

# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LÓPEZ MATEOS"

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

## "ANÁLISIS DE MODELOS DE PROPAGACIÓN E INTERFERENCIA DE LA TECNOLOGÍA RFID PASIVA DE UHF PARA APLICACIÓN EN LA IDENTIFICACIÓN VEHICULAR"

## TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

## PRESENTA:

### ING. ROBERTO OROSCO VEGA

A S E S O R:

DR. ROBERTO LINARES Y MIRANDA

MÉXICO, D. F. JUNIO DEL 2011





## INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SIP-14

#### SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

1011100	memoros de la Comisión M	CCA120	ora de	I CSIS	uesig	gnaua		
por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgri	ado e Investigación de				ESI	ME-Z	acate	nco
para examinar la tesis titulada:				-22				
" ANALISIS DE MODELOS DE PROPAGA	CION E INTERFEREN	CIA	DEL	ATE	CNC	DLOC	GIA R	FID
PASIVA EN UHF PARA APLICA	CION EN LA IDENTIFI	CAC	TON	VEH	ICUL	AR"		
OROSCO	VECA				D	OBE	DTO	
Apellido paterno	Apellido materno				1	Nomt	ore(s)	
	Con registro:	A	0	9	0	7	4	4
aspirante de				1	_			_
asphane de.								
MAESTRÍA EN CIENC	IAS EN INGENIERÍA E.	LEC	TRÓN	ICA				
Después de intercambiar opiniones los miembros o	de la Comisión manifestaro	n SL	APR	OBA	CIÓN	DE	LAT	ESIS
en virtud de que satisface los requisitos señalados	por las disposiciones regla	menta	arias vi	igent	cs.	~~~		COIL
LA CO	OMISIÓN REVISORA							
ELD	DIRECTOR DE TESIS							
	lugar (							
	fulles ->							
DR	ROBERTO LINARES Y	(	-					
/	MIRANDA							
Presidente			Sam	ndo '	Vocal	/	1	
		1	Segu	1	v Ocal	/	/	
N is a a		1		1	1 L	/	/	
José Dela Pora		1		Z	h	1	/	
DR. JOSÉ MANUEL DE LA ROSA VÁZQU	IEZ M	. EN	C. SA	J izv.	LDON	RRI	/	00
DR. JOJÉ MANUEL DE LA ROSA VÁZQU	IEZ M	. EN	C. SA		ADON GON	RRIE	/ CARI EZ	00
DR. JOJÉ MANUEL DE LA ROSA VÁZQU	IEZ M	. EN	C. SA	SES O		RRIC	CARI EZ	00
DR. JOJÉ MANUEL DE LA ROSA VÁZQU Tercer Vocal	IEZ M	. EN M	C. SA TENES			RRIE	/ CARI EZ	00
DR. JOSÉ MANUEL DE LA ROSA VÁZQU Tercer Vocal	IEZ M	. EN M	C. SA IENES	SES o		RIC	/ CARI EZ	00
DR. JOJÉ MANUEL DE LA ROSA VÁZQU Tercer Vocal	EZ M	. EN	C. SA TENES			RIC	/ CARI EZ	00
DR. RAÚL PEÑA RIVERO	IEZ M	. EN N	C. SA IENES Se				CARI EZ	00
DR. JOJÉ MANUEL DE LA ROSA VÁZQU Tercer Vocal DR. RAÚL PEÑA RIVERO	JEZ M M. EN.	. EN N	C. SA IENES Se	SES Creta			/ EZ TENO	00
DR. JOJÉ MANUEL DE LA ROSA VÁZQU Tercer Vocal DR. RAÚL PEÑA RIVERO EL PRESIDI	NEZ M	. EN N	C. SA IENES Se	creta HÉCTI		CAL	CARI EZ TEN(	00
DR. JOJÉ MANUEL DE LA ROSA VÁZQU Tercer Vocal DR. RAÚL PEÑA RIVERO EL PRESIDI	M. EN ENTE DEL COLEGIO	. EN M	C. SA IENES Se DSÉ H	creta HÉC			/ EZ TENO	00



#### INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL secretaría de investigación y posgrado

#### CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F., el día 20 del mes Junio del año 2011, el (la) que suscribe Roberto Orosco Vega alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería electrónica, con número de registro A090744, adscrito a la Selección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME, Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Roberto Linares Y Miranda y cede los derechos del trabajo intitulado "Análisis de modelos de propagación e interferencia de la tecnología RFID pasiva de UHF para aplicación en la identificación vehicular", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: roroscov0900@ipn.mx, ovr\_beto@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Roberto Orosco Vega Nombre y firma

## RESUMEN

La tecnología de RFID pasiva tiene una amplia aplicación en diferentes ámbitos de la sociedad, en la identificación vehicular se utiliza para pago de peaje; en México se ha desarrollado para identificar vehículos en utopistas de forma estática, lo cual hace ineficiente al sistema.

En esta tesis se presenta un análisis de los diferentes aspectos involucrados en la tecnología RFID pasiva para la identificación de vehículos en forma dinámica, es decir cuando los vehículos circulan a velocidades de hasta 140 km/hr. Para esto se han tomado como referencia reportes del desempeño de esta tecnología y algunos modelos de propagación de RF que se encuentran en la literatura. Los aspectos más relevantes que se presentan en esta tesis son:

- La sensibilidad de etiquetas RFID pasivas de acuerdo a su geometría de colocación (acimutal y elevación).
- Una metodología para determinar la sensibilidad de radiofrecuencia en el conjunto circuito integrado (CI) -antena, así como también la determinación de la tasa de error (BER).
- Un análisis de los modelos de propagación, desde el modelo más simple que es el de una trayectoria (modelo de Friis) hasta el modelo de dos rayos donde se considera un ambiente real. El comportamiento del modelo de dos rayos se compara con resultados experimentales los cuales tienen una concordancia.
- La detección de los vehículos con la etiqueta RFID de acuerdo su velocidad, parámetro importante para el diseño del sistema sobre todo para el protocolo de comunicación.
- Un análisis de la relación Señal-Interferencia (SIR) y la Relación de Reducción del Intervalo de Lectura (IRRR).
- Un modelo para determinar de la distancia promedio a la que se pueden encontrar fuentes interferentes (Lectores RFID) y un modelo probabilístico para determinar el efecto de las interferencias considerando la distancia promedio. La validación del modelo se lleva a cabo con datos experimentales.

Los análisis desarrollados en esta tesis, puede aplicarse como referencia para el despliegue de un sistema de RFID pasivo en la identificación vehicular en el pago de peaje de forma automática a las velocidades típicas que se permite circular en México. Así como también en cualquier lugar donde se requiera tener un control de acceso de vehículos.

## ABSTRACT

Passive Radio Frequency Identification (RFID) technology has broad application in different areas of society, the vehicle identification is used to pay tolls, in Mexico has been developed to identify vehicles on freeway statically, which makes the system inefficient.

This thesis presents an analysis of the different aspects involved in passive RFID technology for identifying vehicles in dynamically, ie when the vehicles travel at speeds up to 140 km / hr. For this report have been taken as reference the performance of this technology and some RF propagation models that are found in the literature. The highlights in this thesis are:

- A sensitivity analysis of the tag according to its placement geometry (azimuth and elevation)
- A methodology for determining the sensitivity of integrated circuit antenna set, as well as determining the bit error rate (BER).
- An analysis of the propagation models from the simplest model known as Friis model to two ray model, where a real environment is considered. The behavior two ray model is compared with experimental data, which good agreement with theoretical results.
- Another contribution in thesis is the detection of vehicles with attached RFID tag in accordance speed, important design parameter for system RFID especially for the communication protocol.
- In this work presents an analysis of the signal-interference rate (SIR), where finally a model to determine the average distance is proposed, with which it can find interference sources.
- A probabilistic model to determine the effect of interference by considering the average distance also is proposed. Model validation is carried out with experimental data.

The developed analysis in this thesis can be applied as a reference in the implementation of a passive RFID system to identify vehicles automatically at average speeds allowed to circulate in Mexico, then is a useful tool in freeway to pay toll. Also may apply where vehicle access control is required.

### AGRADECIMIENTOS

A mi familia

A mis hermanos Muchas gracias por todo su apoyo a Reina, £o, £uis, Rosi y sobre todo a mi madre 9sabel.

A mi Abuelo y Amigo Sr. Martin

Con mucho cariño

A mis Profesores

Al Dr. Roberto Linares y Miranda, al Dr. Raúl Peña Rivero y al Men C. José Héctor Caltenco.

Por su apoyo, confianza, enseñanzas y consejos durante todo este tiempo, que me han servido en mi formación profesional.

A mis compañeros y amigos

Ing. £zequiel Ignacio £spinosa Rivas, Ing. Fernando £liseo Solares Zavala e Ing. Jonathan Conde £ópez.

Por su apoyo y esfuerzo durante las mediciones de campo realizadas en esta tesis, sin los cuales no hubiera sido posible llevarlas a cabo.

## **CONTENIDO**

RESUMENiv
ABSTRACTv
AGRADECIMIENTOSvi
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLASxi
LISTA DE ACRÓNIMOSxiv
OBJETIVO xvi
JUSTIFICACIÓNxvi
ALCANCE xvi
DISTRIBUCIÓN DE LA TESISxvii
CAPÍTULO 1 1
TECNOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA (RFID)1
1.1 Tecnologías de Auto-identificación aplicadas a la Identificación vehicular en México1
1.1.1 Sistema IAVE (Identificación Automática Vehicular)1
1.1.2 Sistema RFID con tecnología pasiva2
1.2 Taxonomía de los Sistemas RFID3
1.3 Protocolo ISO/IEC 18000-6C 5
1.4 Principios de Operación y funcionamiento7
1.4.1 Modulación y Codificación8
1.4.2 Comunicación Lector – Etiqueta (Enlace de subida)9
1.4.3 Comunicación Etiqueta – Lector (Enlace de bajada)10
1.5 Protocolos de Anticolisión en los sistemas RFID pasivos11
1.5.1 Protocolo ALOHA 12
1.5.2 Protocolo Árbol binario (Binary Tree)12
CAPÍTULO 2
DESEMPEÑO DE ETIQUETAS RFID PASIVAS EN LA BANDA DE UHF
2.1 Justificación de los Lectores RFID 14
2.2 Metodología de prueba 15
2.3 Equipo de RF y RFID empleado 17

2.4 Pruebas de desempeño de etiquetas RFID pasivas18
2.4.2 Tasa de lectura de etiquetas RFID pasivas19
2.4.3 Mediciones del parámetro de Polarización de la etiqueta de RFID 21
2.4.4 Prueba de Distribución de campo de lectura23
2.4.5 Sensibilidad de etiquetas RFID 25
2.4.5.1 Cálculo de la sensibilidad de la etiqueta RFID26
2.4.5.2 Potencia en el lector de RFID respecto a la respuesta de la etiqueta RFID 27
2.5 Análisis de la tasa de error por bit (BER) de un sistema de Tecnología RFID Pasiva 29
CAPÍTULO 3
MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA LA TECNOLOGÍA DE RFID EN LA BANDA DE UHF
3.1 Modelo de Friis
3.2 Modelo de 2 rayos
3.2.2 Coeficiente de Reflexión (Γ)
3.2.2.1 Polarización Paralela ( $\Gamma$   )38
3.2.2.2 Polarización Perpendicular ( $\Gamma$ $ot$ )
3.3 Modelo de dos rayos (Análisis vectorial) 40
3.3 Modelo de dos rayos aplicado a la Identificación vehicular con tecnología RFID 44
3.3.1 Modelo de dos rayos para el enlace de subida (Lector - Etiqueta)
3.3.2 Modelo de dos rayos para el enlace de bajada (Etiqueta - Lector)
3.3.3 Análisis del canal de comunicación de un sistema RFID aplicando el modelo de dos rayos 
3.3.3.1 Resultados del Análisis del canal de comunicación para el enlace de subida y el enlace de subida y 49
3.4 Comprobación de los modelos de propagación de la Tecnología RFID para la aplicación a la Identificación vehicular
3.4.1 Medición de la señal de propagación para un Sistema de Identificación vehicular 52
3.4.1.1 Equipo para la medición del Ambiente Electromagnético
3.4.1.2 Procedimiento de medición del ambiente electromagnético
3.4.1.3 Resultados de la medición del ambiente electromagnético
3.4.2 Instalación del portal con la antena del lector RFID54
3.4.2.1 Ajuste de la Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE)

3.4.2.2 Distribución de la Potencia eléctrica	. 56
3.4.3 Pruebas de lectura estática de la etiqueta de RFID	. 59
3.4.3.1 Equipo de RFID para la prueba de lectura estática de la etiqueta de RFID	. 59
3.4.3.2 Instalación del sistema para las pruebas de lectura estática de la etiqueta de RFID	. 59
3.4.3.3 Realización de las pruebas de lectura estática de la etiqueta de RFID	60
3.4.3.4 Resultado de las lecturas de prueba estática de la etiqueta de RFID	62
3.4.4 Respuesta del Sistema RFID para vehículos circulando a diferentes velocidades	. 62
3.4.4.1 Equipo para las pruebas de lectura dinámica de la etiqueta de RFID	62
3.4.4.2 Equipo auxiliar para la prueba de lectura dinámica	. 62
3.4.4.3 Procedimiento de evaluación para la prueba dinámica de la etiqueta de RFID	. 63
3.4.4.4 Desplazamiento de los vehículos por el portal	. 63
3.4.4.4.1 Vehículo Autobús (1)	. 64
3.4.4.4.2 Vehículo (2)	. 65
3.4.4.4.3 Vehículo (3)	. 68
3.4.4.5 Tasa de Lectura del sistema RFID de acuerdo al protocolo ISO/IEC 18000-6C	. 71
3.4.4.6 Tasa de Lectura de la Etiqueta de RFID para los diferentes modos de operación del	
Lector de RFID Impinj Speedway	. 72
Lector de RFID Impinj Speedway	. 72 . 76
Lector de RFID Impinj Speedway CAPÍTULO 4 INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS SISTEMAS DE RFID EN LA BANDA UHF	. 72 . 76 . 76
Lector de RFID Impinj Speedway CAPÍTULO 4 INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS SISTEMAS DE RFID EN LA BANDA UHF 4.1 Interferencia Lector – Lector	. 72 . 76 . 76 . 77
Lector de RFID Impinj Speedway CAPÍTULO 4 INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS SISTEMAS DE RFID EN LA BANDA UHF 4.1 Interferencia Lector – Lector 4.2 Función de distribución de la distancia promedio en un Sistema RFID con interferentes	. 72 . 76 . 76 . 77 . 79
Lector de RFID Impinj Speedway CAPÍTULO 4 INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS SISTEMAS DE RFID EN LA BANDA UHF 4.1 Interferencia Lector – Lector 4.2 Función de distribución de la distancia promedio en un Sistema RFID con interferentes 4.3 Análisis de las Interferencias en escenarios reales de identificación vehicular	. 72 . 76 . 76 . 77 . 77 . 84
Lector de RFID Impinj Speedway CAPÍTULO 4 INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS SISTEMAS DE RFID EN LA BANDA UHF 4.1 Interferencia Lector – Lector 4.2 Función de distribución de la distancia promedio en un Sistema RFID con interferentes 4.3 Análisis de las Interferencias en escenarios reales de identificación vehicular 4.3.1 Instalación y calibración del portal	. 72 . 76 . 76 . 77 . 79 . 84 . 84
Lector de RFID Impinj Speedway CAPÍTULO 4 INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS SISTEMAS DE RFID EN LA BANDA UHF 4.1 Interferencia Lector – Lector 4.2 Función de distribución de la distancia promedio en un Sistema RFID con interferentes 4.3 Análisis de las Interferencias en escenarios reales de identificación vehicular 4.3.1 Instalación y calibración del portal 4.3.2 Introducción de un sistema RFID interferente	. 72 . 76 . 76 . 77 . 79 . 84 . 84
Lector de RFID Impinj Speedway CAPÍTULO 4 INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS SISTEMAS DE RFID EN LA BANDA UHF 4.1 Interferencia Lector – Lector 4.2 Función de distribución de la distancia promedio en un Sistema RFID con interferentes 4.3 Análisis de las Interferencias en escenarios reales de identificación vehicular 4.3.1 Instalación y calibración del portal 4.3.2 Introducción de un sistema RFID interferente 4.3.2.1 Configuración 1 Sistema RFID con interferente	. 72 . 76 . 76 . 77 . 79 . 84 . 84 . 88
Lector de RFID Impinj Speedway CAPÍTULO 4 INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS SISTEMAS DE RFID EN LA BANDA UHF 4.1 Interferencia Lector – Lector 4.2 Función de distribución de la distancia promedio en un Sistema RFID con interferentes 4.3 Análisis de las Interferencias en escenarios reales de identificación vehicular 4.3.1 Instalación y calibración del portal 4.3.2 Introducción de un sistema RFID interferente 4.3.2.1 Configuración 1 Sistema RFID con interferente 4.3.2.2 Configuración 2 Sistema RFID con interferente	. 72 . 76 . 76 . 77 . 79 . 84 . 84 . 88 . 88
Lector de RFID Impinj Speedway CAPÍTULO 4 INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS SISTEMAS DE RFID EN LA BANDA UHF 4.1 Interferencia Lector – Lector 4.2 Función de distribución de la distancia promedio en un Sistema RFID con interferentes 4.3 Análisis de las Interferencias en escenarios reales de identificación vehicular 4.3.1 Instalación y calibración del portal 4.3.2 Introducción de un sistema RFID interferente 4.3.2.1 Configuración 1 Sistema RFID con interferente 4.3.2.2 Configuración 2 Sistema RFID con interferente 4.3.2.3 Configuración 3 Sistema RFID con interferente	. 72 . 76 . 76 . 77 . 79 . 84 . 88 . 88 . 88 . 89 . 90
Lector de RFID Impinj Speedway CAPÍTULO 4 INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS SISTEMAS DE RFID EN LA BANDA UHF 4.1 Interferencia Lector – Lector 4.2 Función de distribución de la distancia promedio en un Sistema RFID con interferentes 4.3 Análisis de las Interferencias en escenarios reales de identificación vehicular 4.3.1 Instalación y calibración del portal 4.3.2 Introducción de un sistema RFID interferente 4.3.2.1 Configuración 1 Sistema RFID con interferente 4.3.2.2 Configuración 2 Sistema RFID con interferente 4.3.2.3 Configuración 3 Sistema RFID con interferente 4.4 Análisis de las interferencias	. 72 . 76 . 77 . 79 . 84 . 88 . 88 . 88 . 89 . 90 . 92
Lector de RFID Impinj Speedway CAPÍTULO 4 INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS SISTEMAS DE RFID EN LA BANDA UHF 4.1 Interferencia Lector – Lector 4.2 Función de distribución de la distancia promedio en un Sistema RFID con interferentes 4.3 Análisis de las Interferencias en escenarios reales de identificación vehicular 4.3.1 Instalación y calibración del portal 4.3.2 Introducción de un sistema RFID interferente 4.3.2.1 Configuración 1 Sistema RFID con interferente 4.3.2.2 Configuración 2 Sistema RFID con interferente 4.3.2.3 Configuración 3 Sistema RFID con interferente 4.4.1 Relación Señal-Interferencia	. 72 . 76 . 77 . 79 . 84 . 88 . 88 . 88 . 89 . 90 . 92 . 92
Lector de RFID Impinj Speedway CAPÍTULO 4 INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS SISTEMAS DE RFID EN LA BANDA UHF 4.1 Interferencia Lector – Lector 4.2 Función de distribución de la distancia promedio en un Sistema RFID con interferentes 4.3 Análisis de las Interferencias en escenarios reales de identificación vehicular 4.3.1 Instalación y calibración del portal 4.3.2 Introducción de un sistema RFID interferente 4.3.2.1 Configuración 1 Sistema RFID con interferente 4.3.2.2 Configuración 2 Sistema RFID con interferente 4.3.2.3 Configuración 3 Sistema RFID con interferente 4.4 Análisis de las interferencias 4.4.1 Relación Señal-Interferencia 4.4.2 Relación de intervalo de reducción de lectura	. 72 . 76 . 77 . 79 . 84 . 88 . 88 . 88 . 88 . 89 . 90 . 92 . 92 . 93
Lector de RFID Impinj Speedway CAPÍTULO 4 INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS SISTEMAS DE RFID EN LA BANDA UHF 4.1 Interferencia Lector – Lector 4.2 Función de distribución de la distancia promedio en un Sistema RFID con interferentes 4.3 Análisis de las Interferencias en escenarios reales de identificación vehicular 4.3.1 Instalación y calibración del portal 4.3.2 Introducción de un sistema RFID interferente 4.3.2.1 Configuración 1 Sistema RFID con interferente 4.3.2.2 Configuración 2 Sistema RFID con interferente 4.3.2.3 Configuración 3 Sistema RFID con interferente 4.4 Análisis de las interferencias 4.4.1 Relación Señal-Interferencia 4.4.2 Relación de intervalo de reducción de lectura 4.4.3 Distancia promedio	. 72 . 76 . 77 . 79 . 84 . 84 . 88 . 88 . 88 . 89 . 90 . 92 . 92 . 93 . 93

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	96
Conclusiones	96
Trabajo Futuro	97
BIBLIOGRAFÍA	98
APÉNDICES	101
Apéndice A Codificación y Modulacion	101
Apéndice B Medición de la potencia nominal del Lector RFID	104
Apéndice C Medición de Pérdidas por retorno (ROE) de una línea de transmisión	108

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1.1 Sistema IAVE con aplicación a la identificación vehicular en México2
Figura 1. 2 Clasificación de Etiquetas RFID 3
Figura 1. 3 Frecuencias para UHF estandarizadas para sistemas RFID
Figura 1. 4 TARI de símbolos para una codificación PIE6
Figura 1. 5 Proceso de comunicación en un sistema de RFID pasivo7
Figura 1. 6 Estructura interna de etiquetas pasivas que operan en la banda de UHF
Figura 1. 7 Diagrama a bloques del proceso de transmisión para los dos enlaces del sistema RFID. 8
Figura 1. 8 Proceso de identificación de etiquetas RFID del protocolo ALOHA 12
Figura 1. 9 Proceso de identificación de etiquetas RFID del protocolo Árbol binario 13
Figura 2.1 Esquema básico de comunicación de un sistema RFID15
Figura 2. 2 Sistema RFID con configuración mono-estática
Figura 2. 3 Sistema RFID con configuración Bi-estática 17
Figura 2. 4 Equipo de RF y RFID empleado
Figura 2. 5 Medición de la potencia de salida para A) el Lector RFID Alien 9900 y B) para el Lector
RFID Motorola XR450 19
Figura 2. 6 Respuesta de los lectores XR450 (Izquierda) y Alien 9900 (Derecha) Potencia nominal vs
Atenuación
Figura 2. 7 Repuesta normalizada de la Tasa de lectura de una etiqueta de RFID vs Atenuación de
la potencia PIRE
Figura 2. 8 Esquema de patrones de radiación de las antenas con Polarización Horizontal 21
Figura 2. 9 Esquema de patrones de radiación de las antenas con Polarización Vertical 21
Figura 2. 10 Respuesta del número de lecturas normalizadas, potencia de atenuación y ángulo de
giro para polarización vertical
Figura 2. 11 Respuesta del número de lecturas normalizadas, potencia de atenuación y ángulo de
giro para polarización horizontal 23
Figura 2. 12 Resultados obtenidos de la Distribución de campo de cobertura para las etiquetas de
RFID A) Avery-Dennisson Mod. AD-224, UBUI Mod. RSI-654 y Mod. RSI-663
Figura 2. 13 Esquema para el cálculo de Sensibilidad de etiquetas RFID pasivas 25
Figura 2. 14 Modulación ASK con codificación no retorno a cero 29
Figura 3. 1 Identificación de vehículos por medio de la tecnología de RFID
Figura 3. 2 Configuración del Modelo de Friis
Figura 3. 3 Comparación de resultados teóricos y medidos de la atenuación de la señal de RF 35
Figura 3. 4 Geometría del modelo de 2 rayos aproximado 36
Figura 3. 5 Comportamiento del campo <b>Et</b> debido a la superposición del rayo directo <b>ED</b> y del
rayo reflejado <i>ER</i>
Figure 2. 6 Cooficientos de Poflovión ys ángula de insidencia con diferentes ser 20

Figura 3. 7 Modelo de dos rayos considerando un dipolo ideal como antena del transmisor 40
Figura 3. 8 Componentes Ez y Ex resultantes debido a una polarización perpendicular respecto al
plano de incidencia
Figura 3. 9 Campo eléctrico total para el modelo de dos rayos con y sin aproximaciones debido a
una polarización perpendicular de la señal de RF 42
Figura 3. 10 Comparación del comportamiento de la señal de RF entre el Modelo de Friis y el
Modelo de dos rayos
Figura 3. 11 Escenario real del modelo de dos rayos con aplicación a la identificación vehicular 44
Figura 3. 12 Esquema para la determinación del ángulo $oldsymbol{ heta}$ de inclinación de la antena del lector
respecto a la vertical
Figura 3. 13 Pérdidas por polarización para el ángulo de apertura entre la antena transmisora del
lector y la antena de la etiqueta 46
Figura 3. 14 Resultados de simulación del enlace de subida para la tecnología RFID
Figura 3. 15 Resultados de simulación del enlace de bajada para la tecnología RFID (Downlink) 50
Figura 3. 16 Configuración del sistema RFID para la identificación vehicular
Figura 3. 17 Equipo de RFID y RF utilizado durante las pruebas de desempeño de etiquetas RFID. 52
Figura 3. 18 Equipo de RFID y RF utilizado durante la medición del Ambiente electromagnético en
el sitio de pruebas
Figura 3. 19 Ambiente electromagnético en el sitio de pruebas
Figura 3. 20 Sistema de medición para las pruebas de lectura dinámicas
Figura 3. 21 Proceso de construcción del portal y colocación de la antena yagui a 15° respecto a la
vertical55
vertical
vertical
vertical
<ul> <li>vertical</li></ul>
<ul> <li>vertical</li></ul>
<ul> <li>vertical</li></ul>
vertical.55Figura 3. 22 Ajuste de la Potencia PIRE en conformidad con la norma NOM-121.55Figura 3. 23 Proceso de medición de cobertura.56Figura 3. 24 Cobertura de potencia eléctrica en el sitio de la prueba dinámica.56Figura 3. 25 Cobertura del número de lecturas en el sitio de la prueba dinámica.57Figura 3. 26 Cobertura de potencia en el sitio de pruebas dinámicas simulada por medio del58Figura 3. 27 Puntos y ángulos para la lectura estática de la etiqueta RFID.60
vertical.55Figura 3. 22 Ajuste de la Potencia PIRE en conformidad con la norma NOM-121.55Figura 3. 23 Proceso de medición de cobertura.56Figura 3. 24 Cobertura de potencia eléctrica en el sitio de la prueba dinámica.56Figura 3. 25 Cobertura del número de lecturas en el sitio de la prueba dinámica.57Figura 3. 26 Cobertura de potencia en el sitio de pruebas dinámicas simulada por medio del58modelo de dos rayos en condición de línea de vista.58Figura 3. 27 Puntos y ángulos para la lectura estática de la etiqueta RFID.60Figura 3. 28 Procedimiento de evaluación de las condiciones ambientales.61
vertical.55Figura 3. 22 Ajuste de la Potencia PIRE en conformidad con la norma NOM-121.55Figura 3. 23 Proceso de medición de cobertura.56Figura 3. 24 Cobertura de potencia eléctrica en el sitio de la prueba dinámica.56Figura 3. 25 Cobertura del número de lecturas en el sitio de la prueba dinámica.57Figura 3. 26 Cobertura de potencia en el sitio de pruebas dinámicas simulada por medio del58modelo de dos rayos en condición de línea de vista.58Figura 3. 27 Puntos y ángulos para la lectura estática de la etiqueta RFID.60Figura 3. 29 Prueba de lectura estática de la etiqueta de RFID.61
vertical.55Figura 3. 22 Ajuste de la Potencia PIRE en conformidad con la norma NOM-121.55Figura 3. 23 Proceso de medición de cobertura.56Figura 3. 24 Cobertura de potencia eléctrica en el sitio de la prueba dinámica.56Figura 3. 25 Cobertura del número de lecturas en el sitio de la prueba dinámica.57Figura 3. 26 Cobertura de potencia en el sitio de pruebas dinámicas simulada por medio del58modelo de dos rayos en condición de línea de vista.58Figura 3. 27 Puntos y ángulos para la lectura estática de la etiqueta RFID.60Figura 3. 29 Prueba de lectura estática de la etiqueta ad RFID.61Figura 3. 30 Pruebas de velocidad para el Autobús.65
vertical.55Figura 3. 22 Ajuste de la Potencia PIRE en conformidad con la norma NOM-121.55Figura 3. 23 Proceso de medición de cobertura.56Figura 3. 24 Cobertura de potencia eléctrica en el sitio de la prueba dinámica.56Figura 3. 25 Cobertura del número de lecturas en el sitio de la prueba dinámica.57Figura 3. 26 Cobertura de potencia en el sitio de pruebas dinámicas simulada por medio del58modelo de dos rayos en condición de línea de vista.58Figura 3. 27 Puntos y ángulos para la lectura estática de la etiqueta RFID.60Figura 3. 29 Prueba de lectura estática de la etiqueta de RFID.61Figura 3. 30 Pruebas de velocidad para el Autobús.65Figura 3. 31 Pruebas de velocidad para el vehículo 2.68
vertical55Figura 3. 22 Ajuste de la Potencia PIRE en conformidad con la norma NOM-121.55Figura 3. 23 Proceso de medición de cobertura.56Figura 3. 24 Cobertura de potencia eléctrica en el sitio de la prueba dinámica.56Figura 3. 25 Cobertura del número de lecturas en el sitio de la prueba dinámica.57Figura 3. 26 Cobertura de potencia en el sitio de pruebas dinámicas simulada por medio del58modelo de dos rayos en condición de línea de vista.58Figura 3. 27 Puntos y ángulos para la lectura estática de la etiqueta RFID.60Figura 3. 29 Prueba de lectura estática de la etiqueta ambientales.61Figura 3. 30 Pruebas de velocidad para el Autobús.65Figura 3. 31 Pruebas de velocidad para el vehículo 2.68Figura 3. 32 Pruebas de velocidad para el vehículo 3.70
vertical.55Figura 3. 22 Ajuste de la Potencia PIRE en conformidad con la norma NOM-121.55Figura 3. 23 Proceso de medición de cobertura.56Figura 3. 24 Cobertura de potencia eléctrica en el sitio de la prueba dinámica.56Figura 3. 25 Cobertura del número de lecturas en el sitio de la prueba dinámica.57Figura 3. 26 Cobertura de potencia en el sitio de pruebas dinámicas simulada por medio del58modelo de dos rayos en condición de línea de vista.58Figura 3. 27 Puntos y ángulos para la lectura estática de la etiqueta RFID.60Figura 3. 29 Prueba de lectura estática de la etiqueta de RFID.61Figura 3. 30 Pruebas de velocidad para el Autobús.65Figura 3. 31 Pruebas de velocidad para el vehículo 2.68Figura 3. 32 Pruebas de velocidad para el vehículo 3.70Figura 3. 33 Respuesta en 3D del Número de lecturas, tiempos promedio y modos de operación.72
vertical.55Figura 3. 22 Ajuste de la Potencia PIRE en conformidad con la norma NOM-121.55Figura 3. 23 Proceso de medición de cobertura.56Figura 3. 24 Cobertura de potencia eléctrica en el sitio de la prueba dinámica.56Figura 3. 25 Cobertura del número de lecturas en el sitio de la prueba dinámica.57Figura 3. 26 Cobertura de potencia en el sitio de pruebas dinámicas simulada por medio del58modelo de dos rayos en condición de línea de vista.58Figura 3. 27 Puntos y ángulos para la lectura estática de la etiqueta RFID.60Figura 3. 29 Prueba de lectura estática de la etiqueta de RFID.61Figura 3. 30 Pruebas de velocidad para el Autobús.65Figura 3. 31 Pruebas de velocidad para el vehículo 2.68Figura 3. 32 Pruebas de velocidad para el vehículo 3.70Figura 3. 33 Respuesta en 3D del Número de lecturas, tiempos promedio y modos de operación.72Figura 3. 34 Respuesta de Número de Lecturas promedio vs velocidad de los automóviles.73
vertical
vertical
vertical
vertical55Figura 3. 22 Ajuste de la Potencia PIRE en conformidad con la norma NOM-121.55Figura 3. 23 Proceso de medición de cobertura.56Figura 3. 24 Cobertura de potencia eléctrica en el sitio de la prueba dinámica.56Figura 3. 25 Cobertura del número de lecturas en el sitio de la prueba dinámica.57Figura 3. 26 Cobertura de potencia en el sitio de pruebas dinámicas simulada por medio del57modelo de dos rayos en condición de línea de vista.58Figura 3. 27 Puntos y ángulos para la lectura estática de la etiqueta RFID.60Figura 3. 29 Prueba de lectura estática de la etiqueta de RFID.61Figura 3. 30 Pruebas de velocidad para el Autobús.65Figura 3. 31 Pruebas de velocidad para el vehículo 2.68Figura 3. 32 Pruebas de velocidad para el vehículo 3.70Figura 3. 34 Respuesta en 3D del Número de lecturas, tiempos promedio y modos de operación.72Figura 3. 35 Análisis tridimensional entre Número de lecturas, velocidades y modos de operación73Figura 4. 1 Proceso de Interferencia Electromagnética (EMI).77Figura 4. 2 Interferencia Lector – Lector en un sistema RFID en la banda de UHF.78

Figura 4. 4 Función de densidad de probabilidad para distancias normalizadas	81
Figura 4. 5 Función de densidad de probabilidad o distancia promedio	83
Figura 4. 6 Función de densidad de probabilidad de distancia promedio	84
Figura 4. 7 Instalación del portal del sistema RFID.	85
Figura 4. 8 Calibración de sistema de RFID del portal	86
Figura 4. 9 Esquema para la medición de la señal radioeléctrica	86
Figura 4. 10 Cobertura de número de lecturas de la etiqueta de RFID con interferente en el sitio d	de
pruebas dinámicas	87
Figura 4. 11 Configuración 1 Sistema RFID con interferente	88
Figura 4. 12 Cobertura de número de lecturas de la etiqueta de RFID con interferente para la	
configuración 1	89
Figura 4. 13 Configuración 2 Sistema RFID con interferente	89
Figura 4. 14 Cobertura de número de lecturas de la etiqueta de RFID con interferente para la	
configuración 2	90
Figura 4. 15 Configuración 3 Sistema RFID con interferente	91
Figura 4. 16 Cobertura de número de lecturas de la etiqueta RFID con interferente para la	
configuración 3	91
Figura 4. 17 Esquema de los sistemas RFID (Victima -Interferente)	94

## Lista de Tablas

Fabla 1. 1 Normas ISO para RFID pasiva	. 5
abla 2. 1 Sensibilidad de la etiqueta RFID pasiva genérica Avery-Dennisson AD-224 con un sister الم	na
Bi-estático y con un sistema Mono-estático	28
Fabla 3. 1 Resultados de la pérdida de trayectoria en una cámara anecoica.	34
abla 3. 2 Parámetros de la Interfaz aérea del lector Impinj en conformidad con la norma ISO/IE	С
18000-6C	71
Fabla 3. 3 N. de bits – Lecturas para los modos de Operación del lector Impinj speedway	75
Fabla 4. 1 Medición de potencia radioeléctrica en el portal	87
Fabla 4. 2 Resultados de SIR, IRRR y $oldsymbol{d}$ para las configuraciones 1, 2 y 3	95

## LISTA DE ACRÓNIMOS

ALOHA	Acceso Aleatorio por división en el tiempo		
ASCII	Código Estándar Americano para el Intercambio de Información		
ASK	Modulación por desplazamiento de Amplitud		
Auto –ID	Identificación Automática		
Backscattering	Retrodispersión		
BER	Tasa de Error por Bit		
сс	Corriente Continua		
CCF	Comisión Federal de Comunicaciones		
ССР	Centro de Control de Peaje		
СІ	Circuito Integrado		
CSMA	Acceso Múltiple por Detección de Portadora		
EMI	Interferencia Electromagnética		
EPC	Código Electrónico de Producto		
FDMA	Acceso Múltiple por división de Frecuencia		
fdp	Función de densidad de probabilidad		
Frequency Hopping	Salto de Frecuencia		
FSA	Trama Ranurado ALOHA		
FSK	Modulación por desplazamiento de Frecuencia		
IAVE	Identificación Automática Vehicular		
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional		
IRRR	Relación del Intervalo de reducción de lectura		

ISM	Sistemas Industriales Científicos y Médicos			
ISO	Organización Internacional de Estandarización			
MAC	Mecanismo de Acceso al medio			
NOM-121	Norma Oficial Mexicana 121			
ООК	Modulación encendido apagado			
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Efectiva			
PLF	Factor de pérdidas por polarización			
PR-ASK	Modulación Fase-Invertida por desplazamiento de Amplitud			
PSK	Modulación por desplazamiento de Fase			
R&S	Rodhe and Schwarz			
RCS	Sección Transversal de Radar			
RF	Radiofrecuencia			
RFID	Identificación de Objetos mediante Radiofrecuencia			
Rx	Receptor (a)			
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes			
SIR	Relación Señal - Interferencia			
TARI	Intervalo de Tiempo de Referencia			
TDMA	Acceso Múltiple por división de Tiempo			
Тх	Trasmisor (a)			
UHF	Ultra Alta Frecuencia			

### OBJETIVO

Analizar modelos de propagación e interferencias electromagnéticas (EMI) de la tecnología de RFID pasiva en la banda UHF para la aplicación de identificación vehicular.

Para alcanzar el objetivo general se tienen los siguientes objetivos particulares:

- Proponer metodologías de la medición de la sensibilidad de las etiquetas de los sistemas RFID pasivos en la banda de UHF.
- Estudiar modelos de propagación de la señal de RF de la tecnología RFID en la banda UHF para escenarios de identificación vehicular.
- Analizar el comportamiento del Sistema RFID para la identificación vehicular.
- Analizar las interferencias electromagnéticas (EMI) de la tecnología RFID en la banda de UHF para un escenario de identificación vehicular.

## JUSTIFICACIÓN

La tecnología de RFID en la banda de frecuencias de UHF, en especial la de 915 MHz, se está aplicando para el control de identificación vehicular, en muchos países del mundo, específicamente para el pago de peaje en autopistas. Sin embargo, la aplicación para un control vehicular total de un país, aun no se ha llevado a cabo, por la gran cantidad de incógnitas que aún se tienen respecto al proceso de propagación de la señal de RF usada en dicha tecnología, ya que normalmente los vehículos circulan a diferentes velocidades con escenarios donde la señal de RFID sufre Reflexiones, Refracciones y Difracciones que afectan el desempeño de esta tecnología.

De acuerdo a lo anterior se plantearon los objetivos de esta tesis teniendo el siguiente alcance.

### ALCANCE

El alcance de este trabajo de investigación se enfoca a tres puntos básicos necesarios para tener un sistema de tecnología RFID pasivo de alto desempeño en la banda de frecuencias de UHF para la aplicación de la identificación vehicular, los cuales son:

Desarrollo de una metodología para determinar la sensibilidad de las etiquetas RFID pasivas. Parámetro importante, para determinar la distancia a la cual se pueden identificar vehículos.

Análisis de los modelos de propagación relacionados con la tecnología RFID pasiva en la banda de UHF que se presentan en el ambiente real de la identificación vehicular.

Determinación de un modelo para el análisis de interferencias de la tecnología RFID pasiva, para la aplicación a la identificación vehicular.

## **DISTRIBUCIÓN DE LA TESIS**

La distribución de esta tesis se presenta de la siguiente forma:

Capítulo 1. En este capítulo se presenta la introducción, los antecedentes y los conceptos básicos de la tecnología RFID, y se describe el sistema de RFID utilizado en el desarrollo de este trabajo.

Capítulo 2. En este capítulo se reporta una metodología de evaluación del desempeño de etiquetas RFID pasivas, que operan en la banda de frecuencias de UHF. La metodología se enfoca a la detección de la etiqueta de acuerdo a su ubicación espacial (acimutal y elevación). Se presenta también una metodología para determinar la sensibilidad del conjunto circuito integrado (CI)-antena, así como la tasa de error (BER).

Capítulo 3. En este capítulo se presenta un análisis de los modelos de propagación, desde el modelo de trayectoria directa (modelo de Friis), hasta el modelo de dos rayos donde se considera un ambiente real. El comportamiento del modelo de dos rayos se compara con los resultados experimentales. También se hace un análisis de la detección de los vehículos con la etiqueta RFID de acuerdo a su velocidad, parámetro importante para el diseño del sistema, sobre todo para el protocolo de comunicación.

Capítulo 4. En este capítulo se analiza uno de los problemas más comunes en cualquier sistema de radiocomunicación, que son las interferencias. Los sistemas de RFID no son la excepción, por lo que en este apartado se presenta un análisis de la Relación Señal-Interferencia, y se propone un modelo para determinar la distancia promedio a la que se pueden encontrar fuentes interferentes y un modelo probabilístico para determinar el efecto de las interferencias en función de la distancia promedio.

Por último se presentan las conclusiones de este trabajo, que se enfocan a las recomendaciones de diseño para la optimización de un sistema RFID con tecnología pasiva en la banda de UHF para la aplicación a la identificación vehicular, así como trabajos futuros.

## **TECNOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA (RFID)**

En los últimos años las tecnologías de auto-identificación han tenido mucha aplicación en casi todos los ámbitos de la sociedad [1], entre sus múltiples aplicaciones se puede mencionar el control de acceso vehicular a edificios, unidades gubernamentales y de educación, así como también en casetas de tele-peaje.

Las tecnologías de auto identificación para la aplicación de acceso vehicular de mayor auge en los últimos años son: sistemas biométricos, tarjetas magnéticas, tarjetas de código de barras y recientemente el sistema de Identificación por Radiofrecuencia (RFID), que en México se utiliza para pago de peaje en las autopistas y se conoce como la tarjeta IAVE (Identificación Automática Vehicular) [1]. El último sistema mencionado es el de mayor aplicación por sus múltiples ventajas con respectos a las anteriores tecnologías [1, 2].

En este capítulo se presenta la tecnología de auto-identificación que se está aplicado en México y una breve descripción de los conceptos básicos en los que se basa su funcionamiento, así como su taxonomía, los elementos que la componen y el protocolo de comunicación para su desempeño. Todo esto con el objetivo de identificar el marco de la ubicación del trabajo de investigación que se presenta en esta tesis.

# **1.1** Tecnologías de Auto-identificación aplicadas a la Identificación vehicular en México

En los últimos años los dos sistemas de auto-identificación en México más destacados que se aplican al control de acceso vehicular son los de RFID del tipo pasivo; llamados así, porque la etiqueta que utilizan no necesita de una fuente de polarización (batería), se activa mediante el proceso de identificación con una señal de radiofrecuencia. Estos sistemas son los siguientes:

#### 1.1.1 Sistema IAVE (Identificación Automática Vehicular)

Los sistemas de identificación automática vehicular (IAVE) para aplicación de peaje se iniciaron con diseños sencillos de tipo manual. Actualmente en México, existen tres niveles de sistemas para peaje que se usan en autopistas: manuales, semiautomáticos y automáticos; predominando los semiautomáticos. El sistema IAVE, así denominado en México como programa, es un ejemplo claro de un sistema semiautomático de identificación de vehículos que usa tecnología RFID, aún no se tienen sistemas completamente automáticos que se denominan "Sin Barreras". Todo lo relacionado con la tecnología del sistema IAVE es controlado por la empresa diseñadora [3]. El

sistema se utiliza principalmente para el control de tránsito de vehículos en casetas de peaje de autopistas. Es un sistema de detección de vehículos a baja velocidad (>20 km/h) y a veces requiere de un alto total para validar una tarjeta de RFID y controlar una barrera de paso. La tarjeta RFID es rígida, está constituida por una antena y un circuito integrado, el protocolo de comunicación se basa en la norma ISO/IEC 180006-B con un código único e insustituible para tener seguridad. Al momento de presentar la tarjeta en la caseta de pago, la tarjeta es identificada por una antena lectora usando señal de Radiofrecuencia y la información leída se valida, así de forma automática se abre la barrera autorizando el paso del vehículo. La operación se registra en un sistema de validación en la plaza de cobro. El sistema de validación envía la información vía satélite u otro medio de comunicación al centro de control de peaje (CCP) .La tarjeta IAVE tiene un sistema cifrado para dar seguridad de propiedad, como sistema cuenta con redundancias de seguridad como es un sistema de circuito cerrado de video que se monitorea vía satélite u otros sistemas de telecomunicación. Los sistemas IAVE con tecnología RFID están normados a través de ISO/IEC 18000-6B, norma que está obsoleta, la norma vigente es la ISO/IEC 18000-6C. Una foto de este sistema de peaje en autopistas se muestra en la figura 1.1.



Circulación de los Automoviles Figura 1.1 Sistema IAVE con aplicación a la identificación vehicular en México.

#### 1.1.2 Sistema RFID con tecnología pasiva

Es una tecnología de identificación automática y captura de datos cuyo propósito es transmitir la identidad u otra información de un objeto mediante ondas de radio. Un sistema de RFID básico está compuesto por 4 elementos: Una computadora, Un lector/escritor de RFID, una antena de RF y una etiqueta de RFID, que se forma por una antena y un Circuito integrado (CI) con una memoria para almacenar datos. El lector y la etiqueta interactúan para conseguir la comunicación y transferir la información.

El lector/escritor genera una señal de RF de interrogación, la cual se transmite por la antena y se propaga uniformemente por el espacio libre, esta señal cuando incide en la antena de la etiqueta, y llega al CI, se convierte en una corriente continua (CC) que lo alimenta, el cual genera la señal de respuesta hacia el lector por medio del fenómeno de retrodispersión [1,2,4]. El proceso del protocolo de comunicación se describirá posteriormente.

#### 1.2 Taxonomía de los Sistemas RFID

Los sistemas de RFID se pueden clasificar por: por la frecuencia en que trabajan, el tipo de lector que opera en el sistema o si la etiqueta de RFID requiere alimentación continúa o contiene alimentación propia. Sin embargo, una de las clasificaciones de acuerdo a los objetivos de este trabajo, es la que específica el centro de Auto-ID [5], que clasifica las etiquetas RFID de acuerdo a su operatividad y funcionalidad. La clasificación se da en clases por su sofisticación (de la clase 0 a la clase 5), lo cual se describe a continuación:

- Clase 0, corresponde a las etiquetas de solo lectura, este tipo de etiquetas se programan con un número de serie único (EPC) desde el momento de su fabricación.
- Clase 1, son etiquetas que tienen la funcionalidad básica. En este tipo de etiquetas solo se puede escribir en su memoria una vez, pero la información grabada puede ser leída múltiples veces. La lectura se lleva a cabo cuando el lector envía una señal de RF codificada, sí la codificación se reconoce, la etiqueta envía la respuesta. La señal de la respuesta contiene la información de la memoria y se genera por medio de la variación de la impedancia de carga del Circuito Integrado, en el cual se presentan dos estados de mínimo y máximo, que corresponden al acoplamiento con la impedancia de la antena generando el fenómeno que se identifica como retrodispersión.
- Clase 2, son etiquetas pasivas con funciones adicionales como encriptación de la información, mayor capacidad de memoria y se puede reescribir en su memoria múltiples veces.
- Clase 3, estas etiquetas son semi-pasivas, esto significa que contienen una batería interna la cual energiza el Circuito Integrado, pero el fenómeno de retrodispersión se genera igual que en las etiquetas clase 1.
- Clase 4, las etiquetas son activas, cuentan con una batería interna y un transmisor, aumentando la distancia de detección considerablemente. En este caso las etiquetas están constantemente emitiendo señal de RF para su localización; el circuito integrado que tienen es más sofisticado y pueden tener mayor capacidad de memoria.
- Clase 5, este tipo de etiquetas son activas al igual que las clase 4, pueden comunicarse con otras etiquetas tal como lo hacen los lectores de RFID.

Un diagrama a bloques de esta clasificación de etiquetas RFID se presenta a continuación en la figura 1.2.



Figura 1. 2 Clasificación de Etiquetas RFID.

Otra clasificación de los sistemas de RFID es de acuerdo a la frecuencia en que operan. Generalmente dichos sistemas operan en bandas de frecuencias especificadas para los sistemas Industriales, Científicos y Médicos (ISM), que ocupan pequeñas proporciones de espectro electromagnético, desde las Bajas frecuencias como la de 125 kHz hasta las Microondas de 5.8 GHz .Un esquema que ilustra las especificaciones de frecuencia para la tecnología RFID se muestra en la figura 1.3.



Figura 1. 3 Frecuencias para UHF estandarizadas para sistemas RFID.

Como se puede observar en la figura anterior México no aparece en el esquema de frecuencias; sin embargo, sí se tiene definida una norma homologada internacionalmente para equipos ISM, que es la NOM 121-SCT1-2009, publicada el 21 de junio de 2010 en el diario oficial [6]. Esta norma cubre las especificaciones del intervalo de frecuencia y el nivel de potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE) de la tecnología RFID de la banda de frecuencia en UHF.

La descripción anterior corresponde a la primera generación de etiquetas de la tecnología RFID. Para la segunda generación la normatividad se llevó a cabo por ISO/IEC, toda la clasificación anterior se específica con las normas ISO/IEC 18000. Para el caso de las etiquetas RFID pasivas que se utilizan para la identificación vehicular, se clasifica también con la norma EPC Gen2. En la actualidad las normas que rigen la aplicación objeto de esta tesis son las ISO/IEC, las cuales se describen brevemente a continuación y se pueden consultar en [7]:

 ISO/IEC 18000. Es una serie de estándares que fueron desarrollados por el comité técnico ISO/IEC/JTC 1/SC31/WG4/SG3 y está en constante revisión para homologar los nuevos desarrollos tecnológicos. Este estándar actualmente se compone de 7 partes que se especifican en la tabla 1.1. Cada una de las partes en que se divide el estándar 18000 muestra un aspecto distinto de los sistemas RFID, la primera parte describe como trabaja la norma y el resto está dividido por las frecuencias de operación de los sistemas RFID.

Norma ISO	Descripción	Situación
ISO 11784	RFID de animales – Estructura del código.	Norma publicada en 1996
ISO 11785	RFID de animales – Documentación Técnica	Norma publicada en 1996
ISO/IEC 14443	Tarjetas de Identificación – Tarjetas de proximidad	Norma publicada en 2000
ISO/IEC 15693	Tarjetas de Identificación – Tarjetas de vecindad	Norma publicada en 2000
ISO/IEC 18001	Tecnología de la información –Técnicas de auto- identificación automática y captura de datos (AIDC) – RFID para gestión de artículos.	Norma publicada en 2004
ISO/IEC18000-1	Parámetro genérico para las comunicaciones de interfaz aérea para frecuencias globales.	Norma publicada en 2004
ISO/IEC18000-2	Parámetro para las comunicaciones de interfaz área por debajo de 135 kHz.	Norma publicada en 2004
ISO/IEC18000-3	Parámetro para las comunicaciones de interfaz área a 13.56 MHz	Norma publicada en 2004
ISO/IEC18000-4	Parámetro para las comunicaciones de interfaz área a 2.4 GHz	Norma publicada en 2004
ISO/IEC18000-5	Parámetro para las comunicaciones de interfaz área de 5.8 MHz.	Norma publicada en 2004
ISO/IEC18000-6	Parámetro para las comunicaciones de interfaz área de 860 -930 MHz	Norma publicada en 2004
ISO/IEC 15961	RFID para gestión de artículos – Protocolo de datos interfaz de aplicación.	Norma publicada en 2004
ISO/IEC15962	RFID para gestión de artículos – Reglas de codificación del protocolo y funciones de memoria lógica.	Norma publicada en 2004
ISO/IEC15963	RFID para gestión de artículos – Identificación Única de etiquetas RF.	Versión Final de la norma.

#### Tabla 1. 1 Normas ISO para RFID pasiva.

#### 1.3 Protocolo ISO/IEC 18000-6C

El estándar ISO/IEC 18000-6C es el más reciente para regular la tecnología RFID pasiva, por lo tanto el más adecuado para la aplicación de identificación vehicular (para evitar confusión de términos todo lo referente se especificará con los acrónimos en ingles dado que son los más conocidos internacionalmente). Los parámetros más importantes para el protocolo de comunicación de la interface aérea que toma en cuenta este estándar son: Modulación de la señal de RF (ASK ó PR-ASK), Codificación de Intervalo de Pulso (PIE) y Mapa de memoria del CI. Para los sistemas de RFID que operan en la banda de frecuencias de 902-928 MHz en México, la norma especificá que la banda se divide en canales de 500 kHz. El lector puede transmitir hasta un 1W o 30 dBm de potencia radiada con salto de frecuencia.

Durante la comunicación Lector - Etiqueta se utiliza codificación Manchester, NRZ (No retorno a cero) o PIE (codificación por intervalo de pulso) con modulación ASK o una variante de ella como se especifica en el punto 1.4.1 de este trabajo. Otros parámetros que se especifican en la norma ISO/IEC 18000-6C son: La tasa de transferencia de datos, TARI, ancho de pulso e inclusive el índice de modulación.

El protocolo de comunicación se basa en comandos por medio de símbolos O's y 1's lógicos, la duración de cada símbolo lo determina el TARI (intervalo de tiempo de referencia), para la comunicación entre el Lector y la etiqueta. Para una codificación PIE, el TARI se muestra en la siguiente figura 1.4.



Figura 1. 4 TARI de símbolos para una codificación PIE.

El protocolo indica que la duración del TARI, es el equivalente de un símbolo "0" que puede variarse de 6.25 µs a 25 µs con pasos de 6.25 µs. Cada valor tendrá una tolerancia de ±1% y el ancho de pulso estará en 0.5TARI aproximadamente. Para el símbolo "1" normalmente se tiene la duración de 1.5TARI≤Dato1≤2TARI. La Tasa de transferencia se determina por el inverso del valor de cada TARI, por lo tanto se toman los valores de 160 kbps - 40 kbps [8]. En la mayoría de los casos el equipo comercial de RFID tiene modos de operación establecidos, para cada uno de los parámetros de interfaz aérea, por ejemplo el Lector de RFID (Impinj speedway) utilizado en el desarrollo de este trabajo cuenta con 3 modos de operación en general, los cuales son\*:

Maximum Throughput (Máximo Rendimiento): En este modo de operación se envía la máxima cantidad de datos con éxito del lector hacia la etiqueta, en un período de tiempo determinado con un TARI de 7.14 µs, equivalente a una tasa de transferencia de 160 kbps. Es decir, se da una máxima tasa de lectura y una baja probabilidad de interferencia con una población baja de etiquetas.

\*Nota: La definición de los modos de operación se específica en ingles debido a que no hay una norma en español.

 Dense Reader (Ambiente denso): En este modo de operación se tiene un TARI de 25 µs lo que reduce su tasa de transferencia a 40 kbps. La tasa de lectura es de aproximadamente ¼ con respecto al modo de operación Maximum Throughput cuando se tiene un gran número de etiquetas en el intervalo de lectura, lo que representa también una mayor probabilidad de interferencias.

 Hybrid (Hibrido): Este modo de operación es resultado de la combinación de los dos modos anteriores, es decir con un TARI de 12.5 μs se presenta la mitad de tasa de lectura de la etiqueta con respecto al modo de operación Maximum Throughput, sin embargo se reduce la probabilidad de interferencia.

Por lo anterior, la elección del modo de operación adecuado dependerá de la aplicación que se requiera, por lo que en el capítulo 3 se hace un análisis teórico - práctico para determinar que conviene en la identificación vehicular.

#### 1.4 Principios de Operación y funcionamiento

La comunicación entre el lector y la etiqueta de un sistema de RFID en la banda de frecuencias de UHF, se puede describir por medio del esquema de la figura 1.5, donde se específica un enlace de subida (que es la señal que envía el lector a la etiqueta) y un enlace de bajada (que corresponde a la respuesta de la etiqueta, es decir la señal que viaja de la etiqueta al lector).



Figura 1. 5 Proceso de comunicación en un sistema de RFID pasivo.

De la figura anterior observamos que en el sistema de RFID ocurren dos tipos de enlace, el primero de ellos se denomina enlace de subida (uplink) en donde el lector manda una señal de RF de interrogación, esta señal contiene la energía de RF (Onda continua) de 915 MHz y sirve como señal portadora y para energizar la circuitería electrónica de la etiqueta. La señal de reloj sincroniza la

comunicación y junto con la señal de datos codifican la información transmitida. La codificación "Manchester" es la más utilizada en RFID (Ver figura 1.7).

Auxiliándonos de la figura 1.6, el enlace de bajada obedece a la comunicación Etiqueta –Lector (downlink), y ocurre cuando la estructura interna de la etiqueta interactúa con el campo incidente (señal de interrogación), la señal de RF es rectificada (D1,C1) a corriente continua (CC), la cual polariza el circuito integrado de la etiqueta. La señal de datos es extraída por medio de un detector de picos (D2,C2) y procesada en la lógica del CI. La etiqueta envía una señal de respuesta hacia el lector variando la impedancia de carga del CI de acuerdo a la información solicitada mediante el fenómeno de retrodispersión. El estudio y medición de estas señales se realiza en laboratorio con equipo de propósito específico y es presentado a detalle en [9].



Figura 1. 6 Estructura interna de etiquetas pasivas que operan en la banda de UHF.

#### 1.4.1 Modulación y Codificación

La modulación y codificación para los dos tipos de enlace en los sistemas de RFID se describen de acuerdo al diagrama a bloques del proceso de transmisión que se presenta en la figura 1.7.





En el diagrama anterior se puede observar que existen distintos formatos de datos, distintas formas de codificar y modular la información en un sistema RFID, las características de cada etapa del diagrama anterior se reportan en el apéndice A. La codificación Manchester, como se observa en la figura 1.7, se forma con una señal de reloj y los datos en formato ASCII, que en conjunto con la portadora de 915 MHz forman una modulación por desplazamiento de Amplitud (ASK). Esta señal es la que se transmite al receptor de conformidad con la ISO/IEC 18000-6C para los sistemas RFID que operan en la banda de frecuencias de 900-930 MHz [8].

#### 1.4.2 Comunicación Lector – Etiqueta (Enlace de subida)

En la banda de frecuencias de 900-930 MHz, las etiquetas de RFID son normalmente utilizadas en la región de campo de lejano de la antena del lector. La región de campo lejano de la antena del lector puede ser estimada por la siguiente ecuación [10]:

$$r = \frac{2D^2}{\lambda} \tag{1.1}$$

Para los sistemas RFID, D es la dimensión máxima de la estructura radiante (Antena de lector), r es la distancia de separación Lector-Etiqueta y  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal portadora. Para el sistema bajo estudio en este trabajo, donde la frecuencia de operación es de 915 MHz y la dimensión máxima de la antena es de 0.5 m, la distancia de campo lejano "r" debe ser  $\geq$  1.8 m.

Los sistemas de RFID son sistemas de comunicación inalámbricos, su desempeño esta dado en función de la transmisión, propagación y recepción de ondas electromagnéticas, es por ello que la potencia recibida por la antena de la etiqueta está en función de la potencia emitida por el emisor de RF, la distancia y la pérdida de radiación en el espacio. Este fenómeno se puede dimensionar en primera instancia por el modelo de Friis cuya expresión es [17,18,40]:

$$P_{retiqueta} = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 = S * A_e$$
(1.2)  
$$S = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2} ; A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r$$

donde  $P_{r_{etiqueta}}$  y  $P_t$  son las potencias recibida y transmitida,  $G_t$  y  $G_r$  son las ganancias de las antenas transmisora y receptora,  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal de RF, S es la densidad de potencia trasmitida y  $A_e$  es el área efectiva de la antena de la etiqueta. El modelo de Friis será estudiado en el capítulo 3.

Por otra parte la frecuencia de operación en un sistema de RFID pasivo no es fija. Normalmente los lectores de RFID transmiten señales de RF con salto de frecuencia (Frequency Hopping) dentro del intervalo de 900-930 MHz. La Señal de RF con salto de Frecuencia es una técnica de modulación en espectro ensanchado, en el que la señal se emite sobre una serie de frecuencias aparentemente

aleatorias, saltando de frecuencia en frecuencia sincronizadas con el transmisor. Los receptores no autorizados recibirán una señal intangible. Si se intenta interceptar la señal, sólo se recibirá unos pocos bits. Una transmisión en espectro ensanchado ofrece 3 ventajas:

- 1. Las señales en espectro ensanchado son altamente resistentes al ruido y a la interferencia.
- Las señales en espectro ensanchado son difíciles de interceptar. Una transmisión de este tipo suena como un ruido de corta duración, o como un incremento en el ruido en cualquier receptor, excepto para el que esté usando la secuencia que se usa por el transmisor.
- 3. Transmisiones en espectro ensanchado pueden compartir una banda de frecuencia con muchos tipos de transmisiones convencionales con mínima interferencia.

La desventaja principal del espectro ensanchado es su estrecho ancho de banda.

#### 1.4.3 Comunicación Etiqueta – Lector (Enlace de bajada)

Se ha comentado que las etiquetas de RFID pasivas se comunican con el lector de la misma energía enviada por este. Es por ello que la etiqueta en el sistema RFID se convierte en el elemento más importante, en ella se concentra la mayor parte de los retos que se presentan en este enlace, porque los parámetros de RF se modifican conforme a la aplicación. Por ejemplo si la etiqueta es adherida a una superficie metálica la señal de RF se refleja, en cambio sí se adhiere a una superficie dieléctrica la señal de RF puede transmitirse, reflejarse o difractarse.

Entonces, este enlace requiere de un análisis específico para cada aplicación, ya que no es lo mismo identificar con etiquetas de RFID productos de cartón, lamina, madera, vidrio, etc. A pesar de la problemática mencionada, la propagación de la señal de RF y la respuesta de la etiqueta en principio puede ser analizada a partir de los siguientes parámetros: Sensibilidad, ganancia de la antena, Polarización de la antena de la etiqueta (Alineación), Impedancia acoplada. El análisis de estos parámetros se presenta en [11] y pueden ser optimizados, por un lado diseñando antenas de las etiquetas con alta ganancia y acoplando las impedancias del circuito integrado con la antena para obtener la máxima transferencia de energía.

Otro análisis que se requiere es el debido a la forma de operar de las etiquetas de RFID pasivas, las cuales están constituidas por un antena y un CI ambos elementos con impedancias complejas. La etiqueta genera una señal de respuesta variando su impedancia entre dos estados lógicos que dan lugar al fenómeno de retrodispersión (backscattering), un 1 lógico ocasiona el máximo acoplamiento entre las impedancias de la antena y del CI por lo tanto se tiene el máximo reflejo de la señal y un 0 lógico para el caso contrario, lo que se denomina Sección Transversal de Radar (STR). Un análisis teórico y una metodología de medición de la señal de retrodispersión y del STR son presentados en [12].

Del enlace directo tenemos que la Potencia recibida en la etiqueta está dado por la ecuación (1.2), por lo tanto el nivel de potencia reflejado por la antena de la etiqueta RFID en dirección al lector es [12]:

$$P_{re-radiada} = S * A_e \frac{4R^2}{|Z_a + Z_c|^2} G_{antenaRFID}$$
(1.3)

donde  $Z_a$  es la Impedancia de entrada de la Antena de la etiqueta,  $Z_c$  es la Impedancia de entrada del Circuito Integrado, R es la resistencia de la antena y  $G_{antenaRFID}$  es la ganancia de la antena de la etiqueta.

El factor que determina que porcentaje de potencia re-radiada hacia el lector es:

$$K = \frac{4R^2}{|Z_a + Z_c|^2}$$

Por similitud a un radar se define una sección transversal de radar (STR) de la etiqueta de RFID, que se determina por [41]:

$$\sigma = A_e \frac{4R^2}{|Z_a + Z_c|^2} G_{antenaRFID}$$
(1.4)

donde:

$$A_e = \frac{\lambda^2 G_{antenaRFID}}{4\pi}$$

Sustituyendo  $A_e$  en la ecuación (1.4), la STR se puede expresar de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{R^2 \lambda^2 G_{antenaRFID}^2}{\pi |Z_a + Z_c|^2}$$
(1.5)

La ecuación (1.5) es congruente con la STR de una antena con carga arbitraria ( $Z_c$ ) en términos de su coeficiente de reflexión para antenas con dispersión de la potencia constante muy cercano a la unidad [12].

Finalmente introduciendo el parámetro STR en la ecuación (1.2) y mediante la ecuación clásica del radar, se tiene que la potencia re-radiada de la etiqueta hacia el lector es [12]:

$$P_{re-radiada} = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4}$$
(1.6)

#### 1.5 Protocolos de Anticolisión en los sistemas RFID pasivos

En general en los sistemas pasivos de RFID, la comunicación entre el lector y la etiqueta se realiza mediante el acceso a un canal de comunicación compartido. Por ello, cuando hay un número elevado de etiquetas en la zona de cobertura, es necesario un mecanismo de acceso al medio (MAC) para minimizar las colisiones que se producen por las transmisiones simultáneas. La

simplicidad en el hardware de las etiquetas pasivas obliga a trasladar la complejidad del protocolo o mecanismo de anticolisión al lector.

Los mecanismos de anticolisión para los sistemas RFID pasivos, incluyendo los estándares actuales, más utilizados son ALOHA y árbol binario (Binary Tree) y tienen como objetivo minimizar el tiempo de identificación de las etiquetas. A continuación estos dos protocolos son descritos:

#### 1.5.1 Protocolo ALOHA

El mecanismo de anticolisión ALOHA o ALOHA ranurado por trama (FSA, Frame Slotted Aloha) consiste en ranuras que están confinadas en tramas consecutivas llamadas ciclos. En el proceso de identificación por un sistema RFID pasivo, el lector inicia un ciclo de identificación anunciando el tamaño (número de ranuras) de ese ciclo. Todas las etiquetas en el área de cobertura reciben esa información y escogen aleatoriamente una ranura de ese ciclo para transmitir su número de identificación [1]. La siguiente figura ilustra mejor el proceso de identificación ALOHA.



Figura 1. 8 Proceso de identificación de etiquetas RFID del protocolo ALOHA.

#### 1.5.2 Protocolo Árbol binario (Binary Tree)

El lector de RFID envía una señal de interrogación a las etiquetas, esperando que responda, cuyos identificadores empiecen con "0" o con "1", si ambos responden entonces vuelve a preguntar pero ahora a los que comiencen con "00" o con "01" y así sucesivamente añadiendo bits a la secuencia hasta encontrar a la etiqueta buscada. El siguiente esquema ilustra mejor este proceso.



Figura 1. 9 Proceso de identificación de etiquetas RFID del protocolo Árbol binario.

En este capítulo se ha reportado una breve descripción del funcionamiento y de las características importantes de operación de la tecnología RFID pasiva en la banda de frecuencias de 900 – 930 MHz, las cuales cubren el marco general para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en esta tesis y llevar a cabo un dimensionamiento de un sistema de RFID para la Identificación de vehículos en movimiento y estáticos. La detección de la etiqueta RFID adherida a vehículos debe de considerarse a la velocidad máxima permitida en carreteras nacionales (110 km/h), por lo tanto en el siguiente capítulo se calculará la sensibilidad de etiquetas RFID pasivas respecto a la potencia PIRE que para México es de 36 dBm según la NOM-121.

## DESEMPEÑO DE ETIQUETAS RFID PASIVAS EN LA BANDA DE UHF

Existen gran variedad de metodologías de pruebas para evaluar el desempeño de etiquetas de RFID pasivas que operan en la banda de UHF [9, 11, 12,13], las pruebas reportadas son hechas en laboratorio y se llevan a cabo de acuerdo a las recomendaciones de las normas ISO/IEC 18046-3 [14] e ISO/IEC 18047-3 [15]. Una de las pruebas más importantes es de sensibilidad de las etiquetas que define en gran medida el desempeño de ellas. Para esta prueba de sensibilidad se han utilizado sistemas emuladores, sobre todo para la determinación de la sensibilidad del CI [12]. Dichos emuladores están formados por generadores y analizadores vectoriales de señales, y la prueba se lleva a cabo a una sola frecuencia de portadora, la cual puede considerarse como estática, debido a que los sistemas de RFID en la banda de UHF operan con salto de frecuencia (Frequency hopping). No se reportan pruebas de medición de sensibilidad dinámica con vehículos circulando a diferentes velocidades, debido a que los efectos del medio ambiente generan muchas perturbaciones en la medición. En este trabajo se presentan los resultados de mediciones de sensibilidad de etiquetas RFID (Antena-CI) en ambientes controlados, los cuales se comprueban de forma dinámica a partir de un análisis de propagación de la señal de RF.

Para llevar acabo esto, se específica una metodología de prueba empezando con la caracterización del equipo de RF y RFID utilizado.

#### 2.1 Justificación de los Lectores RFID

Los lectores de RFID son trans-receptores, los cuales transmiten y reciben energía de RF al mismo tiempo y a la misma frecuencia. Hay dos tipos de lectores RFID en cuanto a su configuración se refiere, de tipo mono-estático y de tipo bi-estático. En la configuración mono-estática se requiere de una sola antena para transmitir y recibir la señal de RF y para la configuración bi-estática se requiere de dos antenas una para transmitir y otra para recibir. La sensibilidad de un lector se determina por la potencia mínima de respuesta para reconocer una etiqueta. La elección del tipo de lector depende de la aplicación. Para el caso de la aplicación de la identificación vehicular para el peor caso se eligieron Lectores con baja sensibilidad.

Con el fin de determinar el nivel de umbral de potencia a la cual una etiqueta de RFID responde, se utilizaron ambas configuraciones de Lectores (Bi-estática y Mono-estática), utilizando sistemas RFID de conformidad con la norma ISO/IEC 1800-6C [8].

#### 2.2 Metodología de prueba

Un esquema básico de prueba que se utilizó para la comunicación de un sistema RFID se muestra en la figura 2.1. En este sistema se puede observar que se tiene un lector de RFID controlado por una computadora. La señal de salida y entrada de RF del lector se conectó a una antena que se encuentra dentro de una cámara anecoica al igual que la etiqueta de RFID separada una distancia "r". La conexión entre el lector y la antena se realizó por medio de un cable coaxial de bajas pérdidas. La cámara anecoica representa un medio controlado que simula el espacio libre donde no debe de haber reflexiones y difracciones.



Figura 2.1 Esquema básico de comunicación de un sistema RFID.

El procedimiento que se siguió para determinar el desempeño de las Etiquetas RFID, de acuerdo al esquema básico de comunicación en un medio controlado, tal como se muestra en la figura 2.1, fue el siguiente:

1.-La potencia del transmisor se ajustó a la potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE), (Potencia del lector (dBm) + Ganancia de la Antena (dBi)).

El nivel de esta potencia se fijó de acuerdo a normas internacionales o locales homologadas. En el caso de México la norma que se aplica es la Norma Oficial Mexicana (NOM-121) [6].Para el caso de la tecnología RFID, en dicha norma se específica el intervalo de operación de frecuencia de 902 – 928 MHz y la PIRE de 4W o 36 dBm.

2.-Habiendo ajustado la PIRE, se verificó si había lectura de la etiqueta RFID, estos datos se toman como referencia para el valor nominal de operación del sistema.

Los ajustes de potencia se llevaron acabo desde la computadora utilizando un programa específico que normalmente lo proporciona el fabricante del lector. Si este programa no se tiene es necesario realizarlo, ya que el control se hace a través de la computadora.

3.-A partir de los datos nominales se atenuó el valor de la PIRE hasta tener el mínimo de lecturas, el cual representa el umbral de respuesta de la etiqueta.

4.-Con los niveles de potencia registrados para la lectura nominal y mínima, se calculó la sensibilidad de la etiqueta utilizando la fórmula de Friis (ecuación 1.2), que es un método apropiado para medios controlados.

Las pruebas se realizaron con etiquetas genéricas, tales como: UBIU Mod. RSI-663 y Mod. RSI-654, así como también etiquetas que se usan para la Identificación vehicular. Una de las etiquetas que tiene características similares a las que se utilizan para la identificación vehicular (sensibilidad y encapsulado) es la: Avery - Dennisson Mod. AD-224, con la cual se determinó el Nivel de umbral de potencia de las etiquetas de RFID, dato que se utilizó en los procesos de modelación del comportamiento del canal de comunicación de dichos sistemas.

• Sistema Mono-estático: En este sistema se utilizó una sola antena, la configuración monoestática utilizada para las pruebas de etiquetas RFID, se muestra en la figura 2.2. La etiqueta y la antena transmisora fueron colocadas a una altura de 1 m respecto al piso de la cámara anecoica, separadas una distancia de 2 m; que cumple con la condición de campo lejano ( $r \gg \frac{2D^2}{\lambda}$ ) [10]. La etiqueta de RFID se colocó sobre un cristal que simula el parabrisas de un vehículo, teniendo una cobertura aproximadamente de 1 m<sup>2</sup> en su plano XY, considerando que la alineación de las antenas es respecto al eje Z. Con esta configuración se realizaron las pruebas de Distribución de campo para las etiquetas de RFID.



Figura 2. 2 Sistema RFID con configuración mono-estática.

 Sistema Bi-estático: En la figura 2.3 se muestra la configuración Bi-estática implementada para las pruebas de las etiquetas de RFID, en donde se aprecia que se tiene una antena transmisora (Tx) colocada a una altura de 1.8 m y una antena receptora (Rx) colocada a una altura de 1.2 m, respecto al plano reflector. La Tx se separó 60 cm de la Rx para que no existiera acoplamiento entre los canales, esta separación cumple con el criterio de 2λ, cuyos detalles de cálculo se pueden consultar en [9]. La etiqueta se separó de dichas antenas una distancia 2 m, la geometría cumple con la condición de campo lejano. Para este caso la etiqueta de RFID se colocó a una altura de 1.5 m para asegurar que el enlace de subida (lector - etiqueta) tuviera la misma distancia que en el enlace de bajada (etiqueta - lector) y no se presentaran retardos en la señal. Esta configuración se utilizó para determinar el "Nivel de potencia de umbral de la etiqueta Avery - Dennisson Mod. AD-224" y para "las pruebas de polarización (Alienación entre la antena del lector y de la etiqueta) en el plano horizontal y en el plano Vertical".



Figura 2. 3 Sistema RFID con configuración Bi-estática.

#### 2.3 Equipo de RF y RFID empleado

Los equipos empleados para estas pruebas de desempeño de etiquetas RFID que operan en la banda de UHF, en este trabajo de investigación fueron:

#### Equipo de RF:

1.-Camara anecoica (medio controlado).

2. Dos antenas marca AARONIA tipo HyperLOG 4060, que tienen una Ganancia de 5 dBi y factor de antena de 25dB para una frecuencia de 915MHz.

3. Un analizador de espectros marca ROHDE & SCHWARZ modelo FSH-6.

- 4. Kit de atenuadores Mini-circuits.
- 5. Analizador de redes marca ROHDE & SCHWARZ modelo ZVB-4.
- 6. Cables coaxiales de bajas pérdidas.

#### Equipo de RFID:

7. Lector RFID Motorola (Symbols) modelo XR450 del tipo bi-estático.

8. Lector RFID Alien Modelo ALR-9900 del tipo mono estático.

9. Etiquetas de RFID: UBIU Mod. RSI-663 y RSI-654, Avery-Dennisson AD-224.



En la figura 2.4 se muestran fotografías de los equipos mencionados.



#### 2.4 Pruebas de desempeño de etiquetas RFID pasivas

Para determinar el desempeño de las etiquetas de RFID que operan en la banda de UHF, primero se caracterizaron los lectores de RFID respecto a su potencia, los datos obtenidos fueron la referencia del desempeño de los lectores cuando la potencia se varió.

Habiendo caracterizado los lectores se llevó acabo la determinación del nivel de umbral de potencia al cual responden las etiquetas RFID, esto se realizó determinando la de tasa de lectura de la etiqueta.

Con los datos del umbral de la tasa de lectura asociada a la potencia del lector (Lector-Antena) y utilizando la fórmula de Friis se calculó la sensibilidad de la etiqueta de RFID.

#### 2.4.1 Caracterización de los lectores de RFID (Lector-Antena)

Los lectores que fueron caracterizados para las pruebas de desempeño de la etiqueta RFID son: Lector Alien modelo 9900 y el lector Motorola modelo XR-450, los cuales están homologados en conformidad con la norma 18000-6C, es decir cumplen con la frecuencia de operación de 902-928 MHz y un 1W de potencia.

En este caso solo se caracterizaron los lectores, ya que se conoce la ganancia de la antena que es de 5 dBi a la frecuencia de 915MHz.

La figura 2.5 muestra el esquema utilizado para la medición de la potencia de salida en cada uno de los lectores, en la figura 2.5.A se muestra la metodología de medición para el lector Alien 9900, el cual es del tipo mono-estático. Por medio de un programa de aplicación, la potencia nominal se atenuó en pasos de 0.5 dB, leyendo el nivel de atenuación con un Analizador de espectros R&S FHS-6. El mismo procedimiento se aplicó para el lector Motorola del tipo Bi-estático (figura 2.5.B). Los resultados obtenidos se reportan en la Figura 2.6.



Figura 2. 5 Medición de la potencia de salida para A) el Lector RFID Alien 9900 y B) para el Lector RFID Motorola XR450.



Figura 2. 6 Respuesta de los lectores XR450 (Izquierda) y Alien 9900 (Derecha) Potencia nominal vs Atenuación.

De acuerdo a los resultados obtenidos para el lector Motorola XR-450 la discrepancia entre el valor medido y el valor programado fue de 0.3 dB. Para el Lector Alien 9900 la discrepancia entre el valor medido y el valor programado fue de 0.5 dB.

#### 2.4.2 Tasa de lectura de etiquetas RFID pasivas

La tasa de lectura de las etiquetas de RFID se determinó para las dos configuraciones Monoestática y Bies-tatica. Para la configuración Mono-estática se utilizó el lector de RFID Alien modelo
9900 y para la configuración Bi-estática se utilizó el lector Motorola modelo XR-450, en ambas configuraciones las antenas que se utilizaron son tipo HyperLOG 4060 que tienen una ganancia de *5 dBi*.

El conjunto Lector-Antena da la Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE), la cual se atenúo para determinar el umbral de lectura de la etiqueta, dato que se utilizó para el cálculo de su sensibilidad.

Para las pruebas de tasa de lectura se utilizaron los esquemas que se muestran en las figuras 2.2 y 2.3, de acuerdo a lo siguiente:

El Lector/Transmisor de RFID se fijó a la potencia PIRE nominal de 36 dBm, y se procedió a atenuar la potencia cada 0.5 dB, hasta determinar el nivel de umbral de lectura de la etiqueta. En cada paso de potencia se tomaron 10 lecturas, el tiempo de cada lectura fue de 15 segundos.

Los resultados normalizados se muestran en la figura 2.7, que es una gráfica del valor promedio de lecturas para cada valor de potencia normalizada respecto al valor nominal, donde se tiene una desviación estándar total de: 0.33 (Motorola) y 3.3 (Alien 9900). La gráfica (a) color azul corresponde al sistema Bi-estático y la gráfica (b) color rojo corresponde al sistema Mono-estático.



Figura 2. 7 Repuesta normalizada de la Tasa de lectura de una etiqueta de RFID vs Atenuación de la potencia PIRE.

La figura 2.7 muestra la respuesta normalizada de la tasa de lectura en función de la atenuación de una etiqueta RFID en UHF comercial (Avery – Dennisson Mod. 224), donde se observan 3 regiones de operación: La zona de saturación de lectura, Zona de débil lectura y Zona Fuera de lectura. La zona de saturación de lectura corresponde a casi el 100% de seguridad en la respuesta de la etiqueta; la zona débil corresponde a la caída brusca de lecturas de la etiqueta, hasta llegar a la zona fuera de lectura, lo que indica una baja probabilidad de lectura.

#### 2.4.3 Mediciones del parámetro de Polarización de la etiqueta de RFID

El parámetro de polarización de la etiqueta es importante, debido a que normalmente las etiquetas tienen antenas dipolos de longitud a  $\lambda/2$ , cuyos lóbulos del patrón de radiación son perpendiculares al objeto donde se adhieren (parabrisas del vehículo), por lo que la inclinación de la etiqueta hace que se pierda sensibilidad de lectura.

Un esquema que ilustra los efectos de la polarización se muestra en la figura 2.8 y en la figura 2.9.



Figura 2. 8 Esquema de patrones de radiación de las antenas con Polarización Horizontal.



Figura 2. 9 Esquema de patrones de radiación de las antenas con Polarización Vertical.

La cuantificación de la polarización en cualquier enlace radioeléctrico, se específica por medio del Factor por pérdidas de polarización (PLF=Polarization Loss Factor), el cual está definido como:

$$PLF = \left| cos\psi_p \right|^2 \tag{2.1}$$

Donde  $\psi_p$  es el ángulo de rotación (elevación o acimutal).

El PLF es un factor que multiplica la potencia, por lo que para el caso de la tecnología RFID, si el ángulo de rotación se incrementa, el nivel de potencia que incidente en la antena de la etiqueta

RFID disminuye, hasta  $\psi_p = 90^o$  donde  $PLF = |cos\psi_p|^2 = 0$ , lo que indica que el registro de lecturas es cero.

La medición de la polarización se llevo a cabo dentro de una cámara anecoica, rotando la etiqueta RFID de 0° a 180° en pasos de 20°, tanto para el plano horizontal (en el ángulo acimutal) como para el plano vertical (ángulo de elevación).Trabajos similares se han reportado solo para el plano acimutal [31]. Para cada ángulo se tomó la tasa de lectura y se varió la potencia del lector desde su valor nominal hasta obtener cero tasa de lectura. La atenuación (Variación) de la potencia se realizó a pasos de 0.5 dB y el tiempo de lectura fue de 15 segundos. Este procedimiento se llevo a cabo para cada cada ángulo de elevacióny cada ángulo acimutal.

La respuesta de la taza de lecturas normalizadas, atenuación de potencia y ángulo de giro de la etiqueta RFID para una polarización vertical se muestra en la figura 2.10 y para una polarización horizontal se muestra en la figura 2.11.



Figura 2. 10 Respuesta del número de lecturas normalizadas, potencia de atenuación y ángulo de giro para polarización vertical.



Figura 2. 11 Respuesta del número de lecturas normalizadas, potencia de atenuación y ángulo de giro para polarización horizontal.

De las gráficas de las figuras anteriores se puede concluir que los efectos de la polarización son importantes para alcanzar un desempeño alto de la respuesta de los sistemas de tecnología RFID, por lo que se recomienda que las antenas de los lectores sean con polarización circular para minimizar este efecto y que la inclinación sea menor de 15° en la parte acimutal.

#### 2.4.4 Prueba de Distribución de campo de lectura

Una característica importante de la tecnología RFID, es la respuesta de la etiqueta para una determinada área de cobertura, con el fin de establecer dónde se va a fijar o colocar la etiqueta RFID. Para el caso específico de la identificación vehicular se considera que la distribución de campo debe cubrir la zona donde se coloca la etiqueta (parabrisas del automóvil). Para esta prueba se utilizaron tres etiquetas genéricas: Avery-Dennisson Mod. AD-224, UBIU mod. RSI-654 y RSI-663, las cuales se colocaron en distintos puntos de un cristal que simula un parabrisas (Centro, Arriba, Derecha, Izquierda, Abajo), que en su conjunto forman una área específica de cobertura respecto a un plano XY. Para cada punto donde se fijaron las etiquetas se tomaron lecturas, a partir de la potencia máxima nominal (0 atenuación) hasta el nivel mínimo de lectura (máxima atenuación), en pasos de 0.5 dB. Los resultados se muestran en la figura 2.12.



Figura 2. 12 Resultados obtenidos de la Distribución de campo de cobertura para las etiquetas de RFID A) Avery-Dennisson Mod. AD-224, UBUI Mod. RSI-654 y Mod. RSI-663.

De la figura 2.12, se puede observar que cuando la potencia es alta (potencia nominal) o atenuación baja (cero), no importa donde se coloque la etiqueta RFID, el nivel de lectura es el

100%. Sin embargo, dependiendo del tipo de etiqueta, cuando se tiene atenuación de la potencia, los efectos de la colocación son significativos, esto es notorio para las etiquetas UBUI RSI-654. Para el caso de la etiqueta UBIU RSI-663 (figura 2.12C) se puede asegurar que puede tener una cobertura de 1 m<sup>2</sup> para una sensibilidad de -13.28 dBm, la cual se determina cuando se tiene un mínimo de lecturas del 20%. Para la etiqueta Avery-Dennisson AD-224, se puede asegurar que su cobertura es mayor de 1 m<sup>2</sup>, ya que para un mínimo de lecturas del 20% se tiene una sensibilidad de -15.78dBm.

Como característica esencial del efecto analizado, el desempeño de las etiquetas depende del tipo de antena, ya que como se puede observar en la fotografía de la figura 2.4 cada una de las etiquetas analizadas tiene antenas diferentes donde la ganancia de ellas aumenta o disminuye la sensibilidad de sistema RFID.

#### 2.4.5 Sensibilidad de etiquetas RFID

La determinación de la sensibilidad de las etiquetas RFID se realizó de forma indirecta conociendo el nivel de potencia del transmisor, a la cual la etiqueta RFID deja de responder. El esquema que se utilizó para este cálculo es el que se muestra en la figura 2.13.





De la fórmula de Friis (ecuación 1.2), la atenuación del espacio libre está dado por:

Atenuación del medio = 
$$\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^n = \frac{P_r}{P_t G_t G_r}$$
 (2.2)

Dónde:

 $\lambda$  es la longitud de onda de la señal de RF que se transmite [m]

r es la distancia entre el transmisor y el receptor (campo lejano) [m]

*P*<sub>t</sub> es la potencia que emite el transmisor [Watts]

P<sub>r</sub> es la potencia que se recibe en el receptor [Watts]

G<sub>t</sub> es la ganancia de la antena transmisora (adimensional)

G<sub>r</sub> es la ganancia de la antena receptora (adimensional)

*n* es un factor empírico del medio, para el espacio libre *n*=2

 $P_t G_t$  el producto potencia del transmisor y ganancia de la antena transmisora se conoce como Potencia Isotrópica Radiada Efectiva.

Las mediciones se realizaron en una cámara anecoica que simula un espacio libre, la cual fue construida originalmente para mediciones en la banda de frecuencia (850MHz) donde opera la telefonía celular de primera generación. A pesar de que la frecuencia de operación (915MHz) de la tecnología RFID objeto de esta tesis está cerca de dicha banda, el sitio se tuvo que caracterizar para la frecuencia de operación de la tecnología RFID de UHF. La caracterización se realizó aplicado el modelo de Friis, determinando el valor de n = 2.2.

Para el cálculo de la sensibilidad de la etiqueta de RFID, la ecuación (2.2) puede escribirse como:

$$\frac{P_r}{G_r} = P_t G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^n \tag{2.3}$$

Ó también por propiedades de los logaritmos [16,17,18]:

$$\left(\frac{P_r}{G_r}\right)_{dBm} = (P_t)_{dBm} + (G_t)_{dBi} + \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^n\right]_{dB}$$
(2.4)

Considerando la Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE)  $(P_t G_t)_{dBm}$  y las pérdidas del cable coaxial que conecta al lector de RFID y la antena transmisora se tiene:

$$\left(\frac{P_r}{G_r}\right)_{dBm} = (P_t \ G_t)_{dBm} + (P\acute{e}rdidas \ del \ cable)_{dB} + \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^{2.2}\right]_{dB}$$
(2.5)

Las expresiones (2.3), (2.4) y (2.5) determinan la potencia que recibe la etiqueta de RFID, la cual está en función de la ganancia de su antena. Conociendo la pérdida de potencia del cable, así como la atenuación del medio, a una potencia PIRE mínima a la cual deja de responder la etiqueta de RFID, se calcula  $\left(\frac{P_r}{G_r}\right)_{dBm}$  que corresponde al nivel de umbral de respuesta o sensibilidad de la etiqueta.

#### 2.4.5.1 Cálculo de la sensibilidad de la etiqueta RFID

A partir de la repuesta normalizada de la tasa de lectura respecto a la atenuación de potencia del lector/transmisor, se puede determinar la sensibilidad de la etiqueta RFID. Para el caso de la etiqueta RFID Avery – Dennisson Mod. 224, figura 2.7, se tiene que para un sistema mono-estático, la tasa de lectura al 20% corresponde a 10.5 dB de atenuación de la potencia PIRE nominal que es de 36 dBm, lo que implica que la potencia PIRE para el cálculo es de 25.5 dBm.

Para una separación de 2 m entre el lector/transmisor de RFID y la etiqueta RFID, la pérdida del medio considerando que la frecuencia de la portadora de RF es de 915MHz, es:

$$\left[\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^{n}\right]_{dB} = 10\log_{10}\left(\frac{0.327}{(4\pi)(2)}\right)^{2.2} = -41.48dB$$

Si en el cable se presenta una pérdida de *-1.8dB* para la banda de frecuencias 900 – 930 MHz, la potencia recibida en la etiqueta RFID de acuerdo a la ecuación (2.5) es:

$$\left(\frac{P_r}{G_r}\right)_{dBm} = 25.5dBm - 1.8dB - 41.48dB = -17.78dBm$$

El valor de -17.78dBm corresponde a la sensibilidad de la etiqueta RFID (Circuito integradoantena). Si la ganancia de la antena de la etiqueta RFID es de 2dBi entonces se tiene que la sensibilidad de circuito integrado es de -15.78 dBm.

#### 2.4.5.2 Potencia en el lector de RFID respecto a la respuesta de la etiqueta RFID

La potencia que recibe el lector de RFID respecto a la respuesta de la etiqueta RFID genera un enlace de comunicación normalmente identificado como enlace de bajada. Para determinar dicha potencia se requiere conocer la potencia que emite la etiqueta RFID y aplicar la fórmula de Friis para este enlace.

La etiqueta emite potencia cuando esta recibe energía de RF, este proceso lo han identificado como retrodispersión y básicamente corresponde a la eficiencia de la etiqueta de RFID, la cual se determina por la siguiente expresión [12]:

$$\eta_{etiqueta} = \frac{P_{re-radiada}G_{etiqueta}}{P_a} = \frac{4R_4}{|Z_a + Z_c|^2}$$
(2.6)

Dónde:

 $P_{re-radiada}$  –Potencia emitida por la etiqueta  $G_{etiqueta}$  –Ganancia de la antena de la etiqueta Pa –Potencia incidente a la etiqueta  $Z_a = R_a + jX_a$  –Impedancia de la antena de la etiqueta  $Z_c = R_c + jX_c$  –Impedancia del circuito integrado de la etiqueta

La potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE) de la etiqueta es:

$$PIRE = P_{re-radiada} = \eta_{etiqueta} P_a \tag{2.7}$$

Considerando el caso de la etiqueta RFID Avery – Dennisson Mod. 224 y suponiendo una eficiencia de  $\eta = -3 dB$  en el sistema, de acuerdo a la figura 2.7, para el caso del lector mono-estático se tiene:

$$\frac{P_r}{G_r} = \eta_{etiqueta} P_a \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^n \tag{2.8}$$

Entonces sí:

$$\eta_{etiqueta} = -3dB$$

$$P_a = -17.78dBm$$

$$\left[\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^n\right]_{dB} = -41.48dB$$

$$\left(\frac{P_r}{G_r}\right)_{dBm} = -3dB - 17.78dBm - 41.48dB = -62.26dBm$$

La potencia que recibe el lector es dependiente de la ganancia de la antena, entonces si la ganancia de la antena es de 5dBi se tiene que:

$$(P_r)_{dBm} = (G_r)_{dBi} - 62.26dB = 5dB - 62.26dBm = -57.26dBm$$

Siguiendo el mismo procedimiento para la configuración del lector Bi-estático se obtiene el resultado que se muestra en la tabla 2.1, donde la sensibilidad de la etiqueta (Antena-Circuito integrado) se identifica como enlace de subida y la potencia recibida en el lector se identifica como enlace de bajada.

Niveles de Potencia			
Sistema	Enlace subida (Etiqueta)	Enlace bajada (Lector RFID)	
Motorola XR450	-16.28 dBm	-60.76 dBm	
Alien 9900	-17.78 dBm	-62.26 dBm	

 

 Tabla 2. 1 Sensibilidad de la etiqueta RFID pasiva genérica Avery-Dennisson AD-224 con un sistema Bi-estático y con un sistema Mono-estático.

Como se puede observar en los resultados obtenidos en la tabla anterior, entre un lector y otro tienen una discrepancia de aproximadamente 1.5 dB entre ambos, esta diferencia se presentó debido a que el sistema bi-estatico se configuro a 35 dBm y no a 36 dBm como lo marca la norma NOM-121. Tomando esta consideración la diferencia final es de solo 0.5 dB por lo que se puede concluir que prácticamente son los mismos para las dos configuraciones.

#### 2.5 Análisis de la tasa de error por bit (BER) de un sistema de Tecnología RFID Pasiva

Uno de los parámetros importantes que cuantifican la calidad de un sistema que trabaja con modulación binaria es la tasa de error por bit (BER), que se define como el número de bit de error dividido por el total de los bits transferidos durante un intervalo de tiempo. Frecuentemente la tasa de error se expresa como un porcentaje o como una probabilidad de que en una cantidad de 1's se presente un error (probabilidad de error  $P_e$ ).

Los sistemas de RFID bajo análisis para las pruebas de desempeño de las etiquetas RFID, emiten señales de RF con modulación ASK (Modulación por desplazamiento de amplitud). La señal portadora de alta frecuencia de 915 MHz es modulada por la señal de datos que envía el lector en forma binaria (0s y 1s), a esto normalmente se le conoce con el nombre de modulación OOK (Modulación encendido apagado). El resultado de la Señal modulada son pulsos de RF, llamados marcas que representan 1's binarios y espacios que representan 0's binarios.

Una señal ASK es una codificación no retorno a cero (NRZ) o Manchester, modulada por un seno. Para un pulso (1 binario) puede expresarse matemáticamente por la ecuación (2.9) y su representación gráfica es como la que muestra en la figura 2.14.



Figura 2. 14 Modulación ASK con codificación no retorno a cero.

Conociendo la forma de onda, se determina la energía de la señal por medio de la siguiente expresión:

$$E = \int_0^T A^2 sen^2 \,\omega_c t dt = \frac{A^2 T}{2}$$
(2.10)

A partir de la energía se puede determinar la probabilidad de error que el sistema presenta en el proceso de identificación; es decir, en una cantidad definida de 1s cuantos no corresponden a la información, lo que representa un error. Entonces, en términos de la Energía promedio por bit, y para una probabilidad de 1s y 0s se tiene [19]:

$$P_e = \frac{1}{2}e^{\frac{-E_{prom}}{4\eta}} + \frac{1}{2}Q\left(\sqrt{\frac{E_{prom}}{2\eta}}\right)$$
(2.11)

Dónde:

Υ

P<sub>e</sub>=Probabilidad de error E<sub>prom</sub>=Energía promedio por bit  $\eta$ =Ruido de fondo para un ancho de banda de operación ( $\beta$  = 500 kHz) Q(x)=Función de error complementaria

$$N = \eta * \beta \tag{2.12}$$

En este caso *N* es la potencia promedio de ruido correspondiente a la sensibilidad del lector, un valor típico es de -75dBm. Por lo tanto la energía de ( $\eta$ ) se puede calcular para el ancho de banda ( $\beta$ ) del canal de RFID de 500 kHz, de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{(P_{sensibilidad})}{(Ancho \, de \, del \, canal)} = \frac{3.1622 x 10^{-11} W}{500 x 10^3 Hz} = 6.3245 x 10^{-17} \, [J]$$

La energía promedio ( $E_{prom}$ ) es la energía que incide en el lector debido a la respuesta de la etiqueta, la cual se calculó y se específica en la tabla 2.1 como la energía para el enlace de bajada, entonces:

Para el lector Motorola XR450, que le incide una potencia de -60.76dBm la energía promedio es:

$$E_{prom} = \frac{\left(P_{enlace\ de\ bajada}\right)}{\left(Ancho\ de\ del\ canal\right)} = \frac{8.3945 \times 10^{-10} W}{500 \times 10^3 Hz} = 1.6789 \times 10^{-15} \ [J]$$

Para este caso la probabilidad de error ( $P_e$ ) es:

$$P_e = \frac{1}{2} e^{\frac{-1.6789 x 10^{-15}}{4x6.3245 x 10^{-17}}} + \frac{1}{2} Q \left( \sqrt{\frac{1.6789 x 10^{-15}}{2x6.3245 x 10^{-17}}} \right)$$
$$P_e = 0.5(1.3116 x 10^{-3} + 2.573 x 10^{-7}) = 6.5592 x 10^{-4}$$

Para el lector Alien 9900, que le incide una potencia de -62.26dBm la energía promedio es:

$$E_{prom} = \frac{\left(P_{enlace\ de\ bajada}\right)}{\left(Ancho\ de\ del\ canal\right)} = \frac{5.9429 \times 10^{-10}}{500 \times 10^{-3}} = 1.1885 \times 10^{-15} \, [J]$$

Para este caso la probabilidad de error ( $P_e$ ) es:

$$P_e = \frac{1}{2}e^{-\left(\frac{1.1885x10^{-15}}{4x6.3245x10^{-17}}\right)} + \frac{1}{2}Q\left(\sqrt{\frac{1.1885x10^{-15}}{2x6.3245x10^{-17}}}\right)$$
$$P_e = 0.5(9.1134x10^{-3} + 1.459x10^{-5}) = 4.56399x10^{-3}$$

De los resultados obtenidos se concluye que el lector juega un papel importante en el análisis de desempeño de la etiqueta, por lo que se recomienda usar un lector con la mayor sensibilidad posible, que en este caso es el lector Motorola modelo XR-450.

En este capítulo se ha descrito de manera puntual la metodología desarrollada para determinar el nivel de umbral de potencia de respuesta de las etiquetas RFID (sensibilidad) con este valor se calcula también la probabilidad de error por bit para asegurar que la etiqueta sea identificada. Este nivel de potencia permite proponer modelos de predicción en ambientes de propagación real con reflexiones debido a objetos reflejantes de la señal de RF. Los modelos de propagación de la señal de RF se analizan en el siguiente capítulo.

### **CAPÍTULO 3**

### MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA LA TECNOLOGÍA DE RFID EN LA BANDA DE UHF

Los sistemas de RFID se encuentran dentro de las comunicaciones inalámbricas. En este tipo de sistemas para la banda de frecuencias de 900-930 MHz, la longitud de onda ( $\lambda$ =33.3 cm) de la señal de RF es pequeña comparada con la distancia entre el transmisor y el receptor. Para el caso de la aplicación a la identificación vehicular, el medio de comunicación puede estar formado además del espacio libre por el asfalto, edificios u otros automóviles, los cuales generan mecanismos de propagación como: la reflexión, refracción y difracción de la señal de RF, produciendo multitrayectorias. Para analizar dichos mecanismos de propagación se requiere de modelos que permitan analizar el desempeño del enlace de comunicación de los sistemas RFID.

Un escenario típico para la identificación vehicular consta de una estación base que corresponde a un lector con la antena y la unidad receptora que es una etiqueta pegada en el parabrisas de un automóvil. La comunicación que se presenta es semi-duplex, es decir la transmisora de RFID emite señal de RF y sí esta es reconocida por la etiqueta de RFID, entonces responde y se forma el enlace de comunicación. Esta comunicación se lleva a cabo en línea de vista, dentro de una cobertura o huella que corresponde a la zona de iluminación de la antena del lector, sin embargo también se tiene comunicación fuera de ella por las reflexiones. La antena a pesar de estar fija no mantiene una zona de iluminación constante debido a que se presentan reflexiones o multitrayectorias aleatorias de la señal de RF durante el proceso de comunicación.

En esta tesis nos enfocamos en primera instancia al modelo de propagación que se representa en el escenario que se muestra en la fig. 3.1 para la identificación vehicular, el cual es el modelo de dos rayos que tiene una línea de vista y una señal reflejada por el asfalto. Este modelo es el que se tratara en este capítulo ya que nos proporciona el análisis de desempeño de la identificación vehicular.



Figura 3. 1 Identificación de vehículos por medio de la tecnología de RFID.

Cuando se tiene una clara línea vista, el primer modelo que da un comportamiento ideal del sistema de radiocomunicación es el de Friis; con este modelo se determinó el nivel de sensibilidad de etiquetas RFID pasivas que operan en la banda de frecuencias UHF (Capítulo 2). Otro de los modelos con el cual se puede analizar este problema es el modelo de dos rayos, el cual considera un coeficiente de reflexión que incluye propiedades del medio como es la conductividad, permeabilidad y permitividad del plano reflector. En este capítulo se presenta el análisis de estos modelos, para un medio controlado que es una cámara anecoica y para un escenario real de identificación vehicular con tecnología RFID.

#### 3.1 Modelo de Friis

El modelo de propagación de Friis, se propuso para un espacio libre de obstáculos, por lo que también se conoce como "del espacio libre" [17, 18, 40]. Este modelo se utiliza para predecir el nivel de potencia recibido cuando existe línea vista entre el transmisor (Tx) y receptor (Rx) en condiciones de campo lejano, sin obstáculos que puedan causar reflexión, refracción o difracción; de tal forma que tiene un factor de atenuación del medio  $(\lambda/4\pi r)^n (ver Cap. 2)$ , donde n=2 para el espacio libre y toma otro valor para condiciones diferentes a las del espacio libre; " $\lambda$ " es la longitud de onda de la señal de RF y "r" es la distancia entre el transmisor y el receptor. Este modelo se analizó (ecuación 2.2) bajo las condiciones de medición del sistema RFID y de la cámara anecoica con una resonancia aproximadamente a los 850MHz, donde se determinó "n=2.2", lo que implica que se tienen reflexiones dentro de la cámara anecoica. Para evitar las reflexiones sobre todo en el piso que es de material de ferrita, cuyo desempeño óptimo es en baja frecuencia se tuvo que agregar material absorbente que operara a la frecuencia de los sistemas de RFID, es decir para tener mayor uniformidad del campo a los 915MHz. Un esquema para la comprobación del modelo de Friis se muestra en la figura 3.2.



Figura 3. 2 Configuración del Modelo de Friis.

De acuerdo a la expresión (2.2) que corresponde al modelo de Friis, si la distancia "r" aumenta, el factor de atenuación aumenta. Este factor se puede representar en decibeles como:

$$PL_{dB} = n * 10 * \log_{10}\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)$$
(3.1)

Cuyos parámetros se describieron en el capítulo 2.

Para el caso específico de la tecnología de RFID que en México opera a la frecuencia nominal de 915 MHz, se analizó el comportamiento de la pérdida por trayectoria en un medio controlado (cámara anecoica) para determinar los parámetros que se pueden compensar en un ambiente real de la aplicación de dicha tecnología. El análisis se realizó para una distancia fija dentro de la cámara anecoica, cumpliendo con las condiciones de campo lejano (2 m) y una frecuencia de 915 MHz, con antenas de características eléctricas iguales y utilizando un analizador de redes HP modelo 8510 así como también un analizador de espectros R&S modelo FSH-6.

Los analizadores se calibraron con los cables para compensar las pérdidas tanto de los cables como de los conectores en un proceso de transmisión ( $S_{21}$  through). Después de haber calibrado estos instrumentos se conectó la antena Tx y la antena Rx de acuerdo a la figura 3.2 y se lleva a cabo la medición del factor de atenuación del medio. Este proceso se realizó más de 10 veces con el fin de observar si el proceso se mantenía constante, la estabilidad en ambos instrumentos se mantuvo con una diferencia entre uno y otro de 1.2 dB, este valor se comprobó de forma teórica utilizando la ecuación 3.1 con un factor empírico del medio (n) igual a 2. Los resultados se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1 Resultados de la pérdida de trayectoria en una cámara anecoica.

Instrumento de medición	Valor Teórico	Valor Medido
Analizador de redes HP 8510	-37.69 dB	-37.4 dB
Analizador de espectros FSH6	-37.69 dB	-36.20 dBm

La medición se hizo para una sola frecuencia (915 MHz) y una sola distancia (2 m) y de acuerdo a los resultados de la tabla 3.1, el valor teórico y el valor experimental con menor error es el que se realizó con el analizador de redes HP modelo 8510, lo cual muestra que este analizador tiene un proceso de compensación mayor respecto a los conectores y a los cables. Para tener idea con respecto a diferentes distancias, se grafica la expresión 3.1 en función de la distancia y se compara con los puntos medidos, esta gráfica se muestra en la figura 3.3.



Figura 3. 3 Comparación de resultados teóricos y medidos de la atenuación de la señal de RF.

De los resultados se puede concluir lo siguiente: el analizador vectorial de redes HP 8510 tiene una mayor precisión de aproximadamente 1.2 dB en la compensación de los parámetros parásitos de cables y conectores respecto al analizador de espectros R&S FSH6, debido a que es un instrumento calibrado para laboratorio. El FSH-6 es un equipo portátil cuya utilidad es para trabajo de campo.

Por los resultados obtenidos, la discrepancia entre el valor teórico y experimental es aproximadamente 0.3 dB, utilizado un valor de n = 2, que es el factor empírico del medio. Este factor empírico es el que se utilizó para el análisis del canal de comunicación de la tecnología RFID.

#### 3.2 Modelo de 2 rayos

El análisis del modelo de dos rayos se realiza a partir de la figura 3.4, donde se tiene un transmisor Tx (lector de RFID) colocado a una altura  $h_t$  y un receptor Rx (etiqueta de RFID) a una altura  $h_r$ separados a una distancia "r". El transmisor emite una PIRE de 36 dBm para estar en concordancia con la norma NOM-121, considerando la frecuencia nominal de portadora de 915 MHz. Como  $\lambda$  es pequeña comparada con las dimensiones del plano reflector (Asfalto), el análisis teórico se desarrolla basándose en la óptica geométrica, la cual nos permite trazar rayos de cada una de las componentes. Para evaluar los campos eléctricos asociados a los rayos en función de las propiedades del material se hace uso de las ecuaciones de reflexión de Fresnel. El modelo aproximado de dos rayos considera tanto un rayo directo como un rayo reflejado con un plano de tierra uniforme y además que  $h_t \ll r$  y  $h_r \ll r$ , de acuerdo a la figura 3.4, se tiene que los valores  $\alpha$  y  $\varphi$  son pequeños. Analizando los campos eléctricos para el modelo de dos rayos se tiene:



Figura 3. 4 Geometría del modelo de 2 rayos aproximado.

El campo eléctrico del rayo directo, de acuerdo a la figura 3.4, está definido por:

$$E_D = \frac{E_O}{r_1} e^{j\omega t} e^{-j\beta r_1}$$
(3.2)

El campo eléctrico del rayo reflejado, está definido por:

$$E_R = \Gamma \frac{E_o}{r_2} e^{j\omega t} e^{-j\beta r_2}$$
(3.3)

donde  $r_1$ y  $r_2$  son las distancias que recorren el campo eléctrico del rayo directo y del rayo reflejado respectivamente y están dados por:

$$r_1 = \sqrt{r^2 + (h_t - h_r)^2}; r_2 = \sqrt{r^2 + (h_t + h_r)^2}$$
 (3.4)

 $\Gamma$  es el coeficiente de reflexión de Fresnel

La diferencia de longitud recorrida entre el rayo directo y reflejado es  $r_2 - r_1$ , de modo que se puede determinar la diferencia de fase que se presenta entre los rayos introduciendo la constante de propagación en el espacio libre  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ , quedando:

$$\varphi = \frac{2\pi (r_2 - r_1)}{\lambda} \tag{3.5}$$

El ángulo de incidencia del rayo reflejado  $\alpha$  está determinado por:

$$\tan \alpha = \frac{h_t + h_r}{r} \Rightarrow \alpha = \tan^{-1} \left( \frac{h_t + h_r}{r} \right)$$
(3.6)

El campo eléctrico total en el receptor es:

$$E_t = \frac{E_o}{r_1} e^{-j\beta r_1} + \Gamma \frac{E_o}{r_2} e^{-j\beta r_2}$$
(3.7)

La ecuación 3.7 representa el campo eléctrico total en la antena receptora, que se forma por un rayo directo y un rayo reflejado. Cuando el rayo directo y el rayo reflejado se encuentran en fase en la antena receptora los campos se suman, pero cuando hay un desfasamiento entre ellos los campos se restan, presentándose en fenómeno de interferencia. Para ilustrar el fenómeno de interferencia con los datos de un sistema de RFID de identificación vehicular de acuerdo a la figura 3.1 se tiene: una altura de la antena del lector  $h_t$ =5.5 m, una altura de la etiqueta (receptor)  $h_r$ =1.5 m y la señal de la antena transmisora de amplitud Eo=1 V/m para una frecuencia de portadora de 915 MHz. Para el coeficiente de reflexión se consideran los parámetros eléctricos típicos del asfalto (plano reflector) en un ambiente normal: permitividad relativa( $\varepsilon_r$ ) de 9 y conductividad( $\sigma$ ) de 0.005 S/m [22,23]. El análisis se realizó en términos de campo eléctrico y de potencia, en la figura 3.5.A se muestra el comportamiento del campo eléctrico en función de la distancia y en la figura 3.5.B se muestra el comportamiento de potencia en función de la distancia.





De la figura 3.5.A, se puede observar que el campo eléctrico directo se identifica con el numero 1 (rojo), campo eléctrico reflejado se identifica con el numero 2 (azul) y el campo eléctrico total se identifica con el numero 3 (negro). El fenómeno de interferencia constructiva se puede observar a la distancia 2.8 m, donde el campo eléctrico directo y el reflejado están en fase y la resultante es la suma de estos campos. El fenómeno de interferencia destructiva se puede observar a la distancia 3.8 m, donde el campo eléctrico directo y el reflejado están desfasados 180° y la resultante es la diferencia de estos campos.

De la figura 3.5.B, se puede observar que la potencia del campo eléctrico directo se identifica con el numero 1 (rojo), la potencia del campo eléctrico reflejado se identifica con el numero 2 (azul) y la potencia del campo eléctrico total se identifica con el numero 3 (negro). El fenómeno de interferencia constructiva se puede observar a la distancia 0.8 m, donde la potencia del campo eléctrico directo y la potencia del reflejado están en fase y la resultante es la suma de estas potencias. El fenómeno de interferencia destructiva se puede observar a la distancia 4.2 m, donde la potencia del campo eléctrico directo y la potencia del reflejado están desfasados 180° y la resultante es la diferencia de estos niveles de potencia.

#### 3.2.2 Coeficiente de Reflexión (Γ)

La componente reflejada  $E_R$  en el plano reflector, es directamente proporcional al coeficiente de reflexión complejo, el cual genera pérdidas en el campo si no se tiene una reflexión total. Como el plano de tierra (Asfalto) es un dieléctrico, el coeficiente de reflexión se puede calcular, solo si se conocen sus parámetros eléctricos que son: la conductividad ( $\sigma$ ), la permitividad relativa ( $\varepsilon_r$ ) y la permeabilidad ( $\mu_r$ ) (para el caso del asfalto  $\mu_r = 1$ ). Otros parámetros importantes para determinar el coeficiente de reflexión son: la longitud de onda ( $\lambda$ ) del campo reflejado, el ángulo de incidencia ( $\alpha$ ) del campo sobre el plano de reflexión y su polarización.

Para la superposición de señales radioeléctricas, solo dos polarizaciones ortogonales necesitan ser consideradas para resolver problemas de reflexión general, que son: la polarización paralela y la polarización perpendicular [10, 20, 21].

#### 3.2.2.1 Polarización Paralela ( $\Gamma_{\parallel}$ )

Esta polarización ocurre cuando el campo eléctrico es orientado paralelamente al plano de incidencia. El coeficiente complejo de reflexión para esta polarización puede ser calculado por [20, 21]:

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{\varepsilon_{c}^{\mathbb{Z}} sen\alpha - \sqrt{\varepsilon_{c}^{\mathbb{Z}} - cos^{2}\alpha}}{\varepsilon_{c}^{\mathbb{Z}} sen\alpha + \sqrt{\varepsilon_{c}^{\mathbb{Z}} - cos^{2}\alpha}}$$

(3.8)

donde la permitividad compleja relativa está dada por:

 $\varepsilon_c^{\mathbb{Z}} = \varepsilon_r - j60\lambda\sigma \tag{3.9}$ 

Y donde  $\sigma$  y  $\varepsilon_r$  son la conductividad y la constante dieléctrica relativa del plano reflector respectivamente,  $\lambda$  es la longitud de onda y  $\alpha$  es el ángulo de incidencia.

#### 3.2.2.2 Polarización Perpendicular ( $\Gamma_{\perp}$ )

La polarización perpendicular ocurre cuando el campo eléctrico es orientado perpendicularmente al plano de incidencia. El coeficiente complejo de reflexión para esta polarización puede ser calculado por [20, 21]:

$$\Gamma_{\perp} = \frac{sen\alpha - \sqrt{\varepsilon_{c}^{\mathbb{Z}} - \cos^{2}\alpha}}{sen\alpha + \sqrt{\varepsilon_{c}^{\mathbb{Z}} - \cos^{2}\alpha}}$$
(3.10)

Donde  $\varepsilon_c^{\mathbb{Z}}$  está dado por la ecuación 3.9.

Una gráfica del comportamiento en magnitud y fase de los coeficientes de reflexión paralelo y perpendicular se muestra en la figura 3.6, para la frecuencia portadora nominal de la tecnología RFID de 915 MHz, considerando valores típicos de los parámetros eléctricos del asfalto: conductividad  $\sigma = 0.005 \ s/m$ , y permitividad relativa ( $\varepsilon_r$ ) de 5, 9 y 15 que corresponde a condiciones extremas de seco, normal y mojado [22, 23].



Figura 3. 6 Coeficientes de Reflexión vs ángulo de incidencia con diferentes  $\varepsilon_r$ .

En la figura 3.6 se grafican la magnitud y fase de los coeficientes de reflexión paralelo y perpendicular, para el caso del coeficiente de reflexión perpendicular se observa que su magnitud crece de forma exponencial conforme aumenta el ángulo de incidencia" $\theta$ " sin llegar a tener una

magnitud de cero, lo que indica que no hay cambio de fase; en cambio para el coeficiente de reflexión paralelo se observa que conforme aumenta " $\theta$ " la magnitud llega a ser cero, en estas condiciones se tiene un cambio de fase de 180°. Este análisis nos permite predecir el comportamiento de propagación de una señal de RF.

De acuerdo al esquema que se está analizando en este trabajo de tesis, las antenas tanto del Lector como de la etiqueta de RFID tienen una polarización perpendicular, lo que implica que la fase del coeficiente de reflexión no sufre un cambio.

#### 3.3 Modelo de dos rayos (Análisis vectorial)

Una evaluación vectorial del modelo de dos rayos se realiza a partir de la figura 3.6. Donde un dipolo ideal con altura  $h_t$  genera dos vectores de campo eléctrico  $(\vec{E}_D y \, \vec{E}_R)$  en el receptor con altura de  $h_r$ .



Figura 3.7 Modelo de dos rayos considerando un dipolo ideal como antena del transmisor.

De la figura 3.7, haciendo el análisis con el método de imágenes, se puede definir que:

$$\psi_p = \operatorname{arc} \tan^{-1} \left( \frac{h_t - h_r}{r} \right)$$
(3.11)  
$$\phi = \alpha - \psi_p$$
$$\gamma = \alpha$$
(3.12)

Donde  $\psi_p$  es el ángulo de polarización que forma el rayo directo con respecto a su vertical y  $\gamma$  es el ángulo de polarización que forma el rayo reflejado con respecto a su vertical.

En este caso, los dos campos asociados por las trayectorias  $r_1 y r_2$  se definen:

$$\vec{E}_D = \frac{E_0}{r_1} \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{-j\beta r_1} \cdot G(\theta)$$
(3.13)

$$\vec{E}_R = \frac{E_o}{r_2} \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{-j(\beta r_2)} \cdot G(\theta)$$
(3.14)

Donde  $G(\theta) = sen\theta$  es la ganancia en un dipolo ideal y  $r_1 y r_2$  están dados por la ecuación (3.4).

Por lo tanto el vector de campo eléctrico total está dado por:

$$\vec{E}_T = \vec{E}_D + \vec{E}_R \tag{3.15}$$

El campo eléctrico total dado por la ecuación (3.15) tiene dos componentes, una en la dirección vertical (z) y otra en la dirección horizontal (x). Estas componentes están dadas por:

$$\vec{E}_{z} = \left(\dot{E}_{D} \cos \psi_{p} - \dot{E}_{R} \operatorname{cPs} \gamma\right) \vec{a}_{z}$$
(3.16)

$$\vec{E}_{x} = (\dot{E}_{D} \operatorname{sen} \psi_{p} + \dot{E}_{R} \operatorname{sen} \gamma) \vec{a}_{x}$$
(3.17)

Donde  $\psi_p$  y  $\gamma$  son los ángulos que forman  $\vec{E}_D$  y  $\vec{E}_R$  en la dirección vertical respectivamente,  $\dot{E}_D$  y  $\dot{E}_R$  son sus respectivas magnitudes en forma fasorial.

Una comparación entre la ecuación 3.16 y la ecuación 3.17 se presenta en la figura 3.8 para las condiciones del esquema de la figura 3.7, donde la altura de la antena del lector es  $h_t$ =5.5 m y la altura de la etiqueta es  $h_r$ =1.5 m; la señal de la antena transmisora es de amplitud Eo=1 V/m para una frecuencia de portadora de 915MHz. Para el coeficiente de reflexión se consideran los parámetros eléctricos típicos del asfalto (plano reflector) en un ambiente seco: permitividad relativa( $\varepsilon_r$ ) de 5 y conductividad( $\sigma$ ) de 0.005 s/m.



Figura 3. 8 Componentes Ez y Ex resultantes debido a una polarización perpendicular respecto al plano de incidencia.

De acuerdo a la gráfica de la figura 3.8 para distancias mayores de 2 metros y hasta 10 metros, las magnitudes de ambas componentes del campo eléctrico tienen la misma tendencia de variación, las magnitudes cambian para cada punto y unas pueden ser mayores que otras por lo que se puede suponer que tienen una polarización elíptica. Para distancias menores a 10 metros las magnitudes de las componentes son diferentes, lo cual nos asegura que se tiene una polarización elíptica.

Como campos eléctricos totales es importante comparar el modelo de dos rayos aproximado (ecuación 3.7) y el modelo de dos rayos vectorial (ecuación 3.15), estas dos ecuaciones se comparan con el propósito de definir cuál es la más adecuada para analizar el comportamiento de propagación de la señal de RF, de los sistemas de RFID para la aplicación de la identificación vehicular. Dicha comparación se realiza de acuerdo a los esquemas de las figuras 3.1, 3.4 y 3.7 para las siguientes condiciones: altura de la antena del lector de  $h_t$ =5.5 m y una altura de la etiqueta  $h_r$ =1.5 m; la señal de la antena transmisora de amplitud Eo=1 V/m para una frecuencia de portadora de 915MHz. Para el coeficiente de reflexión se consideran los parámetros eléctricos típicos del asfalto (plano reflector) en un ambiente seco: permitividad relativa( $\varepsilon_r$ ) de 5 y conductividad( $\sigma$ ) de 0.005 s/m [22,23].



Figura 3. 9 Campo eléctrico total para el modelo de dos rayos con y sin aproximaciones debido a una polarización perpendicular de la señal de RF.

De los resultados obtenidos de las gráficas de la figura 3.9 se puede observar que existen pequeñas discrepancias entre el modelo de dos rayos con y sin aproximaciones a distancias menores de 10 m de separación entre la antena Transmisora y la Receptora, por lo que para la aplicación de la identificación vehicular con tecnología RFID cualquiera de los dos modelos puede aplicarse. En este trabajo se utilizó el modelo de dos rayos con aproximaciones, modificándolo para un dimensionamiento de potencias.

La relación del campo eléctrico con la potencia puede obtenerse por la siguiente ecuación:

$$P(r) = \frac{|E_t|^2}{120\pi}$$
(3.18)

De acuerdo a la ecuación 3.18, se observa que la potencia es directamente proporcional al campo eléctrico. Por lo tanto el modelo de dos rayos para un dimensionamiento de potencias puede expresar como:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left|\frac{1}{r_1} e^{-j\beta r_1} + \Gamma_\perp \frac{1}{r_2} e^{-j\beta r_2}\right|^2$$
(3.19)

Donde  $P_r$  es la potencia recibida en el receptor,  $P_tG_t$  es la potencia isotrópica radiada,  $G_r$  es la ganancia de la antena receptora,  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal portadora de radiofrecuencia y  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$  es el número de onda. Los parámetros geométricos del ambiente se determinan de acuerdo a la figura 3.4, por lo que  $r_1 = \sqrt{r^2 + (h_t - h_r)^2}$  corresponde a la distancia que recorre el rayo directo,  $r_2 = \sqrt{r^2 + (h_t + h_r)^2}$  es la distancia para el rayo reflejado, el parámetro  $\Gamma_{\perp}$  es el coeficiente de reflexión para una polarización de la señal de RF perpendicular.

El modelo de dos rayos de la ecuación 3.19 es un modelo aproximado, el cual puede simularse para las condiciones de la tecnología RFID de identificación vehicular y compararse con el modelo de Friis en línea de vista, de acuerdo a los esquemas de las figuras 3.1 y 3.4. La comparación puede realizarse para una altura de la antena del lector de  $h_t$ =5.5 m y una altura de la etiqueta  $h_r$ =1.5 m, con una potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE) de 4W o 36 dBm, teniendo una frecuencia de portadora de 915MHz y una ganancia de la antena de la etiqueta ( $G_r$ ) de 2dBi. Los parámetros eléctricos típicos del asfalto (plano reflector) en un ambiente normal son: permitividad relativa( $\varepsilon_r$ ) de 9 y conductividad( $\sigma$ ) de 0.005 S/m. Los resultados de la simulación se presentan en la gráfica de la figura 3.10.





De las curvas de la figura 3.10 se puede observar el valor de potencia que incide en el receptor (etiqueta de RFID) para una trayectoria (modelo de Friis) y dos trayectorias (modelo de dos rayos) en función de la distancia. Este valor se interpreta como el nivel de potencia que se recibe en la etiqueta, para que esta responda su sensibilidad debe ser mínima de ese nivel de potencia. El modelo de Friis presenta una menor atenuación de la señal de RF en comparación del modelo de dos rayos debido a que no se presentan las condiciones reales de un escenario de identificación vehicular. En el modelo de dos rayos se presenta una mayor atenuación de la señal de RF debido a la superposición del rayo directo con el reflejado la cual genera interferencia destructiva donde se presentan mínimos de potencia. Estos mínimos representan mínima intensidad de la señal de RF para el canal de comunicación.

El análisis anterior del dimensionamiento de potencias con el modelo de dos rayos es una buena aproximación de un escenario real para la identificación vehicular con tecnología RFID, sin embargo para tener mayor exactitud es necesario considerar otros fenómenos como la rugosidad del plano reflector (Asfalto).

#### 3.3 Modelo de dos rayos aplicado a la Identificación vehicular con tecnología RFID

Un escenario real para esta aplicación se puede representar por el esquema de la figura 3.11, donde se observan las trayectorias de propagación de los rayos reflejados por el Asfalto (plano reflector) que no es liso y que presenta problemas de rugosidad, que aunque pueden ser mínimos si llegan a afectar en la propagación de la señal de RF.



#### Figura 3. 11 Escenario real del modelo de dos rayos con aplicación a la identificación vehicular.

En el esquema de la figura 3.11 se puede observar que la estación base del sistema de RFID se fija a una altura de 5.5 m, debido a que esta tecnología se está proponiendo para la identificación vehicular de la República Mexicana, donde la altura de los puentes está normalizada a 5.5 m. Entonces, las estaciones base se pueden colocar en cualquier puente que cruce una carretera. Las etiquetas de RFID comerciales que se adhieren a los parabrisas de los vehículos pueden detectarse a una distancia típica de 4 m, la cual puede ser mayor o menor dependiendo de la sensibilidad de esta. Considerando la distancia de detección de las etiquetas y usando una antena del lector direccional, se calculó el ángulo que dicha antena debe tener respecto a su vertical para tener mínimo una cobertura de 4 m, si la etiqueta se coloca a una altura de 1.5 m (parabrisas de un vehículo), dicho ángulo  $\theta$  se determina de acuerdo al esquema de la figura 3.12.



Figura 3. 12 Esquema para la determinación del ángulo  $\theta$  de inclinación de la antena del lector respecto a la vertical.

De la figura anterior se puede observar que si el ángulo  $\theta = 15^{\circ}$ ,  $B = A \tan(\theta)$ , entonces como el valor de A es igual a 5.5 m y a la altura de 1.5 m, se tienen los 4 m de cobertura con la etiqueta RFID, esto es:

$$B = A * \tan(\theta) = 5.4 \tan(15^\circ) = 1.47 m$$

Por el teorema de Pitágoras se obtiene C

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{5.5^2 + 1.47^2} = 5.6 m$$

De la misma forma para una altura  $\hat{A}$  de 1.5 m y el ángulo de 15°, en la intersección con la recta C se puede calcular ahora,  $\hat{B} = \hat{A} * \tan(\hat{\theta})$ 

$$\dot{B} = \dot{A} * \tan(\dot{\theta}) = 1.5 \tan(15^\circ) = 0.4 m$$

Por el teorema de Pitágoras se obtiene Ć

$$\hat{C} = \sqrt{\hat{A}^2 + \hat{B}^2} = \sqrt{1.5^2 + 0.4^2} = 1.55 \ m$$

Finalmente en el punto "P" se tienen los 4 metros en línea de vista entre la antena lectora y la etiqueta de RFID, es decir:

$$P = C - \acute{C} = 5.6m - 1.5m \approx 4m$$

La inclinación de la antena lectora a 15°asegura la detección de la etiqueta RFID a una distancia de 4 m que son las condiciones óptimas de cobertura para las etiquetas comerciales.

En la tecnología RFID para la aplicación de identificación vehicular, un parámetro que afecta sustancialmente el desempeño del sistema es la colocación de la etiqueta RFID en el parabrisas del automóvil, la cual está relacionada con la polarización de las antenas. Este fenómeno se mostró en el capítulo 2, por lo que es importante considerarlo en el modelo de dos rayos. La falta de alineación de las antenas (Antena del lector – Antena de la etiqueta RFID) se conoce como factor de pérdidas por polarización (PLF), el cual se describe en la figura 3.13 [10].



Figura 3. 13 Pérdidas por polarización para el ángulo de apertura entre la antena transmisora del lector y la antena de la etiqueta.

Dónde:

 $\hat{a}_i$  es el vector unitario de la onda incidente

- $\hat{a}_a\,$  es el vector unitario de la onda de polarización (polarización de la antena)
- $\psi_{p}\;$  es el ángulo que se forma entre los dos vectores unitarios  $\,\hat{a}_{i}\,y\,\hat{a}_{a}\,$

De la figura 3.13 se puede observar, que cuando la antena de la etiqueta de RFID tiene la misma polarización de la onda electromagnética que le incide, se dice que se tienen las mínimas pérdidas, entonces el PLF=1 (figura 3.13.A). Cuando la polarización de la antena de la etiqueta de RFID difiere con la polarización de la onda electromagnética que le incide, las pérdidas de polarización se determinan de acuerdo a la expresión que se muestra en la figura 3.13.B. Cuando la polarización de la antena de la etiqueta de RFID es ortogonal con la polarización de la onda electromagnética que le incide, se dice que se tiene la máxima pérdida y entonces el PLF=0 (figura 3.13.C).

Otro de los fenómenos que afectan el canal de comunicación es la rugosidad del plano reflector (Asfalto). El asfalto no es un material totalmente liso, por lo que presenta irregularidades de dimensiones iguales o menores a la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la señal portadora de RF de 915 MHz. De acuerdo al criterio de Rayleigh [24], estas irregularidades perturban la comunicación cuando son mayores a un décimo de la longitud de onda de la portadora.

El factor de rugosidad es función del ángulo incidente ( $\alpha$ ) de la señal de RF sobre el plano reflector y de la desviación estándar ( $\sigma_h$ ) de las alturas de la rugosidad. La expresión para el cálculo de este factor es la que se muestra a continuación [24]:

$$\rho(\alpha) = e^{\left[-8\left(\frac{\pi\sigma_h}{\lambda}\cos\alpha\right)\right]}$$
(3.20)

Donde  $\sigma_h$  es la desviación estándar de la distribución normal de la rugosidad de la superficie reflectora.

En el modelo de dos rayos, el rayo reflejado se ve afectado por el factor de rugosidad ( $\rho(\alpha)$ ) y por el coeficiente de reflexión ( $\Gamma(\alpha)$ ), cuyo producto se expresa como un factor de pérdidas total, esto es:

$$\Gamma_T(\alpha) = \Gamma(\alpha)\rho(\alpha) \tag{3.21}$$

La comunicación en un sistema de RFID para la banda de UHF se presenta del tipo semi-duplex, es decir primero se envía una señal de interrogación del Lector - Etiqueta que se identifica como enlace de subida y si la etiqueta responde se genera la comunicación Etiqueta – Lector este proceso se identifica como enlace de bajada. Estos dos tipos de enlace se analizan con el modelo de dos rayos integrando el factor de rugosidad del plano reflector ( $\rho(\alpha)$ ).

#### 3.3.1 Modelo de dos rayos para el enlace de subida (Lector - Etiqueta)

En un sistema de RFID que opera en la banda de frecuencias de UHF, el enlace de subida es la comunicación de Lector – Etiqueta. El comportamiento del canal de comunicación de este enlace se puede analizar por medio de un modelo de dos rayos modificado que representa un comportamiento más exacto, ya que involucra un factor de rugosidad asociado a la trayectoria reflejada. Este modelo está dado por [25, 26]:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left|\frac{1}{r_1} e^{-j\beta r_1} + \Gamma(\alpha)\rho(\alpha)\frac{1}{r_2} e^{-j\beta r_2}\right|^2$$
(3.22)

donde  $P_r$  es la potencia recibida en el receptor ,  $P_tG_t$  es la potencia isotrópica radiada,  $G_r$  es la ganancia de la antena receptora,  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal portadora de radiofrecuencia y  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$  es el número de onda. Los parámetros geométricos del ambiente se determinan de acuerdo a la figura 3.7, por lo que  $r_1 = \sqrt{r^2 + (h_t - h_r)^2}$  corresponde a la distancia que recorre el rayo directo,  $r_2 = \sqrt{r^2 + (h_t + h_r)^2}$  es la distancia para el rayo reflejado, el parámetro  $\Gamma(\alpha)$  es el coeficiente de reflexión para una polarización horizontal, el parámetro  $\rho(\alpha)$  es el factor de rugosidad del asfalto , el símbolo  $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{h_t + h_r}{r}\right)$  representa el ángulo de incidencia en el plano reflector.

#### 3.3.2 Modelo de dos rayos para el enlace de bajada (Etiqueta - Lector)

La potencia para el enlace de bajada, corresponde a la respuesta de la etiqueta hacia el lector. Para este enlace primero se requiere analizar el fenómeno de retrodispersión que presenta la etiqueta, el cual se debe a la respuesta de la etiqueta cuando esta reconoce a la señal de interrogación del lector. El fenómeno de retrodispersión se puede identificar como la eficiencia de la respuesta de la etiqueta, que corresponde a la relación de la potencia isotrópica en la etiqueta respecto a la potencia de entrada. Esta relación es función de las impedancias que se presentan en la etiqueta y se expresa por la siguiente ecuación [12]:

$$\eta_{etiqueta} = \frac{P_{re-radiada}G_{etiqueta}}{P_a} = \frac{4R_a}{|Z_a + Z_c|^2}$$
(3.23)

donde

 $P_{re-radiada}$ : Potencia emitida por la etiqueta  $G_{etiqueta}$ : Ganancia de la antena de la etiqueta  $P_a$ : Potencia incidente a la etiqueta  $Z_a = R_a + jX_a$ :Impedancia de la antena de la etiqueta  $Z_c = R_c + jX_c$ :Impedancia del circuito integrado de la etiqueta  $\eta_{etiqueta}$ :Es la eficiencia de la etiqueta.

La potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE) de la etiqueta es:

$$PIRE = P_{re-radiada} = \eta_{etiqueta} P_a \tag{3.24}$$

El modelo de dos rayos modificado que se utiliza en el enlace de subida (ecuación 3.22), es el mismo que se utiliza en el enlace de bajada, cambiando las siguientes condiciones: la etiqueta se convierte en el transmisor y el lector de RFID en el receptor. Los demás parámetros son los mismos ya que la geometría no cambia, entonces el modelo de dos rayos para el enlace de bajada puede expresarse como:

$$P_{recibida-lector} = \left\{ \eta_{etiqueta} P_{transmitida-lector} G_{etiqueta} \right\} \\ * \left\{ G_{lector} \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{1}{r_1} e^{-j\beta r_1} + \Gamma(\alpha) \rho(\alpha) \frac{1}{r_2} e^{-j\beta r_2} \right|^2 \right\}^2$$

$$(3.25)$$

donde  $P_{recibida-lector}$  es la potencia recibida en el Lector,  $P_{transmitida-lector}G_{etiqueta}\eta_{etiqueta}$  es la potencia isotrópica radiada por la etiqueta.

#### 3.3.3 Análisis del canal de comunicación de un sistema RFID aplicando el modelo de dos rayos

Para el caso de la identificación vehicular con tecnología de RFID pasiva en la banda de frecuencias de UHF y de acuerdo a la figura 3.11, se puede predecir el comportamiento del canal de comunicación utilizando el modelo de dos rayos para el enlace de subida y el enlace de bajada,

suponiendo parámetros reales del ambiente donde circulan los vehículos. Entonces los parámetros típicos para un escenario real para la identificación vehicular son:

1.-Los parámetros geométricos utilizados para el análisis del canal fueron: una altura de la antena del lector  $(h_t)$  de 5.5 m (Altura promedio de puentes de carreteras en México), una altura de la antena de la etiqueta  $(h_r)$  de 1.5 m (altura del parabrisas de un automóvil) y una distancia máxima de análisis de 10 m.

2.-Los parámetros eléctricos utilizados para el análisis del canal fueron: Una Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (*PIRE*) de 36dBm a una frecuencia nominal de operación de 915 MHz, que es la que se específica en la Norma Oficial Mexicana NOM-121. La *PIRE* es la suma de la Potencia del lector ( $P_t$ ) de 30 dBm y la Ganancia de la antena del lector ( $G_t$ ) = 6 dBi en dB. La Ganancia típica de la antena de la etiqueta ( $G_r$ ) es de2 dBi con una eficiencia ( $\eta_{etiqueta}$ ) de -3 dB.

3.-Los parámetros ambientales fueron: Temperatura 27 °C con 48 % de humedad para un día soleado, para dichas condiciones ambientales el asfalto (plano reflector) toma los valores de permitividad relativa ( $\varepsilon_r$ ) de 9 y una conductividad ( $\sigma$ ) de 0.005 s/m.

Los datos anteriores fueron utilizados para el análisis del canal de comunicación de la tecnología de RFID pasiva en UHF para la aplicación a la identificación vehicular aplicando el modelo de dos rayos para el enlace de subida (ecuación 3.22) y el enlace de bajada (ecuación 3.25). Los resultados del análisis se presentan en la gráfica de las figura 3.14.

## **3.3.3.1** Resultados del Análisis del canal de comunicación para el enlace de subida y el enlace de bajada



Enlace de subida (Comunicación Lector – Etiqueta)



Como se puede observar en la gráfica de la figura 3.14, se tendrá un nivel de potencia incidente en la etiqueta de RFID a 9 m de aproximadamente -9dBm en línea de vista y cuando se presentan reflexiones se tiene un nivel de potencia incidente de aproximadamente -5 dBm, es decir se tiene una mayor cobertura de lectura de la etiqueta de RFID. Con estos niveles de potencia se cubre perfectamente la detección de la etiqueta de RFID a 10m ya que la sensibilidad actual de estas es de -18 dBm.

#### • Enlace de bajada (Comunicación Etiqueta - Lector)

Para una eficiencia en el sistema de  $\eta = -3dB$  en la etiqueta de RFID. Se obtiene la siguiente grafica:





Para el caso del enlace de bajada de igual manera se analiza las gráfica de la figura 3.15, cuando se tiene una trayectoria directa se presenta una nivel de potencia en el lector de RFID de -49 dBm a 9 m y cuando se presentan reflexiones se tienen -45 dBm; si los actuales lectores de RFID son diseñados para una sensibilidad de -75 dBm, se cubre perfectamente 10 metros de cobertura.

## 3.4 Comprobación de los modelos de propagación de la Tecnología RFID para la aplicación a la Identificación vehicular

Para la comprobación de los modelos de propagación propuestos en los puntos anteriores y con el propósito de analizar el comportamiento de un sistema de RFID con tecnología pasiva en la banda de UHF para la aplicación de identificación vehicular en un ambiente real, se montó un portal con altura de 5.5 m. En dicho portal se instaló el sistema de lectura de tecnología RFID, el cual consiste de una antena que se conecta al lector de RFID a través de un cable coaxial de bajas pérdidas. El equipo de RFID del portal se ajustó a la normativa de 36 dBm en conformidad con la norma NOM-

121. En este portal se midió la potencia radioeléctrica emitida por el lector de RFID en diferentes puntos para determinar la cobertura y asegurar que etiquetas de RFID pasivas adheridas en parabrisas de automóviles puedan ser leídas a diferentes velocidades. Un esquema de esta configuración se puede visualizar en la figura 3.16.



Figura 3. 16 Configuración del sistema RFID para la identificación vehicular.

El procedimiento para determinar el comportamiento de esta tecnología en un ambiente real con aplicación a la identificación vehicular, fue el siguiente:

- Se Montó un portal de 5.5 m de altura y 4.5 m de ancho, en el cual se colocó la antena transmisora en el centro de la parte superior de la estructura, fijándose a un ángulo de 15° respecto a su vertical.
- Con un Radiorreceptor de Interferencias Electromagnéticas (EMI), se realizó un barrido a las frecuencias en que opera el sistema de RFID en UHF (900 -930 MHz), a fin de determinar que no existieran señales de RF que interfirieran con el sistema a prueba.
- Se determinó el área de cobertura tanto de la señal Radioeléctrica como de lectura de una etiqueta RFID pasiva genérica, para verificar que el sistema de RFID estuviera funcionando correctamente.
- Se realizaron pruebas de lectura estáticas a los vehículos donde se pegaron las etiquetas de RFID con el propósito de verificar que se leyera correctamente la etiqueta antes de circular de realizar las pruebas dinámicas.
- Se realizaron pruebas dinámicas con vehículos circulando a diferentes velocidades a través del portal de medición montado previamente con el objetivo de asegurar que la tecnología de RFID puede ser aplicada a escenarios de identificación vehicular.

A continuación se muestra una fotografía del equipo de RFID y material de RF utilizado durante las pruebas de lectura dinámica de la etiqueta de RFID.



Figura 3. 17 Equipo de RFID y RF utilizado durante las pruebas de desempeño de etiquetas RFID.

En la fotografía anterior podemos apreciar a la derecha el sistema de RFID Impinj modelo speedway utilizado para procesar la señal de RF, un radiorreceptor que permite la detección de señales de RF en una determinada banda de frecuencias, en este caso fue de 900 – 930 MHz y a la izquierda, se observa una fotografía del portal instalado para la detección de las etiquetas de RFID en vehículos circulando a diferentes velocidades.

Las pruebas fueron realizadas dentro de las instalaciones de Instituto Politécnico Nacional específicamente en la Av. Manuel de Anda Barredo. A continuación se describe a detalle cada uno de los pasos del procedimiento que se siguió.

# **3.4.1 Medición de la señal de propagación para un Sistema de Identificación vehicular**

Con el objetivo de corroborar que no existe una señal externa de RF que pueda interferir en la banda de 900 - 930 MHz, es necesario conocer el espectro electromagnético de dicha banda de frecuencias en el sitio de prueba. A continuación se describe el procedimiento de medición del ambiente electromagnético.

#### 3.4.1.1 Equipo para la medición del Ambiente Electromagnético

Los equipos para medir emisiones electromagnéticas radiadas en un determinado ambiente son: los analizadores de espectros y para el caso específico de las interferencias electromagnéticas (EMI) radiadas se han diseñado radiorreceptores de EMI, los cuales tienen programas que se les puede incluir el factor de antena, con el fin de proporcionar de forma directa la magnitud del campo eléctrico. Para el caso específico de la medición del ambiente electromagnético en el sitio donde se llevaron a cabo las pruebas de la etiqueta de RFID para la identificación vehicular, se utilizó el siguiente equipo:

•Un Radiorreceptor de interferencias electromagnéticas (EMI) marca Rohde & Schwarz, modelo ESPC.

- Un Antena dipolo entonada en la banda de frecuencia de operación de 902-928MHz.
- Una Computadora para el control y adquisición de datos del medidor de EMI.

Una fotografia del equipo de medicion en el lugar de las pruebas se muestra en la figura 3.18.





#### 3.4.1.2 Procedimiento de medición del ambiente electromagnético

Se hizo un barrido en frecuencia de 900 - 930 MHz del ambiente electromagnético con el sistema de RFID apagado y encendido con el radiorreceptor y una antena dipolo entonada a 915 MHZ. Cuando el sistema está apagado no se debe de registrar ninguna señal de RF dentro del intervalo de frecuencias de 900 – 930 MHz. Y cuando el sistema se enciende se debe de registrar la señal de RF dentro de esta misma banda de frecuencias, en esta prueba también se verifica que no se tenga señales externas que puedan interferir con el sistema de RFID.

#### 3.4.1.3 Resultados de la medición del ambiente electromagnético

En la figura 3.19, se muestran las gráficas del ambiente electromagnético, sin señal (A) y con señal (B) de RFID para el sitio de pruebas.



Figura 3. 19 Ambiente electromagnético en el sitio de pruebas.

#### 3.4.2 Instalación del portal con la antena del lector RFID

La prueba de lectura de etiquetas dinámica se realiza a partir de la instalación de un portal, una antena previamente caracterizada en laboratorio que se coloca en el centro del portal y un lector de RFID para este caso fue el Impinj Speedway que está en conformidad con la norma ISO/IEC 18000-6C. El lector de RFID y la antena están conectados por un cable coaxial, el esquema de dicho sistema de acuerdo al protocolo se muestra en la figura 3.20.



Figura 3. 20 Sistema de medición para las pruebas de lectura dinámicas.

La construcción del portal de estructura metálica, tiene dimensiones de 4.5 m de ancho y 5.5 m de altura. La antena que se utilizó fue una antena Yagi marca Andrew modelo ASPJ810 y se colocó al centro de la parte superior de la estructura, fijándose a un ángulo de 15° respecto al plano vertical. El lector de RFID que se utilizó fue un Impinj Speedway y el cable coaxial que unió al lector con la antena fue el LMR400 que es de bajas pérdidas. En la figura 3.21 se muestran fotografías del proceso de instalación del portal.



Figura 3. 21 Proceso de construcción del portal y colocación de la antena yagui a 15° respecto a la vertical.

#### 3.4.2.1 Ajuste de la Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE)

Durante la construcción del portal es necesario ajustar la potencia máxima nominal del lector de RFID a 24 dBm que junto con la ganancia de la antena que en este caso se utiliza una antena yagui de 12 dBi nos da la potencia PIRE máxima permitida de 36 dBm . La potencia Isotrópica Radiada Efectiva de 36 dBm o 4 Watts es la que se específica como exigencia para los sistemas de comunicaciones inalámbricos no licenciados, según el acuerdo de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) emitido en el diario oficial el 13 de marzo de 2006 y recientemente por la norma oficial mexicana para emisiones radiadas NOM-121 [6,27]. Este ajuste se hace con la ayuda de un analizador de espectros marca R&S modelo FSH-6. Este proceso es mostrado por la siguiente figura.



Potencia del lector (dBm) – Pérdidas del cable + Ganancia de la Antena (dBi)= Potencia PIRE (dBm)

#### 26 dBm -2 dB +12 dBi =36 dBm

Figura 3. 22 Ajuste de la Potencia PIRE en conformidad con la norma NOM-121.
En el apéndice B y C se describen a detalle los procedimientos de medición de pérdidas en una línea de transmisión (cable coaxial) y la medición de potencia de salida nominal de un generador de RF (Lector de RFID) respectivamente.

# 3.4.2.2 Distribución de la Potencia eléctrica

Una vez encendido el sistema de RFID se mide la huella de cobertura esto se hace marcando el asfalto en forma de cuadricula de 1x1 m en un área de 6 m de ancho por 8 m de largo (ver figura 3.20).

Para obtener la cobertura, primero se marcaron los puntos de medición sobre el área donde apunta la antena Yagi, esto con el fin de tener una referencia para la distribución tanto de señal de radiofrecuencia como número de lecturas. La medición de la cobertura para la señal de RF se llevó a cabo con un analizador de espectros y una antena de banda ancha colocada a una altura de 1.2m del piso y para la cobertura de lecturas se utilizó una etiqueta genérica.



Figura 3. 23 Proceso de medición de cobertura.

Los resultados de las mediciones de la cobertura de potencia eléctrica para dos y en tres dimensiones se muestran en las figura 3.24.



Figura 3. 24 Cobertura de potencia eléctrica en el sitio de la prueba dinámica.

Para la cobertura respecto a las lecturas, se tomó el número de lecturas para cada 15 segundos, en cada punto marcado en el asfalto los resultados se muestran en la figura 3.25 para dos y tres dimensiones.



Figura 3. 25 Cobertura del número de lecturas en el sitio de la prueba dinámica.

Como se puede observar de los diagramas anteriores de las figuras 3.24 y 3.25 de cobertura de potencia eléctrica y la cantidad de lecturas se concentran en la parte media del portal por donde circularon los vehículos, teniendo una zona de cobertura de entre 5 - 6 m de distancia para la antena Yagi colocada a un ángulo de 15° con respecto a la vertical. Todo esto asegura las lecturas de las etiquetas de RFID colocadas en los parabrisas de los vehículos que circularon a diferentes velocidades, lo cual corresponde a las pruebas dinámicas, sin embargo estos datos son medidos y del tipo aleatorio, por lo que resta hacer una homologación con el modelo de dos rayos propuesto.

Por lo anterior se realizó una simulación tridimensional vía software del modelo de dos rayos dado por la ecuación 3.22, en la condición de línea de vista y para la polarización Horizontal. Las condiciones de simulación están dadas de acuerdo a las de la simulación bidimensional del modelo de dos rayos, es decir 30 dBm de potencia del lector de RFID, ganancia de la antena del lector de 6 dBi; Ganancia de la antena de la etiqueta de 2 dBi; Distancia Máxima 8 m de análisis; Altura de la antena del lector de 5.5 m y Altura de la antena de la etiqueta 1.5 m. El área propuesta del sitio de prueba dinámicas fue de 6 m de ancho y 10 de largo de acuerdo a los resultados de las gráficas 3.24 y 3.25, obteniendo los siguientes resultados:



Figura 3. 26 Cobertura de potencia en el sitio de pruebas dinámicas simulada por medio del modelo de dos rayos en condición de línea de vista.

En las gráficas anteriores de la figura 3.26, se presentan los resultados de la simulación del modelo de dos rayos para el enlace de subida (comunicación Lector - Etiqueta) para 2 y 3 dimensiones, en línea de vista para cuando se establece una polarización perpendicular de la señal de RF. Estas graficas corresponden al comportamiento de la señal en el sitio de pruebas dinámicas de forma determinística (Área del portal donde circulan vehículos a diferentes velocidades), donde se puede observar para los resultados que el nivel de potencia tiende a disminuir conforme la distancia aumenta. Estos resultados están de acuerdo a las gráficas 3.24 que muestran una misma

tendencia, en la cual se observa que en los puntos medios de la zona de cobertura se concentra el máximo nivel de potencia y esta se desvanece conforme aumenta la distancia, lo que indica que el modelo de dos rayos propuesto en el capítulo 3 de este trabajo de tesis es el adecuado para predecir el comportamiento de la señal de RF en los sistemas RFID con aplicación a la identificación vehicular.

# 3.4.3 Pruebas de lectura estática de la etiqueta de RFID

Las pruebas de lectura estática son pruebas de lectura de la etiqueta de RFID preliminares que tienen como objetivo asegurar que la etiqueta sea adherida correctamente en el parabrisas del automóvil y verificar que puede ser leída en forma estática a diferentes ángulos sin anomalías antes de tener una prueba dinámica, es decir la circulación de los vehículos a través del portal con diferentes velocidades.

# 3.4.3.1 Equipo de RFID para la prueba de lectura estática de la etiqueta de RFID

El equipo de RFID utilizado para esta prueba consistió de un lector de RFID portátil con antena integrada marca Motorola modelo MC9090 que opera a 915MHz y está en conformidad con la norma ISO/IEC 18000-6C.

Además del lector de RFID se requirió del siguiente equipo auxiliar:

- •Un Medidor de distancia láser.
- Un Medidor de ángulo.
- Un Medidor de temperatura y humedad relativa.
- Un Automóvil

## 3.4.3.2 Instalación del sistema para las pruebas de lectura estática de la etiqueta de RFID

Se ajustó el equipo de RFID utilizado y se colocó el vehículo donde se realizó la prueba, marcando las distancias de los puntos donde se llevaron a cabo las lecturas de la etiqueta de RFID de acuerdo al protocolo especificado, tal como se ilustra en la figura 3.27.



Figura 3. 27 Puntos y ángulos para la lectura estática de la etiqueta RFID.

## 3.4.3.3 Realización de las pruebas de lectura estática de la etiqueta de RFID

En esta prueba se corrobora el desempeño de la lectura estática de las etiquetas de RFID a diferentes ángulos con línea de vista. Para esta prueba la etiqueta se adhiere al parabrisas del vehículo y se realizan lecturas a los ángulos de -45°, 0° y 45° respecto de la perpendicular de la etiqueta a una altura de 1.2 m y a una distancia en línea de vista de 1.5 m. El procedimiento de evaluación para la etiqueta de RFID se llevó a cabo de acuerdo a lo siguiente:

- Se colocó el vehículo y se marcaron los puntos desde donde se deben realizar las lecturas, como se ilustra en la figura 3.27;
- Se midió el ángulo de inclinación del parabrisas del vehículo;
- Se colocó la calcomanía de la etiqueta de RFID en el parabrisas del vehículo;
- Se midió la temperatura y humedad relativa dentro y fuera del vehículo.

En la figura 3.28 se muestran fotografías de cómo se llevó a cabo el proceso de medición del ambiente; temperatura y humedad relativa.



Figura 3. 28 Procedimiento de evaluación de las condiciones ambientales.

La lectura de la etiqueta de RFID en la prueba estática se llevó a cabo para los ángulos de -45°, 0° y 45° con respecto al eje perpendicular de la etiqueta de RFID y se realizó con el vehículo sin ocupantes, con conductor, con conductor y copiloto. En la figura 3.29 se muestran fotografías de este proceso.



Figura 3. 29 Prueba de lectura estática de la etiqueta de RFID.

## 3.4.3.4 Resultado de las lecturas de prueba estática de la etiqueta de RFID

El vehículo que se utilizó para esta prueba es un auto compacto y el ángulo de su parabrisas es de 60° respecto a la vertical (ángulo de elevación). Se pegó al parabrisas una etiqueta de RFID comercial. Las condiciones ambientales fueron: 32.6°C con una humedad relativa de 42% dentro del vehículo y fuera 33.4° con una humedad relativa de 40%. Todas las pruebas de lectura fueron exitosas.

# 3.4.4 Respuesta del Sistema RFID para vehículos circulando a diferentes

# velocidades

La prueba de lectura dinámica consistió en corroborar que las etiquetas de RFID adheridas a parabrisas de vehículos circulando por un portal a velocidades de 30, 50 y 70 km/h pueden ser leídas. El parámetro de lectura de la etiqueta fue el TID (Identificador de etiqueta), el cual se leyó con un conjunto lector-antena de conformidad con norma ISO/IEC 18000-6C y las especificaciones de potencia del acuerdo de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) emitido en diario oficial del 13 de marzo del 2006 y recientemente la NOM-121. La antena que se utilizó fue una Yagi marca Andrew, modelo ASPJ810 que tiene una ganancia de 12 dBi, la cual se colocó en un portal con una altura de 5.5m. El lector que se utilizó es de la marca Impinj, modelo Speedway y se ajustó para una potencia de salida de 26 dBm, el cual se colocó a una distancia de 15m de la antena, El cable coaxial que une al lector y la antena es el LMR400 y presentó una atenuación de 2 dB. Haciendo el balance de potencia se obtuvo los 4 Watts o 36 dBm PIRE que específica el acuerdo a la NOM-121.

La medición del ambiente electromagnético y el ajuste del equipo de RFID para las pruebas de lectura dinámica se describieron en el los puntos 3.4.1 y 3.4.2. Por lo que en este punto solo se presentan los resultados de la prueba dinámica de la etiqueta RFID.

## 3.4.4.1 Equipo para las pruebas de lectura dinámica de la etiqueta de RFID

El equipo de RFID para las pruebas de lectura dinámica de la etiqueta de RFID constó de lo siguiente:

- Una Antena Yagi marca Andrew modelo ASPJ810.
- Un Lector de RFID marca Impinj modelo Speedway operando a 915MHz homologado con la norma ISO/IEC 18000-6C.
- Una Computadora para el control y adquisición de datos de la unidad RFID.

## 3.4.4.2 Equipo auxiliar para la prueba de lectura dinámica

Además del equipo de RFID utilizado, se requirió de equipo auxiliar para hacer el registro de la lectura dinámica, el cual consistió de lo siguiente:

• Un Portal de lectura.

- Un Radar para medir la velocidad de los vehículos.
- Un Medidor de distancia láser.
- Un Medidor de ángulo.
- Un Medidor de temperatura y humedad relativa.
- Vehículo Autobús (1)
- Vehículo (2)
- Vehículo (3)

**3.4.4.3 Procedimiento de evaluación para la prueba dinámica de la etiqueta de RFID** El procedimiento que se siguió para realizar esta prueba fue el siguiente:

1) Se registró el contenido espectral en el medio ambiente antes de encender el lector de RFID utilizando una antena dipolo entonada a 915MHz;

2) Se midió la potencia directamente en el puerto de salida del Lector de RFID;

3) Se verificó la potencia PIRE de 4 Watts en el conjunto Antena-Cable-Lector;

4) Se colocó una etiqueta de RFID en cada vehículo utilizado en esta prueba;

6) Se registraron las condiciones de operación: temperatura interna y externa del parabrisas, temperatura ambiental, condiciones de humedad y condiciones climatológicas generales;

7) Se desplazaron los vehículos por el portal ocupado únicamente por el conductor a velocidades de 30, 50 y 70 km/h;

8) Se registró la velocidad del vehículo y el número de lecturas obtenidas por el software del lector de RFID.

Nota: Criterio para la prueba.

Se definió como una lectura exitosa al proceso mediante el cual se identifica una etiqueta de RFID adherida al parabrisas de un vehículo al pasar por el portal donde se tiene colocada la antena yagi conectada al lector de RFID.

## 3.4.4.4 Desplazamiento de los vehículos por el portal

Las condiciones ambientales del sitio de prueba fueron: Soleado con nubes, la temperatura de 33.4°C y la humedad relativa de 42%.Los vehículos se desplazaron por el portal únicamente con el conductor a velocidades de 30, 50 y 70 km/h, Cada vehículo cruzó tres veces el portal por cada velocidad.

# 3.4.4.1 Vehículo Autobús (1)

Número de Tag ID: 00140023

Condiciones ambientales:

Temperatura ambiental: 33.4° Condiciones de humedad:42 %

Condiciones climatológicas generales: Soleado (X) Nublado () Lluvioso ()

# • 30 km/h

Evento	Lectura Radar	Número de lecturas
1	33	56
2	34	49
3	31	60
4	33	55
Promedio	32.75	55



# • Para 50 km/h

Evento	Lectura Radar	Número de lecturas
1	48	40
2	52	29
3	53	32
4	55	19
Promedio	52	30



Un resumen del número de lecturas respecto al evento se muestra en la gráfica 3.30 y así como también una fotografía del autobús –Vehículo (1) circulando por el portal.



Figura 3. 30 Pruebas de velocidad para el Autobús.

# 3.4.4.2 Vehículo (2)

Número de Tag ID: 00884502

Condiciones ambientales:

Temperatura ambiental: 33.4° Condiciones de humedad: 42 %

Condiciones climatológicas generales: Soleado (X) Nublado () Lluvioso ()

# 30 km/h

Evento	Lectura Radar	Número de lecturas
1	42	46
2	42	46
3	41	50
Promedio	41.66	47.33



• Para 50 km/h

Evento	Lectura Radar	Número de lecturas
1	48	33
2	55	30
3	53	32
Promedio	52	31.66



# Para 70 km/h

Evento	Lectura Radar Número de lecturas	
1	77	20
2	77	22
3	85	17
Promedio	79.66	19.66



Un resumen del número de lecturas respecto al evento se muestra en la gráfica 3.31 y así como también una fotografía del Vehículo 2 circulando por el portal.





# 3.4.4.3 Vehículo (3)

Número de Tag ID: 00140023

Condiciones ambientales:

Temperatura ambiental: 33.4° Condiciones de humedad: 42 %

Condiciones climatológicas generales: Soleado (X) Nublado () Lluvioso ()

# • 30 km/h

Evento	Lectura Radar	Número de lecturas
1	41	62
2	37	72
3	54	83
Promedio	44	72.33



Para 50 km/h

Evento	Lectura Radar	Número de lecturas
1	56	43
2	58	38
3	57	36
Promedio	57	39



• Para 70 km/h

Evento	Lectura Radar	Número de lecturas
1	72	29
2	77	25
3	79	32
Promedio	76	28.66



Un resumen del número de lecturas respecto al evento se muestra en la gráfica 3.32 y así como también una fotografía del Vehículo 3 circulando por el portal.





Las gráficas de Prueba de Velocidad con respecto al número de lecturas indican que a menor velocidad circulen los Automóviles por la cobertura de lectura del portal instalado (Aproximadamente 5 a 6 m, especificada en las gráficas de las figura 3.24) mayor número de lecturas, las cuales decrecen conforme aumenta la velocidad. Estos resultados son lógicos debido a que el tiempo en que tarda en cruzar el automóvil por la zona de cobertura de 5 m es mayor si circula con una velocidad de 30 km/h que a 70 km/h. Esta tendencia indica que a altas velocidades (mayores a 120 km/h), el sistema dejara de funcionar correctamente por lo que esta limitación se debe compensar con los parámetros que específica la norma ISO/IEC 18000-6C que a continuación se describen.

#### 3.4.4.5 Tasa de Lectura del sistema RFID de acuerdo al protocolo ISO/IEC 18000-6C

El objetivo de este análisis es obtener la configuración más adecuada de los parámetros de comunicación en un sistema RFID como lo son: TARI, Modulación, codificación, Ancho de pulso en conformidad con la norma ISO/IEC 18000-6C para obtener la tasa máxima de lecturas para la aplicación a la identificación vehicular. Dichos parámetros se pueden modificar en el Lector, siendo por lo general el parámetro TARI (tasa de transferencia) como el más flexible de modificar.El lector de RFID Impinj Speedway que se ocupó en las pruebas dinámicas opera en 6 modos, cada uno de ellos con valores de los parámetros diferentes, los cuales se especifican en la siguiente tabla:

Modo de operación	TARI	Codificación	Modulación	Ancho de Pulso	Condiciones
1Maximum Throughput (Máximo Rendimiento)	7.14 μs	PIE (Codificación por intervalo de pulso)	PR-ASK/FMO	0.5TARI	Se presenta la Máxima tasa de lectura. Hay una población baja de etiquetas RFID. Probabilidad de interferencia baja.
2Hybrid (Hibrido )	12.5 μs	PIE (Codificación por intervalo de pulso)	PR-ASK/FM0	0.5TARI	Se presenta una Tasa de lectura rápida. Se presenta una baja probabilidad de interferencia. Baja probabilidad de interferencia de co- canal, canal adyacente o canal alterno.
3Dense reader M=4 (Ambiente denso)	25 μs	PIE (Codificación por intervalo de pulso)	PR-AS/M=4	0.5TARI	Se presenta una Tasa de lectura intermedia La población de etiquetas es grande. La probabilidad de interferencia es alta.
4 Mode outset (Modo inico)					
5Dense reader M=8 (Ambiente Denso)	25 μs	PIE (Codificación por intervalo de pulso)	PR-ASK/M=8	0.5TARI	Se presenta la mitad de Tasa de lectura del anterior modo. Ambientes extremos de interferencia donde las etiquetas están fijas o se mueven lentamente.
6Maximum Throughput Max Miller (Redimiento Max Miller)	7.14 μs	PIE (Codificación por intervalo de pulso)	PR-ASK/M=4	0.5TARI	Una gran población de etiquetas en el área de cobertura. Hay una población baja de etiquetas. La probabilidad de interferencia es baja

#### Tabla 3. 2 Parámetros de la Interfaz aérea del lector Impinj en conformidad con la norma ISO/IEC 18000-6C.

# 3.4.4.6 Tasa de Lectura de la Etiqueta de RFID para los diferentes modos de operación del Lector de RFID Impinj Speedway

En el anterior punto se comentó que el lector impinj speedway cuenta con 6 modos de operación con diferentes parámetros de interfaz aérea como el TARI, Modulación, codificación y ancho de pulso los cuales se especifican en la tabla 3.2 para cada modo. Dados estos datos, se realizó una prueba de lectura de la etiqueta de RFID en forma estática en laboratorio en los diferentes modos de operación del lector RFID impinj con el propósito de obtener en qué modo se obtenía la mejor respuesta de lectura, las condiciones en que se realizó dicha prueba fueron las siguientes: La etiqueta de RFID se colocó a una distancia de separación de 2 m del lector, con el software del lector se seleccionó el modo de operación y cada uno de sus parámetros de interfaz área de acuerdo a la tabla 3.2, el tiempo de lectura de la etiqueta de RFID fue de 1 minuto para cada modo de operación. Por último se normalizaron las tasas de lecturas entre el tiempo estimado en que el automóvil recorre la zona de cobertura en un ambiente real de identificación vehicular, tal resultado se reportó en la gráfica de la figura 3.24 donde se observa que se tiene una zona de cobertura de 5 m. El cálculo del tiempo en que recorre un automóvil a una velocidad de 30 km/h la zona de cobertura se realiza de la siguiente manera:

Tiempo de Cruce en la zona de cobertura = 
$$\frac{5 m}{8.33 m/s} = 0.6 s$$

Este cálculo se realizó para las velocidades de 30, 40,50,70,80,100,120 y140 km/h de las cuales se han tomado lectura de la etiqueta RFID en un escenario real de identificación vehicular. En la siguiente grafica se muestra la interdependencia de los valores promedio del número de lecturas, tiempo de cruce en la zona de cobertura y modos de operación del lector Impinj.



Figura 3. 33 Respuesta en 3D del Número de lecturas, tiempos promedio y modos de operación.

De la gráfica 3.33 se observa que la mejor respuesta de lectura de la etiqueta se obtiene con el modo **"Máximum Throughput"**, modo en el que se realizaron todas las pruebas dinámicas de lectura de este trabajo de tesis. Otras de sus ventajas de este modo, es que presenta baja

probabilidad de interferencia cuando otros lectores RFID operan en lugares adyacentes. Los otros modos de operación son para aplicaciones con condiciones diferentes por ejemplo el modo **Dense Reader** es para identificar grandes cantidades de etiquetas (almacenes) y el modo hybrid es una combinación de Máximum Throughput y Dense Reader por lo que nos da una respuesta promedio de estos dos modos.

Cabe señalar que las pruebas de lectura dinámica del punto 3.4.4 fueron realizadas en modo "Máximum Throughput", los parámetros de comunicación están de acuerdo a la tabla 3.2. Con esta configuración del Lector Impinj speedway y siguiendo el mismo protocolo del punto 3.4 se realizaron pruebas de lectura de la etiqueta RFID para vehículos circulando a velocidades de 30, 40, 50, 70, 80, 100, 120, 140 km/h. La prueba se realizó 10 veces para cada velocidad. Los resultados promedio de Lecturas con respecto a las diferentes velocidades se muestran en la siguiente gráfica:



Figura 3. 34 Respuesta de Número de Lecturas promedio vs velocidad de los automóviles.

La respuesta de la gráfica de la figura 3.34, indica que a velocidades bajas se tienen el mayor número de lecturas, a velocidades medias se tiene una buena repuesta también sobre todo en el intervalo de 50 – 70 km/h (tales velocidades son las promedio en carreteras en México) por lo que se puede decir que la tecnología RFID es la adecuada en este tipo de aplicación, sin embrago también se observa que a velocidades mayores de 70 km/h las lecturas decaen en forma exponencial. Por ejemplo para una velocidad de 90 km/h o mayor, las lecturas de la etiqueta se encuentran en límite propuesto de 10 lecturas, lo cual no es conveniente para la aplicación de identificación vehicular que se persigue.

Una forma más completa de visualizar esta respuesta es haciendo un análisis tridimensional, el cual corresponde a una interdependencia del Número promedio de Lecturas, Velocidad a la que circulan los automóviles y los diferentes modos de operación del lector Impinj speedway. Nuevamente en la figura 3.35 se muestra el resultado de este análisis.



Figura 3. 35 Análisis tridimensional entre Número de lecturas, velocidades y modos de operación del lector de RFID impinj speedway.

Nota: Los números del 1-6 del eje de modos de operación de la gráfica de la figura 3.34 corresponde a lo siguiente:

1 Max Throughput,2 Max Throughput Miller,3 Hybrid ,4 Mode outset ,5 Dense Reader M=4 y 6 Dense Reader M=8.

De la gráfica de la figura 3.33, se corrobora que para velocidades bajas el vehículo tarda más tiempo en pasar sobre la zona de cobertura por lo tanto se tienen mayor número de lecturas , por el contrario cuando el tiempo de cruce para velocidades grandes es menor, la lectura de la etiqueta decrece exponencialmente. Esta respuesta está directamente asociada con la TARI (Intervalo de tiempo de referencia de los símbolos o bits "0" y "1") de cada modo de operación de acuerdo a la siguiente relación:

$$N.Lecturas = \frac{Tiempo \ de \ Cruce \ en \ la \ zona \ de \ cobertura}{2.5 \ * \ TARI \ * \ 96}$$

Donde Un paquete es el Conjunto de los símbolos "0" y "1" de duración 2.5TARI como lo específica la norma ISO/IEC 18000-6C y 96 es la longitud en bits del TID de una etiqueta normalmente.

Si el Automóvil cruza por la zona de cobertura de 5m a una velocidad constante de 30 km/h con una TARI de 7.14  $\mu$ s y codificación PIE para el modo Máximum Throughput se tiene:

$$N.Lecturas = \frac{0.6s}{96 * 2.5 * 7.14\mu s} = 350.14$$

Ahora bien el mismo calculo, con velocidad de 30 km/h, pero para un TARI diferente como el especificado para el Dense Reader M=4 de 25  $\mu$ s.

$$N.Lecturas = \frac{0.6s}{96 * 2.5 * 25\mu s} = 100$$

De los anteriores resultados se puede decir que un menor tiempo de TARI con respecto al tiempo de cruce en cobertura de lectura del móvil, se obtendrá un mayor número de bits y esto se refleja en una mayor tasa de lectura como lo muestran las gráficas de las figuras 3.34 y 3.35 y viceversa. Los resultados completos para todos los modos de operación de la Impinj se reportan en la siguiente tabla 3.3:

Max Throughput	Hybrid	Dense Reader			Max Throughput	Hybrid	Dense Reader
TARI (μs)	TARI	TARI (μs)	Velocidad	T. de Cohortura	N.	N.	N. Lecturas
	(μs)			(s)	Lecturas	Lecturas	
7.14	12.5	25	30km/h	0.6	350.14	200	100
7.14	12.5	25	40km/h	0.45	262.61	150	75
7.14	12.5	25	50km/h	0.36	210.08	120	60
7.14	12.5	25	70km/h	0.257	150.06	85.71	42.86
7.14	12.5	25	80km/h	0.225	131.30	75.00	37.50
7.14	12.5	25	100km/h	0.18	105.04	60	30
7.14	12.5	25	120km/h	0.15	87.54	50	25.00
7.14	12.5	25	140km/h	0.129	75.03	42.86	21.43

Tabla 3. 3 N. de bits – Lecturas para los modos de Operación del lector Impinj speedway.

De acuerdo a los resultados de la tabla 3.3 y de las gráficas 3.34 y 3.35 para la Aplicación que se persigue en este trabajo de tesis "La Identificación vehicular mediante RFID" se recomienda trabajar con el modo de operación del lector "Máximum Throughput" que es el modo que presenta la mejor respuesta de lectura de la etiqueta de RIFD con respecto a los otros modos de operación. Por ejemplo el modo Máximum Throughput muestra una tasa promedio de 15 lecturas incluso a velocidades mayores a 100 km/h, lo cual se puede corroborar en los resultados de la gráfica 3.34 y 3.35. Dichos resultados se pueden mejorar ya que se observa que están directamente relacionados con los parámetros de interfaz área normados por la ISO/IEC 18000-6C para los sistemas RFID, lo que nos lleva a que en algún momento dado se tenga que desarrollar un nuevo protocolo de interfaz área como trabajo futuro.

# **CAPÍTULO 4**

# INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS SISTEMAS DE RFID EN LA BANDA UHF

En un escenario de identificación vehicular como el presentado en la figura 3.11 del capítulo anterior, se pueden tener uno o varios sistemas de RFID operando simultáneamente, uno cerca del otro, ocasionando que las zonas de cobertura de lectura se traslapen, lo que generalmente podría causar serios problemas de interferencias electromagnéticas.

Los 3 tipos de interferencia más comunes que pueden presentarse en la tecnología RFID son:

1.- Interferencia Etiqueta-Etiqueta.

Este tipo de interferencia ocurre cuando múltiples etiquetas son energizadas simultáneamente por el lector y estas reflejan sus respectivas señales de retrodispersión. Debido a la mezcla de las señales de retrodispersión de las etiquetas, el lector no puede identificar cual es el número único de cada etiqueta (TID). Para evitar este tipo de problemas los mecanismos de anticolisión implementados son: ALOHA y Árbol Binario [1].

2.-Interferencia de Múltiples Lectores – Etiqueta.

Esto ocurre cuando una etiqueta está localizada en la intersección del intervalo de lectura de varios lectores de RFID, por lo que los lectores intentan comunicarse con la etiqueta simultáneamente. Esto puede causar que la etiqueta no sea detectada.

3.- Interferencia Lector – Lector.

Se presenta cuando dos o más lectores operan cercanamente, lo que origina que sus respectivas zonas de cobertura de lectura se traslapen. Esto produce una reducción del nivel de potencia de los lectores, el efecto se refleja en una pobre lectura de la etiqueta (cuentas mínimas) sin llegar a que los campos se nulifiquen [28].

El problema de interferencia más común es de lector-lector, por lo que muchas propuestas para reducirla se han reportado, los cuales se basan en los mecanismos de Acceso Múltiple utilizados en los sistemas comunicaciones tales como: Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), y Acceso múltiple por portadora (CSMA) [28, 29,30].

En este capítulo se analizan las interferencias electromagnéticas Lector - Lector (EMI) en un sistema RFID con tecnología pasiva para la banda UHF en un escenario de identificación vehicular desde el punto de vista de compatibilidad electromagnética, la cual está definida como: La degradación del desempeño de un dispositivo, equipo o sistema electrónico causada por una señal de RF externa de RF [42]. Este proceso de EMI se ilustra en la figura 4.1.



Figura 4. 1 Proceso de Interferencia Electromagnética (EMI)

Si el nivel de potencia de la fuente de señal de RF es tal que bloquee la señal útil del lector de RFID víctima se conoce como fuente interferente.

# 4.1 Interferencia Lector – Lector

En base al modelo propuesto por D.-Y. Kim and J.-G. Yook [30], se presenta el análisis de interferencia lector-lector, modificándolo para condiciones de dos rayos, lo que permite tener una mayor predicción de las interferencias. Este tipo de interferencia ocurre cuando un lector transmite una señal de RF de interrogación que interfiere con la señal del enlace de bajada de una etiqueta de otro sistema de lectura. Por ejemplo cuando hay un lector víctima y un lector interferente como lo muestra la figura 4.2. La señal de retrodispersión que alcanza al lector víctima de una etiqueta puede ser distorsionada por señales del lector interferente. De este modo, la interferencia Lector – Lector resulta en una reducción de la relación señal – interferencia (SIR) en el lector víctima, lo cual se refleja en la reducción del intervalo de interrogación o de lectura.



Figura 4. 2 Interferencia Lector – Lector en un sistema RFID en la banda de UHF.

Este fenómeno puede ser modelado matemáticamente. Para un lector víctima, la potencia de retrodispersión que incide sobre él está dada:

$$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{s}(\boldsymbol{x})} = \left\{ \eta_{etiqueta} P_{transmitida-lector} G_{etiqueta} \right\}$$
$$* \left\{ G_{lector} \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{1}{r_1} e^{-j\beta r_1} + \Gamma(\alpha)\rho(\alpha) \frac{1}{r_2} e^{-j\beta r_2} \right|^2 \right\}^2$$
(4.1)

La ecuación (4.1) es el modelo de dos rayos para el enlace de bajada cuyos parámetros han sido especificados en el capítulo 3.

Entonces, el nivel de potencia de un lector interferente está dado por:

$$I_{(d)} = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left|\frac{1}{r_1} e^{-j\beta r_1} + \Gamma(\alpha)\rho(\alpha)\frac{1}{r_2} e^{-j\beta r_2}\right|^2$$
(4.2)

La ecuación (4.2) es el modelo de dos rayos para el enlace de subida cuyos parámetros han sido especificados en el capítulo 3. Finalmente la Relación Señal-interferencia está dada por [30]:

$$SIR(x) = \frac{P_{s(x)}}{N + I(d)}$$
(4.3)

Donde N es la potencia de ruido que para los sistemas RFID corresponde a la sensibilidad del Lector.

Y Para el cálculo de la Relación del intervalo de reducción de lectura [30]:

$$IRRR = \frac{R_{max} - R_{lectura}}{R_{max}} \times 100\%$$
(4.4)

# **4.2** Función de distribución de la distancia promedio en un Sistema RFID con interferentes

Otro problema de análisis asociado con la interferencia lector – lector en los sistemas RFID es como el que se muestra en la figura 4.3, donde se observa que el sistema de RFID víctima tiene una zona radial de cobertura de lectura ( $d_{lector}$ ), sí se considera también una zona radial mayor ( $d_{max}$ ), se puede definir un área con limites  $d_{lector} \le d \le d_{max}$  donde se ubiquen más sistemas de RFID distribuidos uniformemente los cuales pueden interferir al sistema de RFID víctima. Las distancias "d" entre el sistema de RFID víctima y las fuentes interferentes se consideran aleatorias debido a que su localización se determina en base a una distancia promedio mediante una función de densidad de probabilidad (fdp).



Figura 4. 3 Esquema de Zona de sistemas RFID interferentes.

Como se observa en la figura 4.3 cada sistema interferente tiene una distancia  $d + \Delta d$  respecto al centro, los cuales emitirán una potencia radiada ( $P_0$ ) hacia el sistema RFID víctima en el cual incidirá un nivel de potencia ( $P_1$ ) reduciendo su intervalo de lectura y/o que opere de forma inadecuada. Estos dos niveles de potencia se pueden cuantificar con el modelo de pérdidas por trayectoria ( $d^{-n}$ ). La pérdida normalizada de potencia PL a una frecuencia dada está definida por:

$$PL = d^{-n} \tag{4.5}$$

Donde "d" está en el intervalo  $d_{lector} \leq d \leq d_{max}$  , "n" es el coeficiente de propagación y

corresponde a una constante empírica cuyos valores dependen del medio: para el espacio libre n = 2, para terrenos relativamente irregulares n = 3, y para terrenos con alta conductividad n = 4.

Para el caso específico de los sistemas RFID con tecnología pasiva, la potencia de la señal emitida por el sistema interferente  $(x_i)$  es  $P_{oi}$  y la señal de potencia que se recibe en el sistema víctima es  $P_{Ii}$  a partir de la relación de potencias y generalizando de acuerdo con la ecuación (4.5) se tiene que:

$$\frac{P_I}{P_o} = d^{-n} \tag{4.6}$$

Para obtener la distancia normalizada en función de las potencias, se aplican leyes de logaritmos a la ecuación (4.6) y se tiene:

$$10 \log d^n = 10 \log \left(\frac{P_o}{P_I}\right)$$

Si se define  $\beta = \frac{1}{n}$ , la distancia puede determinarse como:

$$d = \left(\frac{P_o}{P_I}\right)^{\beta} \tag{4.7}$$

La probabilidad de que la señal  $P_{oi}$ , generada por un sistema interferente  $(x_i)$  en la zona de cobertura sea recibida  $(P_I)$  en el sistema víctima, se describe por medio de la función de densidad w(d), que se determina con el siguiente planteamiento.

De acuerdo a las regiones de la figura 4.2, la probabilidad de que "d" sea la distancia en la cual se encuentra los sistemas interferentes respecto al punto central (sistema víctima), dentro del intervalo ( $d + \Delta d$ ) de la zona de cobertura, se obtiene por:

$$w(d) = \lim_{\Delta d \to 0} \left(\frac{1}{\Delta d}\right) \frac{d_{\Delta d}}{d_T}$$
(4.8)

Donde  $d_{\Delta d}$  es la distancia que se tiene en el intervalo  $[d_{lector}, d + \Delta d]$  en toda la región de cobertura, la distancia total es  $d_T = d_{max} - d_{lector}$ .

Considerando la geometría del espacio prefijado de la figura 4.3, se tiene:

Para el área A<sub>1</sub>, círculo de radio  $d_{lector}$ :  $A_1 = \pi d_{lector}^{\rho}$ 

Para el área A<sub>2</sub>, círculo de radio  $d_{max}$ :  $A_2 = \pi d_{max}^{\rho}$ 

Para el área A<sub>3</sub>, zona de cobertura:  $A_3 = \pi d_T^{
ho} = \pi (d_{max}{}^{
ho} - d_{lectura}{}^{
ho})$ 

Para el área A<sub>4</sub>, zona de cobertura:  $A_4 = \pi d^{\rho}_{\Delta d} = \pi [(d + \Delta d)^{\rho} - d_{lectura}^{\ \rho}]$ 

Donde  $\rho$  es el coeficiente del medio de propagación y toma los siguientes valores:

 $\rho = \begin{cases} 1 \ para \ un \ análisis \ de \ sistemas \ interferentes \ en \ un \ eje \ (línea \ de \ vista) \\ 2 \ para \ un \ análisis \ de \ sistemas \ interferentes \ en \ un \ plano \ (superficie) \\ 3 \ para \ un \ análisis \ de \ sistemas \ interferentes \ en \ un \ esfera \ (volumen) \end{cases}$ 

Para cualquier punto en la región seleccionada ( $\Delta d$ ), y haciendo uso del binomio de Newton, considerando los dos primeros términos, la región que se analiza se puede determinar por:

$$A_4 = \pi d_{\Delta d}^{\rho} = \pi [(d + \Delta d)^{\rho} - d_{lectura}^{\rho}] = \pi [d_{max}^{\rho} - \rho d_{max}^{\rho-1} \Delta d - \Delta d d_{max}^{\rho}]$$

Entonces, la fdp de la distancia promedio entre el sistema RFID víctima y las fuentes interferentes se determina por:

$$w(d) = \lim_{\Delta d \to 0} \left( \frac{1}{\Delta d} \right) \left( \frac{\Delta d(\rho d^{\rho-1})}{d_{max}^{\rho} - d_{lectura}^{\rho}} \right)$$
(4.9)

En el límite, finalmente se tiene la fdp de la distancia promedio y se expresa como:

$$w(d) = \frac{\rho d^{\rho-1}}{d_{max}^{\rho} - d_{lectura}^{\rho}}$$
(4.10)

La respuesta de la fdp de la distancia promedio w(d) para distancias normalizadas (d)con diferentes constantes de propagación  $(\rho)$  se muestra en la figura 4.4.



Figura 4. 4 Función de densidad de probabilidad para distancias normalizadas.

De los resultados de la gráfica de la figura 4.4 podemos observar que conforme la distancia (*d*), promedio aumenta, su fdp disminuye en forma exponencial, es decir mientras  $d_{lectura}$  se aleja de  $d_m$ ; *d* también aumenta por lo tanto la densidad de los sistemas interferentes disminuye en el área de interés como lo muestra el denominador de la ecuación (4.10).Donde vemos que el cambio más significativo de la fdp es cuando se hace un análisis de sistemas interferentes para  $\rho = 3$ .

Ahora bien, para obtener la Función de distribución de probabilidad que corresponde a la distancia promedio donde se encuentran las fuentes interferentes, se tiene que integrar la ecuación (4.10) de la siguiente manera:

$$\langle d \rangle = \int_{d_{lectura}}^{d_{max}} d * w(d) dR$$

Finalmente se tiene la Función de distribución de probabilidad de la distancia promedio donde se encuentran las fuentes interferentes queda como:

$$\langle d \rangle = \frac{\rho}{\rho+1} \left[ \frac{d_{max}^{\rho+1} - d_{lectura}^{\rho+1}}{d_{max}^{\rho} - d_{lectura}^{\rho}} \right]$$
(4.11)

La expresión 4.11 permite calcular la Relación del intervalo de reducción de lectura para fuentes interferentes colocadas aleatoriamente en la zona de cobertura del lector víctima.

Ahora, si se considera que las señales multitrayectorias son una secuencia de señales con diferente recorrido debido a obstáculos, todas ellas independientes y uniformemente distribuidas, estas pueden ser representadas por medio de conjuntos estadísticos:

$$P_{I} = \sum_{i=1}^{N} P_{i}$$

$$\sigma^{2} = \sum_{i=1}^{N} \sigma_{i}^{2}$$

$$(4.12)$$

Donde N es el número de señales y de acuerdo con el modelo estadístico de pérdidas por trayectoria dado por la ecuación (4.6) y (4.10), la función de densidad de la potencia promedio en el receptor víctima es:

$$w_{o}(P_{I}) = \frac{\rho\beta\left(\frac{P_{O}}{P_{I}}\right)^{\rho\beta}}{\left(d_{max}^{\rho} - d_{lectura}^{\rho}\right)P_{I}}$$
(4.14)

La expresión anterior permite conocer la probabilidad de que a partir de una señal emitida ( $P_o$ ), por un sistema interferente localizado en el área de cobertura limitado por  $d_{lector} \leq Area \leq d_{max}$ , interfiera en el receptor victima con un nivel de potencia ( $P_I$ ) de acuerdo al esquema de la

figura 4.3. La expresión (4.14) se determina a partir de la distancia promedio de los sistemas interferentes y el sistema víctima y para su aplicación se requieren las características geométricas de la zona cobertura ( $d_{lectura}, d_m$ ), el coeficiente del medio de propagación en el espacio libre  $\left(\beta = \frac{1}{n}\right)$  y el coeficiente del medio de propagación de acuerdo a la localización del sistema interferente ( $\rho$ ). El parámetro ( $P_I$ ) corresponde al nivel de potencia que incide hacia el sistema de RFID víctima; ( $P_o$ ) corresponde al nivel de potencia emitida por un sistema interferente. Para la aplicación del modelo se grafica la función de densidad (4.14) para los valores  $\beta = 0.5$  y de  $\rho = 2$ , los cuales corresponden al espacio libre y un análisis en un plano. La respuesta gráfica se muestra en la figura 4.4.



Figura 4. 5 Función de densidad de probabilidad o distancia promedio.

De la gráfica de la figura 4.5 podemos observar que la función de la densidad de probabilidad de que la señal  $(P_o)$  emitida por un sistema interferente incida en el sistema de RFID víctima, esta relación se determina de acuerdo a una distancia promedio la cual indica que a medida que "d" aumenta la respuesta disminuye de forma exponencial. Para obtener la probabilidad en función de la señal  $(P_I)$  producida por un sistema interferente al sistema de RFID víctima, y quitar la dependencia de la distancia promedio, se debe obtener el área bajo la curva de la función de densidad de probabilidad de  $w_0(P_I)$ , reportada en la gráfica de la figura 4.5. Por lo tanto la ecuación (4.14) debe de integrarse como sigue:

$$W_o(P_I) = \int w_o(P_I) dP_I = 1$$

Finalmente toma la forma de:

$$W_o(P_I) = \frac{\rho\beta(d)^{\rho\beta}}{\left(d_{max}^{\rho} - d_{lectura}^{\rho}\right)} * \ln(P_I) = 1$$

(4.15)

Para la aplicación de la ecuación (4.15), los parámetros requeridos son: la distancia promedio de d = 8.16m determinada por los limites  $d_{lector} = 6m \ y \ d_{max} = 10m$ , el coeficiente del medio de propagación en el espacio libre de  $\beta = 0.5$  y el coeficiente de del medio de propagación de acuerdo a la localización del sistema interferente de  $\rho = 2$ . El parámetro ( $P_I$ ) corresponde al nivel de potencia que incide hacia el sistema de RFID, que para este sistema el máximo que puede incidir son 4 watts o 36 dBm PIRE, potencia que emiten los sistemas RFID pasivos en la banda UHF. Una gráfica del modelo de la ecuación (4.15), con los parámetros antes dichos se muestra a continuación:



Figura 4. 6 Función de densidad de probabilidad de distancia promedio.

De la gráfica de la figura 4.6, se observa la dependencia de la probabilidad con respecto a un nivel de potencia PIRE que interfiere a un sistema de RFID víctima, es decir a medida que el lector de RFID interferente esté más cerca en distancia al sistema de RFID víctima este incidirá más potencia, lo cual ocasiona que se tenga mayor probabilidad de interferencia.

# 4.3 Análisis de las Interferencias en escenarios reales de identificación vehicular

## 4.3.1 Instalación y calibración del portal

Para la corroboración de la funcionalidad de la etiqueta RFID que se adhiere a los vehículos, en el proceso de identificación vehicular con tecnología RFID pasiva, se instaló un portal con altura de 5.5 m. En dicho portal se instaló el sistema de lectura de tecnología RFID, el cual consiste de una antena que se conecta al lector a través de un cable coaxial de bajas pérdidas (esta configuración se reporta a detalle en el capítulo 3).

El equipo que se utilizó fue:

- Antena tipo Yagi marca PC-904, con ganancia de 5dBi;
- Cables coaxial LMR400 con conectores N de bajas pérdidas;
- Lector marca Impinj modelo Speedway;



Fotografías de la instalación del portal se muestran en la figura 4.7.

Figura 4. 7 Instalación del portal del sistema RFID.

La tecnología de RFID que se utiliza en esta aplicación de identificación vehicular se encuentra en la banda de frecuencia UHF, y de acuerdo a la NOM-121, para los sistemas de radio que no requieren licencia y que operan en la banda de frecuencia de 902MHZ a 928MHz la Potencia Isotrópica Radiada (PIRE) debe ser de 4 Watts o 36 dBm. Esta normativa debe de cumplirse por los sistemas de RFID instalados en cualquier parte del país.

El equipo del portal se ajustó a la normativa de la SCT y la NOM-121, fijando la antena en el centro del portal que tiene una altura de 5.5 m y un ancho de 4 m. La antena se colocó a un ángulo de 15° para tener una cobertura de aproximadamente 4x5 m en el plano horizontal, tomado como referencia el centro del portal. Fotografías del proceso de ajuste de potencia y calibración del sistema de RFID se muestran en la figura 4.8.





Figura 4. 8 Calibración de sistema de RFID del portal.

En el portal prueba se midió la potencia radioeléctrica emitida por el sistema de RFID en diferentes puntos para determinar su cobertura, también se comprobó la lectura de etiquetas de RFID.

Antes de empezar la prueba se midió el ambiente radioeléctrico para verificar que no existieran señales interferentes en la banda de frecuencia en la cual opera el sistema de RFID que se utiliza. Los equipos que se ocuparon para esta medición fueron:

- Dos analizadores de espectros marca R&S modelo FSH6, con accesorios para medir potencia y pérdida de cables
- Dos antenas HyperLOG
- Una antena dipolo EMCO
- Un medidor de campo eléctrico

El esquema de medición que se utilizó para la determinación de la cobertura de lectura y de interferencias es el que se ilustra en la figura 4.9.



Figura 4. 9 Esquema para la medición de la señal radioeléctrica.

La cobertura de lecturas de la etiqueta se muestra en la figura 4.10.





Como la determinación de cobertura se realizó para el número de lecturas y no para la señal de radiofrecuencia, fue necesario medir la potencia radioeléctrica en algunos puntos de la cobertura para tener referencia de los niveles que emite la antena lectora colocada en el portal. Dichas mediciones son reportadas en la tabla 4.1.

Medición de Potencia en el Portal						
0m	0m 0m 0m					
Х	Х	Х				
5m	5m	5m				
-10.47 dBm	-7.99 dBm	-11.69 dBm				
10m	10m	10m				
-13.89 dBm	-16.17 dBm	-15.94 dBm				

Tabla 4. 1 Mediciór	de potencia	radioeléctrica	en el portal.
---------------------	-------------	----------------	---------------

Los anteriores datos fueron obtenidos en conformidad a la norma NOM-121 que nos indica que el sistema de RFID que opera en la banda de UHF debe emitir un máximo de 36 dBm, el portal también fue colocado a una altura de 5.5 m de altura con un ancho de 4 m a manera de simular la altura de los puentes vehiculares y peatonales y los 4 m de ancho son los requeridos para un carril de carretera. Se determinó que a 5m en el centro se debe tomar una lectura de potencia de aproximadamente -8 dBm, que va de acuerdo a lo establecido de una potencia de -10 dBm ±1dB. La gráfica de la figura 4.10 nos sirve para corroborar que el sistema lee adecuadamente las etiquetas de RFID y además nos proporciona el área de cobertura de detección, es decir nos indica que el número de lecturas es mayor en el costado izquierdo en comparación al lado derecho en un área de 16 m<sup>2</sup>.

## 4.3.2 Introducción de un sistema RFID interferente

Esta prueba se realizó con el objetivo de obtener el comportamiento del sistema RFID con la introducción de sistemas interferentes RFID en diferentes posiciones dentro de la cobertura del sistema de RFID bajo prueba (EMI Lector - Lector). El equipo que se utilizó como fuente interferente fue un lector Alien modelo 9900 con una antena de parche con polarización circular. El área que se seleccionó para la colocación de fuentes interferentes fue de 4X4 m y para cada posición de la señal interferente se midió la cobertura de lectura para verificar los efectos de las interferencias (EMI), obteniendo la nueva cobertura.

Para las pruebas de interferencia se propusieron 3 configuraciones las cuales se describen a continuación.

# 4.3.2.1 Configuración 1.- Sistema RFID con interferente

La configuración 1 utilizada para esta prueba de interferencia se muestra en la figura 4.11. En este caso la antena de la fuente interferente en una de las esquinas del área seleccionada.





Se introdujo un sistema RFID Alien modelo 9900 con una antena tipo parche con polarización circular adicional en la esquina derecha como lo muestra la figura anterior, con el propósito de observar su influencia en el sistema original reportado en el punto anterior. La influencia del sistema RFID interferente se observa mediante una nueva medición de la cobertura de lectura de la etiqueta en diferentes puntos marcados en el asfalto, estos puntos tienen una separación de 0.5 m entre ellos en forma de cuadrados.

Una vez marcados los puntos en el asfalto, se ponen en marcha los 2 sistemas RFID durante 15 segundos, la etiqueta de RFID se pone en un punto marcado y con la ayuda del software del lector RFID del portal se toman las lecturas. Este procedimiento se repite para todos los puntos marcados. La gráfica de la figura 4.12 muestra los resultados obtenidos.



Figura 4. 12 Cobertura de número de lecturas de la etiqueta de RFID con interferente para la configuración 1.

De acuerdo a la gráfica obtenida, un sistema de RFID interferente colocado como se especifica en la figura 4.11, modifica la cobertura original generando nulos en el centro de la cobertura y corriendo la zona de cobertura hacia el lado izquierdo de la antena del equipo bajo prueba. Se puede observar que en la parte derecha del portal donde se colocó el sistema interferente disminuyeron considerablemente las lecturas en relación con los resultados de la gráfica 4.10 e incluso se forma un área donde se anulan las lecturas, lo que indica que los niveles de potencia de la fuente interferente son mayores a la de la señal útil del sistema bajo prueba.

## 4.3.2.2 Configuración 2.- Sistema RFID con interferente

La configuración 2 utilizada para esta prueba de interferencia se muestra en la figura 4.13. En este caso la antena de la fuente interferente se colocó en la parte lateral derecha del área seleccionada.



Figura 4. 13 Configuración 2 Sistema RFID con interferente.



La cobertura que se obtuvo con esta configuración es la que se muestra en la figura 4.14.

En la gráfica anterior se puede ver que la influencia negativa del sistema RFID interferente con el víctima disminuye si este se coloca y radia en forma perpendicular. Se observa que influye también de forma negativa y se refleja en una disminución de lecturas en comparación a nuestra grafica de referencia (4.10), formando un área de anulación más pequeña que en el caso de la gráfica 4.12. Este resultado es lógico debido a que la antena del sistema RFID victima tiene una polarización lineal perpendicular al plano reflector y la antena del sistema interferente tiene polarización circular, por lo tanto no introduce ruido en el lector víctima.

## 4.3.2.3 Configuración 3.- Sistema RFID con interferente

La configuración 3 utilizada para esta prueba de interferencia se muestra en la figura 4.15. En este caso la antena de la fuente interferente se colocó en la parte central en la misma dirección que la antena de la fuente bajo prueba.

Figura 4. 14 Cobertura de número de lecturas de la etiqueta de RFID con interferente para la configuración 2.



Figura 4. 15 Configuración 3 Sistema RFID con interferente.



La cobertura que se obtuvo con esta configuración es la que se muestra en la figura 4.16.

Figura 4. 16 Cobertura de número de lecturas de la etiqueta RFID con interferente para la configuración 3.

Como se puede observar en la figura 4.16 el efecto de la interferencia se manifiesta en la dirección del patrón de radiación de la antena interferente, que es donde se tiene el menor número de lecturas.

Como conclusión general de esta parte experimental respecto a las fuentes interferentes se especifica lo siguiente:

1.- En la zona donde se colocó el portal del equipo de RFID bajo prueba se tenía una barda de piedra en el lado derecho, lo cual generaba reflexiones lo cual se manifiesta en la cobertura que se muestra en la figura 4.10 donde el mínimo de lecturas se tiene en el lado donde se encontraba la barda (derecho). En el lado izquierdo del portal estaba el espacio libre y en esa zona se tiene el máximo número de lecturas.
2.-Las fuentes interferentes que se colocaron en las configuraciones propuestas afectan la señal útil en la zona donde la antena interferente apunta, de acuerdo a esto es importante, comprobar las zonas de cobertura de los sistemas de RFID cuando estos se instalen cerca uno del otro y operen de forma simultánea.

3.- La parte experimental que se llevó a cabo en este trabajo fue para analizar el desempeño de la tecnología de RFID con otros sistemas de identificación y los datos que se obtuvieron se analizaron después de las mediciones, por lo que se considera que no fue el mejor escenario para analizar las interferencias, ya que solo se obtiene información cualitativa. La repetición de un escenario experimental para este tipo de pruebas tiene un alto costo por la infraestructura requerida, por lo que no fue posible realizar otras mediciones.

Para tener una mayor interpretación de las interferencias se recurre a los modelos analíticos presentados al inicio de este capítulo, tomando como datos los niveles de potencia que se obtuvieron en el desarrollo experimental descrito.

#### 4.4 Análisis de las interferencias

Los efectos de las interferencias de acuerdo a la parte experimental realizada se pueden observar en las gráficas de cobertura (figuras 4.10, 4.12, 4.14 y 4.16). Con los datos de esas gráficas y las expresiones que se presentan al inicio de este capítulo se puede llevar a cabo un análisis de las interferencias con más detalle práctico.

#### 4.4.1 Relación Señal-Interferencia

Para el caso específico de los sistemas de RFID con tecnología pasiva que operan en la banda de frecuencias UHF, la interferencia Lector – Lector puede ser evaluada por la relación Señal – Interferencia dada por la ecuación (4.3):

$$SIR(x) = 10 * log\left(\frac{P_{s(x)}}{N+I(i)}\right)$$
(4.3)

Dónde:  $P_{s(x)}$  esta dada por la ecuación (4.1) y es el nivel de potencia de respuesta de la etiqueta de RFID hacia el lector e I(i) esta dada por la ecuación (4.2), que es el nivel de la fuente interferente y N es el ruido del lector, el cual corresponde a su sensibilidad.

De resultados de las gráficas de las figuras 4.10, 4.12, 4.14 y 4.16, para una sensibilidad del lector de RFID de N= -75 dBm y para x= 2 m, que es la distancia de la etiqueta con respecto al lector víctima y con un lector interferente colocado a 6 m, lo cual corresponde a la primera configuración experimental (figura 4.11) se tiene:

$$SIR(x) = 10 * log\left(\frac{2.22x10^{-8}W}{2.66x10^{-12}W}\right) = 39.21$$
dB

El valor de SIR(x) de 39.21 dB es aceptable, ya que nos indica que la señal útil es mucho mayor que el nivel de interferencia. Para asegurar que los efectos de las fuentes interferentes son mínimas la SIR(x) debe ser menor de 3dB.

#### 4.4.2 Relación de intervalo de reducción de lectura

La Relación del intervalo de reducción de lectura para el sistema de RFID víctima está dada por la ecuación (4.4), esto desde el punto de vista de reducción de lectura:

$$IRRR = \frac{R_{max} - R_{lectura}}{R_{max}} \times 100\%$$
(4.4)

donde:

R<sub>max</sub> : Es la distancia máxima de lectura de la etiqueta de RFID sin sistema interferente

 $R_{lectura}$ : Es la distancia máxima de lectura de la etiqueta de RFID con sistema interferente

Para la configuración de los sistemas de RFID en la identificación vehicular que se reporta en esta tesis y considerando los resultados que se obtuvieron de forma experimental, de acuerdo a los resultados de la gráfica 4.12, se tiene: la distancia máxima de lectura de la etiqueta de RFID ( $R_{max}$ ) es de 4m sin considerar una fuente interferente y la distancia máxima de lectura de la etiqueta de RFID considerando una fuente interferente ( $R_{lectura}$ ) es de 1.2m, con estos datos se puede determinar el IRRR, entonces se tiene que:

$$IRRR = \frac{R_{max} - R_{lectura}}{R_{max}} \times 100\% = \frac{4m - 1.2m}{4m} \times 100\% = 70\%$$

El valor de IRRR de 70% indica que los efectos de interferencia son muy grandes para cuando se utiliza una configuración de lectores de RFID (víctima - interferente) como el presentando en la figura 4.11.

# 4.4.3 Distancia promedio

El esquema de la distancia promedio (ecuación 4.11) se aplica cuando en una zona de cobertura se tienen fuentes interferentes distribuidas aleatoriamente de forma uniforme (figura 4.3). En esta zona de cobertura se pueden identificar tres casos: línea de vista, plano xy, y un volumen; también se involucra el coeficiente de propagación. La expresión para la distancia promedio es:

$$\langle d \rangle = \frac{\rho}{\rho+1} \left[ \frac{d_{max}^{\rho+1} - d_{lector}^{\rho+1}}{d_{max}^{\rho} - d_{lector}^{\rho}} \right]$$

(4.11)

donde:

 $\rho$  es el coeficiente del medio de propagación de acuerdo a la localización del sistema interferente. De acuerdo a la figura 4.3,  $d_{lector}$  es la zona radial de cobertura de lectura del sistema de RFID víctima,  $d_{max}$  es también una zona radial mayor donde se ubican los sistemas de RFID interferentes distribuidos uniformemente, los cuales pueden afectar al sistema de RFID víctima.

De los resultados experimentales se reconstruye la figura 4.3, donde se especifican las distancias de las zonas de cobertura de lectura e interferentes, entonces se tiene:



Figura 4. 17 Esquema de los sistemas RFID (Victima -Interferente).

De acuerdo a los datos de la figura anterior se tiene que para una cobertura en un plano xy  $\rho = 2$ , la distancia promedio de lectura segura (sin interferencias) es:

$$\langle d \rangle = \frac{\rho}{\rho+1} \left[ \frac{d_{max}^{\rho+1} - d_{lector}^{\rho+1}}{d_{max}^{\rho} - d_{lector}^{\rho}} \right] = \frac{2}{2+1} \left[ \frac{6^3 - 4^3}{6^2 - 4^2} \right] = 5.06 \text{ m}$$

Esta distancia promedio de 5m está en concordancia con los resultados experimentales de lectura y cobertura de los sistemas de RFID que se han reportado en esta tesis para la aplicación de identificación vehicular, lo cual se puede corroborar con las gráficas de las figuras 3.24 y 3.25. Este resultado es importante para el despliegue de la tecnología RFID de identificación vehicular en México, ya que está se quiere colocar en los puentes de cobro de peaje en autopistas, las antenas lectoras deben colocarse al menos 5 m entre ellas para no interferirse.

Valores de SIR (x), IRRR y  $\langle d \rangle$  se calcularon para tres configuraciones del sistema de RFID con una fuente interferente de acuerdo a los resultados experimentales que se muestran en las gráficas de las figuras 4.12, 4.14 y 4.16. Los valores calculados se muestran en la tabla siguiente:

Sistema RFID con Interferente	Distancia etiqueta RFID	Distancia Lector interferente	SIR(x) dB	IRRR %	ho = 1	$\langle d \rangle$ ho = 2	ho = 3
Configuración 1	2 m	6 m	39.21	70%	5m	5.06 m	5.13m
Configuración 2	2 m	4.89 m	38.04	22.5%	4.44m	4.45m	4.47m
Configuración 3	2 m	3 m	35.96	50%	3.5m	3.52 m	3.54m

#### Tabla 4. 2 Resultados de SIR, IRRR y $\langle d \rangle$ para las configuraciones 1, 2 y 3.

De la tabla 4.2 se observa que el modelo propuesto por D.-Y. Kim and J.-G. Yook, no es adecuado para la aplicación de identificación vehicular, por lo menos eso se puede asegurar con los sistemas desplegados en esta tesis, ya que para valores similares de SIR la IRRR tiene una gran variación lo cual en la práctica no corresponde. Es decir sí la SIR es 39.21 dB el sistema muestra que no tiene interferencias, sin embargo un IRRR de 70% indica que el porcentaje de pérdida de lectura es alto. Estos resultados son contradictorios.

Con el modelo propuesto de la distancia promedio, no se específica la figura de mérito (SIR) de los niveles señal – interferencia ni las pérdidas de lectura, pero da un dato importante que es la distancia a partir de la cual el lector del sistema RFID víctima puede ser interferido y la cobertura de lectura segura.

# **CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

## Conclusiones

Uno de los problemas más importantes por los que se genera carga vehicular en las carreteras de México es el procedimiento de pago de peaje, debido a que es un sistema de pago semiautomático (sistema IAVE). Con el sistema IAVE, a pesar de que la identificación se hace de forma automática, está debe realizarse a velocidades menores de 30 km/h, incluso el automóvil debe parar completamente y esperar a que la identificación se valide para que una pluma le ceda el paso. Este problema se debe atacar con un sistema completamente automático como lo es el sistema RFID homologado con la Norma ISO/IEC 18000-6C, donde la identificación se puede llevar a cabo a velocidades altas (mayores a 110 km/h; que es la velocidad permitida en autopistas) donde no se hace necesaria una pluma de control de paso. Esta propuesta agilizaría el tránsito vehicular en carreteras de peaje en México.

Este sistema desde luego puede usarse bajo condiciones estáticas, es decir el vehículo sin movimiento, lo cual también se reporta en esta tesis, por lo que esta tecnología puede ser aplicada en acceso y control de vehículos para entrada y salida de cualquier sitio como son estacionamientos.

Como parámetro importante en un sistema de RFID es la sensibilidad de la etiqueta pasiva (antena – circuito integrado), por lo que en este trabajo se desarrolló una metodología que permite determinar la sensibilidad de etiquetas RFID pasivas, tanto para la señal de RF como para su geometría (colocación). Con esta información también se puede determinar la tasa de error (BER). Conociendo la sensibilidad se puede estimar la distancia de lectura óptima de la etiqueta.

También se presenta la metodología para caracterizar los sistemas de RFID con el fin de predecir su comportamiento básico, ya que los niveles de potencia deben de cumplir lo que especifican las normas.

El modelo ideal con el cual se puede analizar el canal de comunicaciones es el de Friis y a partir de él se han presentado modificaciones (ecuación 3.12) que permiten predecir bajo condiciones reales la propagación de la señal de RF esto se muestra analíticamente y de forma experimental (figura 3.24), lo que indica que el modelo propuesto es una buena solución para analizar el canal de comunicación del sistema RFID para aplicación de identificación vehicular.

Otra de las conclusiones de esta tesis es el análisis de la selección de los modos de operación de los lectores, donde se muestra que para el protocolo interface – aire especificado por la norma ISO/IEC 18000-6C, la mejor condición para detectar vehículos circulando a velocidades altas es el modo "Maximum Throughtput" (Máximo Rendimiento) para el lector de RFID Impinj modelo speedway utilizado en las pruebas de lectura estáticas y dinámicas.

Los resultados de las pruebas de campo fueron exitosos al detectar un número promedio de lecturas, las cuales presentan una tendencia a disminuir conforme aumenta la velocidad del automóvil. Esta tasa de lectura está directamente ligada a la tasa de transferencia, la mayor es de aproximadamente 140 kbps, lo cual corresponde a un TARI de 7.15 µs. Como el equipo RFID que se utilizó es de propósito general, el tiempo TARI limita la detección de etiquetas a velocidades altas, es decir, se requiere una mayor tasa de lectura de etiquetas RFID para velocidades mayores de 140 km/h, lo cual el equipo utilizado presenta dificultades por lo que se requieren lectores de RFID con un tiempo TARI menor, pero esto modifica los protocolos de comunicación que específica la norma ISO/IEC18000-6C. Lo que indica que el protocolo de comunicación de dicha norma para la aplicación de identificación vehicular en autopistas tiene que modificarse.

A pesar de que la tecnología RFID con tecnología pasiva en la banda de UHF asegura la identificación de vehículos circulando a diferentes velocidades, está es susceptible a interferencias electromagnéticas (EMI), para este análisis se propuso utilizar el modelo propuesto por D.-Y. Kim and J.-G. Yook, el cual no es adecuado. Se propuso el modelo de D.-Y. Kim and J.-G. Yook, porque es el último que se encontró en la literatura del tema. También se propuso un modelo probabilístico que no tiene la concepción del modelo de D.-Y. Kim and J.-G. Yook, pero da información práctica respecto a la distancia donde se puede tener interferencias que afecten las lecturas. La aplicación de este modelo es una de las aportaciones de este trabajo de tesis.

# Trabajo Futuro

Los modelos de propagación presentados en este trabajo de tesis son determinísticos y el escenario de aplicación de la tecnología RFID es aleatorio por lo que representan los fundamentos para el desarrollo de modelos probabilísticos. Los modelos probabilísticos más utilizados dentro de las comunicaciones inalámbricas son: El modelo de Rayleigh que se utiliza cuando entre el Transmisor y Receptor no se tiene una clara línea de vista y Rice que se utiliza cuando se presentan multitrayectorias durante la comunicación, debido a que en la comunicación de RFID se presentan las dos condiciones pueden desarrollarse una combinación de ambos modelos.

También desde el punto de vista de las interferencias la función de densidad de probabilidad (ecuación 4.15), puede utilizarse para determinar una función de densidad de probabilidad más completa de multivariables, donde se consideren los parámetros estadísticos de la señal como lo son la media y la varianza de acuerdo a las condiciones del canal de propagación.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification, Second Edition Klaus Findkenzeller.
- [2] RFID in the supply chain, A guide to selection and implementation, Judith M. Myerson
- [3] <u>https://www.iave.mx/iave</u>
- [4] RFID Security, Frank Thornton & John Kleinschmidt Technical Editor.
- [5] Sarma, S., Engels, D.W.: On the future of RFID tags and protocols. White paper, Auto-ID Center, Massachusetts Institute of Technology (2003).
- [6] Norma Oficial Mexicana, NOM-121-SCT1-2009, Telecomunicaciones-Radiocomunicación-Sistemas de radiocomunicación que emplean la técnica de espectro disperso-Equipos de radiocomunicación por salto de frecuencia y por modulación digital a operar en las bandas 902-928 MHz, 2400 2483.5 MHz y 5725-5850 MHz-Especificaciones, límites y métodos de prueba.
- [7] Evaluación y Caracterización de Lectores RFID que Operan en la Banda de Frecuencias UHF ,Roberto Orosco vega , México 2010.
- [8] ISO/IEC 180006-C: Information technology —Radiofrequency identification for item management — Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz.
- [9] Pasquale Dottorato, Pruebas simples, flexibles y precisas para etiquetas pasivas UHF de RFID, Agilent Technologies, Junio 2009.
- [10] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, John Wiley & Son, 1997.
- [11] Nikitin, P.V.; Rao, K.V.S, "Performance limitations of passive UHF RFID systems," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp.1011–1014, 2006.
- [12] P. V. Nikitin and K. V. S. Rao,"Theory and Measurement of Backscattering from RFID Tag," IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 48, no. 6, pp 212-218, December 2006.

- [13] K. Ramakrishnan and D. Deavours, "Performance benchmarks for passive UHF RFID tags", Proceedings of the 13th GI/ITG Conference on Measurement, Modeling, and Evaluation of Computer and Communication Systems, pp. 137-154, 2006.
- [14] ISO/IEC 18046-3: Information technology Radiofrequency identification device performance test methods Part 3: Test methods for tag performance, 2007-09-15.
- [15] ISO/IEC 18047-6: Information technology Radio frequency identification device conformance test methods — Part 6: Test methods for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz, 2008-12-15.
- [16] El decibel como una función, VI Semana de Ingeniería en Electrónica de SENIE Octubre 2010.Ezequiel I. Espinosa R y R. Orosco Vega, ISBN: 978-607-477-363-7.
- [17] Smart Antennas for wireless communications IS-95 and Third generation CDMA Applications, Joshep C.Liberty and Theodore S. Rappaport.
- [18] Introduction to Electromagnetic Compatibility, CLAYTON R. PAUL Second Edition.
- [19] Introduction to Communication Systems, Ferrel G. Stremler, Third Edition.
- [20] Dolukhanov, M. "Propagation of Radio Waves". MIR Publishers, Moscow, USSR, 1971.
- [21] Anderson, H. A. "A Ray-Tracing Propagation Model for Digital Broadcast Systems in Urban Areas". IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 39, Number 3, September 1993.
- [22] J. D. Parsons, The Mobile Radio Propagation Channel, New York: John Wiley, 1992
- [23] Theodore S. Rappaport, Wireless Communications: Principles and Practice, second edition.
- [24] Cocheril and R. Vauzelle, A new ray-tracing based wave propagation model including rough surfaces scattering, Y., PIER 75, 357–381, 2007.
- [25] About the Path Loss in the RFID Radio Channel, Ricardo Meneses, Laura Montes and Roberto Linares.
- [26] Some Propagation Issues in RFID Road Environment, Ricardo Meneses, and Roberto Linares.
- [27] Secretaria de comunicaciones y Transportes (COFETEL), Acuerdo en el diario oficial del 13 de marzo de 2006.
- [28] Engels, D. W. and S. E. Sarma, "The reader collision problem," Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 3, 92–97, 2002.

- [29] Hongyue Dai, Shengli Lai, Hailong Zhu and Hongyue Dai, "A Multi-Channel MAC Protocol for RFID Reader Networks"
- [30] Y. Kim and G Yook ,"Interference Analysis of UHF RFID Systems", Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 4 ,pag 115-126, 2008.
- [31] TECNOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA EN LA BANDA DE UHF, Dulce Borja Becerril, México Julio 2008.
- [32] Manual Alien READER INTERFACE GUIDE All Fixed Readers September 2008.
- [33] Manual UHF Gen 2 RFID Speedway Reader (IPJ-R1000) Octane 3.2 User Guide
- [34] Antenna terms and Calculations, EMC Test systems An ESCO Company
- [35] Shang, J. Q., Umana, J. A., Bartlett, F. M., and Rossiter, J. R., 1999, "Measurement of complex permittivity of asphalt pavement materials," J. Trans. Eng., Vol. 125, no. 4, p. 347-356.
- [36] S. Riki Banerjee, Ronald Jesme, and Robert A. Sainati "Performance Analysis of short Range UHF Prppagation as Applicable to passive RFID".
- [37] P. V. Nikitin, K. V. S. Rao, Sander F. Lam, "Antenna Design for UHF RFID Tags: A Review and a Practical Application". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 53, No 12, pag 3870-3876 December 2005.
- [38] Martin A.K. Wiles and Alexader Kriz, "Multi-Purpose Anechoic Chambers EMC (SAR/FAR) to Antenna Measurements".
- [39] T. S. Rappaport, "Characterization of UHF multipath radio channels in factory buildings,"
  IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 37, no. 8, Aug. 1989, pp. 1058 1069.
- [40] Handbook: Electromagnetic Compatibility, Kenneth L. Kaiser, CRC press 2005.
- [41] O. White, "Radar cross-section: measurement, prediction, control", Electronics and Communications Engineering Journal, vol.10, no. 4, 1998, pp. 169-180.
- [42] "More on EMC Terminology", IEEE Transactions on Electromagnetic compatibility, Vol. EMC-29, No 3, August 1987.

# APÉNDICES

# **Apéndice A Codificación y Modulacion**

La información almacenada en la memoria de la etiqueta es codificada (Informacion) y modulada (portadora a 915 MHZ) para la transmision hacia el lectro de RFID en cualquiera de las siguientes formas[19]:

# Métodos de Codificación

- Bifase
- Manchester
- NRZ
- Dual Pattern (Anticolisión)

# Métodos de Modulación

- ASK (Amplitud Shift Keying) Modulación por Desplazamiento de Amplitud
- FSK (Frequency\_Shift Keying) Modulación por Desplazamiento de Frecuencia
- PSK (Phase Shift Keying) Modulación por Desplazamiento de Fase

Sin embargo en este aparatado solo presentamos los tipos de codificación y modulación más utilizados.

# • Codificación Manchester

Es un método de codificación eléctrica de una señal binaria en donde se requiere de una señal de reloj y una señal de datos las cuales se combinan en una sola señal que auto sincroniza el flujo de datos y cada bit codificado contiene una transición del periodo de cada bit. En la siguiente figura A se muestra este proceso.



Figura A.- Codificación Manchester.

# • Codificación NRZ (No Retorno a Cero)

Es un método de codificación que utiliza dos niveles de voltaje, el positivo y el negativo de la señal. Existen dos tipos:

- NRZ-L. Bit 0 (Cero)= Voltaje Positivo; Bit(Uno)=Voltaje Negativo
- NRZ-I. Bit 0 (Cero)=No hay cambio de Voltaje; Bit(Uno)=Transición de Voltaje.

El proceso de este tipo de codificación es mostrado a continuación:



Figura B.- Codificación No Retorno a Cero (NRZ).

# Métodos de Modulación

Para transmitir datos digitales mediante señales analógicas es necesario convertir estos datos a un formato analógico [19].

# • Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK)

En este tipo de modulación los valores binarios se representan por dos valores de amplitud de la portadora.



# • Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK)



Los dos valores binarios se representan por dos valores de frecuencia próximas a la portadora.

• Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK)

La fase de la portadora se desplaza de acuerdo a los valores binarios de la señal de datos :

- Un "0 cero" representa una señal con igual fase que la anterior
- Un "1 uno" representa una señal con fase opuesta que la anterior.



# Apéndice B Medición de la potencia nominal del Lector RFID

En los sistemas de RFID con tecnología pasiva en la banda de frecuencias de 900 -930 MHz, las etiquetas de RIFD son energizadas por la propia señal de RF emitida por el lector. En México el nivel de potencia máximo nominal que puede emitir un lector es de 1 watt o 30 dBm que junto con la ganancia de la antena nos determinada los 4 watts o 36 dBm PIRE regulada por la Comisión Federal de comunicaciones (Diario Oficial de 13 de marzo de 2006) [27] y recientemente por la Norma Oficial Mexicana NOM-121 [6]. A continuación se reporta el equipo utilizado y procedimiento para ajustar la PIRE de 36 dBm en un sistema RFID en Mexico.

## Equipo empleado:

- Un Analizador de Espectros R&S FSH-6
- Un Sensor de Potencia Direccional R&S FSH-Z44
- Un Lector de RFID.
- Una Computadora Portátil o de escritorio
- Una carga de 50 Ω
- Un cable coaxial convertidor de bajas pérdidas "TNC" a "N".

#### Procedimiento:

1.-Una vez concentrado todo el equipo de RF, se deben de preparar por separado el Sistema de RFID y el Medidor de potencia, como lo muestra la figura A.

#### 1.1. Sistema de RFID:

Este apéndice pretende generalizar la medición de la potencia PIRE de cualquier sistema de comunicación. Por lo que se enfatiza más en la parte de medición de la potencia nominal del generador o fuente. Por lo que la puesta en marcha de cada generador según sea el caso de cada sistema de comunicación y sus normas que los regulan serán responsabilidad del lector. Para este caso el procedimiento de la puesta en marcha de algunos Sistemas de RFID comerciales (Alien 9800, Alien 9900 e Impinj Speedway ) esta reportado en el trabajo de tesis *"Evaluación y caracterización de lectores de RFID que operan en la banda de UHF"* que se puede encontrar en la Biblioteca Nacional de Ciencia y Tecnología (BNCT) del IPN. Además que también se reporta algunas pruebas para corroborar que el sistema RFID funcione correctamente.



Figura A.- Configuración para la medición de potencia nominal del lector de RFID

#### 1.2 Sistema de medición de la potencia

1.2.1 El cable del sensor de potencia se debe conectar y enroscar al Analizador de Espectros R&S FSH-6 como lo muestra en la figura A. En este momento conecte la carga de 50  $\Omega$  en la terminal 2 (configuración forward) y en la terminal 1 no conectar nada.

1.2.2 Una vez conectado el sensor al analizador se debe de hacer lo siguiente:

1.2.2.1 En el Analizador de espectros, se deben de oprimir la siguiente secuencia de botones para calibrar el Sensor; Measure  $\rightarrow$ Power Sensor  $\rightarrow$ Enter y esperar a que el analizador reconozca al sensor de potencia, fotografías de esta secuencia se muestran a continuación.



1.2.2.2 Una vez detectado el sensor de potencia, configurar a la frecuencia de medición de interés, también se debe configurar si estamos midiendo potencia promedio o pico y posteriormente hacer un ajuste a cero del sensor de potencia.

Para nuestro caso los datos a configurar son: Frecuencia central 915 MHz, con detección de picos (PEP). Esta configuración se logra con la siguiente secuencia de botones en el analizador de espectros. Oprimir Freq en el menú de teclas de funciones/ 915 MHz con el teclado alfanumérico. Para el caso de la configuración de detección de picos oprimir la tecla Power display y elegir la opción Peak (PEP) y enter. Solo resta ajustar a cero el sensor con la tecla ZERO, por último esperar a que el analizador de espectros realice este último paso. Fotografías de este proceso se muestran a continuación.



Todos los demás parámetros se dejan por default, a menos que se persigan otros intereses .Para mayor información consultar **Operating Manual Handheld Spectrum Analyzer R&S FSH.** 

#### 2.-Medición de potencia nominal

2.1 Una vez hecho la puesta en marcha del Lector de RFID y del sistema de medición por separado. Se procede a hacer la conexión del lector de RFID en el puerto 1 del sensor de potencia recordando que en la terminal 2 está conectada una carga de 50  $\Omega$  como mínimo.

2.2 Se deberá tener cuidado con las dimensiones de potencia a medir debido a que puede dañar severamente a los equipos de RF utilizados por lo que previamente se recomienda leer las especificaciones técnicas de todo equipo a utilizar. En este caso el sensor utilizado puede medir hasta 400 W con una carga en la terminal 2 adecuada.

2.3 Se configura para que el Lector de RFID emita una potencia de 24 dBm o 0.25 W vía software recordando que la PIRE es el conjunto (PtGt), y los 36 dBm se logran con la ganancia de la antena transmisora que es de 12 dBi para este caso.



2.4 Se procede a medir, fotografías de la medición se muestran a continuación.

Como se puede observar en las fotografías anteriores con el procedimiento adecuado se logra la potencia deseada de 24 dBm sin embargo recordamos que nuestro generador va a estar conectado a la antena transmisora por una línea de transmisión (cable coaxial) y esta puede ser de varios metros lo que provocara pérdidas en el sistema, por lo que para estar dentro de la norma NOM-121, se deberán compensar estas pérdidas. En el siguiente apéndice C se trata este punto.

# Apéndice C Medición de Pérdidas por retorno (ROE) de una línea de transmisión

En este apéndice se describe la medición las pérdidas de potencia que se generan en líneas de transmisión (cable coaxial) a una frecuencia puntual cuando por ellas se les inyecta potencia por medio de un generador de RF. Estas pérdidas se pueden compensar con la potencia emitida por el generador por ejemplo si las pérdidas del cable coaxial es de 0.8 dB y se quiere una potencia de 5 dBm a la salida de este, el generador debe emitir 5.8 dBm.

A continuación se describe el equipo de RF utilizado y procedimiento para estas pruebas.

## Equipo utilizado:

- Un Analizador de espectros R&S FSH-6.
- Un puente y Divisor de Potencia R&S FSH-Z3.
- Cable coaxial de 3 m LMR400.
- Kit de calibración de cargas tipo N Dispositivo de cargas "T" R&S FSH-Z29.

#### **Procedimiento:**

1. Con el equipo de RF reunido, este se debe de configurar como lo muestra el esquema y la fotografía de la figura 1.A



Figura 1.A.- Configuración para la medición por pérdidas de retorno a través del puente de impedancias R&S FSH-Z3.

2.-Antes de medir las pérdidas por retorno en el puente de impedancias este debe ser calibrado en el analizador de espectros de la siguiente manera:

2.1 Pulsar la tecla MEAS→ MEASURE, Usando las teclas del cursor o el mando rotatorio, seleccionar el menú TRACKING GEN y enter. El R&S FSH habilita el generador de tracking y muestra su menú. Cuando se enciende el generador de tracking, el R&S FSH muestra Track Gen Uncal. Esto indica que las medidas del generador de tracking están des calibradas. Fotografías de este proceso se muestran a continuación:



2.2 Antes de la calibración, se debe configurar el intervalo de frecuencias deseado debido a que la calibración es sólo válida para el intervalo de frecuencias calibrado. Dicha calibración no sería válida si, una vez finalizada, se cambia la configuración de frecuencias. Esta configuración se logra de la siguiente forma:

Pulsar la tecla FREQ, Usar el teclado numérico para introducir la frecuencia central y luego Pulsar la tecla SPAN. Usar el teclado numérico para introducir el span. Como alternativa, las frecuencias inicial y final se pueden introducir usando las teclas START y STOP en el menú de frecuencia. A continuación una demostración grafica de este procedimiento: El intervalo de frecuencias a configurar es el siguiente Frecuencia central: 915 MHz, F. inicial 900 MHz, F. de paro: 930 MHz y un span de 30 MHz.

Detect: Sample Ref: 0 dB	Trig:Free Trace:Cl/Wr	RBW:1 kHz VBW:1 kHz	Detect: Sample Ref: 0 dB	Trig:Free Trace:Cl/Wr	RBW: 1 kHz VBW: 1 kHz	
Att: 10 dB		SWT:1s	Att: 10 dB		SWT:1s	
-5		FSH-Z2: Uncal	-5		FSH-Z2: Uncal	
-10			-10			
-15			-15			
-20			-20			
-25			-25			
-30			-30			
_35			_35			
-33			-33			
-40			-40			
-45	START: 900 MHz		-45	STOP: 93	0 MHz	
Start: 900 MHz	t: 900 MHz -C Stop: 1.8 GHz		Start: 900 MHz -C Stop:		930 MHz	
CENTER CF	START SI			START ST		
The JIEFJICE					· • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
Detect: Sample	Trig: Free	RBW: 1 kHz	Detect: Sample	Trig: Free	RBW: 1 kHz	
Ref: U dB	Trace: Cl/Wr		Ref: 0 dB	Trace: CI/Wr	VBW: 1 KHZ	
-5		FSH-Z2: Uncal	-5		FSH-Z2:-Uncal	
-10			-10			
-15			-15			
_90						
-20			-20			
-25			-25			
-30			-30			
-35			-35			
-40			-40			
-45	CENTED.	015 MH-	-45 Cambió SD(	N CENTED.	000 MH-	
Start: 900 MHz	CENTER: 915 MHZ		Start: 0 Hz		8 GH7	
CENTER CF FREQ STEPSIZE	START SI FREQ FF	IOP FREQ REQ OFFSET	CENTER CF FREQ STEPSIZE	START ST FREQ FF	OP FREQ EQ OFFSET	

2.3 Una vez configurada la frecuencia de interés y el span, se procede a calibrar el puente de impedancia con el kit de cargas tipo N, como se describe a continuación:

Pulsar la tecla REFLECT CAL  $\rightarrow$ El R&S FSH ahora indica al usuario que se va a realizar la medida con un abierto en el puerto  $\rightarrow$ Dejar el puerto de prueba del puente ROE abierto  $\rightarrow$ la tecla CONTINUE comienza la calibración en abierto. Mientras la calibración está en proceso, el R&S FSH muestra el mensaje "Calibrando en ABIERTO, Espere por favor...".



Cuando la calibración en abierto finaliza, el R&S FSH indica al usuario que se va a realizar la calibración en cortocircuito $\rightarrow$  Conectar un corto en el puerto de prueba del puente ROE.  $\rightarrow$ Pulsando CONTINUE comienza la calibración en corto.

Cuando finaliza la calibración en corto, el R&S FSH muestra en pantalla el mensaje "Calibrado en carga.".

Cuando finaliza la calibración en carga, el R&S FSH muestra en pantalla el mensaje "Calibrado en Refl." durante 3 segundos. Reflection se muestra en lo alto de la esquina derecha del diagrama de medida para indicar que el R&S FSH está calibrado para medidas de reflexión. Fotografías del procedimiento anterior se muestran a continuación:



2.4 Una vez hecho la calibración, colocar el dispositivo bajo prueba en el puente ROE de impedancias y teclear la siguiente secuencia de botones para la medición de pérdidas del cable coaxial:

Oprimir la tecla MEAS MODE.

Se abre un menú, elegir CABLE LOSS, esperar a que la medición se realice, esta operación puede tardar varios segundos. Las dos fotografías siguientes muestran el resultado final de la medición de las pérdidas de potencia del cable coaxial utilizado.

Detect:Sample Ref:0dB Att:10dB	Trig: Free Trace: Cl/Wr	RBW: 1 kHz UBW: 3 MHz	Detect:Sample Ref:0dB	Trig: Free Trace: Cl/Wr	RBW: 1 kHz UBW: 3 MHz SWT: 1 S
-5	ESH-72: M	anitude refl	-5	F	SH-72: Cable Loss
10	T SH-LLT H	Igintode rent	10		
-10			-10		
-15			-15		
-20	SCALAR		-20		
-25	. VECTOR		-25		
-30	MAGNITUDE		-30		
-30	PHASE		-50		
-35	SMITH CHART		-35		
-40	CABLE LOSS		-40		
-45	GROUP DELAY		-45 Cobl		<b>07 J</b> D
			LdUI	e 1055; U	
Start: 900 MHz		Hz	Start: 900 MHz	-CE Stop:	930 MHz
CAL CAL	MEAS TG AT MODE	T CBL LOSS ON/OFF	CAL CAL	MODE T	G ATT CBL LOSS ON/OFF

El resultado de las pérdidas por retorno del cable coaxial de 3 m mostrado en la fotografía anterior es de 0.87 dB, lo que significa que se requiere emitir 24 dBm a la salida de este cable, el generador debe emitir un potencia nominal de 24.87 dBm en conformidad con la norma NOM-121.