



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA División de Ciencias Básicas e Ingeniería

Análisis de mecanismos de identificación en sistemas RFID

por:

Leonardo Daniel Sánchez Martínez

Una tesis doctoral presentada para obtener el grado de:

**Doctor en Ciencias
y Tecnologías de la Información**

Asesor:

Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos

Una disertación defendida públicamente en la UAM-Iztapalapa el 28 de Junio de 2016

Los miembros del jurado:

Presidente :	Dr. Francisco Rodríguez Henríquez, CINVESTAV-IPN
Secretario :	Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos, UAM-Iztapalapa
Vocal :	Dra. Graciela Román Alonso, UAM-Iztapalapa
Vocal :	Dr. Enrique Stevens Navarro, UASLP
Vocal :	Dr. Miguel López Guerrero, UAM-Iztapalapa



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA División de Ciencias Básicas e Ingeniería

Análisis de mecanismos de identificación en sistemas RFID

por:

Leonardo Daniel Sánchez Martínez

Una tesis doctoral presentada para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias y Tecnologías de la Información

Asesor:

Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos

Una disertación defendida públicamente en la UAM-Iztapalapa el 28 de Junio de 2016

Los miembros del jurado:

Presidente :	Dr. Francisco Rodríguez Henríquez, CINVESTAV-IPN
Secretario :	Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos, UAM-Iztapalapa
Vocal :	Dra. Graciela Román Alonso, UAM-Iztapalapa
Vocal :	Dr. Enrique Stevens Navarro, UASLP
Vocal :	Dr. Miguel López Guerrero, UAM-Iztapalapa

ABSTRACT

RFID is one of the most pervasive technologies nowadays. Its main attractiveness lies on the ability of identifying objects with no contact or a direct line of sight between the participant devices. An RFID system comprises two main components: an RFID network and a storage system. There are important research directions on each of these subjects, which together allow to improve the performance of RFID technology. The RFID network is the core of an RFID system since in this component resides the whole information of interest. Each object has attached an RFID tag with a unique ID. The RFID reader is the central part of the RFID network, its main function is to manipulate the information from the tags. Therefore, several processes are executed in an RFID network in order to manage such information. Normally, each process is related to an application and its requirements, causing an on-demand execution of a particular process. Moreover, the *Identification Process* is always executed in an RFID network, which consists of collecting the tag IDs by means of the interaction between an RFID reader and the tags in the interest area. In this thesis, we call such a scenario *the centralized approach*. Improving the performance of the identification process is vital for the whole RFID system. Most of the research work has been made around the centralized approach for RFID networks; however, we identify in this work that this not only limits the execution of the identification process, but also limits the impact of the future mechanisms.

A new architecture for RFID tag identification has arisen in recent years. Such approach proposes to evolve from the original centralized approach to one that in some way groups tags in different coverage zones and executes the identification process in a distributed way. The main goal is to improve the identification delay of the system, and eventually the associated implementation costs. In this work, we call such architecture as *the distributed approach*. We also prove in this work that the contributions made so far in this direction still need lots of improvements. Particularly, we highlight the need of new communication protocols for the distributed approach, as well as the need of analyzing their performance.

In this PhD thesis, we review a wide set of RFID identification mechanisms and we evaluate their performance in terms of *identification delay*. Such parameter is the time needed to identify the whole set of tags present in an interest zone. Then, we describe in detail how to improve such performance parameter for each of the analyzed mechanisms. Finally, we propose an algorithm to help designers choose an identification mechanism according to application requirements.

RESUMEN

La tecnología RFID es ampliamente utilizada hoy en día. El gran atractivo de RFID es su habilidad de identificar objetos sin la necesidad de contacto o línea de visión directa entre los dispositivos participantes. Estas características, junto con su relativo bajo costo de implementación hacen de RFID una de las tecnologías de identificación automática más atractivas en la investigación y en la industria. Un sistema RFID tiene dos componentes principales: una red RFID y un sistema de almacenamiento. Cada uno de estos ha impuesto líneas de investigación que buscan mejorar el desempeño de la tecnología en general. La red RFID es el núcleo del sistema debido a que en esta reside toda la información de interés. Cada objeto en la red tiene una etiqueta RFID adjunta, que a su vez tiene un identificador único o ID. El lector es el dispositivo central de la red que se comunica con las etiquetas para manejar la información contenida en ellas. En una red RFID se pueden realizar diversos procesos de comunicación. Normalmente un proceso está relacionado a una aplicación en particular, es decir, se ejecuta a la demanda. Sin embargo, existe uno que se ejecuta en todo sistema RFID: el *proceso de identificación*. Este es el realizado entre lectores y etiquetas para recolectar el ID de cada una de ellas. En este sentido, todo el trabajo realizado en torno a este proceso se ha realizado bajo el *enfoque centralizado*, el cual no solo limita la ejecución del proceso de identificación, sino que también limita el impacto de futuros mecanismos.

Una nueva arquitectura para la identificación de etiquetas ha surgido en años recientes. Esta propone cambiar el enfoque tradicional por uno que permita agrupar las etiquetas en subzonas de cobertura y ejecutar el proceso de identificación de manera distribuida. El objetivo de este es mejorar el retardo de identificación del sistema y eventualmente los costos de implementación asociados. En este trabajo se denomina a esta nueva arquitectura como *enfoque distribuido*. Tras su estudio, se demuestra que las contribuciones realizadas en esta dirección necesitan muchas mejoras. Particularmente, se resalta la necesidad de protocolos de comunicación para el enfoque distribuido, así como su análisis de rendimiento.

En esta tesis de doctorado se revisan los mecanismos de identificación propuestos hasta el momento y se evalúan en términos del *retardo de identificación*. Este corresponde al tiempo utilizado para identificar un conjunto de etiquetas presentes en una zona de interés. Posteriormente, se describe a detalle cómo mejorar cada mecanismo analizado respecto a este parámetro. Finalmente, se propone un algoritmo que ayuda a elegir un mecanismo de identificación de acuerdo con los requerimientos específicos de una aplicación.

AGRADECIMIENTOS

Este pequeño espacio es para agradecer a todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron a la realización de este trabajo. De antemano, una disculpa a todas aquellas personas que no se mencionan explícitamente, pero que saben son parte de mi sincera gratitud.

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de vivir esta etapa en las mejores condiciones, en el mejor lugar y con las mejores personas. Agradezco a mis padres, Leonardo y Dolores, por darme la oportunidad de tener una educación a costa de muchos sacrificios, por su cariño y aliento. El sentimiento sobrepasa mi gratitud, ya que sin ustedes dos a mi lado, esto no hubiera sido posible. Agradezco a mi esposa Jessica por estar a mi lado en cada momento, por sus consejos y apoyo en todo momento. Eres la mitad de mi corazón. Agradezco a mi hijo Leonardo Gamaliel por existir, eres la otra mitad de mi corazón y mis ganas de vivir.

Agradezco profundamente al Dr. Victor Manuel Ramos Ramos por darme la oportunidad de trabajar bajo su dirección. Por brindarme sus conocimientos y consejos durante el desarrollo de este proyecto, los cuales no solo me permitieron culminar de mejor manera mi trabajo, sino que además me han ayudado en mi vida personal. Le agradezco infinitamente su amistad y su apoyo. Agradezco a todos mis amigos del autodenominado WiNetSys, quienes siempre contribuyeron y aportaron observaciones valiosas tanto en el aspecto labora como personal.

También agradezco a todos los profesores que contribuyeron a mi formación. En particular, no puedo dejar de mencionar al Dr. Miguel López Guerrero, ya que siempre tuvo la mejor disposición para ayudar a mejorar este trabajo.

Al los miembros del jurado, Dr. Francisco Rodríguez Henríquez, Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos, Dra. Graciela Román Alonso, Dr. Enrique Stevens Navarro y Dr. Miguel López Guerrero por aceptar ser parte del jurado evaluador de esta tesis y por tomarse el tiempo para brindarme observaciones que mejoraron a esta.

A la Universidad Autónoma Metropolitana, mi casa abierta al tiempo, por darme la oportunidad de desarrollarme académica y personalmente. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por aportar los recursos económicos para mi formación académica, sin los cuales habría sido muy difícil llegar a buen término.

ÍNDICE GENERAL

Lista de figuras	IX
Lista de tablas	XIII
1. Introducción	1
1.1. Sistema RFID	1
1.2. Alcance y limitaciones de los sistemas RFID	4
1.3. Procesos de comunicación fundamentales en sistemas RFID	6
1.4. Problema de investigación	9
1.5. Objetivos	9
1.6. Metodología	10
1.7. Lista de contribuciones	11
1.8. Estructura de la tesis	12
2. Trabajo relacionado	13
2.1. Enfoque centralizado	15
2.1.1. Un lector - área de cobertura limitada - una zona de interrogación	16
2.1.2. Un lector - área de cobertura limitada - k zonas de interrogación	20
2.2. Enfoque distribuido	25
2.2.1. Sistemas RFID aumentados	25
2.2.2. Múltiples lectores - área de cobertura extendida - k zonas de interrogación	32
3. Modelado de sistemas RFID pasivos	35
3.1. Modelo del sistema	35
3.2. Dispositivos de una red RFID	36
3.3. Rango de cobertura y modelo de propagación	36
3.3.1. Antecedentes	37
3.4. Número y distribución de etiquetas	38

3.5. Suposiciones	40
4. Enfoque centralizado para sistemas RFID pasivos	43
4.1. Esquema <i>1R-LCA-1IZ</i>	44
4.1.1. Análisis de 1R-LCA-1IZ	44
4.1.2. Propuesta: modificación del EPC Gen2 para el 1R-LCA-1IZ	45
4.1.3. Resultados	49
4.1.4. Discusión	50
4.2. Esquema <i>1R-LCA-kIZ</i>	51
4.2.1. Análisis del 1R-LCA-kIZ	52
4.2.2. Propuesta: modificación del EPC Gen2 para el 1R-LCA-kIZ	52
4.2.3. Resultados	60
4.2.4. Discusión	66
5. Enfoque distribuido para sistemas RFID pasivos	69
5.1. Esquema <i>AS-LCA-kIZ</i>	70
5.1.1. Análisis de AS-LCA-KIZ	70
5.1.2. Propuesta: EPC Gen2 para el AS-LCA-kIZ	70
5.1.3. Resultados	81
5.1.4. Discusión	82
5.2. Esquema <i>AS-ECA-kIZ</i>	84
5.2.1. Análisis del AS-ECA-kIZ	84
5.2.2. Propuesta: extensión del rango de cobertura de un sistema RFID	85
5.2.3. Consideraciones para el <i>L-Scheme</i>	87
5.2.4. Diseño de EPC Gen2 para el AS-ECA-kIZ	87
5.2.5. Resultados	95
5.2.6. Discusión	96
6. Mecanismos de identificación para sistemas RFID pasivos: análisis, comparación y clasificación	99
6.1. Análisis de desempeño	99
6.2. Comparación y clasificación de los mecanismos de identificación para sistemas RFID pasivos	101
7. Conclusiones y perspectivas de investigación	107
Referencias	111

LISTA DE FIGURAS

1.1. Sistema RFID.	2
1.2. <i>Free space model</i>	5
1.3. <i>Two-ray ground reflection model</i>	6
2.1. Enfoque centralizado y enfoque distribuido. Un característica evidente del enfoque distribuido es que siempre hay más de una zona de interrogación.	14
2.2. Taxonomía de los mecanismos de identificación para sistemas RFID pasivos.	15
2.3. Protocolos de lectura para ambientes RFID pasivos.	16
2.4. Funcionamiento del estándar EPC <i>Class 1 Generation 2</i>	20
2.5. Algoritmo Q : Mecanismo para adaptar el tamaño de trama utilizado por el EPC Gen2.	21
2.6. <i>Power Distance Clustering Scheme</i>	23
2.7. Diagrama de flujo del <i>PDC Scheme</i> basado en [1].	23
2.8. Esquema de particionamiento del <i>AICTSP Scheme</i>	24
2.9. Enfoque de recepción distribuida.	26
2.10. Esquema de comunicación utilizado por el <i>DR-Scheme</i>	27
2.11. <i>Multi-reader scheme</i>	31
2.12. <i>L-Scheme: One illuminator</i>	31
3.1. Rango de cobertura del <i>One-Reader Scheme</i>	37
3.2. Casos para la distribución de las etiquetas en la zona de interés.	39
4.1. Retardo de identificación para EPC Gen2 y EPC Gen2 con probabilidad de transmisión.	50
4.2. Retardo de identificación para EPC Gen2 con Q óptima y EPCGen2 con Q óptima y probabilidad de transmisión.	51
4.3. Áreas de cobertura para k en la zona de interrogación.	55
4.4. Áreas de tamaños diferentes: d constante.	56

4.5. Áreas de tamaños iguales: d variable.	56
4.6. EPC Gen2 con d constante.	61
4.7. EPC Gen2 con k constante.	62
4.8. EPC Gen2 con Q óptima y d constante.	63
4.9. EPC Gen2 con Q óptima modificado para iniciar con un tamaño de trama igual al número estimado de etiquetas y valor constante de d	63
4.10. EPC Gen2 con Q óptima y k constante.	64
4.11. EPC Gen2 con Q óptima modificado para iniciar con un tamaño de trama igual al número estimado de etiquetas y k constante.	64
4.12. EPC Gen2 con k óptima y Q inicial.	65
4.13. EPC Gen2 con Q óptima, k óptima y Q inicial.	66
5.1. Ranura vacía en el <i>DR-Scheme</i>	72
5.2. Ranura exitosa o con identificación en el <i>DR-Scheme</i>	73
5.3. Ranura con colisión en el <i>DR-Scheme</i>	74
5.4. Ranura vacía o con colisión del protocolo distribuido EPC Gen 2 en el <i>iDR-Scheme</i>	78
5.5. Ranura exitosa o con identificación en el protocolo distribuido EPC Gen 2 sobre el <i>iDR-Scheme</i>	79
5.6. Configuración de los <i>cluster-heads</i> en la zona de interrogación. Existen dos conjuntos de <i>cluster-heads</i> para calendarizar el reconocimiento de etiquetas identificadas en la consulta actual.	80
5.7. Retardo de identificación para el <i>DR-Scheme</i> con el protocolo EPCGen2DP.	81
5.8. Retardo de identificación para el <i>iDR-Scheme</i> con el protocolo EPCGen2DP.	82
5.9. Retardo de identificación para la versión paralela del <i>iDR-Scheme</i> con el protocolo EPCGen2DP.	83
5.10. Relación potencia-distancia para el modelo FSM.	86
5.11. Relación potencia-distancia para el modelo 2RGR con $h = 1\text{m}$	87
5.12. Relación potencia-distancia para el modelo 2RGR con $h = 2\text{m}$	88
5.13. Rango de cobertura del <i>One-Reader Scheme</i>	88
5.14. Rango de cobertura del <i>L-Scheme</i>	88
5.15. Configuración óptima seis discos.	93
5.16. Configuración óptima ocho discos.	93
5.17. Solución aproximada para el despliegue del <i>MR-Scheme</i> mediante el GA implementado.	94
5.18. Solución aproximada para el despliegue del <i>AL-Scheme</i> mediante el GA implementado.	94
5.19. Configuración del despliegue de los dispositivos para el <i>L-Scheme</i>	94
5.20. Retardo de identificación promedio para el <i>MR-Scheme</i> y el <i>L-Scheme</i>	96
5.21. Retardo de identificación promedio para el <i>AL-Scheme</i> y el <i>SL-Scheme</i>	97
6.1. Agrupación de los mecanismos de identificación de acuerdo a la complejidad inducida para el despliegue de la red.	103

6.2. Agrupación de los mecanismos de identificación de acuerdo a la complejidad para el diseño de protocolos de lectura.	104
6.3. Diagrama de flujo para la selección de un posible mecanismo de identificación adecuado.	105

LISTA DE TABLAS

1.1. Características de los sistemas RFID [2].	3
2.1. Q óptima.	22
3.1. Especificación de los dispositivos seleccionados de la compañía Impinj.	36
3.2. Valores típicos adoptados por el estándar EPC Gen2.	41
4.1. Paquete <i>Query</i> extendido.	45
4.2. Paquete <i>QueryAdjust</i> extendido.	45
5.1. Principales comandos utilizados por el estándar EPC Gen 2.	71
5.2. Especificaciones del mensaje <i>Reply</i>	77
6.1. Características relacionadas a los mecanismos de identificación.	102
6.2. Mecanismos de identificación con área de cobertura limitada.	102
6.3. Mecanismos de identificación con área de cobertura extendida.	103

ACRÓNIMOS

RFID: Identificación por Radiofrecuencia o *Radio Frequency IDentification*

MAC: Control de Acceso al Medio o *Medium Access Control*

SDMA: Acceso Múltiple por División de Espacio o *Space Division Multiple Access*

FDMA: Acceso Múltiple por División de Frecuencia o *Frequency Division Multiple Access*

CDMA: Acceso Múltiple por División de Código o *Code Division Multiple Access*

TDMA: Acceso Múltiple por División de Tiempo o *Time Division Multiple Access*

CSMA: Acceso Múltiple por Detección de Portadora o *Carrier Sense Multiple Access*

PA: Aloha Puro o *Pure ALOHA*

SA: ALOHA Ranurado o *Slotted ALOHA*

FSA: ALOHA Ranurado y Agrupado por Tramas o *Framed Slotted ALOHA*

BFSA: FSA Básico o *Basic Framed Slotted ALOHA*

DFSA: FSA Dinámico o *Dynamic Framed Slotted ALOHA*

TS: División por Árbol o *Tree Splitting*

BTS: TS Básico o *Basic Tree Splitting*

ABTS: TS Binario Adaptativo o *Adaptive Binary Tree Splitting*

QT: Árbol de Consulta o *Query Tree*

ACK: Acuse de recibo o *Acknowledgement*

CI: Ciclo de Identificación o *Identification Cycle*

ID: Identificador Único o *Unique Identifier*

BD: Base de Datos o *Database*

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Con la alta demanda de servicios en tiempo y recursos ha surgido la necesidad de mejorar las diversas tareas realizadas en nuestra sociedad. El rápido desarrollo de nuevas tecnologías de comunicación y la amplia gama de sistemas de información disponibles han dado lugar al desarrollo de sistemas para la automatización de tareas. En particular, la conjunción de los sistemas de cómputo con las redes inalámbricas permiten crear los bien conocidos sistemas de identificación automática o sistemas AutoID. Una de las tecnologías más representativas de este tipo, es la Identificación por Radiofrecuencia o RFID (*Radio Frequency IDentification*). Por su bajo costo de implementación, capacidad de comunicación inalámbrica, escalabilidad y relativamente fácil despliegue, la tecnología RFID es la mejor opción para sistemas de identificación automática, aún frente a tecnologías de muy bajo costo como el código de barras.

Así, RFID es una de las tecnologías más utilizadas en los sectores educativo e industrial, teniendo múltiples aplicaciones que van desde el transporte público y cadenas de suministros, hasta tiendas departamentales.

1.1. Sistema RFID

Un sistema RFID es un sistema de almacenamiento y recuperación de información remoto, que permite asociar un identificador único o ID a cualquier objeto. Está conformado por cuatro elementos: uno o más lectores RFID, un conjunto de etiquetas, un dispositivo de almacenamiento y software integrador de información o *middleware*. La Figura 1.1 presenta los componentes de

un sistema RFID, así como la interacción entre ellos.

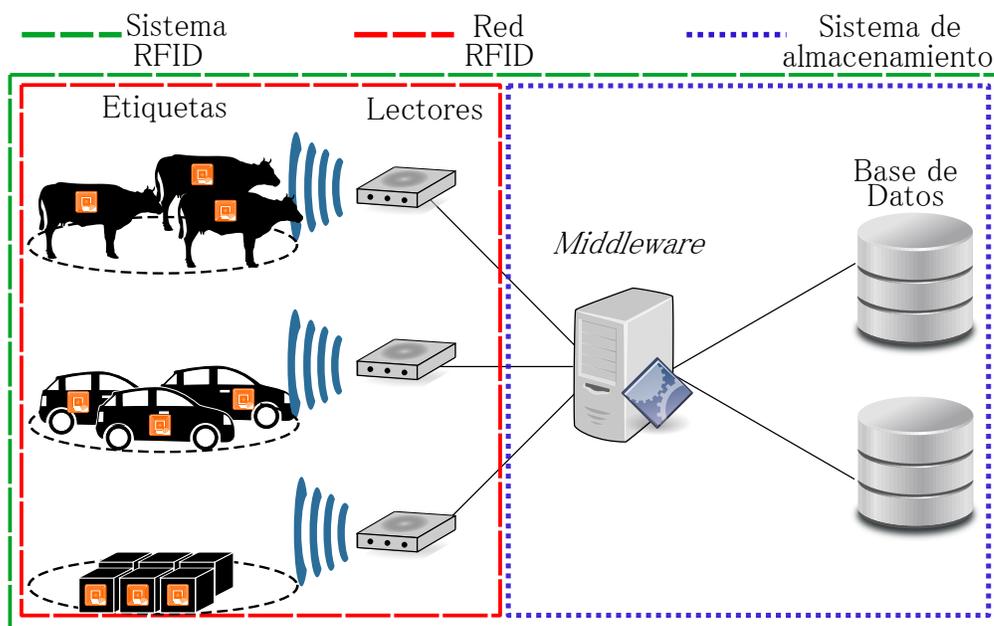


Figura 1.1: Sistema RFID.

Como se puede apreciar en la Figura 1.1, lector(es) y etiquetas conforman una **red RFID**. Esta es la parte principal de este tipo de sistemas, ya que en ella se encuentran los objetos que se desean identificar, junto con toda la información relacionada a este. Esto es, cada objeto tiene información relevante del sistema y se distingue del resto mediante una etiqueta RFID con un ID único. Existen muchos tipos de etiquetas, así como diversas maneras de clasificarlas, pero la más común es con base en la fuente de alimentación utilizada: *activas* y *pasivas*. Las etiquetas activas cuentan con una fuente de alimentación propia, lo que les permite ser dispositivos independientes, y tener capacidades considerables de almacenamiento y procesamiento, mientras que las etiquetas pasivas obtienen su energía a través de las ondas emitidas por el lector, lo que las hace dependientes de este y limita sus capacidades de almacenamiento y procesamiento. Por su parte, el lector se encarga de administrar la información almacenada en las etiquetas que se encuentran en su rango de comunicación, pues puede consultar o modificar la información contenida en cada una de ellas. El lector RFID es un dispositivo típicamente poderoso al ser móvil o estático, por tener una fuente de alimentación limitada o ilimitada, respectivamente.

Por otro lado, en la Figura 1.1, se aprecia que los dispositivos de almacenamiento y el *middleware* conforman un **sistema de almacenamiento**. Este permite almacenar la información de la red, tal como el número de dispositivos, identificadores y tipo de objetos. En este caso,

Rango de frecuencia	< 135 kHz (LF)	13.56 MHz (HF)	860-960 MHz (UHF)	2.45 GHz (Microwave)
Estándares relevantes	ISO 11784 & 11785 ISO/IEC 18000-2 ISO 14223-1	ISO/IEC 18000-3 EPC class-1 ISO 15693 ISO 14443 (A/B)	ISO/IEC 18000-6 EPC class-0, class-1	ISO/IEC 18000-4
Rango de lectura	< 0.5 m	~1 m	~4-5 m	~1 m
Tipo de etiqueta	Acoplamiento pasivo-inductivo	Acoplamiento pasivo-inductivo	Pasiva o activa	Pasiva o activa
Aplicaciones típicas	Control de acceso, etiquetados de animales, inmovilizador de vehículo	Tarjetas inteligentes, control de acceso, ID de pago, etiquetado a nivel de objeto, control de equipaje, bibliotecas, transporte, vestido	Cadena de suministro y etiquetado a nivel de caja, manejo de equipaje, telepeaje	Cobro de peaje electrónico, gestión de la cadena en frío, monitoreo del medio
Tasa de lectura	Baja —————→Alta			
Capacidad de lectura en ambientes difíciles	Mayor —————→Menor			

Tabla 1.1: Características de los sistemas RFID [2].

el *middleware* procesa y filtra la información proveniente de la red, para después dirigirla a los dispositivos de almacenamiento.

Así, en un sistema RFID los lectores recopilan/almacenan información en las etiquetas por instrucción del sistema terminal. En caso de recuperar información, los lectores la pasan al *middleware* para que la procese y la almacene en los dispositivos correspondientes.

Existen diversos factores para clasificar a los sistemas RFID, sin embargo, los más comunes son el tipo de etiqueta utilizada en el sistema y el rango de frecuencia. En este sentido, las características de un sistema RFID varían de acuerdo a las características individuales de cada uno de los dispositivos utilizados en la red. La Tabla 1.1 resume las características principales de los sistemas RFID con base en los posibles rangos de frecuencias: baja frecuencia o LF (*Low Frequency*), alta frecuencia o HF (*High Frequency*), ultra alta frecuencia o UHF (*Ultra High Frequency*) y microondas. Como podemos observar, el rango de cobertura, la tasa y capacidad de lectura varían de acuerdo a la frecuencia utilizada. Una clasificación más general y simple, sería de acuerdo al tipo de etiqueta en el sistema: sistemas RFID pasivos y sistemas RFID activos. Los sistemas RFID pasivos son los más empleados en diversos sectores dentro de nuestra sociedad, que van desde la industria hasta la investigación. Esto se debe principalmente a que son de menor costo de implementación que los sistemas RFID activos y a que las limitaciones de los sistemas RFID pasivos imponen retos más interesantes para la mejora del funcionamiento y el despliegue de la red, respectivamente. En este trabajo nos enfocamos en sistemas RFID pasivos, particularmente

en los sistemas RFID UHF.

1.2. Alcance y limitaciones de los sistemas RFID

Existen dos tipos de restricciones relacionadas a las comunicaciones de los sistemas RFID, y en particular en las redes RFID. Las primeras son restricciones impuestas por el hardware utilizado en los dispositivos de la red. Las segundas son normas impuestas por la sociedad con el fin de hacer un uso eficiente del espectro radioeléctrico. En ese sentido, ambas restricciones están fuertemente ligadas entre sí, ya que factores como la potencia de transmisión, y la ganancia de la antena están en conformidad con las diferentes normas establecidas para esta tecnología alrededor del mundo. Por ejemplo, la Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos establece que la potencia máxima de transmisión de un lector es de 1 W con un EIRP (*Effective Isotropically Radiated Power*) de 4 W [3].

En las redes RFID pasivas, ambas restricciones se centran en el lector, puesto que este inicia y coordina la comunicación con las etiquetas, además de energizarlas. Por lo tanto, las características de un sistema RFID, como el rango de cobertura y la tasa de transmisión, están ligadas a las características específicas del lector y las normas establecidas para esta tecnología.

El rango de cobertura de un sistema RFID, o *zona de interrogación* de un lector RFID, se define como la distancia máxima a la que una etiqueta RFID se puede detectar. Esto significa que la etiqueta debe contar con la energía suficiente para que las señales emitidas por esta sean percibidas por el lector. Para determinar el rango de cobertura de un sistema RFID, es necesario estimar la potencia recibida por una etiqueta, ya que con base en eso, es posible determinar si cuentan con la potencia suficiente para activar su circuito integrado para responder a las solicitudes del lector [4]. La potencia recibida por una etiqueta es una función de las características específicas de la antena del lector, la antena de la etiqueta y el modelo de pérdidas de trayectoria considerado, como lo expresa la Ecuación (1.1) [3].

$$Pr_{\text{tag}} = Pt_{\text{reader}}G_{\text{reader}}G_{\text{tag}}PL(\text{dBm}) \quad (1.1)$$

donde:

Pr_{tag} : potencia recibida por la antena de la etiqueta

Pt_{reader} : potencia transmitida por la antena del lector

G_{reader} : ganancia de la antena del lector

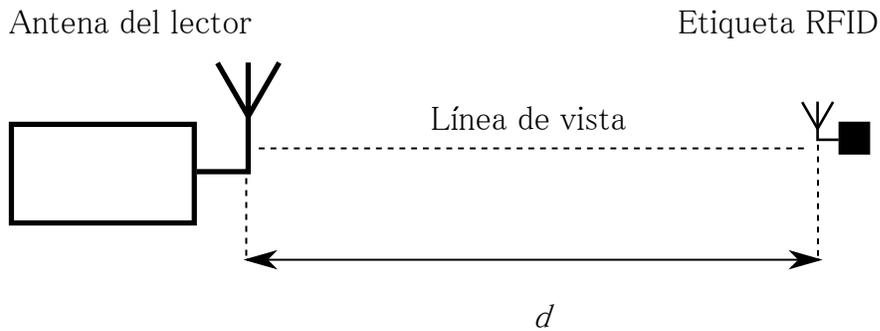


Figura 1.2: *Free space model*.

G_{tag} : ganancia de la antena de la etiqueta

PL : modelo de pérdidas de trayectoria.

Existen muchos modelos para simular las pérdidas de trayectoria en comunicaciones inalámbricas. Los más utilizados para simular y aproximar los rangos de cobertura de todo tipo de dispositivos inalámbricos, y en particular de los sistemas RFID, son los modelos de espacio libre y de dos rayos [3].

El modelo de espacio libre (*free space model* o FSM) permite determinar la pérdida de potencia de una señal. Este considera que existe una línea de visión entre los dispositivos de comunicación y que no existen obstáculos entre ellos que pudieran causar difracción o refracción, como se muestra en la Figura 1.2. La Ecuación (1.2) caracteriza el FSM como una función de la distancia entre los dispositivos comunicantes.

$$PL = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (1.2)$$

con:

λ : longitud de onda

d : distancia entre transmisor y receptor.

Por otro lado, el modelo de dos rayos (*two ray ground reflection model* o 2RGRM) [5] describe las pérdidas de trayectoria cuando la señal recibida está conformada por dos componentes. La primera componente es la señal emitida en la línea de visión entre el transmisor y el receptor, mientras que la segunda se forma por la reflexión de la señal emitida desde el transmisor, tal y como se presenta en la Figura 1.3. La Ecuación (1.3) expresa el 2RGRM como una función de la

altura en la que se encuentran posicionados los dispositivos de comunicación y la distancia entre ellos.

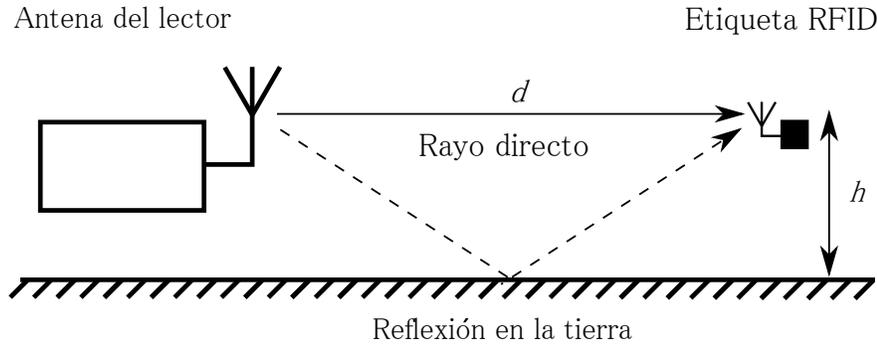


Figura 1.3: *Two-ray ground reflection model.*

$$PL = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left| 1 - \frac{d}{d_1} e^{-jk(d_1-d)} \right|^2, \quad (1.3)$$

con:

$$d_1 = \sqrt{d^2 + (2h)^2}$$

h : altura de la antena

k : número de onda ($2\pi/\lambda$)

j : número complejo.

De esta manera, existen dos opciones para determinar el rango de cobertura de un sistema RFID. La primera consiste en medir la distancia máxima a la que una etiqueta puede ser aún detectada. La segunda consiste en utilizar un modelo específico de pérdida de trayectoria, así como determinar las características particulares de los dispositivos que participan en la red RFID. Para fines prácticos, en este trabajo se modelan todos los sistemas RFID analizados, considerando el último caso.

1.3. Procesos de comunicación fundamentales en sistemas RFID

Existen muchas aplicaciones para la tecnología RFID como se describe en la Tabla 1.1. Dependiendo de la aplicación, una red RFID puede realizar cualquiera de los siguientes procesos

de comunicación fundamentales:

- *Estimación de la cardinalidad de un conjunto de etiquetas.* Se realiza entre un lector o conjunto de lectores y un conjunto de etiquetas en un área de interés. Consiste en aproximar el número de etiquetas presentes en un área determinada. Este se puede realizar de forma independiente o como una fase previa a otros procesos, como el de identificación. En ese sentido, se espera que este proceso sea rápido y que se ejecute continuamente. Se utiliza en aplicaciones no críticas, es decir, en aplicaciones que no requieren conocer el número exacto ni el ID de las etiquetas en la zona de interés para un correcto funcionamiento. Algunas de estas aplicaciones son los contadores de afluencia y el seguimiento de activos.
- *Detección de etiquetas.* Se realiza por un lector o un conjunto de lectores en un área de interés, en el(los) que el lector(es) debe(n) detectar un conjunto de etiquetas como *presentes* o *ausentes*. Para ello, es necesario conocer los IDs de las etiquetas que conforman el conjunto a detectar, lo que indica que este proceso se precede siempre por uno de identificación. La mayoría de aplicaciones que ejecutan este proceso se enfocan en seguridad. Algunos ejemplos de estas son el seguimiento de activos y aplicaciones antirobo.
- *Proceso de lectura/escritura.* Se lleva a cabo entre un lector y una etiqueta que están en rango de comunicación. El objetivo de este es obtener o modificar la información almacenada en la memoria de la etiqueta. En ambos casos, la información está relacionada con el objeto al cual se encuentra adjunta. Para poder llevar a cabo cualquiera de los dos procesos, es necesario conocer *a priori* el ID de la etiqueta. En ese sentido, se espera que ambos se ejecuten lo más rápido posible. Este tipo de procesos se ejecutan en aplicaciones como líneas de producción y manejo de cadena de suministros.
- *Proceso de identificación.* Es el proceso realizado por un lector o grupo de lectores y un conjunto de etiquetas en un área de interés. El o los lectores recolectan los identificadores correspondientes intercambiando mensajes entre ellos. Se realiza en todo sistema RFID al menos una vez; algunas de las aplicaciones más representativas son: manejo de inventarios, cadena de suministros, tareas de conteo y seguimiento de activos.

Sin duda alguna, de todos, **el proceso de identificación** es el más común y relevante, ya que se ejecuta cuando se inicia el sistema RFID o cuando se integran nuevos objetos al mismo. Generalmente es seguido de otros procesos como el de detección de etiquetas y el de lectura/escritura. Es el más relevante debido a que con este se pueden obtener los IDs de cada

etiqueta en una zona de interés. Lo anterior no solo permite identificar de manera única a cada objeto, sino que además permite acceder a mucha más información para manipular, como el número de objetos en la red RFID y la información asociada a cada uno de ellos. Otra razón por la que el proceso de identificación es el más relevante, es porque este involucra factores que afectan el desempeño del sistema RFID en general, tales como el consumo de energía y asignación de recursos. Estos factores se traducen en un problema de optimización, ya que se tienen recursos limitados que se deben utilizar de la manera más eficiente posible. Entonces, el uso de recursos como el ancho de banda, energía y tiempo se debe optimizar para garantizar el funcionamiento eficiente del sistema RFID.

Numerosos trabajos en la literatura han propuesto diversas técnicas para mitigar los problemas asociados al proceso de identificación [6, 7]. No obstante, queda mucho trabajo por hacer, ya que la mayoría se enfocan en mitigar los problemas de colisiones, consumo de energía y asignación de recursos en general a través del diseño de protocolos de comunicación eficientes [6, 8], manteniendo la red RFID intacta. Esto limita su potencial, pues si bien el diseño de protocolos de comunicación eficientes ha demostrado ser una técnica muy eficaz, también es cierto que se ha observado que el desempeño de los sistemas RFID está alcanzando un límite impuesto por las características subyacentes del mismo y, en particular, de las características de la red RFID [9].

En los últimos años, se ha observado una nueva tendencia en los trabajos de investigación para mejorar el rendimiento del proceso de identificación. Dicha tendencia está marcada por un enfoque en el que se busca migrar hacia un esquema de comunicación diferente en la red RFID. Este consiste en distribuir el proceso de identificación dividiendo la zona de interés, lo que puede realizarse introduciendo nuevos dispositivos en la arquitectura de red o variando el rango de cobertura de los dispositivos. En ambos casos, las opciones no se han explorado a profundidad y existe mucho trabajo por hacer en este campo. Adicionalmente, con esta tendencia ha surgido la necesidad de nuevos protocolos que aprovechen las características de estos esquemas de comunicación, derivando una nueva tendencia en el diseño de protocolos distribuidos para redes RFID. Además, resulta interesante determinar cuándo y qué condiciones es conveniente utilizar este nuevo enfoque respecto al tradicional o bien, determinar si es conveniente adoptarlo o no.

En este trabajo, se distinguen dos enfoques para llevar a cabo el proceso de identificación: **centralizado** (o tradicional) y **distribuido** (o nuevo). Cada uno tiene características propias que definen sus cualidades y debilidades, las cuales los hacen más o menos atractivos para su uso en una aplicación. En ese sentido, resaltamos que existe un uso adecuado para cada uno de ellos, que se discute en el Capítulo 6.

Así, en este trabajo se revisan las propuestas más representativas de la literatura, tanto para el enfoque centralizado como para el distribuido. Se analizan una a una y se encuentran los puntos que las debilitan, haciendo énfasis en las áreas de oportunidad. Con base en el análisis realizado, se proponen una serie de mecanismos que permiten reducir el tiempo para realizar el proceso de identificación, es decir, en términos del retardo de identificación. Este parámetro, como medida de desempeño, no sólo permite exhibir la eficiencia de un sistema, sino que además da una medida de desempeño en términos prácticos y tangibles que cualquier persona puede comprender como satisfactoria o no. Los mecanismos propuestos en este trabajo van desde el diseño de protocolos de comunicación eficientes, hasta consideraciones a nivel de hardware. Así, se logra mejorar el proceso de identificación en ambos enfoques con reducciones que van desde 2 % hasta el 50 % dependiendo del enfoque utilizado.

1.4. Problema de investigación

Los sistemas RFID son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones de hoy en día. Sin embargo, existen algunas aplicaciones que no los utilizan debido a que no cumplen con los requerimientos mínimos para su operación o bien no resultan una opción rentable para ellas. Con el surgimiento de nuevos enfoques para realizar el proceso de identificación, se observa una diversidad en cuanto los posibles sistemas RFID disponibles, así como varias oportunidades para el uso de esta tecnología en otras aplicaciones. Hasta ahora, no existe un marco de referencia que permita conocer y comparar los mecanismos de identificación existentes en cada enfoque. Entonces, resulta interesante conocer las características relevantes de cada mecanismo para ofrecer alguna opción de mejora, y para determinar sus ventajas respecto a los otros. De esta manera, se podría determinar qué enfoque cubre mejor o más características de acuerdo a los requerimientos de una aplicación.

1.5. Objetivos

En este trabajo de investigación se plantean los siguientes objetivos.

- **General**

- Diseñar un marco de referencia para los mecanismos de identificación y ofrecer mejoras en los mecanismos de identificación existentes
-

■ **Particulares:**

1. Estudiar y analizar los mecanismos de identificación presentados en la literatura
2. Identificar características principales de cada uno de los mecanismos de identificación
3. Diseñar un protocolo de comunicación eficiente para el enfoque tradicional
4. Diseñar una arquitectura basada en los nuevos enfoques
5. Diseñar protocolos de comunicación eficientes para los nuevos enfoques
6. Diseñar un marco de referencia para identificar el uso conveniente del enfoque tradicional respecto al de los enfoques alternativos.

1.6. Metodología

Para cumplir con los objetivos planteados en este trabajo, se sigue la metodología que a continuación se describe:

1. Identificación de la literatura relacionada a el proceso de identificación.
 2. Identificación y selección de la literatura relacionada a los diferentes mecanismos de identificación.
 3. Estudio y comprensión de cada uno de los mecanismos de identificación presentados en la literatura.
 4. Estudio y comprensión de los factores determinantes del rango de cobertura de un sistema RFID.
 5. Identificación de los nichos de oportunidad en cada mecanismo y generación de propuestas para mejorar el proceso de identificación en estos.
 6. Modelado de sistemas RFID con base en las características generales de los dispositivos participantes.
 7. Desarrollo de escenarios de implementación y comparación para los diversos mecanismos de identificación.
 8. Análisis e integración de resultados.
-

1.7. Lista de contribuciones

A lo largo del desarrollo de esta tesis doctoral se produjeron los siguientes artículos de investigación:

1. En el artículo titulado "*Adding Randomness to the EPC Class1 Gen2 Standard for RFID Networks*" [10], presentado y publicado en la conferencia PIMRC 2012, se aborda el primer mecanismo de identificación propuesto para sistemas RFID pasivos. En este trabajo se identifican las características principales de este tipo de mecanismos. Además, se proponen modificaciones en el protocolo de comunicación utilizado para mejorar la ejecución del proceso de identificación.
 2. En el artículo titulado "*Optimum Power Distance Clustering for the EPC Class-1 Gen2 Standard in RFID Systems*" [9], publicado en la revista IJDSN, se estudia el funcionamiento de uno de los mecanismos de identificación más prometedores. Se identifican las características principales de este y se proponen modificaciones al mismo para mejorar la ejecución del proceso de identificación. Adicionalmente, en ese trabajo se identifica un límite inferior para el retardo de identificación obtenido en este tipo de mecanismos.
 3. En el artículo titulado "*Towards a new paradigm for RFID identification: should we cluster RFID tags or not?*" [11], presentado y publicado en la conferencia WiMob 2013, se estudia el funcionamiento de uno de los primeros mecanismos de identificación distribuidos. Se identifican las características principales de este tipo de mecanismos y se diseña el primer protocolo basado en el estándar para estos. Adicionalmente, se muestra el pobre desempeño exhibido por estos con protocolos estándar.
 4. En el artículo titulado "*An EPC Class-1 Generation-2 anti-collision protocol for RFID tag identification in augmented systems*" [12], presentado y publicado en la conferencia EURFID 2015, se estudia el funcionamiento de uno de los mecanismos de identificación aumentados que proponen un área de cobertura extendida. Se valida la posibilidad de extender el área de cobertura de un sistema RFID y se determina esta. Se identifican las características principales de este tipo de mecanismos y se diseña un protocolo basado en el estándar para estos. Los resultados muestran reducciones considerables en el tiempo de ejecución, lo que demuestra que bajo ciertas condiciones los mecanismos de identificación distribuidos son mejor que los centralizados.
-

5. En el artículo titulado " *Efficient detection of missing tags for passive RFID systems* " [13], publicado en la revista IJCS, es el resultado de un trabajo relacionado a uno de los procesos realizados por una red RFID. En este se identifican las principales líneas de trabajo en el contexto de detección de objetos perdidos para mecanismos centralizados. Se propone un protocolo que mejora a los existentes y se definen las características necesarias para mejorar este tipo de procesos en los mecanismos distribuidos.

1.8. Estructura de la tesis

Este trabajo se organiza como sigue. En el Capítulo 2 se revisa el estado del arte relacionado a los mecanismos de identificación. En el Capítulo 3 se realiza un breve estudio relacionado al modelado de sistemas RFID y a las características de los dispositivos participantes en una red. En ese mismo capítulo, se determina el rango de cobertura de un sistema tradicional y se describe el modelo utilizado para cada evaluación realizada en este trabajo. Se detallan las consideraciones tomadas en cuenta en este trabajo, tales como la distribución y número de etiquetas en el área de interés. Posteriormente, en el Capítulo 4 se analizan cada uno de los mecanismos del enfoque centralizado y se proponen mejoras para cada mecanismo analizado. En el Capítulo 5 se analizan cada uno de los mecanismos del enfoque distribuido y se proponen mejoras para cada mecanismo analizado. Además, en ese capítulo se propone un mecanismo de identificación alternativo basado en uno existente. Todas las propuestas realizadas se evalúan junto con el trabajo relacionado en términos del retardo de identificación y se presentan los resultados en los capítulos correspondientes. Posteriormente, en el Capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos, en los que se resumen las fortalezas y debilidades de cada mecanismo de identificación evaluado. Finalmente, en el Capítulo 7 se concluye este trabajo junto con las perspectivas de investigación generadas a partir de este trabajo.

CAPÍTULO 2

TRABAJO RELACIONADO

Originalmente, las redes RFID pasivas fueron concebidas con un enfoque centralizado. Esto se debe a que el lector realiza las funciones de transmisión y recepción de información. Por lo tanto, la comunicación en este tipo de redes se centra en dicho dispositivo y además es secuencial, ya que este inicia y finaliza el proceso de comunicación, obtiene información del estado de la red para aprovechar al máximo los recursos en esta y energiza a las etiquetas.

En trabajos recientes, se ha propuesto mejorar el proceso de identificación realizándolo de manera distribuida. Para ello, en esos trabajos se plantea la idea de introducir un nuevo elemento en la arquitectura de red RFID cuya función principal es la recepción de las respuestas de las etiquetas. De esta manera, se separan las funciones de envío y recepción del lector en dispositivos independientes distanciados uno del otro.

En este trabajo se analizan los dos enfoques existentes para realizar un proceso de identificación: centralizado y distribuido. En el primero únicamente existe un lector en el área de interés y un conjunto de etiquetas a identificar; en este caso, el lector es el único responsable de ejecutar el proceso de identificación. Esto significa que el lector es la fuente de energía y consultas para las etiquetas, así como el destino de las respuestas emitidas por estas. En el enfoque distribuido existe más de un lector en el área de interés, o bien, existe más de un dispositivo dedicado a recolectar las respuestas emitidas por las etiquetas; en este caso, hay uno o más dispositivos que funcionan como fuentes de energía y consultas, y al mismo tiempo hay más de un dispositivo que opera como receptor de las respuestas emitidas por las etiquetas. Así, se observa que pueden existir distintas formas para llevar a cabo el proceso de identificación en

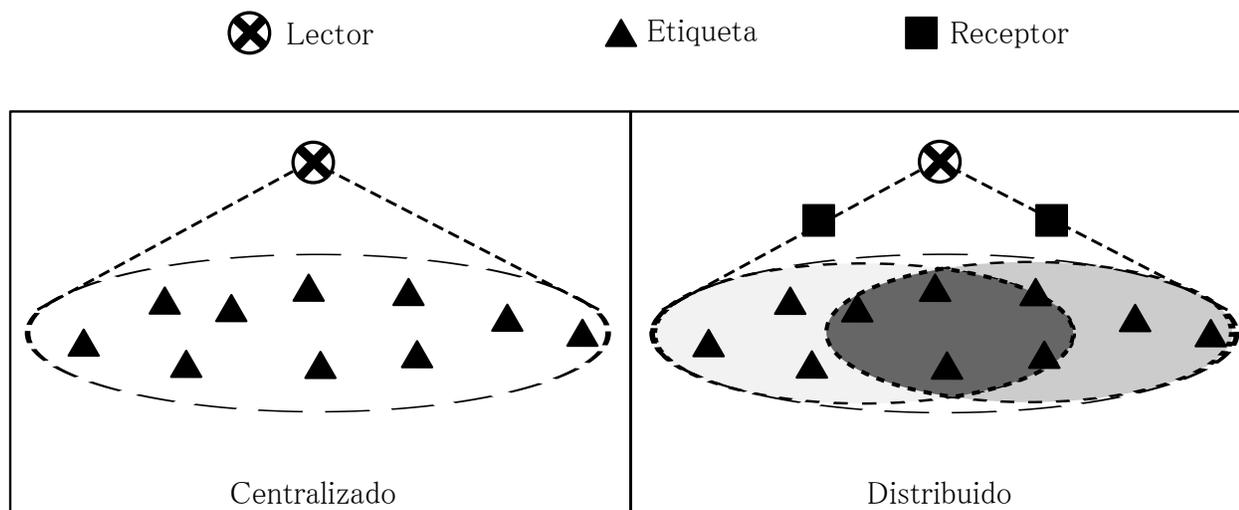


Figura 2.1: Enfoque centralizado y enfoque distribuido. Una característica evidente del enfoque distribuido es que siempre hay más de una zona de interrogación.

ambos enfoques. A cada una de esas maneras las denominamos **mecanismo de identificación** y las clasificamos en dos categorías con base en los enfoques descritos. La Figura 2.1 muestra una representación de dichos enfoques. Es evidente que el esquema centralizado tiene un menor rango de cobertura que algunos esquemas distribuidos. Esto se debe a que con el uso de múltiples transmisores se puede cubrir un área de cualquier tamaño.

Por el momento no existe una clasificación de los mecanismos de identificación actuales. Esta permitiría ubicar de manera adecuada el contexto en el que un mecanismo de identificación es más apto que otro. En este trabajo se propone una taxonomía para los mecanismos de identificación existentes, la cual se muestra en la Figura 2.2 y se basa en los dos enfoques aquí identificados. Como se puede observar, la taxonomía propuesta clasifica los mecanismos de identificación con base en el enfoque utilizado; es decir, si el enfoque es centralizado o distribuido. El centralizado se basa en el esquema de un lector (*One-Reader Scheme*) que tiene un área de cobertura limitada. Esto implica que hay una zona de interrogación por lector en el área de interés, por lo que si se requiriera, un lector podría cubrir un área grande este fuera móvil. Por otro lado, el enfoque distribuido se basa en el esquema multilector (*Multi-Reader scheme*) o en el esquema de un sistema RFID aumentado (*Augmented RFID system scheme*). El primero consiste en un conjunto de lectores que operan de manera conjunta para realizar un proceso de identificación en un área determinada. Se puede considerar que este es una versión extendida del esquema de un lector. En este caso, se pueden usar tantos lectores como sean necesarios para garantizar la cobertura total del área de interés. El segundo es una versión extendida de un sistema RFID tradicional, en el que

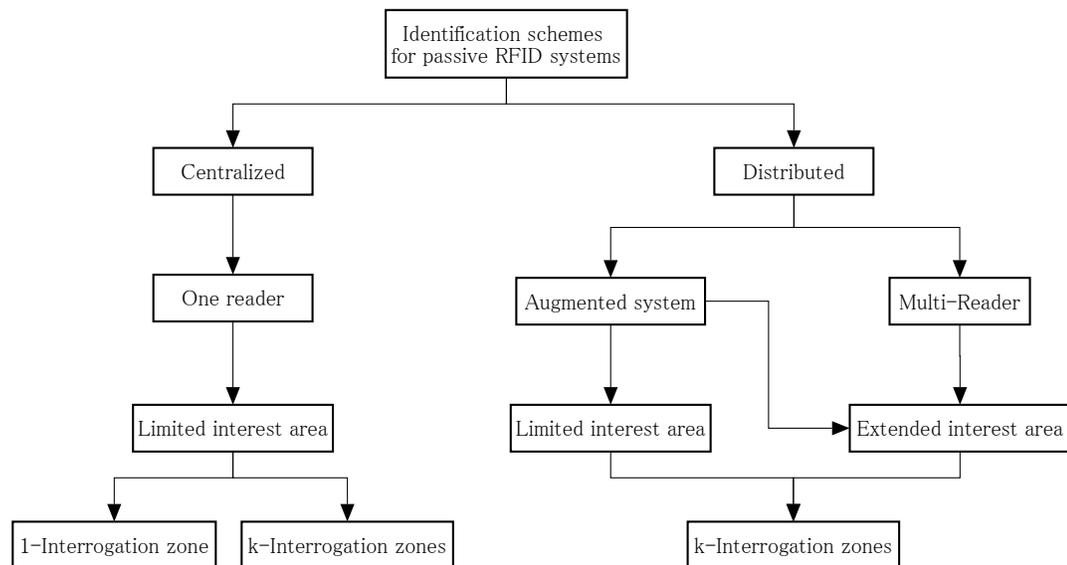


Figura 2.2: Taxonomía de los mecanismos de identificación para sistemas RFID pasivos.

se incluye un nuevo dispositivo en la arquitectura (ver Sección 5.1 y 5.2); en este caso, el área de cobertura de este tipo de mecanismos puede ser limitada por los alcances de la misma tecnología, como en el caso del esquema de un lector, o bien puede ser extendida hasta los límites permitidos por la tecnología y las normas que la regulan en diferentes países.

A continuación, se presenta una revisión de los mecanismos de identificación existentes en la literatura, que se basa en la taxonomía propuesta en este trabajo.

2.1. Enfoque centralizado

Este enfoque considera solamente la participación de un lector y un conjunto de etiquetas en la red RFID. Entonces, el proceso de identificación se lleva a cabo por el único lector en la red. El área de cobertura de este tipo de mecanismos de identificación está limitada por las características físicas de los dispositivos en la red, que se encuentran en conformidad con las normas establecidas alrededor del mundo. Entonces, se puede notar que una de las características principales de este tipo de mecanismos de identificación es el área de cobertura limitada, como se discute en la sección 1.2.

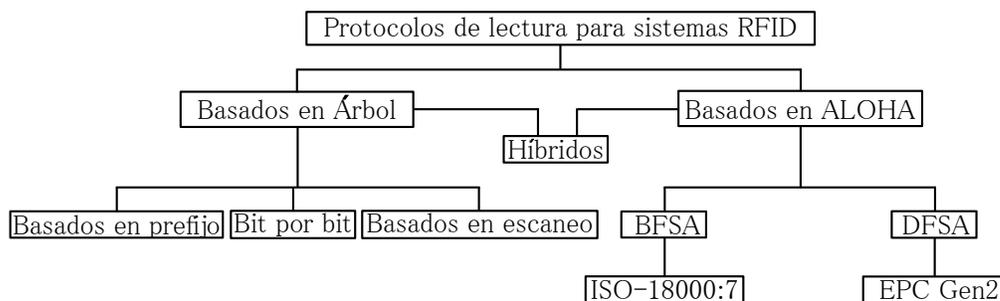


Figura 2.3: Protocolos de lectura para ambientes RFID pasivos.

2.1.1. Un lector - área de cobertura limitada - una zona de interrogación

El mecanismo de identificación que considera un lector, área de cobertura limitada y una zona de interrogación (*One Reader with Limited Coverage Area and One Interrogation Zone* o 1R-LCA-1IZ) es el primer mecanismo de identificación para sistemas RFID. El 1R-LCA-1IZ surge prácticamente con la creación de los sistemas RFID. En este, el único lector en la red interroga a las etiquetas en su zona de cobertura, que se define como el área en la que las señales emitidas por el lector aún son válidas para las etiquetas.

Si bien los dispositivos son capaces de establecer comunicación entre ellos, esto no es suficiente para garantizar la ejecución de un proceso de identificación *per se*. Entonces, los mecanismos de identificación se valen de protocolos de lectura para ejecutar dicho proceso, los cuales especifican las condiciones necesarias para la comunicación.

Protocolos de lectura para el mecanismo 1R-LCA-1IZ

Puesto que el esquema basado en un lector es el más estudiado en la literatura, existen múltiples propuestas de protocolos de lectura para este mecanismo de identificación. Como resultado, hoy en día se tienen estándares para regular la comunicación y el uso de este mecanismo de identificación. Una taxonomía de estos protocolos se muestra en la Figura 2.3.

Como se puede apreciar en la Figura 2.3, existen tres tipos de protocolos de lectura para el mecanismo de identificación de un lector:

Protocolos basados en ALOHA. Son una adaptación del bien conocido protocolo ALOHA, que fue originalmente pensado para redes cableadas [14]. Hoy en día existen muchas variantes de este para redes RFID, siendo las más eficientes las basadas en ALOHA ranurado agrupado por tramas (*Framed Slotted ALOHA* o FSA). Los protocolos FSA

son probabilísticos y consideran que el tiempo es ranurado y agrupado por tramas. Estos necesitan ejecutar varias rondas de interrogación o ciclos de identificación (CI). Un CI está formado de una trama con s ranuras. Existen dos versiones del protocolo FSA: FSA Básico (BFSA) y FSA Dinámico (DFSA). En BFSA, el tamaño de la trama no cambia durante todo el proceso de identificación, mientras que en DFSA sí. Las propuestas más relevantes de protocolos de lectura para redes RFID están basadas en una variante de FSA. Incluso los estándares existentes para sistemas RFID, el EPC Class 1 Generation 2 (EPC Gen2) e ISO-18000-7, están basados en una versión de DFSA y BFSA, respectivamente.

Protocolos basados en árbol. Son protocolos deterministas y difieren de los basados en ALOHA en que estos garantizan la identificación de cada etiqueta en la zona de interrogación con una sola ronda de identificación. Originalmente, estos protocolos fueron diseñados para control de acceso múltiple en sistemas inalámbricos [6]. Estos requieren que las etiquetas cuenten con algunas características específicas, tales como la de "silencio", que permite que estas dejen de participar en el proceso de identificación actual. La idea principal es dividir el conjunto de etiquetas en tantos subconjuntos como sea posible. Existen tres tipos de protocolos basados en árbol: basados en prefijo, bit por bit y basados en monitorización. Los primeros utilizan el prefijo del ID para ejecutar el proceso de identificación. El prefijo se incrementa y se transmite hasta que solamente una etiqueta responda. Los protocolos de bit por bit resuelven el problema de colisiones verificando bit a bit el ID recibido. Este tipo de protocolos generalmente utiliza punteros para indicar el bit colisionante actual, que puede moverse a través del ID de las etiquetas desde el bit más significativo hasta el bit menos significativo. Finalmente, los protocolos basados en monitorización aprovechan el tipo de codificación utilizada en la transmisión para identificar las posiciones de los bits colisionantes.

Protocolos híbridos. Este tipo de protocolos combinan las características de los protocolos basados en árbol y los basados en ALOHA. Por un lado, esta combinación hace que los protocolos híbridos sean más eficientes, mientras que por otro los hace más complejos y caros de implementar.

Discusión

Existen múltiples protocolos de lectura para el mecanismo 1R-LCA-1IZ. Los más relevantes están basados en ALOHA. Esto es porque este tipo de protocolos ha mostrado tener un buen desempeño dadas las limitaciones impuestas por dicha tecnología. Más aún, los estándares para

sistemas RFID pasivos y activos, EPC Gen2 e ISO-18000-7, usan una versión modificada del protocolo FSA.

Por otro lado, aunque los protocolos basados en árbol son más fáciles de implementar, los basados en ALOHA se prefieren sobre los de árbol ya que los primeros no dependen de características específicas de las etiquetas, como el ID de las mismas, ni de las características específicas del canal de comunicación, como el tipo de codificación [15]. De igual manera, aún cuando los protocolos de árbol son deterministas y garantizan identificar todo un conjunto de etiquetas con una ronda de identificación, generalmente los protocolos ALOHA han demostrado ser más rápidos que los basados en árbol [6]. Así, estos últimos son un referente para el diseño de nuevos protocolos de lectura para redes RFID.

Finalmente, ya que este trabajo se centra en el estudio de ambientes RFID pasivos, en secciones subsecuentes se abordarán las propuestas de protocolos de lectura más relevantes para redes RFID pasivas.

Estándar *EPC Class 1 Generation 2*

El estándar *EPC Class 1 Generation 2* también conocido como estándar EPC Gen2, es el protocolo estandarizado que define los requerimientos físicos y lógicos para la comunicación en sistemas RFID pasivos que operan en UHF [16]. EPC Gen2 usa una versión modificada de DFSA conocida como protocolo Q .

En DFSA las ranuras se agrupan en tramas. Una *ranura* se define como un intervalo de tiempo en el que una etiqueta puede transmitir información al lector, tal como su ID u otra información específica [17]. Una *trama* es el tiempo transcurrido entre solicitudes del lector. Cada trama comprende un determinado número de ranuras. En DFSA dicho número varía de acuerdo al número de etiquetas por identificar. Un ciclo de identificación o CI está conformado por una trama.

EPC Gen2 opera usando el esquema de un lector y n etiquetas. El proceso de identificación comienza cuando el lector envía un paquete de señalización que indica a las etiquetas el inicio de un nuevo proceso de identificación. Las etiquetas responden al comando y producen una colisión. Al detectarla, el lector inicia un nuevo CI enviando un paquete *Query*. Este paquete contiene el parámetro Q , con $(Q \in [0, \dots, 15])$, que indica que el tamaño de la trama actual es de $N = 2^Q$ ranuras de tiempo. Al recibir el paquete *Query*, cada una de las etiquetas selecciona una ranura s en el intervalo $[0, 2^Q - 1]$ para transmitir su ID. La selección de la ranura se realiza siguiendo una distribución uniforme. Dentro de la trama, el inicio de cada ranura subsecuente a la primera ranura de tiempo lo controla el lector enviando un paquete *QueryRep*. Por otro lado, las etiquetas

utilizan el valor de s como un contador, que se decrementa por cada paquete *QueryRep* recibido. Cuando el valor de s es igual a 0 en alguna etiqueta, esta transmitirá un paquete con un número aleatorio de 16 bits conocido como *RN16*. Dicha transmisión producirá uno de los siguientes casos:

- Si c etiquetas eligen la ranura actual, con $c \geq 2$, esta es una *ranura colisionante*, c_c . El lector detecta la colisión y envía un paquete *QueryRep* para indicar el inicio de una nueva ranura de tiempo. Por su parte, las etiquetas involucradas en la colisión actualizan su contador $s = 2^Q - 1$.
- Si solamente una etiqueta elige la ranura actual, la ranura de tiempo es una *ranura exitosa*, c_1 . El lector detecta una única respuesta que puede decodificar exitosamente y responde con un paquete *ACK*, que contiene el *RN16* de la etiqueta que transmitió exitosamente. A su vez, la etiqueta responde a este con un paquete *Data* que contiene su *Electronic Product Code* o *EPC*. Finalmente, el lector continúa el proceso de identificación al enviar un paquete *QueryRep*.
- Si ninguna etiqueta seleccionó la ranura actual, esta resulta en una *ranura vacía*, c_0 . El lector no detecta ninguna respuesta en un lapso de tiempo y continúa con el proceso enviando un paquete *QueryRep*.

Este proceso se repite ranura por ranura hasta el final de la trama. Cuando este se alcanza, el lector determina el valor del parámetro Q basado en el número de ranuras vacías, exitosas y colisionantes que sucedieron en la trama actual. Posteriormente, el lector determina el tamaño de la trama para el siguiente CI con el valor actual de Q . Finalmente, el lector inicia un nuevo CI enviando un paquete *QueryAdjust*, que contiene el valor actual de Q . El proceso continúa hasta que se identifican todas las etiquetas, es decir, hasta que no se tiene respuesta en ninguna ranura de la trama. La Figura 2.4 ilustra el proceso que se acaba de describir.

El proceso utilizado por el estándar EPC Gen2 para actualizar el valor de Q se conoce como Algoritmo Q . El diagrama de flujo correspondiente se muestra en la Figura 2.5. Este actualiza el valor de Q por cada ranura vacía y colisionante. En este caso, el estándar propone utilizar una constante $C \in (0.1, \dots, 0.5)$ para controlar el mecanismo de adaptación de trama. No obstante, el estándar no indica cómo elegir el valor de C , sólo sugiere sumar o restar valores pequeños de C cuando Q es grande y valores grandes cuando Q es pequeña (ver Figura 2.5). Esto último hace muy ambigua la implementación del estándar y merma el desempeño del mismo.

Varios trabajos proponen modificaciones en el EPC Gen2 para mejorar su desempeño temporal y el uso de recursos con el mismo. Algunos de esos trabajos sugieren modificaciones al mecanismo

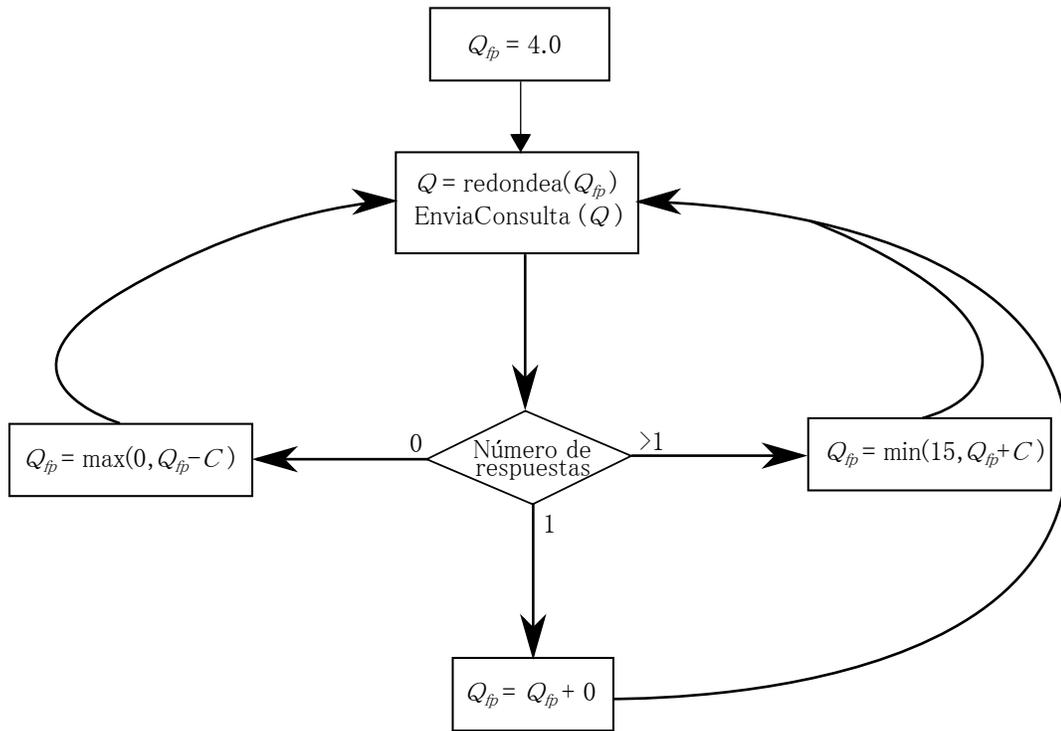


Figura 2.5: Algoritmo Q : Mecanismo para adaptar el tamaño de trama utilizado por el EPC Gen2.

el mismo principio de particionamiento: la potencia recibida por las etiquetas. Las propuestas son *Power Distance Clustering* (PDC) [1] y *ALOHA with Interference Cancellation and Tag Set Partitioning* (AICTSP) [15].

Por un lado, en el esquema PDC [1] se varía el rango de cobertura del lector modificando la potencia transmitida por la antena del lector. La idea principal es aumentar gradualmente la zona de interrogación del lector desde una distancia inicial hasta alcanzar su máxima área de cobertura. Así, el lector inicia el proceso identificando las etiquetas en la primera subzona de interrogación usando un protocolo de lectura. Cuando termina el proceso de identificación en la subzona de interrogación actual, las etiquetas presentes en la misma se ponen en estado de inactividad, de tal forma que ya no participan en procesos de identificación. Después de eso, el lector aumenta su rango de cobertura y repite el proceso. El objetivo es reducir el número de etiquetas participantes al mismo tiempo, como se muestra en la Figura 2.6. Se puede observar que la zona de interrogación se divide en grupos o subzonas de interrogación s_1 , s'_2 , y s''_k con distancias de cobertura d , d' , y d'' , respectivamente. Un parámetro clave para el esquema PDC es la distancia o “paso” a la cual se encuentran separadas las subzonas d . Dicho valor determina

Tabla 2.1: Q óptima.

Valor de Q	n
0	$n = 1$
1	$1 < n \leq 3$
2	$3 < n \leq 6$
3	$6 < n \leq 11$
4	$11 < n \leq 22$
5	$22 < n \leq 44$
6	$44 < n \leq 89$
7	$89 < n \leq 177$
8	$177 < n \leq 355$
9	$355 < n \leq 710$
10	$710 < n \leq 1420$
11	$1420 < n \leq 2839$
12	$2839 < n \leq 5678$
13	$5678 < n \leq 11357$
14	$11357 < n \leq 22713$
15	$n > 22713$

el número de subzonas de interrogación en el rango de cobertura de un lector. Por lo tanto, es común utilizar valores pequeños de d para ambientes densos y valores grandes para ambientes dispersos.

La Figura 2.7 resume el funcionamiento del esquema PDC. Como se puede observar, este mecanismo es independiente de los protocolos de lectura, por lo que se puede utilizar con protocolos basados en ALOHA, en árbol o híbridos.

Por otro lado, en el esquema AICTSP el número etiquetas se divide con base en el nivel de potencia que estas reciben. Para ello, las etiquetas utilizan este valor de potencia y un umbral indicado por el lector. Una vez que las etiquetas se agrupan de acuerdo al nivel de potencia recibida, estas se reagrupan en particiones. Entonces, dos grupos de etiquetas que pertenecen a una misma partición pueden estar lo suficientemente lejos una de la otra, como para retrodispersar diferentes intensidades de potencia. El proceso de identificación se realiza de manera secuencial, seleccionando una partición a la vez. Entonces, con el uso de técnicas de espectro expandido, el lector puede decodificar las señales emitidas simultáneamente por etiquetas que están en distintas particiones. Así, con el uso de técnicas de acceso múltiple por división de código (CDMA) y particionamiento basado en el nivel de la potencia recibida, el lector puede identificar etiquetas incluso en casos de colisión. La Figura 2.8 muestra el método de particionamiento de etiquetas

▲ Etiquetas en la subzona 1 ▲ Etiquetas en la subzona 3
▲ Etiquetas en la subzona 2 ▲ Etiquetas en la subzona 4

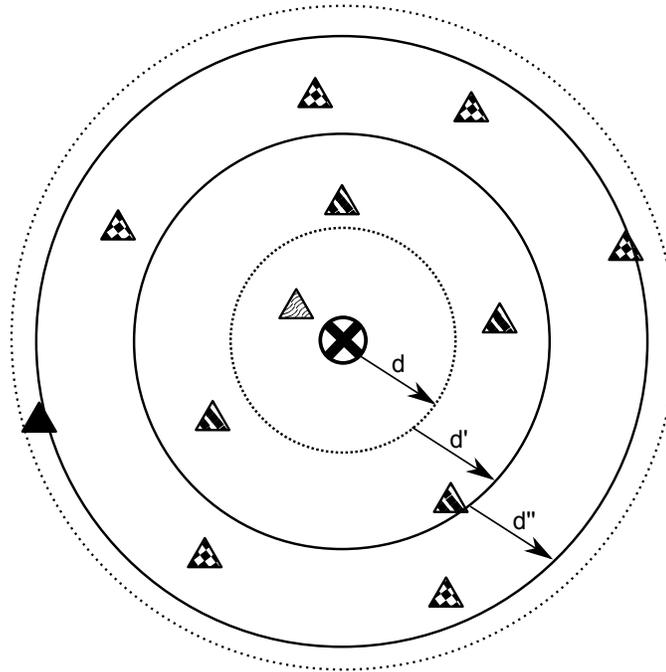


Figura 2.6: *Power Distance Clustering Scheme*.

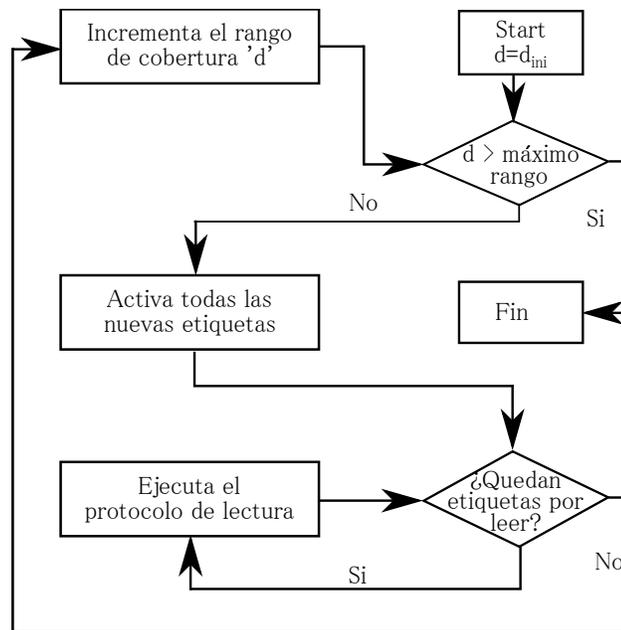


Figura 2.7: Diagrama de flujo del *PDC Scheme* basado en [1].

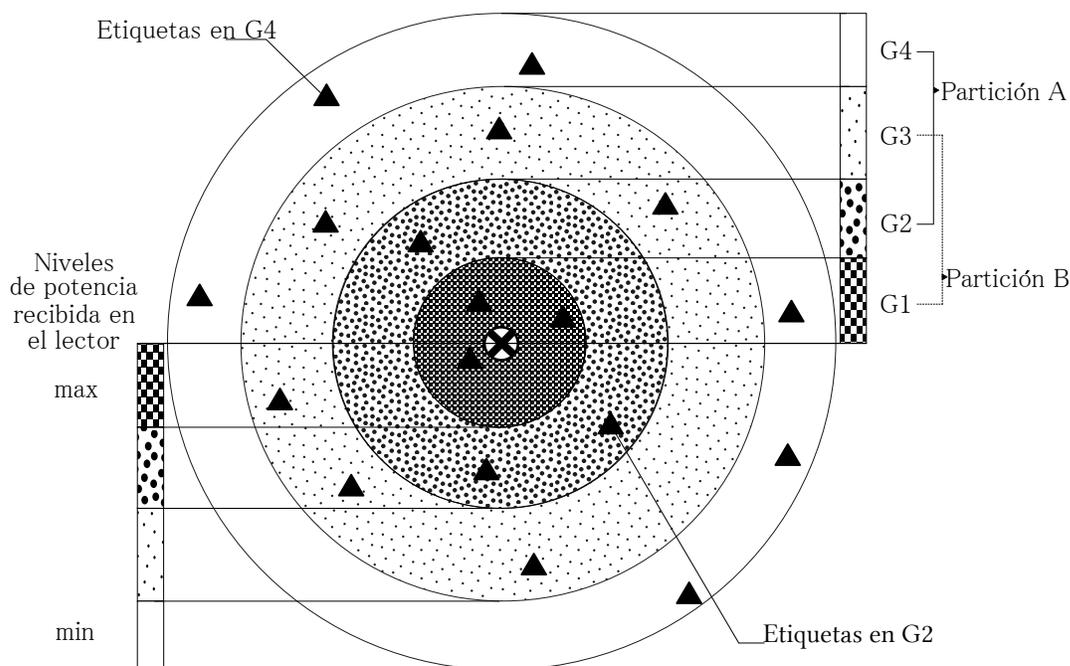


Figura 2.8: Esquema de particionamiento del *AICTSP Scheme*.

utilizado por el esquema AICTSP, el cual genera varias subzonas de interrogación en el área de cobertura del lector.

Protocolos de lectura para 1R-LCA-kIZ

Como se mencionó anteriormente, el esquema PDC es independiente del protocolo de lectura. En la literatura, se ha encontrado que los protocolos basados en árbol son los más utilizados en el esquema PDC [20], dejando de lado a los protocolos ALOHA. Esto se debe en gran medida a que los protocolos basados en árbol tienen características que facilitan su optimización en el esquema PDC [1, 20].

Respecto al esquema AICTSP, en [15] se propone un protocolo de lectura para este esquema, que se conoce como el protocolo *Spread Partial-Q Slot Count*. Este se basa en el estándar y está diseñado para operar con técnicas de espectro expandido para CDMA.

Discusión

Existen diversas técnicas que permiten mejorar la eficiencia de un mecanismo de identificación. Estas van desde mejorar el funcionamiento del hardware hasta maximizar el desempeño de los protocolos de comunicación.

Una de las técnicas más novedosas y atractivas que ha surgido en años recientes, es la de dividir una zona de interrogación en k -subzonas. Esto permite que el proceso de identificación se realice por partes de manera secuencial, lo que resulta muy atractivo para sistemas RFID densos. Sin embargo, el particionamiento de una zona de interrogación no es una tarea fácil, ya que este determina el número de subzonas de interrogación, así como el número de etiquetas en cada una de ellas. Esto implica que el esquema de particionamiento de la zona de interrogación debería considerar la distribución de las etiquetas si desea mejorar el desempeño del proceso de identificación.

Respecto a los protocolos de lectura para este mecanismo de identificación, se encontraron solo un par de trabajos relacionados en la literatura [20, 15]. En el caso particular del PDC, cualquier protocolo de lectura puede implementarse, siendo los protocolos basados en árbol los más utilizados. Esto se debe a que sus características facilitan su ejecución y optimización.

2.2. Enfoque distribuido

Este enfoque sugiere distribuir el proceso de identificación a lo largo de un área de interés. Dependiendo del esquema, varios dispositivos son necesarios para cubrir dicha área. Existen dos principales mecanismos de identificación en esta categoría: los sistemas RFID aumentados (*augmented RFID systems*) y el esquema multilector (*Multi-Reader scheme*).

2.2.1. Sistemas RFID aumentados

Los sistemas RFID aumentados, consideran un dispositivo adicional en la arquitectura de red RFID. La función principal del mismo es recolectar la información transmitida por las etiquetas. La idea es separar las funciones de transmisión y recepción de información del lector en dos dispositivos espacialmente separados. Esto implica que más de un dispositivo receptor se debe desplegar en la zona de interés para garantizar su cobertura total. Así, en este tipo de mecanismos de identificación existe un solo lector/transmisor, dos o más receptores y un conjunto de etiquetas en un área de interés, la cual puede ser limitada o extendida de acuerdo a las características de la tecnología utilizada, como se discute en la sección 1.2.

a) Sistemas RFID aumentados - Área de cobertura limitada - k zonas de interrogación

El mecanismo de identificación que considera un sistema RFID aumentado, área de cobertura limitada y k zonas de interrogación (*Augmented RFID System with Limited Coverage Area and*

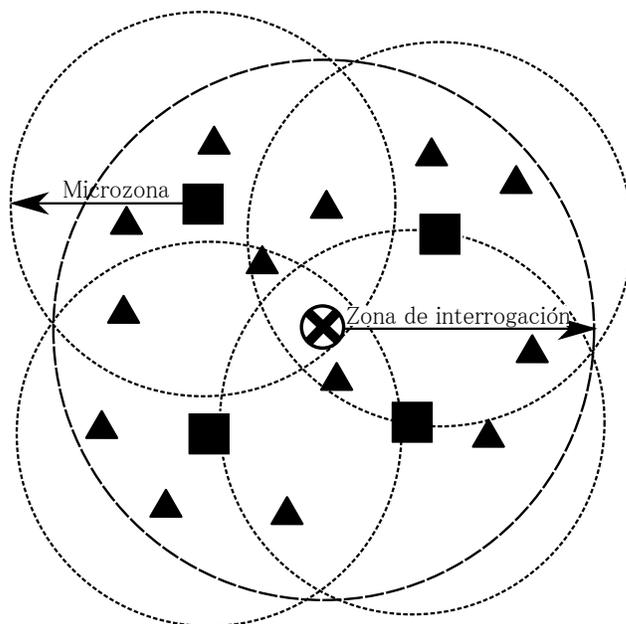


Figura 2.9: Enfoque de recepción distribuida.

k : *Interrogation Zones* o AS-LCA-kIZ) es uno de los más recientes presentados en la literatura. Este considera el mismo rango de cobertura que el 1R-LCA-1Z. La diferencia radica en que en el AS-LCA-kIZ se tienen varias subzonas en el rango de cobertura y más de un dispositivo receptor dentro de dicho rango.

En [21], se presenta el trabajo titulado *Distributed receiving in RFID systems*, que considera un sistema RFID aumentado con área de cobertura limitada. En la propuesta llamada *DR-Scheme*, los autores plantean modificar el paradigma centralizado de las redes RFID incluyendo un nuevo componente en esta llamado *fielder* o *cluster-head*. Dicho dispositivo tiene dos funciones principales: ajustar el coeficiente de reflectividad de las etiquetas y funcionar como intermediario entre estas y el lector. La primera función permite crear microzonas virtuales o grupos, porque limita el rango de alcance de las etiquetas. Por un lado, esto permite reducir las colisiones en toda el área de cobertura, ya que las producidas son intra-zona, mientras que por otro aumenta la complejidad de despliegue de la red. Lo último se debe a que crece el número de dispositivos en la misma y a que se desea garantizar una cobertura total del área de interés. La segunda función permite reducir la carga de trabajo en el lector, puesto que ahora este recibirá información únicamente de los *cluster-heads*, quienes a su vez son los encargados de recibir y procesar la información transmitida por las etiquetas. La Figura 2.9 describe el esquema de recepción distribuida.

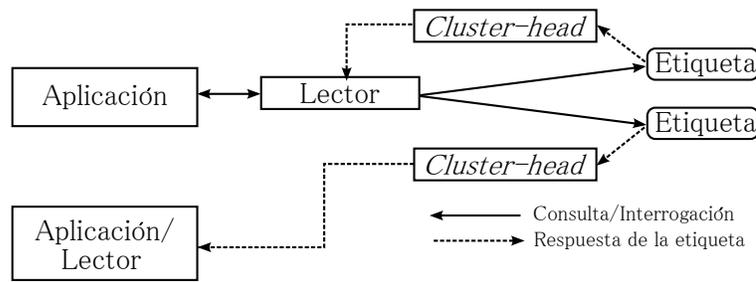


Figura 2.10: Esquema de comunicación utilizado por el *DR-Scheme*.

Los *cluster-heads* son dispositivos con características similares a las de los nodos de una red de sensores, esto es, son dispositivos con recursos limitados que deben hacer uso eficiente de los mismos, tales como el ancho de banda y la energía. Adicionalmente, los *cluster-heads* pueden estar conectados con el lector con un enlace de alta velocidad o por medio de algún tipo de tecnología inalámbrica como ZigBee [22], eliminando así el esquema maestro-esclavo, como se muestra en la Figura 2.10. Las solicitudes de información, las ondas energizantes y las respuestas de las etiquetas se transmiten por un canal, mientras que las retransmisiones de estas últimas se hacen por un canal diferente.

Como se observa, el uso de *cluster-heads* en el área de cobertura de un lector permite identificaciones de más de una etiqueta a la vez, lo que mejora la tasa de lectura o *reading throughput* y al mismo tiempo aumenta la complejidad del diseño de protocolos de comunicación. Esto se debe a que se necesita una alta coordinación entre los dispositivos de la red para poder realizar el proceso de identificación de forma exitosa.

Protocolos de lectura para sistemas RFID aumentados con área de cobertura limitada y k zonas de interrogación

Existen solamente dos protocolos de lectura para el *DR-Scheme* que son: *Binary Search Algorithm adapted for DR-Scheme* y *EPC Gen2*.

Binary Search Algorithm for Distributed Receiving. En [21], se propone adaptar el protocolo *Binary Search Algorithm* o BSA al *DR-Scheme*. BSA es un protocolo de control bit a bit que depende del ID de las etiquetas [23]. Dada la naturaleza distribuida del *DR-Scheme*, es necesario adaptar BSA para aprovechar las ventajas del *DR-Scheme*. El resultado es BSA-DR que se puede ejecutar en paralelo de acuerdo al *DR-Scheme*, por lo que el lector mantiene una instancia independiente del protocolo por cada microzona. Además, el lector mantiene una pila por cada microzona en la que almacena las consultas a realizar en cada una de ellas. Así, el

protocolo inicia con el lector enviando un mensaje *REQA* a todas las etiquetas que se encuentran en su rango de cobertura. Posteriormente, las etiquetas responden a dicho mensaje con su ID, lo que produce uno de los siguientes casos en los *cluster-heads*:

Sin respuesta o identificación exitosa. Si el k -ésimo *cluster-head* no detecta respuesta o detecta una sola al mensaje *REQA*, este envía un mensaje para indicar el resultado de la consulta actual. En cualquier caso, el lector extrae el elemento superior de la pila correspondiente y lo transmite a las etiquetas del k -ésimo *cluster*.

Colisión. Cuando una colisión ocurre en el k -ésimo *cluster-head*, este la reporta al lector con un mensaje. A su vez, el lector genera dos nuevos mensajes de consulta *REQA* usando el bit colisionante más significativo (MSCB). El primer *REQA* se genera poniendo el MSCB a 0 seguido de una cadena de unos. Este mensaje se utiliza en el CI subsecuente. El segundo *REQA* se genera poniendo el MSCB a 1 seguido de una cadena de unos. Este mensaje se guarda en la pila asociada al k -ésimo *cluster*.

El proceso se repite hasta que todas las pilas estén vacías y hasta que los *cluster-heads* ya no detecten ninguna respuesta. En este último caso, si el k -ésimo *cluster-head* no detecta ninguna respuesta y no hay más consultas por transmitir a dicho grupo, entonces el lector pone el k -ésimo *cluster-head* en estado inactivo por el resto del proceso de identificación. Después de eso el lector continúa el proceso de identificación con la transmisión de los mensajes *REQA* para los *cluster-heads* activos, repitiendo el proceso descrito hasta que todos los *cluster-heads* estén en estado inactivo.

EPC Class-1 Gen2 protocol adapted to the DR-Scheme. En [24], se plantea un protocolo de lectura basado en ALOHA para el *DR-Scheme*. Este es el primer esfuerzo para incorporar protocolos basados en ALOHA en los nuevos mecanismos de identificación. La propuesta intenta ejecutar el estándar EPC Gen2 en forma distribuida, no obstante no lo logra y deja de lado demasiados detalles sin aclarar. Este asume que el número de etiquetas en la zona de interés se conoce, lo que es posible con la ejecución de un proceso de estimación de etiquetas como una prefase al de identificación. Además, el protocolo no considera una fase de estimación del número de etiquetas por identificar en cada ciclo, solamente lo hace al inicio del proceso, afectando el desempeño del mismo. Finalmente, al igual que en BSA-DR, las características de los mensajes intercambiados entre el lector, las etiquetas y los *cluster-heads* no se detallan ni se especifican, dejando libre la implementación de dichos mensajes.

Discusión

Los sistemas RFID aumentados parecen muy prometedores para aplicaciones con altos requerimientos de rendimiento, sin embargo, estos necesitan de protocolos de lectura que aprovechen todas las ventajas que estos ofrecen. Existen muy pocos protocolos de comunicación para este tipo de mecanismos de identificación, no solo de lectura, sino de comunicación en general para los distintos procesos realizados por una red RFID.

En el caso particular del *DR-Scheme*, son pocas las propuestas de protocolos de lectura para este esquema. Ya que en BSA-DR el lector difunde un mensaje diferente por cada *cluster*, este no aprovecha el enfoque distribuido del *DR-Scheme*. Esto es porque que el lector envía tantos mensajes de consulta como microzonas haya en su zona de interrogación. Respecto a la versión adaptada del EPC Gen2 al *DR-Scheme*, bastantes detalles sobre su operación no se especifican, tales como la estructura y tamaño de los mensajes intercambiados entre los dispositivos participantes, por lo que no es posible implementar dicha propuesta.

b) Sistemas RFID aumentados - Área de cobertura extendida - k zonas de interrogación

El mecanismo de identificación que considera un sistema RFID aumentado, área de cobertura extendida y k zonas de interrogación (*Augmented RFID System with Extended Coverage Area and k Interrogation Zones* o AS-ECA- k I Z) es el más reciente hasta el momento. Este mecanismo considera un área de mayor cobertura que la de los sistemas RFID tradicionales. Esta se particiona en k subzonas con ayuda de varios dispositivos receptores. Cada una de las subzonas es una *microzona* de comunicación virtual en la que se comunican las etiquetas con uno de los dispositivos receptores.

En este mecanismo, se separan las funciones de transmisión y recepción de información realizadas por el lector en dispositivos espacialmente separados. Las funciones de transmisión las realiza un dispositivo, lo que trae consigo dos consecuencias importantes: se reduce la carga de trabajo en el lector/transmisor y se abre la oportunidad para aumentar el rango de cobertura de los sistemas RFID. La primera consecuencia viene de quitar la función de recepción del transmisor y distribuirla en varios dispositivos, lo que elimina el cuello de botella de la red. La segunda consecuencia surge de la misma manera, es decir, debido a que los dispositivos receptores están distribuidos a lo largo del área de interés, y en teoría más cerca de las etiquetas que el dispositivo transmisor, basta con que las etiquetas tengan la suficiente energía para activar su circuito integrado y transmitir una respuesta. Así, en el mecanismo de identificación con un sistema

RFID aumentado con área de cobertura extendida se tiene un solo transmisor con un gran rango de cobertura, un conjunto de receptores y etiquetas desplegados a lo largo de del mismo.

No existen muchos trabajos relacionados con este mecanismo de identificación, ya que en la literatura se pueden encontrar solamente un par de estos. El trabajo titulado *Challenge: Towards distributed RFID sensing with Software-Defined Radio* [25], que denominamos *L-Scheme*, es la referencia principal para este tipo de mecanismos de identificación. La idea consiste en reemplazar el lector por dos dispositivos dedicados que realizan funciones diferentes. El dispositivo que emite consultas y energiza las etiquetas se denomina **illuminator** o iluminador, mientras que el dispositivo receptor de información se llama RFID **listener** u oyente. Así, una red RFID que opere con *L-Scheme* consta de tres tipos de dispositivos: iluminador, RFID *listener* y etiquetas. Un iluminador es similar a un lector RFID, con pequeñas diferencias: el iluminador únicamente realiza funciones de transmisión, tiene mayor potencia de transmisión y por ende, mayor rango de cobertura. Un RFID *listener* es un dispositivo dedicado a recolectar la información transmitida por las etiquetas, para lo cual es necesario que el RFID *listener* primero decodifique los comandos transmitidos por el iluminador. Un RFID *listener* puede implementar técnicas de recepción cooperativa para recolectar más eficientemente la información transmitida por las etiquetas, tal y como se discute en [25]. Una vez recolectada la información transmitida por las etiquetas, el RFID *listener* retransmite dicha información por otro canal a todos los dispositivos interesados. De esta manera, se observa que el RFID *listener* actúa como intermediario entre el iluminador y las etiquetas ya que puede decodificar los comandos transmitidos por ambos. Esto hace del RFID *listener* un dispositivo bastante útil al momento de desplegar la red RFID.

Puesto que el *L-Scheme* sustituye al lector RFID tradicional con un *iluminador*, el *L-Scheme* tiene un mayor rango de cobertura que el 1R-LCA- k I Z . Esto implica que si se desea cubrir un área de interés grande con el *L-Scheme* o con un mecanismo del tipo 1R-LCA- k I Z , se deberían utilizar t iluminadores en el caso del *L-Scheme* y r lectores en el caso del mecanismo del tipo 1R-LCA- k I Z , con $t < r$. Dicha relación siempre se cumple debido a que el rango de cobertura de un *iluminador* es mayor que el rango de cobertura de un lector. De hecho, la relación se mantiene hasta el punto en el que cuando $t = 1$, existe una p tal que $1 = pr$, con $r > 1$. Esto implica que para cubrir la misma área de cobertura del *L-Scheme* con un mecanismo del tipo 1R-LCA- k I Z , es necesario implementar el esquema multilector [26] con al menos dos lectores. Así, se nota que una de las principales contribuciones del *L-Scheme* es reducir la coordinación de transmisión de información que se tendría con el esquema multilector.

Las Figuras 2.11 y 2.12 muestran una comparación del *L-Scheme* con el esquema multilector. Como se puede observar, la idea de [25] es sustituir el esquema multilector con el *L-Scheme* con

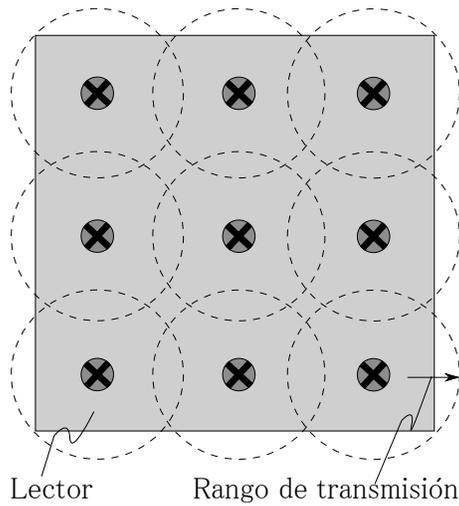


Figura 2.11: *Multi-reader scheme.*

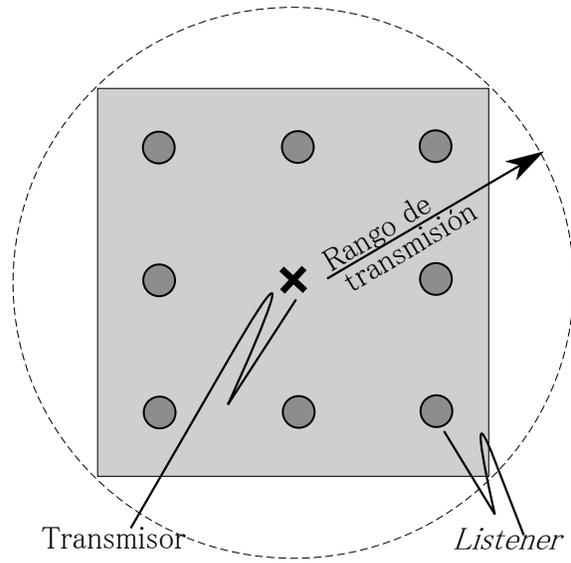


Figura 2.12: *L-Scheme: One illuminator.*

el fin de ofrecer mejores condiciones para las diversas aplicaciones de los sistemas RFID. Esto se debe principalmente a que en el primero se presentan dos problemas de colisiones adicionales que no existen en ambientes con un solo transmisor: colisiones lector-lector y colisiones lector-etiqueta. Existe una vasta cantidad de trabajos que sugieren mecanismos para mitigar estos problemas, los cuales se tratarán en la sección subsecuente.

Discusión

Los sistemas RFID aumentados con área de cobertura extendida y k zonas de interrogación son muy prometedores para aplicaciones que requieren cubrir un área de gran tamaño y escenarios densos. Esto se debe a que este tipo de mecanismos promete reducir el retardo de identificación y, por ende, mejorar el proceso de comunicación en este tipo de sistemas. Lo anterior resulta muy atractivo para aplicaciones con altos requerimientos en tiempo o rango de cobertura, sin embargo, a pesar de la promesa de este tipo de mecanismos para ser más eficientes que el esquema multilector, no existen pruebas que confirmen tal hipótesis. Aunado a esto, se presenta un problema en particular que atañe a este tipo de mecanismos: extender el rango de cobertura de un sistema RFID. Este problema se relaciona de manera directa con las restricciones impuestas por la tecnología *per se*, así como por las impuestas por la sociedad.

En el caso particular del *L-Scheme*, este solo ha sido presentado y evaluado a nivel de prototipo, es decir, únicamente se verificó la comunicación entre los dispositivos, más nunca se evaluó el

desempeño de la red completa. Esto reduce el impacto del *L-Scheme* en cuanto a su uso potencial en diversas aplicaciones, ya que su funcionamiento es poco claro o se deja de lado. Lo anterior genera expectativa en torno a cómo se puede extender el rango de cobertura de un sistema RFID, cómo se despliega una red RFID que considera un sistema aumentado, y si el *L-Scheme* es más rápido, exacto o eficiente que el esquema multilector. Más aún, el *L-Scheme* sufre los mismos problemas que otros mecanismos de identificación distribuidos, es decir, carece de protocolos de lectura eficientes que maximicen el uso de recursos. En capítulos posteriores se satisfacen cada uno de los requerimientos antes mencionados.

2.2.2. Múltiples lectores - área de cobertura extendida - k zonas de interrogación

El mecanismo de identificación con múltiples lectores, área de cobertura extendida y k zonas de interrogación (*Multi-Reader Scheme with Extended Coverage Area and k Interrogation Zones* o MR-ECA-kIZ) extiende el área de cobertura de un sistema RFID usando k lectores en el área de interés. Cada lector en dicha área crea su propia zona de interrogación y lleva a cabo el proceso de identificación correspondiente. Por el momento, el esquema multilector o *MR-Scheme* es el único mecanismo en esta categoría.

El *MR-Scheme* se puede definir como varias instancias del mecanismo con solo un lector operando en conjunto. Esto implica que dentro de una misma área hay más de un lector RFID transmitiendo información, lo que produce problemas adicionales de interferencia que no existen en el mecanismo con solo un lector como son:

- **Colisiones lector-lector.** También conocidas como *interferencia en frecuencia*, ocurren cuando el lector intenta recibir la señal de una etiqueta y no la puede decodificar debido a que esta es enmascarada por las señales emitidas por otro lector cercano.
- **Colisiones lector-etiqueta.** Ocurren cuando dos más lectores intentan acceder a una etiqueta al mismo tiempo. Esto sucede únicamente cuando una etiqueta se encuentra en el rango de cobertura de dos o más lectores, es decir, en un área de traslape.

Protocolos anticolidión

En la literatura se pueden encontrar múltiples protocolos anticolidión que permiten resolver los problemas asociados al *MR-Scheme*. La mayoría de ellos permiten evitar o minimizar los problemas de colisiones en este tipo de mecanismos de identificación. En [26], se revisan la mayoría de estos

protocolos para solventar los problemas relacionados al *MR-Scheme*, y además se presenta la siguiente taxonomía:

- **Protocolos anticollisión basados en cobertura.** Son protocolos centralizados que intentan minimizar las áreas de traslape entre lectores. Para ello, cada lector necesita ajustar dinámicamente su rango de comunicación. Algunos trabajos que pertenecen a esta categoría son: *Localized Clustering for RFID networks* [27], *Distributed Adaptive Power Control* [28], *Probabilistic Power Control* [29] y *Power-Aware Location-based Anti-Collision protocol* [30].
- **Protocolos anticollisión basados en la asignación de recursos.** Este tipo de protocolos asignan los recursos disponibles, como en tiempo y frecuencia, a cada uno de los lectores. La asignación se realiza lo más equitativamente posible para reducir el número de lectores que transmiten al mismo tiempo. Trabajos de este tipo son: *Colorwave* [31], *Simulated Annealing Algorithm for RFID Reader Networks* [32] y *An Efficient Reader Anticollision Algorithm in Dense RFID Networks With Mobile RFID Readers* [33].
- **Protocolos basados en mecanismos de control.** Este tipo de protocolos anticollisión utilizan paquetes de control para mitigar los problemas relacionados al *MR-Scheme*. Cada vez que un lector inicia un proceso de identificación, este envía un paquete de control a sus vecinos. Los lectores que reciben dicho paquete detienen sus transmisiones y esperan a que termine el proceso, es decir, esperan a otra ronda para iniciar un nuevo proceso de comunicación con las etiquetas. Protocolos que pertenecen a esta clasificación son: *Pulse* [34], *Distributed Tag Access with Collision-Avoidance* [35], *Enhanced Distributed Tag Access with Collision-Avoidance* [36], *Two Phase Dynamic Modulation* [37] y *Multi-Channel MAC Protocol for RFID Reader Networks* [38].

Ya que el *MR-Scheme* es uno de los mecanismos de identificación más estudiados en la literatura, existen protocolos de comunicación estandarizados para resolver los problemas de colisiones relacionados a este. EPCglobal, bajo la regulación europea ETSI EN 302 208, propone el protocolo EPC-ETSI como el estándar para resolver los problemas de interferencia en el *MR-Scheme* [39]. EPC-ETSI es un mecanismo distribuido que permite a los lectores operar de manera independiente entre ellos. En EPC-ETSI, cada lector selecciona aleatoriamente una de las cuatro frecuencias disponibles para llevar a cabo la comunicación lector-etiqueta. Cada lector escucha el canal seleccionado por al menos 5 ms (*Listen Before Talk* - LBT). Si el canal permanece libre, el lector utiliza la frecuencia seleccionada e inicia el proceso de identificación enviando ondas electromagnéticas y creando un área de exploración para identificar etiquetas. Por cada paquete

de consulta que envía el lector, este espera por la respuesta de las etiquetas un intervalo de 10 ms. Si el lector no recibe ninguna respuesta en ese intervalo de tiempo, este deja libre el canal y aleatoriamente selecciona otro. En otro caso, el lector continúa el proceso de identificación durante 4 ms. Al final de ese intervalo de tiempo, el lector deja libre el canal y espera durante 100 ms antes de seleccionar otro canal.

Discusión

Ya que el esquema basado en múltiples lectores considera la participación de más de un transmisor, este impone varios retos que van desde el despliegue de la red hasta mejorar el rendimiento, al momento de ejecutar un proceso de identificación. El *MR-Scheme* es útil para aplicaciones con áreas de interés bastante grandes, o bien, irregulares. En este caso, el área se divide cuando se agregan lectores y todos estos operan en conjunto para llevar a cabo un proceso de identificación en ella.

Respecto a los protocolos anticolidión para el *MR-Scheme*, los más utilizados son los basados en mecanismos de control, como el estándar EPC-ETSI [39].

CAPÍTULO 3

MODELADO DE SISTEMAS RFID PASIVOS

En este capítulo se realiza una revisión al estado del arte relacionado con el modelado de redes RFID, para después determinar las características necesarias para modelar cada uno de los sistemas que se evalúan en este trabajo. Además, se especifican las consideraciones realizadas para modelar cada uno de los mecanismos de identificación descritos en el capítulo 2. Se plantea el modelo del sistema, las características de los dispositivos a participar, las características del canal de comunicación, así como la distribución de los dispositivos en un área de interés.

3.1. Modelo del sistema

Los modelos de propagación de señales de radiofrecuencia (*Radio Frequency* o RF) son un tema de investigación que, aunque forman parte del estudio de los sistemas RFID, no son parte central del tema de investigación de este trabajo. Uno de los enfoques más aceptados para modelar la propagación de señales en sistemas RFID es el esférico [15, 1, 20], el cual a pesar de omitir muchas características del mundo real, enmarca bastante bien la esencia del modelo de comunicación de los sistemas RFID.

Tabla 3.1: Especificación de los dispositivos seleccionados de la compañía Impinj.

Parámetro	Lector	Etiqueta
Modelo	Speedway revolution	Monza 5
Sensibilidad	-82 dBm	-17.8 dBm
Ganancia	5 dBi	2 dBi
Potencia de transmisión	1-3 W	–

3.2. Dispositivos de una red RFID

Para poder modelar un sistema RFID, es necesario describir las características específicas de los dispositivos participantes en la red. Para ello, se requieren seleccionar dispositivos que cumplan con las normas establecidas en el mundo entero. Actualmente, existen muchos proveedores de tecnología RFID en el mercado. Una de las compañías más sobresalientes es Impinj [40]. Esta ofrece una amplia variedad de productos RFID, desde lectores y etiquetas RFID hasta dispositivos dedicados de almacenamiento. Por lo anterior, se seleccionan los dispositivos ofrecidos por esta empresa para modelar las redes que permitan evaluar todos los mecanismos de identificación aquí analizados. La Tabla 3.1 resume las características más importantes de los dispositivos seleccionados. Se puede observar que se selecciona el lector RFID *Speedway revolution* [41] con la antena *Threshold-FS Antenna* [42] y la etiqueta Monza 5 [43].

Se debe notar que un estudio similar se puede realizar con otros dispositivos. Sin embargo, el objetivo principal de la evaluación aquí propuesta es comparar los mecanismos de identificación existentes en condiciones similares y de acuerdo a los dispositivos actuales, más no resaltar las ventajas de utilizar algunos en particular.

3.3. Rango de cobertura y modelo de propagación

El rango de cobertura de un sistema RFID está delimitado por $\min(R_L, R_T)$ [25], donde R_L representa el alcance máximo de recepción de una etiqueta y R_T representa el alcance máximo de energización de las etiquetas. R_L es una función de la potencia máxima restrodispersada por las etiquetas, mientras que R_T es una función de la potencia máxima transmitida por el lector. Entonces, el rango de cobertura de un sistema RFID está limitado por R_T , el cual está asociado con una característica particular de las etiquetas: la sensibilidad. Esta se puede definir como la energía mínima requerida por una etiqueta para activar su chip (*Integrated Circuit* o IC) [4]. Entonces, la sensibilidad de las etiquetas es un parámetro esencial para determinar la distancia

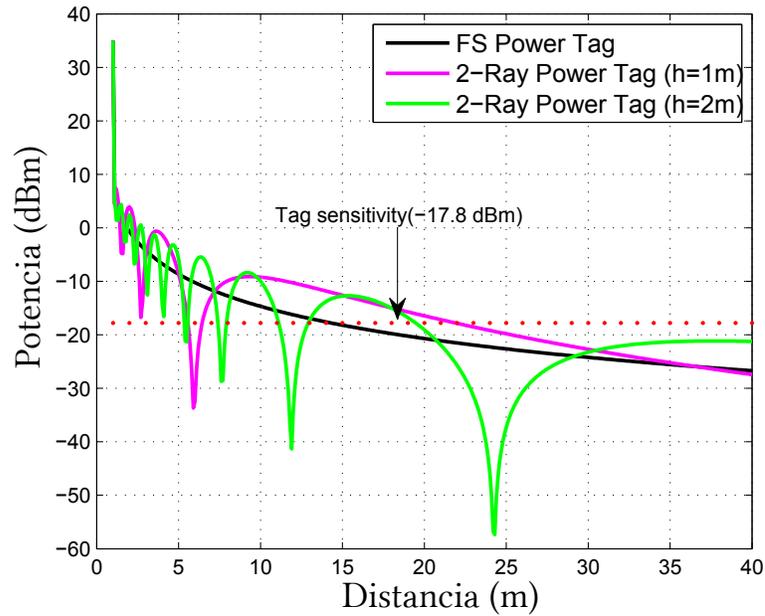


Figura 3.1: Rango de cobertura del *One-Reader Scheme*.

máxima a la que se puede detectar una etiqueta.

3.3.1. Antecedentes

A fin de determinar la distancia máxima a la que puede operar una etiqueta, es necesario estimar la potencia recibida por esta. Dicha potencia es una función de las características específicas de la antena del lector y el modelo de pérdidas de trayectoria, tal y como lo indica la Ecuación (1.1) en el capítulo 1. Si se considera que los dispositivos seleccionados operan en una frecuencia de 867.6 MHz, y se toman en cuenta las consideraciones mencionadas arriba, así como los dispositivos presentados en la Tabla 3.1 y los modelos de pérdidas de trayectoria FSM y 2RGR descritos en el capítulo 1, se puede determinar el alcance del sistema de base. La Figura 3.1 muestra el rango de cobertura para dicho sistema. Como se puede observar, un lector puede cubrir alrededor de 15 m con el FSM, alrededor de 22 m, con el 2RGR y $h = 1$ m, y alrededor de 18 m con el 2RGR y $h = 2$ m. Los valores para h se seleccionan porque se consideran adecuados para caracterizar sistemas de comunicación inalámbricos [3, 4, 5, 44]. Es importante señalar que con el modelo 2RGR existen zonas muertas dentro del rango de cobertura.

Así, se determina que el rango de cobertura o zona de interrogación del sistema RFID de base es de 15 m, por lo que se toma dicho valor como referencia para comparar todos los mecanismos

de identificación aquí estudiados.

3.4. Número y distribución de etiquetas

Se considera que el número de etiquetas en la zona de interrogación de un lector varía desde 100 hasta 2000 etiquetas. El rango se determina de esa manera ya que se considera común y adecuado en la literatura [17, 45].

La distribución de las etiquetas es dependiente de la aplicación. Existen aplicaciones donde las etiquetas están conglomeradas en un área en particular dentro de la zona de interés, como contenedores o en bandas transportadoras, y existen otras tantas donde las etiquetas están dispersas a lo largo de la zona de interés, como en los almacenes o tiendas departamentales. Con esta amplia gama de aplicaciones, tenemos muchas alternativas para modelar la distribución de las etiquetas en la zona de interrogación.

En el caso de los **esquemas centralizados**, la distribución de las etiquetas solamente afecta al proceso de identificación con fenómenos como el efecto de captura [46], que ocurre cuando las respuestas de dos o más etiquetas colisionan en el canal y una de ellas se recibe correctamente. Dicho fenómeno acelera el proceso de identificación ya que una etiqueta puede ser identificada aún en caso de colisión. Respecto a los **esquemas distribuidos**, la distribución de las etiquetas afecta el proceso de identificación en términos de tiempo debido a que el número de etiquetas por subzona varía. Entonces, en este trabajo se distinguen tres casos para la distribución de las etiquetas en los esquemas distribuidos:

- **Mejor de los casos.** Ocurre cuando el número de etiquetas por subzona es el mismo en cada uno de ellas y no existen etiquetas en las zonas de traslape. Esto se debe a que en los mecanismos identificación distribuidos se busca tener múltiples identificaciones al mismo tiempo, lo cual puede ocurrir más fácilmente cuando el número de etiquetas a identificar decremente a la misma tasa en cada una de las subzonas. Adicionalmente, en este escenario se elimina la posibilidad de que ocurran colisiones del tipo lector-etiqueta en el *MR-Scheme*, ya que no existen etiquetas en las zonas de traslape. Dicho escenario no es muy representativo de las aplicaciones de este tipo de tecnología.
 - **Peor de los casos.** Tiene lugar cuando el todo el conjunto de etiquetas a identificar está en una subzona. En tal escenario se desvanece el concepto distribuido de este tipo de mecanismos, y se sustituye por uno centralizado secuencial. Lo anterior implica que el *One-Reader Scheme* sería suficiente para realizar el proceso de identificación en dicho
-

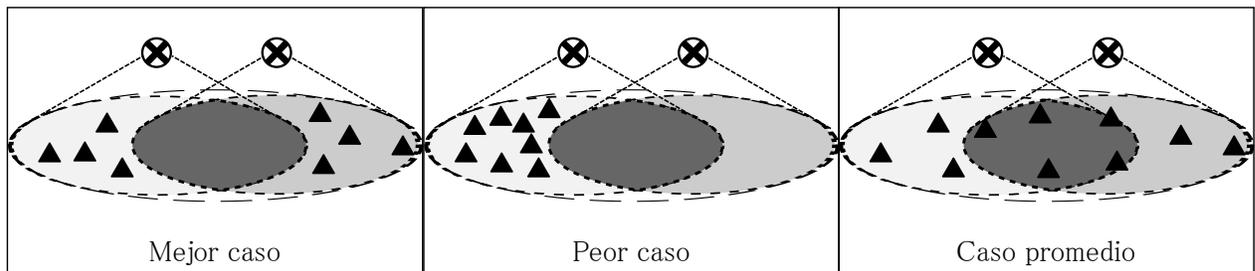


Figura 3.2: Casos para la distribución de las etiquetas en la zona de interés.

escenario. Además, este caso suprime la necesidad de múltiples lectores o receptores en un área y no representa un escenario de interés para evaluar el desempeño de los mecanismos de identificación distribuidos, puesto que *a priori* se sabe que tendrán un desempeño peor o igual que el *One-Reader Scheme*. Esto se debe a que el retardo inducido por la retransmisión de información desde los dispositivos receptores hacia el lector incrementará el retardo de identificación.

- **Caso promedio.** En el caso promedio, el número de etiquetas por subzona es diferente y varía de acuerdo al tamaño del área de cobertura de cada subzona. Esto significa que hay cierto número de etiquetas en cada subzona y además, que existen etiquetas en las zonas de traslape de dichas subzonas. Las etiquetas que se encuentran en las zonas de traslape ocasionan varios problemas interesantes para los mecanismos de identificación distribuidos, que van desde obtener identificaciones múltiples de una etiqueta, hasta involucrar todos los tipos de colisiones conocidos entre dispositivos, como son colisiones lector-lector, lector-etiqueta y etiqueta-etiqueta. Este caso es uno de los más interesantes para evaluar en los mecanismos de identificación distribuidos ya que no asume consideraciones especiales y contempla todos los escenarios posibles.

La Figura 3.2 muestra los tres casos que se acaban de describir. Como se puede observar, la distribución de las etiquetas en el área de interés para el caso promedio es muy parecida a la uniforme.

Así, para todos los mecanismos de identificación analizados en este trabajo, se asume que las etiquetas están distribuidas uniformemente en el área de interés por las siguientes razones:

- No supone características particulares de una aplicación
- Representa de mejor manera el caso promedio para la distribución de las etiquetas en los mecanismos de identificación distribuidos

- Representa el caso general respecto al número de etiquetas por subzona.

3.5. Suposiciones

El trabajo de investigación aquí realizado se centra en la evaluación de mecanismos de identificación con protocolos anticollisión estándar, es decir, con protocolos basados en el EPC Gen2 [16]. Así, se considera que cada uno de los mecanismos de identificación descritos en el capítulo 2 utiliza una versión del EPC Gen2 con las siguientes consideraciones:

- Se selecciona $M=2$ de la Tabla 3.2 para aproximar el tiempo utilizado en la comunicación entre los dispositivos de la red
- Todos los dispositivos participantes tienen un CCA coherente (*Clear Channel Assessment*), es decir, detectan el canal ocupado cuando el preámbulo de un paquete es detectado
- La red está libre del efecto de captura.

En el siguiente capítulo se presenta un análisis de los mecanismos de identificación descritos en el Capítulo 2. Dicho análisis se enfoca en el rendimiento exhibido por cada uno de ellos respecto al retardo promedio de identificación. Para ello, cada mecanismo de identificación se evalúa con un protocolo de lectura basado en el estándar EPC Gen2.

Tabla 3.2: Valores típicos adoptados por el estándar EPC Gen2.

Parámetro	Símbolo	Valor
Electronic Product Code	EPC	96 bits
Initial Q value	Q_0	4
Reference Time interval for a data-0 in Reader-to-Tag signalling	Tari	12.5 μ s
Tag-to-Reader calibration symbol	TRcal	64 μ s
Reader-to-Tag calibration symbol	RTcal	31.25 μ s
Divide Ratio	DR	8
Backscatter Link Frequency	LF	DR/TRcal
Number of subcarrier cycles per symbol in Tag-to-Reader direction	M	1, 2, 4, 8
Reader-to-Tag rate	Rtrate	64 kbps
Tag-to-Reader rate	Trrate	LF/M
Link Pulse Repetition Interval	T_{pri}	1/LF
Time for reader transmission to tag response	T1	Max (RTcal, $10T_{pri}$)
Time for tag response to reader transmission	T2	$5T_{pri}$
Time a reader waits, after T1 before it issues another command	T3	$5T_{pri}$
Minimum time between reader commands	T4	2RTcal
Query packet	Query	22 bits
QueryAdjust packet	QueryAdjust	9 bits
QueryRep packet	QueryRep	4 bits
Ack packet	Ack	18 bits
Random Number 16-bits	RN16	16 bits

CAPÍTULO 4

ENFOQUE CENTRALIZADO PARA SISTEMAS RFID PASIVOS

El enfoque centralizado es aquel con el que surgieron las redes RFID. Es por ello que la mayoría del trabajo de investigación sobre el proceso de identificación se ha realizado bajo dicho enfoque. Este tiene diversas ventajas y desventajas frente a su contraparte distribuida:

- Una de sus principales desventajas es que limita el uso del ancho de banda disponible, lo que reduce la cantidad de información que puede transmitirse por unidad de tiempo
- La comunicación en el proceso de identificación se centra en el lector, lo que produce un cuello de botella
- El diseño centralizado reduce la complejidad del diseño de protocolos de comunicación, pues únicamente considera la participación de dos dispositivos en el proceso de comunicación
- El diseño centralizado reduce la complejidad del despliegue de la red al considerar sólo dos tipos de dispositivos.

A continuación, se retoman cada uno de los mecanismos centralizados presentados en el capítulo anterior, y se discuten las propuestas realizadas en cada uno de ellos.

4.1. Esquema 1R-LCA-1IZ

Entre todos los esquemas de identificación, 1R-LCA-1IZ es el más estudiado en la literatura. Desde su surgimiento se han propuesto mejoras de hardware y protocolos de lectura eficientes.

Este mecanismo ha mostrado un retardo de identificación razonable con diversos protocolos de lectura [6]. Por sus características, su principal limitante es su área de cobertura, ya que reduce el rango de posibles aplicaciones para su uso, pero no su rendimiento. Aún así, existen muchos problemas a resolver en este esquema de identificación debido a los altos requerimientos de las aplicaciones: colisiones, consumo de energía, asignación de recursos, escalabilidad, por mencionar algunos.

Con el fin de dar solución a los problemas relacionados al 1R-LCA-1IZ, la comunidad investigadora ha realizado diversos esfuerzos en varios campos de la tecnología RFID. Uno de los que ha tenido mayor éxito es el diseño de protocolos de comunicación eficientes, ya que estos permiten hacer un uso adecuado de los recursos disponibles en la red y no suponen características especiales de los dispositivos. Esto permite que cualquier propuesta realizada a este nivel se pueda implementar con relativa facilidad en cualquier sistema RFID.

EPC Gen2 es el protocolo de lectura estándar para el *One Reader Scheme*. Este protocolo se ha estudiado a profundidad, por lo que es posible encontrar diversos trabajos que plantean mecanismos para optimizar su desempeño [18, 47].

4.1.1. Análisis de 1R-LCA-1IZ

Debido a las capacidades limitadas de las etiquetas RFID pasivas, estas no son capaces de detectar el medio, lo que significa que estas no conocen el estado actual del canal, el resultado de una consulta, así como el número de etiquetas participantes en una transmisión. Esto implica que las etiquetas no cuentan con algún mecanismo de retroalimentación que les permita regular su transmisión para maximizar el uso de los recursos. En particular, se observa la necesidad de que las etiquetas conozcan el estado del canal con el objetivo de minimizar las colisiones entre ellas. Además, se identifica que el lector es el único dispositivo de la red capaz de conocer el estado del canal, es decir, vacío, en transmisión o colisión.

Así, se puede concluir que en este mecanismo de identificación se necesita que lector informe a las etiquetas el estado actual del canal. Para ello, el lector debe implementar una solución que no suponga características adicionales de las etiquetas. Entonces se observa que la única opción disponible para realizar tal actividad es el protocolo de lectura.

Tabla 4.1: Paquete *Query* extendido.

	Command	DR	M	TRext	Sel	Session	Target	Q	CRC-5	W
# of bits	4	1	2	1	2	2	1	4	5	4
description	1000	0: DR=8 1: DR=64/3	00: M=1 01: M=2 10: M=4 11: M=8	0: No pilot tone 1: Use pilot tone	00: ALL 01: ALL 10: SL 11: SL	00: S0 01: S1 10: S2 11: S3	0: A 1: B	0-15		0-15

Tabla 4.2: Paquete *QueryAdjust* extendido.

	Command	Session	UpDn	W
# of bits	4	2	3	4
description	1001	00: S0 01: S1 10: S2 11: S3	110: $Q = Q + 1$ 000: No change to Q 011: $Q = Q - 1$	0-15

4.1.2. Propuesta: modificación del EPC Gen2 para el 1R-LCA-1IZ

Uno de los conceptos que permite extraer información de la red y que se puede emplear con el protocolo de lectura para regular las respuestas de la etiquetas, es la **probabilidad de transmisión**. Este se introduce en las redes RFID en [48], donde la idea principal es reducir el número de etiquetas que participan en un CI. Esto se logra variando la probabilidad con la que una etiqueta decide participar o no en el CI actual.

Entonces, se propone utilizar el concepto de probabilidad de transmisión con el estándar EPC Gen2 para regular las respuestas de las etiquetas con base en el estado de la red. Ya que las etiquetas pasivas tienen funciones limitadas, el lector calcula la probabilidad de transmisión p_t asociada al CI actual y la envía a las etiquetas. Puesto que el envío de un número flotante es altamente costoso en términos de recursos, el lector tiene que transformar dicha probabilidad a un formato de menor costo. En este caso, se hace una equivalencia entre el valor de p_t y un número entero. El parámetro denominado como W , representa el valor de p_t en un rango de 0 a 15. La idea de utilizar los valores de Q es porque se desea colocar p_t en los mensajes enviados de el lector a las etiquetas en el EPC Gen2, en particular en los paquetes *Query* y *QueryAdjust*.

Además, para lograr introducir el concepto de probabilidad de transmisión en las etiquetas pasivas, se requiere utilizar las funciones disponibles en ellas para no modificar su comportamiento o suponer funcionalidades adicionales. Entonces, se utiliza la capacidad de almacenar dos números de 16 bits al mismo tiempo y la capacidad de generar números aleatorios [16].

Ya que la propuesta se basa en el estándar EPC Gen2, los valores iniciales de Q , p_t , y W son conocidos. Al final de cada CI, el lector calcula los valores subsecuentes asociados a tales

variables. Para calcular el valor de Q es posible utilizar el protocolo Q o un mecanismo alternativo para seleccionar uno dentro del rango de posibilidades. Respecto al cálculo de los valores de p_t y W , se necesita utilizar una función de estimación [6], la cual se describirá en líneas posteriores. Entonces, al inicio de un CI, el lector envía un paquete *Query* o *QueryAdj*, que contiene los valores de W y Q . Después de recibir dicho paquete, las etiquetas almacenan el valor de W y generan un número aleatorio r . Si el resultado en una etiqueta es $r < W$, entonces esta participa en el CI actual, en otro caso espera hasta el siguiente CI para intentar transmitir su información. El lector recolecta la respuesta transmitida por las etiquetas en la ranura actual y determina el resultado de la misma. Posteriormente el lector inicia otra ranura enviando un paquete *QueryRep*. El proceso continúa ranura por ranura hasta el final de la trama. Cuando esto sucede, el lector ejecuta una función de estimación para intentar predecir el número de etiquetas restantes por identificar en el siguiente CI, i.e., \hat{n}_i , y subsecuentemente calcular los valores de p_t y W . Posteriormente, el lector calcula el tamaño de la trama subsecuente de acuerdo a \hat{n}_i . Este procedimiento se repite hasta que todas las etiquetas se identifican, lo que sucede cuando se obtienen dos ciclos de identificación vacíos consecutivos. Esto se debe a que la probabilidad de transmisión introduce aleatoriedad extra en el proceso de identificación. Las versiones extendidas de los paquetes *Query* y *QueryAdjust* se presentan en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2, respectivamente. Se puede apreciar que el parámetro W genera una sobrecarga de información en cada uno de los paquetes antes mencionados; no obstante, se demostrará que dicha sobrecarga permite mejorar el desempeño de 1R-LCA-1IZ con EPC Gen2.

El cálculo de la probabilidad de transmisión es esencial para el funcionamiento de esta propuesta. Para que el lector RFID pueda calcular la probabilidad de transmisión, este requiere algunos parámetros de entrada, tales como: el número de etiquetas a ser identificadas, el tamaño de la trama en el CI actual, N_i , el tamaño de la trama del siguiente CI, N_{i+1} , el número de ranuras vacías $c_{0,i}$ en el CI actual, el número de ranuras exitosas $c_{1,i}$ en el CI actual y el número de ranuras colisionantes $c_{c,i}$ en el CI actual. De todos estos parámetros, el único que no es posible conocer *a priori* en la mayoría de las aplicaciones RFID es el número de etiquetas a identificar. Sin embargo, dicho valor se puede aproximar con el uso de una función de estimación F . Se observa entonces que F juega un papel muy importante para el cálculo del número de etiquetas por identificar en el i -ésimo ciclo, \hat{n}_i . En ese sentido, varias funciones de estimación se han presentado en la literatura [6, 49, 50] e incluso, el estándar EPC Gen2 tiene su propia función de estimación utilizada por el algoritmo Q , la denominada función C .

Así, en esta propuesta se consideran dos casos: EPC Gen2 con el algoritmo Q y EPC Gen2 con un mecanismo de adaptación de trama alternativo. Para EPC Gen2 con el algoritmo Q , se

propone utilizar la siguiente función de estimación basada en [51]:

$$F(c_{0,i}, c_{1,1}, c_{c,1}, i, \hat{n}_i) = \begin{cases} (c_{1,1} + 2 * c_{c,1})/p_t & \text{si } i = 1 \\ \hat{n}_i - (c_{1,i}) & \text{si } i > 1. \end{cases} \quad (4.1)$$

Las razones para elegir esta función de estimación son la baja exactitud exhibida por el algoritmo Q [19], así como el hecho de que el número de etiquetas que participan en el primer CI, corresponde a una fracción del número total de etiquetas a identificar. Sin embargo, un análisis similar se puede realizar con una función de estimación diferente.

Para la función de estimación de EPC Gen2 con el mecanismo de adaptación alternativo, se plantea utilizar cualquier función de estimación presentada en la literatura [19], considerando siempre que entre mejor sea la función de estimación elegida, mejor será el desempeño del protocolo. Por lo tanto, el número estimado de etiquetas para cualquier CI está dado por:

$$\hat{n}_i = F(c_{0,i}, c_{1,i}, c_{k,i}), \quad (4.2)$$

con $F(c_{0,i}, c_{1,i}, c_{k,i})$ cualquier función de estimación presentada en la literatura.

Sin embargo, se sabe que el número de etiquetas estimadas \hat{n}_i depende de la probabilidad de transmisión $p_{t,i}$, por lo que el “verdadero” número de etiquetas estimadas ($\hat{\hat{n}}_i$) debería de ser:

$$\hat{\hat{n}}_i = \frac{\hat{n}_i}{p_{t,i}}. \quad (4.3)$$

En ambos casos, la función de estimación está basada en la idea de que el número de etiquetas que transmiten en la trama actual es una fracción del número de etiquetas que están en la zona de interrogación. Una vez que el lector ha estimado el número de etiquetas que restan por identificar, este calcula el tamaño de la trama para el siguiente CI, N_{i+1} . Para el caso de EPC Gen2, el lector utiliza el protocolo Q , mientras que para EPC Gen2 con un mecanismo alternativo de adaptación de trama, el lector utiliza el mecanismo correspondiente, por ejemplo, el mecanismo conocido como Q óptima descrito en el Capítulo 2. Entonces, el lector calcula el número de etiquetas por ranura para el siguiente CI como sigue:

$$\hat{m} = \frac{\hat{\hat{n}}_i}{N_{i+1}}. \quad (4.4)$$

Debido a que se está buscando que el valor de \hat{m} sea lo más cercano a uno, se necesita cambiar la probabilidad de transmisión para el siguiente CI. Entonces, la probabilidad de transmisión está dada por:

$$p_{t,i+1} = \frac{1}{\hat{m}}. \quad (4.5)$$

De la Ecuación (4.4) se puede observar que el cálculo de la probabilidad de transmisión en (4.5) carece de sentido si el número de etiquetas por ranura para el siguiente CI es menor que uno, pues en otro caso sabremos que la cantidad de etiquetas por ranura es menor que el número de ranuras en la trama del siguiente CI. Por lo tanto, la probabilidad de transmisión debe ser cuidadosamente incrementada en lugar de ser disminuida. En este caso, el valor de W_i (la probabilidad de transmisión asociada al i -ésimo CI) está dado por:

$$W_i = p_{t,i} N_i. \quad (4.6)$$

Para evaluar la propuesta se toman los valores indicados por el estándar EPC Gen2 [16]. Para ello, se considera que la duración de un CI es una función del número de ranuras de tiempo y la cantidad de mensajes intercambiados entre el lector y las etiquetas. Entonces, se expresan los CI en tiempo absoluto considerando el conjunto de parámetros descritos en [16], así como los valores típicos tomados por el estándar EPC Gen2. Dichos valores se muestran en la Tabla 3.2 [52].

Se implementa en Matlab® el funcionamiento del estándar EPC Gen2 así como el funcionamiento del estándar EPC Gen2 con el mecanismo de adaptación de trama conocido como selección de Q óptima [52]. Adicionalmente, se implementa el funcionamiento del estándar EPC Gen2 y de EPC Gen2 con selección de Q óptima junto con el concepto de probabilidad de transmisión. Así, se implementan cuatro versiones del estándar EPC Gen2:

- *EPC Gen2 (EPCC1G2)*. Esta implementación utiliza el protocolo Q para redimensionar el tamaño de la trama en cada CI.
- *EPC Gen2 with Q optimal selection (EPCC1G2Q)*. Al final de cada CI, el lector utiliza la heurística presentada en [19] para determinar el tamaño de la trama para el siguiente CI (ver Tabla 2.1). Para ello, se propone utilizar la función de estimación presentada en [53] para calcular el número de etiquetas restantes por identificar.
- *EPC Gen2 with transmission probability (EPCC1G2pt)*. En esta implementación se utiliza el protocolo Q para redimensionar el tamaño de la trama subsecuente al final de cada CI. Además se hace uso de la función de estimación de la Ecuación (4.1) junto con la Ecuación (4.5) para determinar la probabilidad de transmisión para el CI subsecuente.
- *EPC Gen2 with Q optimal selection and transmission probability (EPCC1G2Qpt)*. En esta implementación el lector utiliza la heurística presentada en [19], Tabla 2.1, junto con la

función de estimación presentada en [53] para determinar el tamaño de la trama subsecuente. Para calcular la probabilidad de transmisión, se utiliza la función descrita por las Ecuaciones (4.2), (4.3), (4.4) y (4.5).

Adicionalmente, se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para las implementaciones de los protocolos *EPCC1G2* y *EPCC1G2Q*, se aproxima el tiempo utilizado por una ranura vacía y con colisión a 0.575 ms, mientras que para una ranura exitosa a 2.505 ms. Para las implementaciones de los protocolos *EPCC1G2pt* y *EPCC1G2Qpt*, se aproxima el tiempo utilizado por una ranura vacía y una con colisión a 0.615 ms, mientras que para una ranura exitosa lo aproximamos a 2.545 ms.
- Respecto al protocolo *EPCC1G2pt*, el valor inicial de la probabilidad de transmisión es de $p_{t_{ini}} = 0,015$ con $p_t \in [0.01, 1]$. Tanto el valor de $p_{t_{ini}}$, como el rango de valores para dicho parámetro, se eligen con base en el funcionamiento del protocolo *EPCC1G2*, es decir, teniendo en cuenta la alta variabilidad en el tamaño de la trama durante todo el proceso de identificación.
- Para el protocolo *EPCC1G2Qpt*, el valor inicial de la probabilidad de transmisión es de $p_{t_{ini}} = 0.1$ con $p_t \in [0.01, 1]$. Al igual que en el caso anterior, el valor inicial de la probabilidad de transmisión $p_{t_{ini}}$, así como el rango en el que varía dicho valor, se eligen de acuerdo al funcionamiento del protocolo *EPCC1G2Q*, es decir, de acuerdo con la baja variabilidad en el tamaño de la trama durante todo el proceso de identificación.
- Finalmente, se aumenta la probabilidad de transmisión a $p_t = 0.8$ cuando el número esperado de etiquetas por ranura es menor que uno. Esto se debe principalmente a que la propuesta aquí planteada introduce aleatoriedad extra en el proceso de identificación.
- Se realizan 300,000 repeticiones por cada protocolo implementado.

4.1.3. Resultados

La Figura 4.1 describe el retardo de identificación promedio exhibido por los protocolos *EPCC1G2* y *EPCC1G2pt*. Se pueden apreciar claramente las deficiencias producidas por el mecanismo de adaptación de trama del protocolo *EPCC1G2*. Además, se puede apreciar que el retardo de identificación de *EPCC1G2pt* es menor que el de *EPCC1G2*, aun cuando en el rango de 500 a 1100 etiquetas la situación es inversa.

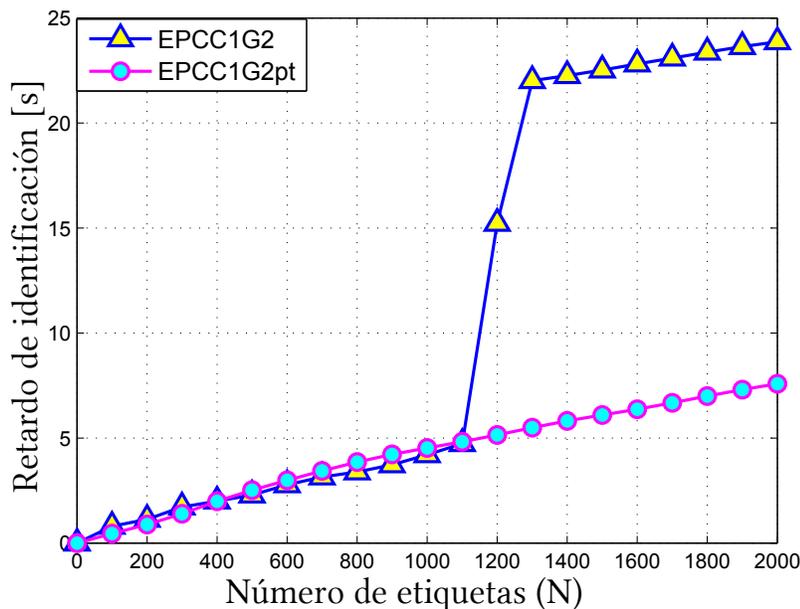


Figura 4.1: Retardo de identificación para EPC Gen2 y EPC Gen2 con probabilidad de transmisión.

Los resultados para la evaluación de los protocolos *EPCC1G2Q* y *EPCC1G2Qpt* se presentan en la Figura 4.2. Es evidente que el último supera al primero para todo el rango de etiquetas evaluado. En este caso, la mejora obtenida se debe a que con la probabilidad de transmisión se reduce el número de participantes en cada CI y por ende se regula el tamaño de la trama durante todo el proceso de identificación. Si bien, la reducción en tiempo no es considerable, se debe tomar en cuenta que esta tiene implicaciones en otros parámetros de desempeño, como ranuras utilizadas, ciclos de identificación y por ende, mensajes transmitidos.

Los resultados obtenidos con esta propuesta están reportados y publicados en [10].

4.1.4. Discusión

El esquema 1R-LCA-1IZ es la base de los diversos mecanismos de identificación existentes para sistemas RFID pasivos. Si se desea mejorar el rendimiento del esquema 1R-LCA-1IZ, se necesita modificar alguna característica en los dispositivos, o bien, modificar su comportamiento. Entre las distintas características y componentes del esquema 1R-LCA-1IZ, el protocolo de lectura es el único que se puede alterar sin suponer ningún cambio físico en los dispositivos de la red RFID. La idea es mejorar el rendimiento de los miles y miles de sistemas RFID que actualmente se encuentran

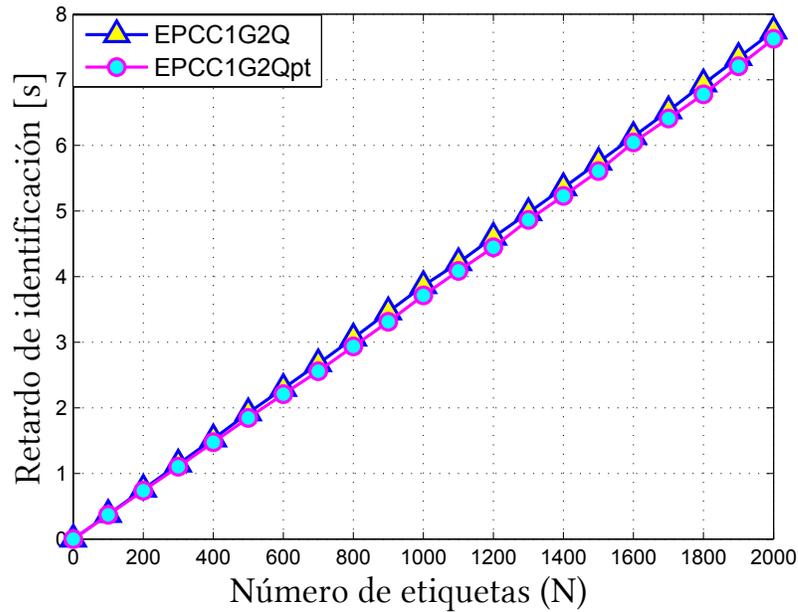


Figura 4.2: Retardo de identificación para EPC Gen2 con Q óptima y EPCGen2 con Q óptima y probabilidad de transmisión.

en operación, sin necesidad de modificar el sistema o costos extras de implementación.

4.2. Esquema 1R-LCA-kIZ

El esquema 1R-LCA-kIZ es relativamente nuevo comparado con el esquema 1R-LCA-1IZ. La característica principal del 1R-LCA-kIZ es el particionamiento de la zona de interés en k -subzonas de interrogación. Dicha característica brinda escalabilidad al sistema; pero no resuelve los problemas del 1R-LCA-1IZ, pues sufre de los mismos problemas que este: colisiones, consumo de energía y asignación de recursos.

Actualmente existen pocos trabajos relacionados con este esquema, por lo que hay muy pocas propuestas para mejorar su desempeño. Al igual que en otros mecanismos, existen dos enfoques para ello. El primero consiste en modificar las características físicas de los dispositivos en la red RFID, a fin de mejorar el rendimiento. El segundo consiste en modificar el procedimiento de particionamiento de la zona de interrogación, para así garantizar un proceso de identificación eficiente. Debido a que los dispositivos en 1R-LCA-kIZ ya tienen un comportamiento diferente al tradicional, concluimos que el enfoque más adecuado para mejorar este esquema es optimizando el particionamiento de la zona de interrogación.

4.2.1. Análisis del 1R-LCA-kIZ

Originalmente, 1R-LCA-kIZ se presenta en [1] bajo el contexto TDMA. El llamado esquema PDC comprende un parámetro d para determinar el número de subzonas en la zona de interrogación. De los pocos trabajos que buscan mejorar el desempeño de PDC se encuentra el presentado en [20]. Ahí los autores optimizan el proceso de identificación para los protocolos basados en árbol, aprovechando su naturaleza determinista. Para ello, calculan el valor óptimo de d utilizando el protocolo *Query Tree* [54] y asumiendo una distribución uniforme de las etiquetas en la zona de interrogación. Se menciona que un análisis similar se puede realizar para cualquier otro protocolo de lectura y cualquier otra distribución, sin embargo, no es posible hacer tales suposiciones para los protocolos basados en el estándar, tal y como se muestra en su trabajo posterior [55]. En dicho trabajo se optimiza PDC, llamado OD-PDC (*Optimal Discrete-PDC*), tomando en cuenta todos los posibles rangos de transmisión del lector. OD-PDC es independiente del protocolo de lectura utilizado y de la distribución de las etiquetas en la zona de interrogación. Sin embargo, a pesar de dichas ventajas, OD-PDC tiene un fuerte requerimiento para operar con protocolos estándar, que consiste en conocer el número total de etiquetas en la zona de interrogación. Es importante notar que aún cuando existen algunas aplicaciones en las que se conoce dicho dato, en la mayoría de ellas no es posible contar con esta información. Esto limita fuertemente el impacto de la propuesta, ya que los protocolos estándar no se pueden utilizar con OD-PDC si no se satisface tal requerimiento.

4.2.2. Propuesta: modificación del EPC Gen2 para el 1R-LCA-kIZ

La implementación de un mecanismo para particionar la zona de interrogación de manera eficiente debe implementarse como una prefase o parte del protocolo de lectura. Esto es porque el lector debe determinar el número de particiones antes o durante el proceso para mejorar el uso de los recursos. Entonces, para mejorar el proceso de identificación en 1R-LCA-kIZ se adapta el funcionamiento de los protocolos basados en el estándar EPC Gen2 para operar con el esquema PDC. Mediante un análisis de superficie, se plantea mejorar el desempeño de los protocolos ALOHA en el esquema PDC para aplicaciones donde el número de etiquetas a identificar se conoce *a priori*, y para aplicaciones donde el número de etiquetas se desconoce. La idea es tomar ventaja de las características de los protocolos basados en ALOHA y del esquema PDC, por lo que de los primeros se toma la capacidad de adaptar el tamaño de trama en cada CI, y del último se toma la habilidad de reducir el número de etiquetas activas a la vez.

Para realizar el análisis de superficie, se modela el sistema como sigue. El lector tiene un

rango de alcance de R unidades y un área de cobertura A_R . El lector es capaz de identificar toda etiqueta en su zona de interrogación. El protocolo de lectura utilizado para resolver colisiones entre etiquetas es el estándar EPC Gen2.

Para optimizar el desempeño de EPC Gen2 con PDC se utiliza el número de subzonas, k y el conocimiento adquirido durante del proceso de identificación. Con dicha información, se puede estimar el número de etiquetas en cada subzona o grupo y entonces adaptar el tamaño de la trama de acuerdo a este para evitar el primer CI, el cual siempre es de exploración.

Número de etiquetas desconocido: Número constante de grupos

Un número constante de grupos se obtiene fijando el valor de d o k . En ambos casos, el número de grupos es constante y está dado por:

$$k = \begin{cases} \lceil R/d \rceil & \text{con } d > 0 \\ K & \text{con } K \geq 1. \end{cases} \quad (4.7)$$

Por un lado, si se fija d , se definen diferentes grupos con distintas áreas de cobertura cada uno de ellos, es decir, $A_i \neq A_j$, con $d_i = d_j, \forall i \neq j$:

$$R \leq \sum_i d_i. \quad (4.8)$$

Por otro lado, si se fija k , se necesita determinar el valor del i -ésimo paso; es decir, el valor de d_i tal que se puedan obtener grupos de área de cobertura igual, es decir $A_i = A_j$, con $d_i \neq d_j, \forall i \neq j$. Entonces, sea r_i el radio asociado al área máxima de cobertura del cluster i , entonces se desea garantizar que:

$$A_i = A_j, \quad \forall i \neq j, \quad i, j \in [1, \dots, k], \quad (4.9)$$

lo que significa que:

$$\pi r_i^2 = \pi r_i^2 - \pi r_{i-1}^2, \quad i \in [2, \dots, k], \quad (4.10)$$

Entonces se obtiene:

$$r_i = r_1 \sqrt{i}, \quad 2 \leq i \leq k, \quad (4.11)$$

$$r_1 = R/\sqrt{k}, \quad (4.12)$$

Prueba por inducción

Caso base: Dos grupos

De la Ecuación (4.10), se sabe que $\pi r_1^2 = \pi r_2^2 - \pi r_1^2$ y que $r_2 = R$, entonces:

$$\begin{aligned}\pi r_1^2 &= \pi r_2^2 - \pi r_1^2 \\ r_1^2 &= r_2^2 - r_1^2, \\ \Rightarrow r_2 &= r_1\sqrt{2}\end{aligned}\tag{4.13}$$

y

$$r_1 = \frac{R}{\sqrt{2}}.\tag{4.14}$$

Paso inductivo

Para k grupos, se sabe que:

$$r_k = r_1\sqrt{k},\tag{4.15}$$

y de la Ecuación (4.10), se sabe que $\pi r_1^2 = \pi r_{k+1}^2 - \pi r_k^2$ y que $r_{k+1} = R$, así:

$$\begin{aligned}\pi r_1^2 &= \pi r_{k+1}^2 - \pi r_k^2 \\ r_1^2 &= r_{k+1}^2 - r_k^2 \\ \Rightarrow r_{k+1}^2 &= r_1^2 + r_k^2\end{aligned}\tag{4.16}$$

reemplazando (4.15) en (4.16) se obtiene:

$$\begin{aligned}r_{k+1}^2 &= r_1^2 + (r_1\sqrt{k})^2 \\ r_{k+1}^2 &= r_1^2 + r_1^2 k \\ r_{k+1}^2 &= r_1^2(k+1) \\ \Rightarrow r_{k+1} &= r_1\sqrt{(k+1)}\end{aligned}\tag{4.17}$$

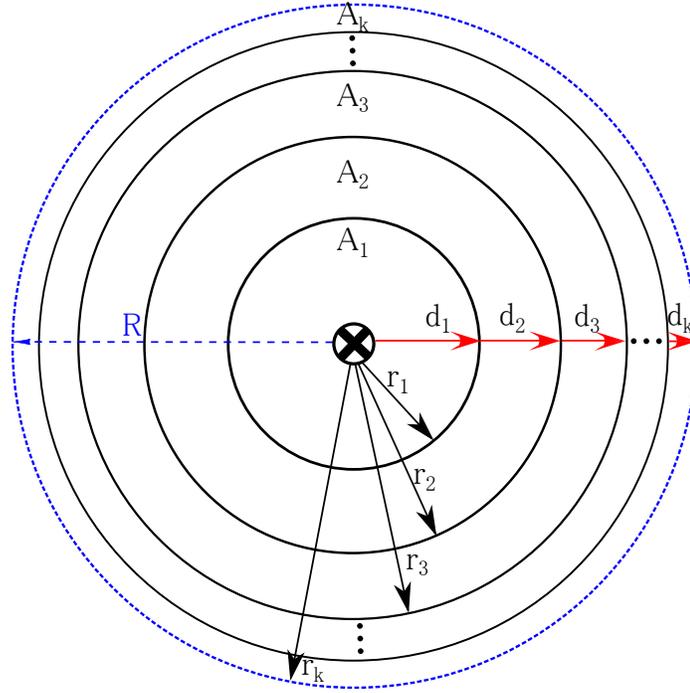


Figura 4.3: Áreas de cobertura para k en la zona de interrogación.

y:

$$\begin{aligned}
 r_{k+1}^2 &= r_1^2 + (r_1\sqrt{k})^2 \\
 r_{k+1}^2 &= r_1^2(k+1) \\
 r_1 &= \frac{r_{k+1}}{\sqrt{k+1}} \\
 \Rightarrow r_1 &= \frac{R}{\sqrt{k+1}}
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

Así, el valor de d_i asociado al i -ésimo paso es:

$$d_i = r_i - r_{i-1}, \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, k. \tag{4.19}$$

En este caso, i va de 2 a k ya que cuando $i = 0$ el área de cobertura es nula, y cuando $i = 1$ el área de cobertura corresponde a la zona de interrogación completa; ambos corresponden a casos poco significativos o poco interesantes bajo este esquema. Como se puede observar en la Figura 4.3, $r_i < r_j$, $r_k = R$, y $d_i > d_j$ para $i < j$.

En las Figuras 4.4 y 4.5 se muestran los casos para áreas de cobertura iguales y diferentes.

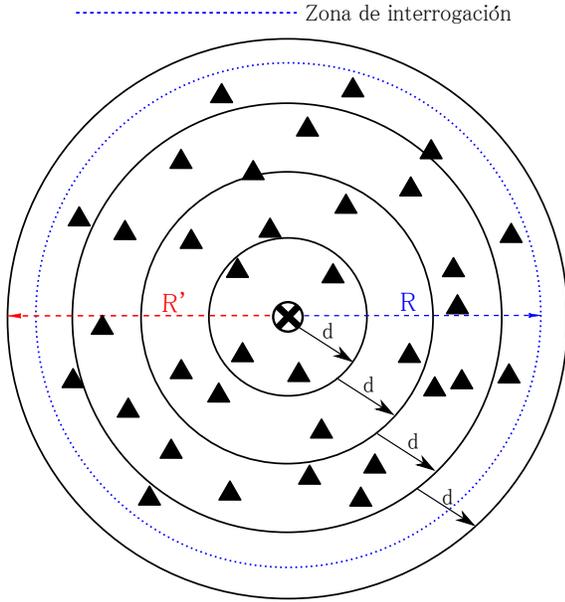


Figura 4.4: Áreas de tamaños diferentes: d constante.

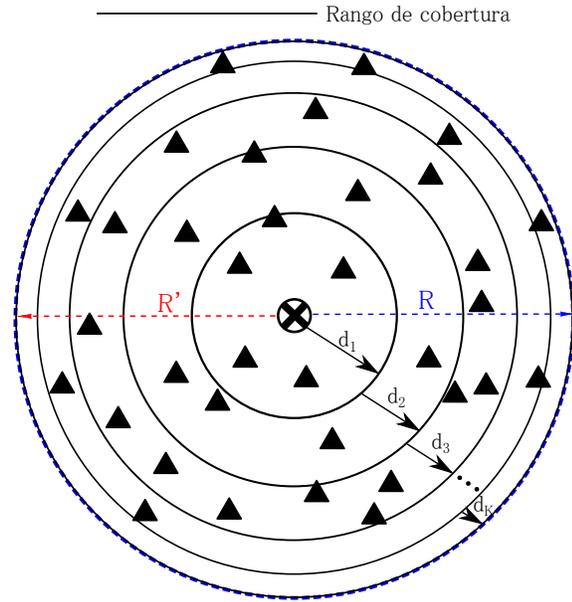


Figura 4.5: Áreas de tamaños iguales: d variable.

Como se puede observar en la Figura 4.4, cuando d es constante, las áreas son diferentes. En este caso, d se agrega al actual R' . Cuando se elige k , el lector calcula d_i para garantizar la misma área para cada grupo i y cada grupo j ($i \neq j$), tal y como se muestra en la Figura 4.5. Nuevamente, d_i se agrega al actual R' . Nótese que $R' \geq R$ cuando d es constante y $R' = R$ para k constante.

De hecho, se puede estimar el número total de etiquetas, \hat{n} , en la zona de interrogación tras explorar el conocimiento *a priori* de las condiciones en cada grupo y el número de etiquetas identificadas en el primer grupo, m_1 . Adicionalmente, con tal información se puede estimar el número de etiquetas en cada grupo, \hat{m}_i , ya que m_1 es una fracción del número total de etiquetas en la zona de interrogación. Por lo tanto, con un análisis de superficie se puede estimar el número total de etiquetas con base en la relación que existe entre A_R y A_i . Así, el número total de etiquetas estimado está dado por:

$$\hat{n} = \begin{cases} m_1 A_R / A_1 & \text{cuando } A_i \neq A_j \forall i \neq j \\ km_1 & \text{cuando } A_i = A_j \forall i \neq j. \end{cases} \quad (4.20)$$

Correspondientemente, el número estimado de etiquetas en el i -ésimo grupo está dado por:

$$\hat{m}_i = \begin{cases} \hat{n}A_i/A_R & \text{cuando } A_i \neq A_j \forall i \neq j \\ m_1 & \text{cuando } A_i = A_j \forall i \neq j. \end{cases} \quad (4.21)$$

Una vez que se conoce el valor de \hat{m}_i , este se puede aprovechar en la ejecución del protocolo EPC Gen2. En particular, la inicialización de este último se puede mejorar tras fijar el tamaño de la trama asociada al primer CI igual al valor de \hat{m}_i . De esta manera, se evita la ejecución del primer CI que sirve para encontrar un tamaño de trama adecuado para realizar el proceso de identificación.

El Algoritmo 1 resume la operación de la propuesta que acabamos de describir, el cual se conforma de dos fases: el *particionamiento de la zona de interrogación* y el *proceso de identificación*. Durante la primera fase, en las líneas 4–22, el sistema terminal divide el conjunto de etiquetas en k grupos. Entonces, durante la segunda fase, líneas 26–28, el lector ejecuta el proceso de identificación para el primer grupo y después, en la líneas 32–36, el lector estima el número de etiquetas en cada subzona. En la línea 38, el lector utiliza el número de etiquetas estimado en cada grupo y calcula el valor inicial de Q . Posteriormente en las líneas 40–42, el lector ejecuta el proceso de identificación para el resto de los grupos utilizando el valor correspondiente de Q . El proceso de identificación se ejecuta de forma incremental con el fin de cubrir el total de la zona de interrogación, y para garantizar que solamente una subzona esté activa a la vez.

Número conocido de etiquetas: Número de grupos basado en la cardinalidad de la población

Como se mencionó, el número de etiquetas en la zona de interrogación es generalmente desconocido para la mayoría de las aplicaciones RFID. No obstante, existe un subconjunto de aplicaciones para el que dicho dato se conoce o se aproxima antes del proceso de identificación; gestión de inventarios o tareas de conteo son algunos ejemplos de aplicaciones en esta categoría. Para tales casos, se puede aprovechar el conocimiento previo relacionado al número de etiquetas en la zona de interrogación para ejecutar dicho proceso de una manera más eficiente.

Ya que se conoce el número y distribución de las etiquetas en la zona de interrogación, se puede mejorar el desempeño de todo el proceso de identificación con base en dicha información. Para llevarlo a cabo, se necesita calcular el número de grupos o subzonas a crear tal que, el número esperado de etiquetas por grupo, $E[m]$, sea el mismo y menor que un umbral determinado, teniendo en cuenta que todos los grupos tienen la misma área de cobertura. Sea W una constante que define el umbral para el número de etiquetas dentro de cada grupo, $E[m]$ debe cumplir que

$E[m] \leq W$, y por lo tanto el número de grupos está dado por:

$$k \geq \left\lceil \frac{N}{W} \right\rceil. \quad (4.22)$$

De la Ecuación (4.22), se calcula el número de grupos y de las ecuaciones (4.11) y (4.12) se puede encontrar el área de cobertura de cada grupo. Ya que el número esperado de etiquetas en cada grupo debe ser menor o igual que W , podemos utilizar el estándar EPC Gen2 con un tamaño de trama igual a W para alcanzar la máxima eficiencia del sistema. Sin embargo, esta opción no es la mejor. Esto se debe a que el número de etiquetas en la zona de interrogación disminuye conforme el proceso de identificación avanza. Por lo tanto, se puede mejorar el desempeño del estándar EPC Gen2 si se inicia el proceso de identificación en cada grupo con el tamaño de trama igual a W y posteriormente se puede utilizar cualquier mecanismo para adaptar el tamaño de trama para el resto del proceso de identificación. Nótese que W es un parámetro de suma importancia, ya que este define el tamaño inicial de la trama en cada grupo.

El pseudocódigo correspondiente se presenta en el Algoritmo 2. La fase, en las líneas 5–13, es previa al proceso de identificación, en la que el sistema terminal calcula el número de grupos con base en el total de etiquetas en la zona de interrogación y el número esperado de etiquetas en cada grupo. La segunda fase que comienza en la línea 14, corresponde al proceso de identificación, en donde el lector calcula el valor inicial de Q para cada grupo. Finalmente, en las líneas 17-19, el lector ejecuta el proceso de identificación en cada subzona utilizando el valor de Q correspondiente. Al igual que en el Algoritmo 1, la fase 1 del Algoritmo 2 la realiza el sistema terminal como una fase previa al proceso de identificación.

Para evaluar el desempeño de esta propuesta, se implementa la funcionalidad del estándar EPC Gen2 tanto en el 1R-LCA-1IZ como en el PDC. El objetivo de esta comparación es mostrar las ventajas de EPC Gen2 cuando la zona de interrogación se divide de una manera inteligente. Se elige Matlab® para implementar y evaluar dichos mecanismos como sigue:

- Se implementan dos versiones del estándar EPC Gen2. La primera, llamada *EPCGen2*, utiliza el protocolo Q para adaptar el tamaño de la trama en cada CI. La segunda versión, denominada *EPCGen2Q*, utiliza la heurística presentada en [19] junto con la función de estimación propuesta en [53] para adaptar el tamaño de la trama en cada CI. También, se consideran los siguientes casos:
 - $Q_{ini} = 4$. El estándar requiere fijar el valor de Q a 4, es decir, $Q_{ini} = 4.0$. De esta manera, con *EPCGen2* se utiliza dicho valor para iniciar el proceso de identificación en cada grupo.

Algoritmo 1 Division de la zona de interrogación para una conjunto de etiquetas con cardinalidad desconocida.

Phase 1 - Tag set partitioning

```

1: // Coverage area approximation according to Equation (2) from [1]
2:  $R = \text{ApproximateRadiusArea}(P, Greader, Gtag)$ 
3:  $A_R = \pi \times R^2$ 
4: if (Is  $d$  constant?) then                                     ← Different Areas
5:      $k = \lceil \frac{R}{d} \rceil$ 
6:      $A_1 = A_{Accum} = \pi \times d^2$ 
7:      $r_1 = d$ 
8:     for  $i = 2$  to  $k$  do
9:          $r_i = i \times r_1$ 
10:         $A_i \simeq \pi \times (i \times d)^2 - A_{Accum}$ 
11:         $A_{Accum} = A_{Accum} + A_i$ 
12:    end for
13:     $w = \frac{A_R}{A_1}$ 
14: else                                                         ← Equal Areas
15:     $d_1 = r_1 = \frac{R}{\sqrt{k}}$ 
16:     $A_1 \simeq \pi \times d_1^2$ 
17:    for  $i = 2$  to  $k$  do
18:         $r_i = \sqrt{i} \times r_1$ 
19:         $d_i = r_i - r_{i-1}$ 
20:         $A_i \simeq \pi \times d_i^2$ 
21:    end for
22:     $w = k$ 
23: end if

```

Phase 2 - Identification Process

```

24:  $Q_{ini} = 4$                                                ← Required by EPCGEN2
25:  $Response = \text{TRUE}$ 
26: while ( $Response = \text{TRUE}$ ) do
27:      $[Response, m_1] = \text{EPCGEN2}(Q_{ini}, r_1)$ 
28: end while
29: // Estimation of the total number of tags
30:  $\hat{n} = w \times m_1$ 
31: for  $i = 2$  to  $k$  do
32:     if (Is  $d$  constant?) then
33:          $\hat{m}_i = \hat{n} \times \frac{A_i}{A_R}$                                ← Tags estimation in cluster  $i$ 
34:     else
35:          $\hat{m}_i = m_1$ 
36:     end if
37: // Set  $Q_{ini}$  to the estimated number of tags in cluster  $i$ 
38:      $Q_{ini} = \text{FindQ}(\hat{m}_i)$ 
39:      $R' = r_i$                                                ← Increase the coverage area
40:     while ( $Response = \text{TRUE}$ ) do
41:          $[Response] = \text{EPCGEN2}(Q_{ini}, R')$ 
42:     end while
43: end for

```

- $Q_{ini} = \hat{m}_i$. Para aprovechar las ventajas de PDC, y puesto que se puede estimar el número de etiquetas en cada grupo, se modifica *EPCGen2Q* para iniciar el proceso de identificación en cada grupo con un valor diferente, es decir, $Q_{ini} = \hat{m}_i$. Así, se utiliza $Q_{ini} = \hat{m}_i$ para iniciar el proceso de identificación en cada subzona. Esta versión se denomina *EPCGen2QMod*.

Algoritmo 2 Division de la zona de interrogación para una conjunto de etiquetas con cardinalidad conocida.

Phase 1 - Tag set partitioning

```

1: // Coverage area approximation according to Equation (2) from [1]
2:  $R = \text{ApproximateRadiusArea}(P, \text{Greeder}, G\text{tag})$ 
3:  $A_R = \pi \times R^2$ 
4:  $N = \text{NumberOfTags}()$ 
5:  $\text{Threshold}_{\hat{m}_i} = W$ 
6:  $k \geq \lceil \frac{N}{\text{Threshold}_{\hat{m}_i}} \rceil$ 
7:  $d_1 = r_1 = \frac{R}{\sqrt{k}}$ 
8:  $A_1 \simeq \pi \times d_1^2$ 
9: for  $i = 2$  to  $k$  do
10:    $r_i = \sqrt{i} \times r_1$ 
11:    $d_i = r_i - r_{i-1}$ 
12:    $A_i \simeq \pi \times d_i^2$ 
13: end for

```

← Total number of tags
 ← Desired number of tags per cluster

Phase 2 - Identification Sequence with PDC-Scheme

```

14:  $Q_{\text{ini}} = \text{FindQ}(\text{Threshold}_{\hat{m}_i})$ 
15: for  $i = 1$  to  $k$  do
16:    $R' = r_i$ 
17:   while ( $\text{Response} = \text{TRUE}$ ) do
18:      $[\text{Response}] = \text{EPCGEN2}(Q_{\text{ini}}, R')$ 
19:   end while
20: end for

```

← Increase the coverage area

- Para este caso en particular, se considera que el lector está centrado en la zona de interrogación con un rango de 10 metros de cobertura.
- Para el caso cuando el número de grupos es constante:
 - Se varía el valor del paso d en el rango de $[0.2, \dots, 1]$ metros.
 - Se varía el número de grupos k de 10 a 50.
- Para el caso cuando el número de grupos está basado en la población:
 - Se varía W de 15 a 255. Se eligen esos valores de acuerdo con los resultados obtenidos en [17], donde se concluye que un valor adecuado para iniciar el proceso de identificación es $Q = 7$.
- Se ejecutan 300000 experimentos a fin de obtener resultados confiables.

4.2.3. Resultados

Los resultados para un número constante de grupos con el *EPCGen2*, d constante y k constante, se presentan en las Figuras 4.6 y 4.7, respectivamente. En la Figura 4.6 se reporta el retardo de identificación en el que incurre *EPCGen2* para distintos valores de d . Como se puede

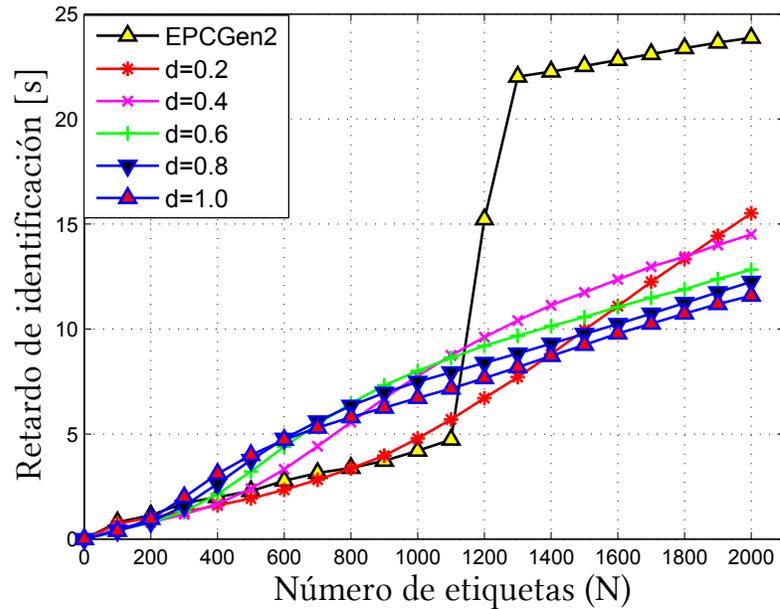


Figura 4.6: EPC Gen2 con d constante.

observar, los mejores resultados se obtienen con $d = 0.2$, ya que así se tiene el menor retardo para la mayoría de los subconjuntos de etiquetas evaluados. Adicionalmente, se nota que con $d = 1.0$ los resultados tienen un mejor comportamiento cuando el número de etiquetas es mayor que 1400. Esto sugiere una relación directa entre el valor de d y la cardinalidad del conjunto de etiquetas, es decir, que para conjuntos de cardinalidad pequeña es mejor utilizar valores pequeños de d , mientras que para conjuntos con cardinalidad grande es mejor utilizar valores grandes de d . Nótese que aún cuando no se obtienen mejores resultados con el menor valor de d , su comportamiento es el más estable para todo el conjunto de etiquetas evaluado en general.

En la Figura 4.7 se presenta el retardo de identificación obtenido para el protocolo *EPCGen2* con diferentes valores de k . Como se puede observar, los mejores resultados se obtienen con el mayor valor de k . La razón es que existe una relación inversa entre el número de etiquetas por grupo y el número de grupos en la zona de interrogación, ya que cuando hay más grupos, menos etiquetas hay en cada uno de ellos. Esto resulta en un bajo retardo de identificación para valores grandes de k . Se puede observar que cuando el número de etiquetas es mayor que 1800, es mejor elegir $k = 10$ en lugar de un valor mayor de k . Esto se debe a que *EPCGen2* alcanza rápidamente el estado estable de la trama.

Los resultados para un número constante de grupos con *EPCGen2Q* se presentan en las Figuras 4.8 a 4.11. La Figura 4.8 muestra el retardo de identificación obtenido por el protocolo

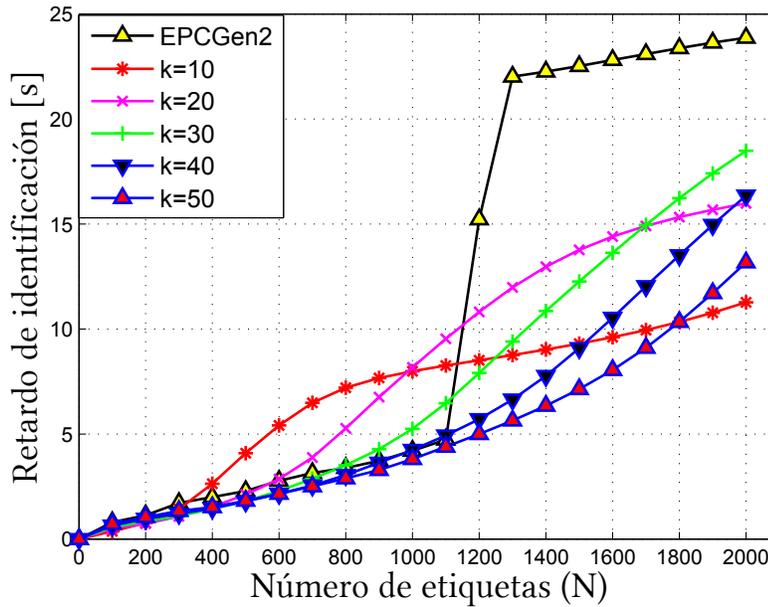


Figura 4.7: EPC Gen2 con k constante.

EPCGen2Q para distintos valores de d . En este caso, se observa que los mejores resultados se obtienen con $d = 0.2$ para la mayoría de los casos, ya que con $d = 1$ se obtienen mejores resultados para el rango de 100 a 300 etiquetas. Este comportamiento sugiere que el protocolo *EPCGen2Q* escala muy bien con la cardinalidad del conjunto de etiquetas. Así, cuando se reduce el número de etiquetas que participan al mismo tiempo, ya sea por el particionamiento de la zona de interrogación o por medio de alguna otra técnica de división, es necesario utilizar más tiempo para identificar el mismo conjunto de manera separada.

En la Figura 4.9 se puede observar el retardo de identificación del protocolo *EPCGen2QMod*. Es evidente que se obtiene el menor retardo de identificación cuando $d > 0.4$ para todos los casos. En ese sentido, debido a la similitud de los resultados para los distintos valores de d , pareciera que existe un límite inferior en el retardo de identificación exhibido para este tipo de mecanismos.

En la Figura 4.10, se presentan los resultados obtenidos por *EPCGen2Q* para distintos valores de k . Se puede apreciar un comportamiento similar al de *EPCGen2Q* para distintos valores de d . Es claro que, a partir de las 500 etiquetas, los mejores resultados se alcanzan con $k = 50$, ya que cuando el número de etiquetas es menor que 500, los resultados varían.

Los resultados para el protocolo *EPCGen2QMod* con distintos valores de k se muestran en la Figura 4.11. Se observa que existe una gran mejoría respecto al retardo de identificación con $k = 50$, ya que para la mayoría de los valores de N , $k = 50$ permite obtener mejoras de hasta

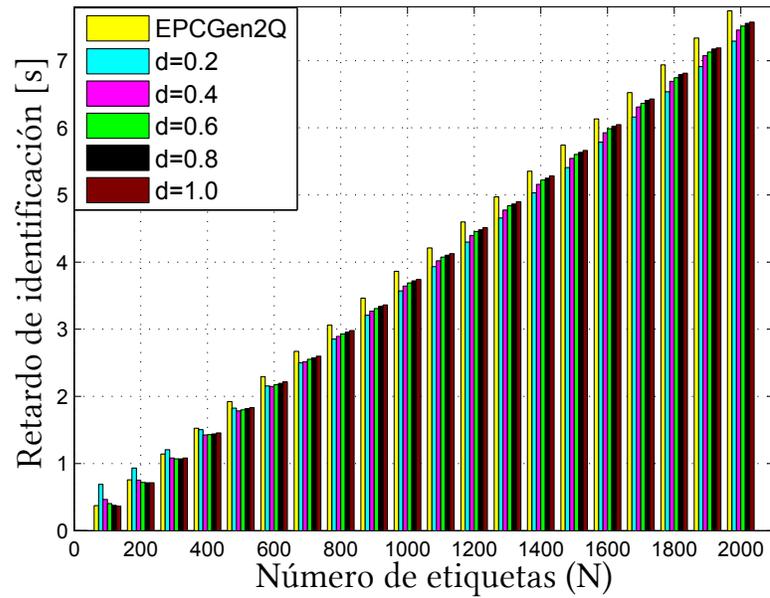


Figura 4.8: EPC Gen2 con Q óptima y d constante.

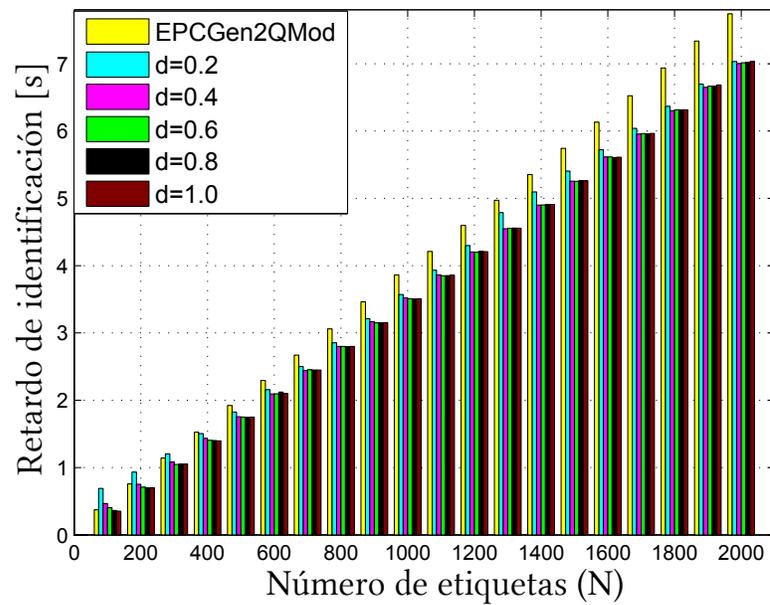


Figura 4.9: EPC Gen2 con Q óptima modificado para iniciar con un tamaño de trama igual al número estimado de etiquetas y valor constante de d .

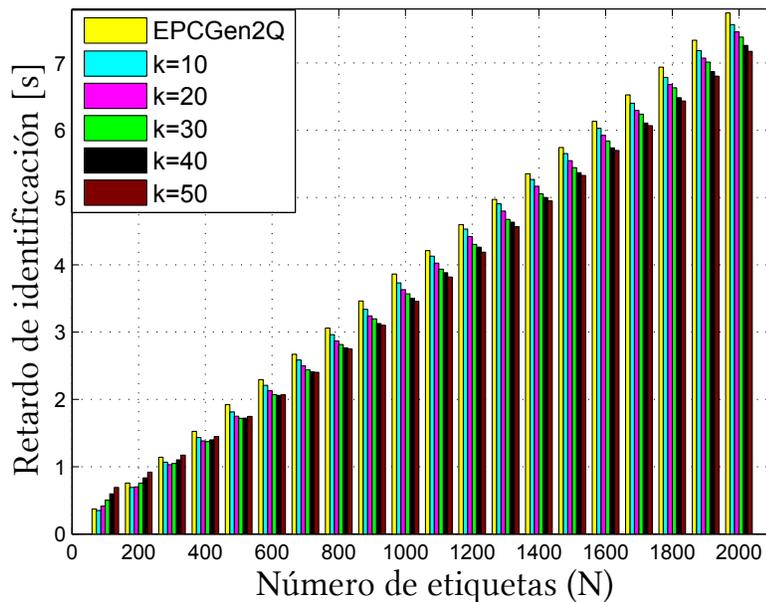


Figura 4.10: EPC Gen2 con Q óptima y k constante.

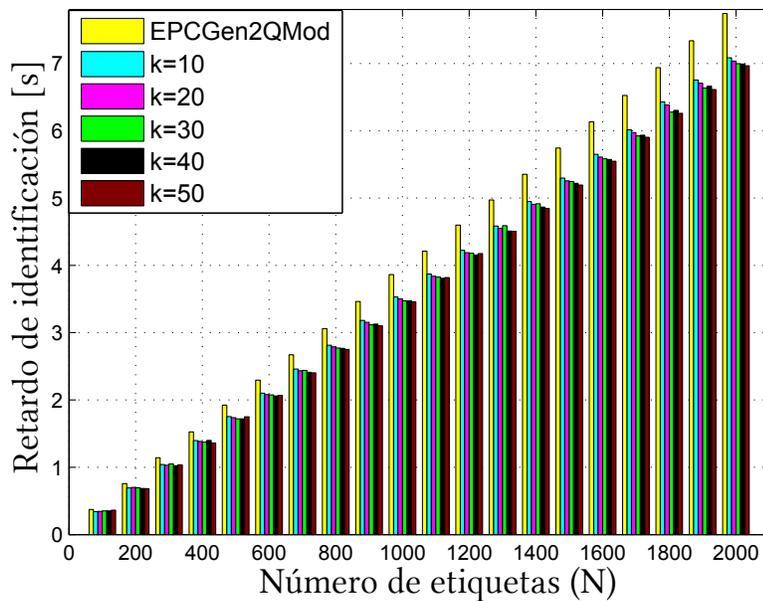


Figura 4.11: EPC Gen2 con Q óptima modificado para iniciar con un tamaño de trama igual al número estimado de etiquetas y k constante.

500 ms respecto a los otros valores.

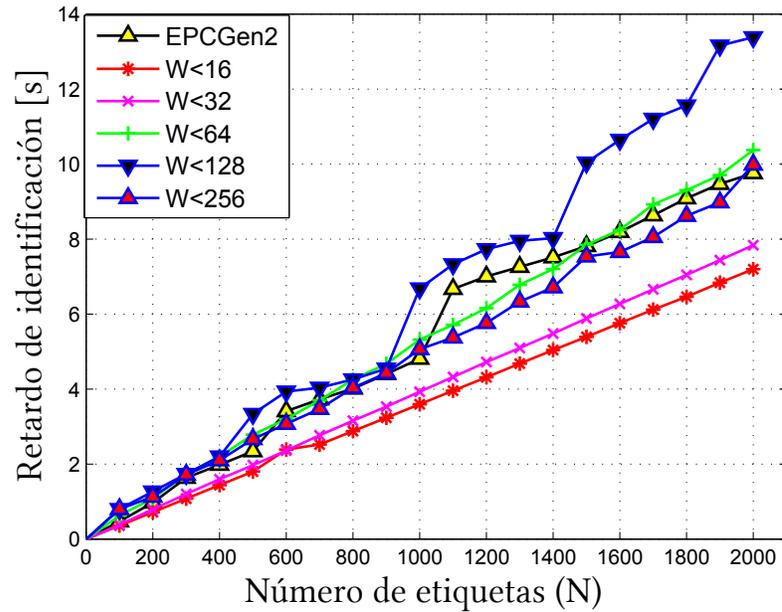


Figura 4.12: EPC Gen2 con k óptima y Q inicial.

Por otro lado, los resultados para el número de grupos basado en el población se presentan en las Figuras 4.12 y 4.13. En la Figura 4.12 se muestran los resultados obtenidos por el protocolo *EPCGen2* cuando el número de etiquetas a identificar en la zona de interrogación es conocido. Se evalúa *EPCGen2* para distintos valores de W , siendo $W < 16$ el mejor de los casos. Esto se debe a que con $W < 16$ se evita que el tamaño de la trama crezca rápidamente, esto es, se reduce la probabilidad de colisión en cada CI. En ese sentido, el protocolo *EPCGen2* exhibe su mejor desempeño cuando el número de etiquetas por grupo es menor que 32.

Finalmente, en la Figura 4.13 se presentan los resultados para el protocolo *EPCGen2QMod* con distintos valores de W . Es claro que los mejores resultados se obtienen cuando $W < 16$. En este caso, la mejora obtenida es pequeña, ya que sólo se logra reducir un poco el retardo de identificación del protocolo *EPCGen2Q* cuando este opera con conocimiento previo. En ese sentido, se nota que este protocolo escala muy bien con la densidad de las etiquetas.

La propuesta presentada en esta sección, así como los resultados mostrados arriba están reportados y publicados en [9]. En ese trabajo se puede encontrar más información respecto a la implementación de los protocolos aquí descritos, junto con resultados adicionales.

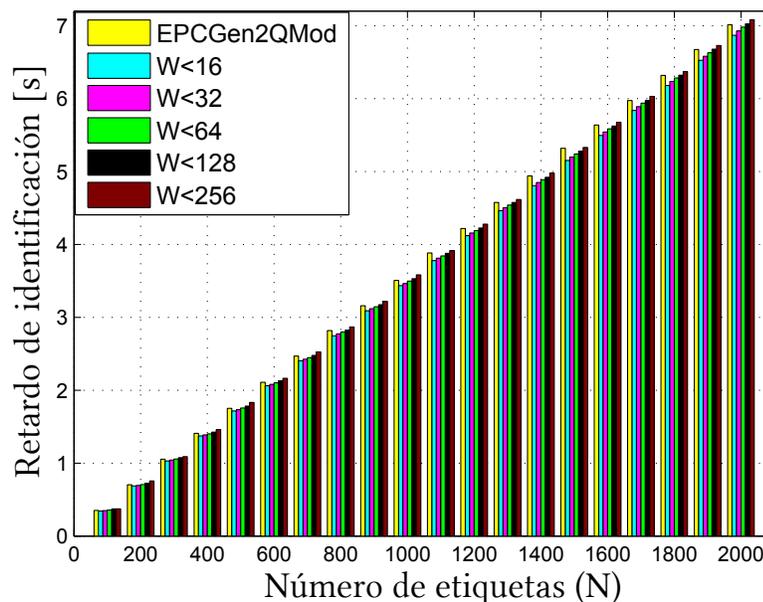


Figura 4.13: EPC Gen2 con Q óptima, k óptima y Q inicial.

4.2.4. Discusión

1R-LCA-kIZ es un mecanismo muy interesante que promete mejorar el rendimiento de los sistemas RFID en general. Particularmente, se ha demostrado que el esquema PDC con protocolos deterministas puede mejorar el proceso de identificación. Sin embargo, poco se ha estudiado la inclusión de protocolos estandarizados en el esquema PDC, ya que si bien los deterministas son ampliamente aceptados, no son implementados en todas las aplicaciones de dicha tecnología. Por consiguiente, la inclusión de protocolos estandarizados en los nuevos esquemas de identificación es crucial, pero no una tarea fácil. Esto se debe principalmente a la aleatoriedad introducida por este tipo de protocolos.

Un enfoque para mejorar el rendimiento de los nuevos mecanismos de identificación con protocolos estandarizados, es aprovechando el conocimiento adquirido durante dicho proceso. Bajo esta premisa y considerando el esquema PDC, se encuentra un mecanismo de particionamiento que permite dividir la zona de interrogación de modo que las características de los protocolos estandarizados se pueden aprovechar para mejorar el rendimiento de todo un sistema RFID. Las mejoras obtenidas hacen del esquema 1R-LCA-kIZ una buena opción para ambientes densos, pero no para escenarios con etiquetas móviles. Adicionalmente, parece que existe una cota inferior para el retardo exhibido por los protocolos basados en ALOHA cuando estos se ejecutan el esquema

1R-LCA-kIZ. Dicho límite se alcanza cuando el número de grupos en la zona de interrogación del lector es el mayor posible, lo cual satisface la condición de optimización de este tipo de protocolos cuando operan con el enfoque tradicional.

CAPÍTULO 5

ENFOQUE DISTRIBUIDO PARA SISTEMAS RFID PASIVOS

El enfoque distribuido es un concepto novedoso bajo el cual se pueden distinguir varios mecanismos de identificación. Puesto que estos son relativamente nuevos, este enfoque ha sido poco explorado. Algunas de sus características son:

- Considera la participación de lectores y etiquetas, lo que facilita su inclusión en los sistemas RFID actuales
- Promete un uso eficiente de los recursos de la red
- Aún cuando se considera distribuido, el lector es la parte central de la red. Esto se debe a que este requiere retroalimentación de la red y al mismo tiempo provee de energía a las etiquetas.
- Aumenta la complejidad en el diseño de los protocolos de comunicación
- Aumenta la complejidad para el despliegue de la red

A continuación, se retoman cada uno de los mecanismos distribuidos presentados en el Capítulo 3, y se discuten las propuestas realizadas en cada uno de ellos.

5.1. Esquema AS-LCA-kIZ

AS-LCA-kIZ incluye un dispositivo adicional en la arquitectura de red RFID. Tiene la misma área de cobertura que 1R-LCA-1IZ, pero no los mismos dispositivos, por lo que puede ser visto como una extensión del mismo.

AS-LCA-kIZ es nuevo comparado con otros mecanismos de identificación. La primera propuesta de este tipo, que es el *DR-Scheme*, se presenta en [21]. Este considera un dispositivo llamado *fielder* o *cluster-head*. El *fielder* tiene dos interfaces de comunicación y características similares a las de un nodo de una red de sensores inalámbricos, ya que tiene restricciones de energía y capacidades de procesamiento y almacenamiento limitadas. Una de sus interfaces es para establecer comunicación con las etiquetas y la otra es para la comunicación con el lector. Su función principal es ayudar al lector a crear microzonas o subzonas de interrogación. Para ello, ajusta el coeficiente de reflectividad de las etiquetas a fin de garantizar la comunicación en un área determinada.

5.1.1. Análisis de AS-LCA-KIZ

El *DR-Scheme* [21] se ha evaluado con protocolos basados en árbol en [56]. Los resultados obtenidos muestran una reducción en el número de colisiones y el número de consultas transmitidas. Sin embargo, la evaluación ahí considerada no es suficiente para garantizar un desempeño eficiente de dicho mecanismo en aplicaciones del mundo real, ya que el número de etiquetas evaluadas es muy pequeño según lo considerado en la literatura [17, 10]. Además, se deja de lado la evaluación con protocolos estandarizados, lo que no solo limita su uso, sino que además reduce el impacto de esta tecnología en general.

Con base en las características del *DR-Scheme*, se observa que existen dos enfoques para mejorar su rendimiento. El primero consiste en diseñar protocolos de comunicación específicos para este mecanismo que aprovechan la naturaleza distribuida del mismo. El segundo consiste en paralelizar la comunicación entre *fielders* y etiquetas para acelerar el proceso de identificación.

5.1.2. Propuesta: EPC Gen2 para el AS-LCA-kIZ

En primera instancia, se nota la necesidad de abandonar el modelo ITF (*Interrogator Talks First*) para aprovechar las ventajas del *DR-Scheme* [11]. Entonces, se propone reemplazar el modelo ITF de las redes RFID con uno que le permita al lector aprovechar ambos canales de

Tabla 5.1: Principales comandos utilizados por el estándar EPC Gen 2.

Comando	Código	Longitud
Query	1000	22 bits
QueryRep	00	4 bits
QueryAdjust	1001	9 bits
ACK	01	98 bits

comunicación independientes. Así, el lector no tiene que esperar a obtener el resultado de la consulta actual en cada una de las subzonas para poder enviar información a las etiquetas.

Además, se plantea una versión distribuida de EPCGen2 para el *DR-Scheme*. Esta, llamada EPCGen2DP, busca maximizar las ventajas del enfoque distribuido mientras que al mismo tiempo mantiene las características esenciales de EPCGen2. Con EPCGen2DP, el lector utiliza los mismos comandos que con el estándar. La Tabla 5.1 lista estos comandos con sus características más relevantes. En ese sentido, puesto que cualquiera de los tres tipos de ranuras puede involucrar a cualquiera de los comandos *Query*, el tiempo utilizado por cada una de ellas puede variar de una a otra dependiendo de las características del canal de comunicación y el tamaño del paquete.

Respecto a las respuestas, el lector necesita retroalimentación del estado de la red a fin de mejorar el proceso de identificación. En particular, el resultado de cada ranura representa información útil para el lector, ya que este puede adaptar el tamaño de la trama subsecuente de acuerdo a la información obtenida en cada ranura. Así, con base en el funcionamiento del *DR-Scheme* [21] y en los requerimientos establecidos por el estándar EPC Gen2, se concluye que el *cluster-head* puede informar al lector el resultado de una consulta, en su respectiva subzona, por medio de los siguientes mensajes:

- *Reply*. El *cluster-head* envía este mensaje a lector para indicarle que la consulta actual ha producido una colisión o no ha producido alguna respuesta. Este mensaje consiste de dos bits para la cabecera del mensaje y uno para la carga útil. El mensaje contiene un 0 para indicar una ranura vacía y un 1 para indicar una ranura con colisión. El tamaño del mensaje permite optimizar el tiempo de ejecución del protocolo en esquemas distribuidos.
- *ID*. El *cluster-head* envía este mensaje al lector para indicarle que se ha identificado una etiqueta. En este caso, la versión distribuida del EPC Gen2 no utiliza el paquete RN16, el cual se usa para evitar colisiones demasiado largas. Al igual que el mensaje *Reply*, este mensaje considera dos bits de cabecera para indicar que corresponde al resultado de una ranura.

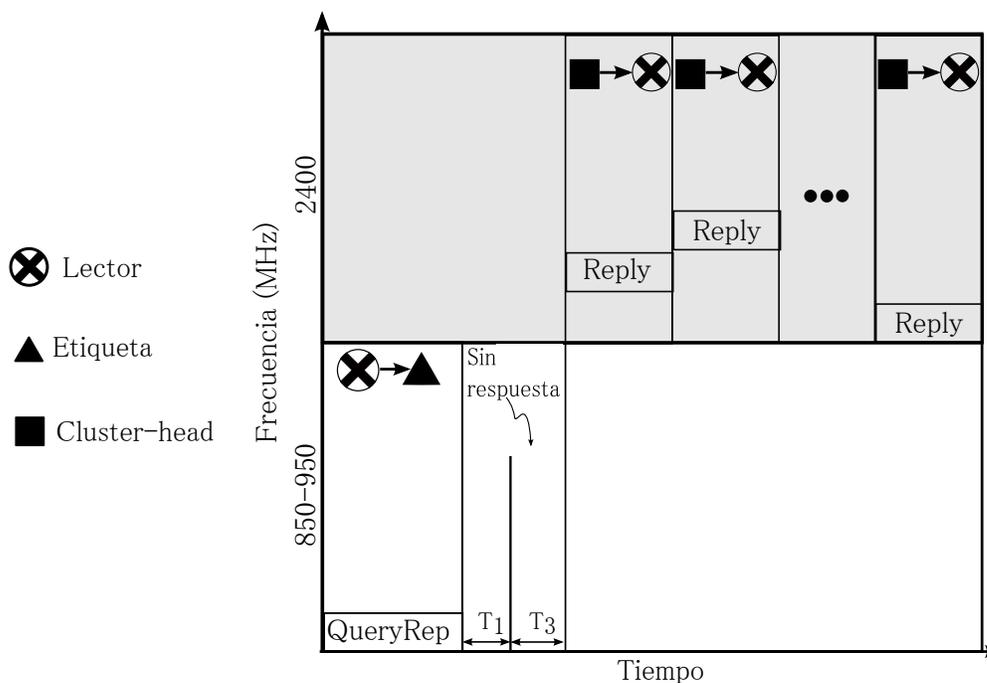


Figura 5.1: Ranura vacía en el *DR-Scheme*.

Así, la comunicación en EPCGen2DP es como sigue: el lector emite solicitudes de información que se reciben por las etiquetas y los *cluster-head* que están en su zona de interrogación. Luego de cada solicitud, las etiquetas intentan responder de manera ordenada. Las respuestas de las mismas se reciben en los *cluster-heads*, quienes a su vez informan al lector el resultado de la consulta actual. Las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 describen el funcionamiento de EPCGen2DP con el modelo de comunicación que se acaba de describir. Cada figura corresponde a uno de los posibles resultados producidos por una consulta: sin respuesta, exitosa o con colisión.

En el Algoritmo 3 se presenta el pseudocódigo del protocolo EPCGEN2DP. El procedimiento realizado por el lector comprende de la línea 1 a la 42. En este caso, de las líneas 1 a 3, el lector pone todos los *cluster-heads* en estado *FORWARD*. El proceso de identificación comienza en la línea 6, cuando el lector envía un paquete *Query* a las etiquetas. En la línea 16 el lector espera el resultado de la consulta actual en cada una de las subzonas, para lo cual espera un tiempo determinado (*timeout*) para obtener información en su segunda interfaz. En caso de que el lector reciba un mensaje *ID*, considerado en la línea 18, el lector inmediatamente envía un paquete *ACK_{ID}* en su interfaz RFID, línea 20, mientras continúa recibiendo información en su segunda interfaz. En caso que el lector reciba un mensaje *Reply*, aquel lo decodifica para distinguir entre ranura vacía y con colisión, líneas 21-26. Después, en la línea 30 el lector continúa el proceso de

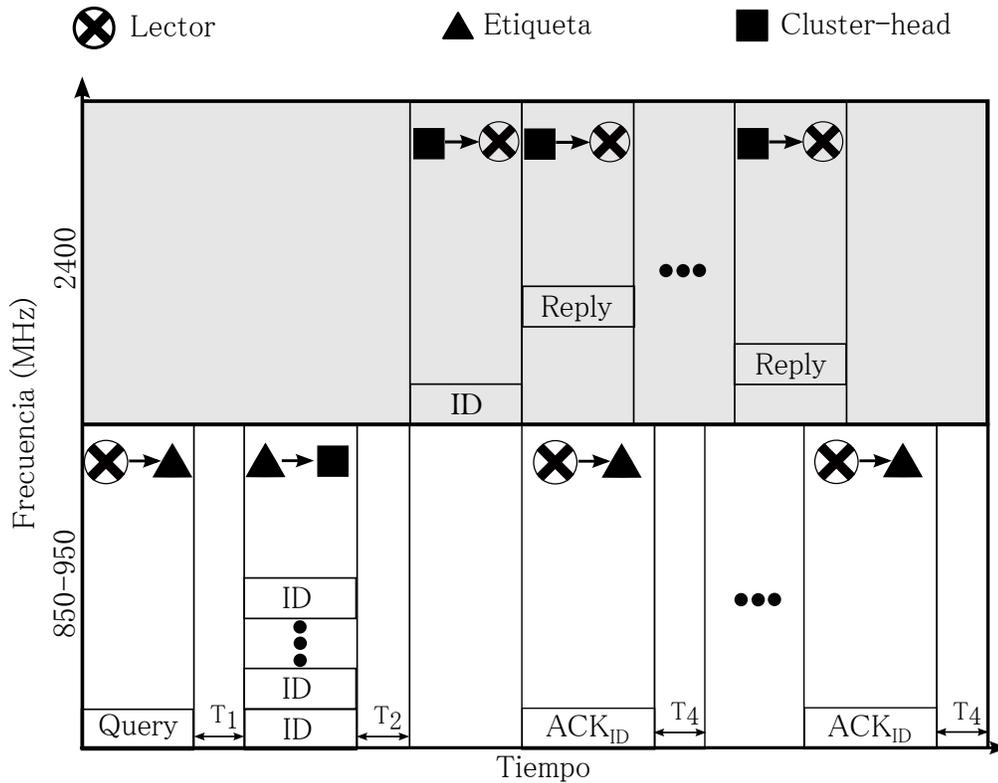


Figura 5.2: Ranura exitosa o con identificación en el *DR-Scheme*.

identificación enviando un paquete *QueryRep*.

En este punto, se observa que *DR-Scheme* es un mecanismo distribuido bastante prometedor que no ha sido completamente aprovechado. Con el diseño de EPCGen2DP se busca maximizar el rendimiento de *DR-Scheme*. Sin embargo, existen diversos aspectos que se pueden mejorar directamente desde su concepción, como son:

Comunicación paralela entre el lector y los cluster-heads. *DR-Scheme* sugiere utilizar el protocolo ZigBee [22] para comunicar al lector con los *cluster-heads*. ZigBee permite utilizar hasta 16 canales independientes en la banda de 2.4 GHz. Por un lado, esto activa la comunicación paralela entre el lector y los *cluster-heads*, mientras que por otro limita el número de subzonas posibles en la zona de interrogación.

Comunicación paralela entre los cluster-heads y las etiquetas. Ya que es posible que los *cluster-heads* se comuniquen con las etiquetas, se propone que estos sean los encargados silenciarlas. Así, los mensajes de confirmación de identificación (*ACK_{ID}*) se pueden enviar en paralelo, lo que podría acelerar el proceso de identificación. Para ello, se

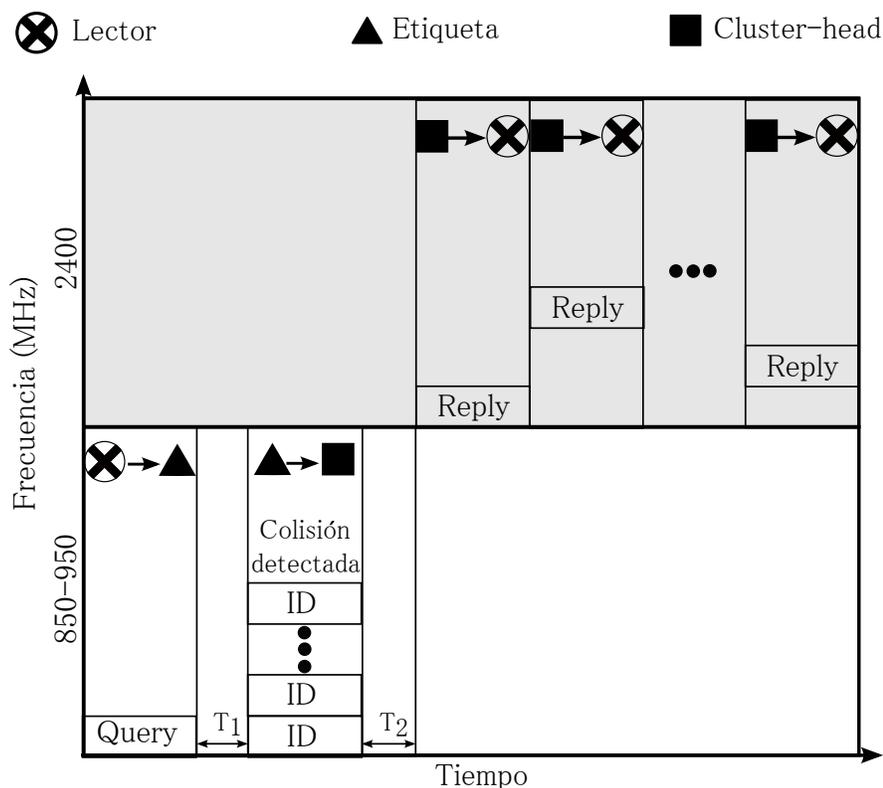


Figura 5.3: Ranura con colisión en el *DR-Scheme*.

necesitan coordinar las transmisiones realizadas por los *cluster-heads*, pues existen zonas de traslape e interferencia entre subzonas. Entonces, se sugiere asignar diferentes turnos a los *cluster-heads* a fin de evitar la interferencia cuando se realiza una transmisión [57]. En este sentido, se observa que se necesitan dos turnos para garantizar la transmisión de información libre de interferencia desde cualquier *cluster-head*, tal y como lo muestra la Figura 5.6.

Eliminación de la sobrecarga de comunicación entre los cluster-heads y el lector.

Es posible reducir la sobrecarga de comunicación de información entre los *cluster-heads* y el lector. Para esto, se necesita mantener el ID de las etiquetas en los *cluster-head*, en lugar de que estos los reexpidan. Esto supone memoria adicional en los *cluster-heads* y al mismo tiempo reduce la cantidad de información transmitida desde los *cluster-heads* hacia el lector, ya que el resultado de una consulta se puede transmitir con el mínimo de información. Esta idea es completamente válida, ya que el lector no requiere conocer el ID de cada etiqueta, basta con que conozca el resultado de una ranura para mejorar el uso de los recursos. Así, los IDs de las etiquetas se mantienen en los *cluster-heads* hasta el final del

Algoritmo 3 Pseudocódigo del protocolo distribuido EPC Gen2 para la identificación de etiquetas.

```

Reader procedure
1: for all cluster  $k$  do
2:    $Send(k, FORWARD)$                                       $\leftarrow$  Put all cluster-heads in FORWARD state
3: end for
4:  $Q_{ini} = 4,0$                                               $\leftarrow$  Initial Q value
5:  $Q = Q_{ini}$ 
6:  $Send(Query, Q)$ 
7: while ( $\exists Tag$  to be identified) do
8:    $Et[k] = 0$                                               $\leftarrow$  Estimated number of tags in cluster k
9:    $Q[k] = 0$                                               $\leftarrow$  Q value for the cluster k
10:   $N\_Empty[k] = 0$                                         $\leftarrow$  Number of empty slots for cluster k
11:   $N\_Single[k] = 0$                                         $\leftarrow$  Number of single slots for cluster k
12:   $N\_Collision[k] = 0$                                       $\leftarrow$  Number of collision slots for cluster k
13:   $L = 2^Q - 1$                                             $\leftarrow$  Frame length
14:  for  $i = 1$  to  $L$  do
15:    for all clusters do
16:      while Not  $QueryTimeOut$  do
17:         $Receive(Message)$ 
18:        if ( $Message == ID$ ) then
19:           $N\_Single[i] = N\_Single[i] + 1$ 
20:           $SEND(ACK_{ID})$ 
21:        else if ( $Message == Reply$ ) then
22:          if ( $Collision$ ) then
23:             $N\_Collision[i] = N\_Collision[i] + 1$ 
24:          else
25:             $N\_Empty[i] = N\_Empty[i] + 1$ 
26:          end if
27:        end if
28:      end while
29:    end for
30:     $Send(QueryRep)$ 
31:  end for
32:  for all Clusters do
33:    if ( $N\_Empty[i] == L$ ) then
34:       $Send(k, SILENT)$ 
35:       $S_k \leftarrow SILENT$ 
36:    end if
37:     $Et[k] = 2,39 * N\_Collision[k]$                           $\leftarrow$  Estimation function [53]
38:     $Q[k] = FINDFRAME(Et[k])$                               $\leftarrow$  Select the optimal value of  $Q$  [19]
39:  end for
40:   $Q = max(Q[k])$ 
41:   $Send(QueryAdj, Q)$ 
42: end while

```

proceso de identificación, para posteriormente difundirlos en la red y/o al sistema terminal a través de un canal de alta velocidad.

Reducción de la sobrecarga de comunicación entre las etiquetas y los cluster-heads.

En el *DR-Scheme*, el número de transmisiones durante el proceso de identificación es mucho mayor que en su contraparte centralizada. Esto se debe a que para que ocurra una identificación, primero las etiquetas transmiten su información a los *cluster-heads*, quienes a su vez la retransmiten al lector, para que finalmente sea este último quien confirme su recepción. Esto sugiere que la información transmitida por las etiquetas debe ser lo más útil

Cluster-head procedure

```

43: Receive(State)
44: while State == FORWARD do
45:   Receive(Cmd)
46:   if Cmd==(Query|QueryRep|QueryAdj) then
47:     Wait(QueryTimeout)
48:     if (Response) then
49:       if (Collision) then
50:         Send(Reply)
51:       else
52:         Send(ID)
53:       end if
54:     else
55:       Send(Reply)
56:     end if
57:   else
58:     State = SILENT
59:   end if
60: end while
    
```

Tag procedure

```

61: Detected = false
62: while not Detected do
63:   Receive(Message);
64:   if Message == (Query|QueryAdj) then
65:      $f = 2^Q - 1$ 
66:      $s = U(0, f)$ 
67:   else if Message == QueryRep then
68:      $s = s - 1$ 
69:   else if Message = ACKID then
70:     Detected = true
71:   end if
72:   if s == 0 then
73:     Send(ID)
74:   end if
75: end while
    
```

y mínima posible, lo que reduciría el retardo inducido por el número de transmisiones realizadas, así como el impacto de las colisiones. Dependiendo del protocolo de lectura utilizado para el proceso de identificación en el *DR-Scheme*, este requerimiento se puede satisfacer con mayor o menor dificultad según el caso.

Propuesta: evolución del *DR-Scheme* al *iDR-Scheme*

Las modificaciones listadas en la sección anterior, son necesarias para aprovechar por completo el enfoque distribuido del *DR-Scheme*. Estas constituyen un nuevo esquema de identificación, el cual se propone como una mejora del *DR-Scheme* y se nombra *improved DR-Scheme* o *iDR-Scheme*. Con este nuevo mecanismo, surge la necesidad de protocolos de lectura que aprovechen sus características. Así, se modifica el protocolo EPCGen2DP para el *iDR-Scheme*, como se describe a continuación:

- I: Se adaptan los mensajes utilizados para informar el resultado de una consulta (líneas 48-56

Tabla 5.2: Especificaciones del mensaje *Reply*.

Código	Significado
00	No response
11	Collision
01	Identification

del Algoritmo 3). En este caso, se modifica el comando *Reply* de acuerdo a la Tabla 5.2

- II: Se crea un mensaje para acusar de recibido el ID de una etiqueta. Este será enviado por el *cluster-head* hacia las etiquetas (línea 20 del Algoritmo 3). Entonces, se utiliza el comando *ACK* del estándar EPC Gen2
- III: Se cambia el mensaje ID por uno más corto (línea 73). Originalmente, en EPCGen2DP una etiqueta responde con su ID completo a un *QueryRep* para evitar retransmisiones. Entonces, se plantea utilizar el paquete *RN16* del estándar EPC Gen2 para responder una consulta del lector. Esta consideración implica modificar los mensajes descritos en los puntos I y II, es decir, necesitan adaptar su tamaño al del mensaje descrito en este punto.

Así, el funcionamiento del protocolo EPCGen2DP para el *iDR-Scheme* es como sigue: el lector crea subzonas en su zona de interrogación con ayuda de los *cluster-heads*. Después, una vez que cada *cluster-head* conoce su turno de transmisión, ya sea configurado durante el despliegue de la red o indicado por la aplicación, el lector pone a todos los *cluster-heads* en estado *FORWARD*. Entonces, este inicia el proceso de identificación enviando un comando *Query*, en el que incluye el tamaño de la trama para el ciclo de identificación actual. Cuando las etiquetas reciben este comando, cada una de ellas selecciona una ranura en la trama actual para transmitir su *RN16*. Las etiquetas que hayan seleccionado la primera ranura transmiten su *RN16* como respuesta al comando *Query*, el cual se recibe por el *cluster-head* asociado a la microzona en la que está la etiqueta. Esto produce dos posibles casos:

Ranura vacía o colisión. Si no hay respuesta o hay dos o más respuestas en la subzona correspondiente, el *cluster-head* envía un comando *Reply* al lector.

Ranura exitosa o con identificación. Si solamente hay una respuesta en la subzona, el *cluster-head* correspondiente envía un paquete AKC_{RN16} a la etiqueta identificada y almacena el ID recibido. Así, el *cluster-head* envía un comando *Reply* al lector para indicarle que se ha identificado una etiqueta exitosamente.

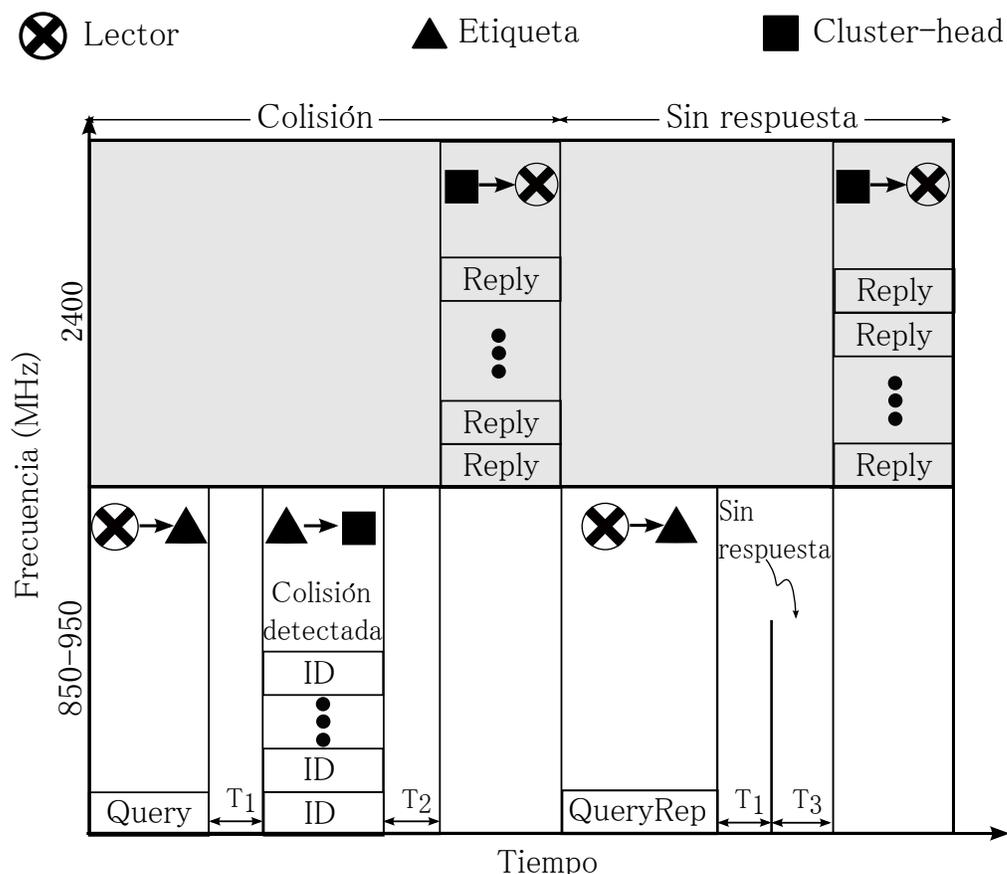


Figura 5.4: Ranura vacía o con colisión del protocolo distribuido EPC Gen 2 en el *iDR-Scheme*.

Ya que el resultado producido por una consulta puede ser diferente para cada microzona, el resultado global se puede clasificar en: vacía, exitosa o con colisión. En el contexto del *iDR-Scheme*, se considera que una ranura es vacía o con colisión cuando el resultado es el mismo en todas las subzonas. Por otro lado, se determina que una ranura es exitosa si al menos en alguna de las subzonas se obtuvo una identificación. Estos casos se muestran en las Figuras 5.4 y 5.5.

Una vez que el lector recibe información de cada *cluster-head* en su zona de interrogación, este envía un comando *QueryRep* para indicar el comienzo de una nueva ranura. El proceso descrito continúa ranura por ranura hasta el final de la trama. Cuando esto sucede, el lector estima el número de etiquetas en cada subzona y calcula el valor asociado de Q a cada una de ellas. Posteriormente selecciona el valor mayor de Q de entre los calculados. Finalmente, inicia un nuevo CI enviando un comando *QueryAjust* que incluye el nuevo valor de Q .

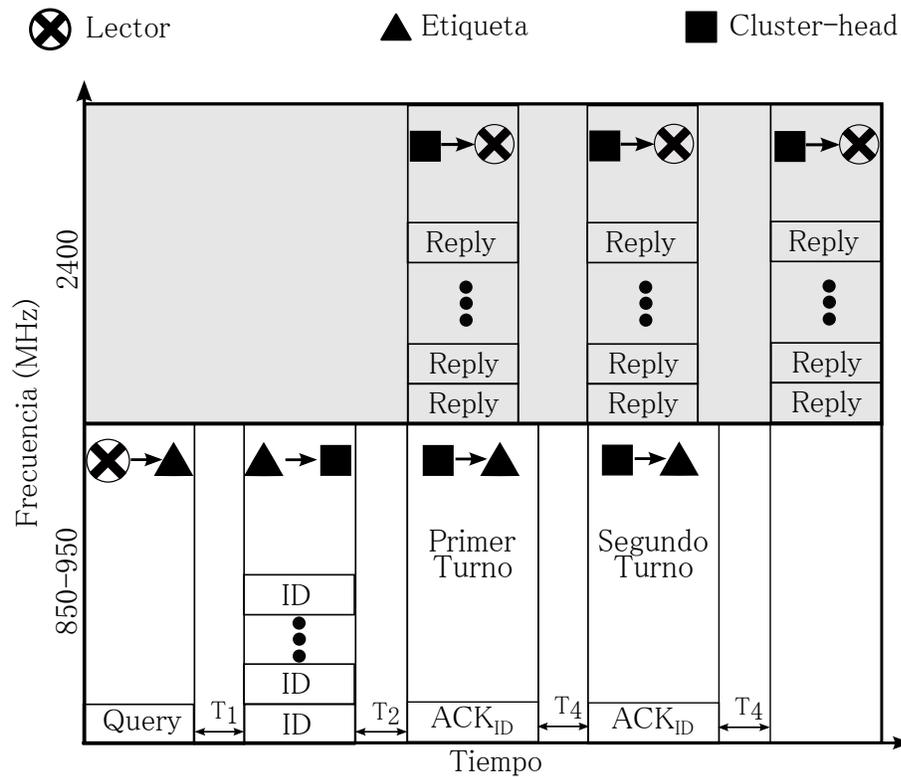


Figura 5.5: Ranura exitosa o con identificación en el protocolo distribuido EPC Gen 2 sobre el *iDR-Scheme*.

Para evaluar y comparar el *DR-Scheme* y el *iDR-Scheme* propuesto, se implementan ambos con sus respectivas versiones del protocolo EPC Gen2. La evaluación se realiza para distintos números de subzonas en la zona de interrogación, k . La configuración de estas es como se muestra en la Figura 5.6. Cada *cluster-head* está localizado a una distancia R_R para el caso de dos y cuatro grupos, mientras que para el caso de 16 grupos están localizados a distancias $R_R/2$, donde R_R corresponde al radio de cobertura del lector.

Se implementan dos versiones del protocolo distribuido EPC Gen2 (EPCGen2DP), considerando lo siguiente:

- Una versión para el *iDR-Scheme* con las adaptaciones I y II, el cual se denomina EPCGen2DPM, y
- Una versión para el *iDR-Scheme* con las adaptaciones I, II, y III, el cual se etiqueta como EPCGen2DPMi.

Adicionalmente, se implementa EPCGen2 en el esquema 1R-LCA-1IZ a fin de contrastarlo con su contraparte distribuida y mostrar las ventajas y desventajas de cada enfoque. Esto se debe a

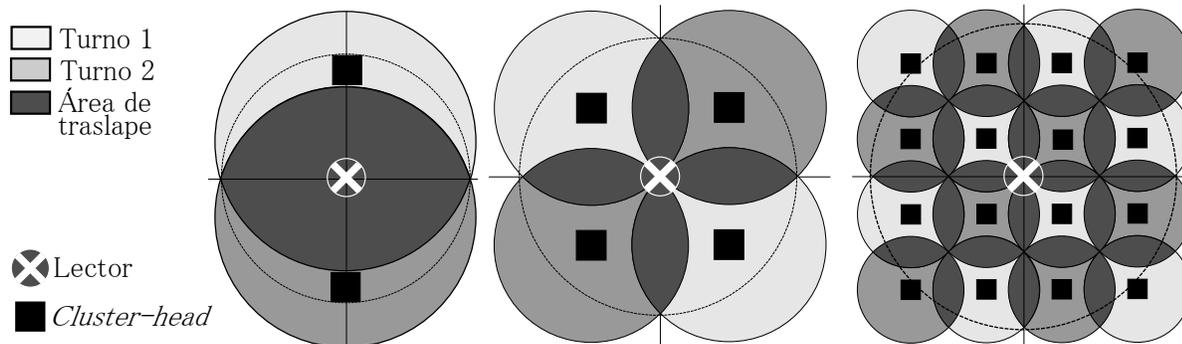


Figura 5.6: Configuración de los *cluster-heads* en la zona de interrogación. Existen dos conjuntos de *cluster-heads* para calendarizar el reconocimiento de etiquetas identificadas en la consulta actual.

que 1R-LCA-1IZ es la referencia para los nuevos mecanismos de identificación.

Para adaptar el tamaño de la trama en cada uno de los protocolos, se utiliza el mecanismo presentado en [19], junto con la función de estimación de [53]. Entonces, se usa Matlab® para implementar los siguientes cuatro protocolos:

- EPCGen2 en el esquema 1R-LCA-1IZ, EPCGen2C
- EPCGen2DP en el esquema *DR-Scheme*, EPCGen2DP-DR
- EPCGen2DPM en el *iDR-Scheme*, EPCGen2DPM-iDR, y
- EPCGen2DPMi en el *iDR-Scheme*, EPCGen2DPMi-iDR.

Se ejecuta el proceso de identificación y se repite 300000 veces para obtener resultados confiables.

Para la implementación de los cuatro protocolos se consideran los parámetros especificados por el estándar EPC Gen2 para aproximar el tiempo utilizado en cada ranura. Para el protocolo EPCGen2 se aproxima a 2.505 ms para una ranura exitosa y a 0.575 ms para una ranura vacía o con colisión. Para el EPCGen2DP-DR, EPCGen2DPM-iDR y el EPCGen2DPMi-iDR, se calcula el tiempo utilizado para el proceso de identificación de acuerdo al modelo presentado en las Figuras 5.1 a 5.5.

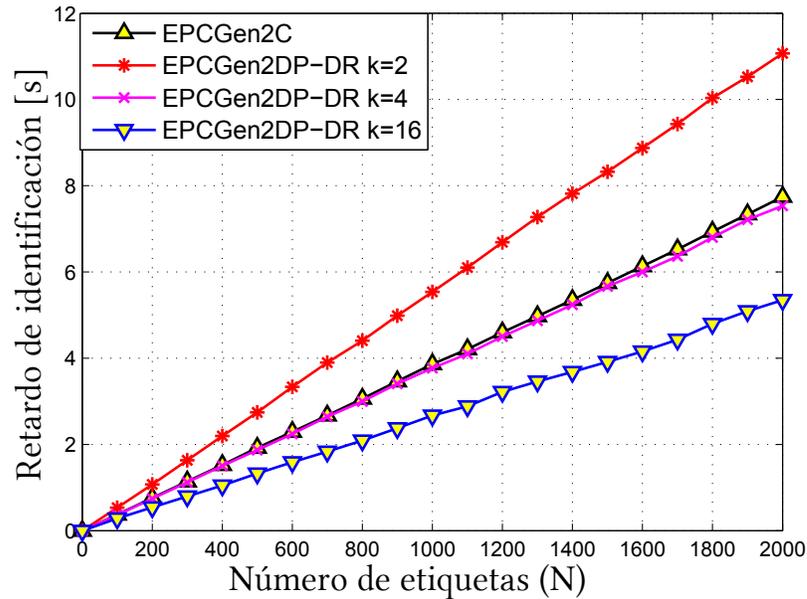


Figura 5.7: Retardo de identificación para el *DR-Scheme* con el protocolo EPCGen2DP.

5.1.3. Resultados

Los resultados obtenidos para cada una de las implementaciones realizadas, se presentan en las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9. En la Figura 5.7, se presenta el retardo de identificación para el *DR-Scheme* con el protocolo EPCGen2DP y el esquema 1R-LCA-1IZ con el EPCGen2. Como se puede apreciar, el *DR-Scheme* mejora el retardo de identificación obtenido por el 1R-LCA-1IZ con el EPCGen2 cuando hay más de dos subzonas en la zona de interrogación. Cuando solamente hay dos subzonas en la zona de interrogación, se obtiene el retardo de identificación más alto. Esto se debe a la sobrecarga de comunicación inducida por el *DR-Scheme*. Al aprovechar los dos canales de comunicación independientes del *DR-Scheme* y al evitar el modelo ITF, se puede reducir el retardo de identificación.

La Figura 5.8 muestra el retardo de identificación para el *DR-Scheme* con EPCGen2 y para el *iDR-Scheme* con el EPCGen2DPM. Nótese que, para la mayoría de los casos se logra reducir el tiempo necesario para identificar un conjunto de etiquetas con el *iDR-Scheme* y su versión del EPC Gen2. Cuando hay solamente dos microzonas en la zona de interrogación del lector, no se obtiene mejora. Sin embargo, cuando hay 16 microzonas en la zona de interrogación se obtienen los mejores resultados, logrando un decremento de 4.6 segundos para el mejor de los casos (cuando hay 2000 etiquetas por identificar) respecto a EPC Gen2 en el esquema 1R-LCA-1IZ.

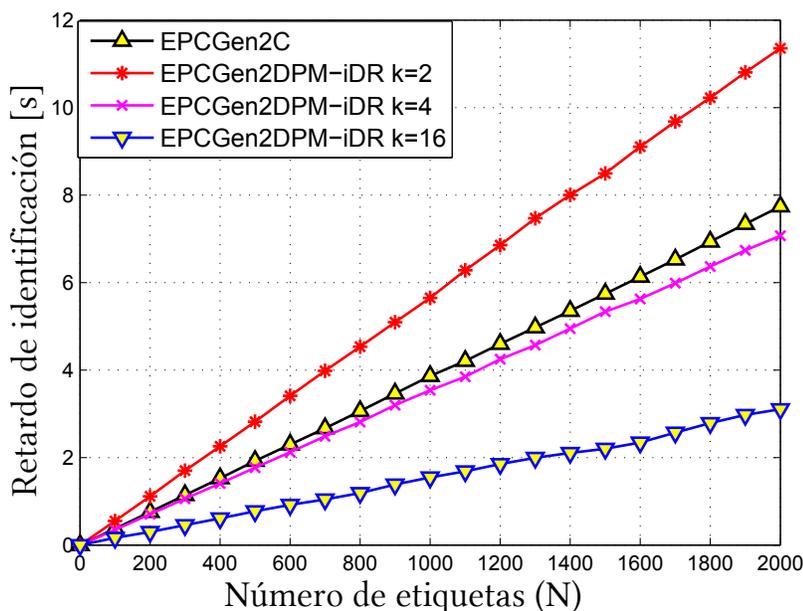


Figura 5.8: Retardo de identificación para el *iDR-Scheme* con el protocolo EPCGen2DP.

En la Figura 5.9 se muestran los resultados para EPCGen2 en el esquema centralizado y EPCGen2DPMi en el *iDR-Scheme*. En este caso, se obtiene una gran reducción respecto al retardo de identificación con EPCGen2DPMi-iDR comparado con el EPCGen2C. De nuevo, los mejores resultados se generan con la propuesta aquí presentada cuando hay 16 microzonas en la zona de interrogación, es decir, $k = 16$, lo que permite una reducción de 5.1 segundos en el mejor de los casos. Adicionalmente, para el caso de dos subzonas no se logra ninguna mejora respecto al esquema centralizado, pero si respecto al *DR-Scheme* cuando hay dos subzonas.

En general, se observa que los resultados sugieren una relación inversamente proporcional entre el retardo de identificación y el número de microzonas. Esto es, el retardo de identificación reduce conforme el número de subzonas en la zona de interrogación aumenta.

5.1.4. Discusión

AS-LCA-kIZ utiliza un enfoque distribuido para realizar el proceso de identificación, el cual intenta reducir la carga de trabajo en el lector. El *DR-Scheme* ha demostrado mejorar el proceso de identificación en muchos aspectos, desde el retardo de identificación, hasta el uso eficiente de los recursos disponibles. Una de las claves para tales mejoras es el uso de protocolos de lectura eficientes para este tipo de esquemas. De esta manera, se identifica al diseño de protocolos de

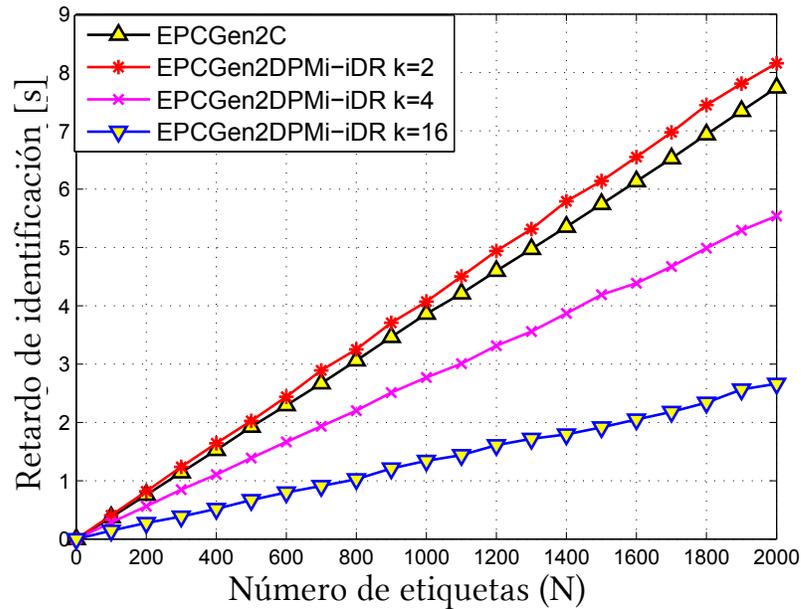


Figura 5.9: Retardo de identificación para la versión paralela del *iDR-Scheme* con el protocolo EPCGen2DP.

comunicación como una tarea clave para mejorar el desempeño del proceso de identificación en los nuevos esquemas.

Se diseña un protocolo de lectura para el AS-LCA-kIZ que toma ventaja de su naturaleza distribuida. Además, se proponen modificaciones al *DR-Scheme*, dando lugar a un nuevo mecanismo de identificación, el *iDR-Scheme*. Con este nuevo mecanismo se puede acelerar el proceso de identificación mediante el particionamiento de la zona de interrogación y la descarga de trabajo en el lector.

Los resultados obtenidos hasta ahora sugieren que el esquema AS-LCA-kIZ es adecuado para aplicaciones con un gran conjunto de etiquetas a identificar o con restricciones en tiempo. También se nota que el esquema AS-LCA-kIZ es susceptible a la distribución de las etiquetas en la zona de interrogación. Adicionalmente, se observa que el rendimiento alcanzado por el *DR-Scheme* depende del protocolo de lectura utilizado y del número de subzonas en la zona de interrogación del lector.

5.2. Esquema AS-ECA-kIZ

AS-ECA-kIZ es una versión extendida del mecanismo 1R-LCA-1IZ. Esto es, AS-ECA-kIZ extiende el rango de cobertura de 1R-LCA-1IZ y además agrega un dispositivo a la arquitectura de red RFID.

5.2.1. Análisis del AS-ECA-kIZ

Una de las propuestas más prometedoras de este tipo es la basada en *RFID listeners* o *L-Scheme* [25], la cual modifica la arquitectura de red RFID. Primero, se sustituye el lector por otro dispositivo llamado *illuminator*, que es un dispositivo similar al lector RFID. Existen diferencias sutiles entre estos dispositivos; el iluminador tiene mayor potencia de transmisión y sus únicas funciones son energizar y consultar a las etiquetas, es decir, no recibe respuestas emitidas por ellas. Entonces, el iluminador se concibe como un dispositivo con características superiores a las de un lector RFID, tales como potencia de transmisión, rango de cobertura y número de interfaces de comunicación. Segundo, se introduce un nuevo dispositivo a la red RFID, el *RFID listener*. Este actúa como intermediario entre el iluminador y las etiquetas, ya que recibe y decodifica las señales emitidas por ambos, y en el caso particular de las etiquetas, retransmite su información. Un *RFID listener* es un dispositivo con recursos limitados y un rango de cobertura restringido. Su función principal es recolectar las respuestas de las etiquetas. Tiene una interfaz independiente para comunicarse con otros *RFID listeners* y el iluminador. Cada *RFID listener* define una microzona en el área de cobertura del iluminador.

El *L-Scheme* pretende mitigar los problemas asociados al proceso de identificación a través de la distribución de este. Si bien la idea planteada es bastante prometedora, esta carece de impacto por su nula evaluación de desempeño. Esto es, el *L-Scheme* surge como propuesta y se queda como tal, ya que en este únicamente se diseña el prototipo del *RFID listener*. Entonces, aun cuando en [25] se presenta el *L-Scheme* y se mencionan sus ventajas, no se especifica cómo se pueden lograr estas. En particular, los autores mencionan que se puede extender el rango de cobertura de un sistema RFID tradicional, sin embargo, no se detalla cómo se puede lograr, ni cuál sería el máximo rango de cobertura ofrecido por el iluminador, simplemente mencionan que se debe usar un transmisor con alta potencia de transmisión. Adicionalmente, los autores argumentan que el *L-Scheme* ofrecería un mejor desempeño con un despliegue denso de *RFID listeners*, no obstante, hasta donde sabemos, no se tiene ninguna prueba que permita corroborar o desechar tal aseveración. Esto significa que no hay ninguna evidencia que sustente las ventajas

del *L-Scheme* y por ende, la viabilidad de adoptar el *L-Scheme* sobre otros esquemas como el esquema MR-ECA-kIZ.

Por lo tanto, para analizar el rendimiento del *L-Scheme*, primero se necesita validar su funcionamiento, así como la posibilidad de su implementación en ambientes densos. Para la última parte se requiere de un protocolo de lectura que se adapte a las características del *L-Scheme*, ya que entre mejor se adapte, mejor será su desempeño.

5.2.2. Propuesta: extensión del rango de cobertura de un sistema RFID

Para validar el funcionamiento del *L-Scheme*, se necesita determinar su rango de cobertura. En [25], los autores mencionan que un dispositivo con gran potencia de transmisión se puede utilizar como iluminador. Sin embargo, como ya se ha discutido en capítulos anteriores, el aumento en la potencia de transmisión de un dispositivo no se puede hacer indiscriminadamente. Así, el *L-Scheme* asume que un solo trasmisor cuenta con los recursos suficientes para cubrir un área de interés. Tal y como se describió en la Sección 1.2, la potencia recibida por una etiqueta es una función de las características específicas de la antena del lector y del modelo de pérdidas de trayectoria. En [25], el *L-Scheme* se evalúa con un lector ALR-8800 con dos antenas circulares ALS-9610 y ocho etiquetas Alien 9640 [58]. Sin embargo, aun cuando el proveedor de tales dispositivos proporciona información relacionada a sus capacidades, dicha información no permite determinar los límites teóricos del sistema conformado por estos.

Entonces, para caracterizar un sistema RFID “tradicional”, se seleccionan un par de productos de la empresa Impinj [40]. Estos se resumen en la Tabla 3.1. Es importante notar que un análisis similar se puede realizar con dispositivos de otra compañía, ya que el objetivo de esta evaluación es mostrar las ventajas de los nuevos esquemas de identificación respecto al tradicional. Entonces, si se desea, se pueden tomar valores diferentes para llevar a cabo el mismo estudio. Respecto al modelo de pérdidas de trayectoria, se seleccionan los modelos FSM y 2RGR descritos en la Sección 1.2 para determinar el rango de cobertura del *L-Scheme*.

De esta manera, para extender el rango de cobertura de un sistema RFID se necesita aumentar la potencia de transmisión de un lector [25]. Como se discute al inicio de esta sección, el aumento de la potencia en la antena del lector está restringido por los estándares. Sin embargo, aun cuando fuera posible hacerlo, se necesitaría una gran cantidad de energía para alcanzar grandes distancias, tal y como se muestra en las Figuras 5.10, 5.11 y 5.12. Como se puede observar, se necesita una

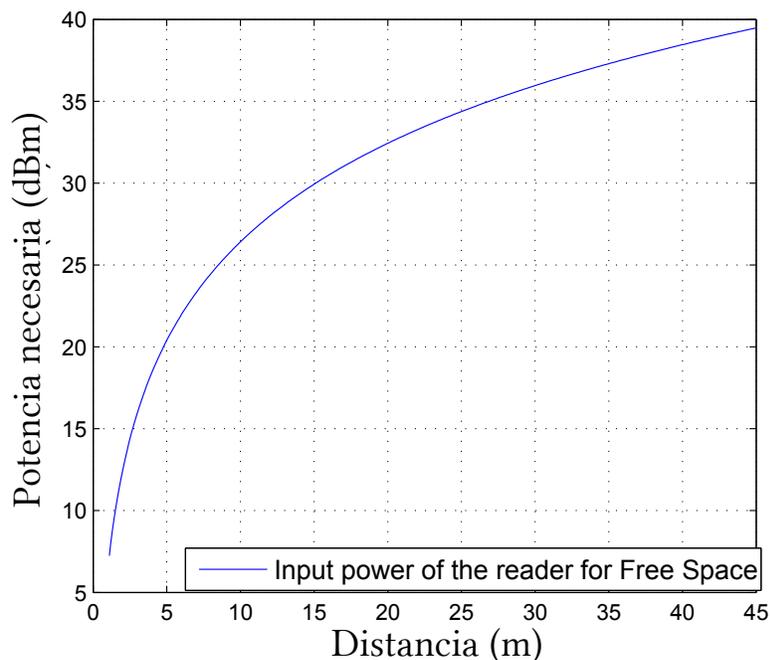


Figura 5.10: Relación potencia-distancia para el modelo FSM.

gran cantidad de energía para obtener grandes distancias. Por ejemplo, para alcanzar 40 m se necesitan alrededor de 6 W para el FSM y 10 W para el 2RGR con $h = 1$ m, y 2 W para el 2RGR con $h = 2$ m. Es importante resaltar que para ambos casos del 2RGR, $h = 1$ m and $h = 2$ m, existen zonas muertas en el rango de cobertura calculado.

Por lo tanto, no se puede aumentar la potencia de transmisión en la antena del lector sin restricciones. Entonces, se toma como referencia el sistema RFID conformado por los dispositivos de la Tabla 3.1. Para el *L-Scheme* se elige la potencia máxima de transmisión del lector (3 W). Así, se puede suponer una relación de 1:3 entre la potencia de transmisión de un lector y la de un iluminador.

La Figura 5.13 muestra el rango de cobertura para el sistema RFID conformado por los dispositivos de la Tabla 3.1. Se aprecia que un solo lector puede cubrir hasta 15 m de distancia con el FSM, y hasta 30 m con el 2RGR con $h = 1$ m, y aproximadamente 50 m con $h = 2$ m. La Figura 5.14 muestra el rango de cobertura del *L-Scheme*. Se nota que el rango de cobertura del *L-Scheme* es superior al del sistema tradicional, ya que está cerca de 25 m con el FSM, 30 m con el 2RGR con $h = 1$ m y hasta 50 m con $h = 2$ m.

Así, se encuentra que el máximo rango de cobertura para el *L-Scheme* es de 25 m y para un sistema tradicional es de 15 m. En este caso, se considera que el rango de cobertura del *L-Scheme*

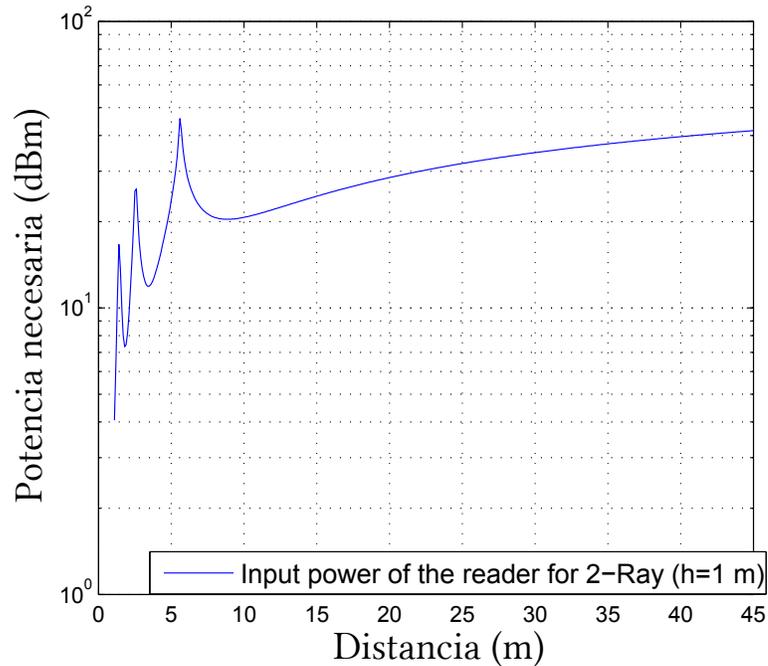


Figura 5.11: Relación potencia-distancia para el modelo 2RGR con $h = 1$ m.

se obtiene al utilizar la tecnología RFID actual en sus límites superiores de operación.

5.2.3. Consideraciones para el *L-Scheme*

Para evaluar el desempeño del *L-Scheme* en términos de retardo, lo primero es determinar algunas de sus características que no son claras en la descripción de la propuesta original. En particular, encontramos una referencia al uso de técnicas de recepción cooperativa en los RFID *listeners*. Esto es, los autores mencionan que se pueden utilizar dichas técnicas en los dispositivos receptores, pero no indican ninguna en particular. Entre las múltiples opciones de técnicas de recepción cooperativa, están la técnicas de recuperación de colisiones y la técnica de cancelación de interferencia, las cuales se utilizarán para la evaluación del *L-Scheme*.

5.2.4. Diseño de EPC Gen2 para el AS-ECA-kIZ

Una vez determinado el rango de cobertura de un AS-ECA-kIZ, se procede al diseño del protocolo de lectura para este, el cual considerará las características del *L-Scheme*. El protocolo que se sugiere para el *L-Scheme* se denomina EPCGen2-LS y está basado en EPC Gen2. EPCGen2-

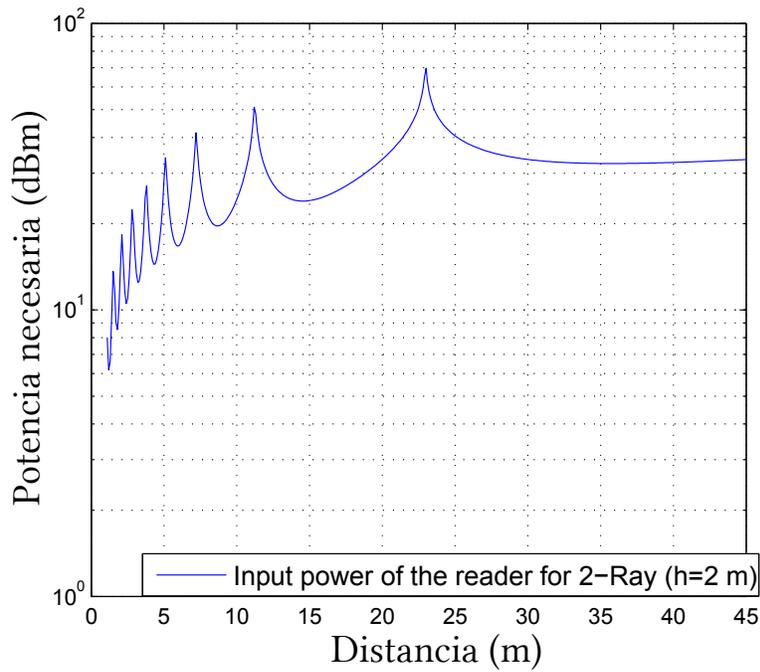


Figura 5.12: Relación potencia-distancia para el modelo 2RGR con $h = 2$ m.

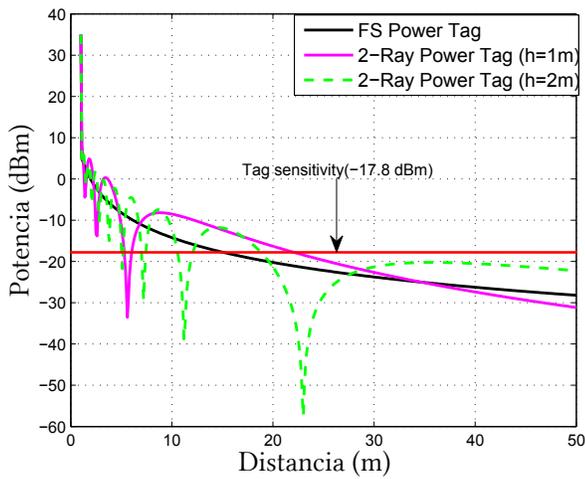


Figura 5.13: Rango de cobertura del *One-Reader Scheme*.

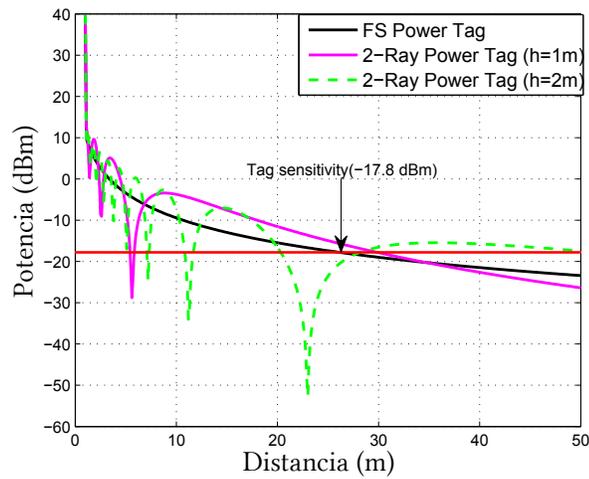


Figura 5.14: Rango de cobertura del *L-Scheme*.

LS conserva los comandos y estructuras tal como se indican en el estándar, manteniendo así sus principales características a fin de cumplir los mínimos requisitos para su implementación en cualquier sistema RFID. El objetivo es mejorar el uso de los recursos de la red aprovechando la naturaleza distribuida del *L-Scheme*.

El Algoritmo 4 presenta el funcionamiento del protocolo EPCGen2-LS. Este se conforma de los procedimientos realizados por cada uno de los dispositivos de la red.

Procedimiento del iluminador. El iluminador define el tamaño de la trama inicial en las líneas 1–2. Posteriormente, inicializa variables independientes para cada RFID *listener* en su zona de cobertura e inicia el proceso de identificación en las líneas 3–9. Después, el iluminador recolecta el resultado generado por la consulta actual en cada uno de los RFID *listeners*. En caso de colisión o no respuesta, líneas 14–20, el iluminador incrementa el contador correspondiente. En caso de identificación, el iluminador envía un paquete *ACK* a la etiqueta correspondiente y espera a recibir el ID de la etiqueta en las líneas 21–23. Una vez que el iluminador termina el proceso de recolección de resultados en todos los RFID *listeners*, este comienza una nueva ranura de la trama enviando un paquete *QueryRep* en la línea 26. El proceso que se acaba de describir continúa ranura por ranura hasta el final de la trama. Cuando el CI actual termina, el iluminador estima el número de etiquetas por identificar por cada RFID *listener*, y entonces determina su valor asociado $Q[k]$ con base en una función de estimación en las líneas 29–30. Posteriormente, en la línea 32 el iluminador selecciona el tamaño de la trama para el siguiente CI y, finalmente, continúa el proceso de identificación enviando un paquete *QueryAdj* que incluye el nuevo valor de Q en la línea 33.

Procedimiento del RFID listener. Un RFID *listener* espera los comandos del iluminador en la línea 36. Si el comando es una consulta y produce una colisión, línea 40, el RFID *listener* envía un paquete *Reply* al iluminador y verifica si puede recuperar la colisión en las líneas 42 a 50. En caso de recuperar la colisión, el RFID *listener* envía el *RN16* al iluminador en la línea 44, y entonces espera por el comando *ACK* correspondiente en la línea 45. Cuando esto ocurre, el RFID *listener* espera el paquete *EPC-ID* de la etiqueta en la línea 47. En la línea 48, el RFID *listener* retransmite el *EPC-ID* de la etiqueta al iluminador o al sistema terminal. En caso de obtener una sola respuesta a la consulta actual, el RFID *listener* envía el *RN16* al Iluminador y espera por el paquete *ACK* correspondiente. Cuando este lo recibe, el *RFID listener* espera el paquete *EPC-ID* por parte de la etiqueta, para posteriormente retransmitirlo al iluminador. En caso de que la consulta actual no produzca ninguna respuesta, el RFID *listener* envía un paquete *Reply* al iluminador en la línea 61.

Procedimiento de la etiqueta. Una etiqueta espera para recibir los comandos del iluminador en la línea 67. Cuando esto sucede, esta verifica si el comando es una consulta que inicia un nuevo

Algoritmo 4 Pseudocódigo del protocolo EPCGen2-LS para sistemas RFID a gran escala.

```

Illuminator procedure
1:  $Q_{ini} = 4,0$  ← Initial Q value
2:  $Q = Q_{ini}$ 
3: Send(Query, Q)
4: while ( $\exists$  Tag to be identified) do
5:    $E_{tags}[k] = 0$  ← Estimated number of tags in listener k
6:    $Q[k] = 0$  ← Q value for the listener k
7:    $N\_Empty[k] = 0$  ← Number of empty slots for listener k
8:    $N\_Single[k] = 0$  ← Number of single slots for listener k
9:    $N\_Collision[k] = 0$  ← Number of collision slots for listener k
10:   $L = 2^Q$  ← Frame length
11:  for  $i = 1$  to  $L$  do
12:    for all RFID listeners do
13:      Receive(Pckt)
14:      if ( $Pckt == Reply$ ) then
15:        if ( $Reply == Collision$ ) then
16:           $N\_Collision[k] = N\_Collision[k] + 1$ 
17:        else
18:           $N\_Empty[k] = N\_Empty[k] + 1$ 
19:        end if
20:      else
21:         $N\_Single[k] = N\_Single[k] + 1$ 
22:        Send(ACK)
23:        WAIT_ID
24:      end if
25:    end for
26:    Send(QueryRep)
27:  end for
28:  for all RFID listeners do
29:     $E_{tags}[k] = 2,39 * N\_Collision[k]$  ← Estimation function [53]
30:     $Q[k] = FINDFRAME(E_{tags}[k])$  ← Choose optimal Q [19]
31:  end for
32:   $Q = \max(Q[k])$ 
33:  Send(QueryAdj, Q)
34: end while

```

Cl; es decir, un comando *Query* o *QueryAdj*, línea 68. En tal caso, la etiqueta determina el tamaño de la trama f en la línea 69. Después elige un ranura entre 0 y f , siguiendo una distribución uniforme, para posteriormente cargar dicho valor en su contador s , línea 70. En caso de un comando *QueryRep*, la etiqueta decrementa su contador s en la línea 72. En caso de un comando *ACK*, la etiqueta envía su ID y cambia su estado a *Detected*, líneas 74 y 75 respectivamente. Finalmente, la etiqueta verifica en cada mensaje recibido si su contador $s == 0$, en cuyo caso envía su *RN16*, línea 78.

Para evaluar el *L-Scheme*, se necesita distinguir entre sus versiones. Hasta donde se sabe, existen dos versiones de *RFID listeners*: *RFID listeners* [25] y *RFID listeners aumentados* [59]. Un *RFID listener* es la primera versión de este tipo de dispositivos. Tiene un rango de cobertura reducido, 3.5 m, el cual se atribuye a las limitaciones de hardware y software en el que es implementado. Un *RFID listener aumentado* es una versión mejorada del *RFID listener* original, llamado *A-RFID listener*. Esta versión incluye una tarjeta extra para adquirir y digitalizar las señales

Listener procedure	
<pre> 35: while (Commands) do 36: Receive(Cmd) 37: if Cmd==(Query QueryRep QueryAdj) then 38: Wait(QueryTimeout) 39: if (Response) then 40: if (Collision) then 41: Send(Reply) 42: if (Can be recovered?) then 43: for all identifications do 44: Send(RN16) 45: Receive(Cmd) 46: if (Cmd == ACK) then 47: WAIT_ID 48: Send(ID - EPC) 49: end if 50: end for 51: end if 52: else 53: Send(RN16) 54: Receive(Cmd) 55: if (Cmd == ACK) then 56: WAIT_ID 57: Send(ID - EPC) 58: end if 59: end if 60: else 61: Send(Reply) 62: end if 63: end if 64: end while </pre>	<pre> ← Collision event ← Could be one or two identifications ← The RN16 is reported to the transmitter illuminator ← Wait for an ID from a tag ← The ID is reported to the transmitter ← Identification case ← No response case </pre>
Tag procedure	
<pre> 65: Detected = false 66: while not Detected do 67: Receive(Message); 68: if (Message == Query QueryAdj) then 69: f = 2^Q - 1 70: s = U(0, f) 71: else if (Message == QueryRep) then 72: s = s - 1 73: else if (Message = ACK) then 74: Send(ID) 75: Detected = true 76: end if 77: if (s == 0) then 78: Send(RN16); 79: end if 80: end while </pre>	

RF de interés, la cual ayuda a incrementar el rango de cobertura más allá de 12 m. Entonces, al *L-Scheme* con *RFID listeners* se le llamará *SL-Scheme* y al *L-Scheme* con *A-RFID listeners* se le llamará *AL-Scheme*. Así, se evalúa el rendimiento del *SL-Scheme* y *AL-Scheme* en términos del retardo de identificación y se compara con el *MR-Scheme* para contrastar el funcionamiento de cada uno de ellos.

Se considera un área de interés de 1933.49 m², donde se debe desplegar la red RFID. El

número de dispositivos necesarios para cubrirla está en función del área de cobertura de cada uno de ellos. Considerando el enfoque esférico, que ya ha sido descrito en secciones anteriores, el problema de cobertura se traduce en uno de optimización conocido como problema de cobertura de disco. Este se define como sigue: dado un disco unitario, encontrar el radio más pequeño $r(n)$ para que n discos iguales cubran por completo el disco unitario [60]. En este caso, se desea cubrir un área de interés de $R_{TL} = 25$ m con n lectores RFID de radio $R_R = 15$ m, n RFID *listeners* de radio $R_{SL} = 3.5$ m, y n A-RFID *listeners* de radio $R_{AL} = 15$ m.

En la literatura, se pueden encontrar muchos trabajos que resuelven el problema de cobertura de disco [60, 61, 62]. Para el *MR-Scheme* se ha mostrado que si la relación entre el área de interés y el área de cobertura está en el intervalo [0.555, 0.607], entonces se necesitan seis discos [60, 61]. Para el *SL-Scheme* no existe una solución exacta, ya que la complejidad del problema aumenta conforme n crece, por lo que para este caso se utilizan tantos *RFID listeners* como sean necesarios. Finalmente, para el *AL-Scheme* se ha mostrado que si la relación entre el área de interés y el área de cobertura está en el intervalo [0.437, 0.5], entonces se necesitan ocho discos [60, 61].

Una vez que se conoce el número de dispositivos necesarios, se debe determinar la configuración del despliegue para dichos dispositivos. En la literatura existen configuraciones eficientes para seis y ocho discos, pero no para más de 50. Sin embargo, a pesar de estas soluciones eficientes, no existe suficiente información para determinar el posicionamiento correcto de los dispositivos en el área de interés. Adicionalmente, la relación entre el área de interés y los discos no es exacta, es decir, para seis discos la relación está entre 0.555 y 0.6069382864, mientras que para ocho discos la relación está entre 0.437 y 0.5, lo cual dificulta el posicionamiento de los dispositivos en el área de interés. Esta última no es una tarea fácil, puesto que encontrar las mejores ubicaciones para los dispositivos representa un problema de optimización. Nuevamente, hoy en día hay muchas técnicas para abordar este tipo de problemas, siendo las heurísticas algunas de las más populares. Particularmente, los Algoritmos Genéticos (GA) han demostrado ser eficientes cuando el tamaño del problema no es grande. Más aún, los GA son métodos robustos capaces de evitar máximos locales y garantizar una solución al problema en un tiempo finito, aún cuando la solución no sea la óptima. Adicionalmente, los GA pueden implementarse fácilmente para este tipo de problemas: el número de dispositivos es pequeño y la solución puede ser fácilmente representada; además, con los GAs se puede evaluar más de una solución a la vez. Así, se diseña un GA para aproximar las soluciones para seis y ocho discos. El GA diseñado encuentra una solución que garantiza la cobertura completa del área de interés y minimiza las zonas de traslape. Las Figuras 5.15 y 5.16 muestran los despliegues óptimos para el *MR-Scheme* y el *AL-Scheme*, mientras que las Figuras 5.17 y 5.18 muestran las soluciones obtenidas con el GA diseñado. Respecto al *SL-Scheme*, se sugiere utilizar la

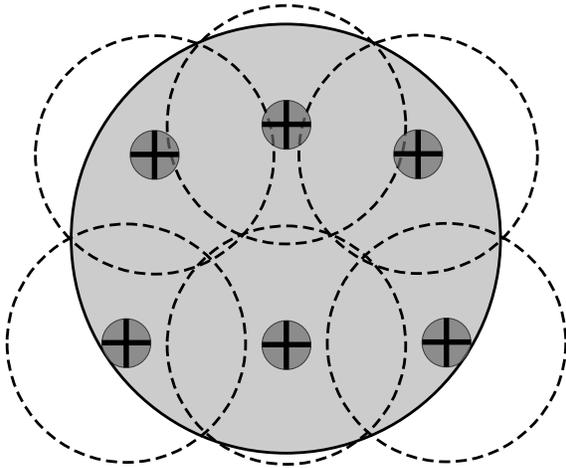


Figura 5.15: Configuración óptima seis discos.

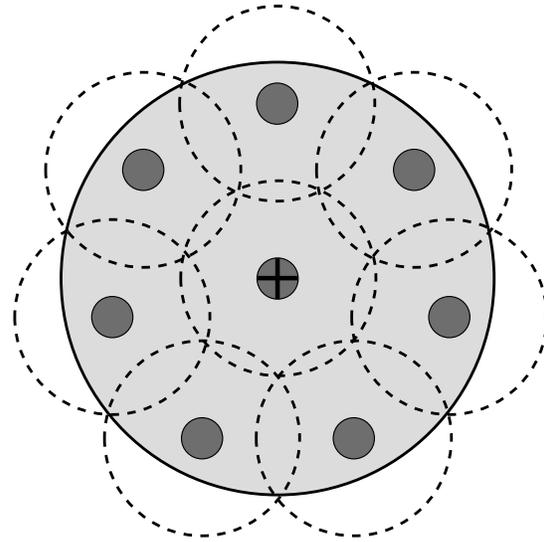


Figura 5.16: Configuración óptima ocho discos.

configuración descrita en la Figura 5.19. Como se puede observar, el *SL-Scheme* requiere desplegar más de 80 RFID *listeners* para garantizar la cobertura total del área de interés. Esto se debe al rango limitado de cobertura de los RFID *listeners*, 3.5 m [25]. Respecto al *AL-Scheme*, se puede apreciar que ocho *A-RFID listeners* son suficientes para garantizar la cobertura total del área de interés. Esto implica una reducción considerable en el número de dispositivos en la red para el *AL-Scheme* respecto al *SL-Scheme*. Nuevamente, esto se debe al rango de cobertura limitado de los RFID *listeners* y al rango de cobertura extendido de los *A-RFID listeners*, 12 m [59]. Finalmente, de la Figura 5.17 se nota que seis lectores RFID son suficientes para cubrir por completo el área de interés con el *MR-Scheme*. Esto es a causa de que el rango de cobertura de un lector RFID es de 15 m.

Para la evaluación de las dos versiones del *L-Scheme* se considera que el número de etiquetas varía de 1000 hasta 12000. El número de etiquetas se determina tomando en cuenta 2000 etiquetas por cada lector RFID, lo que es común en este tipo de sistemas [17, 45]. Respecto a los protocolos de lectura, se plantea utilizar el protocolo EPCGen2-LS para las dos versiones del *L-Scheme*. Respecto al *MR-Scheme*, se utilizan dos mecanismos para evitar los problemas de interferencia en este. El primero es un algoritmo anticollisión para evitar las colisiones del tipo lector-lector y lector-etiqueta. El algoritmo implementa un proceso secuencial en el que un solo lector está activo a la vez. La idea de optar por un mecanismo de esta naturaleza, es porque no se desean asumir funciones especiales en los lectores. Además, para implementar los algoritmos anticollisión en el

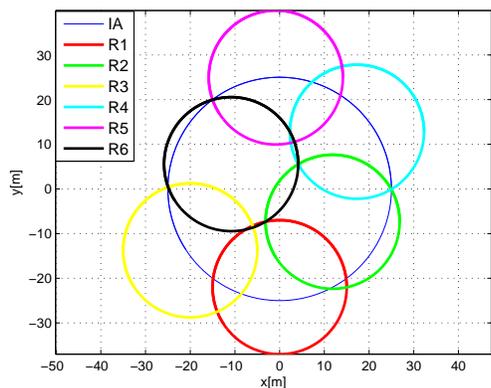


Figura 5.17: Solución aproximada para el despliegue del *MR-Scheme* mediante el GA implementado.

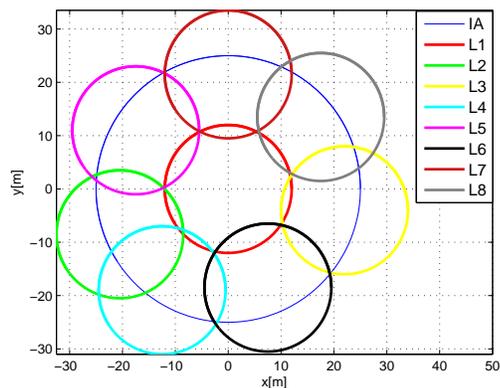


Figura 5.18: Solución aproximada para el despliegue del *AL-Scheme* mediante el GA implementado.

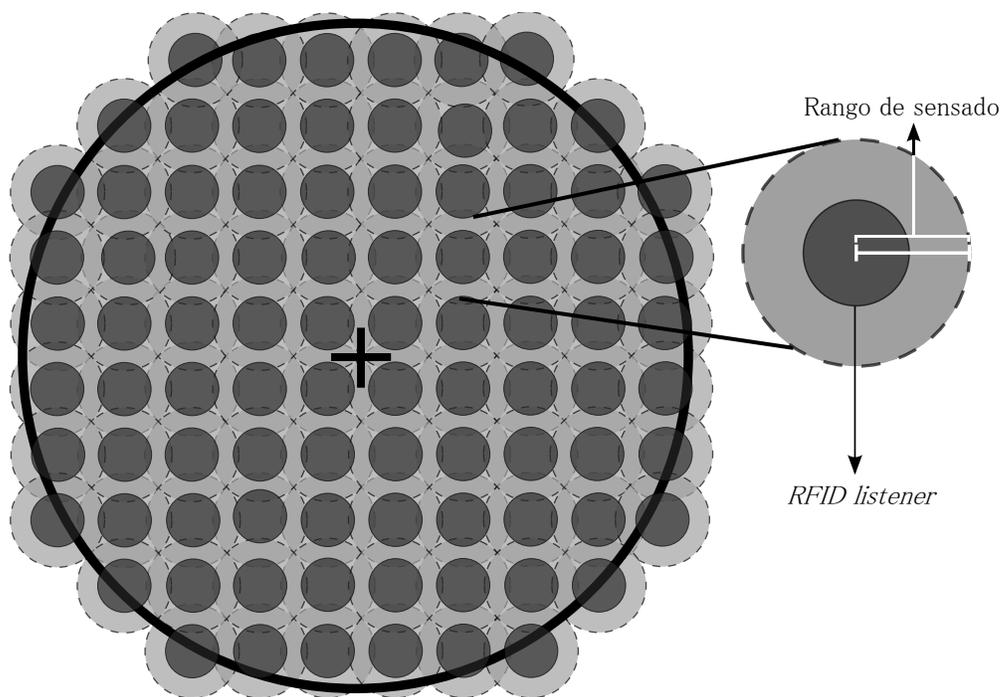


Figura 5.19: Configuración del despliegue de los dispositivos para el *L-Scheme*.

MR-Scheme, es necesario separar los lectores varios cientos de metros entre ellos para garantizar que no habrá interferencia [63]. El segundo consiste en utilizar un protocolo basado en el área de cobertura. El mecanismo activa solamente dos lectores a la vez para evitar las colisiones del tipo lector-etiqueta. Los dos lectores activos necesitan estar lo suficientemente separados a fin de evitar

zonas de traslape entre sus áreas de cobertura. Adicionalmente, se considera el uso de técnicas de recuperación de colisiones en los lectores del *MR-Scheme*. Finalmente, se utiliza EPC Gen2 para resolver las colisiones entre etiquetas en el *MR-Scheme*. Así, se implementan los esquemas descritos con sus respectivos protocolos de lectura en Matlab® como sigue:

- **SL-EPCGen2-LS.** El *SL-Scheme* con EPCGen2-LS.
- **AL-EPCGen2-LS.** El *AL-Scheme* con EPCGen2-LS.
- **MR-Seq-EPCGen2.** El *MR-Scheme* con un algoritmo anticolidión secuencial para resolver los problemas de interferencia entre lectores y EPC Gen2 para resolver los problemas de colisiones entre etiquetas.
- **MR-Seq-CR-EPCGen2.** El *MR-Scheme* con un algoritmo anticolidión secuencial para resolver los problemas de interferencia entre lectores, EPC Gen2 y una técnica de recuperación de colisiones para resolver los problemas de colisiones entre etiquetas.
- **MR-Par-CR-EPCGen2.** El *MR-Scheme* con un algoritmo anticolidión paralelo para resolver los problemas de colisiones entre lectores, EPC Gen2 y una técnica de recuperación de colisiones para resolver los problemas de colisiones entre etiquetas.

Para los protocolos EPCGen2-LS y EPCGen2, se utiliza la función de estimación de [53] y la Tabla II en [19] como mecanismo para adaptar el tamaño de la trama en cada CI. Adicionalmente, se aproxima el tiempo utilizado por cada protocolo asumiendo que el número de ciclos de portadora por símbolo es $M = 2$.

Ya que los autores del *L-Scheme* no especifican el uso de alguna técnica de recepción cooperativa, se usa la de [64] para recuperar las colisiones y otra basada en la cancelación de interferencia mediante la supresión de señales conocidas. La técnica de cancelación de interferencia se ejecutaría cuando un RFID *listener* remueve de las señales recibidas por parte de las etiquetas, aquellas transmitidas por sus vecinos. También se considera que un RFID *listener* está integrado a un nodo de una red de sensores, el cual es capaz de comunicarse con sus pares y con el iluminador mediante un canal ZigBee con una tasa de transmisión de 250 kb/s [22].

5.2.5. Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 5.20 y 5.21. Se observa que los mejores resultados se obtienen con el SL-EPCGen2-LS, mientras que los peores se obtienen con el MR-Seq-EPCGen2. Esto significa que los mejores resultados en general, siempre se obtienen cuando

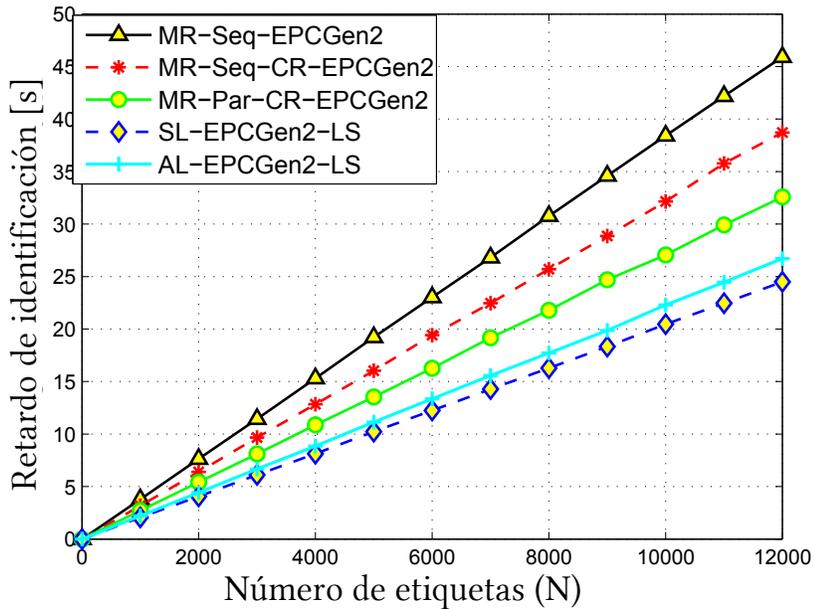


Figura 5.20: Retardo de identificación promedio para el *MR-Scheme* y el *L-Scheme*.

se utiliza el *L-Scheme*, lo que confirma que el uso de este mecanismo mejora el desempeño de los sistemas RFID en general. Respecto al *MR-Scheme*, se nota que la técnica de recuperación de colisiones reduce el retardo de identificación del *MR-Scheme* original. Además, es evidente que la combinación de técnicas de recuperación de colisiones con algoritmos anticollision para lectores RFID reduce considerablemente el tiempo utilizado por el *MR-Scheme* para realizar un proceso de identificación. Respecto al *L-Scheme*, se puede apreciar que el uso de técnicas de recepción cooperativa en los RFID *listeners* aumenta la posibilidad de identificar una etiqueta por cada consulta. A su vez, el uso de un despliegue denso de RFID *listeners* acelera el proceso de identificación gracias a que cada etiqueta tiene mayor probabilidad de ser identificada en cada consulta.

Resultados parciales de los presentados en esta sección están reportados y publicados en [12].

5.2.6. Discusión

El mecanismo AS-ECA-kIZ considera un enfoque distribuido para realizar el proceso de identificación. Tales enfoque permite acelerar la recepción de información emitida por las etiquetas. Adicionalmente, este tipo de mecanismos extiende el rango de cobertura de un sistema RFID tradicional para ofrecer un mejor rendimiento. Tales mejoras podrían ser traducidas en la utilización

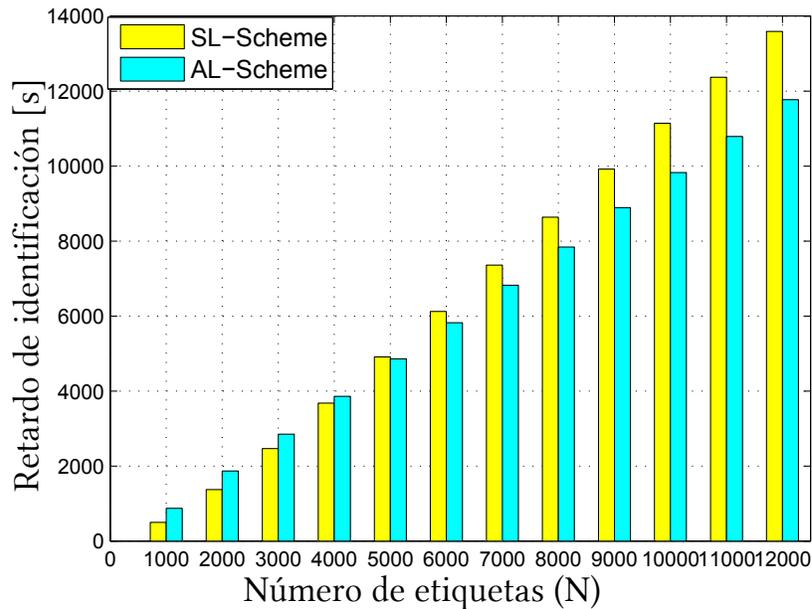


Figura 5.21: Retardo de identificación promedio para el *AL-Scheme* y el *SL-Scheme*.

de esta tecnología en ambientes poco viables para comunicaciones RF. En ese sentido, existe una relación 1:3 entre el rango de cobertura de un sistema RFID tradicional y un sistema RFID extendido. Por lo que, si el sistema RFID tradicional extiende su rango de cobertura, necesariamente el sistema RFID extendido también lo hace.

En particular, el *L-Scheme* es un esquema prometedor para aplicaciones con altos requerimientos. La validación del *L-Scheme* es un hecho crucial para el desarrollo de nuevos mecanismos de identificación, así como para el diseño de protocolos de comunicación eficientes para esquemas distribuidos. El *L-Scheme* extiende el rango de cobertura de un sistema RFID tradicional sin utilizar más de un transmisor, evitando así los problemas de interferencia relacionados al *MR-Scheme*. Los resultados obtenidos en la evaluación de rendimiento para el *L-Scheme* han mostrado que es una buena alternativa al *MR-Scheme*, el cual reduce la coordinación de los dispositivos y reduce el tiempo utilizado para un proceso de identificación. Además, se diseñó un protocolo de lectura basado en EPC Gen2 que aprovecha la naturaleza distribuida del *L-Scheme* y considera el uso de técnicas de recepción cooperativa durante el proceso de identificación. Asimismo, se llegó a la conclusión de que el uso de técnicas de recepción cooperativa en los dispositivos receptores ayuda a disminuir el retardo de identificación para realizar un proceso de identificación. Además se observó que la reducción es mayor conforme el número de dispositivos receptores desplegados en la red aumenta. Esto significa que existe una relación lineal entre el

número de dispositivos en la red y las reducciones obtenidas.

Finalmente, entre las ventajas ofrecidas por el *L-Scheme* se encontraron la eficiencia en tiempo, la reducción de coordinación entre los dispositivos y la posible reducción de costos de implementación. Entre sus desventajas, se encontró la susceptibilidad a la distribución de las etiquetas y una alta complejidad para el despliegue de la red.

CAPÍTULO 6

MECANISMOS DE IDENTIFICACIÓN PARA SISTEMAS RFID PASIVOS: ANÁLISIS, COMPARACIÓN Y CLASIFICACIÓN

Ya que el objetivo de este trabajo es resaltar las ventajas de utilizar cada uno de los mecanismos evaluados, en este capítulo se presenta un análisis de los resultados obtenidos. Mas allá de determinar si un mecanismo de identificación es mejor que otro, este capítulo se enfoca en discutir las características de cada uno de ellos. Para ello, se toman como referencia las características de los mecanismos evaluados en los capítulos 4 y 5. Los resultados obtenidos, junto con el análisis presentado aquí, permiten diseñar un algoritmo para sugerir un mecanismo de identificación acorde con los requerimientos de la aplicación.

6.1. Análisis de desempeño

Con la revisión de la literatura se identificaron diversos mecanismos de identificación para sistemas RFID pasivos, los cuales se pueden clasificar en dos tipos: Limitados en Área de Cobertura (LCA) y con Área de Cobertura Extendida (ECA). En los LCA pueden haber dos tipos de redes RFID, las conformadas por un lector y un conjunto de etiquetas y las conformadas por

un lector, un conjunto de receptores y un conjunto de etiquetas. En los ECA pueden haber redes conformadas por múltiples lectores y múltiples conjuntos de etiquetas, y redes conformadas por un solo transmisor, múltiples receptores y múltiples conjuntos de etiquetas.

Se observa que existen muchas limitantes para extender el rango de cobertura de un sistema RFID pasivo. Desde el consumo de energía hasta temas relacionados con la salud, son las razones para no incrementar el área de cobertura de un sistema RFID pasivo. Esto implica que, en caso de que se permitiera aumentar el rango de cobertura de los sistemas RFID pasivos, este aún se encontraría limitado por el hardware utilizado en este tipo de dispositivos.

Los mecanismos de identificación existentes se pueden clasificar con base en el enfoque utilizado para llevar a cabo el proceso de identificación: centralizado y distribuido. Por un lado, los centralizados pueden ser LCA o ECA. En ambos casos, pueden haber una o varias subzonas de interrogación en el área de cobertura del lector. Estos mecanismos generan un cuello de botella en el lector, ya que este es quien lleva el flujo de la comunicación y el manejo de la información: el lector energiza y consulta a las etiquetas, así como también recibe respuestas de las mismas. Se observa que estos no son muy recomendables para escenarios densos, ya que el retardo de identificación obtenido con ellos aumenta para conjuntos de etiquetas de gran cardinalidad. Dicho retardo se puede reducir usando esquemas de particionamiento en la zona de interrogación, sin embargo, su uso limita las posibles aplicaciones de este tipo de tecnología a aplicaciones con área regular. Finalmente, se observa que el enfoque centralizado parece haber alcanzado un límite inferior en cuanto al retardo de identificación, ya que aún con el uso de técnicas de particionamiento eficientes, los mecanismos de identificación centralizados no pueden obtener mejoras considerables.

Por otro lado, los mecanismos de identificación distribuidos incluyen dos o más lectores y un conjunto de etiquetas o uno o más transmisores, dos o más receptores y un conjunto de etiquetas. Al igual que en los centralizados, los distribuidos pueden ser LCA o ECA. En ambos casos, el número de subzonas de interrogación en el área de cobertura del sistema siempre será mayor a dos y estará determinado por el número de dispositivos receptores en ella. En el caso del *MR-Scheme*, el número de subzonas de interrogación está en función del número de lectores utilizados en un área de interés. Para el caso de los sistemas RFID aumentados, el número de subzonas de interrogación es una función del número de dispositivos receptores en el área de interés. Así, todos los mecanismos de identificación basados en el enfoque distribuido consideran k subzonas de interrogación en el área de interés. La participación de más de un transmisor ocasiona inconvenientes de interferencia adicionales a los del enfoque centralizado. Dichos problemas agregan complejidad al diseño de protocolos de comunicación eficientes, así como al despliegue de la red. Uno de los enfoques para resolver estas consecuencias es el uso de protocolos anticollisión.

Para el caso del *MR-Scheme*, existe una gran cantidad de protocolos anticolidión para evitar o mitigar los problemas de interferencia. Para el caso de los sistemas RFID aumentados, existen muy pocas soluciones que permitan resolver esos problemas. A pesar de tal limitante, los mecanismos de identificación distribuidos han demostrado superar el rendimiento de su contraparte centralizada en términos de retardo. Tales mejoras se pueden maximizar con el posicionamiento adecuado de los dispositivos, técnicas de particionamiento y el uso de protocolos eficientes de lectura. Adicionalmente, usar de técnicas de recepción cooperativa mejora significativamente la tasa de lectura de etiquetas. En ese sentido, se concluye que los protocolos de lectura deben cambiar el enfoque utilizado para realizar el proceso de identificación, y en particular, para la estimación de etiquetas por identificar. Esto se debe a que con el uso de técnicas de recepción cooperativa se puede obtener información útil a partir de una colisión. Así, se recomienda el uso de este tipo de mecanismos de identificación para escenarios densos con un área de interés grande o con un área de interés irregular.

6.2. Comparación y clasificación de los mecanismos de identificación para sistemas RFID pasivos

Las Tablas 6.1 y 6.3 resumen los resultados más importantes. Como se puede observar, la complejidad para el diseño de los protocolos de comunicación y para el despliegue de la red es mayor para los mecanismos de identificación distribuidos que para los mecanismos de identificación centralizados. Esto se debe a que el número de dispositivos en la red es mayor para los mecanismos distribuidos que para los centralizados. Así, una ventaja de los primeros es que incrementan la exactitud para el seguimiento y rastreo de etiquetas conforme el número de dispositivos receptores aumenta en el área de interés. Esta característica también es una desventaja, ya que hace susceptible a los mecanismos de identificación distribuidos respecto a la distribución de las etiquetas.

Por otro lado, se nota que la eficiencia temporal es una función del número de dispositivos en la red RFID y del protocolo de lectura utilizado. Los mecanismos de identificación centralizados tienen una eficiencia estándar debido a que mantienen un sólo transmisor y un conjunto de etiquetas, mientras que los mecanismos de identificación distribuidos poseen una alta eficiencia ya que utilizan uno o más transmisores, al menos dos receptores y un conjunto de etiquetas. En este caso, usar más de un receptor permite acelerar el proceso de identificación.

La Figura 6.1 presenta los mecanismos de identificación de acuerdo a la complejidad en el

Tabla 6.1: Características relacionadas a los mecanismos de identificación.

Característica	Enfoque centralizado	Enfoque distribuido
Complejidad en el despliegue de la red	Baja	Alta
Complejidad en el diseño de los protocolos de comunicación	Baja	Media-Alta
Dispositivos participantes	1 lector, N etiquetas	k lectores o 1 transmisor, k receptores y N etiquetas
Exactitud para seguimiento y rastreo	Baja	Alta
Susceptibilidad a la distribución de las etiquetas en el área de interés	No/Sí (únicamente cuando un esquema de particionamiento es utilizado)	Si
Escalabilidad	Baja. Hasta una decena de cientos de etiquetas.	Alta. Hasta una decena de miles de etiquetas
Eficiencia temporal	Estándar	Alta

Tabla 6.2: Mecanismos de identificación con área de cobertura limitada.

Mecanismo de identificación	Rango de cobertura	Número sugerido de etiquetas
1R-1IZ (1R-Scheme)	~ 15 m	≤ 2000
1R-kIZ (PDC-Scheme)	~ 15 m	≤ 2500
AS-LCA-kIZ (DR-Scheme)	~ 15 m	≤ 5000

despliegue de la red, mientras que la Figura 6.2 los presenta conforme a la complejidad en el diseño de protocolos de lectura. El despliegue de la red se vuelve más complejo conforme el número de dispositivos en la red aumenta. Específicamente, el número de dispositivos transmisores dificulta el despliegue de la red, ya que entre más transmisores haya en un área de interés, mayor será la probabilidad de interferencia entre ellos. Adicionalmente, utilizar más de un receptor en el área de interés ocasiona otro problema, debido a que el posicionamiento adecuado de los receptores para garantizar la cobertura total de dicha área no es una tarea sencilla. Por lo tanto, la complejidad

Tabla 6.3: Mecanismos de identificación con área de cobertura extendida.

Mecanismo de identificación	Rango de cobertura	Número sugerido de etiquetas
AS-ECA-kIZ (<i>L-Scheme</i>)	~25 m	$4000 \leq$
MR-ECA-kIZ (<i>MR-Scheme</i>)	$15 \text{ m} \leq$	∞

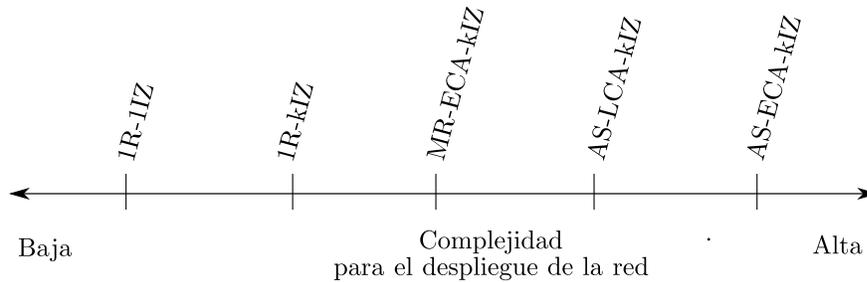


Figura 6.1: Agrupación de los mecanismos de identificación de acuerdo a la complejidad inducida para el despliegue de la red.

para el despliegue de la red será mas baja si el número de dispositivos es bajo, y será alta si el número de dispositivos es alto. Algo importante a resaltar es que se considera al *MR-Scheme* con menor complejidad para el despliegue de la red que a un sistema RFID aumentado. Esto se debe a que para el caso del *MR-Scheme* existe una relación 1:1 entre el número de transmisores y el número de receptores, mientras que para el caso de los sistemas RFID aumentados, se tiene una relación 1:k entre el número de transmisores y receptores, lo que produce k subzonas de interrogación en el área de cobertura del transmisor, ocasionando un problema de cobertura como ya se ha mencionado. En consecuencia, se observa que cuando la relación entre el número de transmisores y receptores no es 1:1 surge el problema de cobertura por cada transmisor, lo que obstaculiza el despliegue de la red.

La complejidad del diseño de protocolos de lectura varía de acuerdo al número de dispositivos y el número de zonas de interrogación en el área de interés. Entonces, esta será baja en tanto el número de dispositivos en la red sea mínimo. En este caso, la mayor complejidad posible en el diseño de protocolos de comunicación la tiene el *MR-Scheme*, ya que hay tantos dispositivos transmisores y receptores como subzonas de interrogación se requieran para cubrir un área de interés.

Así, el estudio realizado en este trabajo permite obtener las herramientas necesarias para diseñar un sencillo algoritmo, el cual sugiere el posible mecanismo de identificación adecuado

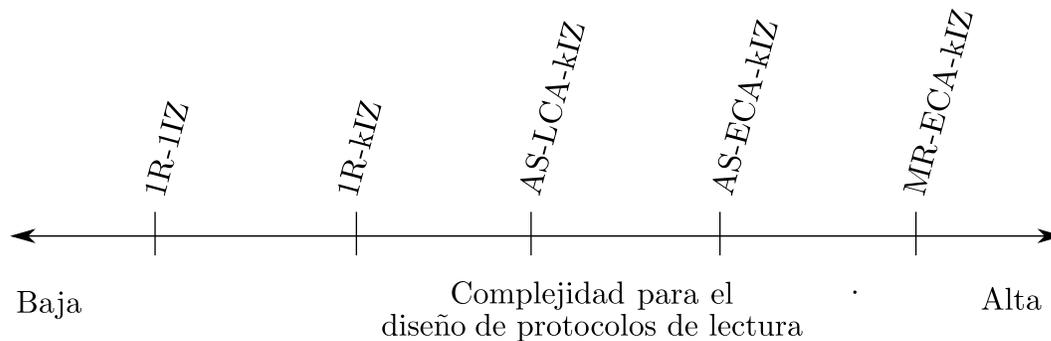


Figura 6.2: Agrupación de los mecanismos de identificación de acuerdo a la complejidad para el diseño de protocolos de lectura.

de acuerdo a los requerimientos de la aplicación. La Figura 6.3 presenta el diagrama de flujo del algoritmo propuesto, que se diseña con base en los resultados obtenidos en las evaluaciones expuestas en el capítulo anterior. El algoritmo requiere como entrada el tamaño del área de interés (*Size of Interest Area* o SIA), el número total de etiquetas en el área de interés o el número estimado de ellas (N), la distribución de las etiquetas (*Tags Distribution* o TD) y la forma del área de interés (*Shape of the interest Area* o SA) para sugerir un posible mecanismo que ejecute de mejor forma el proceso de acuerdo a tales características.

Como se nota, el primer criterio de selección es el tamaño del área de interés a cubrir. Este parámetro debe especificarse en metros y corresponder al radio del área de cobertura deseada. Esta característica da una buena idea del número de dispositivos necesarios para cubrirla. El segundo criterio es el número total de etiquetas o el número estimado de ellas, el cual está asociado a una característica muy importante de los sistemas RFID, *la escalabilidad*. Entonces, un vez que se conoce el tamaño del área a cubrir, es necesario determinar el mecanismo de identificación con base en la escalabilidad ofrecida por cada uno de ellos, la cual es directamente proporcional al número de subzonas en el área de interés. Entonces, los mecanismos con más de una subzona de interrogación son más escalables que aquellos con una sola zona de interrogación. El tercer criterio de selección puede ser la distribución de las etiquetas o la forma del área de interés. La distribución de las etiquetas describe cómo se dispersan estas a lo largo de un área. Se observa que cuando están lo suficientemente dispersas, es decir, casi uniformemente, un mecanismo de identificación con más de una zona de interrogación tiene mejor eficiencia temporal que uno que tiene solamente una zona. Por otro lado, la forma del área de interés determina qué tan fácil o difícil será el despliegue de los dispositivos que conforman la red. Si se considera un área sin muchos obstáculos, no se necesita invertir mucho tiempo en la planeación del posicionamiento de los dispositivos, ya que solamente se necesita uno que garantice la cobertura total de esta. En caso

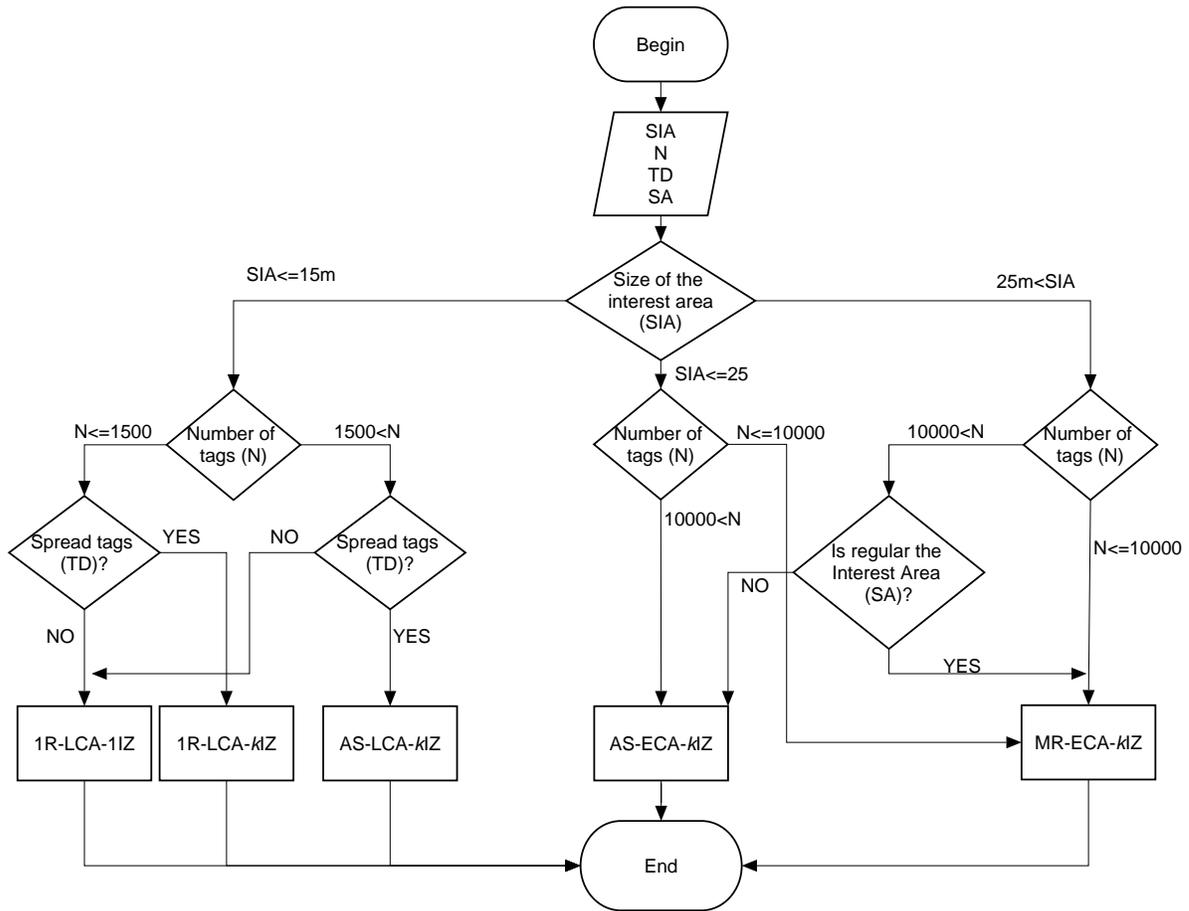


Figura 6.3: Diagrama de flujo para la selección de un posible mecanismo de identificación adecuado.

contrario, se necesita determinar el correcto posicionamiento de los dispositivos para garantizar la cobertura total.

Así, la idea principal del algoritmo propuesto en este trabajo es utilizar el mecanismo de identificación más escalable y flexible en ambientes difíciles (ambientes con mucha interferencia para señales RF) o con altos requerimientos de desempeño, y utilizar el mecanismo de identificación menos flexible en ambientes con menores requerimientos de implementación. De esta manera, si una aplicación requiere cubrir un área de alrededor de 40 m de radio (un tamaño común para tiendas departamentales o pequeños almacenes), con 20000 etiquetas, y con un área irregular, nuestro algoritmo sugeriría el uso del mecanismo AS:ECA:kIZ. Pero si se tiene una aplicación que requiere cubrir un área de alrededor de 40 m, con área regular, y con 20000 etiquetas, nuestro

algoritmo sugeriría un mecanismo MR-ECA: k I Z . Y finalmente, si la aplicación requiere cubrir un área de 40 m, con un área regular, y 4000 etiquetas en tal área, nuestro algoritmo sugeriría utilizar un mecanismo MR:ECA: k I Z .

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN

En este trabajo, se revisaron las propuestas presentadas hasta el momento para mejorar el desempeño de los sistemas RFID. Se observaron las diferentes tendencias utilizadas para obtener alguna mejora, encontrando que la mayoría de los trabajos se enfoca en el diseño de protocolos de comunicación eficientes, siendo muy pocas las que proponen soluciones alternas. En ese sentido, se observó que existen unos cuantos trabajos que proponen modificar el enfoque de comunicación subyacente de las redes RFID, dando lugar al concepto de *mecanismo de identificación*. La revisión de la literatura permitió identificar más de un tipo de estos mecanismos. Además, tras un análisis del funcionamiento de cada uno de ellos, se logró sugerir una clasificación que los agrupa de manera general con base en el enfoque de base utilizado: centralizado o distribuido.

Por otro lado, se estudiaron los protocolos de lectura disponibles para cada mecanismo, encontrando que el estándar EPC Gen2 es el protocolo utilizado para sistemas RFID pasivos. Tras un análisis de su funcionamiento, se logró diseñar una versión de este para cada mecanismo de identificación estudiado. Cada versión de EPC Gen2 diseñada ofrece técnicas que permiten mejorar la ejecución del proceso de identificación.

Finalmente, el análisis de cada mecanismo y el diseño de cada protocolo permitieron identificar características del esquema de comunicación subyacente que se pueden mejorar. Entonces, en algunos casos, se proponen modificaciones a dicho esquema, dando lugar a nuevos mecanismos de identificación.

El análisis realizado comienza con 1R-LCA-1IZ. Al analizar sus características, se definieron las posibles propiedades a mejorar, concluyendo que el diseño de un protocolo de comunicación es la mejor opción. Para este caso, los resultados obtenidos sugieren que 1R-LCA-1IZ aún se puede mejorar utilizando protocolos de comunicación eficientes. Respecto a 1R-LCA-kIZ, se identificó el uso de técnicas de particionamiento en la zona de interrogación y se diseñó un mecanismo de particionamiento junto con un protocolo de comunicación para acelerar el proceso de identificación. Los resultados sugieren que los mecanismos de identificación centralizados alcanzan un límite en su desempeño, pues aún con el uso de técnicas de particionamiento y protocolos de comunicación eficientes, no se logran mejoras considerables. En lo referente a AS-LCA-kIZ, se observó que su naturaleza distribuida se puede aprovechar por los protocolos de comunicación que usa. De esta manera se lograron mejores resultados con este tipo de mecanismos que con su contraparte centralizada. Adicionalmente, se descubrió que la naturaleza distribuida de este tipo de mecanismos ocasiona nuevos problemas en el proceso de identificación, tales como de cobertura, identificaciones repetidas y zonas de traslape. Finalmente, en lo que respecta a AS-ECA-kIZ, se exploró la posibilidad de aumentar el rango de cobertura de un sistema RFID, para posteriormente distribuir el proceso de identificación. Para ello, primero se demostró que el rango de cobertura de un sistema RFID sí se puede extender y se determinó el máximo ofrecido por la tecnología actual. Posteriormente se diseñó el protocolo para distribuir el proceso de identificación. Adicionalmente, se encontró que el uso de técnicas de recepción cooperativa mejoran el desempeño de todo mecanismo de identificación.

Las evaluaciones realizadas en este trabajo consideran como medida de desempeño el *retardo de identificación*. Se encontró que los esquemas de particionamiento aumentan la escalabilidad de los mecanismos de identificación centralizados. Adicionalmente, se halló que los mecanismos de identificación distribuidos son más eficientes en tiempo que los centralizados, sin embargo, dependiendo de la aplicación, no siempre es conveniente utilizar los distribuidos. En ese sentido, se descubrió que estos son susceptibles a la distribución de las etiquetas, y además, la mayoría de ellos permiten aumentar el rango de cobertura de un sistema RFID.

Con base en los resultados obtenidos se diseñó un algoritmo que permite sugerir un mecanismo de identificación con base en los requerimientos de la aplicación. Este permitiría utilizar la tecnología de manera eficiente en función de los requerimientos de la aplicación y además reducir costos de implementación.

Finalmente, vale la pena mencionar que con la aparición de nuevos mecanismos de identificación, también surgen nuevas oportunidades de investigación. En primer lugar están los diversos procesos de comunicación realizados por una red RFID, los cuales hasta donde sabemos,

no se han evaluado en las redes RFID que consideran dispositivos adicionales. En este sentido, se observa que diversos procesos, como el de detección y estimación de cardinalidad de un conjunto de etiquetas, se pueden mejorar con los nuevos mecanismos. En particular, la estimación de la cardinalidad de un conjunto de etiquetas se puede beneficiar del particionamiento de la zona de interés. Para ello, se debe tomar en cuenta que cada subzona en el área de interés es independiente de las demás y que las zonas de traslape producen redundancia. Entonces, tomando esto en cuenta, se podría ofrecer más rápidamente y de manera más precisa una aproximación al número de etiquetas en un área determinada. Por otro lado, se observó que el uso de técnicas de recepción cooperativa se debe considerar al momento de diseñar funciones de estimación, ya que para los mecanismos distribuidos una colisión proporciona información relevante o bien se puede convertir en varias identificaciones.

Respecto al proceso de identificación, existen diversos factores aún por considerar. En primer lugar está la movilidad. Hoy en día, una gran cantidad de aplicaciones considera movilidad en los dispositivos de la red. Si bien, en la literatura se pueden encontrar trabajos que consideran escenarios con movilidad, hasta donde sabemos, ninguno de ellos lo ha realizado en un sistema RFID aumentado. Así, tomando en cuenta las características de los esquemas distribuidos, resulta evidente que esta actividad representa un reto tanto de diseño, como de implementación. En segundo lugar, resulta interesante averiguar el impacto que tienen diversos fenómenos de comunicación, como el de captura, en el desempeño de los nuevos esquemas de identificación. Al igual que en el punto anterior, existe mucho trabajo respecto este tema para sistemas RFID, pero ninguno sobre los sistemas RFID aumentados. Entonces, los efectos que podrían tener dichos fenómenos son aún desconocidos. En tercer lugar, resta por considerar evaluaciones que capturen otros aspectos del mundo real, como ambientes con alta frecuencia o errores en el canal de transmisión.

Por otro lado, el diseño de mecanismos de identificación alternativos es una línea interesante a desarrollar, ya que existen diversos factores a considerar. El primero es el particionamiento eficiente de un área. Se pueden considerar dispositivos con rango de monitorización variable para particionar de distintas maneras un área. El segundo sería el diseño de algoritmos para configurar dichos dispositivos de manera inteligente, es decir, para reducir zonas de interferencia. El tercero es considerar el uso de técnicas de codificación de mensajes para la transmisión de información, lo que reduciría el número de transmisiones. El cuarto consiste integrar RFID con otras tecnologías de comunicación inalámbrica, como Bluetooth o IEEE 802.15.4. Esto permitiría tasas de comunicación más rápidas y por ende mejores mecanismos de identificación.

Finalmente, el diseño de protocolos de comunicación es una de las líneas más prometedoras a

desarrollar, ya que como se observó, es la mejor opción para mejorar un mecanismo sin suponer características adicionales en los dispositivos.

REFERENCIAS

- [1] K. Ali, H. Hassanein, and A.-E. M. Taha, "RFID anti-collision protocol for dense passive tag environments," in *Proceedings of the IEEE Local Computer Networks (LCN)*, October 2007, pp. 819–824.
- [2] V. Chawla and D. S. Ha, "An overview of passive RFID," *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 9, pp. 11–17, September 2007.
- [3] D. M. Dobkin, *The RF in RFID: UHF RFID in Practice*, 2nd ed. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK: Elsevier Inc, 2008.
- [4] P. Nikitin and K. V. S. Rao, "Performance limitations of passive UHF RFID Systems," in *Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation (ISAP)*, July 2006, pp. 1011–1014.
- [5] P. Nikitin and K. V. S. Rao, "Antennas and propagation in UHF RFID Systems," in *Proceedings of the IEEE International Conference on RFID*, April 2008, pp. 277–288.
- [6] D. K. Klair, K.-W. Chin, and R. Raad, "A survey and tutorial of RFID anti-collision protocols," *IEEE Communications Survey & Tutorials*, vol. 12, no. 3, pp. 400–421, July 2010.
- [7] Z. Li, C. He, and H.-Z. Tan, "Survey of the advances in reader anti-collision algorithms for RFID systems," in *Proceedings of the 50th IEEE Conference on Control and Decision (CCDC)*, May 2011, pp. 3771–3776.

-
- [8] D.-H. Shih, P.-L. Sun, D.-C. Yen, and S.-M. Huang, "Short survey: Taxonomy and survey of RFID anti-collision protocols," *ACM Computer Communications*, vol. 29, no. 11, pp. 2150–2166, July 2006.
- [9] L. Sanchez and V. Ramos, "Optimum power distance clustering for the EPC Class-1 Gen2 standard in RFID systems," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2015, no. 12, p. 12, January 2015.
- [10] L. Sánchez and V. Ramos, "Adding randomness to the EPC Class1 Gen2 Standard for RFID networks," in *Proceedings of the 23rd IEEE Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, September 2012, pp. 609–614.
- [11] L. Sanchez and V. Ramos, "Towards a new paradigm for RFID identification: should we cluster RFID tags or not?" in *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, October 2013.
- [12] L. Sanchez and V. Ramos, "An EPC Class-1 Generation-2 anti-collision protocol for RFID tag identification in augmented systems," in *Proceedings of the International EURASIP Workshop on RFID Technology (EURFID)*, October 2015, pp. 36–43.
- [13] L. Sanchez, V. Ramos, and O. Ledesma, "Efficient detection of missing tags for passive RFID systems," *International Journal of Communication Systems*, vol. 29, no. 9, pp. 1545–1567, 2016.
- [14] L. A. Burdet, "RFID multiple access methods," Tech. Rep., April 2008.
- [15] D.-F. Tseng and Z.-C. Lin, "An anti-collision algorithm in RFID systems based on interference cancellation and tag set partitioning," in *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, May 2008, pp. 1609–1614.
- [16] EPCGlobal, "EPC Radio-Frequency Identity Protocols Class 1 Generation-2 UHF RFID Air Interface Protocol for Communications at 860 Mhz-690Mhz," Version 1.2.0, Tech. Rep., 2008.
- [17] M. A. Bonuccelli, F. Lonetti, and F. Martelli, "Instant collision resolution for tag identification in RFID networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 5, no. 8, pp. 1220–1232, November 2007.
- [18] J.-R. Cha and J.-H. Kim, "Novel anti-collision algorithms for fast object identification in RFID system," in *Proceedings of the 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems*, vol. 2, July 2005, pp. 63–67.
-

-
- [19] M. V. Bueno-Delgado, J. Vales-Alonso, and F. González-Castano, "Analysis of DFSA anti-collision protocols in passive RFID environments," in *Proceedings of the IEEE International Conference of the Industrial Electronics Society (IECON)*, November 2009, pp. 2610–2617.
- [20] W. Alsalih, K. Ali, and H. Hassanein, "Optimal distance-based clustering for tag anti-collision in RFID systems," in *Proceedings of the IEEE Local Computer Networks (LCN)*, October 2008, pp. 266–273.
- [21] K. Ali and H. Hassanein, "Distributed receiving in RFID systems," in *Proceedings of the 34th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN)*, October 2009, pp. 69–76.
- [22] S. Farahani, *Zigbee wireless networks and transceivers*, Elsevier, Ed. Newnes, 2008.
- [23] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*, 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [24] K. Ali, "Enabling ultra large-scale radio identification systems," Ph.D. dissertation, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 2011.
- [25] D. De-Donno, F. Ricciato, L. Catarinucci, A. Coluccia, and L. Tarricone, "Challenge: Towards distributed RFID sensing with software-defined radio," in *Proceedings of the 16th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, 2010, pp. 97–104.
- [26] D. W. Engels and S. E. Sarma, "The reader collision problem," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 3, October 2002, p. 6.
- [27] J. Kim, W. Lee, J. Yu, J. Myung, E. Kim, and C. Lee, "Effect of localized optimal clustering for reader anti-collision in RFID networks: fairness aspects to the readers," in *Proceedings of the 14th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, October 2005, pp. 497–502.
- [28] K. Cha, S. Jagannathan, and D. Pommerenke, "Adaptive power control protocol with hardware implementation for Wireless Sensor and RFID reader networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 145–159, December 2007.
- [29] K. Cha, A. Ramachandran, S. Jagannathan, and D. Pommerenke, "Decentralized power control with implementation for RFID networks," in *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, December 2006, pp. 1858–1863.
-

-
- [30] S. Haoru, D. Ko, and S. An, "Power-aware location-based anti-collision protocol for RFID-sensor networks," in *Proceedings of the First International Conference on Ubiquitous and future networks (ICUFN)*, June 2009, pp. 40–45.
- [31] J. Waldrop, D. W. Engels, and S. E. Sarma, "Colorwave: An anticollision algorithm for the reader collision problem," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, vol. 2, May 2003, pp. 1206–1210.
- [32] C. F. Lin and F. Y. S. Lin, "A simulated annealing algorithm for RFID reader networks," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, March 2007, pp. 1669–1672.
- [33] J. B. Eom, S. B. Yim, and T. J. Lee, "An efficient reader anticollision algorithm in dense RFID networks with mobile RFID readers," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 7, pp. 2326–2336, July 2009.
- [34] S. M. Birari and S. Iyer, "PULSE: a MAC protocol for RFID networks," in *Proceedings of the International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*, 2005, pp. 1036–1046.
- [35] K. il Hwang, S.-S. Yeo, and J. H. Park, "Dica: Distributed tag access with collision-avoidance among mobile RFID readers," in *Proceedings of the International Conference on Computational Science and Engineering (CSE)*, vol. 2, August 2009, pp. 621–626.
- [36] L. Guo, H. Tan, and J. Tong, "EDiCa: An enhanced distributed anti-collision algorithm for mobile RFID reader network," in *Proceedings of the Conference on Wireless, Mobile and Sensor Networks (CCWMSN)*, December 2007, pp. 48–51.
- [37] C.-H. Hsu, S.-C. Chen, C.-H. Yu, and J. H. Park, "Alleviating reader collision problem in mobile RFID networks," *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 13, no. 7, pp. 489–497, October 2009.
- [38] H. Dai, S. Lai, H. Zhu, and H. Dai, "A multi-channel MAC protocol for RFID reader networks," in *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom)*, September 2007, pp. 2093–2096.
- [39] EPCGlobal, "En 302 208-1," 2011.
- [40] Impinj Inc. <http://www.impinj.com/>, Last accessed on May 5, 2016.
-

-
- [41] Impinj Speedway UHF RFID Reader.
http://www.impinj.com/speedway_revolution_reader_spec_table.aspx/, Last accessed on May 5, 2016.
- [42] Threshold FS Antenna Datasheet.
http://www.impinj.com/documents/reader~_antennas/brickyard_antenna_datasheet/, Last accessed on May 5, 2016.
- [43] Monza 5 UHF RFID TAG CHIPS.
http://www.impinj.com/monza_5~_rfid_tag_chips.aspx/, Last accessed on May 5, 2016.
- [44] L. W. Mayer and A. L. Scholtz, "Sensitivity and impedance measurements on UHF RFID Transponder Chips," Vienna University, Technology Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering Gusshausstrasse 25/389, 1040 Wien, Austria, Tech. Rep.
- [45] S.-R. Lee, S.-D. Joo, and C.-W. Lee, "An enhanced dynamic framed slotted ALOHA algorithm for RFID tag identification," in *Proceedings of the 2nd International Annual Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*, July 2005, pp. 166–172.
- [46] J. H. Kim and J. K. Lee, "Capture effects of wireless CSMA/CA protocols in rayleigh and shadow fading channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 4, pp. 1277–1286, 1999.
- [47] D. Lee, K. Kim, and W. Lee, "Q+- algorithm: An enhanced RFID tag collision arbitration algorithm," in *Proceedings of the 4th International conference on Ubiquitous Intelligence and Computing (UIC)*, 2007, pp. 23–32.
- [48] L. Sánchez and V. Ramos, " p -persistent CSMA as a collision resolution protocol for active RFID environments," in *Proceedings of the Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, May 2011, pp. 1–5.
- [49] C. Qian, H. Ngan, and Y. Liu, "Cardinality estimation for large-scale RFID systems," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCOM)*, 2008, pp. 30–39.
- [50] D. K. Klair, K. wu Chin, and R. Raad, "On the accuracy of RFID tag estimation functions," in *Proceedings of the International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, October 2007, pp. 1401–1406.
-

-
- [51] H. Vogt, "Efficient object identification with passive RFID tags," in *Proceedings of the First International Conference on Pervasive Computing (Pervasive)*, August 2002, pp. 98–113.
- [52] M. Bueno-Delgado and J. Vales-Alonso, "On the optimal frame-length configuration on real passive RFID systems," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 34, no. 3, pp. 864 – 876, 2011.
- [53] F. C. Schoute, "Dynamic frame length ALOHA," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 31, pp. 565–568, April 1983.
- [54] C. Law, K. Lee, and K.-Y. Siu, "Efficient memoryless protocol for tag identification (extended abstract)," in *Proceedings of the 4th International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications (DIALM)*, Boston, MA, US, August 2000, pp. 75–84.
- [55] W. Alsalih, K. Ali, and H. Hassanein, "A power control technique for anti-collision schemes in RFID systems," *Computer Networks*, vol. 57, no. 9, pp. 1991 – 2003, 2013.
- [56] K. Ali and H. Hassanein, "Parallel singulation in RFID systems," in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, December 2009, pp. 1–6.
- [57] H. Yue, C. Zhang, M. Pan, Y. Fang, and S. Chen, "A time-efficient information collection protocol for large-scale RFID systems," in *Proceedings of the 31st IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, March 2012, pp. 2158–2166.
- [58] Alien Technology Inc. <http://www.alientechnology.com/>, Last accessed on May 5, 2016.
- [59] D. De Donno, F. Ricciato, L. Catarinucci, and L. Tarricone, "Design and applications of a software-defined listener for UHF RFID systems," in *Proceedings of the IEEE International Microwave Symposium Digest (MTT)*, June 2011, pp. 1–1.
- [60] C. T. Zahn, "Black box maximization of circular coverage," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 66B, no. 4, pp. 181–217, August 1962.
- [61] S. Verblunsky, "On the least number of unit circles which can cover a square," *Journal of the London Mathematical Society*, vol. s1-24, no. 3, pp. 164–170, 1949.
- [62] D. covering problem. <http://www2.stetson.edu/~efriedma/circovcir/>, Last accessed on May 5, 2016.
-

- [63] M. Bueno-Delgado, R. Ferrero, F. Gandino, P. Pavon-Marino, and M. Rebaudengo, "A geometric distribution reader anti-collision protocol for RFID dense reader environments," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 296–306, April 2013.

 - [64] K. Fyhn, R. M. Jacobsen, P. Popovski, A. Scaglione, and T. Larsen, "Multipacket reception of passive UHF RFID tags: A communication theoretic approach," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 9, pp. 4225–4237, 2011.
-