

# Mitigación de Interferencias en Sistemas RFID UHF Pasivos durante la Identificación de Objetos Metálicos en Movimiento

Por:

**Wendy Paola Navarro Ariza**  
Ingeniera Electrónica – Ingeniera Electricista

TESIS PRESENTADA CON EL OBJETIVO DE OPTAR AL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Director de Tesis:  
Ph.D. Juan Carlos Vélez Díaz



Barranquilla, Atlántico, Colombia  
Junio 2015

# Mitigación de Interferencias en Sistemas RFID UHF Pasivos durante la Identificación de Objetos Metálicos en Movimiento

Tesis presentada a la UNIVERSIDAD  
DEL NORTE en cumplimiento parcial  
de los requisitos para el título de  
Magíster en Ingeniería Electrónica

Por:

---

Wendy Paola Navarro Ariza

Director de Tesis:

---

Ph.D. Juan Carlos Vélez Díaz

Barranquilla, Atlántico, Colombia  
Junio 2015

*Dedicado especialmente  
A mi familia y a Dios quien da el Entendimiento y la Sabiduría*

*“Porque el Señor da la sabiduría;  
conocimiento y ciencia brotan de sus labios”  
Proverbios 2:6*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por su guía durante el desarrollo de esta investigación, permitiéndome alcanzar cada uno de los objetivos propuestos. A mis padres José Ismael Navarro Mercado y Aida Luz Ariza Camacho por su apoyo incondicional y colaboración, por procurar diligentemente mi formación integral. Agradezco de manera especial a mi asesor el ingeniero Juan Carlos Vélez Díaz Ph.D. por sus recomendaciones, orientación y acompañamiento durante cada etapa del proyecto de investigación. De igual forma, extendo mi más sincera gratitud al ingeniero David Marum por su colaboración incondicional durante la ejecución de las pruebas. A los ingenieros María Gabriela Calle Ph.D, Luis Torres Ph.D. y Lácides Ripoll Ph.D. por su orientación en las fases de análisis de resultados. Asimismo al director ejecutivo de KEREON RFID, Roberto Rossetti, por su asesoría en temas propios del proyecto. A los representantes de la empresa regional Acerías de Colombia ACESCO S.A.S. y a la Fundación Universidad del Norte por facilitarnos los recursos necesarios para realizar pruebas y proveer la documentación necesaria para llevar a cabo la presente investigación.

# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	4
ÍNDICE GENERAL .....	5
ÍNDICE DE TABLAS .....	10
ÍNDICE DE FIGURAS .....	12
RESUMEN.....	19
<b>I. INTRODUCCIÓN, CONTEXTO, FUNDAMENTO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE 21</b>	
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>22</b>
1.1. Planteamiento del problema .....	24
1.2. Antecedentes.....	26
1.3. Justificación .....	29
1.3.1. Impacto científico – tecnológico .....	30
1.3.2. Impacto en la producción y la competitividad.....	31
<b>2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>32</b>
2.1. Objetivo General.....	32
2.2. Objetivos Específicos.....	32
<b>3. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>33</b>
3.1. Alcances de la Investigación .....	33
3.2. Limitaciones de la Investigación .....	34
<b>4. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>35</b>
4.1. Sistema de Identificación por Radiofrecuencia (RFID).....	35
4.2. Componentes de un sistema RFID .....	36
4.2.1. Etiquetas.....	36

4.2.2. Lector.....	37
4.3. Clasificación de los sistemas RFID .....	39
4.4. Especificaciones técnicas de sistemas RFID UHF .....	41
4.5. Principios de comunicación lector-etiqueta en sistemas RFID pasivos en la banda UHF .....	44
4.6. Problemas durante la identificación de objetos metálicos en sistemas RFID pasivos en la banda UHF .....	47
4.7. Ondas electromagnéticas en superficies metálicas.....	49
4.8. Cambio de parámetros de la antena de una etiqueta RFID pasiva en la banda UHF en cercanía de superficies metálicas ..	51
<b>5. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>53</b>
5.1. Estado del arte en relación con soluciones propuestas a sistemas RFID UHF pasivos sobre superficies metálicas .....	53
5.2. Estado del arte en relación con técnicas y principios de estimación de distancias para etiquetas RFID UHF pasivas.....	55
5.2.1. Técnicas basadas en trilateración.....	55
5.2.2. Técnicas basadas en triangulación.....	55
5.2.3. Técnicas basadas en niveles de RSSI.....	56
5.2.4. Técnicas basadas en el ángulo de fase .....	57
5.3. Estado del arte en relación con técnicas para estimar la velocidad y sentido de movimiento de etiquetas RFID UHF pasivas .....	59
5.3.1. Considerando las variaciones del ángulo de la fase en el tiempo	59
5.3.2. Considerando la frecuencia Doppler y la frecuencia instantánea	60
<b>II. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO .....</b>	<b>62</b>
<b>6. MÉTODO PROPUESTO .....</b>	<b>63</b>
6.1. Planteamiento del problema de investigación .....	63
6.2. Estructura del método propuesto para la mitigación de interferencias .....	64

6.2.1.	Construcción del modelo físico del sistema de identificación por radiofrecuencia RFID pasivo en la banda UHF.....	64
6.2.2.	Adquisición y almacenamiento de las variables de radiofrecuencia .....	69
6.2.3.	Caracterización de las variables de radiofrecuencia de interés ...	73
6.2.4.	Determinación y asignación de parámetros de decisión .....	74
6.2.5.	Definición de experimentos para la verificación del modelo .....	74
<b>7.</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN .....</b>	<b>75</b>
7.1.	Requerimientos para el etiquetado de las estructuras metálicas consideradas .....	75
7.1.1.	Ubicación de las etiquetas pasivas sobre láminas metálicas .....	75
7.1.2.	Ubicación de las etiquetas pasivas sobre cilindros metálicos .....	76
7.2.	Sentidos de movimiento considerados.....	77
7.3.	Ubicación de las etiquetas RFID estáticas interferentes ...	78
7.4.	Propuesta para estimar el movimiento .....	79
7.5.	Propuesta para estimar el sentido de movimiento.....	80
7.6.	Propuesta para estimar la velocidad promedio .....	80
7.7.	Propuesta para estimar el desplazamiento en el tiempo ...	81
7.8.	Parámetros de decisión del método propuesto .....	81
7.9.	Estructura del método propuesto .....	82
7.10.	Estructura del algoritmo de adquisición y almacenamiento de información .....	84
7.11.	Estructura del algoritmo para el procesamiento y análisis de las variables de radiofrecuencia .....	86
<b>III.</b>	<b>EXPERIMENTOS, RESULTADOS, VERIFICACIÓN Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>89</b>
<b>8.</b>	<b>EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS .....</b>	<b>90</b>
8.1.	Estimación experimental del área de cobertura .....	90
8.2.	Caracterización de variables de radiofrecuencia en etiquetas adheridas sobre objetos metálicos estáticos .....	94
8.2.1.	Caracterización del porcentaje de cambios del nivel de RSSI.....	97

8.2.2.	Caracterización de la diferencia absoluta del RSSI máximo y mínimo .....	101
8.2.3.	Comportamiento del ángulo de fase en etiquetas estáticas .....	103
8.2.4.	Caracterización de la proporción de variaciones grandes del ángulo de fase .....	106
8.2.5.	Caracterización de la frecuencia Doppler promedio.....	107
8.3.	Estimación experimental de la ubicación de una estructura metálica estática.....	110
8.4.	Caracterización de variables de radiofrecuencia en etiquetas adheridas sobre objetos metálicos en movimiento .....	117
8.4.1.	Caracterización del porcentaje del cambio de nivel de RSSI.....	118
8.4.2.	Caracterización de la diferencia absoluta del RSSI máximo y mínimo .....	120
8.4.3.	Caracterización de la proporción de variaciones grandes del ángulo de fase .....	124
8.5.	Estimación experimental de la velocidad, sentido de movimiento y trazabilidad del recorrido.....	126
8.5.1.	Caracterización de la frecuencia Doppler y estimación del sentido de movimiento .....	127
8.5.2.	Estimación de la velocidad .....	130
8.5.3.	Estimación de la trazabilidad del movimiento.....	132
8.6.	Verificación del método: Movimiento interrumpido .....	134
9.	<b>VALIDACIÓN DEL MÉTODO.....</b>	<b>137</b>
9.1.	Planteamiento.....	137
9.2.	Diseño del experimento .....	139
9.3.	Resultados y análisis .....	140
10.	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>144</b>
10.1.	Conclusiones.....	140
10.2.	Futuros trabajos .....	145
	<b>GLOSARIO .....</b>	<b>146</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>150</b>

<b>APÉNDICES.....</b>	<b>155</b>
A. Algoritmo de adquisición y almacenamiento del estado de las variables de radiofrecuencia.....	155
B. Algoritmo de procesamiento y análisis de las variables de decisión .....	158

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre etiquetas activas y etiquetas pasivas.....	37
Tabla 2. Comparación de sistemas de identificación por radiofrecuencia de acuerdo con su frecuencia de operación.....	40
Tabla 3. Probabilidad de error de una etiqueta ubicada de forma paralela sobre una lámina metálica.....	76
Tabla 4. Parámetros calculados para la identificación de cilindros metálicos a partir de sistemas RFID pasivos en la banda UHF .....	77
Tabla 5. <i>Reader Modes</i> ofrecidos por Impinj .....	86
Tabla 6. Comparación de la eficiencia de los estimadores contemplados: Media y mediana.....	114
Tabla 7. Resultado de modelos independientes considerando la media (promedio) y la mediana de la distancia de etiquetas estáticas para cada estructura metálica .....	115
Tabla 8. Resultado preliminar del modelo para estimar distancias de etiquetas estáticas .....	115
Tabla 9. Tiempo de identificación de acuerdo con la velocidad de desplazamiento .	118
Tabla 10. Estimaciones para la velocidad considerando el promedio como el mejor estimador en un ambiente (a) <i>indoor</i> y (b) <i>outdoor</i> .....	131
Tabla 11. Corrección de la estimación de la velocidad para una estructura metálica “Saliendo” considerando la media como el mejor estimador en un ambiente (a) <i>indoor</i> y (b) <i>outdoor</i> .....	132

Tabla 12. Resultados para el movimiento de una etiqueta adherida a un cilindro que se mueve (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” en un ambiente <i>indoor</i> .....	141
Tabla 13. Resultados para el movimiento de una etiqueta adherida a una lámina metálica que se mueve (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” en un ambiente <i>indoor</i> .....	141
Tabla 14. Resultados para el movimiento de una etiqueta adherida a un cilindro que se mueve (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” en un ambiente <i>outdoor</i> .....	142
Tabla 15. Resultados para el movimiento de una etiqueta adherida a una lámina metálica que se mueve (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” en un ambiente <i>outdoor</i> .....	142
Tabla 16. Resultados de la estimación de la velocidad promedio de desplazamiento .....	143

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dispositivos RFID del sistema RFID pasivo en la banda UHF para la identificación de objetos metálicos en movimiento: (a) Lector Impinj Speedway Revolution R420, (b) Etiqueta RFID pasiva ShortDipole, (c) Antena PAL90209H [9]. 27

Figura 2. Configuración del sistema RFID pasivo UHF tipo portal en ACESCO S.A. 28

Figura 3. Pirámide de rollos estáticos interferentes en la identificación del producto metálico en movimiento transportado por el montacargas en el portal construido. .... 28

Figura 4. Operación de un lector en un sistema RFID ..... 38

Figura 5. Espectro de señales de radiofrecuencia ..... 39

Figura 6. Características técnicas del enlace de bajada (lector → etiqueta) de sistemas RFID pasivos en la banda UHF ..... 42

Figura 7. Características técnicas del enlace de subida (etiqueta → lector) de sistemas RFID pasivos en la banda UHF ..... 42

Figura 8. Espectro electromagnético asignado a la comunicación de sistemas RFID pasivos en la banda UHF en Colombia ..... 43

Figura 9. Ondas electromagnéticas emitidas por una antena RFID en la banda UHF 44

Figura 10. Diagrama esquemático del proceso de comunicación entre un lector RFID en la banda UHF con una etiqueta pasiva ..... 45

Figura 11. Comunicación RFID sobre metal (a) Condición Normal. (b) Con superficies metálicas vecinas. (c) Con material dieléctrico que aisle las etiquetas [3]. ..... 48

Figura 12. Degradación del patrón de radiación de una etiqueta RFID UHF pasiva Alien Squiggle con antena ShortDipole sobre metal ..... 49

Figura 13. Condiciones de frontera para la propagación de ondas electromagnéticas entre dos medios [34]. ..... 49

Figura 14. Comportamiento de las condiciones de frontera para (a) Campos eléctricos y (b) Campos magnéticos cercanos a superficies conductoras [32]. ..... 51

Figura 15. Lector RFID móvil en la banda UHF AT870 de CAEN RFID..... 54

Figura 16. Relación entre  $PRxReader/PTxReader$  y la distancia estimada de una etiqueta RFID pasiva en la banda UHF para diferentes  $n$  (*path loss exponent*) utilizando técnicas basadas en niveles de RSSI..... 56

Figura 17. Escenario para las mediciones sobre un sistema RFID tipo portal [44] ..... 60

Figura 18. Diagrama de bloques del modelo físico del sistema RFID pasivo en la banda UHF requerido para la identificación de objetos metálicos en movimiento ..... 65

Figura 19. Prototipos construidos (a) Lámina metálica (etiqueta adherida a la superficie metálica), (b) Cilindros metálicos (etiqueta adherida al interior del cilindro metálico) [5] ..... 68

Figura 20. Diagrama conceptual de la propagación de ondas de radio entre el lector y la etiqueta ..... 70

Figura 21. Fuentes que contribuyen en la determinación compleja del ángulo de fase de la señal recibida por un lector RFID en la banda UHF ..... 71

Figura 22. Mapeo cíclico de la periodicidad del ángulo de fase ..... 71

Figura 23. Esquemático para la determinación de la distancia de separación etiqueta-borde de la lámina metálica que asegure un mejor proceso de lectura ..... 75

Figura 24. Ubicación de una etiqueta pasiva dentro de un cilindro metálico (corte horizontal o longitudinal)..... 77

Figura 25. Sentidos de movimiento considerados por el método de mitigación de interferencias propuesto. (a) “Saliendo”, (b) “Entrando” .....	78
Figura 26. Ubicación considerada para las etiquetas estáticas RFID interferentes ....	79
Figura 27. Esquemático general del método propuesto para la mitigación de interferencias durante la identificación de estructuras metálicas en movimiento .....	82
Figura 28. Variables calculadas después del proceso de inventario y parámetros de decisión asignados por el método presentado en la figura 29 .....	83
Figura 29. Diagrama de flujo detallado del método propuesto (Véase figura 28).....	83
Figura 30. Movimiento de un montacargas que transporta una lámina galvanizada en el sentido “Entrando” con la antena conectada al lector (corresponde a figura 25 (b))...	84
Figura 31. Movimiento de un montacargas que transporta una lámina galvanizada en el sentido “Saliendo” con la antena conectada al lector (corresponde a figura 25 (a)) ...	84
Figura 32. Flujograma del algoritmo de adquisición y almacenamiento de información de las variables radioelectrónicas consideradas.....	85
Figura 33. Interfaz gráfica de usuario construida para el análisis y procesamiento de las variables radioelectrónicas de decisión .....	87
Figura 34. Diagrama esquemático del algoritmo para el procesamiento y análisis de las variables radioelectrónicas considerada. ....	88
Figura 35. Escenario de la prueba para estimar el área de cobertura de la antena UHF externa PAL90209H de LAIRD Technology.....	90
Figura 36. Esquemático de los resultados obtenidos para el alcance de lectura de la antena LAIRD a una potencia de 20dBm (Véase figura 38) .....	91
Figura 37. Esquemático de los resultados obtenidos para el alcance de lectura de la antena LAIRD a una potencia de 25dBm (Véase figura 38) .....	92

Figura 38. Vista superior del plano azimutal de la zona de cobertura de la antena PAL90209H de LAIRD Technology para una etiqueta ShortDipole .....	93
Figura 39. Vista lateral del plano de elevacion de la zona de cobertura construido para la parte (a) izquierda y (b) derecha de la de la antena LAIRD .....	93
Figura 40. Área de cobertura considerada en los experimentos realizados.....	94
Figura 41. Escenario para la ejecución de experimentos en un ambiente <i>indoor</i> para (a) cilindros y (b) láminas.....	95
Figura 42. Escenario para la ejecución de experimentos en un ambiente <i>outdoor</i> para (a) cilindros y (b) láminas.....	95
Figura 43. Porcentaje de cambios del RSSI en un ambiente (a) <i>indoor</i> y (b) <i>outdoor</i>	98
Figura 44. Registro de nivel de RSSI durante el periodo de identificación en un ambiente <i>indoor</i> .....	99
Figura 45. Registro de nivel de RSSI con respecto al canal en un ambiente <i>indoor</i> .	100
Figura 46. Registro cronológico de nivel de RSSI durante el periodo de identificación en un ambiente <i>outdoor</i> .....	100
Figura 47. Registro de nivel de RSSI con respecto al canal en un ambiente <i>outdoor</i> .....	101
Figura 48. Diferencia absoluta entre el nivel de RSSI máximo y el mínimo con respecto a la distancia de separación en un ambiente (a) <i>indoor</i> y (b) <i>outdoor</i> .....	102
Figura 49. Registro del ángulo de fase con respecto a la frecuencia de operación durante el periodo de identificación en un ambiente <i>indoor</i> .....	103
Figura 50. Registro del ángulo de fase con respecto a la frecuencia de operación durante el periodo de identificación en un ambiente <i>outdoor</i> .....	104

Figura 51. Registro de observaciones consecutivas de ángulo de fase con respecto al tiempo en un ambiente <i>indoor</i> .....	104
Figura 52. Registro de observaciones consecutivas de ángulo de fase con respecto al tiempo en un ambiente <i>outdoor</i> .....	105
Figura 53. Registro de observaciones consecutivas de la variación de ángulo de fase con respecto al tiempo en un ambiente <i>indoor</i> .....	105
Figura 54. Registro de observaciones consecutivas de la variación de ángulo de fase con respecto al tiempo en un ambiente <i>outdoor</i> .....	106
Figura 55. Proporción de valores grandes en las variaciones de fase con respecto a la distancia de separación lector-etiqueta en un ambiente (a) <i>indoor</i> y (b) <i>outdoor</i> .....	107
Figura 56. Frecuencia Doppler promedio con respecto a la distancia de separación lector-etiqueta en un ambiente (a) <i>indoor</i> y (b) <i>outdoor</i> .....	108
Figura 57. Registro cronológico de la frecuencia Doppler instantánea de una etiqueta ShortDipole adherida a una estructura metálica separada 60cm de la antena lectora. Se considera la respuesta en el tiempo en un ambiente (a) <i>indoor</i> y (b) <i>outdoor</i> .....	109
Figura 58. Promedio de la distancia calculada para una etiqueta estática ubicada sobre (a) cilindro y (b) lámina en un ambiente <i>indoor</i> .....	112
Figura 59. Curvas de regresión lineal del modelo preliminar: Mediana de la distancia para una etiqueta ubicada sobre (a) cilindro y (b) lámina en un ambiente <i>indoor</i> .....	113
Figura 60. Histograma de distancias estimadas por el modelo preliminar con una etiqueta ubicada sobre una lámina metálica a 1.5m de separación con la antena lectora: (a) <i>histograma</i> , (b) <i>histograma siguiendo la regla de Sturges</i> .....	114
Figura 61. Curvas de regresión lineal del modelo final: Mediana de la distancia calculada para una etiqueta estática en un ambiente (a) <i>indoor</i> y (b) <i>outdoor</i> .....	116

Figura 62. Comportamiento del porcentaje de cambios en el nivel de RSSI los sentidos (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente <i>indoor</i> .....	119
Figura 63. Comportamiento del porcentaje de cambios en el nivel de RSSI con respecto a la velocidad en los sentidos de movimiento (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente <i>outdoor</i> .....	120
Figura 64. Comportamiento de la diferencia absoluta del nivel de RSSI máximo y mínimo con respecto a la velocidad en los sentidos (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente <i>indoor</i> .....	121
Figura 65. Comportamiento de la diferencia absoluta del nivel de RSSI máximo y mínimo con respecto a la velocidad en los sentidos (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente <i>outdoor</i> .....	122
Figura 66. Comportamiento temporal del nivel de RSSI en los sentidos de movimiento “Saliendo” y “Entrando” para un cilindro metálico en un ambiente <i>outdoor</i> que se desplaza a una velocidad de (a) 0.2m/s y (b) 1.2m/s.....	123
Figura 67. Comportamiento temporal del nivel de RSSI para una lámina metálica en un ambiente <i>indoor</i> que se desplaza a una velocidad de (a) 0.2m/s y (b) 1.2m/s .....	124
Figura 68. Proporción de variaciones grandes de fase con respecto a la velocidad en los sentidos (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente <i>indoor</i> .....	125
Figura 69. Proporción de variaciones grandes de fase con respecto a la velocidad en los sentidos (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente <i>outdoor</i> .....	126
Figura 70. Comportamiento de la frecuencia Doppler promedio con respecto a la velocidad de desplazamiento en los sentidos (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente <i>indoor</i> .....	128

Figura 71. Comportamiento de la frecuencia Doppler promedio con respecto a la velocidad de desplazamiento en los sentidos (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente <i>outdoor</i> .....	129
Figura 72. Comportamiento de la frecuencia Doppler en el dominio del tiempo .....	130
Figura 73. Trazabilidad estimada para una lámina metálica que se desplaza en un ambiente <i>indoor</i> (a) “Entrando” con una velocidad de 0.2m/s sin calibración, (b) “Entrando” con una velocidad de 0.2m/s con calibración, (c) “Saliendo” con una velocidad de 1.2m/s sin calibración, (d) “Saliendo” con una velocidad de 1.2m/s sin calibración. ....	133
Figura 74. Movimiento interrumpido: (a) Fase, (b) RSSI, (c) frecuencia Doppler y (d) trazabilidad .....	135
Figura 75. Movimiento interrumpido: (a) Proporción de variaciones grandes del ángulo de fase, (b) Porcentaje de cambios de nivel de RSSI y (c) Diferencia absoluta de RSSI máximo y RSSI mínimo. ....	136
Figura 76. Escenario del experimento de validación diseñado en los ambientes <i>indoor</i> y <i>outdoor</i> .....	137
Figura 77. Vista superior del escenario considerado para el experimento.....	138

## RESUMEN

La emisión y recepción de señales de radio en la banda UHF (Ultra-Alta Frecuencia 860MHz-960MHz) constituye el método de operación utilizado por los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID) pasivos analizados en esta investigación. Esta forma de comunicación permite identificar objetos dentro de una zona de cobertura sin necesidad de un campo visual directo. Sin embargo, las prestaciones de estos sistemas han sido cuestionadas cuando los artículos etiquetados son estructuras metálicas en movimiento que atraviesan áreas con amplia densidad de etiquetas estáticas. En estos casos la identificación generalmente no es adecuada.

En la banda UHF los metales reflejan la energía emitida por el lector. Además, las ondas electromagnéticas transmitidas al entrar en contacto con superficies conductoras inducen corrientes de Foucault con campos opuestos al del transmisor. Esto produce la atenuación o posible cancelación del campo necesario para la comunicación lector-etiqueta. Dado que el ítem de interés está en movimiento el tiempo requerido para su identificación es limitado. Es posible que debido a la interferencia de una población de etiquetas estáticas el objeto abandone la zona de cobertura sin lograr ser identificado.

Con el propósito de mitigar las interferencias estáticas se ha propuesto investigar la viabilidad de añadir variables de radiofrecuencia (RSSI, frecuencia Doppler, ángulo de fase, frecuencia de operación) para la identificación y seguimiento de objetos metálicos en movimiento. Para ello, se ha decidido estructurar la investigación en cuatro fases. La primera corresponde a la consulta de métodos propuestos en la literatura para entornos dinámicos pero no metálicos. Seguidamente, se valora la influencia de variables de radiofrecuencia sobre el problema de investigación abordado a través de una serie de experimentos en dos ambientes: uno *indoor* y otro *outdoor*. Los experimentos incluyen el análisis del

comportamiento de las variables en objetos metálicos estáticos y en movimiento que se acercan o alejan del transmisor en un rango de 3 metros. En esta sección, se encontró que la mediana de la variación del ángulo de fase es el estadístico que mejor estima la distancia de separación lector-etiqueta a través de un modelo de regresión lineal para objetos metálicos estáticos. Luego, se propone un método inductivo experimental que estime el sentido de movimiento y la trazabilidad de los objetos metálicos considerando la información de las variables caracterizadas. Por último, se verifica el rendimiento del método en diferentes casos de estudio. En esta fase se considerará una etiqueta que se acerca o aleja del transmisor a diferentes velocidades en una zona con variedad de etiquetas estáticas adheridas a artículos metálicos.

El método propuesto es capaz de mitigar las interferencias en el proceso de identificación de objetos metálicos en movimiento con limitaciones que serán expuestas en el presente documento. La trazabilidad y el sentido de movimiento en el área de cobertura son registrados y enlazados a una base de datos empleando una estampa de tiempo y la información de las variables caracterizadas. Finalmente, se estima la velocidad del objeto con un porcentaje de error inferior al 25% descartando información interferente que provenga de etiquetas estáticas.

# I. INTRODUCCIÓN, CONTEXTO, FUNDAMENTO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE



---

*En esta parte se desarrolla la introducción al tema de investigación indicando el planteamiento del problema, las motivaciones para su realización, el alcance, las limitaciones y los objetivos, los antecedentes generales, fundamento teórico y estado del arte.*

---



# 1. INTRODUCCIÓN

La investigación presentada en este documento surge de la necesidad de desarrollar sistemas de identificación automática para apoyar la gestión logística de los productos metálicos fabricados en la industria siderúrgica. En este contexto, los sistemas basados en tecnología RFID (Identificación por radiofrecuencia) en la banda UHF (Ultra-Alta Frecuencia 860MHz-960MHz) surgen como una propuesta con tendencia a sustituir los tradicionales códigos de barra.

Los códigos de barra operan bajo la impresión de una imagen con líneas de diferentes anchos que representan un código cifrado, UPC (Código Universal de Producto), el cual es capturado por un escáner óptico unidireccional. Estos sistemas limitan la identificación de los productos al campo visual del dispositivo de detección. Adicionalmente, la capacidad de almacenamiento de información se restringe a la ubicación de barras consecutivas más finas sobre el área de impresión de la imagen. Esto incrementa el tamaño de las etiquetas y el costo de implementación, al tiempo que disminuye el alcance de detección del sistema de identificación. Además, editar la información del producto requiere el reemplazo total de la imagen impresa. Este hecho afecta significativamente la proyección de costos por producto terminado en las empresas que actualmente implementan este tipo de sistemas [1].

A diferencia de los tradicionales códigos de barras, los sistemas RFID no necesitan un campo de visión directa para la identificación de objetos. De esta forma reducen tiempo y costos de ejecución de procesos. En ellos, la identificación se realiza a partir de ondas de radio que comunican inalámbricamente un lector con etiquetas RFID distribuidas dentro del área cubierta por la antena utilizada [1]. Lastimosamente, los sistemas RFID presentan una significativa disminución de su rendimiento cuando operan en presencia de superficies húmedas y estructuras metálicas [2]. En la banda UHF, los metales reflejan la energía de las ondas emitidas por el lector RFID. Los líquidos, por su parte, la absorben y atenúan [3]. Además, en presencia de metales se produce un fenómeno electromagnético conocido como corrientes de Foucault [3]. Básicamente, cuando la antena de una etiqueta se aproxima a una superficie

conductora, la interferencia del campo electromagnético del lector con el metal induce corrientes de “torbellino” cuyo campo magnético se opone al aplicado. Cuanto mayor sea la potencia de la señal transmitida por el lector o mayor la conductividad del conductor, mayores serán las corrientes de Foucault y los campos opositores generados. Esto puede producir la atenuación o cancelación total del campo requerido para el proceso de comunicación lector – etiqueta [4].

La Universidad del Norte en proyectos anteriores ha venido trabajando en la construcción de un sistema RFID pasivo en la banda UHF capaz de realizar el inventario de estructuras metálicas. Algunos de los avances en este esfuerzo han sido reportados en [5] y [6]. Hasta el momento, los resultados incluyen la caracterización de lectores, etiquetas y antenas para la determinación de alcances y limitaciones en la implementación de sistemas RFID sobre superficies metálicas estáticas [5] y equipos de la red eléctrica [6]. Sin embargo, no se había abordado hasta el momento el estudio de sistemas de identificación por radiofrecuencia UHF pasivos para la trazabilidad (*tracking*) de objetos metálicos en movimiento. La identificación de un producto metálico etiquetado que se moviliza dentro de una bodega en una empresa siderúrgica podría visionarse como un desafío si se considera la multitud de artículos estáticos etiquetados que podrían interferir en la comunicación. Además, el hecho que el objeto se encuentre en movimiento sugiere la necesidad que el sistema identifique el producto de interés en el menor tiempo posible.

Teniendo en cuenta lo anterior, la presente investigación permitirá evaluar el comportamiento de las variables de radiofrecuencia obtenidas durante el proceso de identificación de objetos metálicos en movimiento. Esto con el propósito de establecer criterios de decisión que permitan descartar entre etiquetas RFID ubicadas sobre objetos metálicos estáticos y en movimiento. Con ello se pretende mitigar las interferencias producidas por etiquetas estáticas vecinas y dar trazabilidad a los artículos de interés.

## 1.1. Planteamiento del problema

Las industrias siderúrgicas del departamento del Atlántico poseen un vasto volumen de activos metálicos almacenados en sus bodegas. Con las firmas de los diferentes TLC (Tratado de Libre Comercio) aumenta la producción de artículos de acuerdo con la demanda nacional e internacional. Este hecho sugiere la necesidad de identificar los productos que entran, salen y permanecen en sus instalaciones durante la ejecución de la cadena de suministro. Actualmente, estas empresas utilizan códigos de barra para identificar las variedades de sus productos: rollos metálicos, perfiles, láminas de acero, tejas, entre otros.

Para el proceso de inventario y despacho de productos de una planta a otra, los operarios deben ir a cada artículo para identificar su código de barra con lectores ópticos de corto alcance. En otras compañías menos especializadas el proceso se realiza anotando manualmente en listas los números de serie de cada producto. Esta tarea demanda tiempo, costos de mano de obra y cese de actividades de la planta mientras se registra el lote de productos. Adicionalmente, este proceso suele presentar partidas conciliatorias, es decir, diferencias entre el saldo físico y el del sistema las cuales luego deben ser ajustadas.

El control de inventario en las empresas siderúrgicas es complejo dadas las dimensiones físicas (pesos en toneladas y alturas en metro) de las estructuras metálicas. Esto representa inconvenientes para el personal técnico debido a que requieren horas para realizar inventarios y actualizar la información de sus productos. A menudo se deben utilizar montacargas para mover el material al que se le está realizando el inventario, incurriendo en elevados costos operativos. Con ello se identifica la necesidad de diseñar sistemas de información del estado de los activos implementando el *internet de las cosas*.

En los sistemas de identificación por códigos de barra cualquier tipo de obstáculo puede distorsionar la lectura de las etiquetas. Para aumentar la capacidad de almacenamiento se requiere la impresión de más barras las cuales ocupan mayor espacio y son identificadas a menor distancia. Finalmente, cambiar la información del

código de barra demanda el reemplazo total de la etiqueta lo cual aumenta los costos por artículo producido.

El Grupo de Investigación de **Telecomunicaciones y Señales** de la Universidad del Norte se encuentra trabajando en la construcción de un sistema RFID pasivo que opere de forma eficiente sobre objetos metálicos en movimiento. Con estos sistemas en la banda UHF es posible registrar la trazabilidad de los productos en un rango de hasta 4 m. Sin embargo, durante el proceso de identificación se presentan múltiples reflexiones de la señal sobre las superficies metálicas, las cuales pueden generar fallas en la comunicación. Adicionalmente, se crean corrientes de Foucault que obstaculizan el flujo electromagnético incidente sobre la etiqueta RFID impidiendo su lectura. Esto produce que algunos productos metálicos en movimiento abandonen el área de cobertura sin ser identificados.

En este contexto, una propuesta para reducir la probabilidad de pérdidas de etiquetas (*TLP- Tag Loss Probability*) es aumentar la potencia del transmisor (lector RFID). Esto genera el ensanchamiento del área de cobertura (*coverage area*) y por lo tanto una mayor probabilidad de identificar todos los objetos metálicos de interés. Sin embargo, es posible que otras etiquetas adheridas sobre productos estáticos se encuentren dentro del alcance de la antena y también logren ser identificadas. De esta forma, la información recolectada luego del inventario y despacho de productos en portales RFID presenta inconsistencias, que pueden interpretarse como interferencias durante el proceso de identificación de objetos metálicos en movimiento.

De esta manera surge la pregunta principal a resolver: ***¿Es posible extraer información de variables de radiofrecuencia para asegurar la trazabilidad y mitigar interferencias durante la identificación de estructuras metálicas en movimiento en sistemas RFID?*** El principal problema de resolver esta pregunta consiste en la escasez de trabajos en torno a este tema.

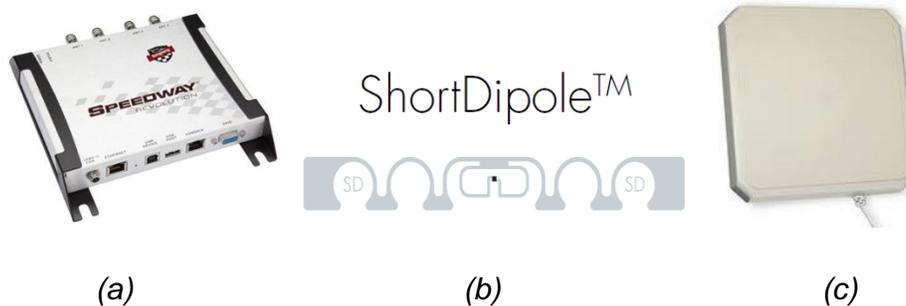
## 1.2. Antecedentes

Estudios relacionados con la identificación de objetos dinámicos que atraviesan un portal RFID han demostrado que las variables de radiofrecuencia pueden contener información relevante para la caracterización del movimiento. El nivel de RSSI y la frecuencia Doppler son variables que pueden proveer información acerca del sentido de movimiento de las etiquetas identificadas. Sin embargo, hasta el momento los trabajos se han dirigido hacia la identificación de objetos dinámicos en aplicaciones de *retail* para textiles, ropa y productos comerciales [10], seguimiento de pallets y cajas de cartón [11] [12], trazabilidad, identificación y control de acceso de personal [13] y artículos distintos a los objetos metálicos considerados en esta investigación.

El estudio de radares con tecnología Dual-Frequency (DF) [14] corresponde al enfoque que hasta el momento se ha estudiado para la estimación de distancia en sistemas RFID estáticos en la banda UHF [15]. Básicamente, la diferencia de fase existente entre dos frecuencias cercanas es el método de estimación empleado [16]. Este método es ampliamente utilizado en sistemas de identificación estáticos sin considerar objetos metálicos ni su movimiento dentro del área de cobertura. La degradación que sufre el sistema por la inducción de corrientes de Foucault explica la exclusión de estos materiales en los análisis presentados. Con esta investigación se pretende cerrar la brecha de investigación científica que se ha creado alrededor de la implementación de sistemas RFID para la identificación de objetos metálicos en movimiento.

Con el fin de estudiar el comportamiento del sistema para estructuras metálicas en movimiento el grupo de investigación de **Telecomunicaciones y Señales** de la Universidad del Norte en el año 2013 decidió construir un portal que monitoreara la salida y entrada de productos de la bodega de distribución de la empresa siderúrgica Acerías de Colombia, ACESCO S.A. Los productos fueron transportados por un montacargas a una velocidad de aproximadamente 1m/s. La configuración utilizada fue un sistema RFID tipo portal compuesto por una antena UHF externa PAL90209H de LAIRD Technology con polarización circular [9] conectada a un lector fijo Impinj Speedway Revolution R420 [7] y etiquetas RFID pasivas tipo ShortDipole [8] adheridas

a estructuras metálicas. En la figura 1 se presentan los dispositivos RFID utilizados para la construcción del sistema.



**Figura 1.** Dispositivos RFID del sistema RFID pasivo en la banda UHF para la identificación de objetos metálicos en movimiento: (a) Lector Impinj Speedway Revolution R420, (b) Etiqueta RFID pasiva ShortDipole, (c) Antena PAL90209H [9].

El montacargas transportó tanto cilindros metálicos como paquetes de láminas galvanizadas. La antena se ubicó en el extremo del portal a una distancia de 3 metros con respecto a la puerta de ingreso a la bodega. Las etiquetas fueron ubicadas al interior de los cilindros metálicos de 1 m de longitud con un diámetro interno (núcleo) de 30 cm, tal como muestra la figura 2. La prueba se realizó considerando la potencia máxima de transmisión, es decir, 30dBm. El lector utilizado tiene un receptor con sensibilidad de -80dBm.

El montacargas transportó en cuatro oportunidades el cilindro con EPC (*Electronic Product Code*) 300833B2DDD9014000000076 con movimientos “Entrando” y “Saliendo” de la bodega. Por simplicidad, se reconocerá al cilindro transportado como EPC 76. El paquete de láminas transportado se etiquetó con el EPC 14. En cada experimento se cargó un solo producto metálico ya sea el cilindro o el paquete de láminas galvanizadas. Para la identificación de los materiales etiquetados se programó en la interfaz de usuario del lector, *MultiReader v6.6.10.240*, un inventario continuo de 30 segundos. Se utilizó un computador con OS Windows 8.1 conectado al lector a través de un enlace de comunicación TCP/IP estático con dirección IP de red 192.168.0.0. El proceso de identificación inicia cuando el montacargas comienza su recorrido.



**Figura 2.** Configuración del sistema RFID pasivo UHF tipo portal en ACESCO S.A.

Al lado derecho del portal (ver figura 2) se dispuso una pirámide de siete rollos metálicos como lo presenta la figura 3. Los códigos de identificación para los rollos de esta pirámide fueron EPC 12, 13, 17, 27, 11, 16 y 18. Al terminar el proceso de identificación se observó que en tres de las cuatro repeticiones el producto metálico en movimiento logró identificarse. Además, en las tres oportunidades donde fue reconocido el objeto dinámico se identificaron con mayor tasa de lectura las etiquetas estáticas con EPC 12 y 27 (20 lecturas/segundo), por su cercanía a la antena del portal construido, por encima de la tasa de identificación de la etiqueta en movimiento (15 lecturas/segundo). Este hecho sugiere un análisis detallado del proceso de identificación para artículos metálicos en movimiento.



**Figura 3.** Pirámide de rollos estáticos interferentes en la identificación del producto metálico en movimiento transportado por el montacargas en el portal construido.

### 1.3. Justificación

Barranquilla es reconocida desde 1993 como Distrito Especial, Industrial y Portuario de la Región Caribe Colombiana. Se considera uno de los principales focos de desarrollo económico del país proyectándose como un centro logístico significativo. Las empresas mayormente reconocidas por sus productos de exportación en el Atlántico pertenecen a la industria siderúrgica, tales como ACESCO S.A. Gracias a las firmas de los diferentes TLC se hace necesario un control robusto de las TIC (Tecnologías de Información y Comunicación) en las industrias participantes. Con ello se reducirían los errores humanos en las operaciones logísticas y las extenuantes jornadas de inventario. La tecnología RFID ofrece llamativas prestaciones en este contexto.

Existen pocas aplicaciones registradas de sistemas RFID UHF pasivos en la industria siderúrgica debido a la degradación del sistema en presencia del metal causado por las corrientes de Foucault. Sin embargo, los ingenieros de POSCO, una de las productoras coreanas de acero más grandes del mundo, han diseñado un sistema capaz de monitorear cerca de dos millones de productos de acero al año usando tecnología RFID [3]. Con esta automatización se consiguió aumentar la satisfacción del cliente y reducir errores logísticos y cargos económicos. En este contexto, POSCO ha reducido cargos mensuales por \$1.4 millones de dólares [4]. Por lo tanto, integrar tecnología RFID en las operaciones logísticas de las industrias siderúrgicas del Atlántico tendría un impacto productivo y competitivo que podría dinamizar la economía de la región caribe.

La obtención de las variables radioelectrónicas para caracterizar los sistemas RFID pasivos permitirá mejorar el desempeño del proceso de comunicación lector-etiqueta mitigando interferencias durante la identificación de objetos metálicos en movimiento. Estas variables (RSSI- *Received Signal Strength Indicator*, variación del ángulo de fase, frecuencia Doppler, entre otras) pueden ser obtenidas directamente del protocolo LLRP (*Low Level Reader Protocol*) luego de un ciclo de inventario.

El problema de investigación supone la consulta e implementación de técnicas experimentales que permitan extraer información de variables radioelectrónicas para caracterizar objetos metálicos en movimiento. Esta caracterización permitirá la estimación del sentido de movimiento y la trazabilidad de los productos utilizando una estampa de tiempo. Con ello se pretende mitigar interferencias disminuyendo la probabilidad que los objetos salgan del área de cobertura sin ser identificados (TLP), o en su defecto, que se identifiquen productos estáticos debido a las reflexiones de la señal.

Se espera con la investigación extender los resultados obtenidos hasta la fecha en cuanto a sistemas RFID pasivos en la banda UHF sobre el metal desarrollados por el Grupo de Investigación en Telecomunicaciones y Señales de la Universidad del Norte. Esto con miras a la construcción de un sistema de identificación y control de inventario para las industrias siderúrgicas del Atlántico que participen en los diferentes TLC. A continuación se presenta los impactos que llegaría a tener la investigación.

### **1.3.1. Impacto científico – tecnológico**

La investigación propuesta permitirá plantear un método para la mitigación de interferencias y el mejoramiento del proceso de identificación de etiquetas RFID pasivas en movimiento en ambientes con densa población de etiquetas estáticas. Esto se realizará a partir de la introducción de variables de radiofrecuencia (RSSI, ángulos de fase, frecuencia Doppler, patrón de radiación) para la discriminación entre objetos metálicos estáticos y en movimiento y la disminución de la probabilidad que objetos en movimiento abandonen el área de cobertura sin ser identificados.

Adicionalmente, el método propuesto permitirá sentar las bases y abrir las puertas para la implementación de muchos más métodos que puedan ser propuestos en torno a la identificación de objetos metálicos en movimiento a partir de sistemas RFID pasivos en la banda UHF. Las variables de radiofrecuencia analizadas para tal fin podrían aumentar y de esta forma ofrecer mayor información sobre la trazabilidad y el estado de los objetos metálicos en movimiento. Por último, aunque existe una serie de estudios que abordan la caracterización de sistemas RFID sobre metal y la

identificación de objetos en movimiento ambas temáticas se presentan por separado en la literatura. En este aspecto, el método propuesto presenta carácter innovador y ofrece información que podría utilizarse para futuras investigaciones.

### **1.3.2. Impacto en la producción y la competitividad**

Barranquilla es considerada un importante centro industrial, comercial, marítimo y fluvial de la privilegiada geografía Colombiana. Esta ciudad se proyecta como un centro logístico significativo, gracias a la firma de diferentes TLC. Debido a esto, es importante conocer e investigar la aplicación de sistemas RFID en la región Caribe colombiana, como una oportunidad de perfeccionar el desarrollo de las operaciones logísticas en la empresa siderúrgica.

La mitigación de interferencias de objetos metálicos en movimiento abre la posibilidad de crear sistemas informáticos de gestión logística para productos metálicos en movimiento en la empresa siderúrgica que utilice información extraída de variables de radiofrecuencia. Esto permitiría perfeccionar operaciones de trazabilidad en procesos logísticos y la implementación de estrategias de despacho organizado de materiales para la participación de la industria siderúrgica de Barranquilla en el mercado nacional e internacional. Con ello se aprovecharía no solo su posición geográfica privilegiada sino también la aplicación de soluciones de ingeniería a los problemas logísticos de la industria.

## 2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1. Objetivo General

Evaluar la influencia de variables de radiofrecuencia para la mitigación de interferencias durante la identificación de objetos metálicos en movimiento en sistemas RFID pasivos en la banda UHF.

### 2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar las variables de radiofrecuencia que permitan discriminar entre objetos metálicos estáticos y en movimiento durante el proceso de identificación.
- ✓ Desarrollar un método que estime el sentido de movimiento y la trazabilidad de los objetos metálicos descartando información interferente a partir de las variables de radiofrecuencia escogidas.
- ✓ Evaluar el rendimiento del método desarrollado en diferentes casos de estudio.

## 3. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1. Alcances de la Investigación

- ✓ Se realizará la caracterización de por lo menos dos variables de radiofrecuencia para la identificación de objetos metálicos en movimiento: RSSI, Frecuencia Doppler.
- ✓ El sistema de identificación por radiofrecuencia será simulado a través de un modelo físico compuesto por un lector RFID, una antena UHF externa y etiquetas RFID pasivas.
- ✓ El sistema modelado utilizará parámetros de comunicación reales del lector fijo RFID y la antena UHF utilizada: Frecuencia de operación, tipo de modulación, potencia de transmisión del lector, tasa de transmisión, alcance máximo de lectura, patrón de radiación y ganancia de la antena UHF.
- ✓ La obtención de los datos utilizados para la caracterización de las variables de radiofrecuencia se realizará utilizando el protocolo LLRP propio del lector RFID escogido.
- ✓ Para cada una de las etiquetas identificadas se llevará el registro de su identificación a través de una estampa de tiempo.
- ✓ Para cada estampa de tiempo se registrará por lo menos una variable de radiofrecuencia.
- ✓ Se incorporarán los parámetros leídos en una base de datos en Excel que contenga información de las etiquetas utilizadas.
- ✓ La interfaz de usuario diseñada permitirá visualizar información de las etiquetas en movimiento identificadas (EPC, RSSI, frecuencia Doppler, diferencia de fase, trazabilidad del movimiento durante el tiempo de identificación) luego de cargar los datos recopilados en el inventario.
- ✓ Se realizará un análisis off-line de los datos recopilados en el proceso de identificación. Luego de almacenar la información en la base de datos esta será analizada en una interfaz distinta a la utilizada para la recopilación de los datos del inventario.

- ✓ Se considerarán por lo menos cinco velocidades distintas de los objetos en movimiento que se encuentren dentro del rango permitido en la operación de vehículos montacargas y/o bandas transportadoras.
- ✓ Para la evaluación del rendimiento del método desarrollado se medirán parámetros propuestos en la literatura como: porcentaje de lecturas correctas (lecturas deseadas), falsos positivos (objetos estáticos consideradas como dinámicos) y falsos negativos (objetos dinámicos considerados como estáticos).

### 3.2. Limitaciones de la Investigación

- ✓ Para el sistema RFID simulado sólo se tendrán en cuenta la etiqueta UHF pasiva ShortDipole fabricada por SMARTRAC para funcionar sobre superficies metálicas.
- ✓ El método será evaluado con una sola etiqueta RFID pasiva en movimiento y más de una etiqueta sobre objetos metálicos estáticos.
- ✓ La velocidad promedio de desplazamiento corresponde a la de un vehículo montacargas y/o una banda transportadora. Esta velocidad no debe superar los 4.32 km/h, es decir 1.2 m/s.
- ✓ Sólo se evaluará la dirección de flujo de entrada/salida de etiquetas en el área de cobertura: Sentido de movimiento “Entrando” / “Saliendo”.
- ✓ Se construirá el prototipo del sistema RFID bajo la participación de un único lector y éste será fijo. No se garantiza la optimización de su consumo de energía.
- ✓ Las pruebas para la validación del método propuesto se realizarán considerando solamente dos tipos de ambiente: uno *indoor* y el otro *outdoor*.
- ✓ En el sistema modelado solo se considerarán dos tipos de estructuras metálicas: láminas de 1m y cilindros con diámetro de 30cm.
- ✓ Los datos recolectados en el inventario desarrollado no serán transmitidos de manera inalámbrica ni automática a otro dispositivo remoto.
- ✓ En las etiquetas RFID a utilizar no se guardará información adicional al código EPC que identificará a cada producto de manera unívoca.
- ✓ Se considerará únicamente la máxima potencia de transmisión del lector utilizado la cual corresponde a 30dBm.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. Sistema de Identificación por Radiofrecuencia (RFID)

RFID, acrónimo de Identificación por radiofrecuencia es una tecnología de identificación automática que constituye una atractiva propuesta para la gestión, control y seguimiento de productos en las cadenas de suministro. Los sistemas RFID se basan en la comunicación inalámbrica entre el transmisor y el receptor mediante ondas de radiofrecuencia que operan en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical 900MHz–2.4GHz), aprobada en 1985 por la FCC (Comisión Federal de Comunicaciones) [17]. Esta banda ha sido reservada internacionalmente para uso no comercial del espectro electromagnético en áreas industriales, científicas y médicas.

La identificación por radiofrecuencia RFID es una tecnología que está creciendo rápidamente por el impacto económico que ha generado en las industrias. Entre la colección de ventajas de implementar tecnología RFID en lugar de cualquier otro sistema de auto-identificación se pueden mencionar las siguientes [18]:

- Permite almacenar y recolectar gran volumen de información sin mantener un contacto directo con la etiqueta.
- Brinda la posibilidad de modificar total o parcialmente la información grabada en la etiqueta las veces que sea necesario, siempre y cuando su memoria interna así lo permita.
- Posee la capacidad de recolectar información de un gran número de etiquetas al mismo tiempo, siempre y cuando se encuentren en el área de cobertura del lector.
- Al ser una tecnología con bajo índice de error, proporciona una trazabilidad fiable del movimiento de los artículos, siempre y cuando estos no sean objetos metálicos y superficies húmedas.
- Al ser una tecnología completamente automática se elimina la necesidad de intervención humana, lo que reduce errores de manipulación manual produciendo un aumento de eficiencia.

## 4.2. Componentes de un sistema RFID

Un sistema RFID consta de tres componentes principales: Una **etiqueta** que identifica cada objeto, un **lector** que solicita el código de identificación del objeto etiquetado y un **sistema de aplicación** en forma de arquitectura de red [17].

### 4.2.1. Etiquetas

Son dispositivos pequeños que pueden ser fijados en la superficie del objeto de interés y cumplen funciones de transmisión/recepción con un mecanismo de almacenamiento de información. Comúnmente conocidos como *tags* o *transponders*. Los tags contienen pequeñas antenas y circuitos integrados, que le permiten compartir información con el lector luego de haberse establecido la comunicación. Las etiquetas RFID responden a peticiones de los lectores mediante ondas de radiofrecuencia las cuales pueden ser enviadas aprovechando la energía recibida del lector o con ayuda de una fuente de alimentación externa. Cada etiqueta posee un número de identificación único, el cual es conocido como EPC [19].

Las etiquetas RFID pueden clasificarse de acuerdo con su fuente de alimentación en: activas, pasivas y semipasivas. Las **etiquetas activas** poseen una fuente de alimentación propia, proporcionando un mayor alcance. Pueden enviar información cada periodo de tiempo sin haberse presentado una solicitud por parte del lector. Las **etiquetas pasivas**, obtienen su energía del campo electromagnético emitido por el lector, tienen un coste reducido y un menor alcance en comparación los tags activos. Por último, las **etiquetas semipasivas** tienen alimentación externa para su circuitería de medición continua; sin embargo, su técnica para la transferencia de datos es la misma que la usada por las etiquetas pasivos [20]. La tabla 1 construida a partir de [21] y [22] compara las etiquetas pasivas y activas en sistemas RFID.

Parámetro	Etiquetas pasivas	Etiquetas activas
<b>Potencia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) No autoalimentado (reciben su alimentación del campo electromagnético recibido del lector)</li> <li>(2) Requieren de lectores de mayor potencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Autoalimentadas a través de fuente de energía interna</li> <li>(2) Pueden funcionar con eficiencia con lectores de menor potencia</li> </ul>
<b>Alcance de lectura</b>	Típicamente por debajo de los 3 metros	Pueden alcanzar o superar los 30 metros
<b>Rendimiento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Bajas tasas de transmisión de datos</li> <li>(2) Susceptible al ruido</li> <li>(3) Mayor sensibilidad a la orientación</li> <li>(4) Menor número de etiquetas puede ser leído de forma simultánea</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Tasas de transmisión de datos más altas</li> <li>(2) Mayor inmunidad al ruido</li> <li>(3) Menor sensibilidad a la orientación</li> <li>(4) Más etiquetas pueden ser leídas de forma simultánea</li> </ul>
<b>Capacidad de Lectura/Escritura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) En su mayoría de sólo lectura</li> <li>(2) Pueden también ser EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)</li> </ul>	Etiquetas de lectura/escritura
<b>Costo</b>	Menor a \$1 US/etiqueta	No supera los \$20 US/etiqueta
<b>Tamaño y dimensiones físicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Pequeñas dimensiones</li> <li>(2) Menor peso debido a la ausencia de batería interna</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Más grandes que las etiquetas pasivas</li> <li>(2) Mayor peso debido a la batería interna</li> </ul>
<b>Vida útil</b>	Larga vida operacional (no tiene expiración eléctrica)	Limitada vida operacional debido a la batería interna (10 años)
<b>Aplicaciones Generales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Bienes de consumo</li> <li>(2) Seguimiento de la cadena de suministro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Seguimiento de activos de elevada cuantía</li> <li>(2) Seguridad del personal</li> </ul>

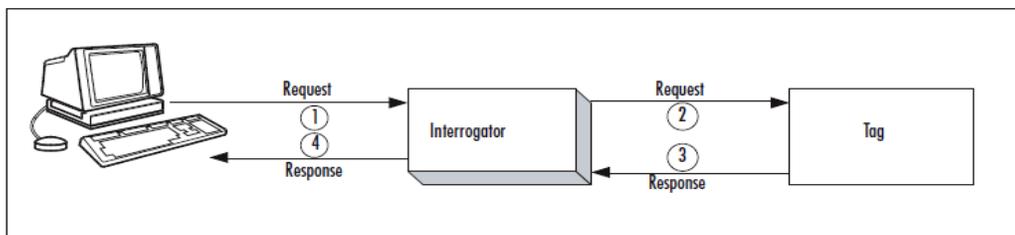
**Tabla 1.** Comparación entre etiquetas activas y etiquetas pasivas

#### 4.2.2. Lector

Un lector o interrogador (*interrogator*) es el componente del sistema RFID que obtiene la información de las etiquetas y la envía como entrada a otro proceso del

sistema. La figura 4 de [19] presenta la forma como funciona un lector dentro de un sistema RFID. La secuencia de pasos corresponden a:

- (1) El lector recibe una solicitud de información desde el servidor del sistema.
- (2) El lector envía la solicitud a través de una(s) antena(s) UHF a las etiquetas dentro de su zona de cobertura.
- (3) Las etiquetas responden con la información solicitada mediante el fenómeno de retro-dispersión o *Backscattering*.
- (4) El lector envía la información capturada al servidor del sistema.



**Figura 4.** Operación de un lector en un sistema RFID

Las etapas (1) y (2) corresponden a la comunicación desde el lector hacia la etiqueta y es denominada enlace de bajada (*downlink*). Análogamente, las etapas (3) y (4) hacen referencia a la comunicación desde la etiqueta hacia el lector llamada enlace de subida (*uplink*) [19].

Tanto los lectores como las etiquetas poseen antenas que permiten la transmisión y recepción de información en forma de ondas electromagnéticas. En el caso de los lectores, estas antenas pueden ser internas o externas. De acuerdo con su tecnología, los lectores RFID pueden clasificarse en:

- **Lectores Fijos:** Se encuentran ubicados en lugares estratégicos donde se espera un tráfico de objetos a identificar. Estos lectores requieren de antenas externas para transmitir la señal RF al medio, las cuales deben ser conectadas como periféricos a sus puertos de entrada/salida.
- **Lectores móviles:** Ofrecen máxima flexibilidad pero están compuestos por una pequeña antena interna, lo cual reduce su alcance

### 4.3. Clasificación de los sistemas RFID

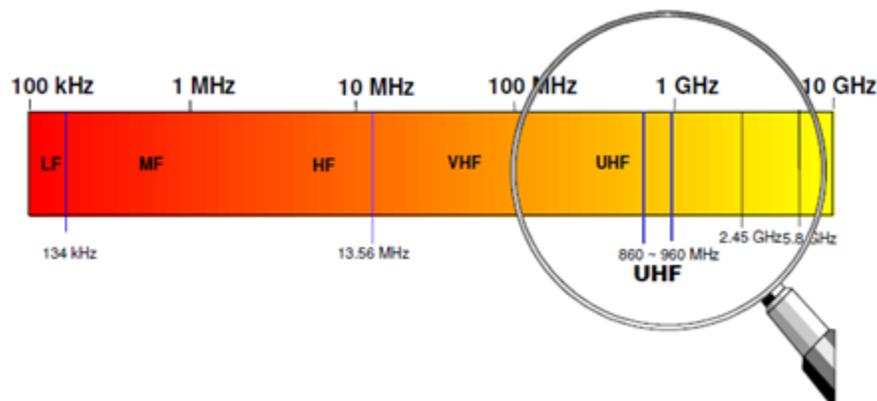
Los sistemas RFID pueden clasificarse de acuerdo con los siguientes criterios [21]:

#### A. Según el modo de alimentación de las etiquetas

- **Sistemas activos:** Son llamados de esta forma debido al empleo de etiquetas activas las cuales poseen una fuente externa de alimentación utilizada en sus operaciones.
- **Sistemas pasivos:** Este tipo de sistemas de identificación emplean etiquetas que no requieren de una batería para comunicarse con el lector. Su alimentación proviene de la señal recibida por el lector.

#### B. Según el rango de frecuencias de operación

- **Baja frecuencia (LF):** Se refiere a los sistemas RFID que operan en frecuencias inferiores a los 135kHz, en el rango de 125-134.2kHz [17].
- **Alta frecuencia (HF):** De acuerdo con [21] y [23] estos sistemas operan en la frecuencia 13.56MHz.
- **Ultra- Alta frecuencia (UHF):** Trabajan en la banda de 433MHz y 860-960MHz. La figura 5 presenta una perspectiva del espectro de las señales de radiofrecuencia [24].



**Figura 5.** Espectro de señales de radiofrecuencia

- **Frecuencia de Microondas (MW):** Comprende las frecuencias de operación a 2.45GHz a 5.8GHz [17].

En la tabla 2 presentada en [21] se resumen las características de los sistemas RFID clasificados de acuerdo con el rango de frecuencias de operación.

Parámetro	Baja Frecuencia (LF)	Alta Frecuencia (HF)	Ultra Alta Frecuencia (UHF)	Microondas (MW)
<b>Frecuencias</b>	125kHz-134kHz	13.56MHz	860MHz–930MHz	2.45GHz
<b>Tipo</b>	Pasivos	Básicamente pasivos	Activos y pasivos	Activos y pasivos
<b>Alcance</b>	Menor a 0.5 m	1.0m – 3.0 m	3.0m – 10m	Mayor a 10m
<b>Tamaño</b>	Muy grande	Grande	Pequeño	Pequeño
<b>Tasa de Transferencia de datos</b>	Baja	Media	Rápida	Muy rápida
<b>Rendimiento sobre agua y metal</b>	Muy bueno	Bueno	Malo	Pésimo
<b>Costo</b>	Alto	Bajo	El menor de todos	Alto
<b>Lectura ante interferencias EM</b>	Baja	Media	Rápida	Muy rápida

**Tabla 2.** Comparación de sistemas de identificación por radiofrecuencia de acuerdo con su frecuencia de operación

### C. Según el protocolo de comunicación utilizado

- **Duplex (DX):** La etiqueta transmite su información tan pronto como recibe la señal emitida por el lector y mientras esta se mantenga. Estas pueden ser [21]:
  - **Half Duplex (HDX):** En estos sistemas la etiqueta y el lector transmiten su información en turnos alternados.
  - **Full Duplex (FDX):** En este tipo de sistemas la comunicación del lector y la etiqueta se realiza de forma simultánea. En estos casos la etiqueta transmite a una frecuencia distinta a la portadora enviada por el equipo lector.

- **Secuencial:** El lector se apaga en intervalos generales en los cuales la etiqueta envía la información que almacena en su memoria interna.

#### D. Según el principio de propagación o tipo de acoplamiento etiqueta-lector

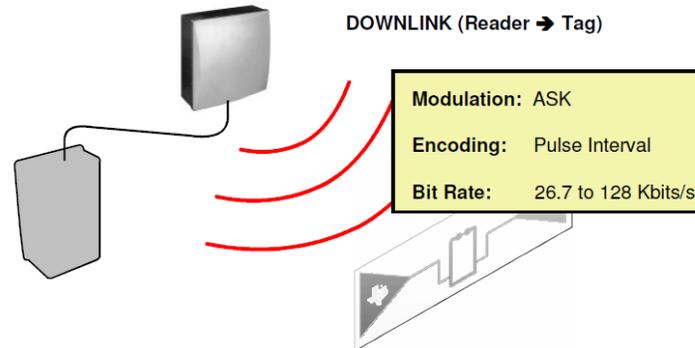
- **Inductivos:** En este tipo de sistemas se usa el campo magnético cercano (*near-field*) creado por la antena del transmisor (Lector RFID) para alimentar los circuitos internos de la etiqueta. En este grupo de sistemas RFID se encuentran los que operan en las frecuencias LF y HF.
- **Capacitivos:** Las etiquetas funcionan mediante la propagación de ondas electromagnéticas en el campo lejano (*far-field*) del transmisor. En este grupo se encuentran los sistemas UHF y microondas.

### 4.4. Especificaciones técnicas de sistemas RFID UHF

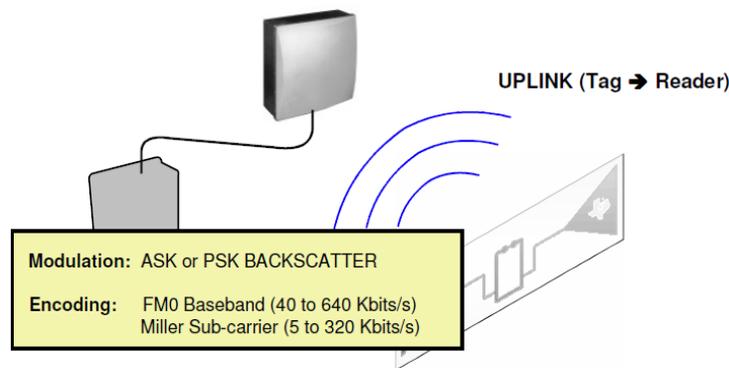
Cuando en el área de cobertura de un lector RFID existe una densa cantidad de etiquetas, el lector utiliza algoritmos anticollisión para evitar conflictos en la comunicación bajo el *Air Interface Protocol*, definido por la norma ISO/IEC 18000-6 del 2004 determinando las pautas para la comunicación lector-etiqueta. Otros protocolos de comunicación RFID, que permiten la certificación de lectores para operar en ambientes densos obedecen al estándar de comunicación EPCglobal Clase 1 Generación 2. Dicho estándar, aprobado por la norma, impone una serie de requerimientos especiales relacionados con el ancho de banda del espectro, los cuales deben cumplirse de forma estricta por los fabricantes de lectores RFID [1].

De acuerdo con [25] la codificación PIE (*Pulse Interval Encode*) es la utilizada por los sistemas RFID UHF pasivos. El resultado de esta codificación es una señal digital que debe convertirse a un formato analógico para ser transmitida por el canal de comunicación. Para ello, se emplean cualquiera de los siguientes tres tipos de modulación: (a) ASK: Modulación por desplazamiento de amplitud (*Amplitude Shift Keying modulation*), (b) FSK: Modulación por desplazamiento de frecuencia (*Frequency Shift Keying modulation*) y (c) PSK: Modulación por desplazamiento de fase (*Phase Shift Keying modulation*). De las tres modulaciones anteriores, la utilizada por el *Air*

*Interface Protocol* es la modulación ASK para el enlace de bajada y ASK o PSK para el enlace de subida [26]. La figura 6 y 7 de [24] ilustran el tipo de modulación considerada por el estándar de comunicación en los enlaces de bajada y subida [26].



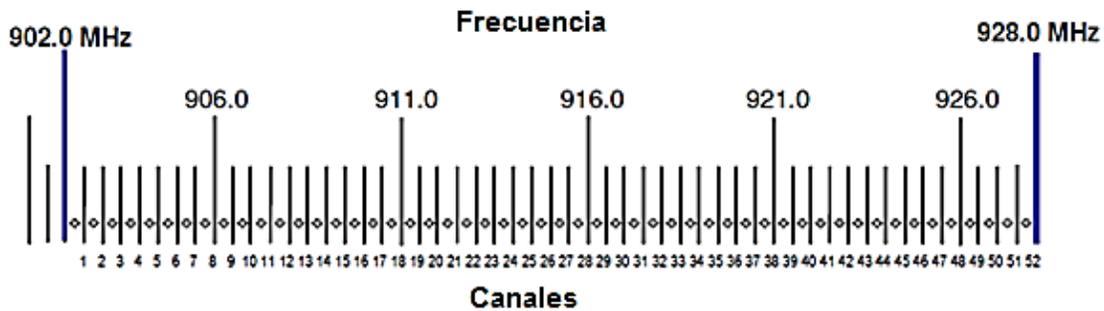
**Figura 6.** Características técnicas del enlace de bajada (lector → etiqueta) de sistemas RFID pasivos en la banda UHF



**Figura 7.** Características técnicas del enlace de subida (etiqueta → lector) de sistemas RFID pasivos en la banda UHF

Por otra parte, de acuerdo con [27] la frecuencia de operación en un sistema RFID pasivo no posee una portadora pura que se mantenga durante todo el proceso de comunicación. Por el contrario, es usual encontrar lectores RFID que transmitan señales de radiofrecuencia por salto de frecuencia (*Frequency Hopping*) dentro del intervalo definido por la norma ISO/IEC 18000-6, la cual regula la tecnología RFID pasiva para los diferentes países del mundo. En el caso de Colombia, la FCC ha determinado que el intervalo de frecuencias de operación para sistemas RFID pasivos en la banda UHF es de 902MHz –928MHz con divisiones de 500kHz en toda la banda. Este es el mismo intervalo de frecuencias utilizado en los Estados Unidos. La figura 8

presenta la división del espectro asignado a Colombia para la comunicación de sistemas RFID UHF pasivos con el fin de evitar interferencias con otras comunicaciones inalámbricas. La figura ilustra los 52 canales disponibles para la comunicación entre el lector y la etiqueta RFID con una EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) de 4W (36dBm).



**Figura 8.** Espectro electromagnético asignado a la comunicación de sistemas RFID pasivos en la banda UHF en Colombia

De acuerdo con [1], la norma PART 15.247 establecida por la FCC en Agosto 14 del 2006 dictamina que los sistemas con *Frequency Hopping* en la banda 902MHz - 928MHz deben tener como mínimo 50 saltos de frecuencia si el ancho de banda de cada salto es menor a 250kHz. Si el ancho de banda de cada salto está en el rango de 250kHz - 500kHz, el sistema debe tener como mínimo 25 saltos de frecuencia. En promedio, el tiempo que ocupa cada frecuencia no debe superar los 400ms en un período de 10 segundos. Además, no se permiten anchos de banda superiores a 500kHz. Para sistemas que posean menos de 50 canales para saltos de frecuencia, la potencia radiada se limita a 0.25W (24dBm). Para sistemas que tengan como mínimo 50 canales para saltos de frecuencia, puede transmitir a 1W (30dBm) [28]. Por mencionar un ejemplo, el lector fijo Speedway Revolution R420 de Impinj posee 50 canales de 500kHz dentro de los cuales se realiza el salto aleatorio y sincronizado de frecuencias [7].

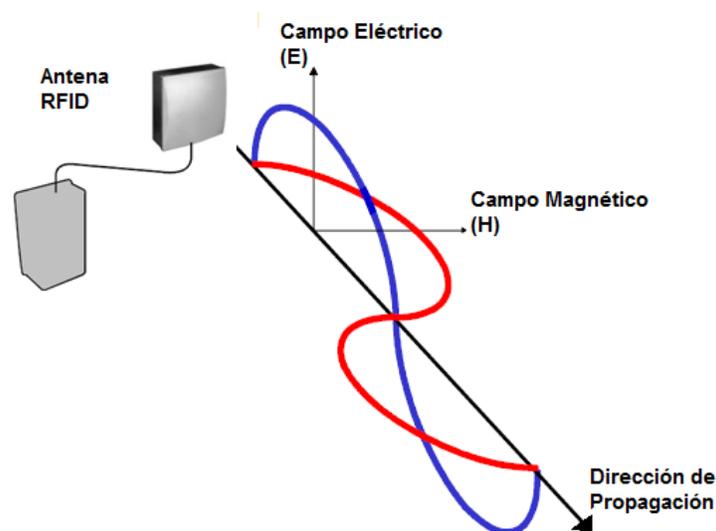
Por motivos de seguridad, los sistemas RFID emplean la técnica de modulación en espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS). Esta técnica consiste en la

asignación aleatoria de frecuencias portadoras por parte del transmisor, las cuales saltan en los distintos canales disponibles dentro del intervalo 902MHz-928MHz. De esta forma, los receptores no autorizados no podrán capturar la información completa. En su lugar, percibirán una especie de ruido de corta duración [28].

Por otro lado, las etiquetas pasivas RFID resuenan a la misma frecuencia de la señal enviada por el transmisor y responden modulando la señal sobre esta misma portadora [1]. En este aspecto, los rápidos saltos de frecuencia permiten la identificación de múltiples etiquetas en un proceso de comunicación.

#### 4.5. Principios de comunicación lector-etiqueta en sistemas RFID pasivos en la banda UHF

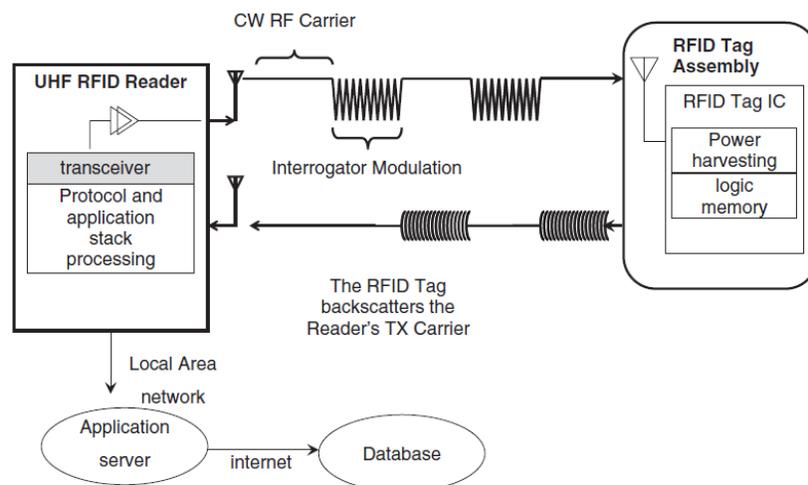
El fenómeno de **Backscattering** corresponde al proceso de detección utilizado por los radares comunes de radiofrecuencia en el cual la energía reflejada por el objeto identificado se transmite en dirección opuesta a las ondas de campo eléctrico incidentes. Las ondas de radio son señales electromagnéticas compuestas por campos eléctricos y magnéticos como lo muestra la figura 9 [24].



**Figura 9.** Ondas electromagnéticas emitidas por una antena RFID en la banda UHF

Análogamente, los sistemas RFID pasivos en la banda UHF pueden considerarse como radares “pasivos” que usan el campo eléctrico para transferir la potencia de las ondas de radio mediante un acoplamiento capacitivo entre el lector y la etiqueta. Las etiquetas RFID pasivas por su parte usan la retro-dispersión o *Backscatter* para responder a las solicitudes del lector. Esto se logra mediante el cambio del coeficiente de reflexión y la impedancia de su antena interna utilizando un circuito de derivación.

Como se muestra en la figura 10, en sistemas RFID pasivos el lector envía una señal portadora no modulada (CW) para alimentar los circuitos internos de las etiquetas. Esta onda se envía durante todo el proceso de inventario excepto durante el período que el lector solicita información específica a la etiqueta. Esto se realiza con el fin de mantener activos los circuitos de las etiquetas pasivas. Cuando la etiqueta está energizada, el lector envía una señal modulada para comunicar un comando del protocolo de comunicación “*Talk*”. Luego de enviar el comando el lector entra en modo de escucha “*Listen*”. Durante este período el lector envía la señal portadora no modulada hasta recibir la respuesta de la etiqueta que se encuentre en su área de cobertura. La etiqueta de interés responde mediante el fenómeno de *Backscattering* de la señal CW. Por lo cual, los sistemas RFID UHF pasivos forman enlaces Half-Duplex [29].



**Figura 10.** Diagrama esquemático del proceso de comunicación entre un lector RFID en la banda UHF con una etiqueta pasiva

Las etiquetas RFID pasivas en la banda UHF usan la región de campo lejano de la antena del lector para establecer la comunicación. La cantidad de potencia que recibe la etiqueta del lector puede ser aproximada mediante la **ecuación de transmisión de Friis**. Considerando la propagación en el espacio libre, la ecuación de Friis está dada por la siguiente expresión.

$$P_{tag} = g_{tag}g_{reader}P_{reader} \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (1)$$

Donde  $g_{tag}$  es la ganancia de la antena de la etiqueta,  $g_{reader}$  es la ganancia de la antena del lector RFID,  $P_{reader}$  es la potencia de salida emitida por lector,  $\lambda$  es la longitud de onda en el espacio libre y  $r$  es la distancia de separación entre las antenas tanto del lector como de la etiqueta. Se puede identificar de la ecuación 1 que el producto  $g_{reader}P_{reader}$  corresponde a la potencia radiada isotrópica equivalente (EIRP) de la antena del lector limitada por estándares y regulaciones como se observó en la sección anterior

Pueden presentarse casos donde las antenas del lector y de la etiqueta presenten polarización lineal y su orientación inadecuada cause pérdidas de potencia durante el enlace de comunicación. Esto debido a la falta de coincidencia en la orientación de las antenas producto de la polarización [30]. Teniendo en cuenta este hecho, son de mayor uso las antenas lectoras de polarización circular.

La cantidad de potencia suministrada al microchip de una etiqueta RFID no necesariamente es la máxima potencia posible de recepción. Si existe un desacople entre las impedancias de entrada del chip de la etiqueta y la impedancia de salida de la antena de la etiqueta, parte de la potencia que se transfiere desde la antena del lector hacia la etiqueta es reflejada y sólo una pequeña porción será recibida. Teniendo en cuenta posibles desacoples de impedancia y polarización, se reformula la ecuación de Friis de la siguiente manera:

$$P_{tag} = pqg_{tag}g_{reader}P_{reader} \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (2)$$

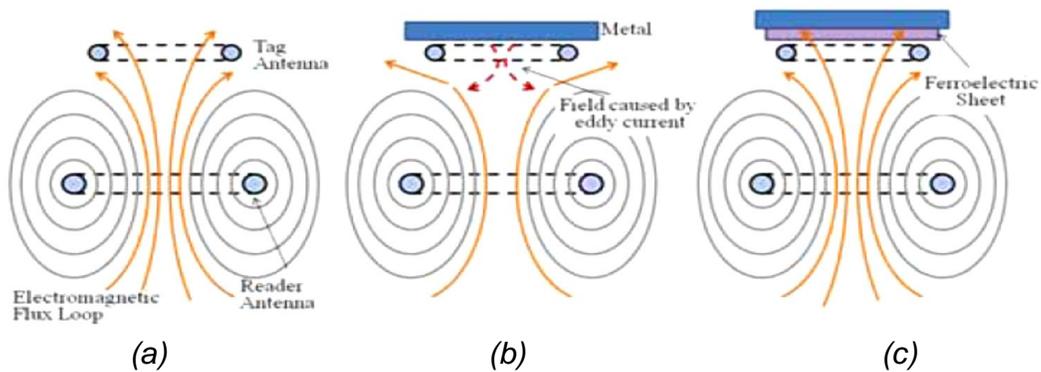
Donde  $p$  es el coeficiente que representa la fracción de potencia restante después de un desacople de impedancias mientras que  $q$  representa la fracción de potencia restante después de un desacople de polarización.

En un sistema RFID pasivo, una parte de la energía obtenida del campo emitido por el lector se utiliza para poner en funcionamiento los circuitos internos de la etiqueta [31]. Durante el enlace de comunicación la señal transmitida experimenta pérdidas de propagación que disminuyen al reducir la distancia de separación lector-etiqueta. Por lo tanto, la cantidad de potencia suministrada al microchip de la etiqueta debe ser suficiente como para asegurar el cumplimiento de todas las operaciones requeridas por el proceso de comunicación.

#### **4.6. Problemas durante la identificación de objetos metálicos en sistemas RFID pasivos en la banda UHF**

Diferentes tipos de materiales afectan el rendimiento de un sistema RFID en las frecuencias UHF [1]. En esta banda de frecuencias los metales reflejan la energía y los líquidos la absorben, provocando que el proceso de identificación se degrade. Las señales de radiofrecuencia de los sistemas RFID interfieren con el metal creándose corrientes de Foucault (*Eddy Currents*) que anulan el flujo electromagnético vital para el proceso de comunicación, ver figura 2. En este contexto, trabajar con sistemas RFID en la banda UHF para la identificación de estructuras metálicas a grandes distancias impone retos [3].

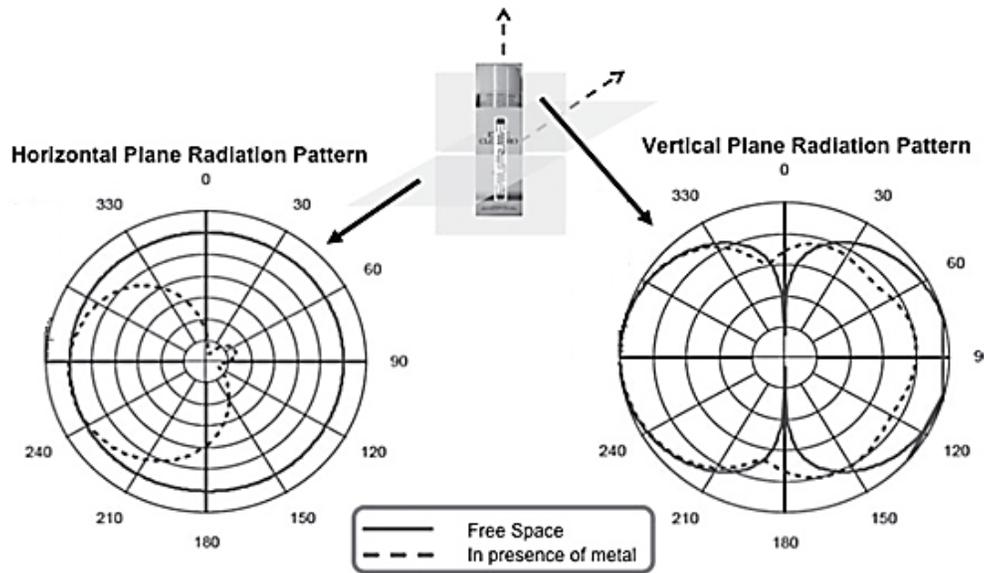
La figura 11 presenta el funcionamiento básico de las etiquetas RFID UHF pasivas cuando operan sobre superficies metálicas. En este tipo de sistemas, el canal de comunicación inalámbrico requiere la transmisión de señales de radiofrecuencia que permitan la aparición de un flujo electromagnético. Dicho flujo permite el proceso de identificación lector-etiqueta y es generado entre el área de radiación del lector y las etiquetas ubicadas dentro de la zona de lectura como lo muestra la figura 11 (a) [3].



**Figura 11.** Comunicación RFID sobre metal (a) Condición Normal. (b) Con superficies metálicas vecinas. (c) Con material dieléctrico que aisle las etiquetas [3].

En la figura 11(b) se presenta como cambia el proceso si se adhiere la etiqueta de la figura 11(a) sobre una superficie metálica. Cuando esto ocurre aparecen las corrientes de Foucault, las cuales generan un campo magnético contrario al del lector en las vecindades de la etiqueta, cancelándolo y degradando el proceso de comunicación lector-etiqueta. Una solución planteada en [3] y [4] a este inconveniente es incluir un material dieléctrico que provea una mínima separación entre la antena de la etiqueta y la superficie metálica, como se muestra en la figura 11(c). De esta forma, no se presenta pérdida de flujo manteniéndose una satisfactoria comunicación en el sistema. Utilizando esta alternativa y dependiendo del diseño de la etiqueta, la superficie metálica podría incluso potencializar la señal de respuesta de la etiqueta, alcanzando rangos de alcance insospechados como se evidencia en [5] y [6].

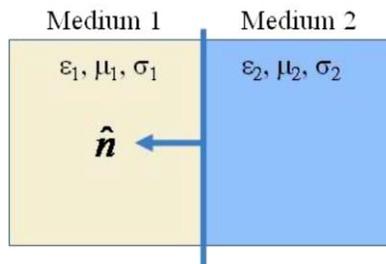
La antena de la etiqueta RFID cambia algunas de sus características radioelectrónicas (frecuencias de resonancia, impedancia de entrada, patrón de radiación entre otros) en presencia del metal como muestra la figura 12 [2] y [33]. Para mitigar los anteriores problemas se ha propuesto ubicar un material dieléctrico entre la etiqueta y la superficie metálica [3] y [5]. Sin embargo, para artículos metálicos en movimiento se ha observado que algunas etiquetas abandonan el área de cobertura sin ser identificadas, fenómeno conocido como **TLP**. Se desea que TLP sea cero no importando la velocidad del objeto en movimiento.



**Figura 12.** Degradación del patrón de radiación de una etiqueta RFID UHF pasiva Alien Squiggle con antena ShortDipole sobre metal

#### 4.7. Ondas electromagnéticas en superficies metálicas

Por otro lado, el estudio de condiciones de frontera es utilizado para el modelado del esquema de propagación de ondas electromagnéticas que viajan a través de dos medios. En este aspecto, considerar fronteras de tipo metálico permitirá comprender el comportamiento de los sistemas RFID sobre metal.



**Figura 13.** Condiciones de frontera para la propagación de ondas electromagnéticas entre dos medios [34].

Considerando la figura 13 es posible observar que para una frontera encontrada entre dos medios de comunicación, un medio 1 con permitividad dieléctrica  $\epsilon_1$ ,

permeabilidad magnética  $\mu_1$  y conductividad eléctrica  $\sigma_1$  y un medio 2, con parámetros  $\varepsilon_2$ ,  $\mu_2$  y  $\sigma_2$ , las condiciones electromagnéticas generales de frontera se pueden expresar de forma vectorial. Las ecuaciones son definidas a continuación [34].

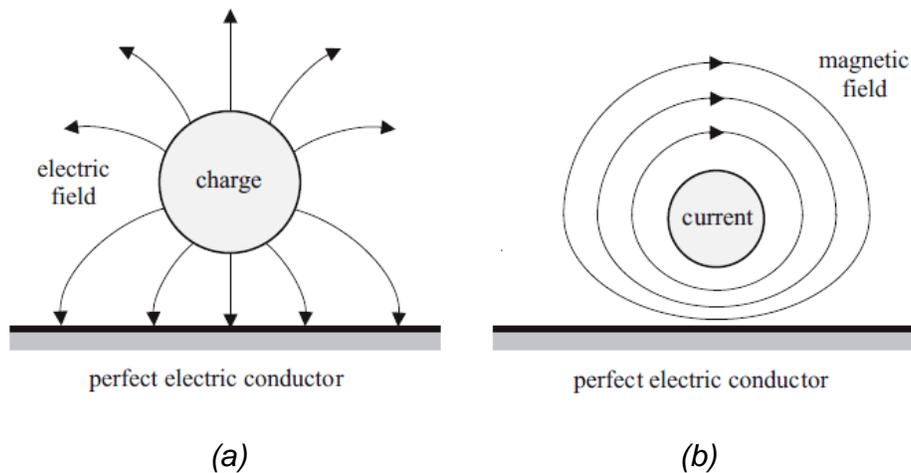
$$\begin{aligned}\hat{n} \times (\mathbb{E}_2 - \mathbb{E}_1) &= 0 \\ \hat{n} \times (\mathbb{D}_2 - \mathbb{D}_1) &= \rho_s \\ \hat{n} \times (\mathbb{H}_2 - \mathbb{H}_1) &= \mathfrak{J}_s \\ \hat{n} \cdot (\mathbb{B}_2 - \mathbb{B}_1) &= 0\end{aligned}$$

Donde  $\hat{n}$  corresponde al vector unitario normal a la frontera, dirigido desde el medio 2 hacia el medio 1, E y H las intensidades de campo eléctrico y magnético, respectivamente, D y B representan las densidades de flujo eléctrico y magnético respectivamente,  $\rho_s$  y  $\mathfrak{J}_s$  corresponden a la densidad de carga superficial y densidad superficial de corriente, respectivamente, que pueden existir en la frontera [34].

Si el medio 1 es un medio metálico y se asume un conductor eléctrico perfecto con conductividad infinita  $\sigma_1 \rightarrow \infty$ , no habrá ningún campo eléctrico en este medio; es decir,  $\mathbb{E}_1 = 0$ . Por consiguiente,  $\mathbb{D}_1 = 0$ ,  $\mathbb{B}_1 = 0$  y  $\mathbb{H}_1 = 0$ . Por lo tanto, para este caso, las condiciones se transforman a las expresiones:

$$\begin{aligned}\hat{n} \times (\mathbb{E}_2) &= 0 \\ \hat{n} \times (\mathbb{D}_2) &= \rho_s \\ \hat{n} \times (\mathbb{H}_2) &= \mathfrak{J}_s \\ \hat{n} \cdot (\mathbb{B}_2) &= 0\end{aligned}\tag{4}$$

A partir de la expresión anterior, se puede observar que sólo existen componentes perpendiculares del campo eléctrico, normales a la superficie de un conductor eléctrico perfecto. Por otro lado, hay ausencia completa de componentes normales del campo magnético en la superficie del material conductor. La figura 14 ilustra mejor el comportamiento de los campos eléctricos y campos magnéticos cercanos a una superficie metálica [32].



**Figura 14.** Comportamiento de las condiciones de frontera para (a) Campos eléctricos y (b) Campos magnéticos cercanos a superficies conductoras [32].

Los sistemas pasivos RFID en la banda UHF que usan etiquetas convencionales disminuyen su rendimiento y alcance de lectura cuando se adhieren a estructuras metálicas. Deben por lo tanto diseñarse etiquetas pasivas que sean capaces de trabajar con un buen rendimiento al adherirse a superficies metálicas [2].

#### 4.8. Cambio de parámetros de la antena de una etiqueta RFID pasiva en la banda UHF en cercanía de superficies metálicas

Por otra parte, parámetros de la antena de las etiquetas RFID tales como la impedancia de entrada, patrón de radiación, eficiencia, ancho de banda, directividad, entre otros, se ven afectados en presencia de metal. Los cambios en estos factores dependen de la forma y el tamaño de la estructura metálica, así como de la distancia de separación existente entre la antena y la estructura [35].

Antenas tipo dipolo eléctrico, cuyo patrón de radiación es omnidireccional en su línea transversal ecuatorial, puede llegar a convertirse en un patrón de tipo unidireccional cuando se coloca cerca de una superficie metálica. La directividad de la antena se puede modificar debido a las reflexiones causadas por el metal, las cuales

alteran la concentración de los campos electromagnéticos cerca de la antena [35]. Estos cambios producen efectos negativos como los que enunciados a continuación.

- ✓ **Desviación en la frecuencia resonante de la etiqueta:** La frecuencia de resonancia de un circuito sintonizado se expresa como se muestra en la ecuación 5. Los parámetros  $L$  y  $C$  corresponden a la inductancia y la capacitancia del circuito, respectivamente.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

Sobre superficies metálicas la impedancia del circuito que controla la antena de una etiqueta RFID cambia. Esto provoca una variación en la frecuencia de resonancia, que genera a su vez un cambio en la sintonización y por lo tanto, una reducción en el rango de lectura de la etiqueta. Este hecho muestra una degradación significativa en el comportamiento del sistema de identificación [32].

- ✓ **Disminución en el acople de impedancia:** La antena de la etiqueta es generalmente diseñada para tener una impedancia que coincida estrechamente con la del microchip. Así, se producirá una máxima transferencia de potencia [1]. Si se altera la impedancia de la antena de una etiqueta RFID por su cercanía a una superficie metálica, el acople de las impedancias se ve afectado. Esto produce una reducción de la cantidad de energía transferida de la antena de la etiqueta al microchip.

En el microchip de la etiqueta se encuentra almacenada toda la información grabada en la memoria interna que contiene desde el EPC hasta datos adicionales agregados por el usuario para un propósito específico. El fenómeno descrito desencadena la disminución del rango de lectura de la etiqueta respecto a las señales enviadas por el lector [2].

## 5. ESTADO DEL ARTE

### 5.1. Estado del arte en relación con soluciones propuestas a sistemas RFID UHF pasivos sobre superficies metálicas

Las investigaciones registradas en [3], [4] y [5] han planteado que las etiquetas RFID pasivas en la banda UHF requieren una separación dieléctrica del material conductor para su correcta operación. De acuerdo con [5] la separación recomendada es igual o superior a 2 cm para cualquier potencia de transmisión. El análisis presentado en [5] considera láminas y cilindros metálicos contruidos a escala para los cuales con distancias de separación inferiores a 2 cm la tasa de lectura disminuye considerablemente debido a la presencia de corrientes de Foucault.

Las distancias de separación consideradas en [5] van de 0 cm a 2.5 cm con incrementos de 0.5 cm en cada repetición. De acuerdo con [5], al analizar la tasa de lectura promedio (número de lecturas promedio registradas por segundo durante un período de inventario) de una etiqueta ShortDipole adherida a una pieza de madera, esta permanece constante en 15 lecturas/s no importando la distancia de separación entre el *inlay* y la superficie en madera. Para estos experimentos se consideraron potencias de 10dBm, 20dBm y 30dBm transmitidas por un lector RFID móvil que opera en la banda UHF AT870 fabricado por CAEN RFID [37]. La figura 15 presenta al lector RFID con antena interna de polarización circular utilizado en las pruebas registradas en [5]. La distancia de separación lector-etiqueta considerada fue de 1 m.

La tasa de lectura promedio ideal fue caracterizada en [5] y [6] para lectores RFID móviles y fijos. En el caso del AT870 la tasa de lectura promedio en condiciones ideales es de 15 lecturas/s. En cambio, para un lector fijo Impinj Speedway Revolution R420 con una antena externa LARID Technology la tasa de lectura promedio ideal es de 20 lecturas/s. El lector fijo mencionado se muestra en la figura 1.



**Figura 15.** Lector RFID móvil en la banda UHF AT870 de CAEN RFID

En [36] se realiza un análisis de las propiedades y parámetros eléctricos que se modifican en la antena de una etiqueta RFID pasiva en la banda UHF al acercarse al metal. En esta investigación se sugiere el diseño de antenas especiales para aplicaciones de sistemas de radiofrecuencia sobre superficies conductoras. En [20] se presentan resultados parecidos. La propuesta de estas investigaciones es modificar la estructura física de la antena de la etiqueta RFID o de su circuito interno para obtener un mejor comportamiento del sistema RFID en presencia de metales.

En [33] se presenta un análisis de la identificación de cápsulas y equipos farmacéuticos empacados en tres diferentes tipos de materiales: metales, vidrio y plástico. De forma similar a las consideraciones de esta tesis, los equipos se transportan sobre una banda transportadora. Las velocidades pueden modificarse desde los 0m/s hasta los 0.66m/s para garantizar la identificación de todos los productos. Se empleó un sistema de identificación por radiofrecuencia pasivo en la banda UHF. Se instalaron dos antenas lectoras una a lado y lado de la banda transportadora y un lector fijo Impinj Speedway UHF.

El estudio en [33] se basa en la escogencia de las etiquetas RFID que mejor comportamiento exhiban ante ambientes metálicos en movimiento, entre ellas se destacan la DogBone y ShortDipole.

## 5.2. Estado del arte en relación con técnicas y principios de estimación de distancias para etiquetas RFID UHF pasivas

La estimación de la distancia de separación entre el lector y una etiqueta para sistemas RFID ha sido tema de investigación en los últimos años. Técnicas basadas en trilateración, DOA (*Direction-of-arrival*) y características de propagación tales como niveles de RSSI, diferencias de tiempo (TDoA – *Time Difference of Arrival*) y mediciones de ángulos de fase analizadas para sistemas de radiofrecuencia con una o más antenas lectoras.

### 5.2.1. Técnicas basadas en trilateración

Este método de estimar la ubicación de los objetos etiquetados es analizado en [39]. De acuerdo con [39], este método es implementado para aprovechar la ubicación estratégica de múltiples antenas lectoras para determinar la posición de una etiqueta RFID en el rango de cobertura. Las antenas se ubican de forma horizontal y oblicua a diferentes distancias de separación entre ellas. Sin embargo, si las antenas son cambiadas de posición o la configuración del sistema varía es posible que la estimación de este método no sea certera.

### 5.2.2. Técnicas basadas en triangulación

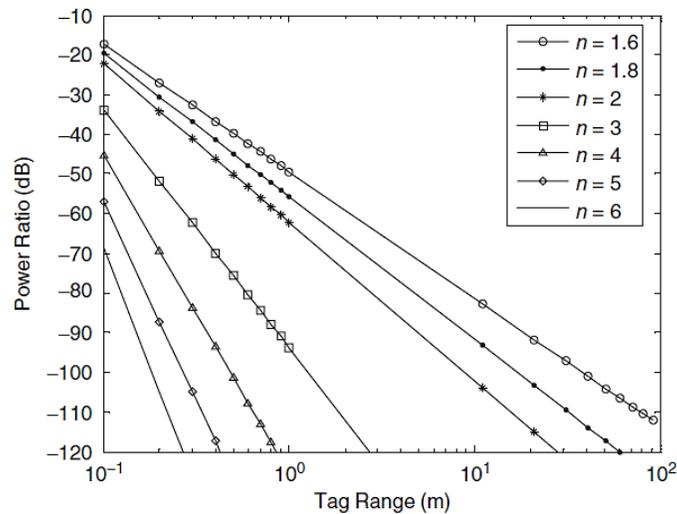
Esta técnica presentada en [16] consiste en la estimación de la distancia de una etiqueta RFID a partir de la medición del DOA de la señal recibida desde uno más puntos de referencia conocidos. El DOA puede ser obtenido usando antenas direccionales, matrices de fase o *Smart antennas*. Este tipo de soluciones son costosas y complejas para su implementación.

En [40] se presenta el diseño de un *array* de antenas inteligentes compuestas por cuatro módulos transmisores que pueden alternar los ángulos de directividad de sus patrones de radiación para cubrir un mayor número de etiquetas y estimar sus distancias a partir de la trigonometría de su estructura física y etiquetas de referencia.

En [41] la información obtenida del DOA de un *array antennas* de dos elementos independientes es utilizada para localizar y rastrear una etiqueta que se mueve sobre una banda transportadora. Con la orientación oblicua del *array* de antenas las etiquetas en la banda transportadora pueden ser localizadas con precisión utilizando la operación de triangulación.

### 5.2.3. Técnicas basadas en niveles de RSSI

Estas técnicas basan su análisis en la premisa que la fuerza de la señal recibida decrece a medida que aumenta la distancia. Sin embargo, la tasa de atenuación de un sistema RFID varía dependiendo de las condiciones del ambiente de propagación. Por lo cual, aplicaciones de estimación de distancias basadas en estas técnicas son altamente afectadas ante la presencia de obstáculos e interferencias del medio.



**Figura 16.** Relación entre  $P_{RxReader}/P_{TxReader}$  y la distancia estimada de una etiqueta RFID pasiva en la banda UHF para diferentes  $n$  (*path loss exponent*) utilizando técnicas basadas en niveles de RSSI

En [16] se propone un modelo que incluye la influencia del medio sobre la estimación de distancia. El modelo se expresa en la ecuación 6.

$$P_{RxReader} = P_{TxReader} \eta G_{tag}^2 G_{reader}^2 \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^{2n} \quad (6)$$

Donde  $P_{RxReader}$  y  $P_{TxReader}$  representan la potencia recibida y transmitida por el lector respectivamente,  $\eta$  representa la eficiencia de la transferencia de potencia de la etiqueta la cual típicamente es -5dB,  $G_{tag}^2$  y  $G_{reader}^2$  las ganancias cuadradas de la antena lectora,  $\lambda$  la longitud de onda,  $d$  la distancia de separación lector-etiqueta y  $n$  se refiere al exponente de pérdidas por el medio. En un ambiente *outdoor* el modelo sugiere un valor para  $n$  de 1.6 a 1.8. En el caso de un ambiente *indoor* se considera entre 2 y 6. La figura 16 muestra la relación propuesta por [16] entre el nivel de RSSI y la distancia de las etiquetas pasivas en la banda UHF del modelo considerado.

#### 5.2.4. Técnicas basadas en el ángulo de fase

Este método es el más utilizado para la estimación de distancias en sistemas RFID pasivos en la banda UHF. Investigaciones realizadas en [42] y [43] emplean la técnica basa en diferencias del ángulo de fase de la señal recibida por el lector para estimar la distancia a la que se encuentra una determinada etiqueta. Se basan en la técnica empleada por radares de onda continua *Dual-Frequency* (DF) y PDoA (*Phase Difference of Arrival*).

La estimación precisa de la ubicación de objetivos a través de tecnología radar de *Dual-Frequency CW* es realizada por medio de diferencias de fase encontradas en pequeñas diferencias en la frecuencia de transmisión. Los radares DF emplean dos portadoras distintas y realizan mediciones simultáneas de las variaciones de la fase con respecto al tiempo para cada una de las dos frecuencias de forma separada [38]. De esta forma, con la comparación de los ángulos de fase de las señales reflejadas por los objetos identificados es posible estimar la distancia a la que se encuentran ubicado.

Este método de localización es ampliamente utilizado en sistemas activos de identificación por radiofrecuencia. Las etiquetas activas de DF permiten la detección de presencia o ausencia de artículos en el área de cobertura. Luego de ser identificadas envían periódicamente información acerca de su estado actual al lector RFID en frecuencias distintas a las utilizadas por el interrogador [16].

Los sistemas RFID pasivos en las bandas LF/HF aplican los principios de operación de los radares DF usando dos frecuencias distintas: Una para el proceso de activación o energización de las etiquetas RFID pasivas y otra empleada durante el proceso de comunicación lector-etiqueta. De acuerdo con [16] esta tecnología ha sido fabricada y desarrollada por IPICO Inc., con el apoyo del fabricante de circuitos integrados EM- Microelectrónicas. Las etiquetas DF se basan en la tecnología radar. La frecuencia de energización de las etiquetas es 125kHz (LF) mientras que la comunicación con el lector se realiza a una frecuencia de 6.8MHz (HF). El empleo de dos portadoras distintas hace que este tipo de tecnología RFID tenga mayor alcance de lectura y aumente su inmunidad ante condiciones de ruido. La aplicación de esta tecnología en los sistemas RFID LF/HF difiere de las técnicas de radares DF mencionadas anteriormente. Básicamente porque las frecuencias transmitidas por el lector son empleadas en funciones diferentes. Por lo cual, no es posible encontrar diferencias de fase entre las dos frecuencias dado que solamente una de ellas es empleada para la comunicación entre el lector y la etiqueta.

En [42] se estima la distancia de etiquetas RFID pasivas en la banda UHF a través de la fase de la señal recibida por el lector PoA (*Phase of Arrival*) y el tiempo de la señal recibida ToA (*Time of Arrival*). En un ambiente de simulación se modela un sistema RFID pasivo a una frecuencia de 902.5MHz. La modulación de la señal enviada es ASK y de la recibida por el lector FSK. La señal recibida es procesada por el lector y separa en los canales de fase y cuadratura (I, Q) demodulando la señal a través de un detector de envolvente.

La fase de la señal recibida a una frecuencia instantánea específica se interpreta como la razón de las señales I y Q en el tiempo. En la simulación presentada en [42] la fase se calcula aplicando la función de arcotangente a las señales I y Q. El resultado de esta operación es una señal diente de sierra la cual se deriva con respecto al tiempo. Los cambios de la fase en el tiempo pueden expresarse en función de la frecuencia instantánea. La distancia estimada en [42] corresponde al promedio de las frecuencias instantáneas observadas durante el tiempo de identificación en un período de cambio

de fase. La simulación realizada en [42] no considera etiquetas en movimiento y tampoco el efecto de objetos metálicos etiquetados en el sistema de identificación.

Las patente [15] se realiza un análisis análogo al presentado en [42]. En esta investigación se obtiene un modelo lineal considerando solamente tres posiciones de una etiqueta en el área de cobertura de un lector. El resultado no menciona el estimador utilizado para encontrar la distancia. Esta es calculada como una razón de las componentes en fase y cuadratura de una señal de radio simulada. Al igual que [42] no considera objetos metálicos en movimiento.

### **5.3. Estado del arte en relación con técnicas para estimar la velocidad y sentido de movimiento de etiquetas RFID UHF pasivas**

#### **5.3.1. Considerando las variaciones del ángulo de la fase en el tiempo**

En [43] se realizan experimentos reales y simulaciones sobre un sistema RFID pasivo en la banda UHF con el fin de estimar la velocidad y la posición de una etiqueta que entra y sale del área de cobertura. Se analiza la fase de la señal recibida por el lector en tres dominios: espacio, tiempo y frecuencia.

De [43] se obtuvo que el análisis cronológico del cambio de fase en el tiempo TD-PDoA (*Time Domain Phase Difference of Arrival*) a una frecuencia específica provee mayor información acerca de la estimación de la velocidad radial y el sentido de movimiento. Además, se concluyó que el análisis del cambio de fase en la frecuencia FD-PDoA (*Frequency Domain Phase Difference of Arrival*) informa acerca de la ubicación de la etiqueta en el área de cobertura. Sin embargo, en este modelo solo se considera una etiqueta en movimiento que recibe interferencias del ambiente *indoor* analizado. Además, se utilizan dos antenas para la caracterización del movimiento. En contraste con esto, la presente investigación pretende analizar el movimiento de estructuras metálicas bajo interferencias de etiquetas estáticas. Esto utilizando solamente una antena lectora.

### 5.3.2. Considerando la frecuencia Doppler y la frecuencia instantánea

En [44] se presentan los resultados de una serie de pruebas realizadas sobre un sistema RFID UHF pasivo en movimiento. El propósito del estudio es diseñar una serie de experimentos que permitan identificar y controlar la pérdida de lecturas que experimentan los sistemas RFID en movimiento. Para ello, se realiza una configuración del sistema RFID tipo portal compuesto por un lector fijo Impinj Speedway Revolution R420 y una serie de etiquetas DogBone UPM Raflactac. La figura 17 presenta el escenario de las pruebas realizadas.



**Figura 17.** Escenario para las mediciones sobre un sistema RFID tipo portal [44]

En [44] se consideran los parámetros de radiofrecuencia como RSSI, rotación de ángulo de fase y los cambios en la frecuencia de Doppler para estimar la velocidad de las etiquetas en el flujo de entrada/salida. Los datos fueron tomados en escenarios estáticos y en movimiento utilizando comandos propios del lector de Impinj. La diferencia de la investigación presentada en [44] con el trabajo propuesto en esta tesis radica en el estándar de regulación de área utilizado. En [44] se trabaja con protocolos de regulación de área ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) por corresponder a una investigación llevada a cabo en el continente europeo. En esta tesis se abordan protocolos regulados por la FCC (*Federal Communications Commission*) de los Estados Unidos. Además, en [44] se usa un arreglo de cuatro antenas ubicadas en el techo de la bodega y no se consideran estructuras metálicas en movimiento.

En la patente [45] se presenta un análisis cronológico de las lecturas registradas en sistemas RFID pasivos en la banda UHF con el fin de discriminar entre etiquetas

estáticas y dinámicas. En la investigación se desarrolla un método que consiste en el filtrado de información de variables de radiofrecuencia obtenidas del proceso de identificación. RSSI, ángulo de fase y frecuencia Doppler son las variables radioelectrónicas analizadas en el método propuesto por [45]. Los filtros considerados para la discriminación entre etiquetas estáticas y dinámicas corresponden a: tasa de lectura, tiempo de ocurrencia de nuevas lecturas, diferencia absoluta de RSSI máximo y mínimo, incremento del RSSI, valor constante de nivel de RSSI, reducción de la variación en el ángulo de fase y filtro de movimiento.

La velocidad en [45] es estimada considerando las frecuencias instantáneas de transmisión y la frecuencia Doppler. El signo de la velocidad estimada permite predecir el sentido del movimiento. El valor promedio de frecuencia Doppler permite conocer si la etiqueta se encuentra en movimiento o permanece en una posición específica durante el período de inventario.

En la investigación presentada en [45] se asignan valores umbrales para cada uno de los filtros diseñados los cuales son asignados aleatoriamente y ajustados durante la simulación. No se mencionan en [45] cuáles son los valores de los parámetros de decisión de las variables de radiofrecuencia analizadas. Tampoco se registra la trazabilidad ni la estimación de la posición de etiquetas en movimiento. El estudio considera solamente un ambiente *indoor* para una aplicación de RFID *retail*. Además, la influencia de superficies metálicas sobre el desempeño del sistema de comunicación no es considerada en [45].

Como se ha podido observar, existen diferentes técnicas que permiten estimar la ubicación de los objetos etiquetados en sistemas RFID UHF pasivos. Sin embargo, las investigaciones anteriormente mencionadas no consideran la influencia del metal en sus experimentos. Es relevante conocer los alcances y limitaciones de la estimación de distancias y velocidades en aplicaciones de sistemas RFID pasivos que involucren estructuras metálicas en movimiento. Este es el enfoque de la presente investigación.

## II. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO



---

*En esta parte se presenta una descripción detallada y rigurosa del diseño e implementación del método propuesto para dar solución al problema de interferencias estáticas durante la identificación de objetos metálicos en movimiento.*

---



## 6. MÉTODO PROPUESTO

### 6.1. Planteamiento del problema de investigación

Uno de los trabajos que el grupo de investigación de Telecomunicaciones y Sistemas de la Universidad del Norte ha venido desarrollando corresponde al diseño e implementación de sistemas de identificación por radiofrecuencia pasivos en la banda UHF que operen satisfactoriamente sobre estructuras metálicas. Con miras a implementar este tipo de sistemas en aplicaciones que apoyen satisfactoriamente la gestión logística de las cadenas de suministro en empresas siderúrgicas del departamento del Atlántico, se ha planteado la presente investigación.

La investigación planteada pretende mitigar las interferencias producidas por la lectura de etiquetas RFID estáticas durante el proceso de identificación de objetos metálicos en movimiento. Las estructuras en movimiento consideradas corresponden a cilindros y láminas fabricados en materiales galvanizados. Estos productos son los usualmente fabricados y distribuidos por las empresas siderúrgicas del departamento del Atlántico.

En particular, la presente investigación plantea evaluar el comportamiento de las variables de radiofrecuencia para la mitigación de lecturas interferentes durante la identificación de estructuras metálicas en movimiento. En este contexto, se consideran interferencias todas las lecturas de etiquetas estáticas presentes en el rango de alcance del lector. Las señales capturadas por el interrogador en un ciclo de inventario contienen información relevante del estado de las variables radioelectrónicas en el enlace de comunicación. Se propone caracterizar dichas variables en el dominio del tiempo y la frecuencia con el propósito de encontrar parámetros de decisión que permitan inferir la presencia de interferencias y su correspondiente eliminación.

El principal aporte de esta investigación es cerrar la brecha de investigación existente y aclarar la perspectiva de implementación de sistemas de identificación por radiofrecuencia en estructuras metálicas. Esto sin necesidad de añadir *hardware* a los

equipos de identificación: lectores, antenas, etiquetas y utilizando variables del mismo proceso de comunicación.

Una contribución importante de esta investigación corresponde a la simplificación de las soluciones actuales de sistemas RFID para la estimación de sentidos de movimiento (entrada/salida) en portales. Actualmente, se requiere el uso de sensores, cámaras o circuitos electrónicos de proximidad para controlar y automatizar la gestión de despacho de materiales en las bodegas de las empresas siderúrgicas. Aunque el método propuesto no asegura el ahorro de energía del sistema RFID si pretende controlar la trazabilidad de productos economizando en la implementación de otros tipos de sistemas de seguimiento y posicionamiento.

## **6.2. Estructura del método propuesto para la mitigación de interferencias**

El planteamiento del método inductivo experimental para la mitigación de interferencias en la identificación de objetos metálicos en movimiento se encuentra estructurado en las cinco fases principales las cuales son:

1. Construcción del modelo físico del sistema de identificación por radiofrecuencia RFID pasivo en la banda UHF
2. Obtención y almacenamiento de las variables de radiofrecuencia
3. Caracterización y selección de las variables de radiofrecuencia de interés
4. Determinación y asignación de parámetros de decisión
5. Definición de experimentos para la verificación del modelo

La definición del método propuesto se basa en el diseño y ejecución de una serie de experimentos que permiten determinar alcances y limitaciones en la mitigación de interferencias durante la identificación de estructuras metálicas en movimiento.

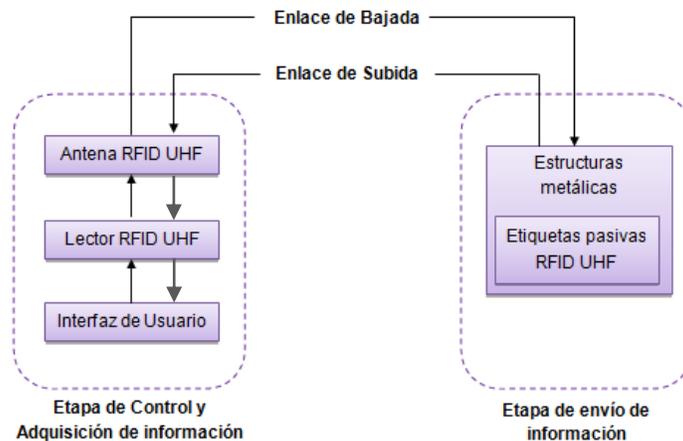
### **6.2.1. Construcción del modelo físico del sistema de identificación por radiofrecuencia RFID pasivo en la banda UHF**

El sistema RFID considerado en esta investigación está compuesto por dos etapas principales: Etapa de control y adquisición de información y Etapa de envío de

datos de interés. En la primera etapa se inicia el proceso de comunicación lector-etiqueta a partir de una solicitud del interrogador. En la interfaz de usuario del lector se programan los parámetros básicos necesarios para la comunicación tales como: potencia de transmisión, sesión de operación, modo de lectura del interrogador, modo de búsqueda de etiquetas en el rango de alcance del lector, sensibilidad del receptor y tiempo de identificación. Estos parámetros se asignan de acuerdo con los estándares y regulaciones impuestas por el EPCglobal Clase 1 Generación 2. Una vez configurado el lector se da inicio al proceso de lectura.

En la figura 18 se presenta el diagrama de bloques general del sistema RFID construido para la identificación de estructuras metálicas. Las flechas mostradas en la figura 18, relacionan las dos etapas esenciales del proceso e indican el sentido de los enlaces presentes en un ciclo de comunicación RFID pasivo. Con el enlace de bajada el lector inicia el proceso de comunicación. La etiqueta responde a la petición del lector en el enlace de subida alimentando la etapa de control y adquisición de la información y continuando el proceso en sentido inverso.

Las estructuras metálicas consideradas en el sistema de comunicación corresponden a cilindros y láminas galvanizadas que se desplazan o se mantienen en una posición específica dentro del área de cobertura.



**Figura 18.** Diagrama de bloques del modelo físico del sistema RFID pasivo en la banda UHF requerido para la identificación de objetos metálicos en movimiento

#### 6.2.1.1. Requerimientos de diseño

Para la deducción y posterior implementación del método propuesto se consideran los siguientes requerimientos mínimos de diseño en la construcción del sistema de identificación por radiofrecuencia pasivo en la banda UHF.

- El lector debe ser apto para trabajar en un ambiente industrial: expuesto a altos niveles de humedad, ruido, suciedad y altas temperaturas. Condiciones de las operaciones rutinarias en las instalaciones de empresas siderúrgicas.
- El lector debe robusto pero de liviano peso y de dimensiones pequeñas para una fácil instalación en los portales de las bodegas.
- El lector debe identificar los productos metálicos, sin requerir la intervención directa de un operario que anote manualmente el código del producto.
- El lector debe reconocer los códigos de identificación EPC para las estructuras metálicas estáticas y en movimiento.
- La interfaz de usuario debe ser sencilla y permitir la visualización de información relacionada con el inventario: EPC, número total de etiquetas leídas, velocidad estimada y trazabilidad de las estructuras metálicas en movimiento identificadas.
- Las etiquetas del sistema deben tener pequeñas dimensiones para su práctico uso sobre los productos a identificar.
- La forma de etiquetado no requerirá ningún tipo de perforación sobre la superficie del producto. Estos productos deben permanecer sin perforaciones para su posterior utilización.
- El costo de las etiquetas debe ser lo más económico posible.
- Los productos a identificar son: láminas y rollos metálicos.

#### 6.2.1.2. Especificaciones de diseño

- El diseño de las etiquetas RFID debe permitir su operación satisfactoria sobre superficies metálicas. Estas etiquetas deben permitir su adhesión a las estructuras metálicas sin necesidad de perforación.
- Las etiquetas deben ser pasivas para asegurar una solución económica.

- El protocolo de comunicación debe ser inteligible tanto para el lector como para la etiqueta. El estándar de comunicación para sistemas RFID UHF pasivos es el ISO/IEC 18000-6 EPCglobal Clase 1 Generación 2.
- El patrón de radiación de la antena lectora debe ser directivo con polarización circular de tal forma que sea posible la identificación de las etiquetas independientemente a la orientación de las mismas sobre el material.
- El sistema de anticolisión empleado por el lector debe ser robusto para evitar pérdida de lecturas debido a colisiones de las etiquetas en el medio compartido durante el proceso de comunicación.

#### 6.2.1.3. Selección de la plataforma tecnológica

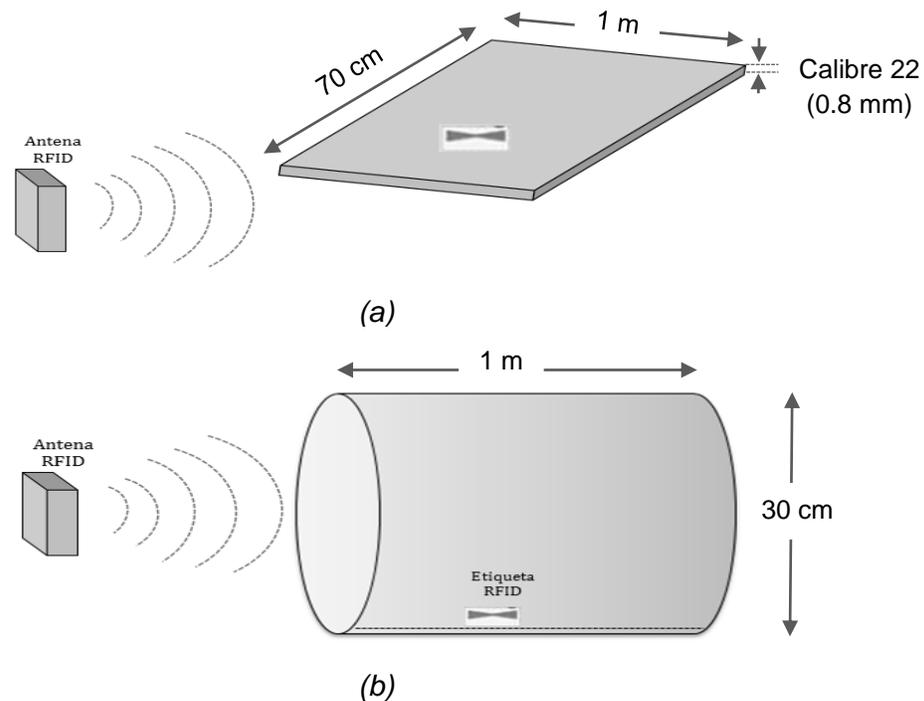
De acuerdo con los estudios preliminares registrados en [5] y [6] las etiquetas RFID pasivas en la banda UHF DogBone y ShortDipole de SMARTRAC exhiben un mejor comportamiento al adherirse sobre estructuras metálicas. Las etiquetas ShortDipole tienen un alcance de lectura mayor a las DogBone logrando ser identificadas en aproximadamente 4 m. Por tal motivo, el modelo físico construido para esta investigación considerará únicamente la participación de etiquetas RFID pasivas tipo **ShortDipole** adheridas a las estructuras metálicas.

Adicionalmente, en [5] y [6] se determinó que con un lector fijo **Impinj Speedway Revolution R420** es posible identificar con una tasa de aproximadamente 20 lecturas/s etiquetas adheridas sobre estructuras metálicas. Además, este tipo de lector posee un protocolo de anticolisión basado en el algoritmo Q-dinámico el cual es robusto ante las colisiones. Básicamente, en 1 de 4.294.967.296 oportunidades dos etiquetas pueden responder escogiendo la misma ranura de comunicación [46]. Por último, este lector maneja el protocolo LLRP (*Low Level User Data Support*) el cual permite la adquisición de información de variables de radiofrecuencia de las señales transmitidas por las etiquetas. Tanto el lector como la etiqueta funcionan bajo el protocolo de comunicación ISO/IEC 18000-6 EPCglobal Clase 1 Generación 2.

La antena RFID utilizada será externa conectada a uno de los puertos del lector fijo. Esta antena corresponde a la **PAL90209H de LAIRD Technology**. Esta antena trabaja en la banda UHF y tiene un patrón de radiación directivo y polarización circular

#### 6.2.1.4. Construcción de las estructuras metálicas prototipo

Para la construcción del sistema, además de determinar los dispositivos RFID, se requiere la construcción de prototipos de las estructuras metálicas a identificar. Dichos objetos son láminas de aluminio y cilindros metálicos como los presentados en la figura 19. El modelo del cilindro construido tiene dimensiones de 1 m de longitud y 30 cm de diámetro. Las láminas galvanizadas tienen calibre 22 (0.8 mm) y miden 1 m x 0.7 m. El prototipo de las estructuras metálicas del sistema es construido considerando dimensiones estándar de los productos metálicos en empresas siderúrgicas. No se considerarán pilas de láminas o de cilindros en la investigación.



**Figura 19.** Prototipos construidos (a) Lámina metálica (etiqueta adherida a la superficie metálica), (b) Cilindros metálicos (etiqueta adherida al interior del cilindro metálico) [5]

## 6.2.2. Adquisición y almacenamiento de las variables de radiofrecuencia

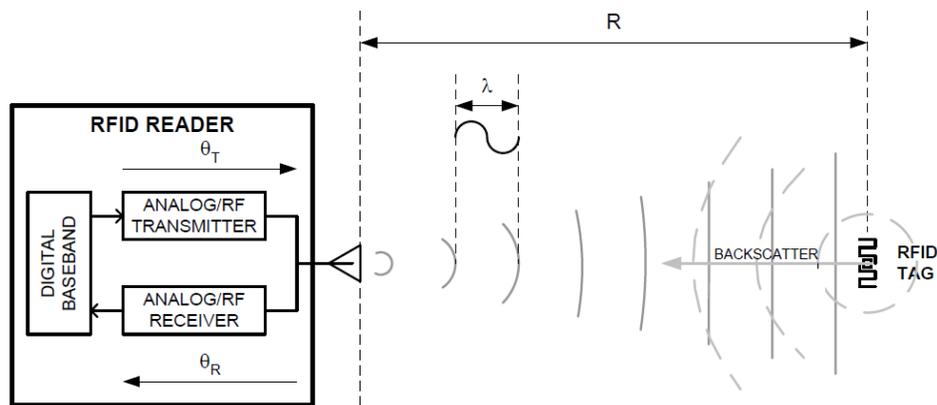
### 6.2.2.1. Especificaciones y definición de la base de datos para el almacenamiento

Para la caracterización del movimiento de las estructuras metálicas en el sistema RFID construido se requiere la adquisición, almacenamiento y procesamiento de las variables de radiofrecuencia en cada observación. En esta etapa se realiza la adquisición de las variables a partir del protocolo LLRP del lector utilizado. Dichas variables son extraídas del lector luego de terminar el periodo de identificación programado.

Para el almacenamiento del estado de las variables calculadas por el lector durante el inventario se requiere utilizar una base de datos. Para cumplir con los objetivos de esta investigación no se necesita que la base de datos se enlace a aplicaciones de Internet por lo cual el manejo de esta será en el *localhost*. De las bases de datos disponibles, Excel ofrece prestaciones en cuanto a licencias y facilidad en el manejo de información. Por este motivo, la información será almacenada en archivos de Microsoft Excel con extensión '.xlsx'.

### 6.2.2.2. Utilización del protocolo LLRP para la adquisición de las variables de radiofrecuencia

Impinj presenta en [46] el protocolo de comunicación LLRP utilizado por sus lectores RFID. En [46] se describe que la señal recibida por el lector presenta tres variables radioelectrónicas importantes: RSSI, rotación del ángulo de fase (*signal phase angle rotation*) y el cambio en la frecuencia Doppler (*Doppler Frequency shift*). Estas pueden ser consultadas en el SDK Octane 4.8 de Impinj usando los comandos *ImpinjPeakRSSI*, *ImpinjRFPhaseAngle* e *ImpinjRFDoppler*. Por simplicidad, *ImpinjPeakRSSI* corresponderá a RSSI. Dichas variables pueden utilizarse para caracterizar etiquetas RFID UHF pasivas en la zona de cobertura. Adicionalmente, estos comandos permiten estimar velocidades y sentidos de movimiento.



**Figura 20.** Diagrama conceptual de la propagación de ondas de radio entre el lector y la etiqueta

El protocolo LLRP (Low Level Reader Protocol) utilizado por el lector fijo de Impinj permite recolectar información del estado de las variables de radiofrecuencia. Utilizando entornos de desarrollo SDK Octane 4.8 o versiones más actualizadas es posible extraer el valor de las variables calculadas por el lector durante el período de identificación. Como se observa en la figura 20, la retro-dispersión o *backscattering* es el proceso utilizado por las etiquetas RFID para responder las solicitudes del lector.

Para la adquisición de las variables de radiofrecuencia calculadas por el lector, el protocolo LLRP emplea las siguientes ecuaciones.

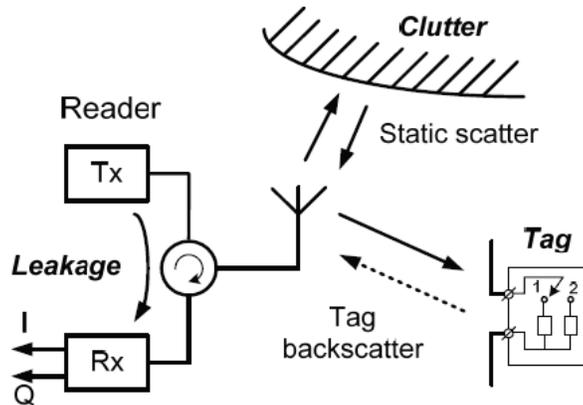
### A. Ecuaciones para la estimación del ángulo de fase

La ecuación 7 corresponde a la rotación de fase total en el plano I-Q de la señal de radiofrecuencia recibida por el lector de una etiqueta durante el tiempo de identificación.

$$\theta = 2\pi \left( \frac{2R}{\lambda} \right) + \theta_{Tx} + \theta_{Rx} + \theta_{TAG} \quad (7)$$

Donde  $R$  es la distancia de separación entre el lector y la etiqueta,  $\lambda$  la longitud de onda de la señal enviada de la etiqueta al lector en una portadora específica,  $\theta_{Tx}$  corresponde a la variación de la fase añadida durante la transmisión del lector,  $\theta_{Rx}$  es la variación de fase producida cuando la señal emitida por la etiqueta es recibida por el lector RFID y  $\theta_{TAG}$  corresponde a la variación de la fase debido a las características de

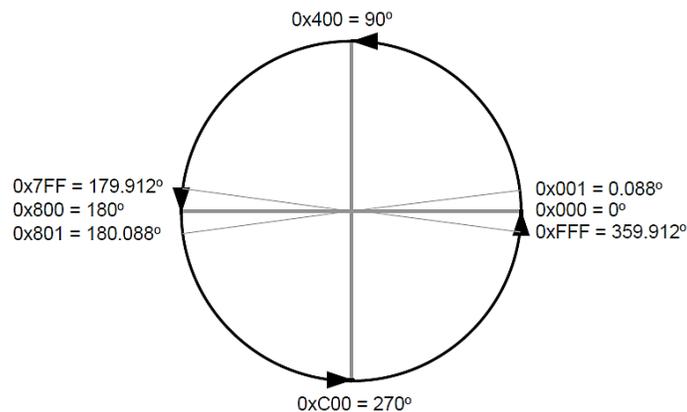
reflexión de la etiqueta RFID, como por ejemplo el tiempo de latencia antes de responder el *Backscattering*. La figura 21 de [43] ilustra el proceso descrito por la ecuación 7.



**Figura 21.** Fuentes que contribuyen en la determinación compleja del ángulo de fase de la señal recibida por un lector RFID en la banda UHF

La figura 22 presenta el ciclo de periodicidad de la fase calculada por el protocolo LLRP. Este protocolo entrega el ángulo de fase en grados o radianes representados en palabras de 12 bits reportando fases de 0 a 4095 con una resolución de  $0.088^\circ$  o  $0.0015$  rad. La ecuación 8 presenta que la fase es periódica de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  con respecto a la distancia repitiéndose cada  $\lambda/2$  [46].

$$R_n = \frac{n\lambda}{2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$



**Figura 22.** Mapeo cíclico de la periodicidad del ángulo de fase

## B. Consideración para la estimación del nivel pico de RSSI

Para el protocolo LLRP el nivel del pico máximo de RSSI en cada lectura es reportado en múltiplos de 100, es decir, si el lector calcula un valor de RSSI de -4050 el valor en dBm corresponde a -40.50dBm. El nivel de RSSI es entregado en palabras de 16 bits con un rango de -110dBm a 0dBm y una resolución de 0.5dBm.

## C. Ecuación para la estimación de la frecuencia Doppler

La ecuación 9 presenta la estimación de la frecuencia Doppler en palabras de 16 bits. La acumulación de fase representada como  $\Delta\theta$  se encuentra en el rango de  $-720^\circ$  a  $720^\circ$ , es decir, entre  $-4\pi$  y  $4\pi$ . El rango de valores posibles para la frecuencia Doppler considera desde 1 Hz hasta 167 Hz en condición de movimiento.

$$f_m = \frac{\Delta\theta}{4\pi\Delta T} \quad (9)$$

La expresión  $\Delta T$  denota la duración de un paquete y de acuerdo con la ecuación 10 una variación en la frecuencia Doppler provoca una rotación en el ángulo de fase sobre la duración del paquete transmitido [46].

$$\Delta\theta = 2\pi(2f_m\Delta T) \quad (10)$$

### 6.2.2.3. Selección de la plataforma y lenguaje de programación

Teniendo en cuenta las prestaciones de la información recibida por el lector RFID utilizado y el protocolo LLRP empleado por Impinj, se decide realizar el algoritmo de adquisición, identificación y almacenamiento de datos utilizando el SDK de Octane 4.8 a través de las librerías *Impinj.OctaneSdk.dll*, *LLRP.dll* y *LLRP.Impinj.dll*. Esta aplicación funciona para Microsoft Visual C# 2010 y emplea el lenguaje de programación orientado a objetos C#, el cual fue empleado para el diseño del algoritmo requerido y la ejecución de los experimentos. Las pruebas preliminares de caracterización serán descritas en la siguiente fase. Éstas se ejecutaron en un computador con sistema operativo Windows 8.1 a través de un enlace TCP/IP estático con dirección IP de red 192.168.0.0.

### 6.2.3. Caracterización de las variables de radiofrecuencia de interés

En esta fase se realiza la caracterización de las variables adquiridas y almacenadas en la base de datos. Los experimentos preliminares son diseñados para analizar el comportamiento de las variables en ambientes con estructuras metálicas estáticas y en movimiento. Dichos experimentos consideran movimientos “Entrando” y “Saliendo” así como etiquetas estáticas y estructuras metálicas que se mueven y se detienen durante un periodo de tiempo dentro del ciclo de identificación programado.

En esta fase se caracterizan en el dominio del tiempo y la frecuencia las variables radioelectrónicas calculadas por el lector (RSSI, ángulo de fase y frecuencia Doppler). El análisis estadístico realizado considera las mediciones de variabilidad (desviación estándar) y tendencia central (media, mediana, moda) de la población de etiquetas identificadas con el fin de encontrar valores umbrales que permitan realizar la discriminación y estimadores eficientes para caracterizar el movimiento.

Adicionalmente, el protocolo LLRP sugiere ecuaciones y métodos para realizar la estimación de la distancia, velocidad radial y sentido de movimiento. Estas ecuaciones serán analizadas y modificadas por el método diseñado para su aplicación a sistemas de radiofrecuencia sobre objetos metálicos en movimiento.

#### A. Ecuaciones para el cálculo de distancia y velocidad radial

La ecuación 11 corresponde al cálculo de la distancia radial teniendo en cuenta el cambio de fase de la señal RF en dos instantes de tiempo ( $t_0, \theta_0$ ) y ( $t_1, \theta_1$ ). De forma análoga, la ecuación 12 de [46] presenta el cálculo de la velocidad radial. Este método considera diferencias de fase en el tiempo.

$$d_{radial} = \frac{1}{2} \left( \frac{\theta_1 - \theta_0}{2^{12}} \right) \lambda \quad (m) \quad (11)$$

$$v_{radial} = \frac{d_{radial}}{t_1 - t_0} \quad (m/s) \quad (12)$$

## B. Ecuaciones para la estimación de la velocidad a partir de frecuencia Doppler

La ecuación 13 corresponde al cálculo de la frecuencia Doppler, la cual depende de al ángulo entre el vector velocidad y la antena del lector,  $\alpha$ . A partir de la ecuación 14 de [46] es posible estimar la velocidad y el sentido de movimiento es inferido por el signo del cálculo final.

$$f_m = \frac{2v}{\lambda} \cos(\alpha) \quad (\text{Hz}) \quad (13)$$

$$v = \frac{\widehat{f}_m \lambda}{2 \cos(\alpha)} \quad (\text{m/s}) \quad (14)$$

### 6.2.4. Determinación y asignación de parámetros de decisión

En esta etapa se asignan umbrales de decisión teniendo en cuenta los valores obtenidos en las pruebas independientes realizadas sobre estructuras metálicas estáticas y en movimiento. A partir de los criterios de decisión de porcentaje de cambios del nivel pico de RSSI, proporción de variaciones grandes del ángulo de fase, signo de la frecuencia Doppler promedio y diferencia absoluta entre nivel máximo y mínimo de RSSI es posible identificar si un objeto metálico se encuentra estático o en movimiento.

### 6.2.5. Definición de experimentos para la verificación del modelo

Luego de determinar los umbrales de decisión para las variables de radiofrecuencia, se procede a diseñar y ejecutar una serie de experimentos considerando distintas velocidades del objeto en movimiento y una población de etiquetas estáticas. Se construirá una interfaz en MATLAB que permita calcular las variables de decisión en cada experimento. Estas variables serán comparadas con los parámetros determinados en la fase anterior con el fin de verificar el desempeño del método propuesto. El análisis de estos resultados se realizará utilizando métricas como porcentaje de lecturas correctas (lecturas deseadas), falsos positivos y falsos negativos. De esta forma se determinarán los alcances y las limitaciones del método propuesto.

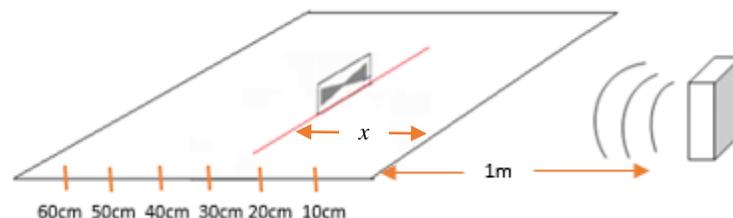
## 7. IMPLEMENTACIÓN

### 7.1. Requerimientos para el etiquetado de las estructuras metálicas consideradas

Estudios previos registrados en [5] y [6] determinaron la posición estratégica donde las etiquetas RFID pasivas ShortDipole deben ser ubicadas sobre estructuras metálicas. Esto se analizó con el fin de asegurar una mayor tasa de lectura mitigando la influencia de las corrientes de Foucault en la comunicación. Las estructuras consideradas corresponden a láminas y cilindros similares a los utilizados en esta investigación.

#### 7.1.1. Ubicación de las etiquetas pasivas sobre láminas metálicas

Pruebas preliminares presentadas en [5] y [6] han demostrado que la mejor forma de ubicar la etiqueta sobre la lámina metálica es adhiriéndola perpendicular a la estructura con el lector apuntando directamente hacia la etiqueta, como se muestra en la figura 23. La etiqueta tiene una distancia de separación de 2 cm respecto a la superficie metálica.



**Figura 23.** Esquemático para la determinación de la distancia de separación etiqueta-borde de la lámina metálica que asegure un mejor proceso de lectura

La probabilidad de error en la identificación de una etiqueta ShortDipole ubicada como muestra la figura 23 se presentan en la tabla 6 de [5]. En esta tabla se registra el número de veces que la etiqueta logra ser identificada luego de realizar 15 disparos a diferentes distancias etiqueta-borde de la lámina y variando el nivel de potencia

transmitida en 10dBm, 20dBm y 30dBm. La lámina utilizada tiene dimensiones de 1m x 0.7m por lo cual se consideran distancias de 10-60cm con incrementos de 10cm.

Distancia borde-etiqueta (x)	Potencia de transmisión	Lecturas/ Disparos	Probabilidad de Error
60 cm	10 dBm	0/15	No hay lectura
	20dBm	0/15	No hay lectura
	30dBm	<b>15/15</b>	<b>0%</b>
50 cm	10 dBm	0/15	No hay lectura
	20dBm	0/15	No hay lectura
	30dBm	<b>15/15</b>	<b>0%</b>
40 cm	10 dBm	0/15	No hay lectura
	20dBm	0/15	No hay lectura
	30dBm	<b>15/15</b>	<b>0%</b>
30 cm	10 dBm	0/15	No hay lectura
	20dBm	0/15	No hay lectura
	30dBm	<b>15/15</b>	<b>0%</b>
20 cm	10 dBm	0/15	No hay lectura
	20dBm	<b>15/15</b>	<b>0%</b>
	30dBm	<b>15/15</b>	<b>0%</b>
10 cm	10 dBm	0/15	No hay lectura
	20dBm	<b>15/15</b>	<b>0%</b>
	30dBm	<b>15/15</b>	<b>0%</b>

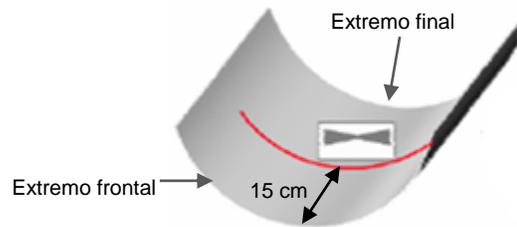
**Tabla 3.** Probabilidad de error de una etiqueta ubicada de forma paralela sobre una lámina metálica

Estos resultados sugieren que a medida que se aumenta la potencia de transmisión se logra identificar la etiqueta a cualquier distancia manteniendo la distancia de separación lector-borde de la lámina en 1m. Además, se sugiere que la etiqueta se ubique entre los 10-20cm con respecto al borde de la lámina.

### 7.1.2. Ubicación de las etiquetas pasivas sobre cilindros metálicos

Para el caso de cilindros metálicos, el análisis se realiza comparando su estructura geométrica como una guía de ondas circular a circuito abierto tal como se menciona en [5]. Debido a esta aproximación, la onda viajante al interior del cilindro es reflejada al llegar al final de la estructura generando una onda estacionaria. Esta onda posee una amplitud mínima en el extremo final del cilindro y amplitudes máximas cada media

longitud de onda de la guía. Estas distancias son medidas desde el extremo final del cilindro. La figura 24 de [3] y [4] ilustra lo mencionado anteriormente.



**Figura 24.** Ubicación de una etiqueta pasiva dentro de un cilindro metálico (corte horizontal o longitudinal)

Para un cilindro con diámetro de 30 cm y una longitud de 1 m suponiendo una frecuencia central de transmisión de 915MHz, se obtienen los parámetros presentados en la tabla 4 de [5]. De acuerdo con [32] existen tres máximos en el interior del cilindro: el primero a los 14.69 cm, el segundo a los 35.96 cm y el tercero a 57.31 cm. Por este motivo, la etiqueta RFID pasiva es ubicada al interior del cilindro metálico a una distancia de aproximadamente 15 cm de su extremo frontal como se muestra en la figura 24.

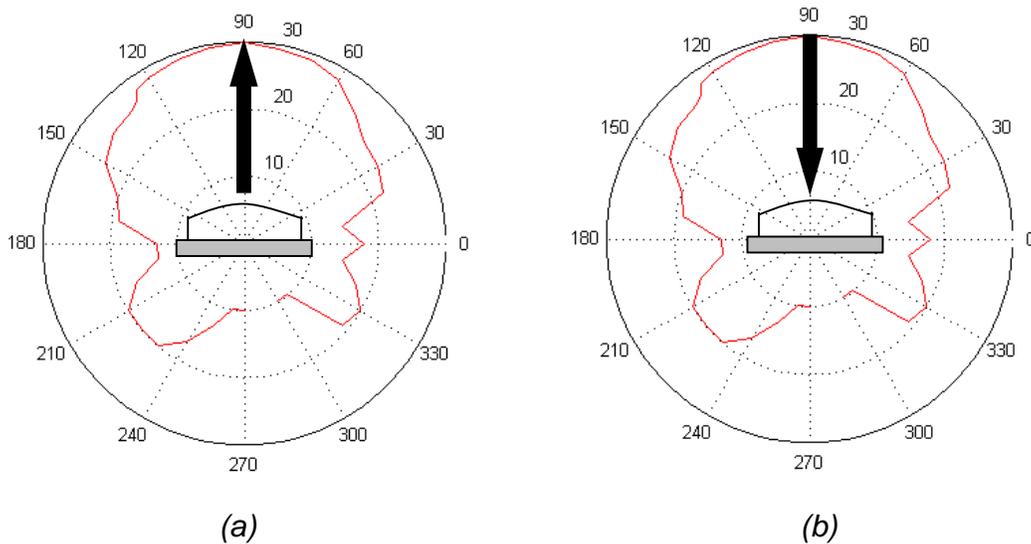
Parámetro	Valor
Velocidad de la luz [m/s]	$3 \times 10^8$
Diámetro [m]	0,3
Longitud de onda [m]	0,3278
Frecuencia de corte [MHz]	585,9947
Longitud de onda en la guía [cm]	42,6904
Longitud del cilindro [cm]	100

**Tabla 4.** Parámetros calculados para la identificación de cilindros metálicos a partir de sistemas RFID pasivos en la banda UHF

## 7.2. Sentidos de movimiento considerados

En el método propuesto se consideran movimientos donde la estructura metálica en movimiento se acerca o aleja de la antena lectora. Tal como se muestra en las figuras 25 (a) y 25 (b), para el patrón de radiación construido para la antena RFID UHF utilizada

(línea roja), las flechas en color negro indican el sentido del movimiento. La figura 25 (a) corresponde al movimiento “Saliendo”, en cambio la figura 25 (b) al movimiento “Entrando”. El método propuesto pretende estimar ambos sentidos de movimiento analizando el comportamiento de una o más variables de radiofrecuencia.



**Figura 25.** Sentidos de movimiento considerados por el método de mitigación de interferencias propuesto. (a) “Saliendo”, (b) “Entrando”

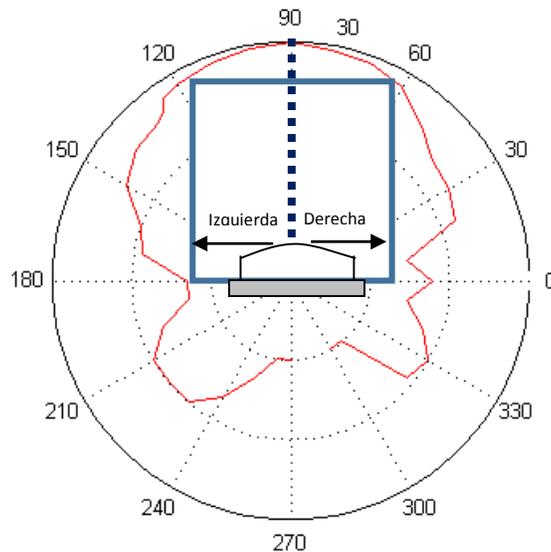
Estos sentidos de movimiento son determinados a partir del comportamiento de las variables de radiofrecuencia RSSI y frecuencia Doppler durante el periodo de identificación. Como se mencionará más adelante, estas dos variables cambian considerablemente al analizarse estadísticamente en los dos sentidos de movimiento.

### 7.3. Ubicación de las etiquetas RFID estáticas interferentes

Las etiquetas estáticas interferentes serán ubicadas a los costados derecho e izquierdo del sentido de movimiento considerado. La estructura se desplazará en línea recta a diferentes velocidades considerando los dos sentidos de movimiento de la figura 25. Las etiquetas serán ubicadas sobre láminas estáticas dispuestas al lado derecho e izquierdo del patrón de radiación como lo muestra la figura 26 (dentro del recuadro). Ninguna etiqueta será ubicada detrás de la antena RFID externa de LAIRD Technology.

Todas las etiquetas participantes estarán en el semiplano del patrón definido por los ángulos de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .

En pruebas preliminares se considerará la caracterización de las variables de radiofrecuencia en estructuras metálicas estáticas a lo largo de la trayectoria del movimiento. Esto quiere decir, directamente enfrente de la antena RFID externa utilizada (ángulo de directividad del patrón de radiación  $90^\circ$ , línea punteada).



**Figura 26.** Ubicación considerada para las etiquetas estáticas RFID interferentes

#### 7.4. Propuesta para estimar el movimiento

La estimación del número de etiquetas en movimiento se realizará analizando las variables de radiofrecuencia RSSI y diferencia de ángulo de fase en el dominio del tiempo. Básicamente, se compararán los cambios del nivel de RSSI, la diferencia absoluta del nivel de RSSI máximo y mínimo y el porcentaje de variaciones del ángulo de fase. Si estas superan un valor umbral definido mediante el análisis estadístico de los experimentos realizados, se considera que la etiqueta RFID se encuentra en movimiento.

## 7.5. Propuesta para estimar el sentido de movimiento

La estimación del sentido de movimiento se realizará analizando el signo del valor promedio de la frecuencia Doppler y de la velocidad promedio preliminar. Como se analizará en la parte III, cuando el sentido de movimiento es el descrito por la figura 25 (a) tanto la frecuencia Doppler promedio como la velocidad promedio preliminar son negativos. En cambio, cuando el movimiento es el presentado en la figura 25 (b) el valor medio de la frecuencia Doppler y la velocidad promedio preliminar son positivos.

## 7.6. Propuesta para estimar la velocidad promedio

La estimación de la velocidad promedio se efectúa luego de considerar la estimación del movimiento y del sentido de movimiento. Solamente se estimará la velocidad promedio de aquellas etiquetas que hayan sido clasificadas como dinámicas y se conozca una predicción del sentido de su movimiento. Sin embargo, antes de calcular la velocidad promedio definitiva el método realiza un análisis preliminar del signo de la velocidad. Este análisis permitirá reconocer el sentido del movimiento tal como se mencionó anteriormente. La velocidad promedio definitiva y la velocidad promedio preliminar son calculadas a partir de la frecuencia instantánea de operación y la frecuencia Doppler instantánea como se presenta en la ecuación 15 de [49].

$$v_{instantánea} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f_{doppler} = \frac{c}{f_i} f_{doppler} \quad (15)$$

Básicamente, la velocidad promedio preliminar se encuentra calculando el valor promedio de aplicar la ecuación 15 a cada una de las observaciones. Luego, al estimar el sentido de movimiento a partir del signo de esta velocidad se procede a calcular el valor promedio de la velocidad definitiva de movimiento. La velocidad de movimiento para una estructura metálica que se mueve “Entrando” mantendrá el valor calculado para la velocidad preliminar. En cambio, cuando el movimiento estimado es “Saliendo”, se le añadirá a la velocidad promedio preliminar un sesgo de -0,1 m/s. En la parte III se explicará en detalle el motivo de este valor *bias*.

## 7.7. Propuesta para estimar el desplazamiento en el tiempo

La estimación del desplazamiento en el tiempo también conocido como trazabilidad del recorrido se realizará una vez haya sido calculada la velocidad promedio definitiva del movimiento. El desplazamiento será calculado como la diferencia de tiempo de dos observaciones consecutivas multiplicado por la velocidad promedio definitiva tal como lo presenta la ecuación 16.

$$\Delta x = v_{promedio} \Delta t \quad (16)$$

Cabe anotar que durante la fase de caracterización experimental de las variables de radiofrecuencia en estructuras metálicas estáticas se obtuvo que la mediana de la distribución de distancias estimadas es el estimador que mejor predice la ubicación una etiqueta. Esto se explicará con mayor detalle en la parte III.

## 7.8. Parámetros de decisión del método propuesto

Del análisis experimental desarrollado en la parte III en ambientes *indoor* y *outdoor* se pudo determinar el valor de los umbrales de decisión para las variables de radiofrecuencia consideradas. Con estos umbrales es posible determinar si una etiqueta se encuentra en movimiento o permanece estática en una posición específica. En el caso de encontrarse en movimiento, el método estima su velocidad de desplazamiento, el sentido de movimiento y la trazabilidad de su recorrido.

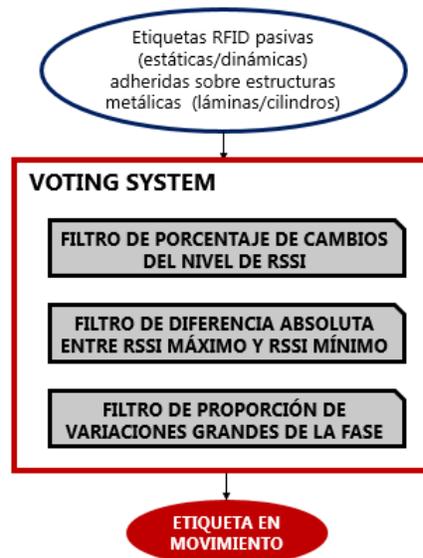
El método propone que si luego de analizar cronológicamente los datos del inventario el cambio de RSSI con respecto al número de total de datos es mayor o igual al 50%, la diferencia absoluta entre el valor máximo y el mínimo del nivel de RSSI es mayor o igual a 25dB y el porcentaje de variaciones del ángulo de fase con respecto al total de datos es como mínimo del 30%, se puede inferir que la estructura metálica se encuentra en movimiento. Ahora bien, si la velocidad promedio preliminar es positiva se dice que el sentido de movimiento es “Entrando”. En caso contrario el objeto esta “Saliendo”.

## 7.9. Estructura del método propuesto

El método propuesto en esta investigación permite la identificación de etiquetas dinámicas adheridas sobre superficies conductoras estimando su velocidad, desplazamiento en el tiempo y sentido de movimiento considerando únicamente la información contenida en las variables de radiofrecuencia.

El método fue diseñado a partir de la ejecución de una serie de experimentos y el análisis estadístico de los resultados obtenidos. El detalle de cada una de las pruebas desarrolladas así como el análisis de los resultados obtenidos se encuentra en la siguiente parte del presente documento.

La figura 27 presenta el esquemático general del método propuesto donde se enuncian las etapas principales para la mitigación de interferencias estáticas en la identificación de una estructura metálica en movimiento.

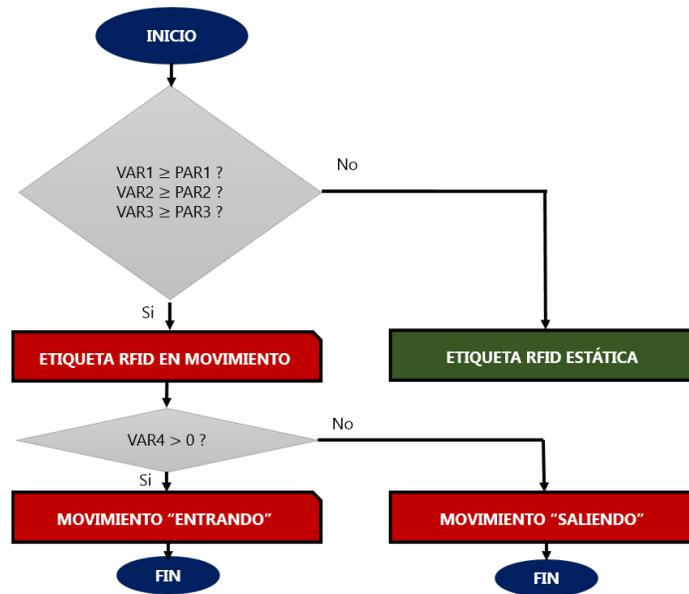


**Figura 27.** Esquemático general del método propuesto para la mitigación de interferencias durante la identificación de estructuras metálicas en movimiento

Por su parte, las figuras 28 y 29 presentan la estructura detallada del método diseñado. En la figura 28 se observan las variables y los parámetros considerados para estimar el sentido de movimiento.



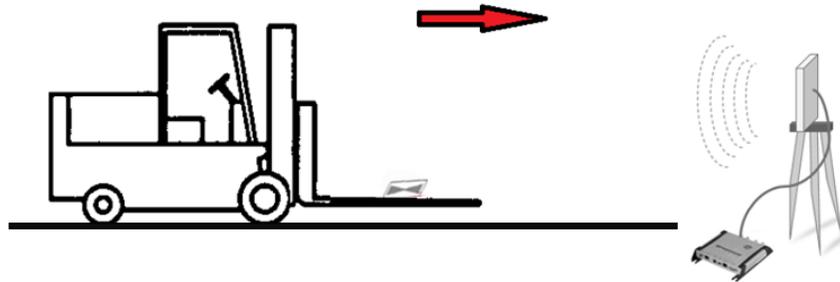
**Figura 28.** Variables calculadas después del proceso de inventario y parámetros de decisión asignados por el método presentado en la figura 29



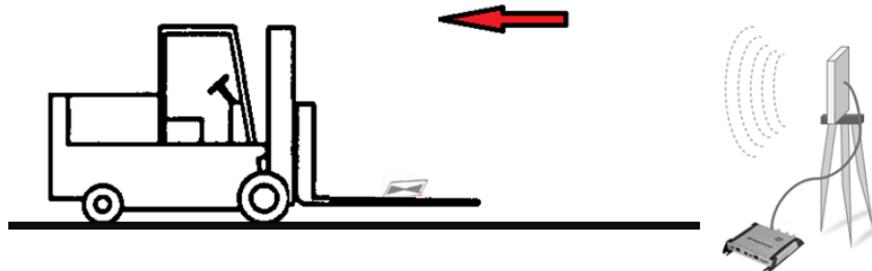
**Figura 29.** Diagrama de flujo detallado del método propuesto (Véase figura 28)

Como se ilustra en la figura 29, para estimar el sentido de movimiento primeramente debe identificarse si la etiqueta se desplaza en el área de cobertura o si mantiene su posición durante el inventario. Para conocer si la estructura metálica permanece estática o en movimiento se aplican los filtros presentados en la figura 27.

Los sentidos de movimiento considerados en esta investigación son ilustrados en las figura 30 y 31 y corresponden a las mostradas en las figuras 25 (b) y (a), respectivamente. En ellas un vehículo montacargas transporta una lámina metálica galvanizada con una etiqueta ubicada en su superficie. Las flechas indican el sentido de movimiento considerado. Para la figura 30 el sentido es “Entrando” en cambio la figura 31 presenta el movimiento “Saliendo”.



**Figura 30.** Movimiento de un montacargas que transporta una lámina galvanizada en el sentido “Entrando” con la antena conectada al lector (corresponde a figura 25 (b))



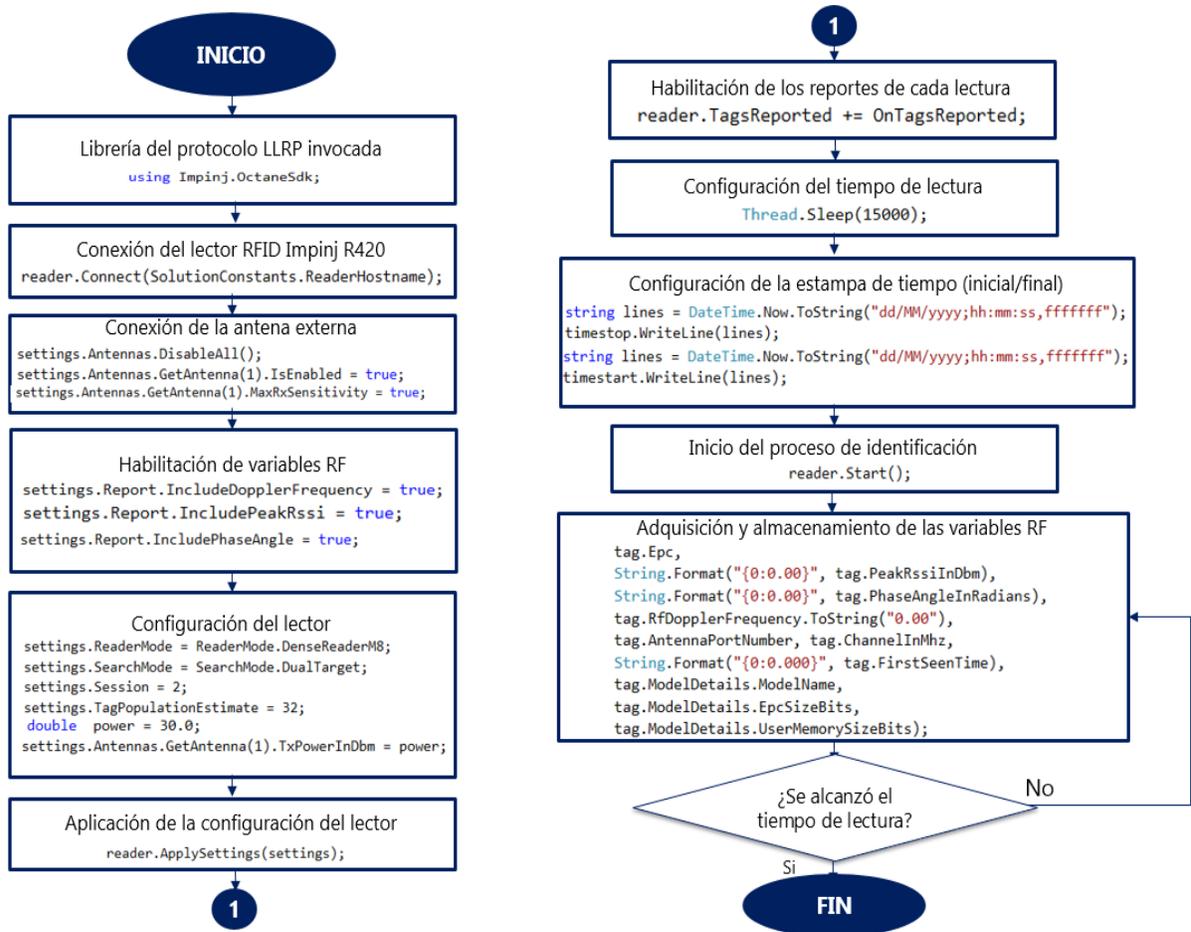
**Figura 31.** Movimiento de un montacargas que transporta una lámina galvanizada en el sentido “Saliendo” con la antena conectada al lector (corresponde a figura 25 (a))

El método consiste de dos algoritmos principales uno de adquisición y almacenamiento de la información del inventario y otro de análisis y cálculo de las variables de decisión. A continuación se explicará en detalle la estructura de cada uno.

## 7.10. Estructura del algoritmo de adquisición y almacenamiento de información

La adquisición y almacenamiento de las variables de radio se realiza a través del algoritmo presentado en el Apéndice A. El algoritmo opera empleando en SDK Octane

4.8 de Impinj. Su estructura general es presentada en la figura 32. El código del algoritmo ha sido desarrollado en lenguaje de programación C#.



**Figura 32.** Flujograma del algoritmo de adquisición y almacenamiento de información de las variables radioelectrónicas consideradas.

En la configuración del lector RFID utilizado se debe asignar el *Reader Mode*, *Search Mode* y *Session*. El *Reader Mode* es especificado por el fabricante, en este caso Impinj. Por el contrario, *Search Mode* y *Session* son estandarizados de acuerdo con la regulación dada por el EPCglobal Clase 1 Generación 2. Esta configuración permite que varios lectores independientes puedan realizar el inventario de una misma población de etiquetas. Impinj ofrece una serie de *Reader Modes* predefinido como se muestra en la tabla 5 de [47]. Como regla general, existe una relación inversa entre la tasa de transferencia de datos y la tolerancia a interferencias. Altas tasas de transmisión de información provocan una elevada susceptibilidad a interferencias.

Reader Mode	Sensibilidad	Tolerancia a interferencias	Throughput
Max Throughput	Buena	Pobre	Excelente
Hybrid	Buena	Buena	Muy Buena
Dense Reader M=4	Muy Buena	Muy Buena	Muy Buena
Dense Reader M=8	Excelente	Excelente	Buena

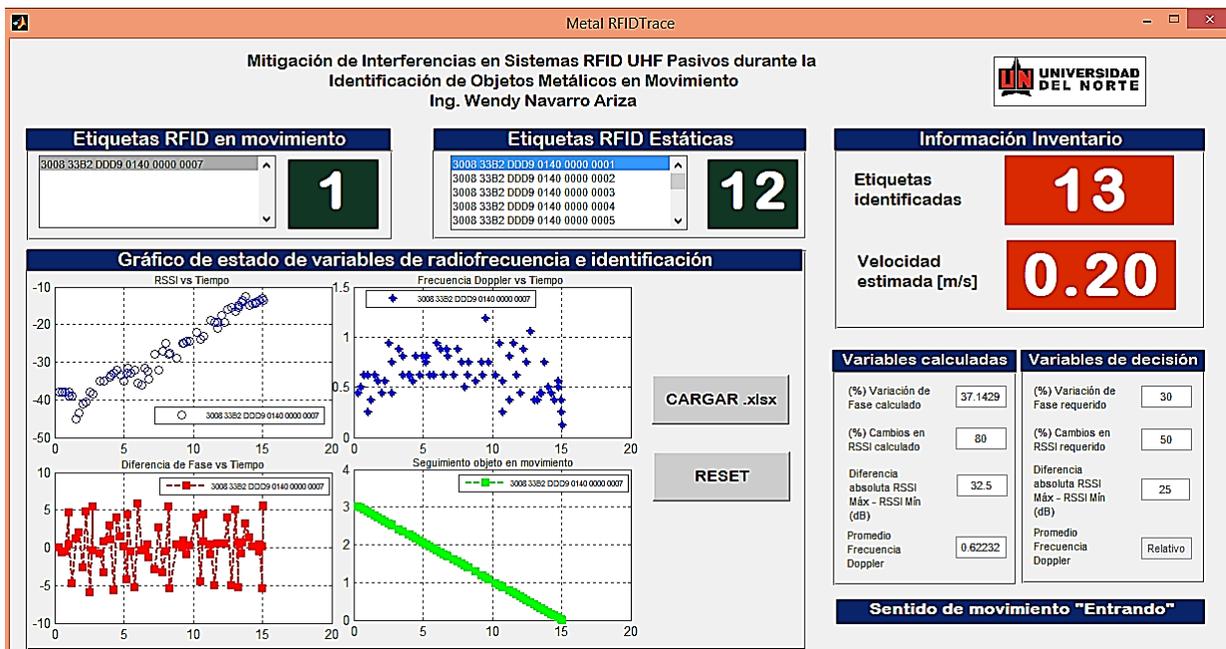
**Tabla 5.** *Reader Modes* ofrecidos por Impinj

Para el algoritmo diseñado se ha considerado el *Dense Reader M=8* el cual tiene una tasa de transferencia baja pero utiliza una comunicación lector-etiqueta estable ante interferencias producto de transmisiones de otras fuentes durante el proceso de identificación. Además, de acuerdo con el estándar [27] el método de búsqueda de etiquetas *Dual Target* permite la identificación de las etiquetas independientemente del estado de su bandera de identificación 'A' o 'B'. Estas banderas permiten que más de un lector pueda identificar un mismo grupo de etiquetas sin interferir entre ellos. Este *Search Mode* permite un mejor desempeño del sistema de acuerdo con [47] por lo cual se decidió utilizar. La *Session 2* permite mejorar el rendimiento de la lectura.

La información recopilada de las variables de radiofrecuencia durante el proceso de inventario es almacenada en un archivo en Excel utilizando la función `File.AppendText()`. Asignando la ruta de almacenamiento deseada, el algoritmo guarda el registro cronológico el estado de todas las variables de radiofrecuencia en un archivo con extensión '.xlsx'.

### 7.11. Estructura del algoritmo para el procesamiento y análisis de las variables de radiofrecuencia

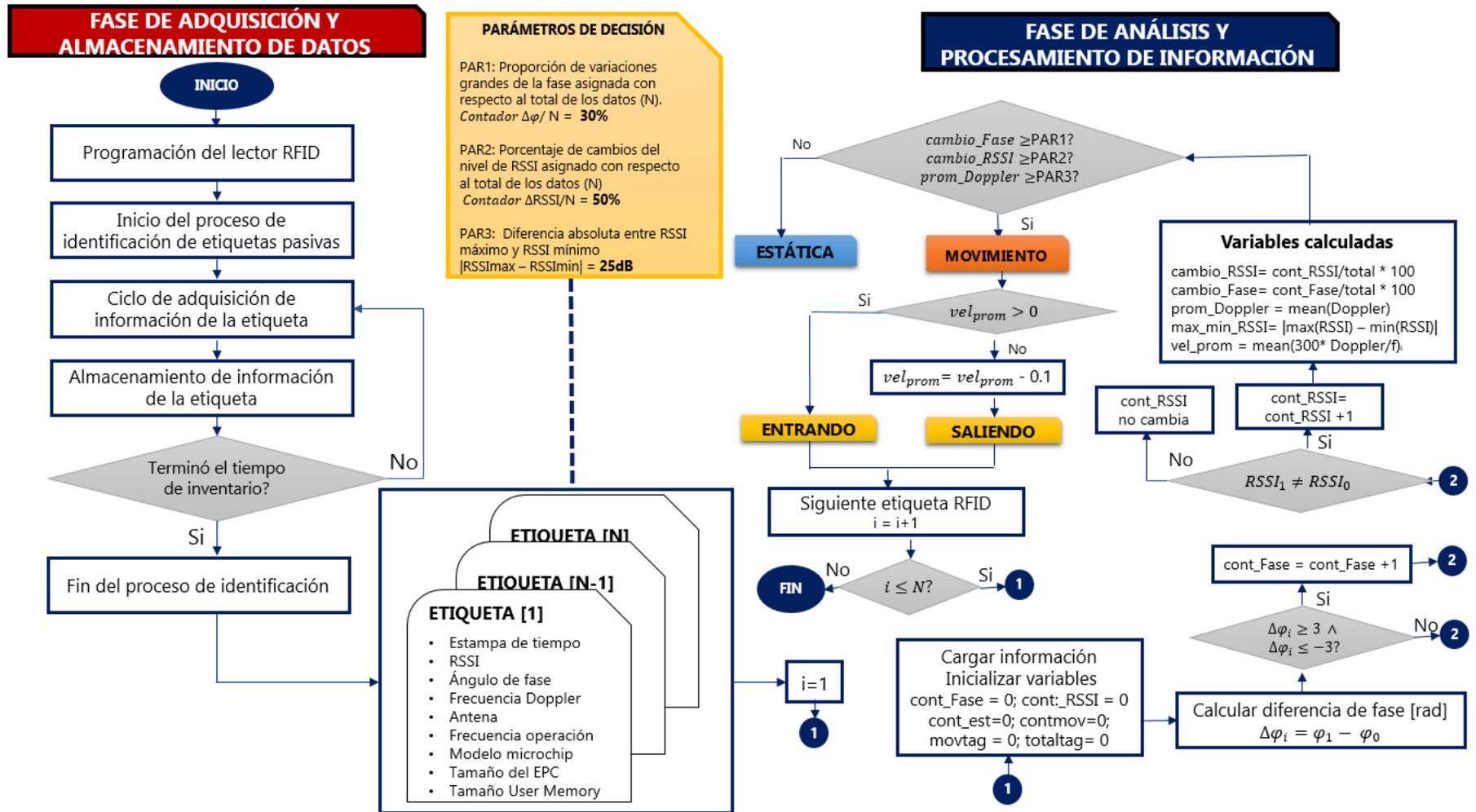
El algoritmo de procesamiento y análisis de la información recopilada por el algoritmo de adquisición y almacenamiento acerca del estado de las variables de radiofrecuencia es explicado en esta sección. Básicamente, luego de almacenar la información de las variables, estas se cargan en la interfaz presentada en la figura 33.



**Figura 33.** Interfaz gráfica de usuario construida para el análisis y procesamiento de las variables radioelectrónicas de decisión

La interfaz gráfica ha sido construida en Matlab y analiza el estado de las variables almacenadas para decidir si la etiqueta se encuentra estática o en movimiento. En ambos casos se presentará en pantalla el código EPC de las estructuras identificadas, el total de etiquetas estáticas encontradas, el total de estructuras dinámicas presentes y la sumatoria de estos valores representa la cantidad total de etiquetas reconocidas. Solamente se calcularán las variables de decisión para la etiqueta a la cual se le ha estimado su posible movimiento.

En la interfaz se visualizan cuatro gráficas, todas ellas en función del tiempo de identificación. La primera corresponde al nivel pico de RSSI, la segunda a la frecuencia Doppler, la tercera presenta la diferencia de fase y la cuarta la trazabilidad del objeto en movimiento. En el recuadro inferior derecho se menciona el sentido de movimiento estimado por el método y sobre este recuadro se presenta el estado de las variables calculadas con respecto a las variables de decisión. La figura 34 presenta el flujograma del algoritmo diseñado considerando la fase de adquisición y almacenamiento de información. En el Apéndice B se presentan detalladamente las líneas de código del algoritmo implementado.



**Figura 34.** Diagrama esquemático del algoritmo para el procesamiento y análisis de las variables radioelectrónicas considerada.

### III. EXPERIMENTOS, RESULTADOS, VERIFICACIÓN Y CONCLUSIONES



---

*En esta parte se presenta el diseño de experimentos, resultados experimentales y análisis estadístico cualitativo y cuantitativo de los datos obtenidos en cada una de las pruebas ejecutadas en dos tipos de ambientes: indoor y outdoor. Finalmente, se enuncian las conclusiones generales de la investigación*

---

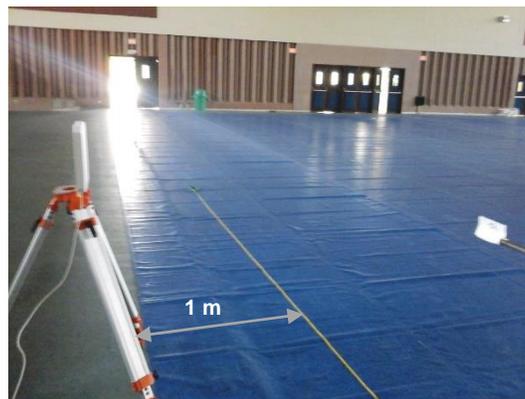


## 8. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

### 8.1. Estimación experimental del área de cobertura

Como se mencionó en la selección de la plataforma tecnológica del método propuesto, el sistema RFID será modelado a partir de un modelo físico compuesto por estructuras metálicas estáticas y/o en movimiento (láminas y cilindros), etiquetas RFID pasivas ShortDipole, un lector fijo Speedway Revolution R420 de Impinj y un antena externa PAL90209H de LAIRD Technology.

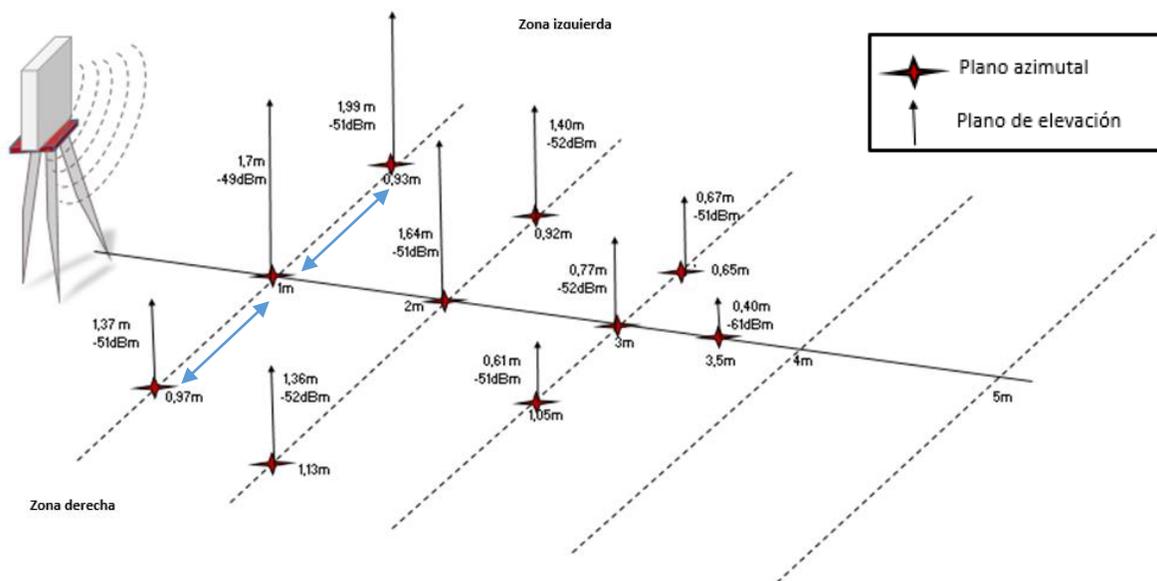
Como primera medida, se requiere delimitar el área de cobertura para el sistema RFID construido. Con el presente experimento se pretende realizar la estimación experimental del rango de alcance de la antena UHF externa para definir el área de cobertura. Las pruebas se realizaron en dos niveles de potencia 20dBm y 25dBm. La construcción del área de cobertura de la antena se realiza en dos planos: azimutal y elevación. El objetivo de esta prueba es conocer experimentalmente el área cubierta por la antena LAIRD y el nivel de RSSI registrado por una etiqueta pasiva ShortDipole realizando desplazamientos cada 1 m con respecto a la antena. La figura 35 presenta el escenario de la prueba realizada en donde una etiqueta ShortDipole se desplaza horizontal y verticalmente siguiendo la línea amarilla a 1 m de la antena lectora.



**Figura 35.** Escenario de la prueba para estimar el área de cobertura de la antena UHF externa PAL90209H de LAIRD Technology

Los desplazamientos se realizan de forma horizontal y vertical siguiendo las líneas rectas punteadas demarcadas por la figura 36 y 37 para una potencia de transmisión de 20dBm y 25dBm, respectivamente. Estas figuras no fueron construidas a escala. En cada desplazamiento horizontal la etiqueta se mueve a una altura de 1 m para reconstruir el plano azimutal. En los desplazamientos verticales se reconstruye el plano de elevación. Esto para construir el contorno de la zona de cobertura.

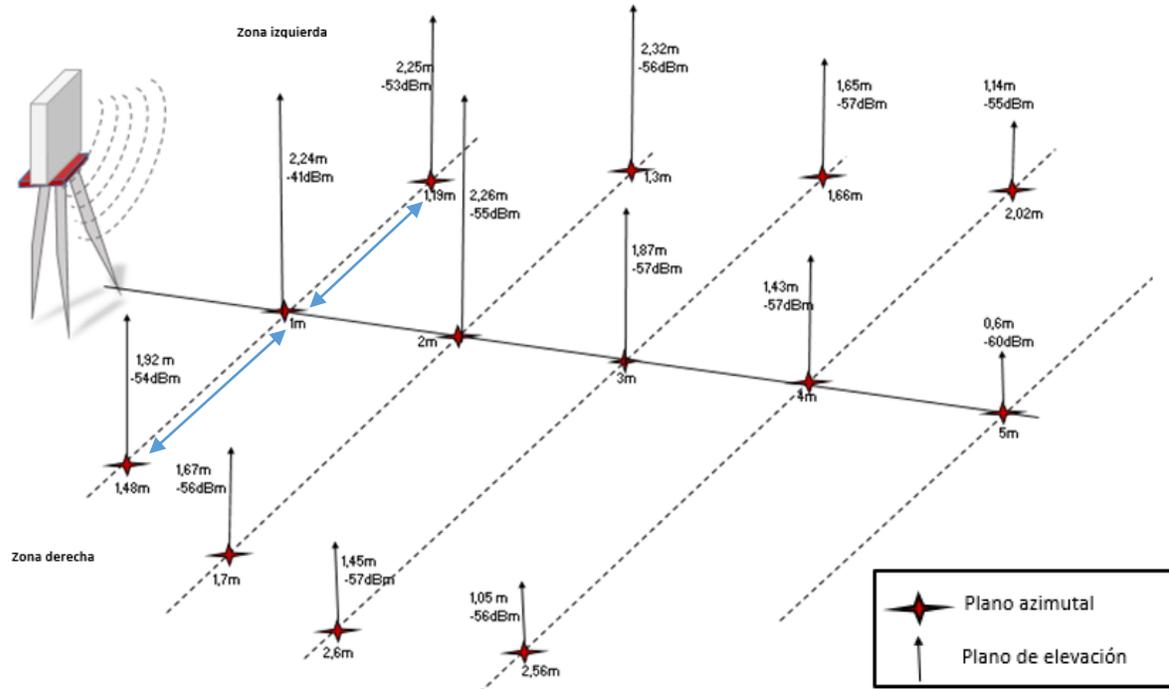
Para cada potencia considerada se encuentra el extremo hasta donde la etiqueta logra ser identificada. Para el plano azimutal se registra la distancia horizontal máxima con respecto al centro (es decir, enfrente de la antena del lector, línea continua) hasta donde la etiqueta es identificada. Se procede a desplazar la etiqueta verticalmente en los extremos del rango de cobertura encontrados y en el centro, hasta hallar el punto máximo donde es reconocida. En este punto se registra la distancia respecto al suelo y el nivel de RSSI (valores ubicados al costado de las flechas verticales).



**Figura 36.** Esquemático de los resultados obtenidos para el alcance de lectura de la antena LAIRD a una potencia de 20dBm (Véase figura 38)

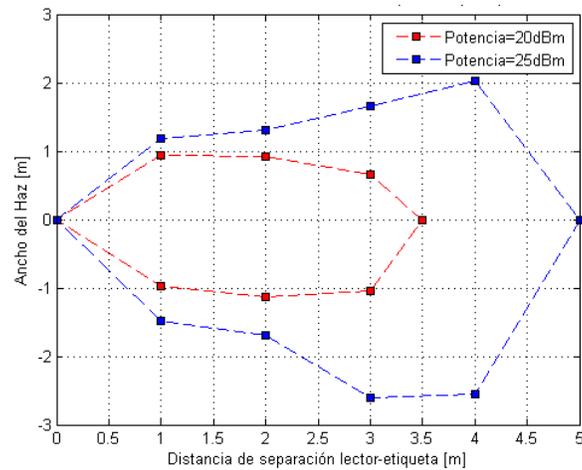
Para una potencia de transmisión de 20dBm, el alcance máximo corresponde a 3.5 m (enfrente de la antena, línea continua) con la etiqueta a una altura de 40 cm registrando un nivel de RSSI de -61dBm. De forma análoga, con una potencia de

25dBm el alcance máximo de lectura es 5 m (enfrente de la antena, línea continua) donde es posible identificar la etiqueta con un RSSI de -60dBm y a una altura de 60 cm.

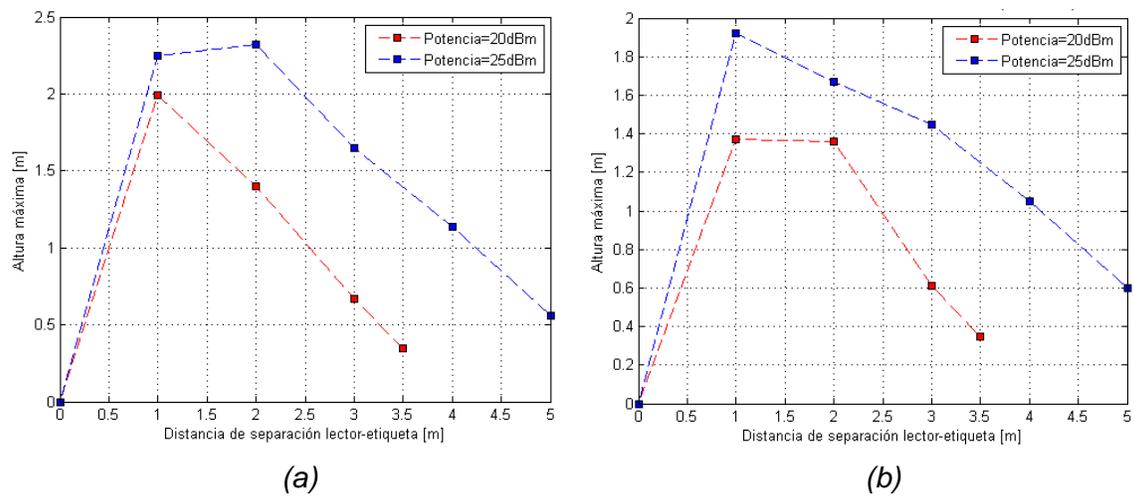


**Figura 37.** Esquemático de los resultados obtenidos para el alcance de lectura de la antena LAIRD a una potencia de 25dBm (Véase figura 38)

Las figuras 38 y 39 fueron construidas con el propósito de dar mayor claridad en la interpretación de los resultados obtenidos. En la figura 38 se presenta el resultado experimental de la construcción de la zona de cobertura en el plano azimutal para la antena LAIRD en las dos potencias de transmisión configuradas, 20dBm y 25dBm. Se observa que el área de cobertura tiende a ensancharse y extenderse cuando se aumenta la potencia de la señal transmitida. Las figuras 39 (a) y 39 (b) fueron construidas con el propósito de presentar la vista lateral del plano de elevación del alcance de lectura para la zona izquierda y derecha de la antena, respectivamente. Las zonas de la antena se presentan en las figuras 36 y 37.

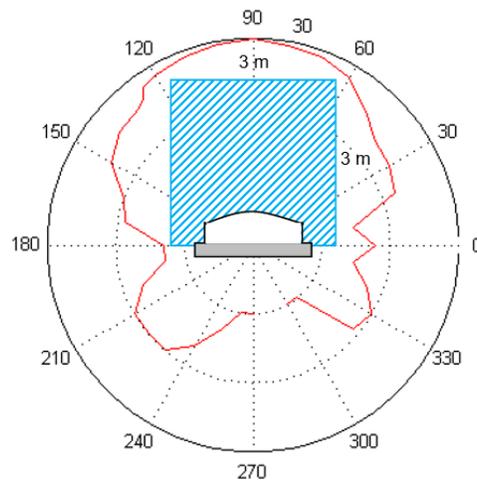


**Figura 38.** Vista superior del plano azimutal de la zona de cobertura de la antena PAL90209H de LAIRD Technology para una etiqueta ShortDipole



**Figura 39.** Vista lateral del plano de elevación de la zona de cobertura construido para la parte (a) izquierda y (b) derecha de la de la antena LAIRD

Para el método propuesto se considerará únicamente la potencia de 30dBm debido a que a máxima potencia la zona de cobertura se extiende aún más, aumentando los problemas de interferencia causados por la identificación de etiquetas estáticas cercanas. Los resultados obtenidos permiten delimitar el área para el desarrollo de pruebas a 3m enfrente de la antena lectora y 1.5m a cada costado, es decir, un área de 9m<sup>2</sup>. El área sombreada en la figura 40 representa la zona de cobertura considerada en los experimentos.



**Figura 40.** Área de cobertura considerada en los experimentos realizados

## 8.2. Caracterización de variables de radiofrecuencia en etiquetas adheridas sobre objetos metálicos estáticos

Considerando el área de cobertura descrita en la figura 40 se procede a realizar la caracterización de las variables de radiofrecuencia extraídas por el algoritmo de adquisición y almacenamiento presentado en el Apéndice A. Las variables consideradas serán nivel de RSSI, ángulo de fase y frecuencia Doppler.

El propósito del método es conseguir valores a las variables de decisión que funciones satisfactoriamente mitigando las interferencias estáticas en los dos ambientes considerados para las estructuras metálicas utilizadas.

Las pruebas se desarrollaron en dos ambientes distintos, uno *indoor* y el otro *outdoor*. Para cada uno de ellos se registrará el análisis independiente de sus resultados. Las figuras 41 y 42 presentan el escenario de medición en el ambiente *indoor* y *outdoor* respectivamente. El primer ambiente corresponde al Laboratorio de Telecomunicaciones y Señales de la Universidad del Norte. El segundo a la cancha multifuncional de tenis de la universidad. El laboratorio tiene dimensiones de 3.73m x 4.30m. La cancha por su parte mide 31.7m x 19m. Los resultados de las pruebas en cada medio son analizados por separado obteniendo conclusiones específicas para cada uno.



(a)



(b)

**Figura 41.** Escenario para la ejecución de experimentos en un ambiente *indoor* para (a) cilindros y (b) láminas



(a)



(b)

**Figura 42.** Escenario para la ejecución de experimentos en un ambiente *outdoor* para (a) cilindros y (b) láminas

El diseño de los experimentos presentados en esta sección considera los siguientes aspectos en común:

#### **Determinación de las variables que intervienen**

- **Variables Independientes (Factores)**

- ✓ Distancias de separación lector-etiqueta enfrente de la antena lectora
- ✓ Estructuras metálicas consideradas

- **Niveles**

- ✓ 30 distancias consideradas desde 0.15m hasta 3.15m.
- ✓ Un cilindro y una lámina galvanizada

### **Determinación del número de casos**

Se realizan 10 repeticiones por nivel. Cada repetición consiste en un proceso de identificación de 15s. Para 30 distancias de separación consideradas, 2 estructuras metálicas y 10 repeticiones, el número de casos es 600 para cada ambiente.

### **Manipulación de los factores o variables independientes del experimento**

Se decidió trabajar con dos tipos de estructuras metálicas distintas: un cilindro de 30cm de diámetro y 1m de longitud y una lámina galvanizada con dimensiones de 1m x 0.7m. La prueba considera una sola estructura metálica en cada medición sobre la cual es adherida una etiqueta ShortDipole de la forma como se mencionó en la sección 7.1. El algoritmo de adquisición y almacenamiento de información es programado para realizar un inventario de 15s a una potencia de 30dBm. Durante este tiempo la etiqueta permanece estática en una posición específica. Al terminar el proceso de inventario ésta es desplazada a la siguiente distancia de separación considerada. Las distancias de separación lector-etiqueta son demarcadas sobre la línea punteada presentada en la figura 26. Finalmente, para minimizar las reflexiones debidas al suelo la antena se ubicó a una altura de 1 m.

Las distancias consideradas son: 0.15m, 0.25m, 0.3m, 0.45m, 0.5m, 0.55m, 0.6m, 0.75m, 0.9m, 1m, 1.05m, 1.2m, 1.25m, 1.35m, 1.5m, 1.65m, 1.75m, 1.8m, 1.95m, 2m, 2.1m, 2.25m, 2.4m, 2.5m, 2.55m, 2.7m, 2.75m, 2.85m, 3m y 3.15m. Se escogieron de esta forma para mantener relación con la longitud de onda de la señal transmitida. Para la frecuencia central de 915MHz  $\lambda \approx 30cm$ . Los incrementos considerados en las distancias fueron de  $\lambda/2 \approx 15cm$ . Esto se realiza recordando que la fase es periódica con periodo  $2\pi$  cada  $\lambda/2$ . Adicionalmente, se tomaron datos a distancias intermedias para caracterizar las variables en puntos distintos.

### **Medición de la variable dependiente del experimento**

Las variables de radiofrecuencia consideradas fueron medidas a partir del SDK Octane 4.8 utilizado para la construcción del algoritmo de adquisición y almacenamiento descrito en la sección 7.10 de la parte II. El algoritmo fue programado para almacenar la información de la variable durante 15s. Se almacenó el estado de la variable en una base de datos en Excel. A cada observación de la variable de interés se le asigna una

estampa de tiempo la cual permitirá mantener el historial cronológico en cada instante del inventario.

### **8.2.1. Caracterización del porcentaje de cambios del nivel de RSSI**

#### 8.2.1.1. Planteamiento

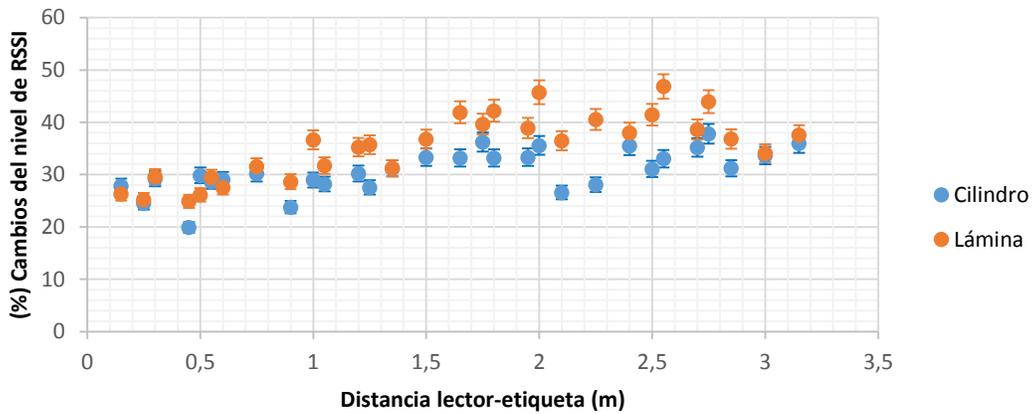
El propósito de este experimento es determinar la influencia de las variaciones del nivel de RSSI sobre la estimación de una etiqueta estática dentro del área de cobertura. Para ello, se considerará el análisis temporal de esta variable de radiofrecuencia.

En una de las pruebas realizadas en [45] se ajustó el valor del porcentaje de cambios del nivel de RSSI en un valor de 45% del número total de datos de RSSI para estimar que la etiqueta era estática. Sin embargo, estos valores eran continuamente ajustados sin mencionar al final del estudio cuál de todos los considerados corresponde al mejor valor para el parámetro de decisión. Teniendo en cuenta que las pruebas registradas en [45] fueron realizadas sin considerar diferentes distancias de separación lector-etiqueta y la influencia de artículos metálicos, en el presente experimento se evaluará el comportamiento de la variable en cuestión bajo las condiciones ignoradas.

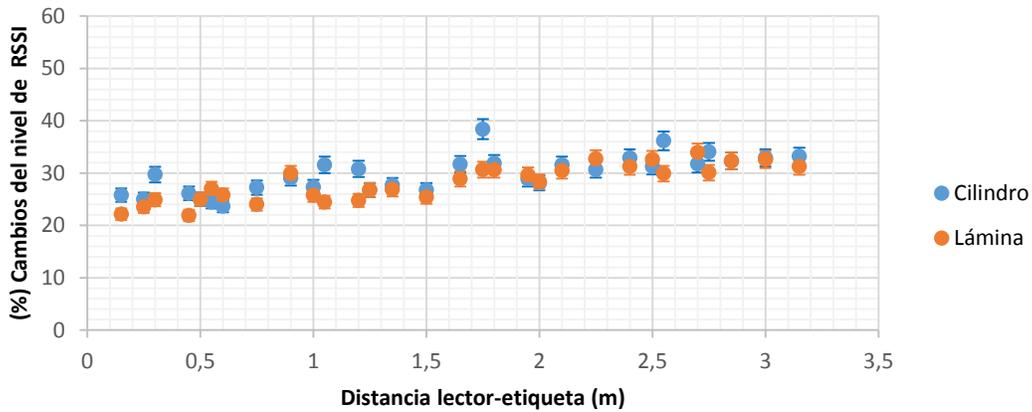
#### 8.2.1.2. Resultados y análisis

Los resultados de este experimento se presentan para cada ambiente por separado. Para cada repetición se tienen 300 datos de nivel de RSSI (20 lecturas/s x 15s). Por realizarse 10 repeticiones se cuentan con 3000 datos de RSSI por distancia. Básicamente, para cada una de las repeticiones se realizó la comparación cronológica del nivel de RSSI en el tiempo con respecto a la observación inmediatamente anterior. Cuando el nivel de RSSI de la observación actual fuese distinto al RSSI anterior se aumentaba el contador que acumula el registro de los cambios. Luego, este contador se expresa como un porcentaje del número total de observaciones para cada repetición. Finalmente, se calcula el valor promedio y la desviación estándar del porcentaje de cambios en el nivel de RSSI para las repeticiones de cada distancia considerada. Luego, se realiza un análisis estadístico por medio de intervalos de confianza del 95%

calculados en Excel como  $=\text{INTERVALO.CONFIANZA.NORM}(0.05, \sigma, N)$ . Se utiliza el estadístico Z para la media. De esta forma, es posible determinar los límites del valor promedio del porcentaje de cambios del nivel de RSSI para cada distancia. Estos límites son presentados en las figuras 43 (a) y 43 (b) para el ambiente *indoor* y *outdoor*, respectivamente.



(a)



(b)

**Figura 43.** Porcentaje de cambios del RSSI en un ambiente (a) *indoor* y (b) *outdoor*

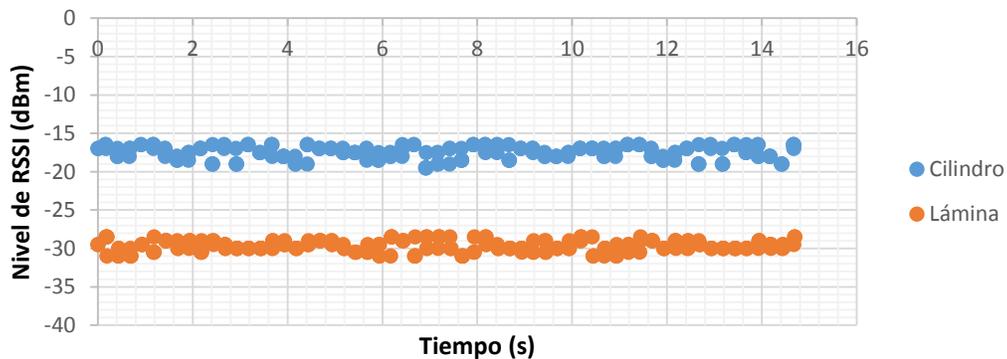
De las figuras 43 (a) y 43 (b) se puede observar que esta variable de radiofrecuencia no se mantiene en el valor específico del 45% para las diferentes distancias de separación consideradas. Se evidencia de esta forma la influencia de adherir la etiqueta a la estructura metálica comparando el resultado con [45]. Para el medio *indoor* el máximo valor que alcanza el porcentaje de cambio del nivel de RSSI

en las distancias consideradas es del 48% para una lámina ubicada a 2.55m. En el caso del ambiente *outdoor* el valor máximo es del 40% para un cilindro ubicado a 1.75m de la antena lectora.

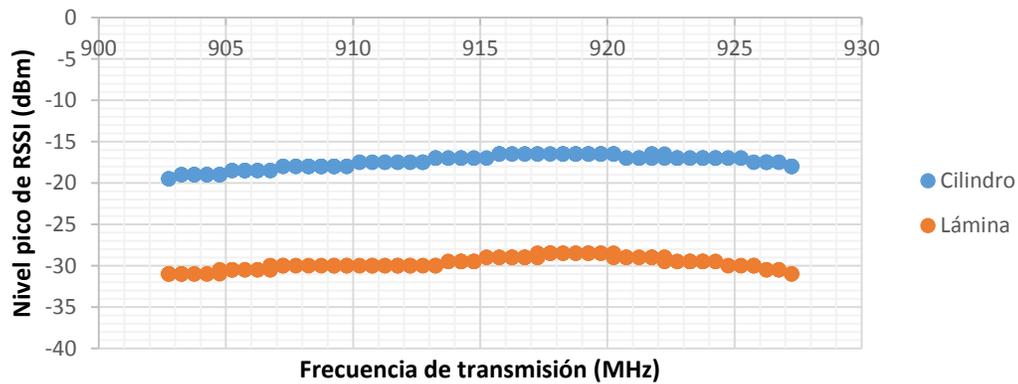
Por tanto, se concluye que el porcentaje de cambios del nivel de RSSI es estadísticamente igual al 45% para el ambiente *indoor*. En cambio, para el ambiente *outdoor* esta variable radioelectrónica no es igual al 45%. Además, se observa que para ambos ambientes el porcentaje de cambios máximo no supera el valor de 50%.

### 8.2.1.3. Análisis del nivel de RSSI con respecto al tiempo y la frecuencia de operación

Las figuras 44, 45, 46 y 47 presentan el comportamiento del nivel de RSSI durante un periodo de identificación de 15s. Estas gráficas fueron construidas para las dos estructuras metálicas a una distancia de separación lector-etiqueta de 60cm. En cada caso, para el análisis en el tiempo hay 300 datos de RSSI. En la frecuencia hay 52 puntos debido a los 52 canales de frecuencia permitidos de 902-928MHz.

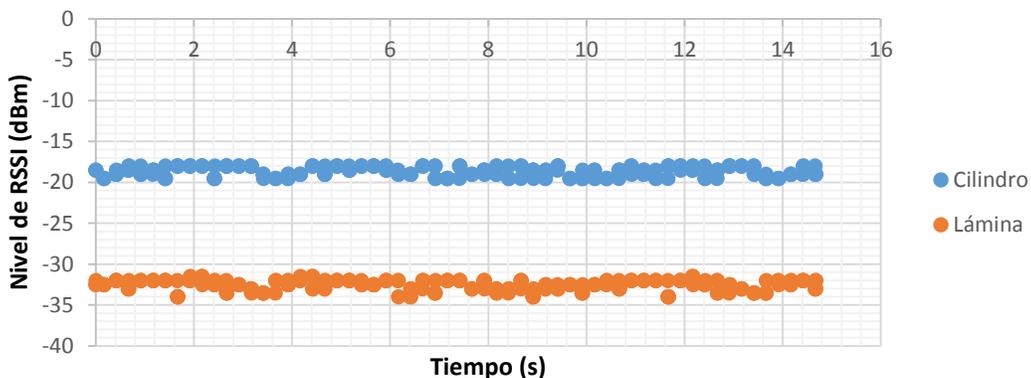


**Figura 44.** Registro de nivel de RSSI durante el periodo de identificación en un ambiente *indoor*

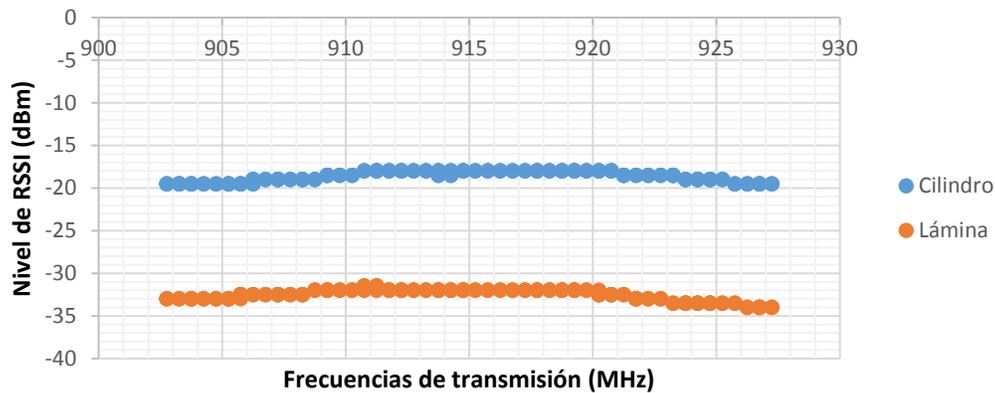


**Figura 45.** Registro de nivel de RSSI con respecto al canal en un ambiente *indoor*

De estas gráficas se puede observar que las variaciones del nivel de RSSI durante el tiempo de identificación de estructuras metálicas estáticas no son estadísticamente significativas. Además, es posible apreciar una leve disminución en el nivel de RSSI cuando la estructura metálica es identificada en un ambiente *outdoor* esto debido a la influencia del medio de propagación. En un ambiente confinado la propagación de las ondas electromagnéticas de los sistemas RFID UHF pasivos alcanza mayores distancias con un buen nivel de RSSI. Tal como se menciona en [48] no se experimenta efectos de multirayectoria en sistemas RFID UHF pasivos.



**Figura 46.** Registro cronológico de nivel de RSSI durante el periodo de identificación en un ambiente *outdoor*



**Figura 47.** Registro de nivel de RSSI con respecto al canal en un ambiente *outdoor*

## 8.2.2. Caracterización de la diferencia absoluta del RSSI máximo y mínimo

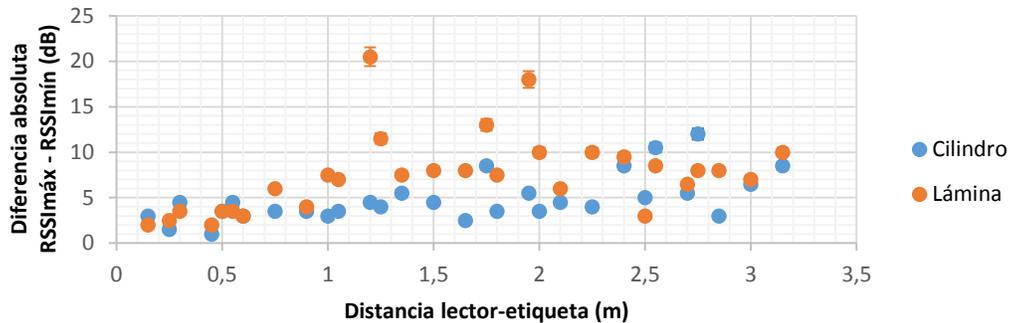
### 8.2.2.1. Planteamiento

El propósito de este experimento es determinar la influencia de la diferencia absoluta del nivel RSSI máximo y mínimo sobre la estimación de una etiqueta estática dentro del área de cobertura. Se realizará un análisis de las respuestas cronológicas de esta variable al finalizar el inventario de 15s. El experimento diseñado fue replicado en dos ambientes distintos uno *indoor* y otro *outdoor*. Los resultados son analizados por separado obteniendo conclusiones específicas para cada medio. De acuerdo con el estándar EPCglobal Clase 1 Generación 2 en [26] y [27] se espera que en condiciones estables el nivel máximo de RSSI difiera del mínimo por debajo de los 20dB. A partir de esta premisa se desarrolla el presente experimento con el fin de evaluar el comportamiento de esta variable en estructuras metálicas estáticas.

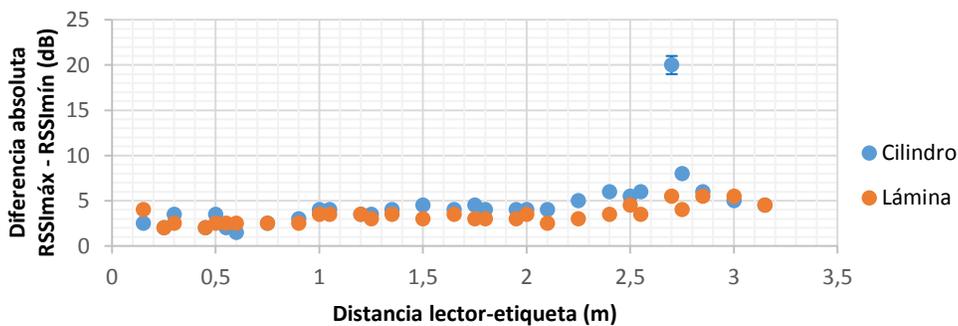
### 8.2.2.2. Resultados y análisis

Mediante un análisis estadístico de intervalos de confianza del 95% análogo al mencionado en la sección 8.2.1.2 se realizó la construcción de las figuras 48 (a) y 48 (b). La figura 48 (a) presenta el comportamiento de la diferencia absoluta en el ambiente *indoor*. Por su parte, la figura 48 (b) muestra el estado de la variable de interés con

respecto a las distancias consideradas en el ambiente *outdoor*. Para cada gráfica se tienen 30 puntos de la variable analizada.



(a)



(b)

**Figura 48.** Diferencia absoluta entre el nivel de RSSI máximo y el mínimo con respecto a la distancia de separación en un ambiente (a) *indoor* y (b) *outdoor*

En los dos medios se observa que para ambas estructuras metálicas la diferencia absoluta entre el nivel de RSSI máximo y el mínimo no supera los 22dB. Se observa que la variabilidad es menor para el ambiente *outdoor*. Sin embargo, se presenta un caso atípico en 2.7 m debido posiblemente a situaciones de reflexión o interferencias durante la medición. Nótese que este valor atípico sigue cumpliendo estadísticamente con la especificación del fabricante.

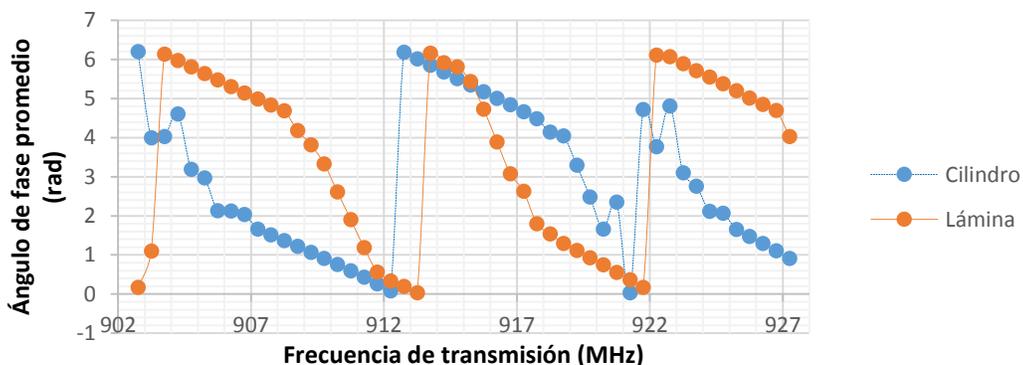
De esta forma, se concluye que para ambos ambientes la diferencia absoluta entre el nivel de RSSI máximo y mínimo cumple con la especificación de 20dB dada por el fabricante independientemente de la distancia de separación lector-etiqueta y la estructura metálica estática sobre la cual esta se adhiera.

### 8.2.3. Comportamiento del ángulo de fase en etiquetas estáticas

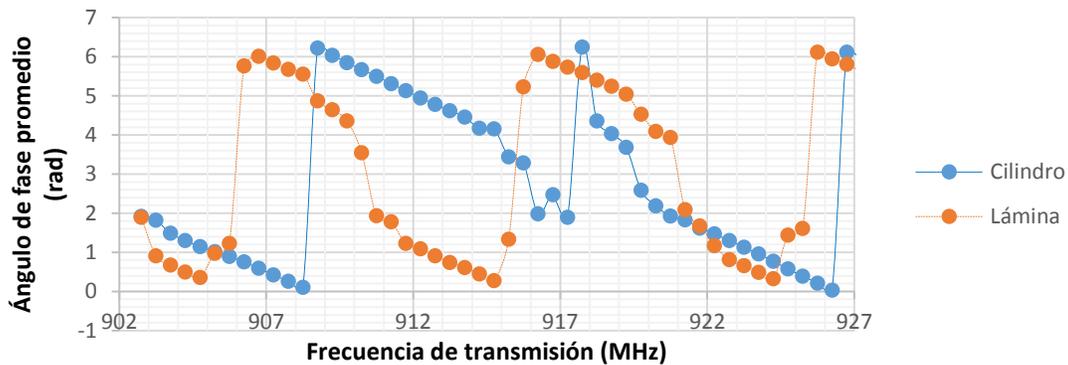
En este experimento se pretende analizar el comportamiento del ángulo de fase de las señales recibidas por el lector en el dominio del tiempo y la frecuencia. De acuerdo con [46] el ángulo de fase es periódico con periodo  $2\pi$ .

Para este experimento se ubica una etiqueta RFID a una distancia de 60cm, la cual corresponde a dos longitudes de onda aproximadamente, realizando inventarios de 15s y considerando 10 repeticiones. La etiqueta ShortDipole es adherida sobre un cilindro y luego sobre una lámina galvanizada con dimensiones presentadas en 6.2.1.4 de la parte II.

Debido al espectro en frecuencia FHSS de los sistemas RFID pasivos que operan bajo *Frequency Hopping*, se observa que en el rango de 902MHz-928MHz las etiquetas responden al lector en diferentes canales de frecuencia. Para cada canal el lector registra un ángulo de fase de la señal recibida de 0 a  $2\pi$  rad. Durante 15s se obtienen 300 valores de ángulo de fase los cuales se promedian para cada frecuencia. La respuesta suavizada se presenta en las figuras 49 y 50. Se observa la marcada forma de “*diente de sierra*” en el ángulo de fase debido a la forma como el método propone representar los datos.

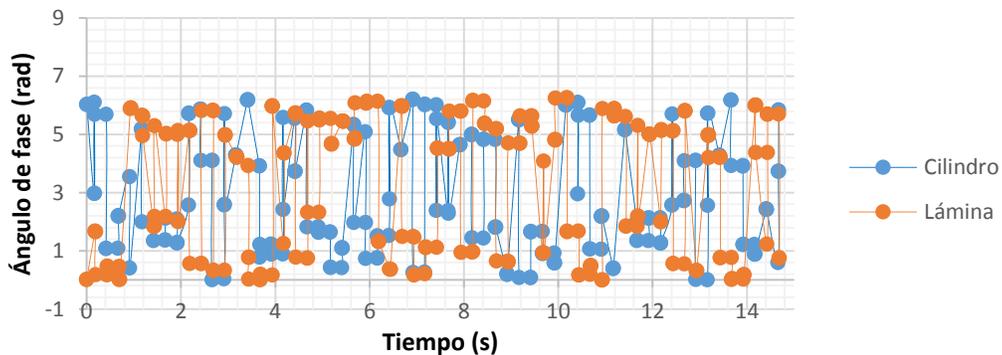


**Figura 49.** Registro del ángulo de fase con respecto a la frecuencia de operación durante el periodo de identificación en un ambiente *indoor*

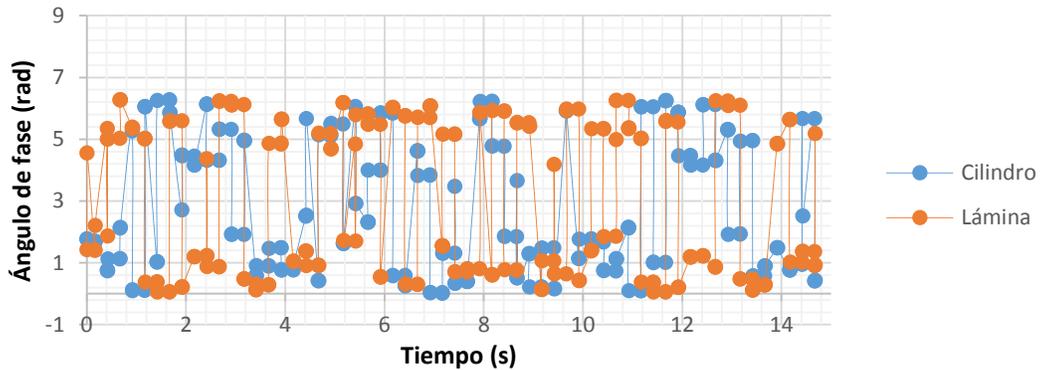


**Figura 50.** Registro del ángulo de fase con respecto a la frecuencia de operación durante el periodo de identificación en un ambiente *outdoor*

Con el fin de observar los valores que adquiere la variable para cada observación se han construido las figuras 51 y 52 para los ambientes *indoor* y *outdoor* respectivamente. Realizar el análisis temporal del comportamiento de fase utilizando estas gráficas es complejo. Por FHSS cada lectura se recibe por un canal distinto por lo que es natural que la fase varíe tal como muestran las figuras 51 y 52. Por este motivo, se decidió calcular la variación de fase instantánea utilizando la información de dos observaciones consecutivas. Los resultados se presentan en las 53 y 54 para ambientes *indoor* y *outdoor*, respectivamente.

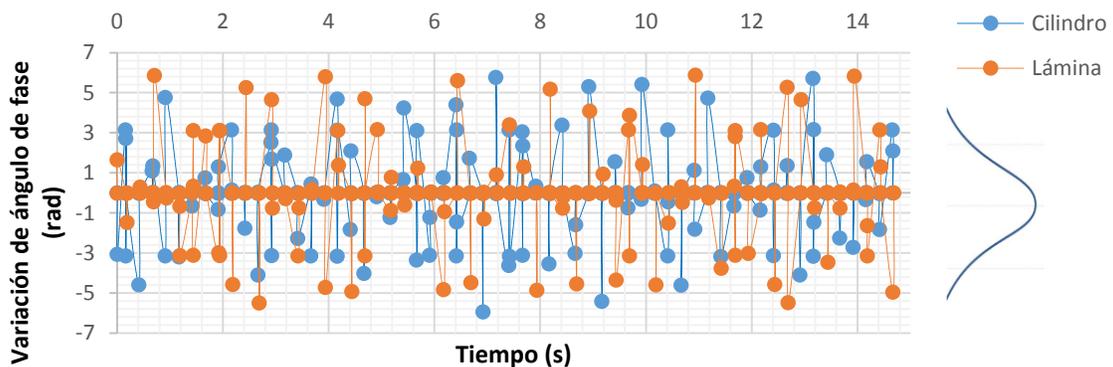


**Figura 51.** Registro de observaciones consecutivas de ángulo de fase con respecto al tiempo en un ambiente *indoor*

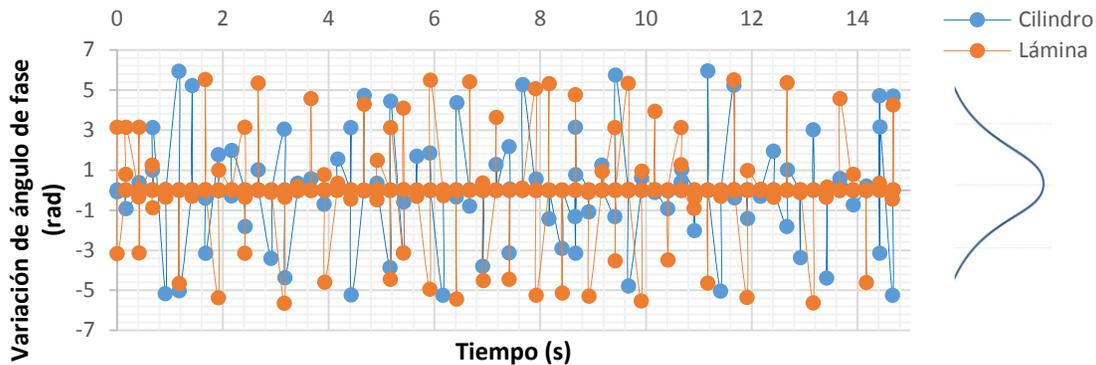


**Figura 52.** Registro de observaciones consecutivas de ángulo de fase con respecto al tiempo en un ambiente *outdoor*

Las figuras 53 y 54 presentan el comportamiento de las variaciones del ángulo de fase con respecto a las lecturas cronológicas de la fase para una etiqueta RFID pasiva adherida sobre las estructuras metálicas consideradas. En estas gráficas se observa que el valor medio de las diferencias de fase se concentra alrededor de los 0 radianes y presenta picos que pueden alcanzar los  $\pm 2\pi$  radianes. Con ello se concluye que los cambios del ángulo de fase son pequeños y paulatinos entre saltos de frecuencia durante el tiempo de identificación. Se plantea como trabajo futuro estimar la distribución de probabilidad que mejor se ajuste a las observaciones de ángulo de fase para diferentes distancias de separación lector-etiqueta consideradas.



**Figura 53.** Registro de observaciones consecutivas de la variación de ángulo de fase con respecto al tiempo en un ambiente *indoor*



**Figura 54.** Registro de observaciones consecutivas de la variación de ángulo de fase con respecto al tiempo en un ambiente *outdoor*

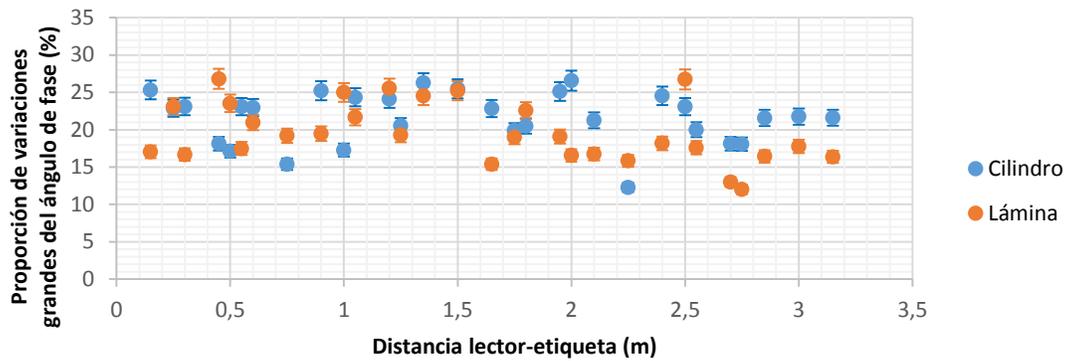
### 8.2.4. Caracterización de la proporción de variaciones grandes del ángulo de fase

#### 8.2.4.1. Planteamiento

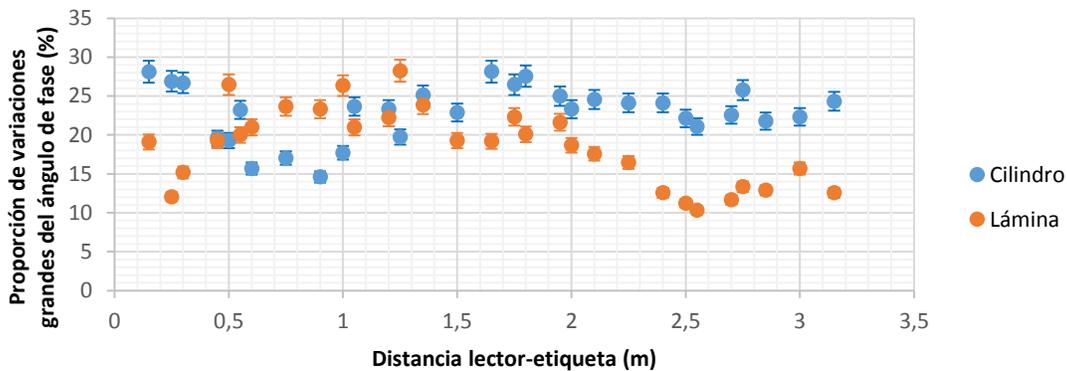
La necesidad de analizar la diferencia de fase como una variable de radiofrecuencia con información relevante surge de los resultados obtenidos en el experimento 8.2.3. Con el propósito de extraer información de la proporción de valores grandes encontrados en las variaciones de fase con respecto al tiempo se ha diseñado el presente experimento.

#### 8.2.4.2. Resultados y análisis

Aplicando un análisis estadístico basado en intervalos de confianza del 95% a los resultados obtenidos en cada medio considerado se construyen las figuras 55 (a) y 55 (b). Para cada punto se usan 10 repeticiones, cada una de 15s, es decir, cada distancia resulta en 150 segundos de medición (típicamente, 150s x 20 lecturas/s = 3000 mediciones). En las figuras se calcula la proporción promedio de los valores cuya diferencia de fase es grande (mayor a 3 radianes y menor a -3 radianes) respecto al total de los valores en cada una de las 10 repeticiones consideradas. De acuerdo con los resultados obtenidos es posible observar que a una potencia de 30dBm la variable de radiofrecuencia analizada no supera el valor de 30%. Para el ambiente *outdoor* el mayor porcentaje de valores atípicos en el cambio de fase para el caso del cilindro fue 28.14% obtenido a una distancia de separación de 1,65m, para el caso de la lámina fue de 28.25% obtenido a 1.25m de separación lector-etiqueta.



(a)



(b)

**Figura 55.** Proporción de valores grandes en las variaciones de fase con respecto a la distancia de separación lector-etiqueta en un ambiente (a) *indoor* y (b) *outdoor*

De esta forma, se concluye que el porcentaje de los valores de diferencia de fase mayores a 3 radianes y menores a -3 radianes no supera el 30% del total de observaciones registradas independientemente de la distancia de separación lector-etiqueta y de la estructura metálica sobre la cual esta se adhiere.

### 8.2.5. Caracterización de la frecuencia Doppler promedio

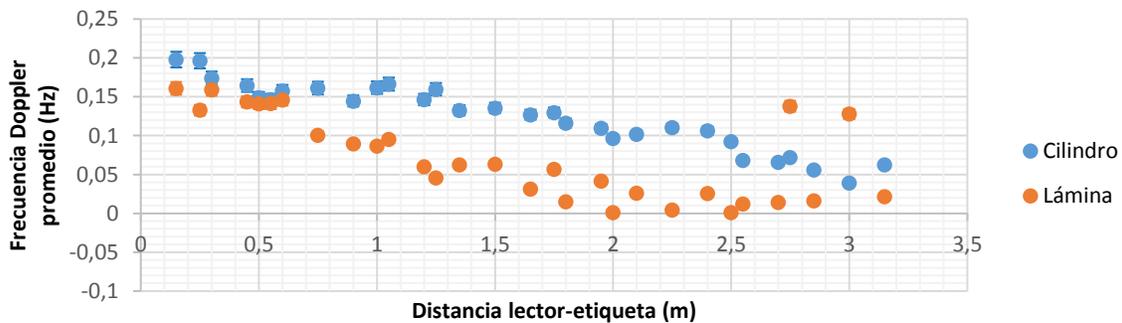
#### 8.2.5.1. Planteamiento

El presente experimento tiene como propósito caracterizar el estado del valor promedio de la frecuencia Doppler para estimar el estado de reposo de una etiqueta RFID pasiva en el área de cobertura. De acuerdo con [49] la frecuencia Doppler estima

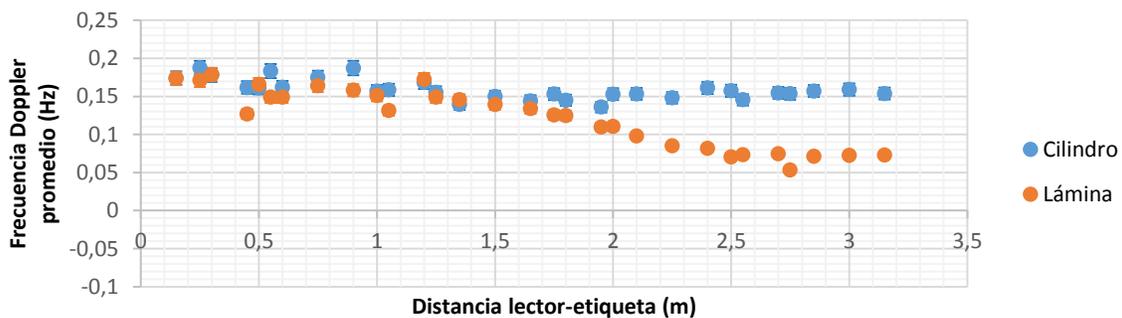
la velocidad de un objeto en movimiento. Se espera que en el caso de estructuras metálicas estáticas la frecuencia Doppler promedio sea 0 Hz o menor a 1 Hz (mínimo valor para condición de movimiento).

### 8.2.5.2. Resultados y análisis

La figura 56 presenta el resultado del experimento realizado en los ambientes *indoor* y *outdoor* considerando intervalos de confianza del 95% y una etiqueta ShortDipole estática ubicada a diferentes distancias. Se observa que para ambos ambientes la frecuencia Doppler promedio registrada para el cilindro y la lámina presenta valores menores a 1 Hz en todas las distancias consideradas. Aunque existe una tendencia de acercarse a cero a medida que se aumenta la distancia de separación lector-etiqueta nunca se obtiene exactamente el valor de 0 Hz. Se plantea como trabajo futuro encontrar la relación entre la frecuencia Doppler y la distancia de separación.



(a)

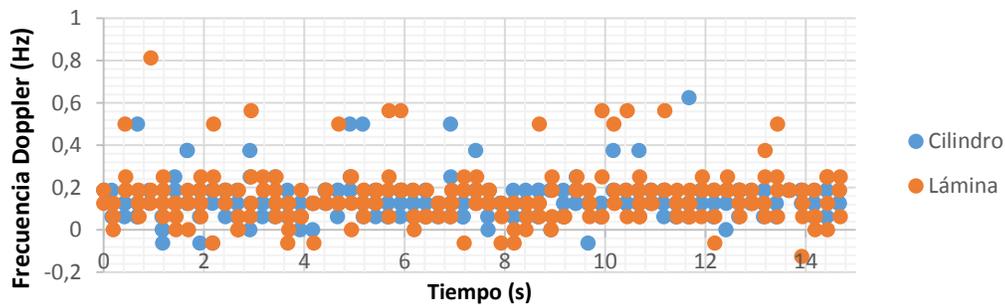


(b)

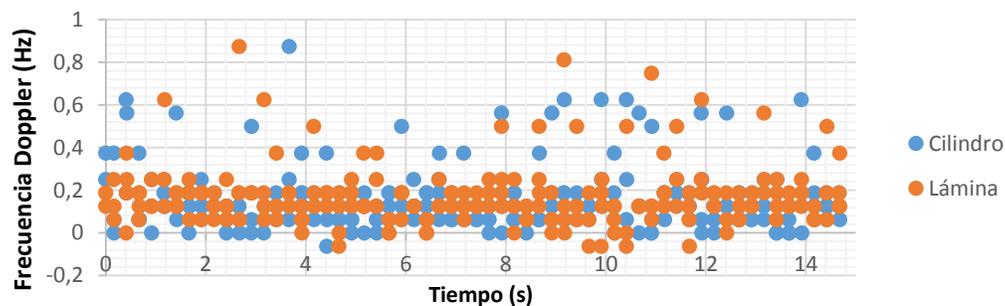
**Figura 56.** Frecuencia Doppler promedio con respecto a la distancia de separación lector-etiqueta en un ambiente (a) *indoor* y (b) *outdoor*

Por ello, se concluye que la frecuencia Doppler promedio es menor a 1 Hz (típicamente, menor a 0.25 Hz y cercanos a 0 Hz) independientemente de la distancia de separación lector-etiqueta y de la estructura metálica sobre la cual esta se adhiera.

Para una distancia de separación lector-etiqueta de 60 cm se construye la figura 57. En ella se presenta el registro cronológico de la frecuencia Doppler para una repetición de 15s las 10 realizadas para esta distancia. Se tienen 300 puntos de la frecuencia Doppler en cada gráfica. Los valores iguales se superponen en las gráficas. Se observa una variabilidad de la frecuencia Doppler en el tiempo para una etiqueta adherida a un cilindro metálico o una lámina galvanizada. Utilizando la información de la figura 56 se concluye que a una distancia de separación de 60 cm los valores se distribuyen en torno a la media que para ambos ambientes y ambas estructuras metálicas corresponde a 0.15 Hz, aproximadamente.



(a)



(b)

**Figura 57.** Registro cronológico de la frecuencia Doppler instantánea de una etiqueta ShortDipole adherida a una estructura metálica separada 60cm de la antena lectora. Se considera la respuesta en el tiempo en un ambiente (a) *indoor* y (b) *outdoor*

### 8.3. Estimación experimental de la ubicación de una estructura metálica estática

Durante la investigación realizada se observó que aplicando el método de estimación basado en PDoA es posible realizar la analogía del sistema de comunicación con un radar de *Dual-Frequency CW*. Sin necesidad de utilizar un lector que emita dos frecuencias al tiempo y aprovechando las ventajas del *Frequency Hopping*, se deduce un modelo capaz de estimar la distancia lector-etiqueta a partir del cambio de fase con respecto a las variaciones de la frecuencia de operación.

Se desea que el modelo pueda ser capaz de estimar la localización de una etiqueta estática sin importar la superficie sobre la cual es adherida. Además, dado que los experimentos fueron realizados en un ambiente *indoor* y otro *outdoor* se desarrolla un modelo distinto para cada medio considerado. Esto se realiza sin considerar el nivel de RSSI como una variable de entrada dado que las condiciones del medio pueden cambiar el valor de la fuerza de la señal recibida y afectar el resultado de la estimación. Adicionalmente, la fase no depende de la potencia de transmisión aplicada como se demostró en [43] por lo cual el nivel de RSSI no se considera una variable de radiofrecuencia con información estable que permita una estimación precisa.

Para este experimento se realizan 10 repeticiones donde se mide la fase, la frecuencia de operación y la estampa de tiempo. La etiqueta ShortDipole es adherida sobre una lámina galvanizada y un cilindro metálico. Se consideran 30 distancias de separación lector-etiqueta distintas (las mismas que han sido consideradas en los experimentos anteriores representadas por la línea punteada de la figura 26). Para cada una de estas distancias se calcula una posición estimada a partir de la ecuación 17 de [16], [38] y [43].

$$d_{estimada} = \frac{-c \Delta\varphi}{4\pi \Delta f} \quad (17)$$

Donde  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  es la velocidad de la luz,  $\Delta f = f_2 - f_1$  y  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  es la diferencia entre dos frecuencias consecutivas y entre dos fases consecutivas, respectivamente.

Dado que se tienen 50 canales de frecuencia distintos en el espectro FHSS y 10 repeticiones, por cada distancia considerada en este experimento se calculan 490 estimaciones (49 diferencias x 10 repeticiones). Para cada conjunto de distancias estimadas se encuentran los estadísticos de variabilidad (desviación estándar, máximo, mínimo) y de tendencia central (media, mediana, moda) con el fin de encontrar el que mejor permita estimar la distancia de separación lector-etiqueta.

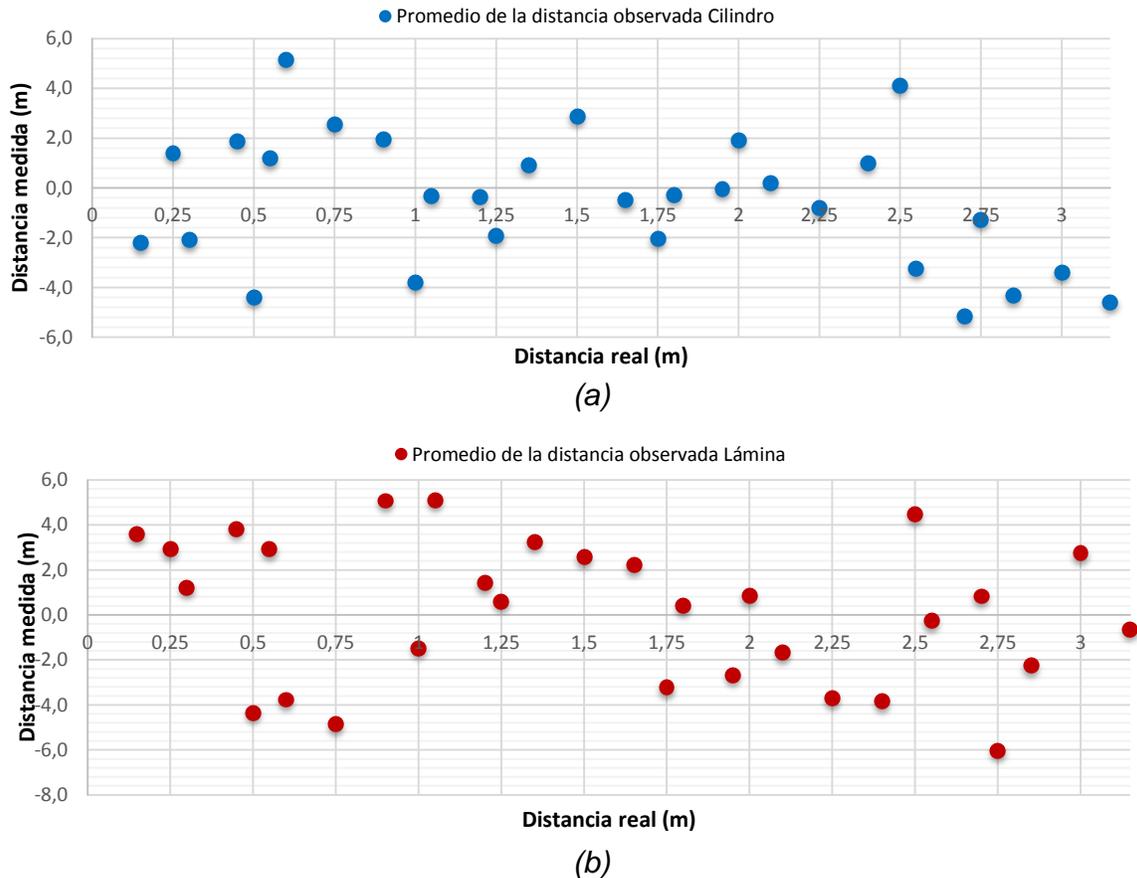
El modelo de la ecuación 17 consiste en tomar diferencias de fase para cada par de frecuencias consecutivas en cada distancia considerada, luego de terminar el inventario programado con un tiempo de 15s. A los 15s se asegura un total cubrimiento del ancho de banda permitido para el sistema RFID pasivo construido lo cual permite que para cada frecuencia se tenga al menos un valor de ángulo de fase en condiciones estables [26]. Los datos son procesados de tal forma que al finalizar el inventario los estimadores de la fase se calculan con los 50 canales de frecuencia ordenados de forma ascendente desde los 902.75MHz hasta los 927.25MHz.

De acuerdo con la ecuación 17 el modelo considera constante la diferencia de frecuencia de operación  $\Delta f$ . Esta será para todos los casos 0.5MHz (saltos permitidos por el estándar [26]). La velocidad de la luz es también constante, por lo cual la distancia estimada dependerá directamente del comportamiento de la diferencia de fase.

En la primera fase de estructuración del modelo se observó que debido a las variaciones grandes de ángulos de fase (ver sección 8.2.4), el valor promedio de las distancias calculadas no es el mejor estimador para el modelo.

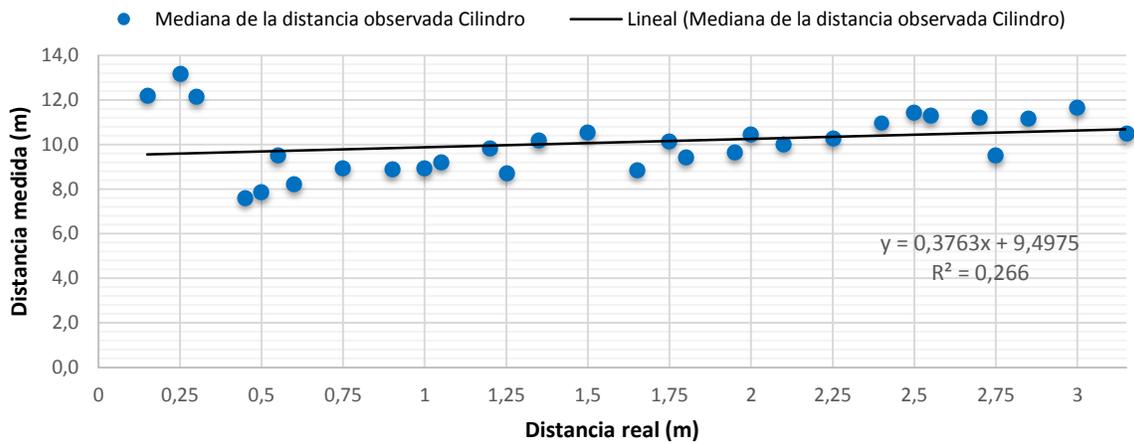
Las figuras 58 y 59 fueron construidas con el propósito de comparar la estabilidad de las estimaciones de distancia lector-etiqueta dados por la media y por la mediana para inventarios de 15s en el medio *indoor*. En el medio *outdoor*, el comportamiento de las distancias es similar. Se observa que la media o promedio presenta oscilaciones considerables debido a las variaciones grandes de la fase. En cambio, la mediana es un estimador mucho más estable ante el mismo conjunto de datos. Los resultados mostrados en las figuras 58 y 59 sugieren que las distancias pueden estimarse mejor a través de la mediana. La diferencia entre la distancia medida

y la real podría deberse a la calibración del dispositivo lector. El modelo propuesto supone el ajuste de las gráficas a partir de las ecuaciones encontradas para cada caso como se presentará más adelante.

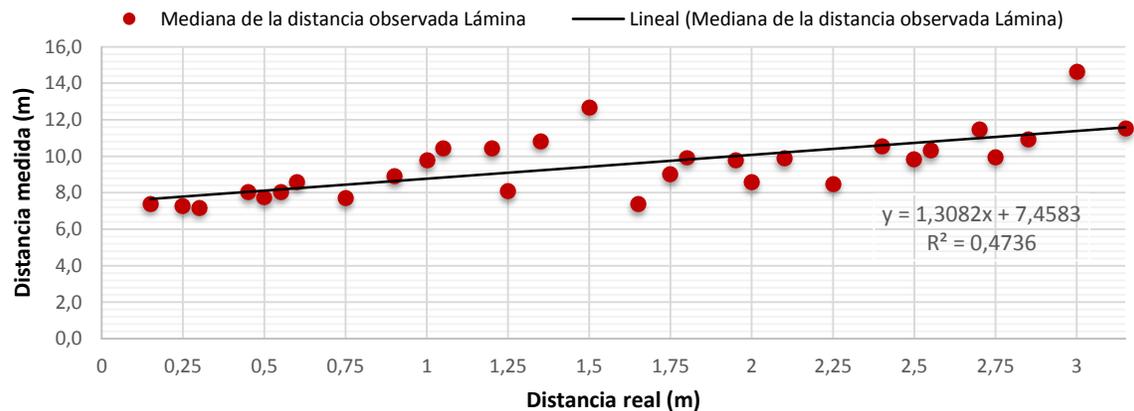


**Figura 58.** Promedio de la distancia calculada para una etiqueta estática ubicada sobre (a) cilindro y (b) lámina en un ambiente *indoor*

Para comprobar que la mediana es el mejor estimador se ha decidido construir un histograma del conjunto de distancias observadas para una lámina con una etiqueta ShortDipole que se encuentra a 1.5m enfrente de la antena lectora. El histograma generado para 200 bins se presenta en la figura 60 (a). Se ha decidido considerar esta cantidad de clases con el fin de presentar los valores extremos de la distribución de distancias. En ella se observa la presencia de *outliers* que afectan la estimación de la mediana, aunque en menor medida que la afectación sobre la estimación dada por la media. La media tiene en cuenta los *outliers* mientras que la mediana los ignora.



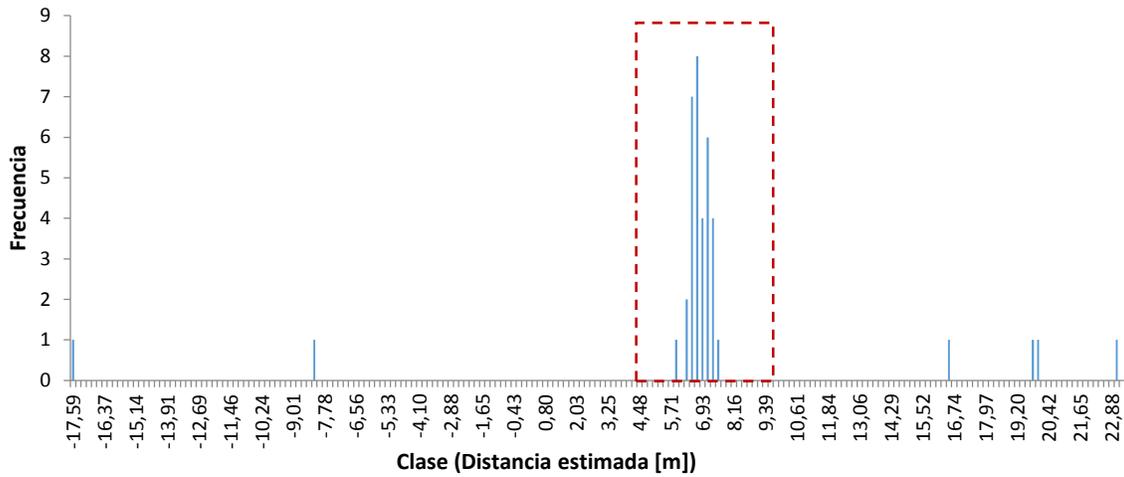
(a)



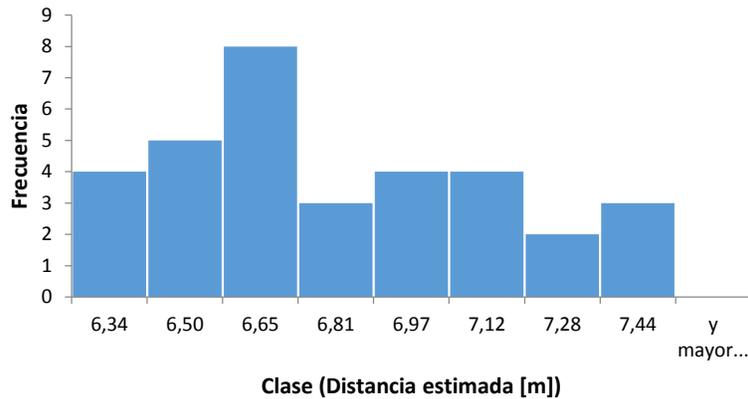
(b)

**Figura 59.** Curvas de regresión lineal del modelo preliminar: Mediana de la distancia para una etiqueta ubicada sobre (a) cilindro y (b) lámina en un ambiente *indoor*

La figura 60 (b) muestra un acercamiento del área punteada en la figura 60 (a). Para construirla primero se hace la remoción de los valores extremos de la figura 60 (a) aplicando un filtrado de mediana y luego con la regla de *Sturges* se encuentra el número óptimo de clases a considerar (en este caso, 8 bins). Se observa que eliminando los *outliers* la mediana es similar a la media, como era de esperarse.



(a)



**Figura 60.** Histograma de distancias estimadas por el modelo preliminar con una etiqueta ubicada sobre una lámina metálica a 1.5m de separación con la antena lectora: (a) *histograma*, (b) *histograma siguiendo la regla de Sturges*

Para el modelo, se escogió la mediana por tener menor variabilidad comparada con la media. La tabla 6 presenta la varianza de los estimadores considerados.

Ambiente	Material	$VAR(X_{med})$	$VAR(\bar{X})$
Indoor	Cilindro o lámina	1,98	7,08
Outdoor	Cilindro o lámina	2,91	7,59

**Tabla 6.** Comparación de la eficiencia de los estimadores contemplados: Media y mediana

La tabla 7 presenta las ecuaciones de regresión para la media y la mediana con su respectivo  $R^2$  para los dos ambientes considerados: *indoor* y *outdoor*.

Ambiente	Material	Media		Mediana	
		Ecuación de Regresión	$R^2$	Ecuación de Regresión	$R^2$
Indoor	Cilindro	$y = -0,9855x + 1,0366$	0,1132	$y = 0,3763x + 9,4975$	0,266
	Lámina	$y = -0,9117x + 1,6109$	0,0673	$y = 1,3082x + 7,4583$	0,4736
Outdoor	Cilindro	$y = 0,1512x + 0,319$	0,0023	$y = 0,9957x + 9,0112$	0,296
	Lámina	$y = -0,6073x + 0,6144$	0,0337	$y = 0,5909x + 7,8602$	0,6094

**Tabla 7.** Resultado de modelos independientes considerando la media (promedio) y la mediana de la distancia de etiquetas estáticas para cada estructura metálica

El modelo preliminar (sin preprocesamiento de los datos y teniendo en cuenta los resultados de la tabla 7) sería el presentado en la tabla 8 para los dos medios considerados. Dado que el lector no tiene conocimiento del tipo de estructura metálica a identificar ni de la distancia a la cual se encuentre, el modelo basado en la mediana generaliza el comportamiento para el cilindro y la lámina en las ecuaciones de la tabla 8. Esto se realiza promediando las medianas de las distancias estimadas para cada estructura metálica en los dos ambientes considerados.

Ambiente	Material	Media		Mediana	
		Ecuación de Regresión	$R^2$	Ecuación de Regresión	$R^2$
Indoor	Cilindro o lámina	$y = -0,9486x + 1,3237$	0,1443	$y = 0,8423x + 8,4779$	0,4037
Outdoor	Cilindro o lámina	$y = -0,228x + 0,4667$	0,0085	$y = 0,7933x + 8,4357$	0,5468

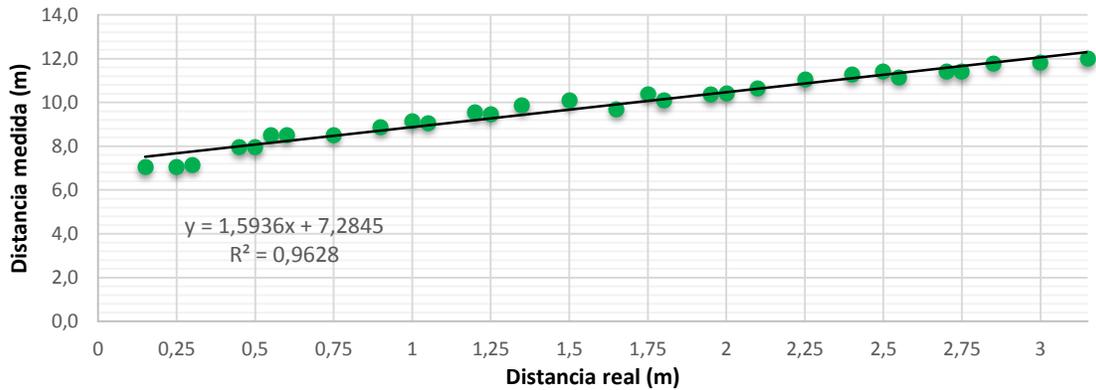
**Tabla 8.** Resultado preliminar del modelo para estimar distancias de etiquetas estáticas

De acuerdo con [50] y [51] el valor  $R^2$  mide la estabilidad de los datos respecto al modelo pero no la eficiencia de los resultados estimados a partir del mismo. Por tal motivo, para medir el desempeño del modelo se calculan porcentajes de error (distancia estimada/distancia medida) ajustando el modelo preliminar de la tabla 8. Para ello se consideran distancias de validación distintas a las utilizadas para calcular el modelo. Estas fueron 0.4m, 0.7m, 1.4m, 1.7m, 2.3m y 2.6m. Se despeja la variable 'x' de cada ecuación de la tabla 7, teniendo en cuenta el ambiente y el valor de la distancia calculada 'y' a partir de la ecuación 17. Se obtuvo que el desempeño promedio fue:

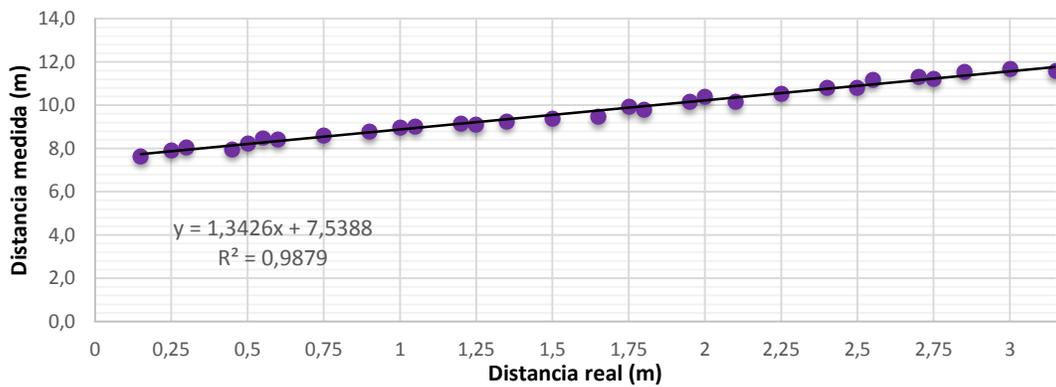
- Para el ambiente *outdoor*: 33.64% para el cilindro y 20.25% para la lámina.
- Para el ambiente *indoor*: 39.45% para el cilindro y 40.73% para la lámina.

Se procede a mejorar el modelo preliminar por lo cual se aplica el filtrado de mediana para la eliminación de *outliers* considerando los datos que se encuentran a 3 desviaciones estándar de la media. El modelo final se presenta en la figura 61 para cilindros y láminas en los ambientes contemplados. Considerando las 6 distancias mencionadas anteriormente, se encontró que el desempeño promedio del modelo final de estimación de distancias para etiquetas pasivas sobre estructuras metálicas es:

- Para el ambiente *outdoor*: 74.46% para el cilindro y 74.05% para la lámina.
- Para el ambiente *indoor*: 80.05% para el cilindro y 82.59% para la lámina.



(a)



(b)

**Figura 61.** Curvas de regresión lineal del modelo final: Mediana de la distancia calculada para una etiqueta estática en un ambiente (a) *indoor* y (b) *outdoor*

Además, se observó en las mediciones que entre las distancias de 2.4m a 2.7m hay pérdida de la información de la fase y disminución en la tasa de lectura a pesar de presentar un buen nivel de RSSI. Esto se explica como la presencia de área gris en el sistema de comunicación por radiofrecuencia tal como se menciona en [48].

#### **8.4. Caracterización de variables de radiofrecuencia en etiquetas adheridas sobre objetos metálicos en movimiento**

Las pruebas descritas a continuación corresponden a la caracterización de las variables de radiofrecuencia de etiquetas en movimiento. Para ello, se considerarán las variables analizadas para estructuras metálicas estáticas con el propósito de encontrar semejanzas y diferencias. Con ello se pretende definir los parámetros de decisión del método diseñado. Las pruebas se desarrollan en los ambientes presentados en las figuras 41 y 42. Uno de ellos *indoor* y el otro *outdoor*.

##### **Determinación de las variables que intervienen**

- **Variables Independientes (Factores)**

- ✓ Velocidad de desplazamiento
- ✓ Estructuras metálicas consideradas
- ✓ Sentido de movimiento

- **Niveles**

- ✓ 11 velocidades distintas de 0.2m/s a 1.2m/s, con incrementos de 0.1m/s
- ✓ Un cilindro y una lámina galvanizada
- ✓ “Entrando” y “Saliendo”

##### **Manipulación de los factores en el diseño de experimentos**

Se realiza la programación de un inventario con una potencia de transmisión de 30dBm y un tiempo de identificación calculado, teniendo en cuenta que el objeto se desplazará en línea recta recorriendo 3m enfrente de la antena lectora. La tabla 9 presenta los tiempos considerados para el inventario teniendo en cuenta la velocidad de desplazamiento. Los sentidos de movimiento considerados son los presentados en la figura 25 de la sección 7.2. La velocidad promedio de un montacargas que transporta

productos pesados como los considerados en esta investigación usualmente se encuentra entre los 0.2m/s y 1.2m/s [52]. La velocidad es medida relacionando la distancia del recorrido y el tiempo requerido para que la estructura metálica llegue a su destino final.

Velocidad [m/s]	Velocidad [km/h]	Tiempo de inventario [s]
0,2	0,72	15
0,3	1,08	10
0,4	1,44	7,50
0,5	1,8	6
0,6	2,16	5
0,7	2,52	4,29
0,8	2,88	3,75
0,9	3,24	3,33
1	3,6	3
1,1	3,96	2,73
1,2	4,32	2,50

**Tabla 9.** Tiempo de identificación de acuerdo con la velocidad de desplazamiento

### Determinación del número de casos

Se consideran 10 repeticiones consideradas por nivel. Cada repetición consiste en un proceso de identificación de 15s. Para 11 velocidades consideradas, 2 estructuras metálicas y 10 repeticiones, el número de casos es 440.

#### 8.4.1. Caracterización del porcentaje del cambio de nivel de RSSI

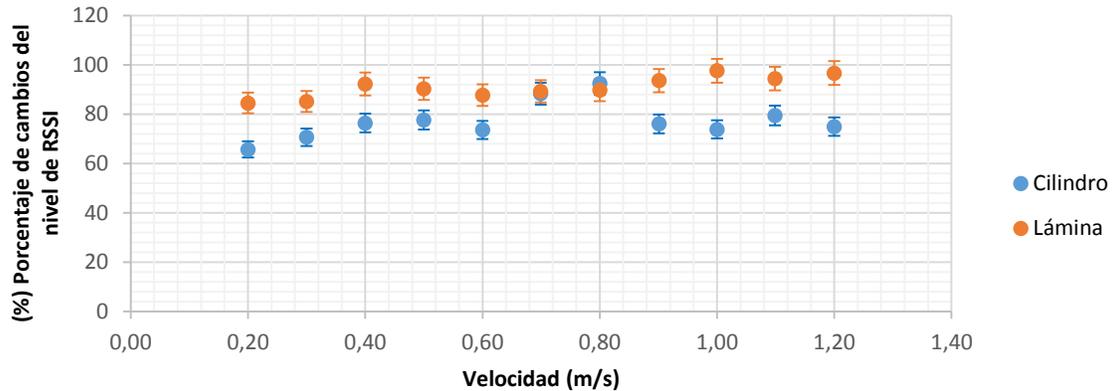
##### 8.4.1.1. Planteamiento

Se encontró en el experimento realizado para el caso de etiquetas estáticas que el porcentaje de cambio de nivel de RSSI durante el tiempo de identificación es diferente al 45% para alguna distancia de separación lector-etiqueta y alguna estructura metálica sobre la cual esta se adhiera. Específicamente, este se encontraba por debajo del nivel umbral descrito. En este experimento se pretende verificar si etiquetas en movimiento experimentan un porcentaje de cambio de nivel de RSSI mayor o igual al 45%.

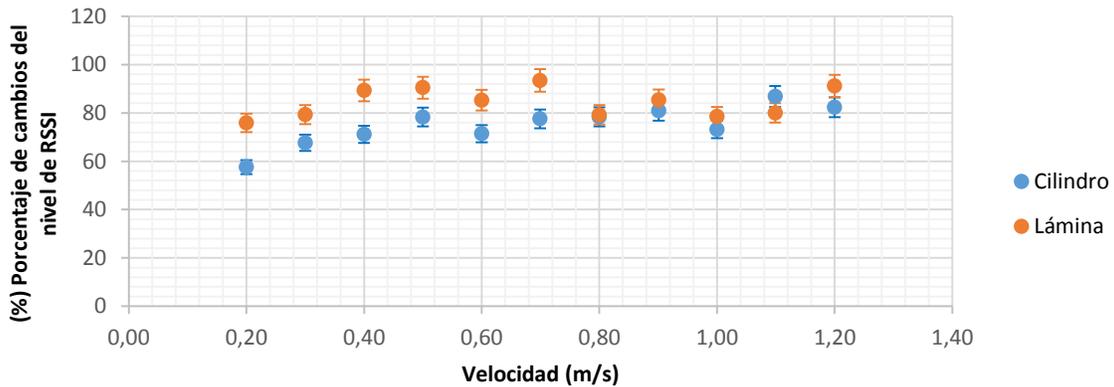
##### 8.4.1.2. Resultados y análisis

Realizando un análisis estadístico basado en intervalos de confianza del 95% se obtienen las figuras 62 y 63 para ambientes *indoor* y *outdoor* respectivamente. En ellas se puede apreciar que el porcentaje de variaciones en el nivel de RSSI supera en todos

los casos el umbral definido del 45%. De esta forma, se concluye que el porcentaje de cambios del nivel de RSSI durante el tiempo de identificación es mayor o igual a 45% independientemente de la velocidad, sentido de movimiento y la estructura metálica sobre la cual esta se adhiere.



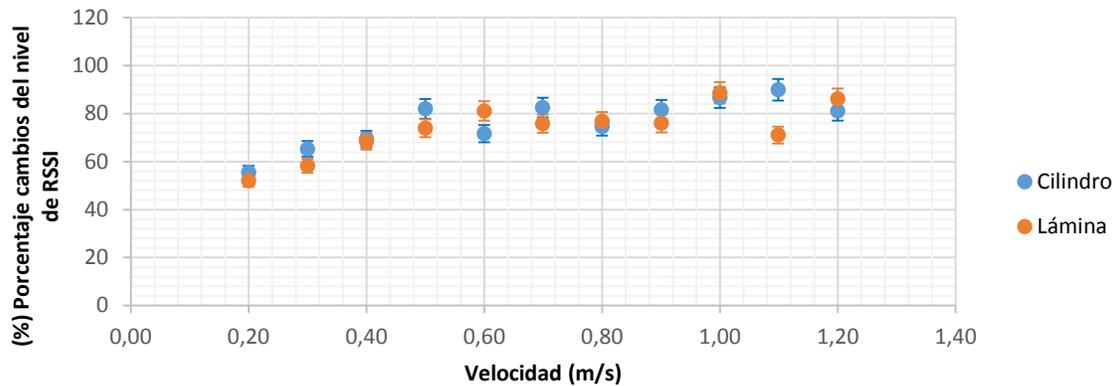
(a)



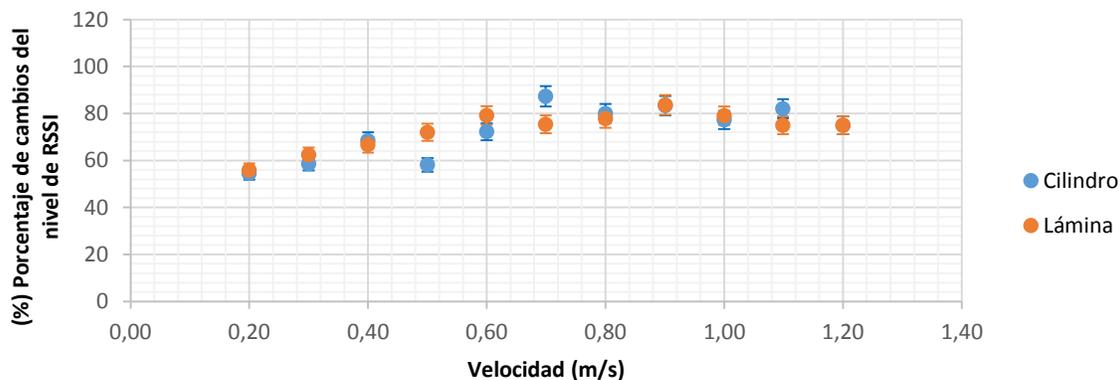
(b)

**Figura 62.** Comportamiento del porcentaje de cambios en el nivel de RSSI los sentidos (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente *indoor*

Con este resultado es posible definir el parámetro de decisión que permitirá deducir si la etiqueta se encuentra estática o en movimiento. Con el propósito de establecer un umbral riguroso se decidió que el método considerará como etiqueta en movimiento a toda aquella que tuviese un valor mayor o igual al 50% en el porcentaje de cambios del nivel de RSSI.



(a)



(b)

**Figura 63.** Comportamiento del porcentaje de cambios en el nivel de RSSI con respecto a la velocidad en los sentidos de movimiento (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente *outdoor*

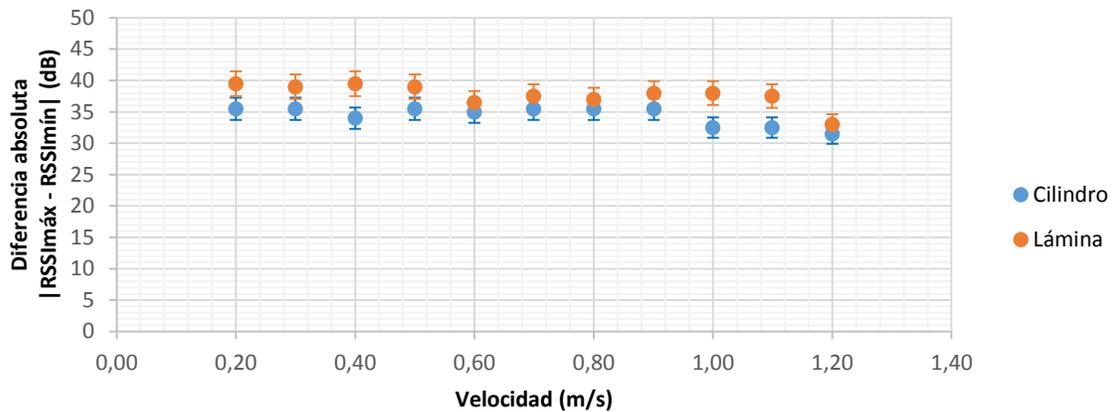
#### 8.4.2. Caracterización de la diferencia absoluta del RSSI máximo y mínimo

##### 8.4.2.1. Planteamiento

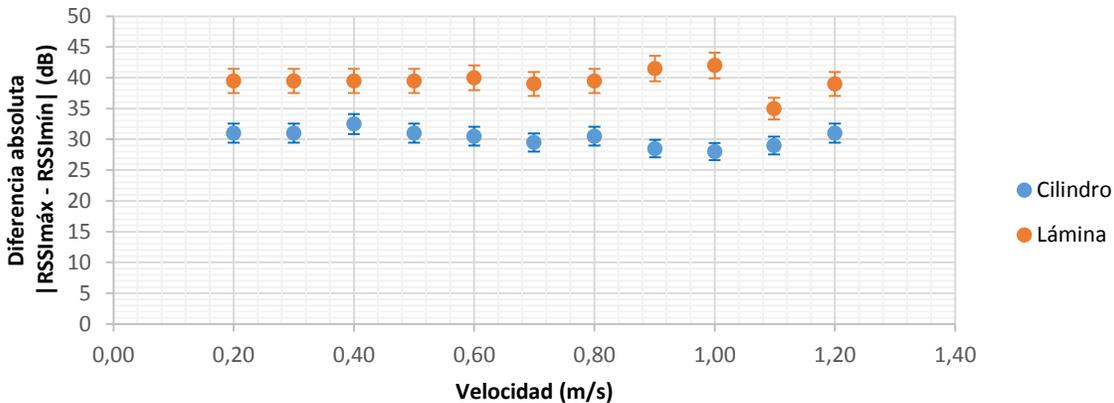
En la sección 8.2.2 se determinó que la diferencia absoluta entre el nivel de RSSI máximo y mínimo no supera los 22dB independientemente de la distancia de separación lector-etiqueta y de la estructura metálica sobre la cual esta se adhiera. En este experimento se desea determinar si al realizar movimientos de la etiqueta en los sentidos considerados el umbral de decisión se mantiene o varía.

### 8.4.2.2. Resultados y análisis

Para cada velocidad se calcula la diferencia absoluta de los valores máximos y mínimos de variable de interés. Se construyen las figuras 64 y 65 con sus respectivos intervalos de confianza del 95%. De acuerdo con los resultados obtenidos en el experimento diseñado, la etiqueta ShortDipole mantiene una diferencia absoluta de nivel de RSSI máximo y mínimo por encima de los 25dB en los sentidos de movimiento y ambientes considerados. Este hecho podría entenderse bajo la premisa expuesta por la *ecuación de Friis* (ver ecuación 1), la cual expresa que la fuerza de la señal recibida aumenta a medida que disminuye la distancia de separación lector-etiqueta.

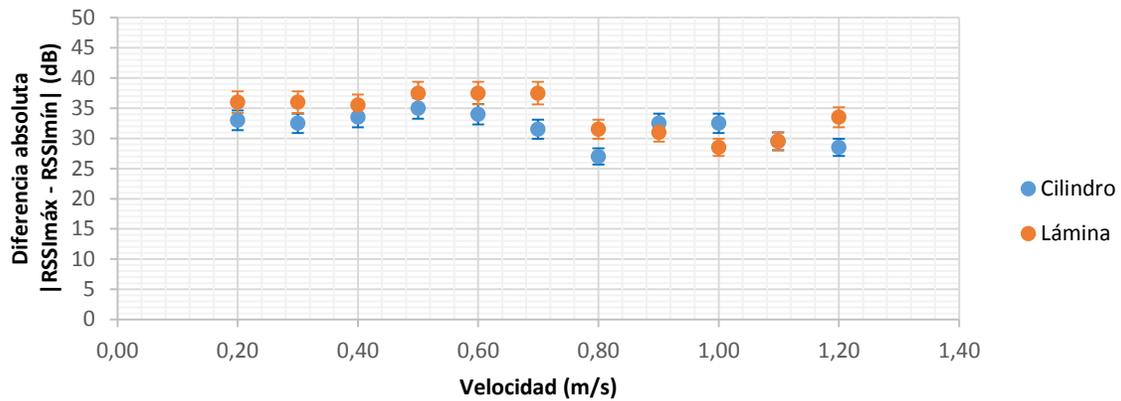


(a)

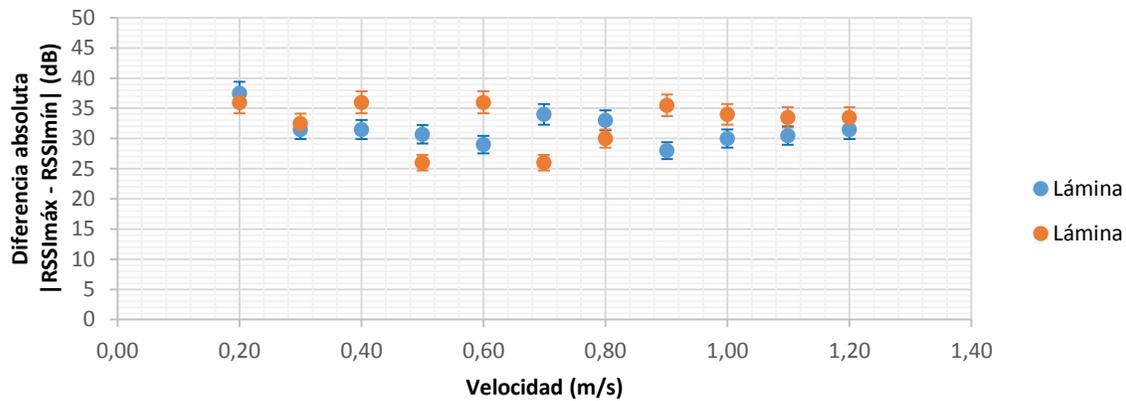


(b)

**Figura 64.** Comportamiento de la diferencia absoluta del nivel de RSSI máximo y mínimo con respecto a la velocidad en los sentidos (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente *indoor*



(a)

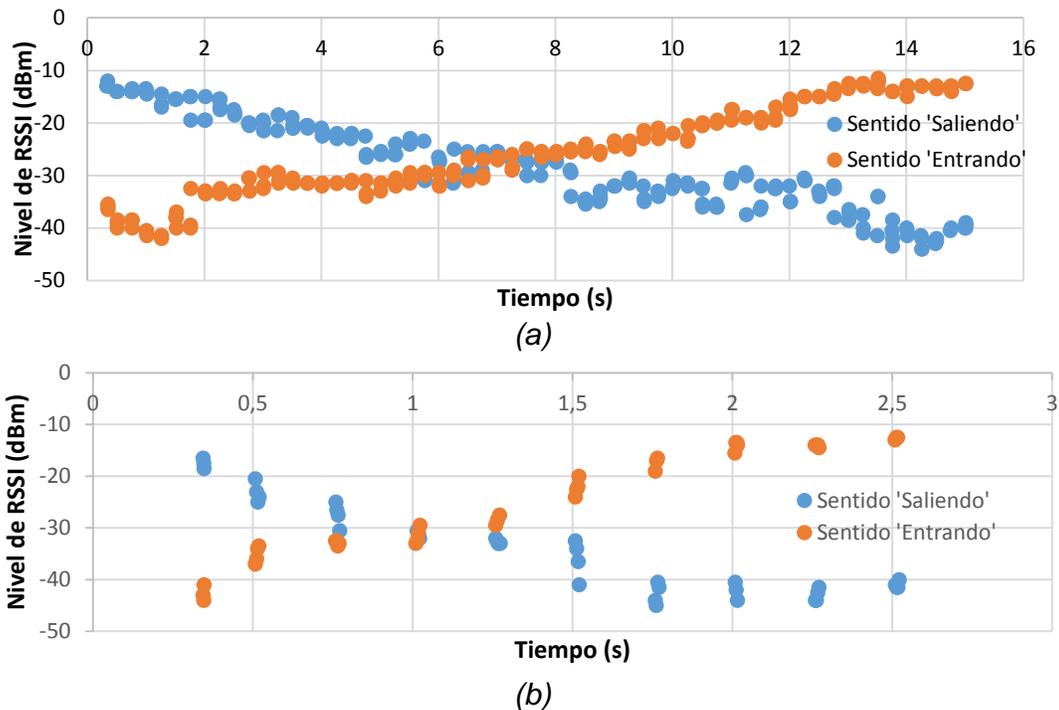


(b)

**Figura 65.** Comportamiento de la diferencia absoluta del nivel de RSSI máximo y mínimo con respecto a la velocidad en los sentidos (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente *outdoor*

De esta forma, se concluye que la diferencia absoluta del RSSI máximo y mínimo durante el tiempo de identificación es mayor o igual a 20dB independientemente de la velocidad, sentido de movimiento y la estructura metálica sobre la cual esta se adhiere.

El método considera como parámetro de decisión el valor de 25dB. Esto con el fin de asegurar rigurosamente que las etiquetas RFID estáticas no sean identificadas como dinámicas.



**Figura 66.** Comportamiento temporal del nivel de RSSI en los sentidos de movimiento “Saliendo” y “Entrando” para un cilindro metálico en un ambiente *outdoor* que se desplaza a una velocidad de (a) 0.2m/s y (b) 1.2m/s

Adicionalmente, la figura 66 presenta la respuesta temporal del nivel de RSSI en la velocidad mínima (0.2m/s) y máxima (1.2m/s) en un ambiente *outdoor*. Con este resultado se desea analizar si aún en las velocidades extremas es posible apreciar un cambio significativo entre el nivel de RSSI máximo y mínimo. Como puede observarse, para un cilindro que se desplaza a las velocidades mencionadas y en ambos sentidos de movimiento “Entrando” y “Saliendo” existe una marcada diferencia entre el nivel de RSSI máximo y el mínimo. Adicionalmente, el cambio de nivel de RSSI presenta una pendiente positiva cuando la etiqueta se acerca a la antena lectora y negativa cuando se mueve en el sentido “Saliendo”. Por tal motivo, se considera que la variable de radiofrecuencia analizada en este experimento provee información relevante para caracterizar no sólo el movimiento sino también el sentido del desplazamiento de la etiqueta de interés.

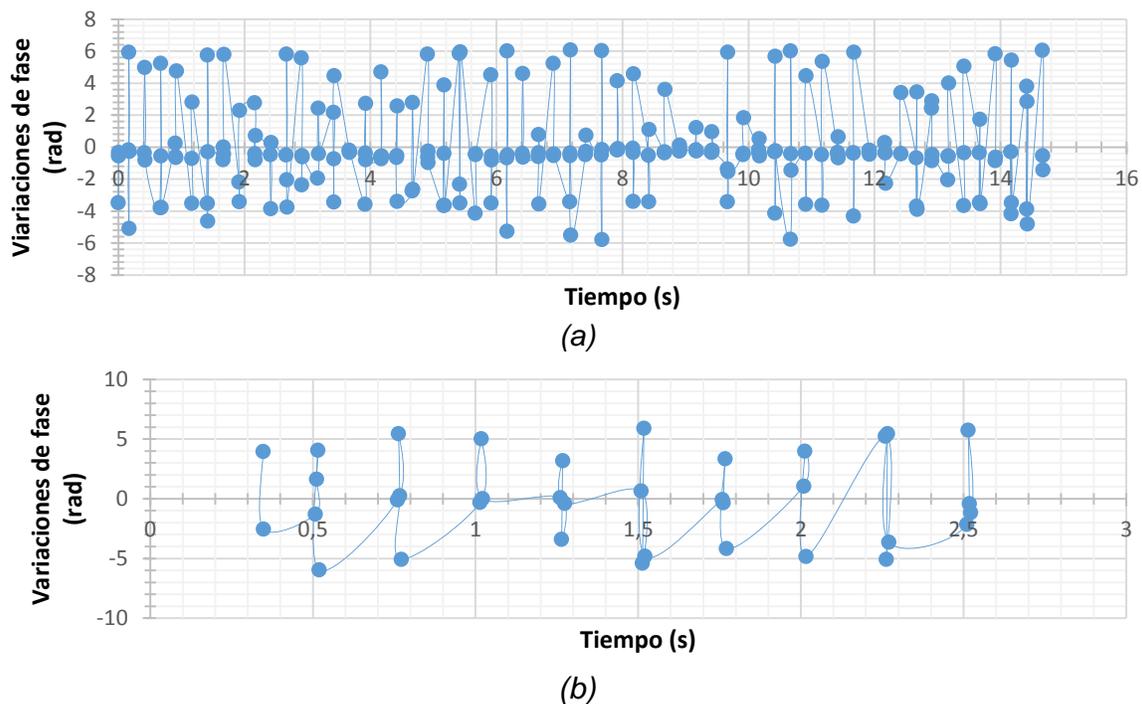
### 8.4.3. Caracterización de la proporción de variaciones grandes del ángulo de fase

#### 8.4.3.1. Planteamiento

De acuerdo con los resultados obtenidos en el experimento 8.2.3 se concluyó que, en el caso de una etiqueta RFID estática, la variación de fase observada presenta un porcentaje de valores mayores a 3 radianes y menores a -3 radianes inferior al 30% con respecto al total de observaciones registradas. Este experimento pretende verificar si el valor de umbral asignado a esta variable no genera ambigüedad en la mitigación de interferencias con el propósito de estimar si la etiqueta se encuentra en movimiento.

#### 8.4.2.3. Resultados y análisis

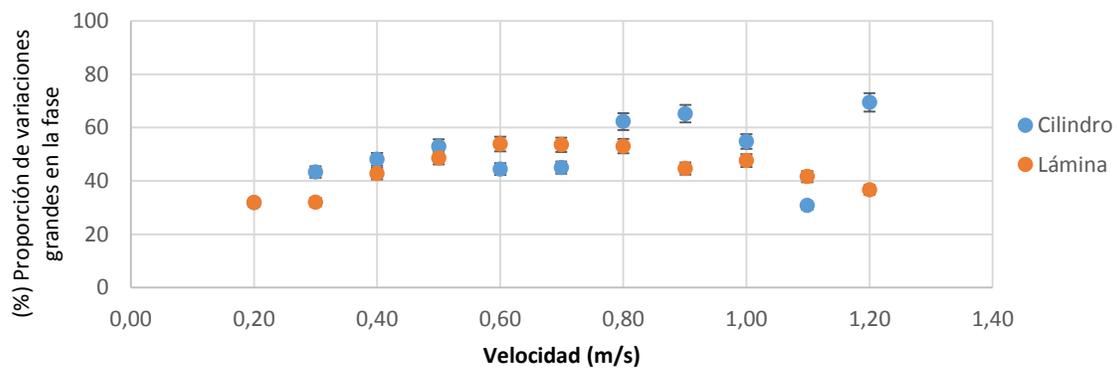
La figura 67 presenta el comportamiento cronológico de la diferencia del ángulo de fase para una lámina metálica en un ambiente *indoor*. Para el ambiente *outdoor* el comportamiento es similar.



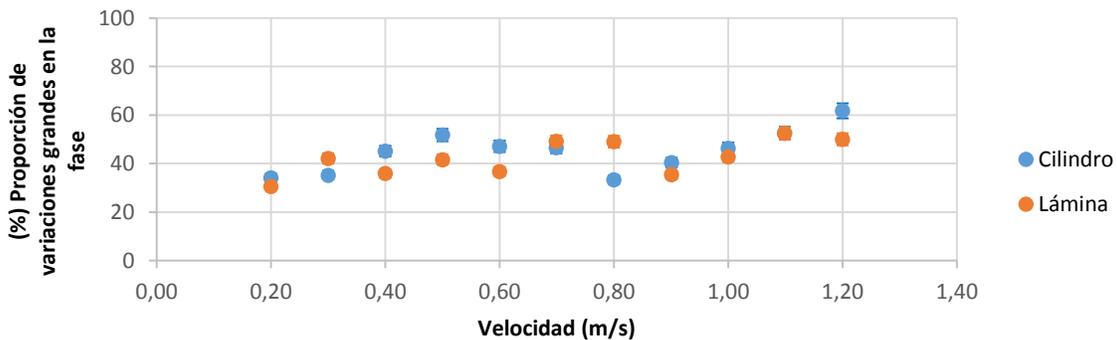
**Figura 67.** Comportamiento temporal del nivel de RSSI para una lámina metálica en un ambiente *indoor* que se desplaza a una velocidad de (a) 0.2m/s y (b) 1.2m/s

Se observa de la figura 67 que repetidamente ocurren cambios del ángulo de fase en el tiempo y la cantidad de variaciones grandes aumenta con respecto al escenario estático. Aún en el caso de máxima velocidad, donde el tiempo de identificación es 2.5s, se observa que la mayoría de las lecturas registradas posee variaciones de fase mayores a 3 radianes y menores a -3 radianes.

Las figuras 68 y 69 presentan el comportamiento de la variable de radiofrecuencia analizada con respecto a la velocidad de desplazamiento en los entornos *indoor* y *outdoor*, respectivamente. Cada punto representa el valor promedio de la proporción de cambios grandes de fase calculada considerando las 10 repeticiones. Se observa que esta variable supera el 30% en todos los casos. Por lo cual, el valor umbral considerado permite distinguir sin ambigüedad el estado del producto metálico etiquetado.

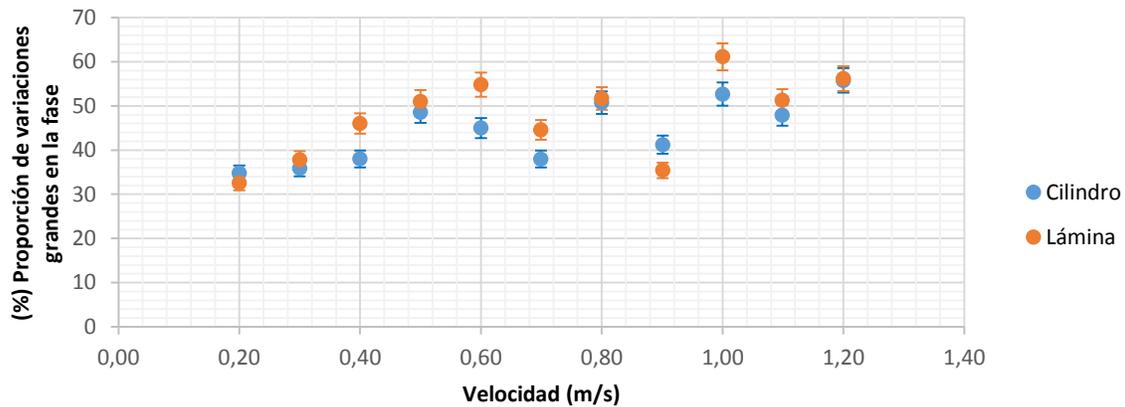


(a)

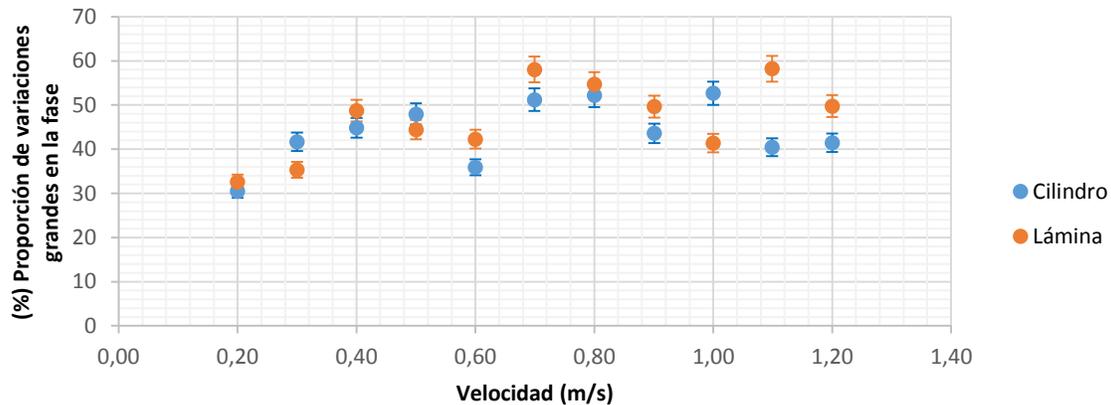


(b)

**Figura 68.** Proporción de variaciones grandes de fase con respecto a la velocidad en los sentidos (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente *indoor*



(a)



(b)

**Figura 69.** Proporción de variaciones grandes de fase con respecto a la velocidad en los sentidos (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente *outdoor*

## 8.5. Estimación experimental de la velocidad, sentido de movimiento y trazabilidad del recorrido

Como se mencionó en la sección 8.4.2 la pendiente de cambio del nivel de RSSI provee información importante acerca del sentido de movimiento. Cuando el sentido es “Saliendo” el RSSI decrece al alejar la etiqueta del transmisor. Por el contrario, cuando la estructura etiquetada se acerca a la antena lectora el RSSI presenta una pendiente positiva alcanzando su valor máximo justo enfrente del transmisor. Aunque el RSSI brinda una noción del sentido de movimiento se requiere realizar el análisis apoyando

la estimación del RSSI con información de otra variable de radiofrecuencia. La variable escogida fue la frecuencia Doppler. En este experimento se pretende utilizar la información de esta variable de radiofrecuencia para estimar la velocidad de la estructura objetivo y su sentido de movimiento con el fin de graficar la trazabilidad de su recorrido.

### **8.5.1. Caracterización de la frecuencia Doppler y estimación del sentido de movimiento**

#### 8.5.1.1. Planteamiento y diseño del experimento

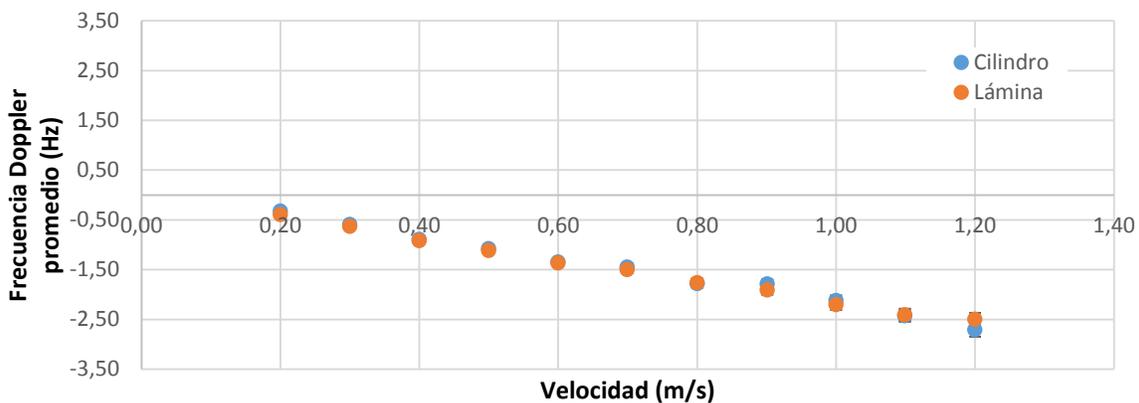
En el escenario estático se observó que el valor promedio de la frecuencia Doppler es menor a 1 Hz para las distancias y estructuras metálicas consideradas. De acuerdo con [43] el sentido de movimiento puede identificarse considerando el signo de la frecuencia Doppler.

El presente experimento pretende analizar si el cambio del valor promedio de la frecuencia Doppler en al menos uno de los dos sentidos de movimiento considerados (“Saliendo” y “Entrando”) también es positivo. De ser así, la ambigüedad en el signo de la frecuencia Doppler promedio provocaría que una etiqueta estática se reconociera como si estuviese en movimiento provocando así falso positivo. En tal caso se requiere considerar otra(s) variable(s) para determinar el movimiento, tales como el porcentaje de cambio en el nivel de RSSI, diferencia absoluta de nivel de RSSI máximo y mínimo y porcentaje de valores atípicos de diferencia de fase.

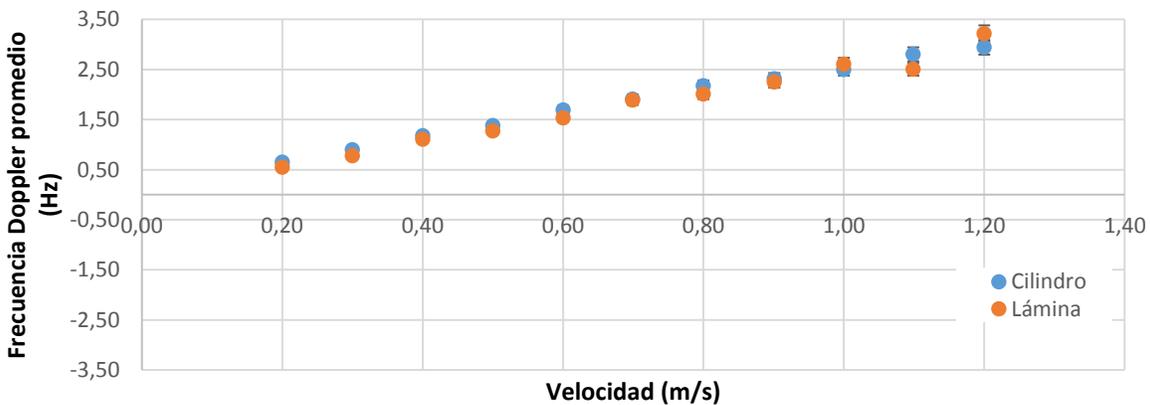
La hipótesis planteada para este experimento pretende comprobar si la frecuencia Doppler brinda información del sentido de movimiento como se menciona en [43]. Esto se realiza considerando 11 velocidades de 0.2m/s a 1.2m/s, con incrementos de 0.1m/s, los dos sentidos de movimiento, dos estructuras metálicas: cilindro y lámina y dos ambientes uno *indoor* y otro *outdoor*. Se realizaron 10 repeticiones para cada velocidad con un NTE de 450.

### 8.5.1.2. Resultados y análisis

De acuerdo con los resultados obtenidos en las figuras 70 y 71, el sentido “Entrando” presenta un valor promedio de frecuencia Doppler positivo para todas las velocidades, estructuras metálicas y ambientes considerados. El promedio de la frecuencia Doppler más que determinar si una etiqueta está o no en movimiento, esta variable informa con una elevada precisión acerca del sentido de desplazamiento (“Saliendo” y “Entrando”). Si la frecuencia Doppler promedio es positiva, el objeto metálico se desplaza acercándose a la antena lectora. En cambio, si es negativa la estructura metálica se aleja del transmisor.

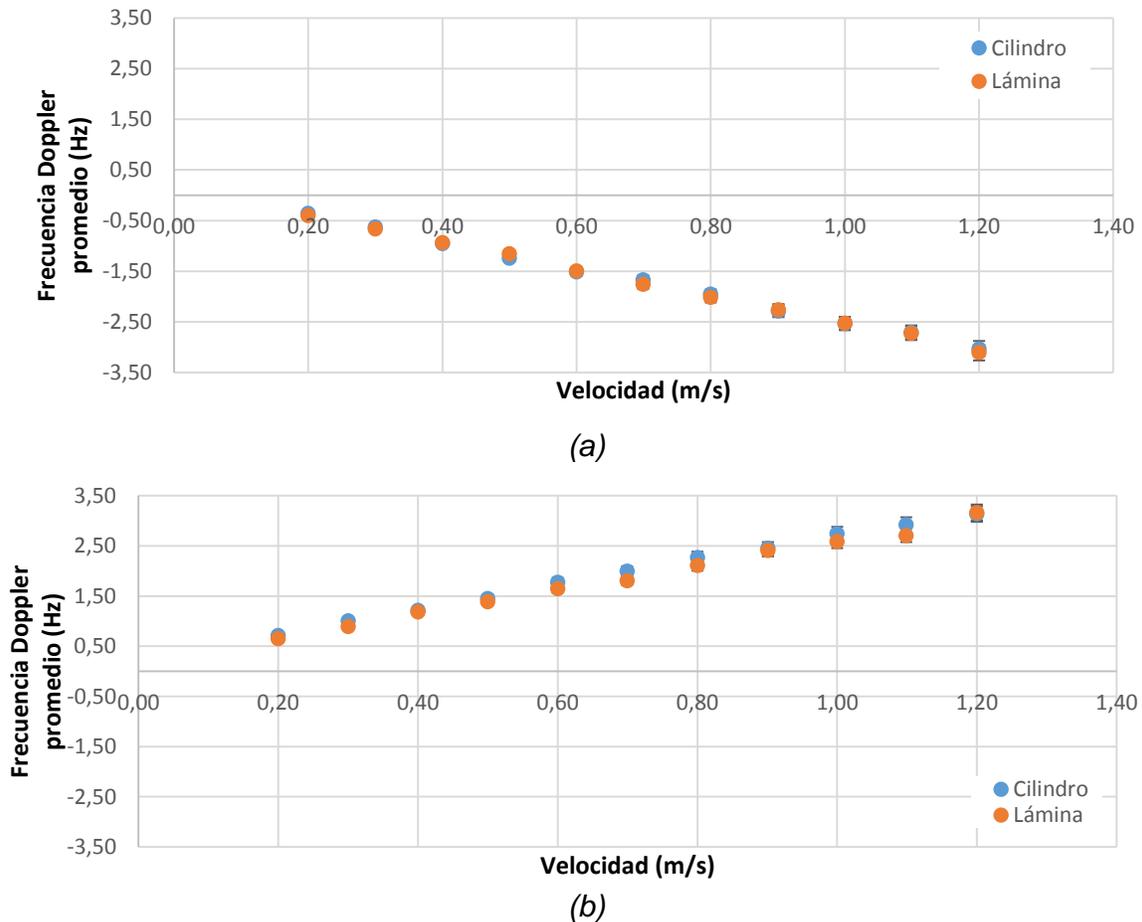


(a)



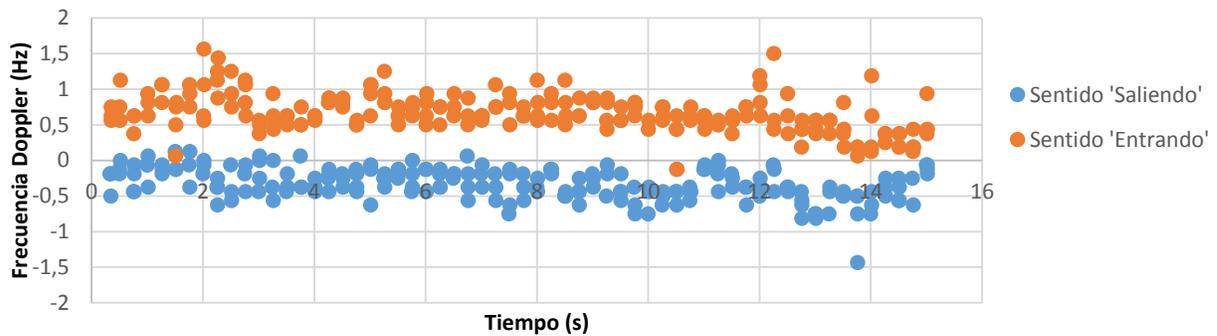
(b)

**Figura 70.** Comportamiento de la frecuencia Doppler promedio con respecto a la velocidad de desplazamiento en los sentidos (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente *indoor*



**Figura 71.** Comportamiento de la frecuencia Doppler promedio con respecto a la velocidad de desplazamiento en los sentidos (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” para un ambiente *outdoor*

En la figura 72 se muestra el comportamiento de las observaciones cronológicas de la variable de interés para una lámina metálica en un ambiente *indoor* a 0.2m/s. Es posible apreciar que el sentido de movimiento puede ser estimado por el signo de la frecuencia Doppler promedio. Se observa además la influencia de un error sistemático de 0.15Hz proveniente de la posiblemente de la calibración en el lector o la etiqueta. Este valor se obtuvo del experimento de caracterización de la frecuencia Doppler promedio para etiquetas estáticas presentado en la sección 8.2.5.



**Figura 72.** Comportamiento de la frecuencia Doppler en el dominio del tiempo

### 8.5.2. Estimación de la velocidad

Para la estimación de la velocidad se aplica la ecuación 15 donde a cada frecuencia Doppler se calcula una velocidad instantánea. Este experimento tiene como fin encontrar el estadístico que caracterice mejor la velocidad radial del objeto en movimiento. Para ello se consideran 11 velocidades distintas presentadas en la tabla 9 y estructuras metálicas: cilindro y lámina. Se realizan 10 repeticiones para cada velocidad en las que se mide la frecuencia Doppler y frecuencia de operación. Aplicando la ecuación 15 se obtiene un conjunto de velocidades para cada repetición. A partir del análisis estadístico se encontró que la media era el estimador que menor porcentaje de error tenía con respecto a la velocidad real.

La tabla 10 presenta los porcentajes de error para la velocidad promedio. En el caso del sentido “Entrando” se observa que la ecuación 15 estima la velocidad con un error promedio de 10.93% para el cilindro y 14.33% para la lámina en el ambiente *indoor*. Para el ambiente *outdoor*, el error promedio en la velocidad estimada es de 8.85% para el cilindro y 10.91% para la lámina. Se observa que estos porcentajes de error no exceden el 15%.

Se observa un sesgo de -0.1m/s en el sentido “Saliendo”. Este valor se encontró como un error sistemático durante la experimentación. Añadiéndole este *bias*, el porcentaje de error en la estimación de la velocidad disminuye. Se escogió la media como el estadístico para estimar la velocidad debido al comportamiento estable de la frecuencia Doppler durante el movimiento.

Tiempo (s)	PROMEDIO DEL VALOR MEDIO							PROMEDIO DEL VALOR MEDIO				
	Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	Saliendo				Entrando					
			Velocidad Estimada (m/s)		Error [%]		Velocidad Estimada (m/s)		Error [%]			
			Cilindro	Lámina	Cilindro	Lámina	Cilindro	Lámina	Cilindro	Lámina		
15,000	0,200	0,720	-0,106	-0,129	46,880	35,539	0,213	0,180	6,316	10,140		
10,000	0,300	1,080	-0,194	-0,207	35,448	31,109	0,295	0,255	1,731	15,134		
7,500	0,400	1,440	-0,293	-0,300	26,660	25,114	0,385	0,362	3,767	9,411		
6,000	0,500	1,800	-0,353	-0,365	29,321	27,001	0,453	0,417	9,342	16,542		
5,000	0,600	2,160	-0,442	-0,446	26,396	25,592	0,555	0,503	7,559	16,195		
4,290	0,699	2,517	-0,474	-0,490	32,248	29,891	0,625	0,618	10,692	11,623		
3,750	0,800	2,880	-0,584	-0,576	27,010	27,951	0,713	0,659	10,869	17,661		
3,330	0,901	3,243	-0,586	-0,626	34,906	30,566	0,757	0,738	15,979	18,120		
3,000	1,000	3,600	-0,695	-0,721	30,473	27,871	0,819	0,854	18,141	14,570		
2,730	1,099	3,956	-0,795	-0,789	27,640	28,244	0,920	0,922	16,303	16,105		
2,500	1,200	4,320	-0,888	-0,818	26,008	31,844	0,965	1,055	19,601	12,110		

Promedio	31,181	29,157	Promedio	10,937	14,328
Desviación	6,194	3,032	Desviación	5,939	3,028
Máximo	46,880	35,539	Máximo	19,601	18,120
Mínimo	26,008	25,114	Mínimo	1,731	9,411

(a)

Tiempo (s)	PROMEDIO DEL VALOR MEDIO							PROMEDIO DEL VALOR MEDIO				
	Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	Saliendo				Entrando					
			Velocidad Estimada (m/s)		Error [%]		Velocidad Estimada (m/s)		Error [%]			
			Cilindro	Lámina	Cilindro	Lámina	Cilindro	Lámina	Cilindro	Lámina		
15,000	0,200	0,720	-0,117	-0,132	41,444	34,193	0,236	0,215	18,014	7,360		
10,000	0,300	1,080	-0,207	-0,218	31,151	27,409	0,331	0,293	10,457	2,406		
7,500	0,400	1,440	-0,314	-0,307	21,541	23,303	0,399	0,390	0,320	2,578		
6,000	0,500	1,800	-0,409	-0,378	18,263	24,381	0,477	0,455	4,626	8,926		
5,000	0,600	2,160	-0,495	-0,491	17,464	18,192	0,583	0,541	2,912	9,859		
4,290	0,699	2,517	-0,547	-0,576	21,800	17,691	0,654	0,594	6,435	15,046		
3,750	0,800	2,880	-0,641	-0,661	19,884	17,352	0,744	0,691	6,985	13,569		
3,330	0,901	3,243	-0,750	-0,740	16,742	17,842	0,805	0,790	10,643	12,326		
3,000	1,000	3,600	-0,831	-0,828	16,923	17,158	0,899	0,849	10,050	15,083		
2,730	1,099	3,956	-0,887	-0,894	19,253	18,677	0,960	0,888	12,682	19,217		
2,500	1,200	4,320	-0,993	-1,018	17,258	15,192	1,028	1,036	14,293	13,635		

Promedio	21,975	21,035	Promedio	8,856	10,909
Desviación	7,645	5,726	Desviación	5,203	5,286
Máximo	41,444	34,193	Máximo	18,014	19,217
Mínimo	16,742	15,192	Mínimo	0,320	2,406

(b)

**Tabla 10.** Estimaciones para la velocidad considerando el promedio como el mejor estimador en un ambiente (a) *indoor* y (b) *outdoor*

De esta forma, el modelo final para la estimación de la velocidad corresponde al *promedio* de los valores obtenidos al aplicar la ecuación 15 a todas las frecuencias observadas para un sentido de movimiento “Entrando”. Para el sentido “Saliendo” se añade -0.1m/s al valor promedio calculado de los resultados instantáneos de la ecuación 15, tal como se muestra en la tabla 11. El error promedio en la estimación no supera el 20%. La velocidad es negativa cuando el objeto está “Saliendo” y positiva cuando está “Entrando”.

Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	PROMEDIO DEL VALOR MEDIO			
			Adelante -Atrás		Error [%]	
			Velocidad Estimada (m/s)			
			Cilindro	Lámina	Cilindro	Lámina
15,000	0,200	0,720	-0,217	-0,232	8,556	15,807
10,000	0,300	1,080	-0,307	-0,318	2,183	5,924
7,500	0,400	1,440	-0,414	-0,407	3,459	1,697
6,000	0,500	1,800	-0,509	-0,478	1,737	4,381
5,000	0,600	2,160	-0,595	-0,591	0,797	1,526
4,290	0,699	2,517	-0,647	-0,676	7,500	3,391
3,750	0,800	2,880	-0,741	-0,761	7,384	4,852
3,330	0,901	3,243	-0,850	-0,840	5,642	6,742
3,000	1,000	3,600	-0,931	-0,928	6,923	7,158
2,730	1,099	3,956	-0,987	-0,994	10,153	9,577
2,500	1,200	4,320	-1,093	-1,118	8,925	6,859

Promedio	5,751	6,174
Desviación	3,210	4,007
Máximo	10,153	15,807
Mínimo	0,797	1,526

(a)

Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	PROMEDIO DEL VALOR MEDIO			
			Adelante -Atrás		Error [%]	
			Velocidad Estimada (m/s)			
			Cilindro	Lámina	Cilindro	Lámina
15,000	0,200	0,720	-0,222	-0,223	10,959	11,560
10,000	0,300	1,080	-0,287	-0,286	4,495	4,666
7,500	0,400	1,440	-0,391	-0,368	2,346	7,980
6,000	0,500	1,800	-0,452	-0,446	9,616	10,763
5,000	0,600	2,160	-0,533	-0,507	11,139	15,417
4,290	0,699	2,517	-0,575	-0,535	17,708	23,535
3,750	0,800	2,880	-0,695	-0,634	13,156	20,811
3,330	0,901	3,243	-0,687	-0,672	23,703	25,402
3,000	1,000	3,600	-0,822	-0,734	17,825	26,614
2,730	1,099	3,956	-0,910	-0,760	17,176	30,883
2,500	1,200	4,320	-1,027	-0,842	14,421	29,836

Promedio	12,959	18,861
Desviación	6,200	9,188
Máximo	23,703	30,883
Mínimo	2,346	4,666

(b)

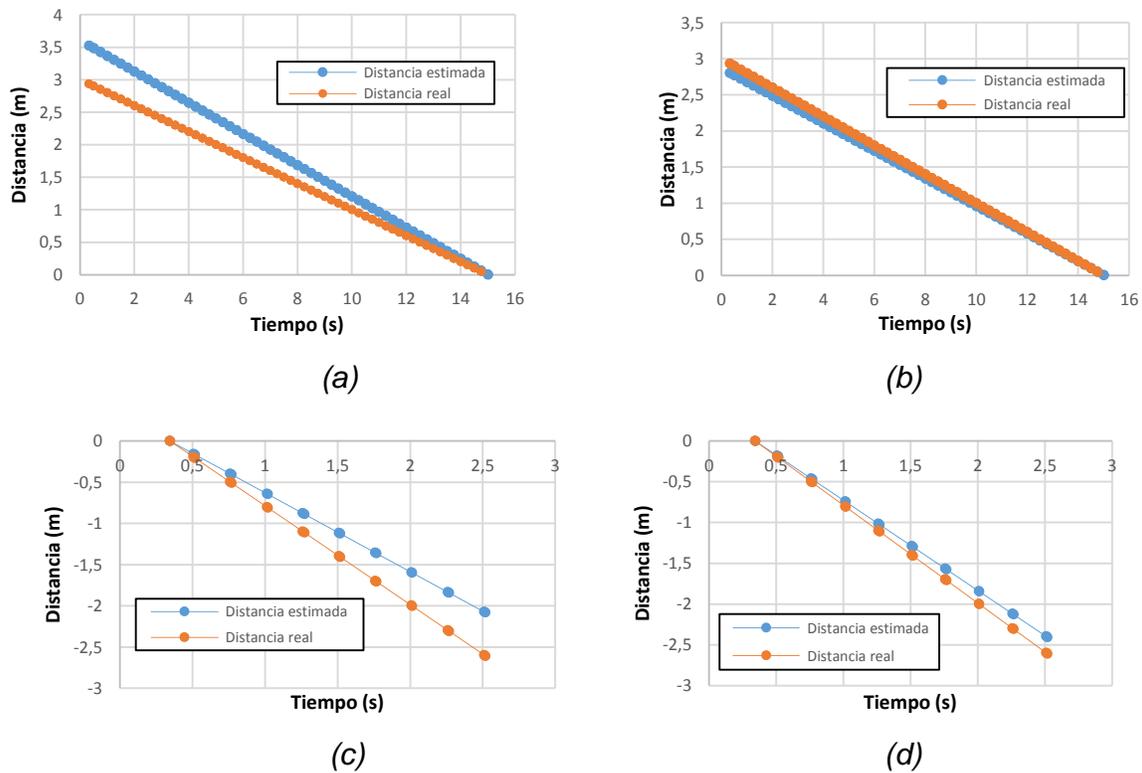
**Tabla 11.** Corrección de la estimación de la velocidad para una estructura metálica “Saliendo” considerando la media como el mejor estimador en un ambiente (a) *indoor* y (b) *outdoor*

### 8.5.3. Estimación de la trazabilidad del movimiento

La estimación de la trazabilidad del objeto en movimiento se realiza utilizando la estimación de la velocidad promedio calculada como describe la ecuación 16. Se analizó el porcentaje de error promedio en la estimación de distancia. El error promedio para todas las velocidades consideradas no supera el 20%.

La figura 73 muestra que el método diseñado representa como desplazamientos positivos cuando el objeto se acerca al lector y como negativos cuando éste se aleja. Además, se observan los resultados positivos de la calibración realizada considerando

los 0.15Hz en la frecuencia Doppler. Se realizó un preprocesamiento de los datos para la frecuencia Doppler corrigiendo el error sistemático de medición de 0.15 Hz mencionado en la sección 8.5.1.2. A partir de un modelo lineal de calibración, a cada dato de frecuencia Doppler registrado por el lector se le sustrae los 0.15 Hz. Para la velocidad de 0.2m/s y el movimiento “Entrando” el porcentaje de error promedio en la estimación de distancia sin calibración fue de 17.26%, aplicando la calibración fue de 0.99%. Para la velocidad de 1.2m/s y el movimiento “Saliendo” el error promedio sin calibración fue de 20.2%, con la calibración fue de 7.77%. Para el sentido “Saliendo” se considera adicionalmente el sesgo de -0.1m/s mencionado en la sección 8.5.2.



**Figura 73.** Trazabilidad estimada para una lámina metálica que se desplaza en un ambiente *indoor* (a) “Entrando” con una velocidad de 0.2m/s sin calibración, (b) “Entrando” con una velocidad de 0.2m/s con calibración, (c) “Saliendo” con una velocidad de 1.2m/s sin calibración, (d) “Saliendo” con una velocidad de 1.2m/s sin calibración.

## 8.6. Verificación del método: Movimiento interrumpido

En este experimento se pretende conocer la estimación de la trazabilidad realizada por el método diseñado cuando una estructura metálica se desplaza a una velocidad y luego se detiene durante el inventario.

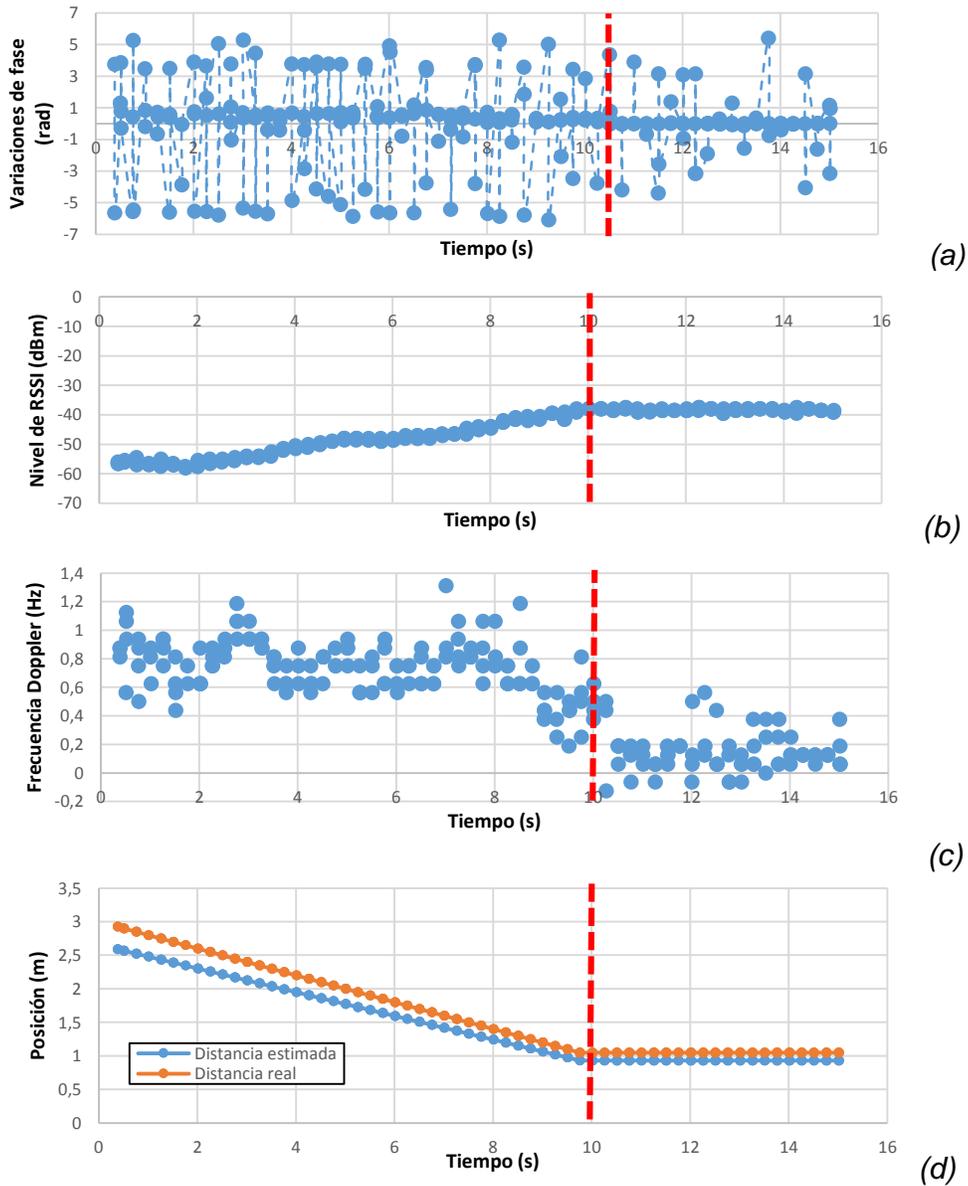
La figura 74 presenta la respuesta del método ante el caso abordado para una lámina metálica que se mueve a 0.2m/s en el sentido “Entrando” en un ambiente *outdoor*. El comportamiento en el medio *indoor* es similar al presentado. La diferencia de fase con respecto al tiempo se presenta en la figura 74 (a). El nivel de RSSI y el valor de la frecuencia Doppler para cada lectura se muestran en la figura 74 (b) y 74 (c), respectivamente. La trazabilidad es construida en la figura 74 (d).

Considerando las variables de decisión calculadas en las fases anteriores se construye la figura 75. De las figuras 74 y 75 es posible determinar que a partir de los 10 segundos la estructura metálica se detuvo. Esto debido a que el porcentaje de cambios en el nivel de RSSI pasó de ser 68.2% en el tiempo  $t_0 = 9.998s$  a convertirse en 21% desde  $t_1 = 10.002s$  hasta finalizar el inventario, como presenta la figura 75. La proporción de variaciones grandes de fase es 59.8% hasta los 9.998s, luego es 19.6%

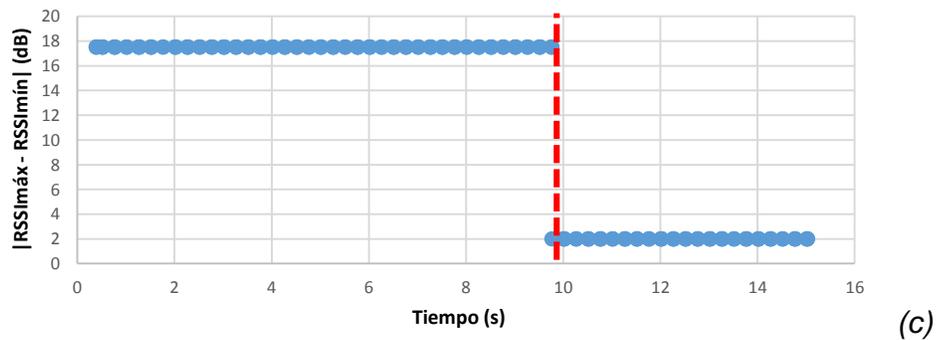
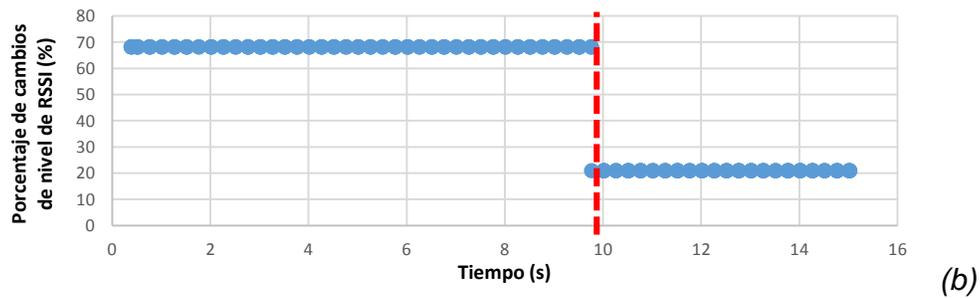
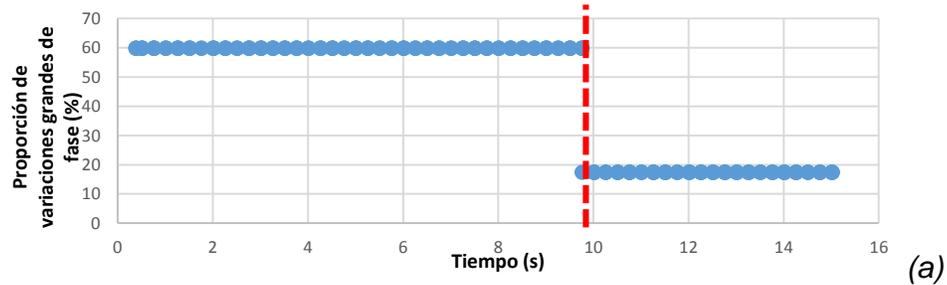
Sin embargo, al considerar la diferencia absoluta de nivel RSSI máximo y mínimo se observa que ésta era 17.5dB hasta  $t_0$  y a partir de  $t_1$  se convirtió en 2dB. Ambos valores están por debajo del umbral de decisión de 25dB y podría considerarse que la etiqueta de 0s a 10.002s se encuentra estática cuando no es así. Gracias al sistema de voto *Voting System* basta que dos de las tres variables cumplan los requerimientos para considerar que la etiqueta se mueve. Por lo tanto, el método reconoce el movimiento dado que el porcentaje de cambios de nivel de RSSI y la proporción de variaciones grandes de ángulo de fase cumplen los requisitos. En cuanto a la frecuencia Doppler, se observa en la figura 74 que a partir de los 10.002s el promedio se concentra alrededor de 0.15 Hz cuando antes de ese instante el valor promedio era 0.768 Hz. Por lo que se estima que la estructura metálica está “Entrando” al portal.

El error promedio en la estimación fue de 11.28%, inferior al 20%. Con esto se verifica el funcionamiento de cada variable de decisión considerada durante el

desarrollo del método. La línea punteada en las figuras 74 y 75 representa el instante a partir del cual la etiqueta cambia de estado de movimiento a un estado de reposo hasta finalizar el proceso de inventario programado. La etiqueta se detuvo a una distancia de separación de 1m con respecto a la antena del lector.



**Figura 74.** Movimiento interrumpido: (a) Fase, (b) RSSI, (c) frecuencia Doppler y (d) trazabilidad



**Figura 75.** Movimiento interrumpido: (a) Proporción de variaciones grandes del ángulo de fase, (b) Porcentaje de cambios de nivel de RSSI y (c) Diferencia absoluta de RSSI máximo y RSSI mínimo.

## 9. VALIDACIÓN DEL MÉTODO

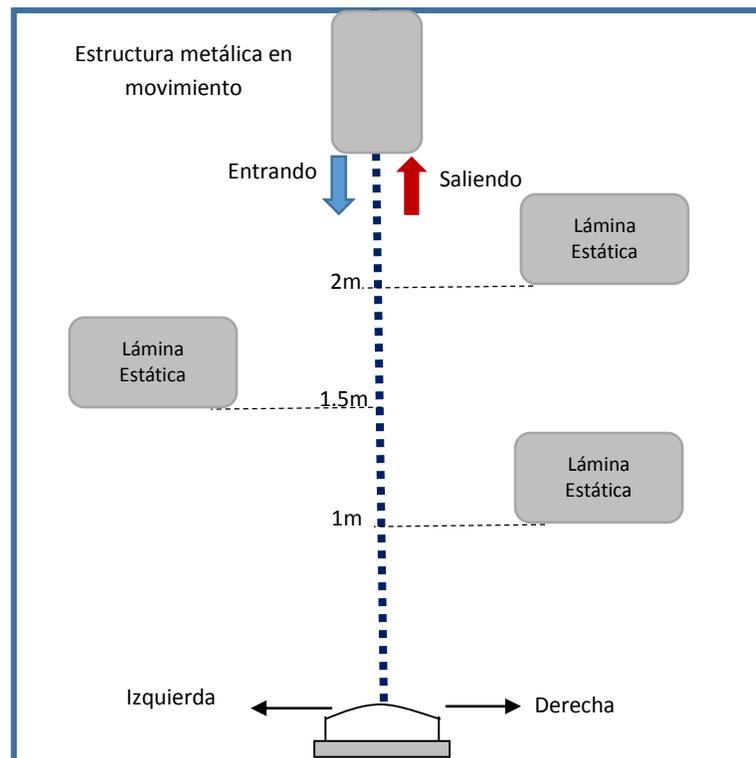
### 9.1. Planteamiento

Luego de verificar el funcionamiento de cada módulo constitutivo del método inductivo experimental diseñado, se procede a validar su desempeño. Para ello se considera el movimiento de una etiqueta adherida sobre una estructura metálica (cilindro o lámina) que se desplaza en los sentidos “Saliendo” y “Entrando” sobre un carro plástico. La zona de cobertura contiene doce etiquetas estáticas interferentes ubicadas sobre láminas a 1m, 1.5m y 2m de separación con respecto a la antena lectora. El escenario de la prueba se presenta en la figura 76.



**Figura 76.** Escenario del experimento de validación diseñado en los ambientes *indoor* y *outdoor*

Se utiliza un lector fijo Speedway Revolution R420 de Impinj y una etiqueta ShortDipole adherida sobre las estructuras metálicas. La figura 77 presenta una vista superior de la disposición de las etiquetas para una mejor comprensión del escenario considerado. Esta figura es un complemento del escenario presentado en la figura 26. Sobre cada una de las estructuras metálicas estáticas se ubicaron 4 etiquetas ShortDipole como lo muestra la figura 76. Solamente una etiqueta se adhería a la estructura en movimiento.



**Figura 77.** Vista superior del escenario considerado para el experimento

Para medir el rendimiento del método propuesto se considerarán tres métricas de desempeño: Porcentaje de lecturas correctas, porcentaje de falsos positivos y porcentaje de falsos negativos. Se entiende por falso positivo el caso donde el método considere a una etiqueta estática como una en movimiento. Se entiende por falso negativo el caso donde se considere como estática una etiqueta en movimiento. Se entiende por porcentaje de lecturas correctas la proporción de aciertos del método al estimar el estado que movimiento de la etiqueta de interés.

## 9.2. Diseño del experimento

### Hipótesis

**H<sub>0</sub>:** El rendimiento promedio del método para la mitigación de interferencias es menor o igual al 90%.

**H<sub>1</sub>:** El rendimiento promedio del método para la mitigación de interferencias es mayor al 90%.

### Determinación de las variables que intervienen y número total de casos

El rendimiento del método desarrollado se medirá considerando 6 velocidades de desplazamiento distintas de 0.2m/s a 1.2m/s con incrementos de 0.2m/s. Se utilizará un cilindro y una lámina galvanizada para el movimiento. Las mediciones se realizarán en los sentidos “Entrando” y “Saliendo” para los dos ambientes considerados. Se empleó el método de Factorial Completo para determinar el número total de casos. Se realizan 30 repeticiones consideradas por nivel. El número total de casos fue 1440 (6 velocidades x 2 ambientes x 2 sentidos x 2 estructuras x 30 repeticiones = 1440).

### Manipulación de los factores

El algoritmo de adquisición y almacenamiento de información es programado para realizar un inventario con un tiempo de identificación dependiendo de la velocidad del desplazamiento, ver tabla 9. La potencia de transmisión será de 30dBm. Las velocidades consideradas corresponden a una muestra de las 11 utilizadas para los análisis de las pruebas anteriores. Esta muestra corresponde a: 0.2m/s, 0.4m/s, 0.6m/s, 0.8m/s, 1m/s y 1.2m/s. Las velocidades son medidas a partir de la relación entre el desplazamiento total y el tiempo que dure el movimiento.

### Medición de la variable dependiente del experimento

Las variables de radio frecuencia consideradas (RSSI, frecuencia Doppler y ángulo de fase) fueron medidas a partir del SDK Octane 4.8 utilizado para la construcción del algoritmo de adquisición y almacenamiento descrito en la sección 7.10 de la parte II. Se almacenó el estado de la variable en una base de datos en Excel. A cada observación de la variable de interés se le asigna una estampa de tiempo la cual

permitirá mantener el historial cronológico de la fase en cada instante del inventario. Luego, en el algoritmo de procesamiento y análisis de información se computan los valores de las variables de decisión (porcentaje de cambios en el nivel de RSSI, proporción de variaciones grandes del ángulo de fase, diferencia absoluta entre RSSI máximo y RSSI mínimo, velocidad promedio estimada a partir de la frecuencia Doppler). Con estas variables el método estima cuál es la etiqueta en movimiento para la cual se calculará la velocidad, trazabilidad y sentido de movimiento

### 9.3. Resultados y análisis

El análisis se realiza para los ambientes *indoor* y *outdoor* por separado. Para realizar el análisis estadístico de este experimento se define la variable aleatoria  $P_c$  que representa la proporción contada o medida de casos en que se determinó exitosamente el estado de movimiento de la etiqueta.  $1-P_c$  representa la proporción de equivocaciones.

Para cada velocidad se consideran 30 repeticiones en las cuales se registra el comportamiento de  $P_c$ . Luego, se promedian los valores obtenidos para la variable aleatoria en cada velocidad.

El resultado de este experimento se presenta en las tablas 12 y 13 para el ambiente *indoor*, 14 y 15 para el ambiente *outdoor* como la columna de porcentaje promedio de identificaciones correctas. En estas tablas se encuentra el resultado del experimento en un ambiente *indoor* considerando el valor promedio de las métricas de desempeño listadas anteriormente. De estas tablas se puede concluir los alcances y limitaciones del método en el ambiente analizado.

De forma general, se observa en estas tablas que para ambas estructuras, sentidos de movimiento y medios considerados el método mitiga el 100% de las interferencias para las observaciones realizadas (0% de falsos positivos) en todas las velocidades medidas. Además, el sentido de movimiento fue estimado correctamente en todas las oportunidades, cuando se detectó la etiqueta en movimiento.

Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	% promedio de identificaciones correctas	% promedio de falsos positivos	% promedio de falsos negativos
15,00	0,20	0,72	100%	0%	0%
7,50	0,40	1,44	100%	0%	0%
5,00	0,60	2,16	99%	0%	1%
3,75	0,80	2,88	99%	0%	1%
3,00	1,00	3,60	93%	0%	7%
2,50	1,20	4,32	83%	0%	17%

(a)

Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	% promedio de identificaciones correctas	% promedio de falsos positivos	% promedio de falsos negativos
15,00	0,20	0,72	100%	0%	0%
7,50	0,40	1,44	100%	0%	0%
5,00	0,60	2,16	98%	0%	2%
3,75	0,80	2,88	95%	0%	5%
3,00	1,00	3,60	85%	0%	15%
2,50	1,20	4,32	30%	0%	70%

(b)

**Tabla 12.** Resultados para el movimiento de una etiqueta adherida a un cilindro que se mueve (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” en un ambiente *indoor*

Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	% promedio de identificaciones correctas	% promedio de falsos positivos	% promedio de falsos negativos
15,00	0,20	0,72	100%	0%	0%
7,50	0,40	1,44	100%	0%	0%
5,00	0,60	2,16	95%	0%	5%
3,75	0,80	2,88	93%	0%	7%
3,00	1,00	3,60	90%	0%	10%
2,50	1,20	4,32	89%	0%	11%

(a)

Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	% promedio de identificaciones correctas	% promedio de falsos positivos	% promedio de falsos negativos
15,00	0,20	0,72	100%	0%	0%
7,50	0,40	1,44	100%	0%	0%
5,00	0,60	2,16	98%	0%	2%
3,75	0,80	2,88	99%	0%	1%
3,00	1,00	3,60	90%	0%	10%
2,50	1,20	4,32	90%	0%	10%

(b)

**Tabla 13.** Resultados para el movimiento de una etiqueta adherida a una lámina metálica que se mueve (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” en un ambiente *indoor*

Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	% promedio de identificaciones correctas	% promedio de falsos positivos	% promedio de falsos negativos
15,00	0,20	0,72	100%	0%	0%
7,50	0,40	1,44	100%	0%	0%
5,00	0,60	2,16	99%	0%	1%
3,75	0,80	2,88	97%	0%	3%
3,00	1,00	3,60	81%	0%	19%
2,50	1,20	4,32	20%	0%	80%

(a)

Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	% promedio de identificaciones correctas	% promedio de falsos positivos	% promedio de falsos negativos
15,00	0,20	0,72	100%	0%	0%
7,50	0,40	1,44	100%	0%	0%
5,00	0,60	2,16	96%	0%	4%
3,75	0,80	2,88	95%	0%	5%
3,00	1,00	3,60	94%	0%	6%
2,50	1,20	4,32	92%	0%	8%

(b)

**Tabla 14.** Resultados para el movimiento de una etiqueta adherida a un cilindro que se mueve (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” en un ambiente *outdoor*

Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	% promedio de identificaciones correctas	% promedio de falsos positivos	% promedio de falsos negativos
15,00	0,20	0,72	100%	0%	0%
7,50	0,40	1,44	100%	0%	0%
5,00	0,60	2,16	94%	0%	6%
3,75	0,80	2,88	94%	0%	6%
3,00	1,00	3,60	91%	0%	9%
2,50	1,20	4,32	90%	0%	10%

(a)

Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	% promedio de identificaciones correctas	% promedio de falsos positivos	% promedio de falsos negativos
15,00	0,20	0,72	100%	0%	0%
7,50	0,40	1,44	100%	0%	0%
5,00	0,60	2,16	98%	0%	2%
3,75	0,80	2,88	99%	0%	1%
3,00	1,00	3,60	90%	0%	10%
2,50	1,20	4,32	90%	0%	10%

(b)

**Tabla 15.** Resultados para el movimiento de una etiqueta adherida a una lámina metálica que se mueve (a) “Saliendo” y (b) “Entrando” en un ambiente *outdoor*

Para evaluar las hipótesis del experimento se utiliza el estadístico Z como la nueva variable a operar la cual posee una distribución normal estándar y se calcula como menciona la ecuación 18 de [50] y [51].

$$Z = \frac{\widehat{P}_c - p}{\sqrt{\frac{pq}{n}}} \quad (18)$$

Para el presente experimento, considerando un nivel de confianza de 95% con un  $p=p_o$ , siendo  $p_o=0.9$  con  $Pc= 0.9267$  (valor promedio de las proporciones observadas) que se distribuye normalmente en torno a la proporción poblacional con una desviación estándar igual a 0.01369, se obtiene un valor de  $Pc$  equivalente en el dominio de la distribución normal estándar de  $z_o= 3.37$ .

Para un  $\alpha=5\%$ , el estadístico Z se encuentra de  $[1.64, \infty]$ . Dado que  $z_o>1.64$ , se observa que estadísticamente  $Pc$  se encuentra en la región  $\alpha=5\%$  del estadístico Z. Considerando la evidencia estadística se rechaza  $H_o$  y se valida  $H_1$ . Por lo tanto, se concluye con un nivel de confianza del 95% que el rendimiento promedio del método propuesto es mayor al 90%.

El modelo lineal de la velocidad se basa en el cálculo de una velocidad promedio, el conocimiento del tiempo inicial de identificación, el cálculo de diferencias de tiempo y la estimación del sentido de movimiento. Se realiza la corrección de calibración antes de procesar los datos. La tabla 16 presenta el resultado para una lámina metálica en un ambiente *indoor*. El resultado para el cilindro y el ambiente *outdoor* es similar. El modelo estima la velocidad con un porcentaje de error inferior al 20% para velocidades menores a 1m/s.

Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	Velocidad estimada promedio	$R^2$	% de error
0,20	0,72	-0,21	1,00	5%
0,40	1,44	-0,41	0,98	2%
0,60	2,16	-0,50	0,97	17%
0,80	2,88	-0,67	0,94	16%
1,00	3,60	-0,80	0,96	20%
1,20	4,32	-0,92	0,93	23%

(a)

Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	Velocidad estimada promedio	$R^2$	% de error
0,20	0,72	0,20	1,00	0%
0,40	1,44	0,34	1,00	15%
0,60	2,16	0,52	0,96	13%
0,80	2,88	0,77	0,91	4%
1,00	3,60	0,72	0,94	28%
1,20	4,32	0,89	0,95	26%

(b)

**Tabla 16.** Resultados de la estimación de la velocidad promedio de desplazamiento

## 10. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 10.1. Conclusiones

Gracias al estudio del estado de variables de radiofrecuencias fue posible diseñar e implementar un método inductivo experimental que permitiera mitigar las interferencias estáticas durante la identificación de estructuras metálicas en movimiento. El método analizado fue construido a partir del diseño y ejecución de una serie de experimentos desarrollados en dos tipos de ambientes uno *indoor* y otro *outdoor* y considerando dos tipos de estructuras metálicas (cilindros de 30cm de diámetro y 1m de longitud, láminas galvanizadas de 1m x 0.7m).

A partir del análisis estadístico de las variables de radiofrecuencia se determinaron umbrales de decisión para cada una de ellas con el fin de categorizar el estado de reposo o movimiento relativo de una etiqueta en el área de cobertura. La zona de cobertura considerada para esta investigación corresponde a un área de 9m<sup>2</sup>.

La caracterización de las variables de radiofrecuencia se realizó tanto para etiquetas estáticas como dinámicas. Para el caso de estructuras metálicas estáticas se encontró que el porcentaje de cambios del nivel de RSSI durante el tiempo de identificación se encuentra por debajo del 50%. Además, la diferencia absoluta del nivel de RSSI máximo y mínimo no supera los 22dB. Por tal motivo se asignó un umbral de decisión para esta variable de radiofrecuencia de 25dB. En cuanto la proporción de variaciones grandes del ángulo de fase (mayores a 3 radianes y menores a -3 radianes) este siempre es inferior al 30%.

En el cuanto al nivel de RSSI se observó que éste presenta una tasa de incremento o decremento al efectuarse movimientos (“Entrando” y “Saliendo”, respectivamente) de la etiqueta en el área de cobertura. Además, la diferencia absoluta entre valor máximo y mínimo de esta variable es considerablemente mayor en las etiquetas dinámicas. Se concluye además que no es posible estimar el movimiento de una etiqueta considerando únicamente la frecuencia Doppler. Se requiere la consulta

del estado de otras variables de radiofrecuencia que apoyen la información extraída del signo de la frecuencia Doppler promedio. Esto se debe además al hecho que las velocidades de desplazamiento del montacargas son muy pequeñas (0.2m/s – 1.2m/s) por lo cual puede existir ambigüedad al estimar su estado de reposo o movimiento.

Se concluye además que el rendimiento promedio del método para la mitigación de interferencias es mayor al 90% (específicamente, mitiga el 100% de las interferencias para las observaciones consideradas) con un porcentaje de falsos negativos no mayor al 20% para velocidades inferiores a 1.2m/s. La estimación de velocidad del método funciona sin problema alguno hasta una velocidad de 0.4m/s. Al aumentar la velocidad por encima de 0.8m/s se observan errores no superiores al 35% en la estimación. Además, el sentido de movimiento fue estimado correctamente en todas las oportunidades, cuando se detectó la etiqueta en movimiento.

Adicionalmente, se obtuvo un modelo de regresión lineal basado en la mediana de las variaciones del ángulo de fase que permite estimar la distancia de separación lector-etiqueta de estructuras metálicas estáticas con un porcentaje de rendimiento de 74.25% para el ambiente *outdoor* y de 81.32% para el *indoor*.

## 10.2. Futuros trabajos

Se plantea como estudio futuro la obtención de la distribución de probabilidad que mejor se ajuste a las distancias estimadas a partir del modelo de diferencia de fase para etiquetas estáticas y el método de estimación de velocidades para etiquetas en movimiento. Además, se plantea la necesidad de ajustar el método para la realización de estimaciones de velocidad, sentido de movimiento y trazabilidad durante la ejecución del inventario.

Se considera necesario además estudiar en investigaciones futuras los alcances y las limitaciones de la aplicación del método propuesto a movimientos horizontales Izquierda-Derecha y Derecha-Izquierda de etiquetas RFID pasivas adheridas sobre estructuras metálicas. Se contempla la posibilidad de realizar sobre el método los ajustes necesarios que permitan la consecución de tal fin.

# GLOSARIO

## A

**Antena:** Elemento conductivo con capacidad para radiar. Dispositivo que emite y recibe energía electromagnética. Es utilizada en conjunto con un chip para la fabricación de tags RFID y también, es parte integrante de los lectores

**Anticolisión (*anti-collision*):** Característica del protocolo de interface RF, que permite al lector RFID identificar simultáneamente múltiples tags en su campo de lectura. Esta característica también impide que lectores muy próximos causen interferencia de uno a otro. Es un componente clave del protocolo EPC Gen2.

## B

**Backscattering:** Proceso donde el *transponder* responde a la señal del lector modulando y retransmitiendo una señal con la misma frecuencia portadora.

**Banda ISM (*Industrial, Scientific, and Medical bands*):** Banda de frecuencia libre (no licenciada), para usos industriales, médicos o de investigación

## C

**Clase 0:** Protocolo de interface RF para tags UHF pasivos. El protocolo Clase 0 es solamente de lectura, por ende, el protocolo subsecuente, Clase 0 Plus, posee capacidad de lectura y escritura. Este protocolo quedó obsoleto con la llegada de Gen2.

**Clase 1:** Protocolo de interface RF propietario para tags UHF pasivos. El protocolo Clase 1 tiene capacidad de lectura y escritura.

**CW (*Continuous Wave*):** Onda electromagnética constante en amplitud y frecuencia enviada durante períodos de tiempo específicos. La información está contenida en las diferentes duraciones del período ON/OFF de la señal emitida.

## D

**Dual-Frequency (DF):** Tecnología radar para la estimación de posiciones por medio de diferencias de fase encontradas en pequeñas diferencias en la frecuencia de transmisión de la señal emitida.

## E

**EEPROM (*Electrically Erasable Programmable read-only memory*):** Memoria más usada en los sistemas RFID con acoplamiento inductivo. Tiene ciclos de escritura limitados y un consumo alto de batería.

**Effective Isotropic Radiated Power (EIRP):** El producto de la potencia de entrada de la antena y la ganancia relativa a una fuente isotrópica.

**EPC (*Electronic Product Code*):** Código electrónico de producto, que permite identificar todos los artículos de manera única e inequívoca en la cadena de suministro. Una serie de bits que identifican la empresa fabricante, categoría del producto y número de producto único.

**EPC Generación 2:** Estándar ratificado por EPCglobal para el protocolo de interfaz aérea.

**EPCglobal:** Organización formada originalmente como una unión entre el *Uniform Code Council* (UCC) y la *Electronic Article Numbering Association* (EAN), EPCglobal es la organización responsable de la creación de las normas para RFID y de promover el desarrollo de soluciones para esta tecnología.

## G

**Gen2 (*Generation2*):** Protocolo de interface RF para aplicaciones en la cadena de suministro que utiliza UHF. El patrón Gen2 fue aprobado en Diciembre de 2004 por EPCglobal y desde entonces recibió la aprobación ISO, a través de la norma ISO 18000-6C. EPCglobal está trabajando para establecer un patrón similar para Alta Frecuencia (HF).

## I

**Inlay:** Chip adjunto a una antena que se monta sobre un sustrato. Normalmente no son etiquetas RFID acabadas.

**ISO (*International Organization for Standardization*):** Institución de estandarización a nivel mundial. Red de institutos de normalización de 148 países, con una Secretaría General en Ginebra (Suiza) que coordina el sistema. EPCglobal es un miembro de ISO y posee la aprobación para el protocolo Gen2.

**ISO 18000:** Conjunto de estándares internacionales que definen el protocolo de interfaz aérea usada en los sistemas RFID para etiquetar productos dentro de la cadena de suministro.

## M

**Modulación (*Modulation*):** Métodos de alterar la portadora a fin de llevar información codificada. Ellos incluyen modulación de amplitud (AM), modulación de fase (PM), modulación de frecuencia (FM), (FSK), posición de pulso (PPM), duración de pulso (PDM) y onda continua (CW).

## P

**Portal:** Punto estratégico en que son instalados lectores RFID con el fin de identificar y acompañar el flujo de los productos a lo largo de un proceso.

**Protocolo de Interfaz aérea (*Air Interface Protocol*):** Conjunto de reglas que definen como los lectores y los tags deben comunicarse.

## R

**Rango/ Alcance (*Range*):** La distancia en que puede ser realizada exitosamente lectura y/o escritura.

**Read (*Lectura*):** La decodificación, extracción y presentación de datos de una etiqueta.

**Reader (Lector):** Dispositivo que contiene la electrónica digital para extraer información de una etiqueta.

## T

**Tag (etiqueta):** Es el transmisor/receptor compuesto por un mecanismo de almacenamiento de información (chip y antena). Transceptor adjunto a un objeto con capacidad de almacenamiento de información.

**Transceptor (*transceiver*):** Elemento con capacidad para transmitir y recibir ondas de radio.

**Transponder (*Transponder*):** Vea Tag, TRANSPONDER (TRANSMitterresPONDER): Elemento de los sistemas RFID capaz de recibir la información del lector y de transmitir su información aprovechando la energía del propio lector o con ayuda de una alimentación externa.

**Trazabilidad:** Concepto de seguimiento de datos sobre un producto, desde su fabricación hasta su venta.

## U

**UPC (*Universal Product Code*):** Principal estándar de código de barras en EEUU.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Dobkin, "The RF in RFID, Passive UHF RFID in Practice". *Technical Marketing, WJ Marketing*, WJ Communications, San Jose, CA, USA. 2008.
- [2] P. Cole, "A Study of Factors Affecting the Design of EPC Antennas & Readers for Supermarket Shelves," *Auto-ID Center White Paper*, 2002.
- [3] M. Kim and K. Kim, "Automated RFID-based identification system for steel coils", *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 131, 1-17, 2012.
- [4] M. Kim, B. Song, D. Ju, E. Choi, and B. Cho, "Development of Metallic Coil Identification System based on RFID", *Microwave Conference Proceedings*, Vol. 4, 2010.
- [5] W. Navarro, Y. Ternera, J. C. Vélez, "Prueba de Concepto: Sistema de identificación por radiofrecuencias en la banda UHF sobre el metal". Tesis para recibir el título como Ingeniero Electrónico. Fundación Universidad del Norte, 2013.
- [6] W. Navarro, Y. Ternera, J. Candelo, "Fase 1: Sistema de identificación por radiofrecuencia RFID sobre equipos de la red eléctrica". Tesis para recibir el título como Ingeniero Electricista. Fundación Universidad del Norte, 2014.
- [7] Impinj, "User Manual Guide, Speedway® Revolution R420 UHF GEN 2 RFID", 2012.
- [8] SMARTRAC, "ShortDipole Datasheet", 2012.
- [9] LAIRD Technology, "Circular Polarity RFID Panel Antenna PAL90209H - PAR90209H Datasheet", 2012.
- [10] J. Han, H. Ding, C. Quian, D. Ma, W. Xi, Z. Wang, Z. Jiang and L. Shangguan, "CBID: A Customer Behavior Identification System using Passive Tags", *22<sup>nd</sup> International Conference on Network Protocol (ICNP) IEEE*, pp. 47-58, 2014.
- [11] Y. Koezuka, K. Iida, "Tag communication device, tag moving direction detecting system and tag moving direction detecting method", U.S. Patent 8 115 594 B2, February 14, 2012.

- [12] G. M. Shafer, "Radio Frequency ID Doppler motion detector", U.S. Patent 2008/0061976 A1, March 13, 2008.
- [13] K. Barret, N. Hepworth, C. Blair, N. Klatsmanyi and L. Tucker, "Departure-Based reminder systems", U.S. Patent 7 821 386 B1, October 26, 2010.
- [14] Y. Zhang, M. Amin and F. Ahmad, "Time-Frequency Analysis for the Localization of Multiple Moving Targets Using Dual-Frequency Radars", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 15, 2008.
- [15] J. C. Carrick, Y. G. Maguire, "Methods and Apparatuses for RFID tag range determination", U.S. Patent 2010/0109844 A1, May 6, 2010.
- [16] M. Bolic, D. Simplot-Ryl, I. Stojmenovic, "RFID Systems: Research, trends and challenges", *Ed. John Wiley & Sons Ltd*, 2010.
- [17] N. Chandra, "Handbook of smart antennas for RFID systems", *Ed. John Wiley & Sons Inc.*, 2010.
- [18] S. Lewis, "A Basic Introduction to RFID Technology and Its Use in the Supply Chain", *Laran RFID White Paper*, 2004.
- [19] P. Sanghera, "RFID+ Study Guide and Practice Exams", *Syngress Publishing, Inc.* 2007.
- [20] M. Leng, "Design of High Performance RFID Systems for Metallic Item Identification", *School of Electrical and Electronic Engineering*. The University of Adelaide, Australia, 2003.
- [21] M. Tajima. "Strategic value of RFID in supply chain management", *Management and Organizational Studies*, The University of Western Ontario, pp. 261-273, November, 2007.
- [22] E. Carrasco, "Estado del arte de tecnología RFID", Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Universitaria de Informática, Madrid, 2009.
- [23] Philips Semiconductors, "Item-level visibility in the pharmaceutical supply chain: A comparison of HF and UHF RFID technologies", TAGSYS and Texas Instruments Inc., 2004.

- [24] Texas Instruments Inc., “UHF Gen 2: System Overview”, TI-RFID, September 2005.
- [25] R. Orosco y R. Linares, “Análisis de modelos de propagación e interferencia de la tecnología RFID pasiva de UHF para aplicación en la identificación vehicular”. Tesis de Maestría Instituto Politécnico Nacional, México, D.F Junio 2011.
- [26] EPCglobal, “EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz Version 1.1.0”, 2005.
- [27] Regulatory status for using RFID in the EPC Gen 2 band (860 to 960 MHz) of the UHF spectrum [online]. Available: <http://www.gs1.org>, September, 2013.
- [28] ISO/IEC 180006-C: Information technology —Radiofrequency identification for item management — Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960MHz [online]. Available: <http://www.iso.org>, August, 2013.
- [29] S. Chiu, I. Kipnis, M. Loyer, J. Rapp, D. Westberg, J. Johansson and P. Johansson, “A 900MHz UHF RFID reader transceiver IC”, *EEE Journal of Solid State Circuits*, vol. 42, no. 12, pp. 2822–2833, Dec. 2007.
- [30] M. H. Mickle, L. Mats, and P. J. Hawrylak, “Physics and Geometry of RFID,” in *RFID Handbook: Applications, Technology, Security, and Privacy*, S. Ahson and M. Ilyas, Eds. CRC Press, 2008.
- [31] B. Jamali, D. C. Ranasinghe, and P. H. Cole, “Design and optimization of power rectifiers for passive RFID systems in monolithic CMOS circuit”, in *SPIE - Microelectronics: Design, Technology and Packaging II*, vol. 6035, 2006.
- [32] W. H. Hayt, “Engineering Electromagnetics”, *Ed. 5th. McGraw Hill*, 1989.
- [33] Catarinucci, L., Colella, R., De Blasi, M., Patrono L. and Tarricone L. “High Performance UHF RFID Tags for Item-Level Tracing Systems in Critical Supply Chains”, *Current Trends and Challenges in RFID, InTech*, 187-208, 2011.
- [34] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley & Sons, 1989.

- [35] P. Raunonen, L. Sydanheimo, L. Ukkonen, M. Keskilammi, M. Kivikoski, "Folded dipole antenna near metal plate" *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 1, pp. 848–851, 2003.
- [36] B. Yu, F. J. Harackiewicz and B. Lee, "RFID Tag Antennas Mountable on Metallic Platforms" *Radio Frequency Identification Fundamentals and Applications Design Methods and Solutions*, vol. 10, pp. 165-180, 2010
- [37] CAEN RFID, "User Manual Guide, AT870 Windows CE® .NET Ruggedized PDA", 2012.
- [38] F. Ahmad, M. G. Amin and P. Setlur, "Through-the-Wall Target Localization using Dual-Frequency CW Radars", *Sensors, Command, Control, Communications and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense V*, vol. 6201, id. 62010H, 2006.
- [39] P. Krishna, J. H. Fischer, D. J. Husak and R. A. Stephenson, "Scheduling in an RFID system having a coordinated RFID tag reader array", U.S. Patent 7817014 B2, Oct. 2010.
- [40] H. Nogami, "Array antenna, tag communication device, tag communication system, and beam control method for array antenna", U.S. Patent 8362954 B2, January 2013.
- [41] Zhang, Y. Amin, M.G., and Kaushik, S "Localization and tracking of passive RFID tags based on direction estimation", *Int. J. Antennas and Propagation*, Dec. 2007.
- [42] A. Povalač and J. Šebesta "Phase of Arrival Ranging Method for UHF RFID Tags Using Instantaneous Frequency Measurement," *ICECom Conference Proceedings*, 2010
- [43] P. V. Nikitin, R. Martinez, S. Ramamurthy, H. Leland, G. Spiess and K. V. S. Rao "Phase Based Spatial Identification of UHF RFID Tags", *IEEE International Conference RFID*, 2010
- [44] S. Toivonen, "Identifying and Controlling Stray Reads at RFID Gates", Thesis submitted for examination for the degree of Master of Science in Technology. Aalto University, 2012.
- [45] H. Kamiya, "RFID tag movement distinguishing method and RFID tag movement distinguishing program", U.S. Patent 2014/0167920 A1, Jun 6, 2014.

[46] Impinj, “Speedway Revolution Reader—Low Level User Data Support”, Revision 3.0, 2013.

[47] A. Andrianakis, “Security and Privacy of passive Low-Cost RFID Systems”, Technical University of Crete, Chania, 2012.

[48] R. Aguirre, D. Altamar, J. Cristancho, J. Martínez, W. Navarro, E. Rodriguez, Y. Ternera, W. Toro, J. Valero, M. Calle and J. C. Vélez, “The Grey Area in Wireless Communications A Multiplatform Experimental”, *IEEE Latin-America Conference on Communications (LATINCOM)*, 2014.

[49] M. A. Richards, “Fundamentals of Radar Signal Processing”, Ed. *McGraw-Hill*, 2005.

[50] R. Walpole, R. Myers, S. Myers, “Probabilidad y estadística para ingenieros”. Ed. *Prentice-Hall*, 1999

[51] D. Montgomery and G. Runger, “Applied Statistics and Probability for Engineers”, Ed. *John Wiley & Sons, Inc.*, 2003

[52] División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional – DITEC – Ministerio de Vivienda y Urbanismo “NTM 009 2013: Requisitos para equipos de transporte vertical: Ascensores y Montacargas Incluidos o Funiculares”, 2012

# APÉNDICES

## A. Algoritmo de adquisición y almacenamiento del estado de las variables de radiofrecuencia

```

using System;
using System.IO;
using System.Text;
using Impinj.OctaneSdk;
using System.Threading;

namespace OctaneSdkExamples
{
    class Program
    {
        static ImpinjReader reader = new ImpinjReader();

        static void Main(string[] args)
        {
            try
            {
                reader.Connect(SolutionConstants.ReaderHostname);

                Settings settings = reader.QueryDefaultSettings();

                settings.Report.IncludeDopplerFrequency = true;
                settings.Report.IncludePeakRssi = true;
                settings.Report.IncludePhaseAngle = true;
                settings.Report.IncludeAntennaPortNumber = true;
                settings.Report.IncludeChannel = true;
                settings.Report.IncludeFirstSeenTime = true;
                settings.Report.IncludeSeenCount = true;
                settings.Report.IncludeFastId = true;

                settings.Antennas.DisableAll();
                settings.Antennas.GetAntenna(1).IsEnabled = true;

                settings.ReaderMode = ReaderMode.DenseReaderM8;
                settings.SearchMode = SearchMode.DualTarget;
                settings.Session = 2;
                settings.TagPopulationEstimate = 32;
                settings.Report.Mode = ReportMode.Individual;

                double power = 30.0;
                Console.WriteLine("Setting Tx Power to {0} dBm", power);
                Console.WriteLine("-----");

                settings.Antennas.GetAntenna(1).TxPowerInDbm = power;
                settings.Antennas.GetAntenna(1).MaxRxSensitivity = true;

                FeatureSet features = reader.QueryFeatureSet();
                reader.ApplySettings(settings);
                reader.TagsReported += OnTagsReported;
            }
            catch { }
        }
    }
}

```

```

reader.Start();
using (StreamWriter timestart = File.AppendText("timestart.xls"))
{
    string lines = DateTime.Now.ToString("dd/MM/yyyy;hh:mm:ss,ffffff");
    timestart.WriteLine(lines);
}
Thread.Sleep(15000);

reader.Stop();
using (StreamWriter timestop = File.AppendText("timestop.xls"))
{
    string lines = DateTime.Now.ToString("dd/MM/yyyy;hh:mm:ss,ffffff");
    timestop.WriteLine(lines);
}

Thread.Sleep(2000);

Console.WriteLine("-----");
Console.WriteLine("Reader Features");
Console.WriteLine("-----");
Console.WriteLine("Model name : {0}", features.ModelName);
Console.WriteLine("Model number : {0}", features.ModelNumber);
Console.WriteLine("Firmware version : {0}", features.FirmwareVersion);
Console.WriteLine("Antenna count : {0}\n", features.AntennaCount);

features.Save("features.xml");

Console.WriteLine("-----");
Console.WriteLine("Reader Status");
Console.WriteLine("-----");
Status status = reader.QueryStatus();
Console.WriteLine("Is connected : {0}", status.IsConnected);
Console.WriteLine("Is singulating : {0}", status.IsSingulating);
Console.WriteLine("Temperature : {0}° C\n", status.TemperatureInCelsius);

reader.ApplyDefaultSettings();
DisplayCurrentSettings();
Console.WriteLine("Saving settings to file.");
settings.Save("settings.xml");

Console.WriteLine("Edit settings.xml and press enter.");
Console.ReadLine();

Console.WriteLine("Loading settings from file.");
settings = Settings.Load("settings.xml");

Console.WriteLine("Applying settings from file.\n");
reader.ApplySettings(settings);

DisplayCurrentSettings();

Console.WriteLine("Press enter to exit.");
Console.ReadLine();
reader.Disconnect();
}
catch (OctaneSdkException e)
{
    Console.WriteLine("Octane SDK exception: {0}", e.Message);
}

```

```

    }
    catch (Exception e)
    {
        Console.WriteLine("Exception : {0}", e.Message);
    }
}

static void DisplayCurrentSettings()
{
    Console.WriteLine("-----");
    Console.WriteLine("Reader Settings");
    Console.WriteLine("-----");

    Settings settings = reader.QuerySettings();
    Console.WriteLine("Reader mode : {0}", settings.ReaderMode);
    Console.WriteLine("Search mode : {0}", settings.SearchMode);
    Console.WriteLine("Session : {0}", settings.Session);

    if (settings.Antennas.GetAntenna(1).MaxRxSensitivity)
    {
        Console.WriteLine("Rx sensitivity (Antenna 1) : Max");
    }
    else
    {
        Console.WriteLine("Rx sensitivity (Antenna 1) : {0} dBm",
            settings.Antennas.GetAntenna(1).RxSensitivityInDbm);
    }

    if (settings.Antennas.GetAntenna(1).MaxTransmitPower)
    {
        Console.WriteLine("Tx power (Antenna 1) : Max");
    }
    else
    {
        Console.WriteLine("Tx power (Antenna 1) : {0} dBm",
            settings.Antennas.GetAntenna(1).TxPowerInDbm);
    }

    Console.WriteLine("");
}

static void OnTagsReported(ImpinjReader sender, TagReport report)
{
    using (StreamWriter wen = File.AppendText("Datos.xls"))
    {
        foreach (Tag tag in report)
        {
            Console.WriteLine("EPC : {0} , Peak RSSI : {1} dBm , Phase Angle (rad)
: {2} , Doppler Frequency (Hz) : {3} , Antenna : {4} , Frequency (MHz) : {5} , Time Stamp
: {6} , Model Name : {7} , EPC memory size (bits) : {8} , User memory size (bits) : {9}",
                tag.Epc,
                String.Format("{0:0.00}", tag.PeakRssiInDbm),
                String.Format("{0:0.00}", tag.PhaseAngleInRadians),
                tag.RfDopplerFrequency.ToString("0.00"),
                tag.AntennaPortNumber, tag.ChannelInMhz,
                String.Format("{0:0.000}", tag.FirstSeenTime),
                tag.ModelDetails.ModelName,
                tag.ModelDetails.EpcSizeBits,
                tag.ModelDetails.UserMemorySizeBits);
        }
    }
}

```



```

        EPC_tag(i,RFIDtag)= input(i,3);
        RSSI_tag(i,RFIDtag)= input(i,4);
        Fase_tag(i,RFIDtag)= input(i,5);
        Doppler_tag(i,RFIDtag)= input(i,7);
        FreqTX_tag(i,RFIDtag)= input(i,8);
        TiempoActual_tag(i,RFIDtag)= input(i,11);
        TiempoInicial_tag(i,RFIDtag)= input(i,12);
    end
end
end
for j=1: max(input(:,3))
    cont_Fase =0; cont_RSSI=0; RFIDtag=j; cont=1;
    for i=2:size(ID_tag,1)
        if ID_tag(i,RFIDtag)~=0
            vector_ID_tag(cont,RFIDtag)= ID_tag(i,RFIDtag);
            vector_EPC_tag(cont,RFIDtag)= EPC_tag(i,RFIDtag);
            vector_RSSI_tag(cont,RFIDtag)= RSSI_tag(i,RFIDtag);
            vector_Fase_tag(cont,RFIDtag)= Fase_tag(i,RFIDtag);
            vector_Doppler_tag(cont,RFIDtag)= Doppler_tag(i,RFIDtag);
            vector_FreqTX_tag(cont,RFIDtag)= FreqTX_tag(i,RFIDtag);
            vector_TiempoActual_tag(cont,RFIDtag)= TiempoActual_tag(i,RFIDtag);
            vector_TiempoInicial_tag(cont,RFIDtag)= TiempoInicial_tag(i,RFIDtag);
            cont= cont+1;
        end
    end
    if size(vector_ID_tag,1)>2 && RFIDtag<= size(vector_ID_tag,2)
        for i=2:size(vector_ID_tag,1)
            %Cálculo de diferencia de Fase
            dif_Fase(i,RFIDtag)= analisis_diferencia_fase(vector_Fase_tag,i,RFIDtag)
            %Cálculo de diferencia de RSSI
            dif_RSSI(i,RFIDtag)= analisis_diferencia_RSSI(vector_RSSI_tag,i,RFIDtag)
        end
        for i=1:size(vector_ID_tag,1)
            if vector_ID_tag(i,RFIDtag) ~=0
                cont_NoCeros = cont_NoCeros+1;
            end
        end
        for i=1:cont_NoCeros
            %Contador de diferencia de fase
            cont_Fase = analisis_contador_Fase(dif_Fase,i,RFIDtag)
        end
        for i=1:cont_NoCeros
            output(i,1) = vector_TiempoActual_tag(i,RFIDtag)-
vector_TiempoInicial_tag(i,RFIDtag);    %Tiempo real = Tactual - Tinicial
        end
        for i=2:cont_NoCeros
            %Contador de diferencia de fase
            cont_RSSI = analisis_contador_RSSI(vector_RSSI_tag,i,RFIDtag)
        end
        cambio_RSSI(1,RFIDtag) = cont_RSSI/cont_NoCeros;
        cambio_Fase(1,RFIDtag) = cont_Fase/cont_NoCeros;
        prom_Doppler(1,RFIDtag) = mean(vector_Doppler_tag(1:cont_NoCeros,RFIDtag));
        max_min_RSSI(1,RFIDtag) = max(vector_RSSI_tag(1:cont_NoCeros,RFIDtag)) -
min(vector_RSSI_tag(1:cont_NoCeros,RFIDtag));

        %% Estimación de velocidades INSTANTÁNEAS por los dos métodos propuestos
        for i=1: cont_NoCeros
            output(i,3) = (vector_Doppler_tag(i,RFIDtag)*300)/(vector_FreqTX_tag(i,RFIDtag));

```

```

% Velocidad instantánea Cálculo estándar
end

%% Estadísticos para encontrar el sentido de movimiento
% Cálculo estándar
velocidad_M2(1,RFIDtag)= mean(output(:,3));
if velocidad_M2(1,RFIDtag) <0 && (cambio_RSSI(1,RFIDtag) >=
str2num(get(handles.difrssi_prog,'String'))/100 && cambio_Fase(1,RFIDtag) >=
str2num(get(handles.diffase_prog,'String'))/100 && prom_Doppler(1,RFIDtag)< 0) &&
max_min_RSSI(1,RFIDtag) >= str2num(get(handles.absRSSI_prog,'String'))

    for i=1: cont_NoCeros
        output(i,2) = output(i,1)-output(1,1);
        % Delta Tiempo_ActualAnterior = Tactual - T anterior
    end
    for i=1: cont_NoCeros
        % Distancia estimada: Sentido "Saliendo"
        output(i,4) = calculo_distancia_estimada(velocidad_M2, RFIDtag, i);
    end
    contmov= contmov+1; movtag(1,contmov) = RFIDtag; sentido=1;
    for i=1:contmov
        if RFIDtag<=9
            final_tag=strcat(str_inicial2,num2str(RFIDtag));
        elseif RFIDtag>=10
            final_tag=strcat(str_inicial,num2str(RFIDtag));
        end
    end
    set(handles.listbox1,'String',final_tag);
elseif velocidad_M2(1,RFIDtag) >0 && (cambio_RSSI(1,RFIDtag) >=
str2num(get(handles.difrssi_prog,'String'))/100 && cambio_Fase(1,RFIDtag) >=
str2num(get(handles.diffase_prog,'String'))/100 && prom_Doppler(1,RFIDtag)> 0) &&
max_min_RSSI(1,RFIDtag) >= str2num(get(handles.absRSSI_prog,'String'))
    for i=1: cont_NoCeros
        output(i,2) = output(size(output,1),1)-output(i,1);
        % Delta Tiempo_ActualAnterior = Tactual - T anterior
    end
    for i=1: cont_NoCeros
        % Distancia estimada: Sentido "Entrando"
        output(i,4) = calculo_distancia_estimada(velocidad_M2, RFIDtag, i);
    end
    contmov= contmov+1; movtag(1,contmov) = RFIDtag; sentido=2;
    for i=1:contmov
        if RFIDtag<=9
            final_tag=strcat(str_inicial2,num2str(RFIDtag));
        elseif RFIDtag>=10
            final_tag=strcat(str_inicial,num2str(RFIDtag));
        end
    end
    set(handles.listbox1,'String',final_tag);
end
end

```