión de ondas de radio; cuando una fuente emite ondas de radio estas son reflejadas por las etiquetas, esta reflexión transporta el EPC de la etiqueta y es identificado por el lector para su posterior tratamiento según sea la aplicación.

El despliegue actual de la tecnología RFID depende de los requerimientos y limitaciones de la aplicación en la que será usada, aunque su funcionamiento es sencillo y es básicamente el mismo en cualquiera de los casos, el uso de los sistemas RFID se ha extendido y diversificado, desarrollando aplicaciones que mejoran continuamente el estilo de vida cotidiano, a través de los sistemas RFID, podemos acceder a sistemas de transporte públicos y privados, validar o revocar permisos de entrada a un edificio, seguimiento de paquetes y hasta para realizar inventarios.

Un sistema RFID consta de etiquetas RFID (Tags) o transpondedores, sistema de lectura RFID o transceptores y sistema de procesamiento de datos, (Figura 2-1). Las etiquetas RFID generan o reflejan una señal de radiofrecuencia que transporta los datos del EPC y otros datos de interés acerca del objeto en el que se encuentran instaladas, los cuales han sido previamente grabados en la ella, la cual, contiene una memoria no volátil y cuenta con un sistema de codificación de seguridad para que dicha información no sea cambiada por personal ajeno al desarrollo de la aplicación. La señal emitida por la etiqueta es recibida por el lector RFID, el cual es el encargado de interpretar la información para posteriormente pasarla para su procesamiento de datos y que sea tratada conforme a las necesidades de la aplicación.

Figura 2-1: Componentes de un Sistema RFID.



Según sean los requerimientos para el sistema RFID se pueden utilizar tres tipos de etiquetas: activas, pasivas y semipasivas, diferenciadas elementalmente por su fuente de alimentación y capacidad de respuesta, (Figura 2-2).

Los tags activos, son aquellos que tienen su propia fuente de energía que le permite transmitir la señal de respuesta al lector RFID, el alcance de la señal de radio en las etiquetas activas pueden alcanzar distancias de lectura entre unos centímetros hasta de 80 metros y la duración de las baterías depende del tiempo y la cantidad de interrogaciones o peticiones para que envíe su ID, teniendo en cuenta que aunque no hayan interrogaciones la batería sufrirá una degradación por lo que en algún momento dejará de funcionar y se tendrá que hacer su reemplazo.

Las etiquetas pasivas, por el contrario, no poseen ninguna fuente de alimentación, por lo que la energía que las alimenta proviene directamente de la señal transmitida por el lector. Esta señal induce una corriente eléctrica mínima, pero es suficiente para lograr el funcionamiento del transpondedor que genera y transmite la respuesta. Las distancias de operación en los sistemas RFID con etiquetas pasivas se encuentran desde unos centímetros hasta un par de metros.

Por otra parte, las etiquetas semipasivas también poseen una fuente de energía propia, pero a diferencia de las activas, solo utilizan esta energía como alimentación de su circuito

interno y no para propagar la señal hacia el lector, por lo tanto, la transmisión de la señal se da de manera semejante a la de una etiqueta pasiva.

De allí, que los tipos de sistemas RFID sean conocidos también como activos, pasivos y semipasivos. Por lo tanto, el tipo de etiqueta utilizada afecta la distancia de lectura, presentando mayores distancias los sistemas con etiquetas activas que las pasivas. Sin importar estas diferencias se puede encontrar en el mercado todo tipo de sistemas activos, pasivos y semipasivos que trabajan a diversas frecuencias dentro del rango de las radiofrecuencias

La frecuencia de trabajo de los sistemas RFID son comúnmente bandas libres, encontrando sistemas que trabajan en rangos desde KHz hasta GHz. Las potencias de los lectores normalmente están reguladas por los fabricantes teniendo en cuenta las recomendaciones de las agencias de comunicaciones y a normatividades de la organización mundial para la salud OMS en lo que respecta a las radiaciones electromagnéticas.

Diferentes presentaciones se encuentran en las etiquetas RFID, desde etiquetas en forma de laminilla adhesiva, hasta tags RFID robustos con protección adicional que se instalan en contenedores para realizar la trazabilidad en los puertos, esta gran variedad de radomos hace que las etiquetas tengan una alta versatilidad en diferentes tipos de soluciones.

Figura 2-2: Tipos de etiquetas RFID.

Nombre de la fuente: [18] Smily, S. “The Best RFID Tag For Your Aplplicattion: 7 key Factors to consider”

Por consiguiente, los sistemas RFID convencionales pueden detectar la presencia de una etiqueta previamente instalada en un objeto, independientemente del tipo de alimentación que utilice la etiqueta. Sin embargo, posee algunas limitantes, como determinar cuando el objeto se encuentra en movimiento; los transceptores, por sí solos, no están en capacidad de determinar la dirección en la que se desplaza dicha etiqueta. Existen sistemas patentados que utilizan tecnologías adicionales a los lectores RFID para la detección del sentido de movimiento de las etiquetas instaladas en los objetos.

La técnica utilizada en el 2016 en la patente [19] consta de varios lectores RFID además de dispositivos de captura de imágenes que realiza videos del entorno y un procesador que analiza el video capturado para detectar y ubicar el movimiento dentro del entorno. Si se detecta movimiento, el procesador modifica el funcionamiento del lector RFID que está próximo a la ubicación del movimiento, por ejemplo, aumentando o disminuyendo la velocidad de interrogación.

La patente [20] es un sistema que comprende un sensor optoelectrónico para la detección de la dirección de movimiento del objeto, un dispositivo de lectura RFID y una unidad de evaluación de las señales obtenidas de los sistemas. Esta invención se aplica a portales de acceso vehicular. Este trabajo se caracteriza porque el sensor optoelectrónico está configurado para detectar un campo previo del portal en un plano bidimensional horizontal y porque la unidad de evaluación es un componente integral del sensor y del dispositivo de lectura RFID.

La técnica utilizada en [21] incluye un procesador configurado para emplear técnicas de radar de apertura sintética en la señal de retorno, el cual consiste en combinar mediante algoritmos la información obtenida en varios barridos de la antena para recrear un solo "barrido virtual". De tal manera que, de acuerdo con el tiempo de detección en el barrido de la señal de retorno, es posible localizar la posición y dirección de movimiento de la etiqueta.

La investigación realizada por Bieber en 2012 [22], utiliza un método y un sistema para determinar la distancia, velocidad y dirección de movimiento de una etiqueta RFID. En el que un dispositivo de lectura RFID transmite una señal portadora durante algunas fases para interrogar a la etiqueta. Un módulo adicional de radar transmite simultáneamente una

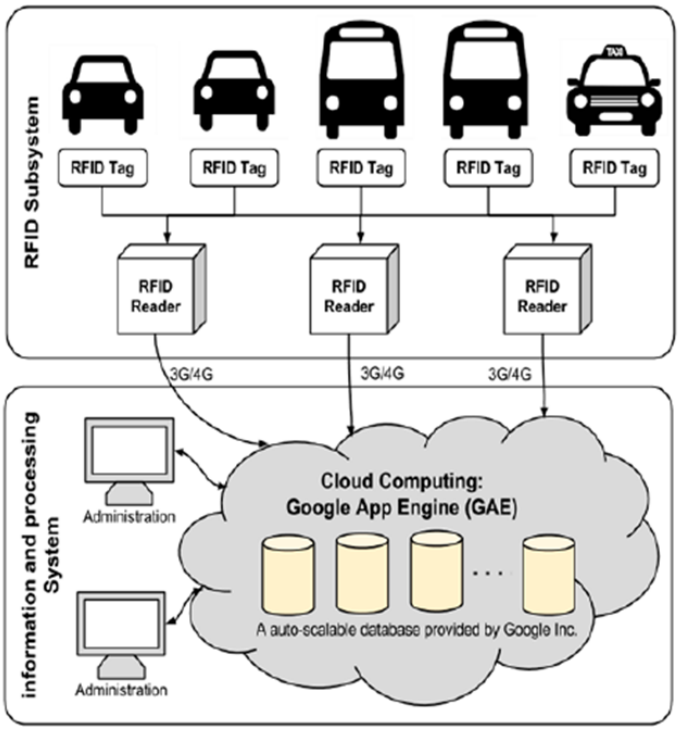
señal de radar que es recibida y reflejada por el TAG. La posición de la etiqueta RFID se puede determinar a partir de la señal de radar recibida y reflejada.

Otro método patentado [23], utiliza una antena RFID de referencia y utilizando una base de datos cronológicos de lectura de etiquetas se aplican filtros Indicadores de la Intensidad de la Señal Recibida (RSSI). De tal manera que, si una etiqueta está en movimiento se aplican uno o más filtros estáticos para conocer si hay un cambio en su estado.

En el área de los Sistemas Inteligentes de Transporte se han implementado también diferentes técnicas complementarias a los sistemas RFID con el objetivo de identificar la dirección de movimiento de los vehículos. En el 2014, la proponente de este trabajo participó en el desarrollo de un proyecto que aplicaba la tecnología de lectura RFID para el control de vehículos de transporte público en la ciudad de Chía, Colombia [24].

El proyecto llamado Plataforma para el Control Inteligente de Vehículos (PCIV), fue desarrollado por el grupo de investigación de compatibilidad electromagnética de la Universidad Nacional de Colombia y consistía en una red de lectores RFID ubicados a lo largo de la avenida tanto de ida como de regreso, en total se instalaron 7 lectores y aproximadamente 100 etiquetas pasivas en los autobuses intermunicipales, (Figura 2-3). El objetivo era recopilar los EPC de las etiquetas instaladas en los autobuses que se desplazaban desde municipio de Chía hasta la calle 170 de la ciudad de Bogotá y de regreso, para poder observarlos en la plataforma desarrollada para su seguimiento en tiempo real.

Figura 2-3: Arquitectura del proyecto PCIV.



Nombre de la fuente: [23]. Urbano, O.; Silva, D.; Vega, F. and Pedraza, C. "Design and benchmarking of an intelligent RFID reader for vehicular traffic monitoring"

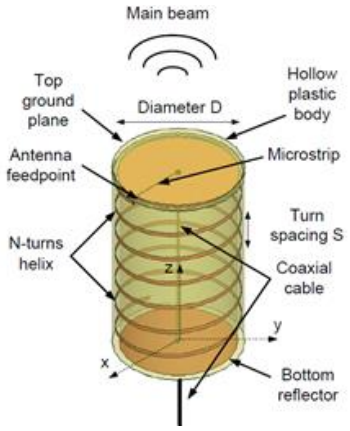
Los sistemas de lectura se encontraban conectados a un aplicativo en línea donde se podía consultar una base de datos que relacionaba la etiqueta y las características adicionales del autobús como; nombre de la empresa, número del autobús y placa de identificación. De esta manera, cuando se realizaba la lectura de una etiqueta, además, de saber las características del autobús también se podía determinar el lugar de la lectura y el tiempo de recorrido de un punto a otro. Esta información era compartida con la secretaria de tránsito municipal con lo cual podían evaluar la calidad en la prestación del servicio, en lo que respecta al cumplimiento del recorrido establecido y de los tiempos regulatorios para la frecuencia de las rutas. La plataforma permitía, además, el cálculo de la velocidad promedio del vehículo teniendo en cuenta la distancia entre lectores y el tiempo entre las lecturas. El sistema RFID por sí solo no permitía la identificación de la dirección de circulación vehicular por lo que se hizo necesario el uso de varios lectores a lo largo de la vía, tanto de ida como de vuelta, y así, identificar si el autobús viajaba de Chía a Bogotá o viceversa, según el orden cronológico y secuencial de las lecturas registradas en el

sistema. A partir de este proyecto surge la idea de realizar un sistema de tecnología RFID que permita la identificación del sentido de movimiento vehicular con el uso de un único lector y una única antena.

2.2 Antenas en Aplicaciones RFID

Diferentes tipos de antenas han sido propuestas como lectoras para aplicaciones RFID. En [25] presentan una propuesta de antena basada en una hélice con el plano de tierra en la parte superior y el reflector en la parte inferior, cuyos diámetros son de aproximadamente el mismo que el diámetro de la propia hélice. La antena se alimenta por medio del cable coaxial a través de la abertura en la parte inferior del reflector. La antena tiene sección transversal uniforme y ofrece una alta ganancia, ancho de banda de impedancia amplio, y una buena polarización circular. La presencia del reflector en la parte inferior permite aumentar la ganancia de la antena y protegerla de la radiación del lóbulo trasero (Figura 2-4).

Figura 2-4: Antena hélice con el plano de tierra en la parte superior y reflector en la parte inferior.

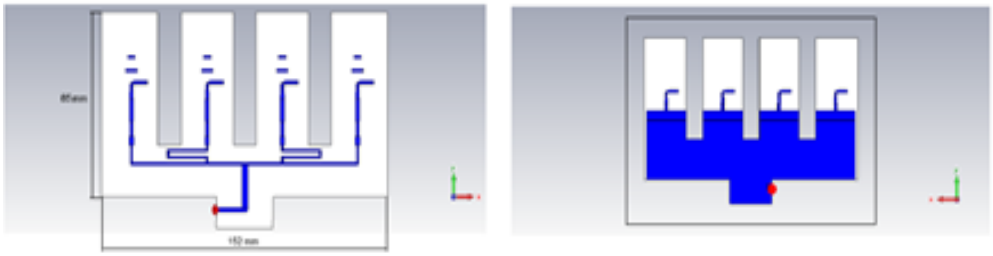


Nombre de la fuente: [25]. Nikitin, P. V. and Rao, K.V.S. "Helical antenna for handheld UHF RFID reader"

Otro tipo de antena se diseñó sobre la base de la antena dipolo-microstrip-Yagi-Uda [26]. Una antena Yagi-Uda tradicional consiste en un elemento activo, un reflector, y uno o más

directores. La antena cuasi-Yagi consiste en un director dipolo impreso, y un dipolo controlador alimentado por una franja de transición de microstrip uniplanar a coplanar (Figura 2-5).

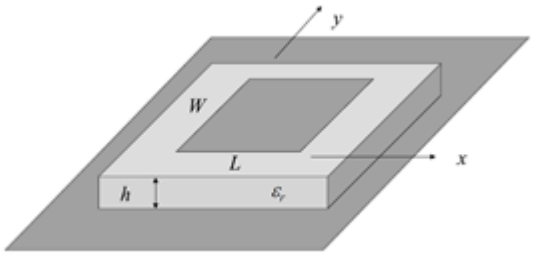
Figura 2-5: Arreglo de antena cuasi-Yagi antena hélice con el plano de tierra en la parte superior y reflector en la parte inferior



Nombre de la fuente: [26]. Franciscatto, B. R.; Vuong, T. P.; Trang, T. T. and Defay, C. "Microstrip-fed quasi-Yagi antenna array for a different DSRC system"

El tipo de antenas más apropiadas en las aplicaciones RFID son las antenas microstrip planar, debido a sus características físicas y rendimiento presentan las mejores condiciones para el desarrollo como parte de un lector de RFID, además de ser la antena más utilizada en este campo. La antena microstrip es una de las antenas más convenientes para trabajar en el rango de las microondas. Consiste en un metal (parche) de largo L, ancho W y grosor t. El metal se encuentra situado sobre un sustrato dieléctrico de ancho h y con su parte inferior sobre un plano referenciado a tierra (Figura 2-6).

Figura 2-6: Estructura de una antena microstrip rectangular.



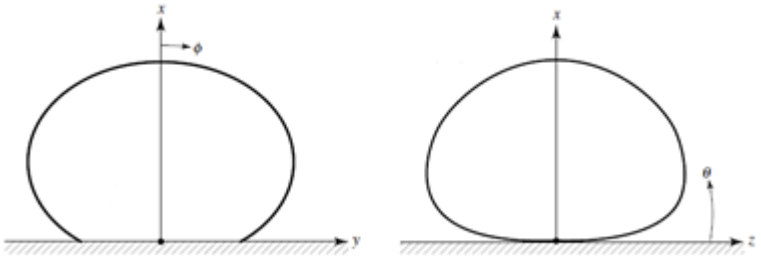
Nombre de la fuente: [27]. Jackson, D.R. “Introduction to Microstrip Antennas”

2.3 Antenas Micriostrip

Las antenas microstrip también llamadas antenas tipo “parche” son ampliamente utilizadas en aplicaciones donde las características físicas como el tamaño y el peso, así como, el rendimiento y facilidad de instalación son de alta importancia, por ejemplo, en implementaciones satelitales, misiles y comunicaciones inalámbricas. El ancho del sustrato y la permitividad eléctrica varían y se ajustan dependiendo del tipo de aplicación y sus requerimientos. Para encontrar los parámetros ideales de la antena se debe tener en cuenta que el material de construcción debe de contar con una baja permitividad pero adicionalmente el grosor del sustrato debe ser mayor a la longitud de onda que se va a emitir.

El parche radiante puede tener diferentes configuraciones geométricas, las más comunes son el cuadrado, el rectángulo, la tira delgada (dipolo) y el círculo, debido a la facilidad que permite su análisis y su fabricación. Estas configuraciones pueden utilizarse como arreglos de elementos dependiendo del tipo de aplicación y, además, obtener mejoras en la eficiencia de la antena. Las polarizaciones lineales y circulares se pueden lograr con cualquiera de las configuraciones individuales o conjuntas de antenas microstrip [28].

Figura 2-7: Patrón de radiación característico de una antena microstrip, a) campo eléctrico E y b) campo magnético H

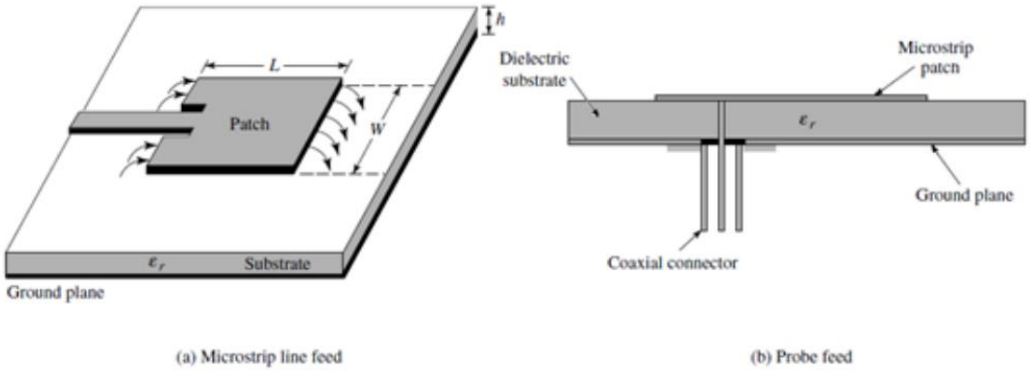


Nombre de la fuente: [28]. Balanis, C. A. “Antennas Theory: Analysis and design”, 3th Edition, Wiley, 2005.

La antena parche presenta un patrón de radiación omnidireccional, aunque la potencia radia mayormente en dirección perpendicular a la estructura del parche. Los lóbulos posteriores que se presentan en este tipo de antena son pequeños y pueden ser despreciados en comparación con el lóbulo principal, esto debido a que el plano de tierra es de dimensiones finitas, (Figura 2-7).

Los métodos de alimentación implementados comúnmente en este tipo de antena son la línea microstrip y la sonda coaxial, (Figura 2-8). La línea microstrip es fácil de fabricar, bastante simple de modelar y permite obtener fácilmente ajustes en la entrada. La sonda coaxial es fácil de fabricar y de ajustar, sin embargo, tiene un ancho de banda estrecho y es más difícil de modelar para sustratos gruesos.

Figura 2-8: Tipos de alimentación típicos para antena microstrip a) Alimentación por línea microstrip, b) Alimentación por sonda coaxial



Nombre de la fuente: [27] Jackson, D.R. “Introduction to Microstrip Antennas”, [28]. Balanis, C. A. “Antennas Theory: Analysis and design”, 3th Edition, Wiley, 2005.

La antena microstrip o tipo parche es la base para la implementación de la antena monopulso del sistema RFID propuesto para la detección de la dirección vehicular, debido a su facilidad de diseño, fabricación, economía y buen rendimiento.

3. Sistema Monopulso

La configuración de los sistemas monopulso, no son más que un arreglo de antenas alimentadas con una configuración específica, por donde se puede recibir una señal de alimentación en fase o en desfase, lo que genera dos patrones de radiación simultáneos. Una señal de entrada en fase genera un patrón de radiación en sumatoria, mientras que con una alimentación en desfase genera un patrón en diferencia que permite identificar a través de la comparación de fases la dirección de llegada de la señal radiada por un receptor u objetivo, en este caso las etiquetas RFID.

Los sistemas monopulsos tienen su origen en los sistemas de seguimiento o radares de rastreo (Tracking Radars) a finales de la década de los 70 y ha sido adaptado desde su uso en radares de vigilancia hasta diferentes aplicaciones en la actualidad [29]. En Radares Primarios de Vigilancia (Primary Surveillance Radar, PSR), todos los elementos de la antena se alimentan en fase y se suman los patrones de radiación; mientras que en los Radares Secundarios de Vigilancia (Secondary Surveillance Radar, SSR) se transmite un impulso en fase por el canal suma y uno en desfase por el canal diferencia.

Para la implementación del sistema monopulso propuesto se diseñaron dos tipos de antenas: la primera es una antena tipo parche con dimensiones simétricas. La segunda es una antena de tipo caja resonante con ranuras cruzadas. Después se diseñó el acoplador direccional para alimentar las antenas con un desfase de 180°. Finalmente, se presenta el acoplamiento de la antena e híbrido que forman el prototipo de la antena monopulso. Los diseños y simulaciones se realizaron en CST Studio Suite 2014.

3.1 Antenas Tipo Parche

La antena microstrip o parche se diseñó con el objetivo de formar un arreglo de 2 antenas para ser alimentadas por medio de un acoplador direccional que inserte 180° de desfase entre ellas, por lo cual se procedió con el diseño de una antena parche que posteriormente será duplicada y conectada simétricamente entre sí, formando de esta manera la antena monopulso.

Esta antena consiste en un metal ubicado sobre un sustrato dieléctrico con su parte inferior sobre un plano referenciado a tierra. La antena tiene un área resonante de $\lambda/2 \times \lambda/2$ (λ=0.328m) alimentada por medio de una línea de transmisión conectada a un adaptador de impedancia para obtener mejores resultados. El diseño se muestra en la Figura 3-1 y su simulación en la Figura 3-2. La antena se configuró para una frecuencia de trabajo de 915MHz donde obtuvo pérdidas por retorno por debajo de -10.72 dB, presentando un buen comportamiento para el diseño de la antena monopulso.

Figura 3-1: Diseño de antena tipo parche resonante a 915MHz

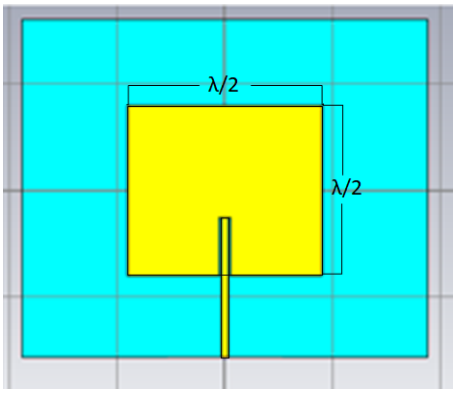
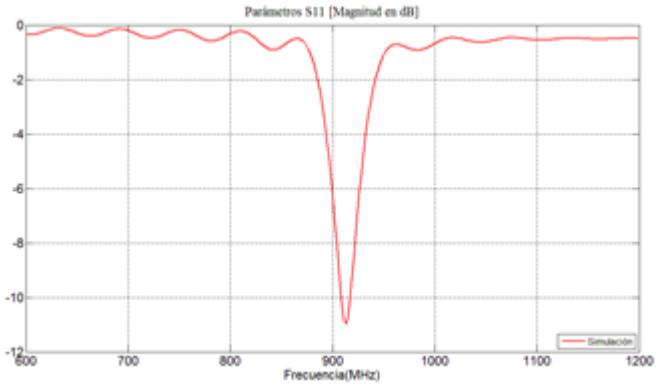


Figura 3-2: Pérdidas por retorno de antena parche



3.2 Antena Tipo Caja Resonante

Las antenas para tecnologías RFID requieren diseños compactos, por lo que las antenas con ranuras se consideran una excelente opción para este tipo de aplicaciones, debido a su estructura simple, ancho de banda amplio, buena eficiencia de radiación y fácil integración en el sistema. Además, este tipo de antenas deben permitir la identificación de la etiqueta en todo momento, por lo que es conveniente que estas antenas tengan polarización circular.

Para lograr una miniaturización de una antena plana se considera comúnmente la técnica de inserción de ranuras. Este tipo de técnica se puede aplicar con diferentes geometrías, tales como ranuras circulares, elípticas, triangulares, ranuras en U, ranuras en L o ranuras en cruz X, entre otras [30]. Con base en esto se diseñó una antena tipo caja resonante con ranuras cruzadas en un ángulo de 90 ° entre sus ejes, alimentada ortogonalmente con puertos discretos para obtener una polarización circular.

El campo irradiado por una ranura en una lámina conductora plana es equivalente al campo irradiado por un dipolo cilíndrico de las mismas dimensiones, con la excepción de que el campo eléctrico se reemplaza por el magnético y la resonancia óptima es 3λ / 4 en lugar de λ / 2 del dipolo cilíndrico [31].

El diseño de la antena se llevó a cabo realizando en primer lugar el diseño de una caja de cobre resonante con solo 2 ranuras y con un espesor de pared de 35 µm, la cual, presentó una ganancia de 5,02 dBi, Figura 3-3. La longitud de las ranuras es 3λ / 4, que es la longitud de resonancia óptima de la ranura, porque a una longitud de λ / 2 la ranura tendría una anti resonancia debido a su alto valor de impedancia. El ancho de las ranuras se estableció en 10 mm después de realizar una optimización marcando como objetivo la mayor directividad posible a la frecuencia de trabajo de 915 MHz, Figura 3-4 [16].

Figura 3-3: Diseño básico de una caja resonante con 2 ranuras

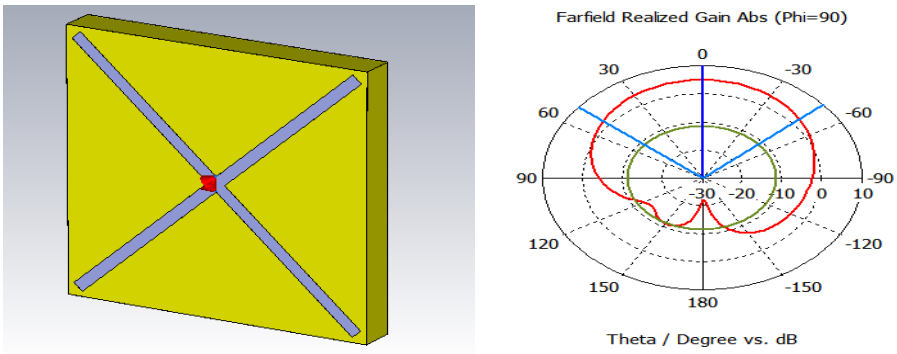
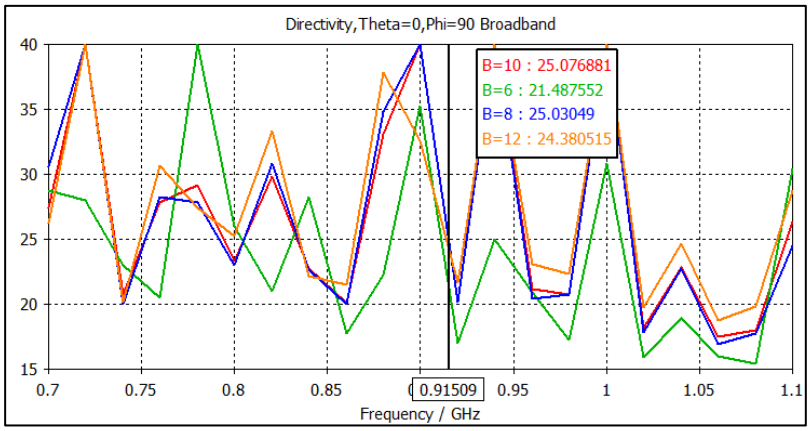


Figura 3-4: Optimización del ancho de ranuras con base en la directividad a 915MHz



Después de tener el diseño base de la caja resonante con ranuras, se continuó con el arreglo de dos pares de ranuras simétricas dispuestas ortogonalmente y separadas entre

ellas de centro a centro por 3λ / 4. Las ranuras se diseñaron en una caja de cobre vacía con un espesor de pared de 35 µm. Las dimensiones de la caja después de optimización son 460x250x30 mm, simuladas igualmente sobre una caja de cobre vacía con un espesor de pared de 35 µm, Figura 3-5.

Las ranuras se alimentan en el centro de la cruz con puertos discretos dispuestos en forma de L. Para lograr una adaptación y alimentación óptima se probaron diferentes combinaciones y direcciones de los puertos de alimentación, Figura 3-6. Dando como resultado una mejor directividad, 9,21 dBi, y una relación axial menor a 6 dB, comparado con las otras configuraciones de alimentación como se muestra en la Figura 3-7.

Figura 3-5: Pérdidas por retorno de antena parche

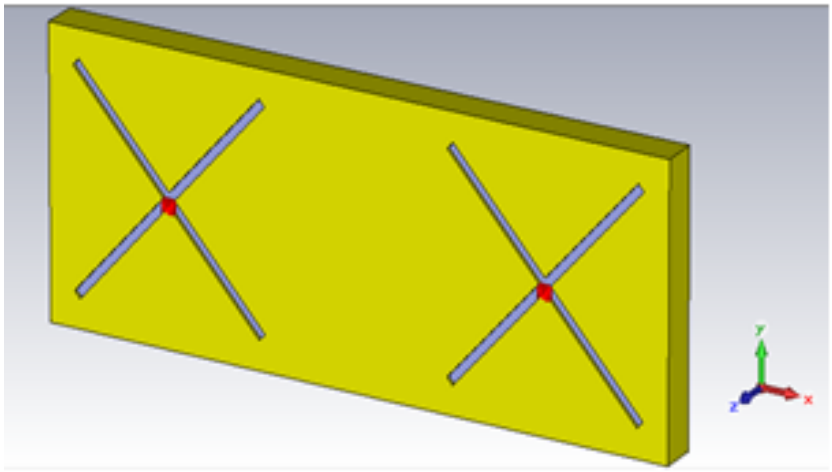
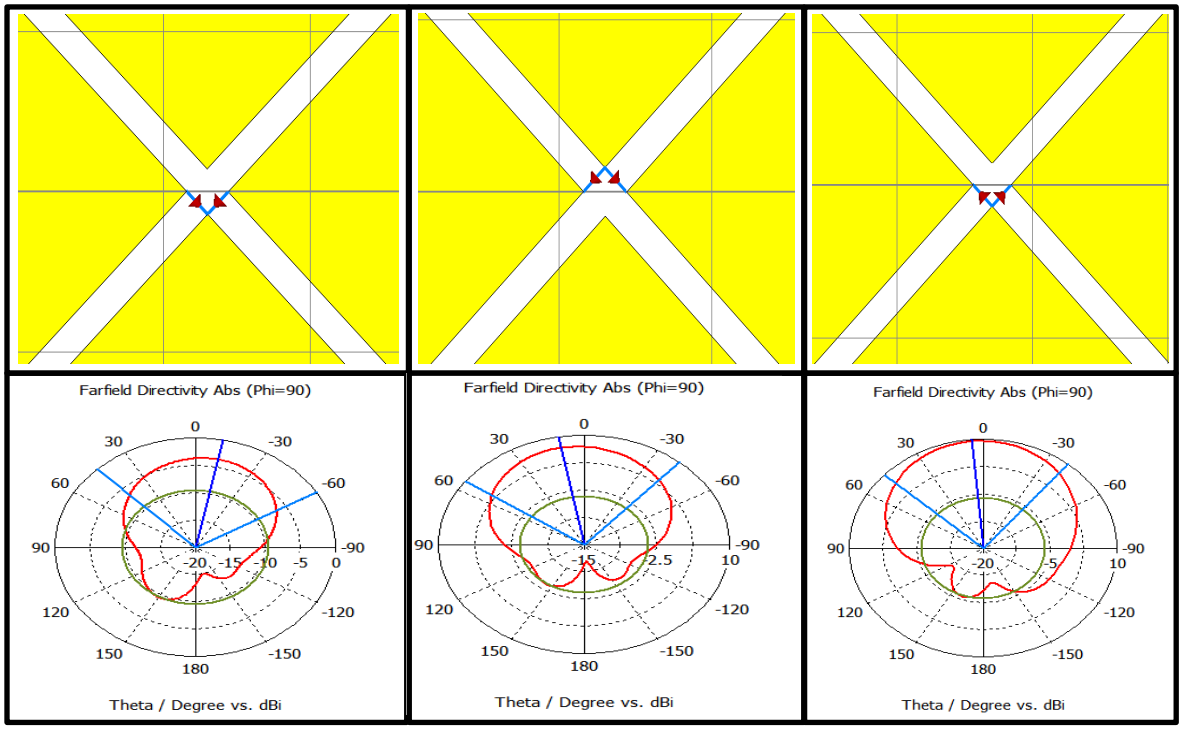


Figura 3-6: Pruebas de optimización en la disposición de los puertos de alimentación



El patrón de radiación obtenido con la configuración de alimentación de la Figura 3-7 después de la optimización, da como resultado un campo simétrico y con una directividad de 8,5 dBi. La relación axial es menor que 3,4 dB dentro del haz principal. El lóbulo principal tiene una pequeña desviación de 3 grados a la izquierda y tiene un ancho de haz de media potencia de 92 °, que se ajusta a los requisitos de RFID, Figura 3-8.

Los resultados de esta antena indican que es apta y cumple con los parámetros de funcionamiento RFID. De tal manera que se podría alimentar los pares de ranuras por medio de un híbrido de 180° que permita el desplazamiento en fase y genere los patrones de radiación en suma y en diferencia, manteniendo la polarización circular de la antena, Figura 3-9.

Figura 3-7: Configuración definitiva de alimentación en los dos pares de ranuras

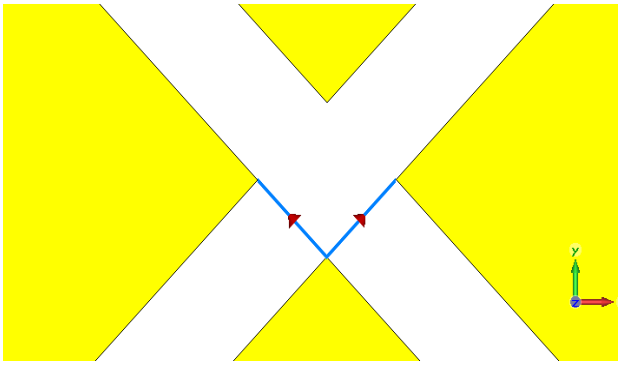
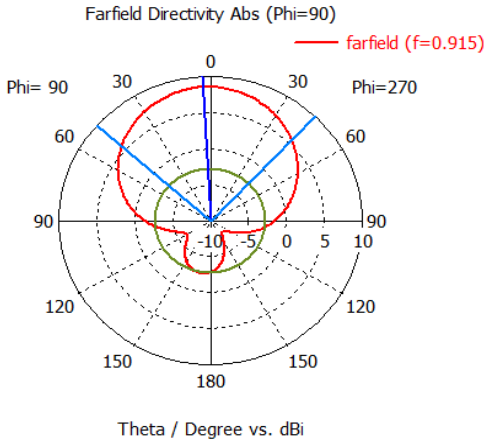


Figura 3-8: Patrón de radiación y relación axial de la antena tipo caja resonante de 4 ranuras cruzadas



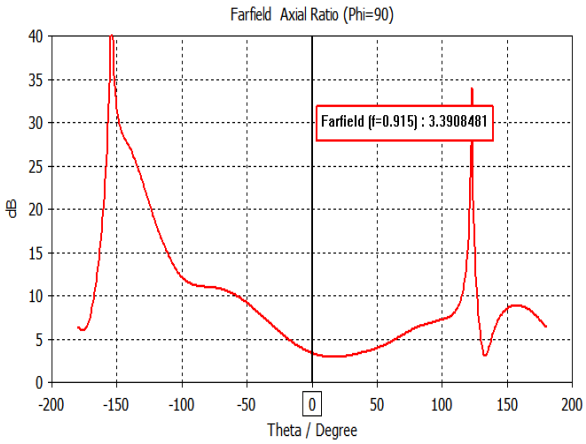
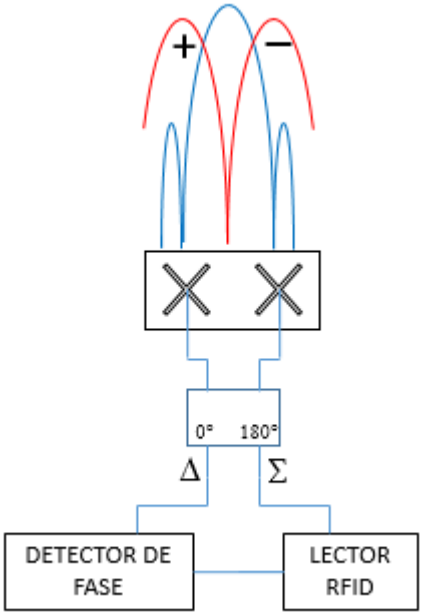


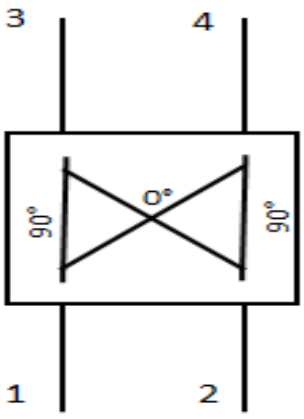
Figura 3-9: Esquema de sistema monopulso basado en antena caja resonante



3.3 Acoplador Direccional

Para el diseño del híbrido de 180° se realizó basados en un acoplador estándar branch-line o híbrido de 90°. Este es un acoplador direccional de potencia equilibrada en los dos puertos de salida y que genera en ellos una diferencia de potencial de 90°, (Figura 3-10). Para adicionar los 90° faltantes al híbrido se añadió un desfasador tipo meandro, completando así los 180° de desplazamiento de fase necesarios para el sistema monopulso.

Figura 3-10: Acoplador estándar Branch-line



El diseño del acoplador híbrido de 180° conformado por el branch-line 90° más el meandro en U se muestra en la (Figura 3-11). Los valores medidos de parámetros de dispersión significativos se presentan en las (Figura 3-12 al 3-15).

- Los parámetros muestran un comportamiento razonablemente bueno para la aplicación monopulso un error de menos de 4% en el desplazamiento de fase (Figura 3-12).
- Menos de 0,15% en S13 y S14, (Figura 3-14); y 0,19% en S23 y S24, (Figura 3-15) de asimetría entre los puertos acoplados para la frecuencia de trabajo central de 915MHz.
- En las pérdidas por inserción S13 y S14 se observa el desfase de 180° generado, (Figura 3-14), mientras que en las pérdidas S23 y S24 se encuentran en fase, (Figura 3-15).

Figura 3-11: Diseño de acoplador híbrido de 180°

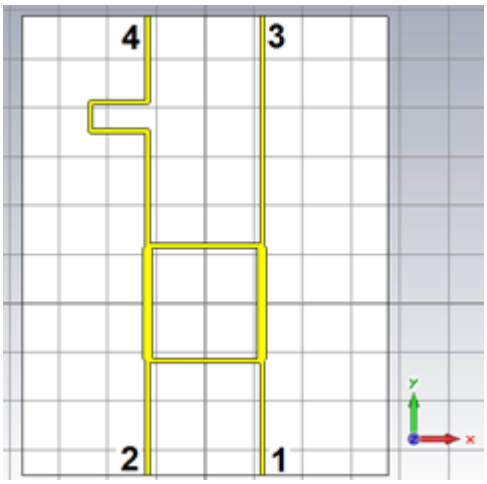


Figura 3-12: Pérdidas por retorno del híbrido de 180°

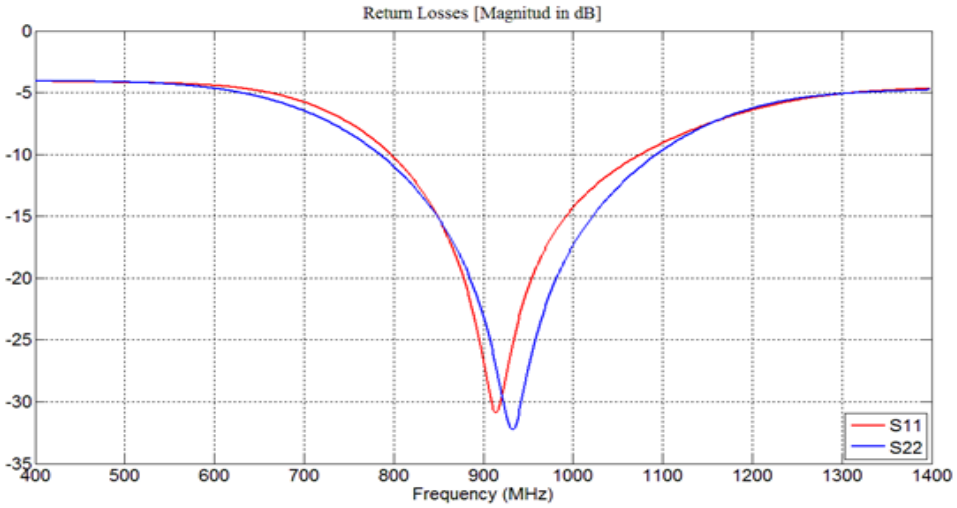


Figura 3-13: Isolación del híbrido de 180°

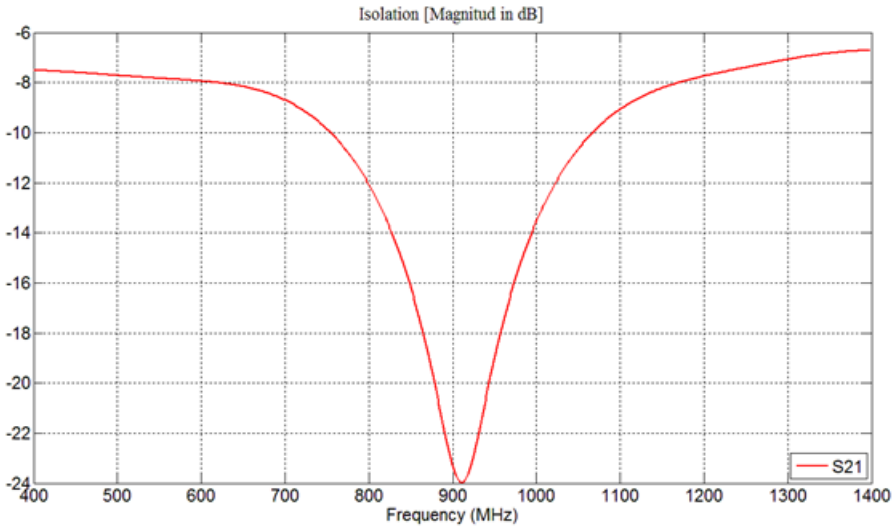


Figura 3-14: Pérdidas por inserción en canales 13 y 14

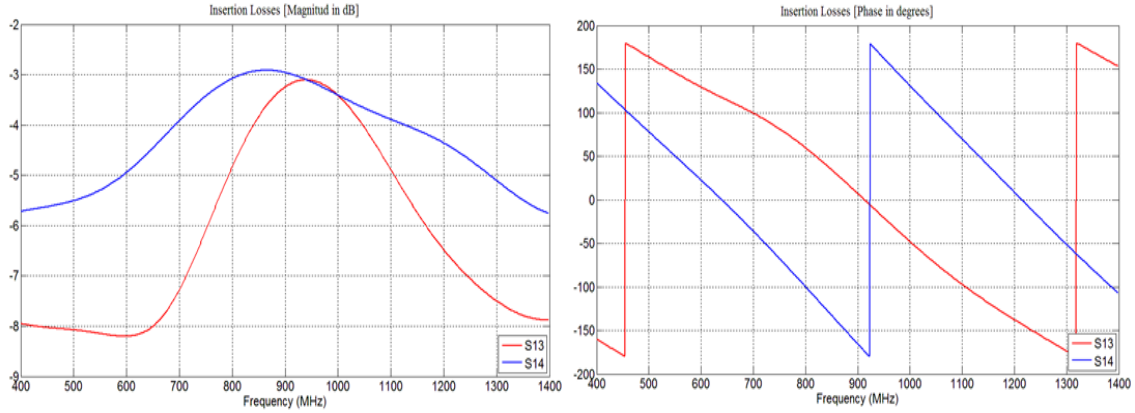
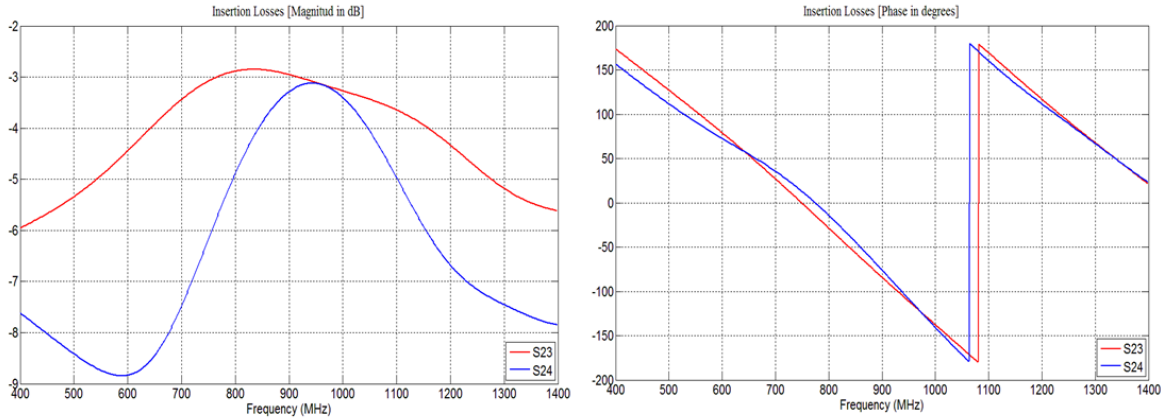


Figura 3-15: Pérdidas por inserción en canales 23 y 24



3.4 Antena Monopulso

El sistema monopulso se diseñó para trabajar a una frecuencia central de 915 MHz con un ancho de banda de 30 MHz. Por simplicidad y facilidad de fabricación se seleccionó la configuración de antenas parche acopladas por el híbrido de 180°, para elaborar el prototipo de la antena monopulso. Esta combinación de antena-híbrido se fabricó sobre un sustrato FR4 de 1,6 mm de grosor, el cual cuenta con una permitividad relativa de $\varepsilon_r = 4{,}16$.

Después de tener una simulación funcional y optimizada de la antena tipo parche y el acoplador direccional de 180° por separado, se procedió a realizar el acoplamiento en un único diseño. Para esto se duplicó la antena obteniendo dos parches idénticos de $\lambda/2 \times \lambda/2$, desfasados y acoplados por medio del híbrido y se obtuvo la antena monopulso. La antena diseñada mide 40 x 30 cm, la separación de los parches de centro a centro es de 20,35 cm, la simulación y fabricación del prototipo se realizaron en un sustrato FR4 de 1,6 mm de espesor. Con esta antena se generan los patrones de radiación suma y diferencia alimentando la antena por los canales $\sum$ y Δ. El patrón de radiación diferencia o en desfase presenta dos polaridades una en positivo y la otra en negativo. El diseño de la antena y la configuración del patrón esperado se presentan en las Figuras 3-16 y 3-17. La ganancia esperada en el patrón suma es de 2,44 dB y para el patrón diferencia de 2,23 dB [13]. La directividad en el patrón suma es de 10,5 dBi y para el patrón diferencia de 7,6 dBi.

Figura 3-16: Esquema de la Antena Monopulso

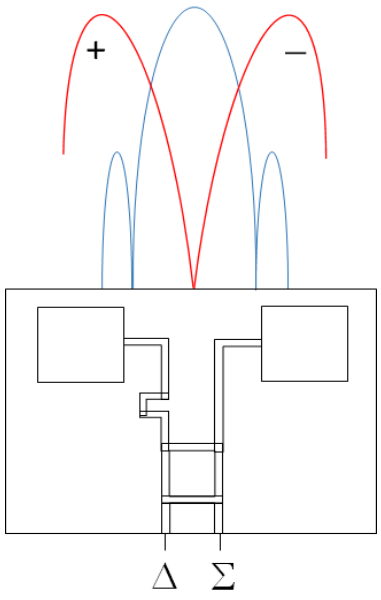
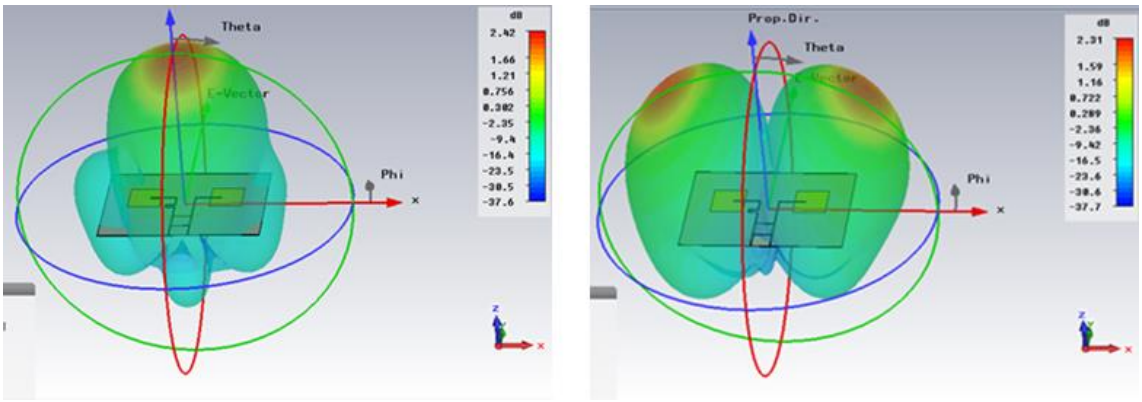


Figura 3-17: Patrones de radicación de la antena monopulso



El proceso de fabricación del prototipo de la antena se realizó utilizando la técnica de fotolitografía, que es la sensibilización del sustrato por medio de una película fotosensible [32], la cual se adhiere al sustrato y reacciona al contacto con la luz formando una imagen latente, luego se somete la placa sensibilizada a un proceso de calentamiento para que la película se adhiera completamente a la lámina. En un equipo Photoplotter se imprime el diseño de la antena en negativo para crear la máscara fotográfica, después de tener el circuito impreso se somete a un proceso químico de revelado. Al transferir la máscara fotográfica al cobre se coloca la máscara sobre la superficie de la lámina sensibilizada y se ingresa en la máquina insoladora. Al retirarla de la insoladora se sumerge en una mezcla de agua con químico revelador photoresist y se talla para ir revelando el diseño de la antena en la lámina. El resultado de fabricación del prototipo se puede observar en la Figura 3-18.

Figura 3-18: Prototipo de Antena Monopulso

El sistema monopulso fue caracterizado en una cámara anecóica usando un VNA Agilet Model HP E5062A y una antena de referencia ETS-Lindgren (LPDA) Modelo 3148B [33]. La medición se realizó colocando una carga de 50 Ω en uno de los canales y mientras se tomaban los datos de pérdidas por retorno y patrones de radiación, por el otro canal.

Los resultados de medición y simulación de las pérdidas por retorno se muestran en las Figura 3-19 y 3-20, donde se observa un ligero cambio de fase. Este cambio se debe a la incertidumbre en los datos permitividad relativa y es común de las estructuras resonantes como la considerada en este trabajo. Aunque este efecto se puede eliminar mediante antenas de banda ancha, se prefiere esta forma más simple en el presente documento en aras de la simplicidad y el coste, por lo que el rendimiento del sistema conseguido con esta antena es aceptable.

Los diagramas de radiación medidos se muestran en las Figuras 3-21 y 3-22, junto con los simulados. Estos resultados muestran una concordancia aceptable entre simulación y prototipo. Por el canal $\sum$ se obtuvieron 2,44 dB de ganancia en la simulación mientras que en la medición del prototipo se logró un 3,54 presentando una mejora en la ganancia en cuanto al sistema simulado. De igual manera, se presenta un aumento en la ganancia por el canal Δ, donde se obtuvieron 2,23 dB de ganancia en simulación y 2,77 dB en la medición.

Figura 3-19: Pérdidas por retorno en el canal ∑

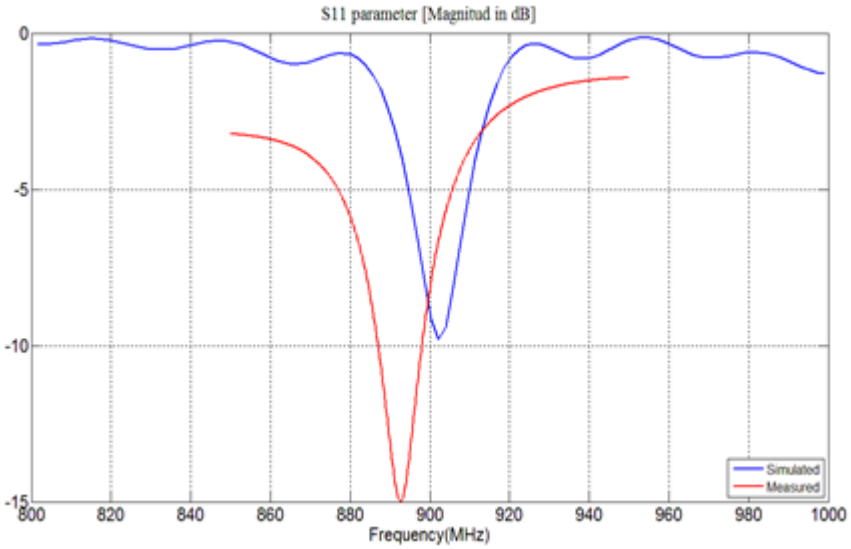


Figura 3-20: Pérdidas por retorno en el canal Δ

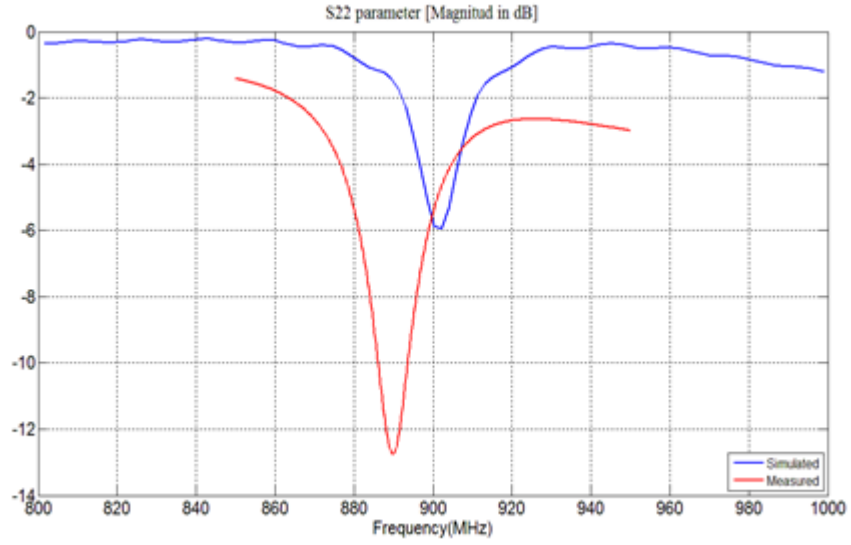


Figura 3-21: Patrón de radiación de ganancia por el canal ∑

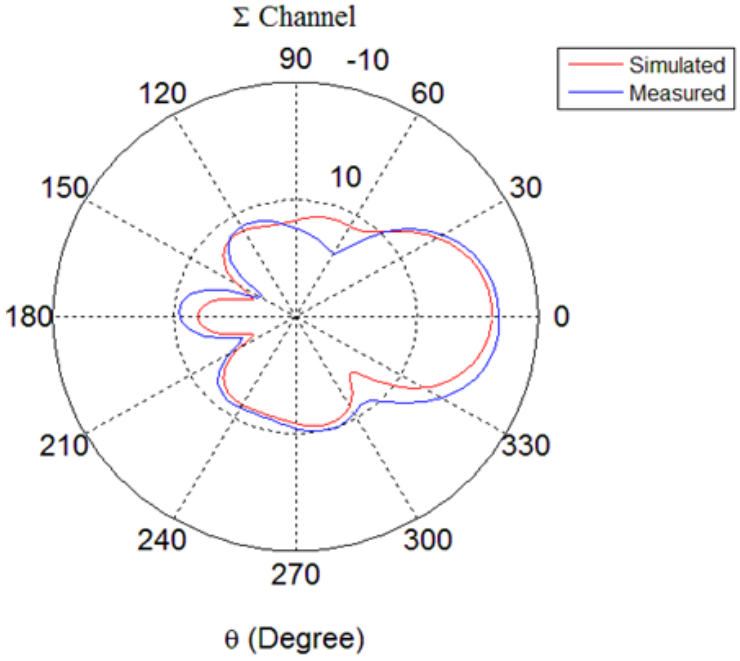
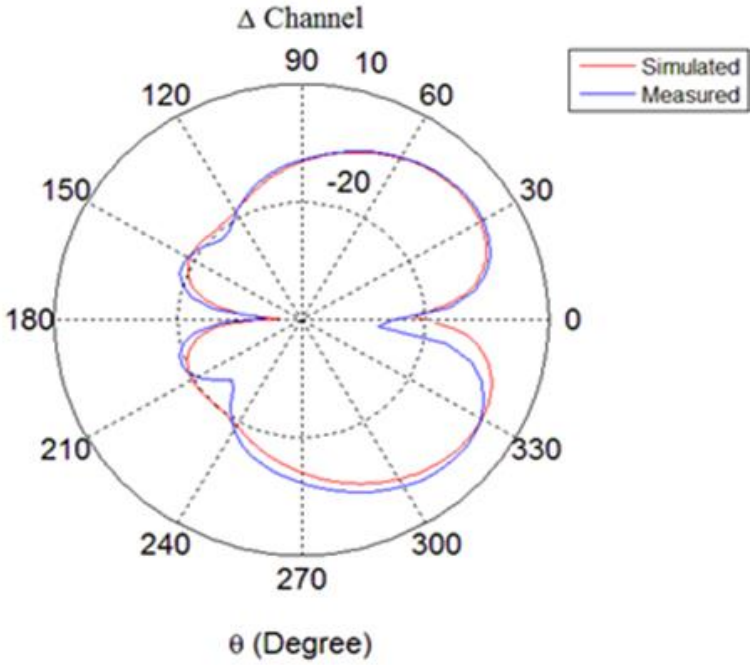


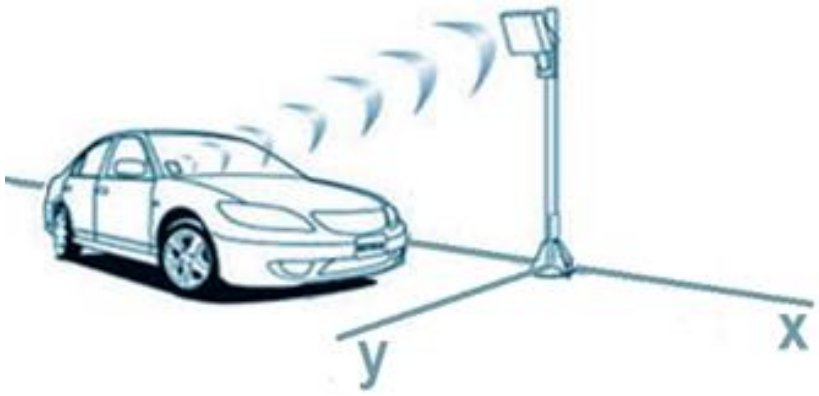
Figura 3-22: Patrón de radiación de ganancia por el canal Δ



3.5 Modelo Determinista Basado en la Ecuación de Friis

Con el fin de evaluar el comportamiento del sistema de recepción monopulso integrado en un sistema RFID, se diseñó un modelo determinista basado en la ecuación de Friis. Este modelo es simple y se basa en las respuestas de una etiqueta a la señal radiada por el lector en función de los parámetros de funcionamiento, utilizando la ecuación de Friis del espacio libre. Este modelo asume que un vehículo pasa a una velocidad constante en una trayectoria paralela al eje X y separado a una distancia Y de la antena, la cual se encuentra en el origen de coordenadas como se indica en la Figura 3-23. Para un tiempo inicial t=0, el vehículo se encuentra en la posición de trayectoria x=-20m.

Figura 3-23: Escenario de simulación del modelo determinista



$$P_{r,tag} = P_{t,reader}\Sigma[\theta,\varphi(t)]G_{tag}\left(\frac{\lambda}{4\pi r(t)}\right)^2 \quad (3.1)$$

$$P_{r,\Sigma} = P_{t,tag}G_{\Sigma}[\theta,\varphi(t)]G_{tag}\left(\frac{\lambda}{4\pi r(t)}\right)^2 \quad (3.2)$$

$$P_{r,\Delta} = P_{t,tag}G_{\Delta}[\theta,\varphi(t)]G_{tag}\left(\frac{\lambda}{4\pi r(t)}\right)^2 \quad (3.3)$$

Con este modelo se calcula la potencia recibida por la etiqueta en cada punto de la trayectoria, por medio de la Ecuación (3.1), mientras que la potencia recibida por el lector se calcula mediante las Ecuaciones (3.2) y (3.3), donde $G_{\Sigma}[\theta,\varphi(t)]$ es la ganancia medida correspondiente al canal suma y $G_{\Delta}[\theta,\varphi(t)]$ es la ganancia medida en el canal diferencia. G_{tag} es la ganancia del tag, el cual se asume que es un monopolo elemental ideal con $G_{tag} = 3$.

$$V_{\Delta}(t) = \sqrt{Z_{in} P_{r,\Delta}(t)} sgn\left\{\Delta\left[\frac{\pi}{2}, \varphi(t)\right]\right\} \quad (3.4)$$

La tensión recibida en el canal Δ se calcula utilizando (3.4), donde $Z_{in} = 50\ \Omega$. Aunque este valor no es crítico, debido a que la magnitud relevante es la polaridad de la tensión y no su amplitud.

Por medio de la potencia recibida en el canal Σ se decodifica la respuesta, cómo se realiza comúnmente en un sistema RFID, mientras que la tensión recibida en el canal Δ se utiliza para identificar el signo del voltaje. Los cambios en la polaridad de voltaje indican el sentido del movimiento del vehículo (por ejemplo, un cambio de positivo a negativo indica un desplazamiento $a + \hat{x}$).

Las Figura 3-24 y 3-25 muestran la potencia recibida en el lector, por lo cual, se observa que el tag siempre emite una respuesta a las interrogaciones del lector. Los resultados de la Figura 3-24 y 3-25 son para una velocidad constante y varias separaciones transversales entre los vehículos que llevan la etiqueta y el lector, y los resultados de las Figura 3-26 y 3-27 representan el modelo para una separación transversal constante entre los vehículos y el lector, y diferentes velocidades

Figura 3-24: Resultados del modelo determinista en el canal ∑

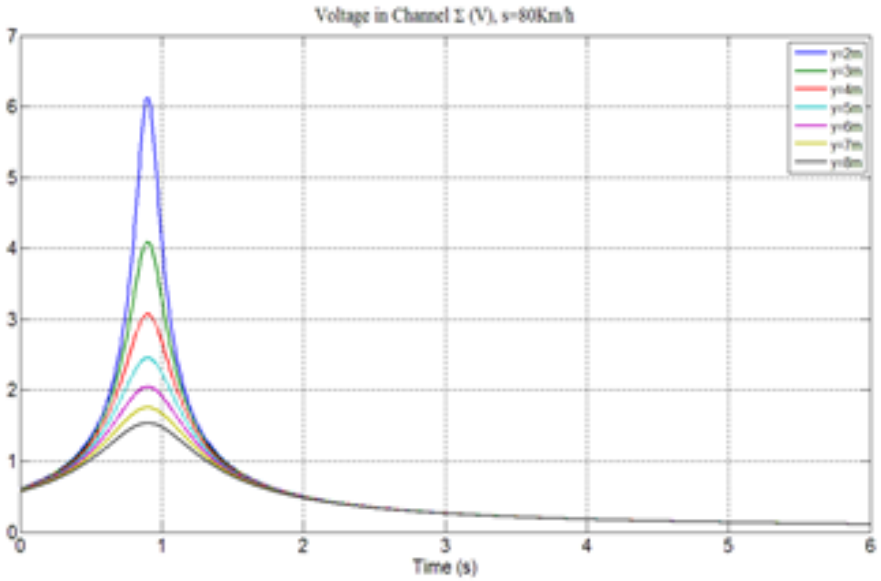


Figura 3-25: Resultados del modelo determinista en el canal Δ

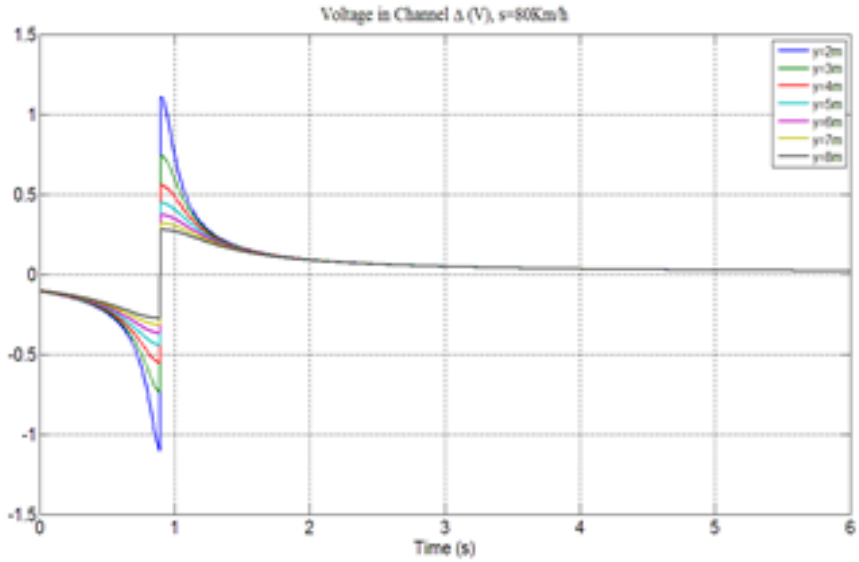


Figura 3-26: Resultados del modelo con separación constante y diferentes velocidades para el canal ∑

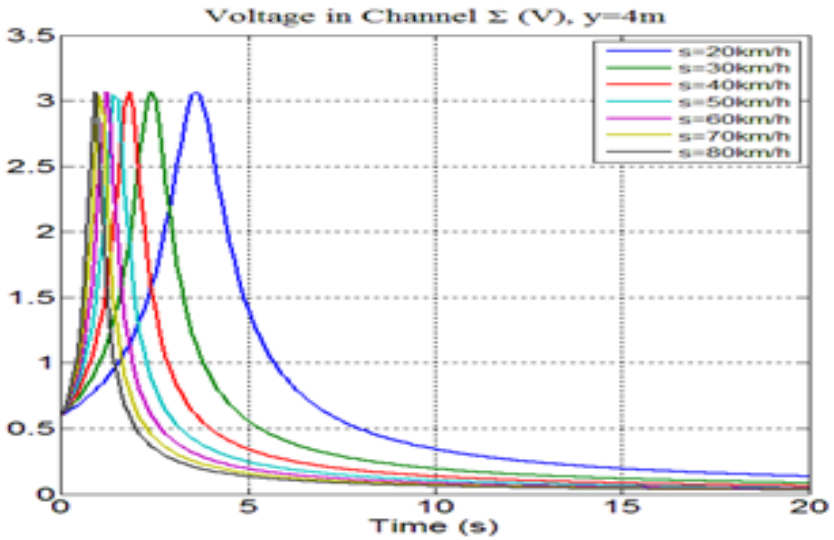
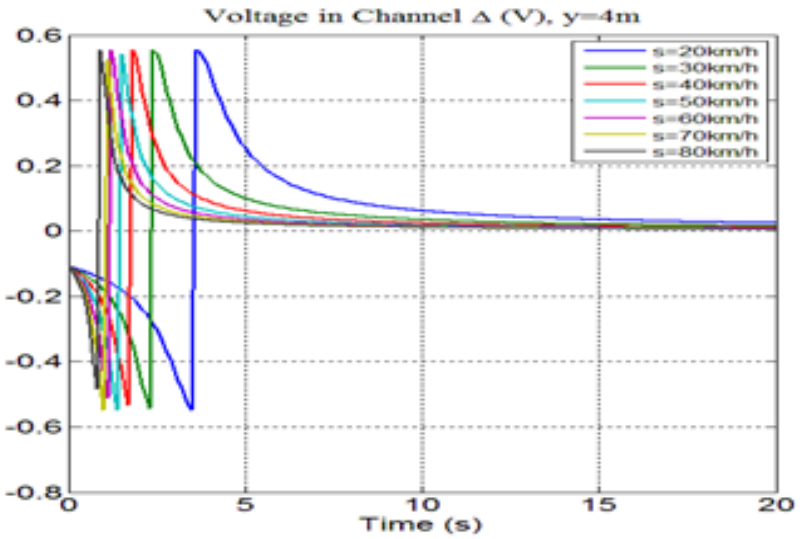
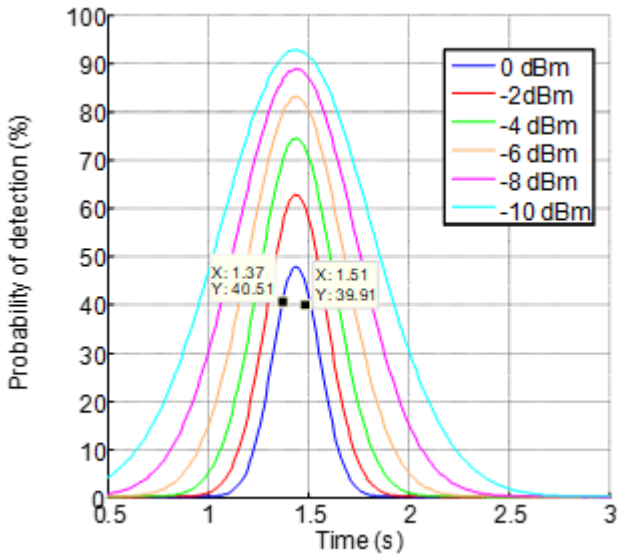


Figura 3-27: Resultados del modelo con separación constante y diferentes velocidades para el canal Δ



Para tener en cuenta el comportamiento aleatorio de las etiquetas reales debido al ruido y al desvanecimiento, la potencia recibida por la etiqueta se calcula teniendo en cuenta que esta potencia sigue una distribución exponencial con el valor medio que está dado por la Ecuación (3.1), que corresponde a un desvanecimiento Rayleigh y el modelo de ruido Gaussiano de media cero. Si la potencia está por encima del umbral correspondiente, se asume una respuesta válida para ser emitida, y la potencia recibida por el lector en los canales Σ y Δ, se calcula utilizando las Ecuaciones (3.2) y (3.3), teniendo en cuenta el lector como un detector ideal. La probabilidad de detección para una sola respuesta se calcula utilizando el método de Monte Carlo con 100.000 ensayos. La Figura 3-28 muestra la probabilidad de detección para un coche que pasa 2 m de distancia desde el lector a lo largo del eje de la calle a 50 km / h, y para diversos umbrales, que van desde -10 dBm a 0 dBm, que corresponden a los valores de umbral reportados en la literatura [34, 35].

Figura 3-28: Probabilidad de detección para un tag pasando a una distancia de separación “y” de 2m a 50 km/h y para varios valores de umbrales de etiquetas.



Como era de esperar, la Figura 3-28 muestra que cuanto menor sea el umbral, mayor será la probabilidad de detección. Para obtener una probabilidad de detección superior al 90% con un solo interrogatorio, se necesitan umbrales más bajos que -10 dBm. Sin embargo, teniendo en cuenta el hecho de que cuando la etiqueta está pasando delante del lector que va a recibir una serie de interrogatorios dados por:

$$n = t_{ob} N_s \tag{3.5}$$

donde t_{ob} es el tiempo de observación para el cual la probabilidad individual de detección es mayor que un valor dado (es decir, $P_{d,0}$) y es la tasa de interrogación, la probabilidad acumulada de detección $P_{d,C}$, se puede calcular como:

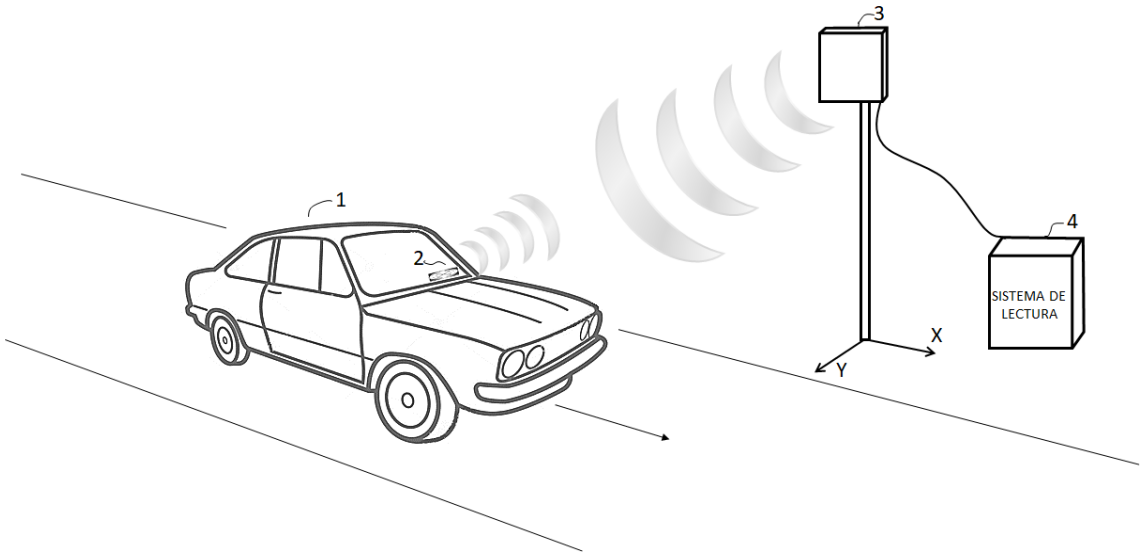
$$P_{d,C} \geq 1 - \prod_{i=1}^{n} \left(1 - P_{d,0}\right) \tag{3.6}$$

Por lo tanto, un óptimo desempeño de detección se puede obtener usando umbrales moderados. Por ejemplo, usando los valores proporcionados por la Figura 3-28, para 0dBm un umbral $P_{d,0} = 40\%$, el tiempo de observación es $t_{ob} = 140\ \text{ms}$; asumiendo una tasa de interrogatorio de $N_s = 100$ interrogaciones por segundo, una probabilidad acumulada de detección de $P_{d,C} \geq 99.92\%$ es lograda.

4. Sistema de Detección Direccional de Vehículos con Tecnología RFID

El esquema de funcionamiento del sistema detección de la dirección vehicular se presenta en la Figura 4-1. Para un funcionamiento ideal del sistema de lectura implica que: cada vehículo (1) lleva instalada una etiqueta RFID (2) para su identificación; que el vehículo se mueve en una determinada dirección y que la antena monopulso (3) se encuentra ubicada de forma paralela a dicho movimiento. Este sistema cuenta con un único sistema de lectura (4) que conecta con la antena monopulso (3) y permite la detección de la etiqueta RFID y de su dirección de movimiento.

Figura 4-1: Esquema del sistema de detección de dirección vehicular.

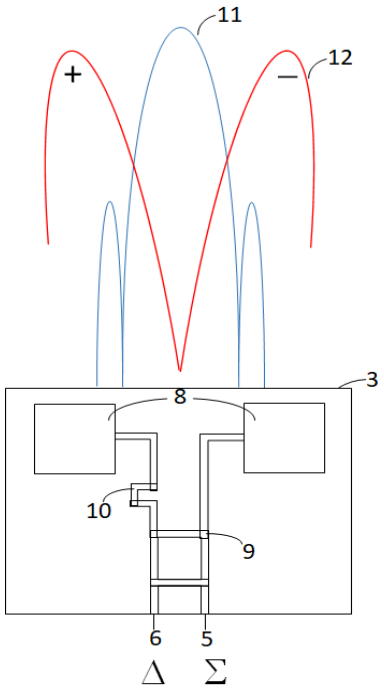


El sistema completo se compone de tres módulos, Figura 4-3:

1. La antena monopulso se conecta por medio de los canales suma (5) y diferencia (6), explicado en detalle en el capítulo anterior.
2. El módulo de lectura (4) que recibe la señal tanto de detección de la etiqueta como de polaridad de la señal.
3. El módulo que determina el cambio de polaridad de la señal (7), en respuesta al paso del vehículo.

La antena monopulso se alimenta por los puertos suma (5) y diferencia (6), Figura 4-2, consta de dos parches idénticos (8) conectados a un desfasador híbrido de 180º, el cual, se conforma por un acoplador en cuadratura (9) que ingresa de 90º de diferencia en fase y un desfasador tipo meandro (10) para introducir los 90º adicionales, necesarios para obtener los 180º deseados entre los parches y permitir la radiación de los patrones en fase (11) y en desfase (12). Con el canal suma (5), que se genera cuando los parches se encuentran en fase, identifica la etiqueta y se obtiene el código único del producto, así como la información adicional que contenga la etiqueta. Mientras que, con el canal diferencia (6), que se genera cuando los parches se encuentran desfasados 180°, se identifica el cambio de fase o polaridad de la señal al pasar la etiqueta de izquierda a derecha o viceversa.

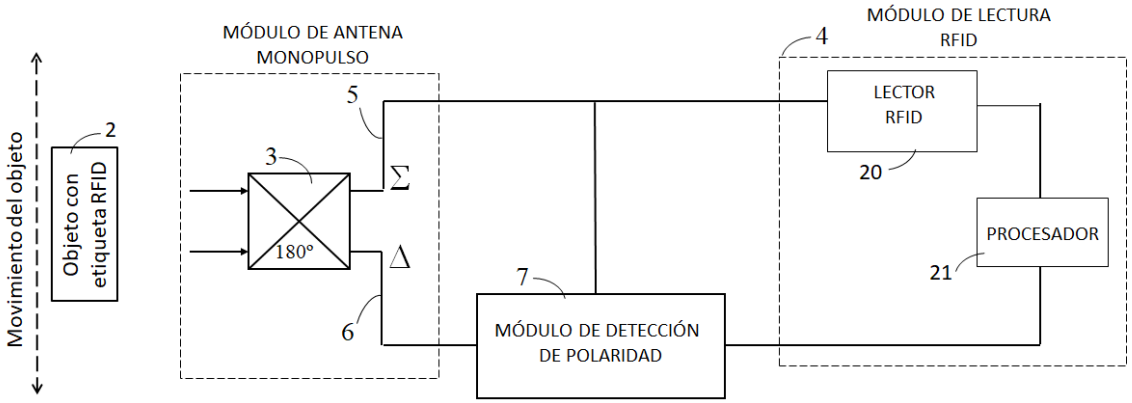
Figura 4-2: Esquema del sistema de detección de dirección vehicular.



El módulo de lectura (4) permite el procesamiento de la información identificando el EPC de la etiqueta además de los datos adicionales almacenados en la misma. El módulo consta de un lector RFID (20) que retroalimenta la antena monopulso (3) por el canal suma (5) y un procesador (21) que recibe las señales transmitidas por el lector RFID (20) y por

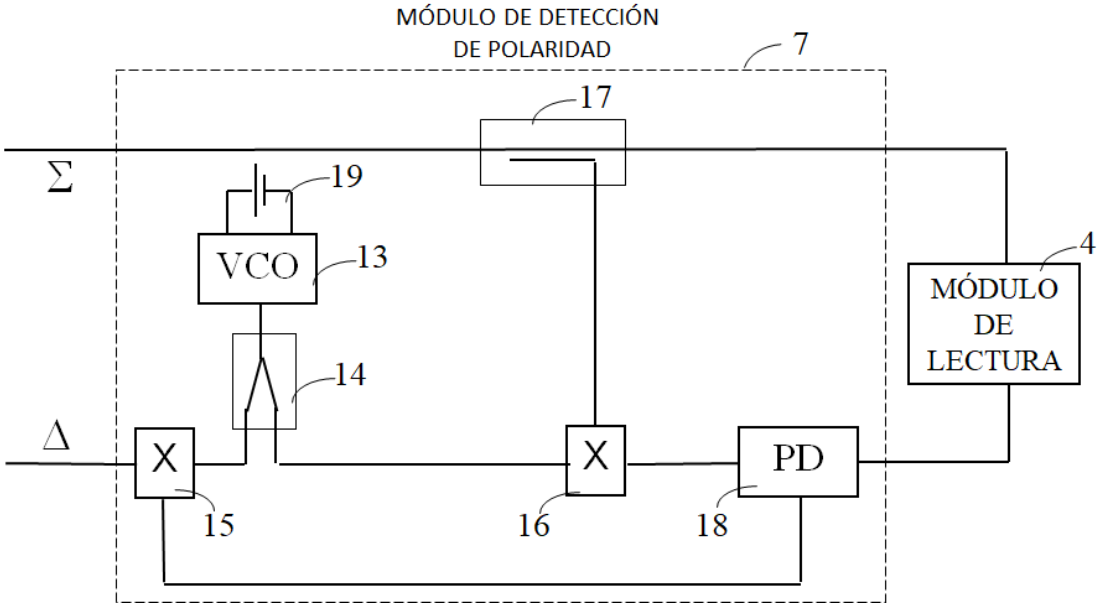
el módulo de detección de polaridad (7), entregando finalmente los datos de la etiqueta RFID del vehículo y la dirección de movimiento según el signo de la polaridad, Figura 4-3.

Figura 4-3: Esquema del sistema de detección por módulos



El sistema que determina el cambio de polaridad al paso de la etiqueta frente a la antena cuenta con un oscilador controlado por tensión (VCO) (13), un divisor de tensión (14), dos mezcladores (15), (16), un acoplador direccional (17), un detector de fase (PD, por sus siglas en inglés) (18), y una fuente que alimenta al VCO (19), Figura 4-4.

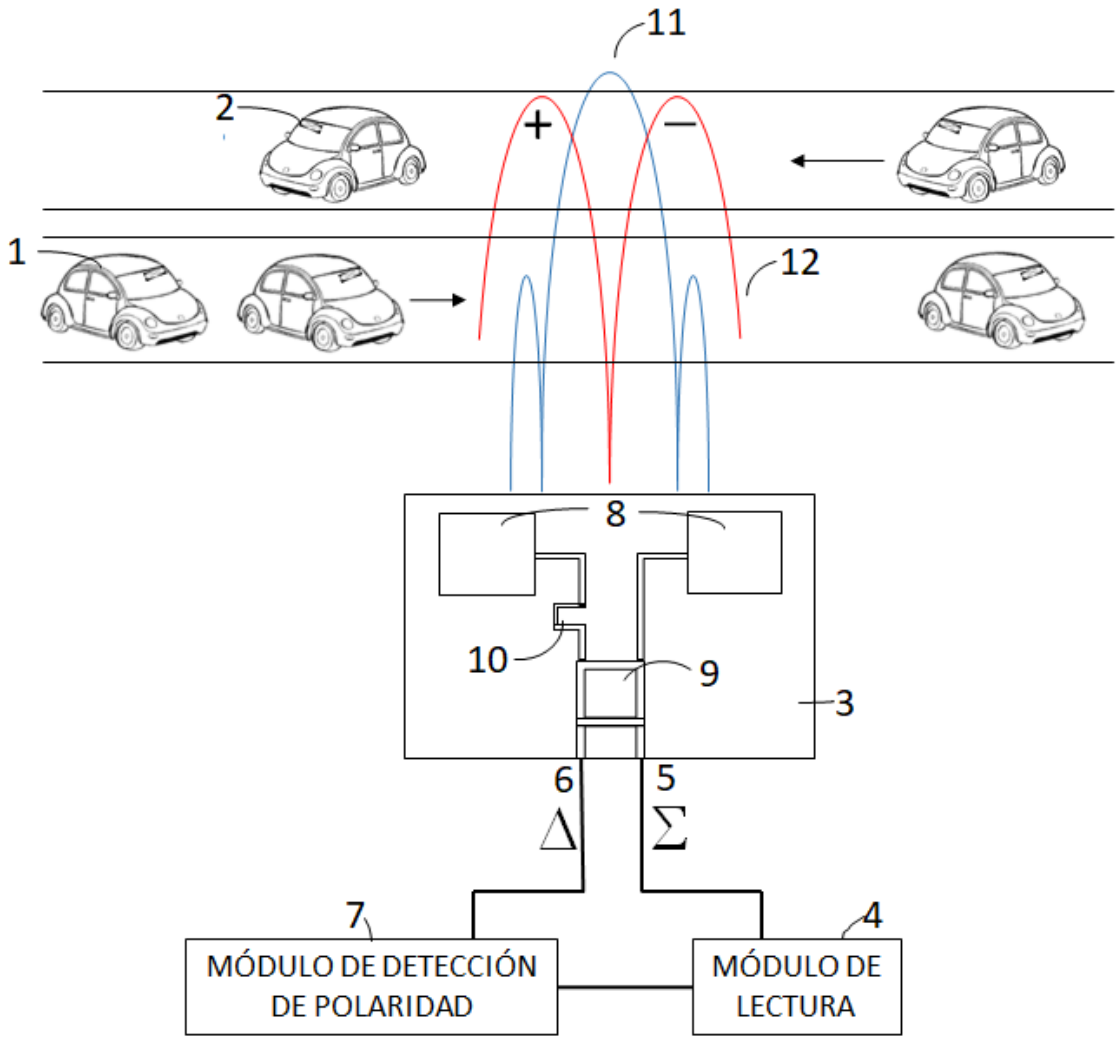
Figura 4-4: Esquema del módulo de detección de polaridad



El esquema completo del sistema RFID para la detección de la dirección vehicular se puede observar en la Figura 4-5. El funcionamiento del sistema se describe a continuación:

El sistema de detección de polaridad (7) recibe las señales del canal suma y diferencia de la antena monopulso. Mientras que el VCO (13) es alimentado por una fuente (19) de voltaje y sintonizado para después enviar su señal al divisor de potencia (14) y repartirla a los dos mezcladores (15), (16). El módulo de lectura alimenta la antena conectando la salida del lector RFID (20) a la entrada del acoplador (17) y, de allí, alimentando el puerto suma (5) de la antena monopulso; la salida del acoplador (17) entrega la señal recibida por la antena a uno de los mezcladores (16) para ser tratada junto con la señal del VCO (13) y entregarla a la primera entrada de referencia del detector de fase (18). El sistema recibe la señal del canal diferencia (6) de la antena (3) por medio de la entrada RF del otro mezclador (15), esta señal se mezcla con la señal que proviene del VCO (13) y se entrega a la segunda entrada de referencia del detector de fase (18). La salida del detector de fase (18) se conecta al procesador (21) del módulo de lectura (4), el cual, procesa la señal de voltaje DC recibida y por medio de un programa de detección de cambio de signo indica si el cambio es de positivo a negativo o viceversa, lo que representa que el vehículo va de derecha a izquierda o de izquierda a derecha, y entrega, finalmente, la dirección de movimiento de la etiqueta RFID instalada en el vehículo que ha cruzado frente a la antena monopulso.

Figura 4-5: Esquema de funcionamiento del sistema de detección de dirección vehicular



5. Validación del Sistema

La validación del sistema se llevó a cabo en 4 etapas: en la primera se realizó la caracterización de los cables que se iban a utilizar en el montaje del sistema para tener en cuenta la cantidad de pérdidas que se insertarán al detector. La segunda etapa consistió en una prueba inicial con el objetivo de identificar si el sistema como receptor permitía identificar el cambio en la polaridad del voltaje de la señal entregada por el detector de fase al paso de una antena transmisora. En la tercera etapa se verificaron los voltajes en ciertos puntos del sistema para validar las pérdidas y funcionamiento de los dispositivos. Finalmente, en la cuarta etapa se realizó una prueba final que consistió en detectar si el sistema completo leía las etiquetas RFID y además detectaba el cambio en la polaridad.

En esta validación del sistema completo se utilizó como generador de voltaje, VCO, un dispositivo ZX95-850+ con el cual se genera el rango de frecuencia 842.9MHz a 861.7MHz, los mezcladores utilizados para comparar las señales que provienen del mezclador VCO y de la señal retorno por los canales suma y resta tiene como referencia ZX05-10L+. El acoplador direccional ZFDC-15-5 por el cual se envía la señal a la antena. Por último, el detector de fase utilizado es un ZRPD-1+ que recibe las señales de referencia de los dos mezcladores. A continuación, se referencian todos los equipos utilizados en la validación y sus características básicas (Tabla 5-1).

Tabla 5-1: Componentes utilizados en el sistema.

Componente	Referencia	Características
Modulo lector RFID	ThingMagic M6e [36]	• Multiprotocolo EPC Gen 2. • Rango de frecuencia entre 860 y 960 MHz. • 4 puertos de 31.5 dBm. • Múltiple estándar SKU india-Australia-USA-Korea. • Tasa de lectura de 750 tags/seg. • Distancia de lectura máxima de 9m con antena de 6 dBi
Detector de fase (Phase detector)	ZRPD-1+ [37]	• Banda de trabajo entre 1 y 100 MHz. • Salida desde 0,2 mV hasta 1000 mV.
Acoplador direccional (Directional coupler)	ZFDC-15-5-S [38]	• Ancho de banda de trabajo entre 1 y 2000 MHz. • Directividad 25 dB
Oscilador Controlador de Voltaje (VCO)	ZX95-850+ [39]	• Sintonizador lineal. • Frecuencia de funcionamiento entre 750 y 850 MHz. • Voltage max tuning 12V. • Voltage max 7V
Mezclador de frecuencia (Frequency Mixer)	ZX05-10L+ [40]	• Banda de trabajo entre 10 y 1000 MHz. • Baja perdida de conversión • Baja perdida de potencia.
Divisor/combinador de potencia (Power Splitter/Combiner)	ZAPD-1+ [41]	• Banda de trabajo entre 500 y 1000 MHz. • Bajas perdidas 0,25 dB. • Potencia de entrada hasta 10W.

5.1 Caracterización de Cables de Conexión

Se caracterizaron todos los cables que se utilizarán en el prototipo, los resultados se pueden apreciar en la Tabla 5-2, donde a menor frecuencia menores son las pérdidas. En total, insertan como máximo, pérdidas de -5,34 dB, lo cual se puede considerar aceptable para este prototipo.

Para realizar la prueba de validación del detector de fase, capítulo 6.2, se utilizaron los cables 1 al 5 (SMA-SMA), 9 y 10 (SMA-BNC) los cuales insertan pérdidas de -4,70 dB, mientras que para la prueba de validación del sistema completo se utilizaron todos los cables calibrados.

Tabla 5-2: Pérdidas insertadas por los cables de conexión utilizados

CABLE	Conector	Longitud (m)	Pérdidas (dB)	
			902MHz	908MHz
1	SMA-SMA	1,0	-1,38	-1,97
2	SMA-SMA	1,0	-1,28	-1,82
3	SMA-SMA	0,3	-0,16	-0,37
4	SMA-SMA	0,3	-0,40	-0,16
5	SMA-SMA	0,3	-0,25	-0,10
6	SMA-SMA	0,3	-0,25	-0,14
7	SMA-SMA	0,3	-0,25	-0,13
8	SMA-SMA	0,3	-0,49	-0,25
9	SMA-BNC	0,3	-0,23	-0,13
10	SMA-BNC	0,3	-0,29	-0,15
11	SMA-BNC	0,3	-0,26	-0,12
TOTAL (dB)			**-5,24**	**-5,34**

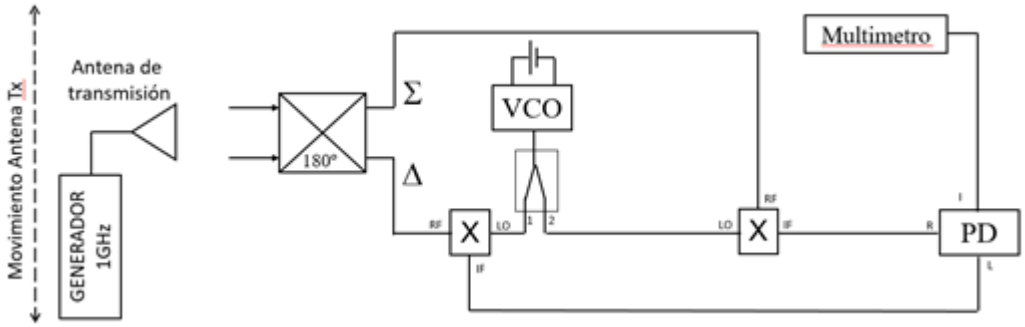
5.2 Prueba del Detector de Fase

Para validar el sistema de detección de fase se realizó una prueba inicial que consistió en conectar una antena de transmisión a un generador de señales y hacerla pasar frente a la antena monopulso (antena receptora) conectada únicamente al sistema de detección de cambio de fase. Con esta prueba se podrá observar con un multímetro el cambio de signo a la salida del detector de fase generado al pasar la antena de transmisión de un lado al otro frente a la antena monopulso y verificar que el sistema de detección de fase cumple con su objetivo, Figura 3-27.

La configuración de la Figura 5-1, muestra cómo se realizó la conexión para la prueba, la cual, contaba con una antena en lugar de la etiqueta pasiva, esta antena se encontraba

conectada a un generador de señales que la alimentaba con parámetros de funcionamiento que se variaron en un rango de frecuencias de 902 a 928 MHz con frecuencia central de trabajo de 915 MHz, esto simulando el funcionamiento en la frecuencia del lector RFID que emite una señal en barrido dentro de dicho rango de frecuencias. El generador emitía a una potencia que se varió de 5dBm a 20dBm. Posteriormente, se hace pasar la antena de izquierda a derecha y viceversa. Los cambios de polarización en la señal se verificaron a diferentes distancias, frecuencias y potencias de transmisión. El acoplador direccional no será utilizado en la prueba inicial ya que no se requiere conectar el lector RFID para comprobar el funcionamiento del detector de fase.

Figura 5-1: Esquema para la validación de módulo de detección de fase

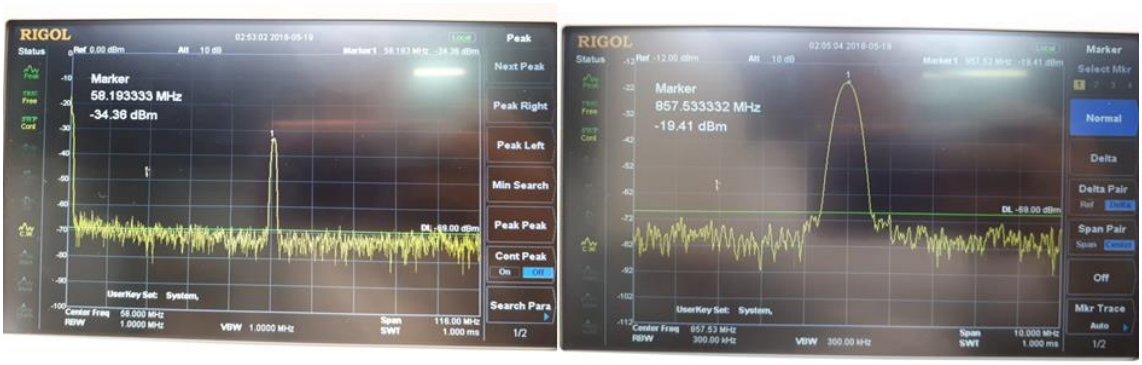


El primer paso fue verificar la señal de salida del VCO y a la salida del mezclador con un analizador de espectros. Debido a que el mezclador entrega la diferencia entre la señal RF y la señal del VCO, y teniendo en cuenta que el detector de fase trabaja a una frecuencia de 1 a 100MHz; la señal de VCO debe trabajar entre 815MHz a 915MHz. Por lo tanto, para obtener una señal de 60 MHz, aproximadamente, en el detector de fase se debe sintonizar la tensión del VCO entre 6 y 7 V (842.9MHz a 861.7MHz).

Después de sintonizar la tensión del VCO se encontró que entre 6.3 V (857.5 MHz) se obtiene una buena detección de cambio de dirección de la antena de transmisión, (Figura 5-2). Además, se verificó que a la entrada del detector de fase entran 58.2 MHz lo que es aproximadamente la diferencia entre la señal RF y la señal VCO, (Figura 5-3).

Figura 5-2: Señal nominal y de sintonización de tensión del VCO

Figura 5-3: Señal de salida del mezclador (58.19MHz) y señal de salida del VCO (857.53MHz)



Teniendo la tensión del VCO sintonizada, se procedió a realizar una prueba de lectura a diferentes frecuencias, potencias de transmisión y distancia. El cambio de tensión se verificó en un FLUKE 45 (Multímetro) con la mayor tasa de cambio posible y en el rango de mV.

En la Tabla 5-3 se muestran los resultados de distancias máximas (en metros) donde se logró detectar el cambio de polarización al paso de la antena según la potencia emitida por la antena de transmisión y la frecuencia. Se observa que a 915MHz se obtuvo un mejor alcance a 20dBm (0,1W) con una lectura a 4 m de distancia. Además, se logra identificar el cambio en la polaridad con una potencia de emisión de 5dBm (3E-3 W) a 1m de distancia. En el multímetro se pudo observar como la señal de izquierda a derecha de la

antena monopulso pasaba de positivo a negativo y de derecha a izquierda pasaba de un voltaje negativo a positivo Figura 5-4. La señal también se pudo observar en el osciloscopio, Figura 5-5.

Tabla 5-3: Prueba inicial, distancias de lectura efectivas variando frecuencia y potencia de antena de transmisión Tx

Potencia (dBm) / F(MHz)	20 dBm	15 dBm	10 dBm	5 dBm
902	3m	3m	2m	1m
906	3m	3m	2m	1m
910	3m	2m	2m	NA
915	4m	3m	2m	1m
920	3m	2m	1m	NA
924	3m	3m	1m	NA
928	3m	2m	1m	NA

Figura 5-4: Cambio de polarización del voltaje a la salida del detector de fase

Figura 5-5: Señal a la salida del detector de fase en un cambio de polarización

5.3 Validación de Voltajes en los Puntos de Conexión

Para validar la funcionalidad del sistema completo se utilizó el esquema de la Figura 5-6. En primer lugar, se realizaron medidas en los diferentes puntos de conexión de los dispositivos mientras que se hacía pasar una etiqueta de lado a lado frente a la antena monopulso. Las frecuencias entregadas en cada uno de los puntos se verificaron por medio de un analizador de espectros RIGOL DSA832E. La conexión del sistema se observa en la Figura 5-7.

Figura 5-6: Esquema del sistema de detección de dirección de etiquetas RFID

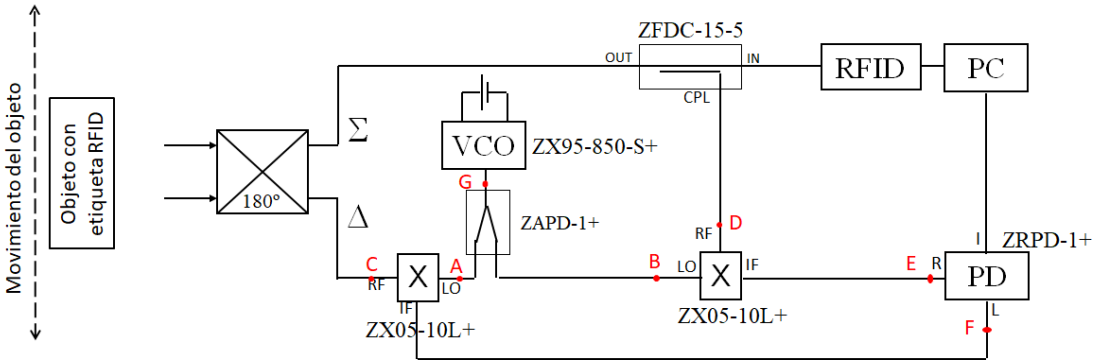
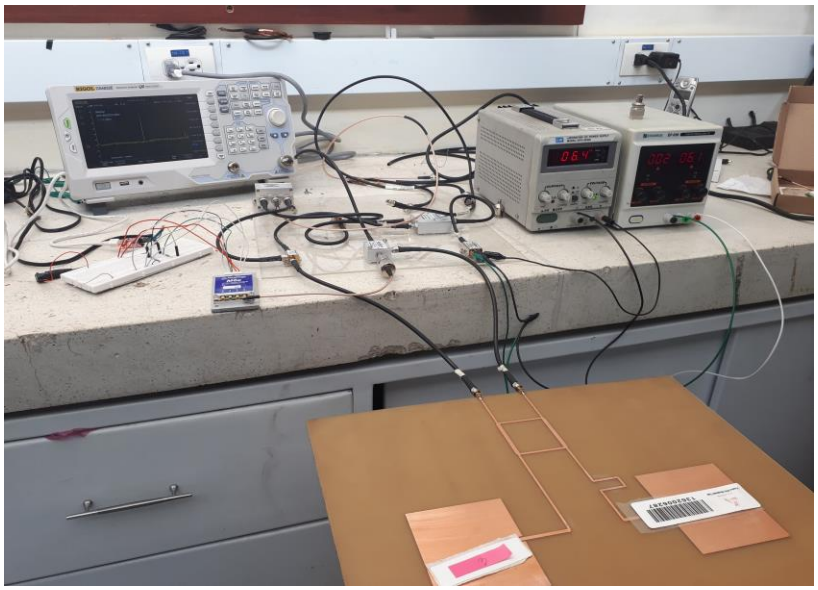


Figura 5-7: Circuito de conexión del sistema completo



Para realizar las medidas se fijó un punto de referencia en el analizador de espectros de 20dBm. En esta prueba se fijaron los voltajes del VCO con VCC= 6.1V y Vtune=6.4V, ya que, según la prueba inicial, al aumentar la potencia fija aumentaba también la distancia máxima de lectura alcanzada, teniendo en cuenta de no superar los parámetros de voltaje permitidos por el dispositivo VCO. Las pruebas se realizaron a una distancia de 1m. Los resultados se pueden observar en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4: Prueba de verificación de voltaje en puntos de conexión de dispositivos

Punto	**Frecuencia (MHz)**	**Tensión (dB)**	
A	857,5	2,69	Fija
B	856,8	2,63	Fija
C	915	7,93	Barrido
D	915	11,15	Barrido
E	57,5	5,06	Barrido
F	57,5	5,65	Barrido
G	857,5	5.10	Fija

5.4 Validación del Sistema Completo

Tras realizar las pruebas y verificar los voltajes en los puntos de conexión de los dispositivos, se procedió a verificar que el sistema permitía la lectura de etiquetas RFID y adicionalmente se generaba una señal que cambiaba de polaridad al paso de la etiqueta de un lado al otro, para lo cual se utilizó el esquemático de la Figura 4-3. Esta prueba se realizó con la etiqueta RFID pegada a un vidrio que se hizo pasar frente a la antena en posición horizontal y vertical obteniendo los mismos resultados en ambos los casos, Figura 5-8.

La variación en la señal se observó por medio de un osciloscopio Tektronix TDS1012, Figura 5-9, mientras que en un multímetro FLUKE 45, se pudo observar la variación en la diferencia de potencial en mV, cambiando de positivo a negativo cuando se pasaba la etiqueta de izquierda a derecha y viceversa, Figura 5-10.

Figura 5-8: Prueba de lectura a 3m de distancia

Figura 5-9: Interferencias en la salida del detector de fase al paso de la etiqueta (Izquierda - Derecha, Derecha - Izquierda)

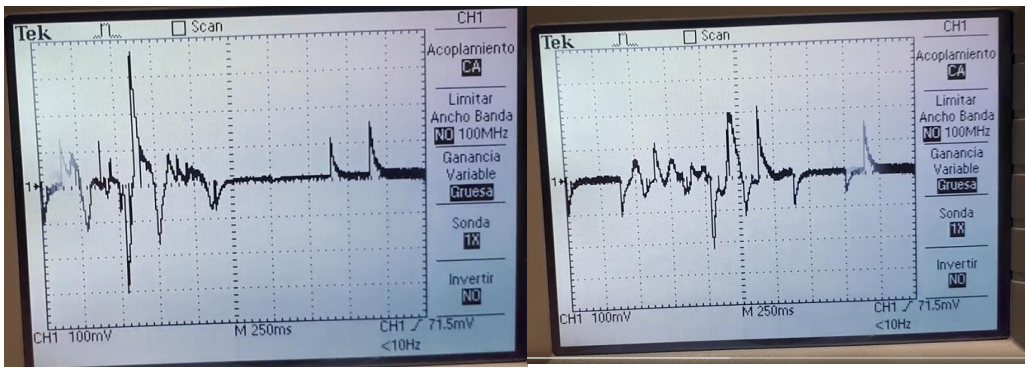


Figura 5-10: Interferencias en la salida del detector de fase al paso de la etiqueta

La Tabla 5-5 muestra los resultados obtenidos en la prueba de lectura. La prueba se realizó en un rango de distancia entre 1m y 4m. La lectura de las etiquetas fue posible en todas las distancias medidas, las cuales se observaban en un computador que procesaba la señal y entregaba el EPC de la etiqueta. Por otra parte, la detección de la señal de polarización no fue tan efectiva y solo se permitió un cambio visible en la señal a 1 m y 2 m de distancia. La Tabla 5-6 presenta los valores máximos obtenidos en una lectura de detección de fase cuando la etiqueta pasaba de lado a lado. Se pudo observar que el voltaje disminuye con la distancia de lectura.

Tabla 5-5: Resultados de lectura y detección de fase a diferentes distancias de la etiqueta.

Distancia	4m	3m	2m	1m
Lectura	SI	SI	SI	SI
Detección de Fase	NO	NO	SI	SI

Tabla 5-6: Valores máximos de voltaje a la salida del detector de fase.

	Izquierda	**Derecha**	**Izquierda**	**Derecha**
1m	75,38 mV	-152,81 mV	81,61 mV	-145,98 mV
2m	35, 73 mV	-73,40 mV	46,82 mV	-63,87 mV

6. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados de la antena monopulso se pueden mejorar aplicando técnicas de optimización para las antenas parche en aras de aumentar el ancho de banda, mejorar la adaptación y disminuir su tamaño. De esta manera se puede evitar el ligero desplazamiento de fase que se obtuvo en la caracterización del prototipo de la antena y ampliar el alcance en la lectura y detección del cambio de polaridad.

Por otra parte, se el diseño de una antena compacta y eficiente se logró mediante ranuras cruzadas ortogonalmente en una caja de cobre vacía. La polarización circular puede mejorarse por medio de optimización ajustando las longitudes de las ranuras. Esta antena representa una buena opción para acoparse a un híbrido y formar una antena monopulso, útil para su uso en sistemas de posicionamiento RFID e identificación de la dirección del movimiento del objeto con la etiqueta instalada.

El rendimiento a nivel del sistema de detección de dirección vehicular se evaluó mediante el método de Monte Carlo con datos de la sensibilidad de la etiqueta obtenidos de la literatura. Para trabajos futuros se propone utilizar algunas mejoras en el receptor monopulso, como el uso de antenas de banda ancha para reducir el efecto de la incertidumbre del sustrato y antenas de polarización circular para reducir el efecto de desvanecimiento. Además, de una caracterización de la etiqueta y el lector para poder realizar un modelo más preciso.

El modelo propuesto, fue validado logrando identificar la etiqueta como en los sistemas RFID convencionales y, además, detectar la dirección de movimiento de la etiqueta, cumpliendo así con los objetivos propuestos y generando precedentes para futuros desarrollos sobre en el área. Para el desarrollo de un prototipo mejorado es necesario realizar, previamente, pruebas de validación en campo con condiciones reales de aplicación, que incluyan vehículos con etiquetas instaladas, antena monopulso óptima para distancias reales. Para lo cual es necesario desarrollar un software que procese la señal de cambio en la polaridad y permita indicar de manera concreta la dirección de movimiento de la etiqueta instalada en un vehículo.

El sistema de detección del sentido del movimiento fue propuesto para Sistemas Inteligentes de Transporte, pero se debe tener en cuenta que el prototipo se puede modificar y desarrollar a partir de los requerimientos y necesidades específicas de la aplicación en la que se va a utilizar. Este sistema se puede replantear en su diseño, desde la antena hasta los dispositivos electrónicos, de manera que las especificaciones requeridas en la aplicación, como la frecuencia de trabajo, ancho de banda, alcance, etc. estén dentro de las características de los componentes a utilizar.

Este prototipo permite la detección del movimiento de una etiqueta a cortas distancias, para perfeccionar esta técnica es necesario tener en cuenta tanto el alcance que permite la antena, como el alcance de la etiqueta utilizada. De esta manera, por ejemplo, se pueden utilizar etiquetas pasivas para aplicaciones que no requieran una gran distancia, con este tipo de etiquetas se tiene un gran balance costo beneficio en la solución; por otra parte, si se necesita que la detección de movimiento se realice a gran distancia, la alternativa son etiquetas activas, aunque estas tienen un costo mayor y se debe de tener en cuenta el mantenimiento por el reemplazo de baterías cuando estas se agoten.

Este sistema puede presentar mejoras económicas importantes frente a los sistemas utilizados actualmente para la detección de la dirección de movimiento de un objeto por medio de tecnología RFID. Debido a que este proyecto utiliza una única antena y un único sistema de detección al contrario de otros sistemas estudiados.

Esta investigación profundiza y aporta nuevas técnicas aplicadas a sistemas de lectura e Identificación por Radio Frecuencia. Los resultados servirán para futuras investigaciones sobre el tema y aplicación no solo en el área de Sistemas Inteligentes de Transporte sino también para diferentes tipos de aplicaciones como inventarios, logística, controles de acceso, etc. Lo que permitirá tener un control sobre la movilidad y ubicación de diferentes objetos.

Bibliografía

[1]. Ali, S. S. M.; George, B. and Vanajakshi, L. “Mutually coupled multiple inductive loop system suitable for heterogeneous traffic,” *IET Intell. Transport System*, vol. 8, no. 5, pp. 470–478, August 2014.

[2]. Cherrett, T.; Waterson, B. and McDonald, M. “Remote automatic incident detection using inductive loops.” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, 158, (3), 149-155. 2005.

[3]. Kastner, R., T. Kühnl, J. Fritsch, and C. Goerick. “Detection and Motion Estimation of Moving Objects Based on 3D-Warping.” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 48–53. Baden-Baden, June 2011.

[4]. Yadnesh, J., Pratik, G., Chetan, A. and Nikhil, A. “Smart parking management system using RFID and OCR.” In *2015 Intenational Conference on Energy Systems and Applications*. pp. 729-734. Pune, Oct 2015.

[5]. Atif, A., Adnan, I., and Maaruf, A. “Radio Frequency Identification (RFID) Based Toll Collection System”. *Third International Conference on Computational Intelligence Communication Systems and Networks*. pp. 103-107. Bali, Jul 2011.

[6]. Wisanmongkol, J., T. Sanpechuda, and U. Ketprom. “Automatic Vehicle Identification with Sensor-Integrated RFID System.” *5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology ECTI-CON 2008*, 2:757–60. Krabi, May 2008.

[7]. Oikawa, Y. “Tag Movement Direction Estimation Methods in an RFID Gate System.” *6th International Symposium on Wireless Communication Systems*, 41–45. Tuscany, Sept. 2009.

[8]. Kim., S.G. and Chang, K. "Low-cost monopulse antenna using bidirectionally-fed microstrip patch array", *Electron Lett*. vol. 39, no. 20, 2003, pp. 1428 - 1429.

[9]. Yu, Z.; Wang, G.; Lei, T. and Yu, Z. "Design of a broadband planar monopulse antenna of S band," *Proceedings of 2011 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference*, Harbin, pp. 510-513, 2011

[10]. Bezousek, P., M. Chyba, V. Schejbal, S. Karamazov, T. Zalabsky, and L. Cernik. “Combined antenna array for primary and secondary surveillance radars”. *IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC),* 597–600, Palm Beach, August 2014.

[11]. Markin, E. “Method of automatic target angle tracking by sum-and-difference monopulse radar invariant against the polarization jamming”. *Radar Conference (EuRAD), 2010 European*, 499–502, Paris, October 2010.

[12]. Zou, X.; Tong, C.; Bao, J. and Pang, W. “SIW-Fed Yagi Antenna and Its Application on Monopulse Antenna”. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 1035–38. May 2014.

[13]. Alcaraz, C.; Balbastre, J. and Vega, J. F “Enhancement of ITS application of RFID technology y means of radar techniques”. *2015 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*, pp. 209-209, Vancouver, BC, July 2015.

[14]. Alcaraz, C.; Balbastre, J. and Vega, J. F “Diseño y fabricación de un sistema monopulso para aplicaciones RFID”. *Avances de ingeniería 1a Ed,* 204-211, Medellin, October 2015,

[15]. Alcaraz, C.; Balbastre, J. and Vega, J. F “Monopulse RFID reader for enhanced intelligent transportation systems applications”. *RFID, 2015 IEEE Brasil*. Sao Paulo, October 2015

[16]. Alcaraz, C.; Balbastre, J. and Vega, J. F “Circulary Polarized Antenna for RFID Applications”. *2018 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*, pp. 321-322. Boston, July 2018

[17]. Alcaraz Rojas, C. "Diseño de antenas monopulso para aplicaciones de RFID en sistemas ITS." Trabajo de Fin de Master en Ingeniería de Telecomunicaciones, programa doble titulación internacional, UPV. Valencia, 2019.

[18]. Smily, S. “The Best RFID Tag For Your Aplplicattion: 7 key Factors to consider”. *RFID Insider, Tracking the RFID Industry.* October 2014

[19]. Jaint, B.; Ekl, R. L.; Griesmann, D. S.; Pandey, A. and Stern, M. “Modifying RFID system operation using movement detection”. US9311799B2, Symbol technologies LLC, April 2016.

[20]. Wagner, M. and Mezger, M. “Access Control System”. US20140226018A1, Sick AG, August 2014.

[21]. Scott, H. L.; Roemerman, S. D. and Volpi, J. P. “Interrogator for use in radio frequency identification (RFID) tag, has processor that employs synthetic aperture

radar processing on return signal in accordance with time to locate position of tag". US9035774B2, Lone Star IP Holding LP, May 2015

[22]. Bieber, R.; Evers, D.; Horst, D.; Metz, G.; Schwarzer, S. and Seisenberg, C. "Method and system for determining the distance, speed, and/or direction of movement of an RFID transponder". US 20120050016 A1, Siemens Aktiengesellschaft, Mar. 2012.

[23]. Kamiya, H. "RFID tag movement distinguishing method and rfid tag movement distinguishing program". EP2733644A1, Mighty Card Corp, Jun. 2012

[24]. Urbano, O.; Silva, D.; Vega, F. and Pedraza, C. "Design and benchmarking of an intelligent RFID reader for vehicular traffic monitoring," *2016 8th Euro American Conference on Telematics and Information Systems (EATIS)*, pp. 1-8, Cartagena, 2016.

[25]. Nikitin, P. V. and Rao, K.V.S. "Helical antenna for handheld UHF RFID reader," *2010 IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2010),* pp. 166-173. Orlando, FL, 2010.

[26]. Franciscatto, B. R.; Vuong, T. P.; Trang, T. T. and Defay, C. "Microstrip-fed quasi-Yagi antenna array for a different DSRC system," *2012 15 International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, pp.1-5, Toulouse, 2012

[27]. Jackson, D.R. "Introduction to Microstrip Antennas" *2013 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC – URSI National Radio Science Meeting*. Orlando Fl. July 2013.

[28]. Balanis, C. A. "Antennas Theory: Analysis and design", 3th Edition, Wiley, 2005.

[29]. Pozar, D.M. "Microwave Engineering" 4th Edition, Wiley 2011.

[30]. N. M. Mohamed-Hicho, E. Antonino-Daviu, M. Cabedo-Fabrés, J. P. Ciafardini and M. Ferrando-Bataller. "On the interaction of Characteristic Modes in slot antennas etched on finite ground planes". 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). pp. 1-5. April 2016.

[31]. J. P. Ciafardini, E. Garcia, G. Rodriguez, and J. A. Bava. "Antena de ranuras cruzadas para un radar ionosférico". In Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), 2014 IEEE. pp. 692-695. June 2014.

[32]. Diseños Electrónicos. “Fabricación de PCB - Método UV”. www.uedesign.com.ar/PDFs/M%C3%A9todoUV.pdf. [Online].

[33]. ETS-Lindgren. “Antennas: 3148B Log Periodic Dipole Array”. http://www.ets-lindgren.com/3148B. [Online].

[34]. Orlenius, J.; Rudander, H.; Khuda, I.; Kildal, P. S and Orlenius, C. "Measurements of RFID Tag Sensitivity in Reverberation Chamber," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 1345-1348, 2011.

[35]. Nikitin, P. V.; Seshagiri, K. V.; Martinez, R. R. and Lam,S. F. “Sensitivity and Impedance Measurements of UHF RFID Chips", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol 57, pp. 1297-1302.

[36]. Jadatech. “ThingMagic M6e UHF RAIN RFID”. www.jadaktech.com/products/rfid/embedded-uhf-rfid-readers/mercury6e-m6e/. [Online].

[37]. Minicircuits Voltage Controlled Oscillator ZRPD-1+. www.minicircuits.com/pdfs/ZRPD-1+.pdf. [Online].

[38]. Minicircuits Directional Coupler ZFDC-15-5. www.minicircuits.com/pdfs/ZFDC-15-5.pdf. [Online].

[39]. Mincircuits Voltage Controlled Oscillator ZX95-850A+. www.mincircuits.com/pdfs/ZX95-850+.pdf. [Online].

[40]. Mincircuits Frequency Mixer ZX05-10L+. www.mincircuits.com/pdfs/ZX05-10L+.pdf. [Online].

[41]. Minicircuits. Power Splitter/Combiner ZAPD-1+. www.minicircuits.com/pdfs/ZAPD-1.pdf. [Online]