

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



PROYECTO FINAL DE CARRERA

## **Sistema de reparto de recursos en un sistema RFID con lectores interferentes y tags móviles**



**AUTOR:** Álvaro Campillo Soler  
**DIRECTOR:** Juan José Alcaraz Espín  
Cartagena, Abril 2013



<b>Autor</b>	Álvaro Campillo Soler
<b>E-mail del Autor</b>	campillo510@gmail.com
<b>Director(es)</b>	Juan José Alcaraz Espín
<b>E-mail del Director</b>	juan.alcaraz@upct.es
<b>Título del PFC</b>	Sistema de reparto de recursos en un sistema RFID con lectores interferentes y tags móviles.
<b>Resumen</b>	<p>En sistemas RFID interferentes se deben plantear mecanismos que eviten que esta interferencia afecte en la detección de los tags. Una de las técnicas es la multiplexación por división en el tiempo (TDMA).</p> <p>En este proyecto se va a abordar este problema en situaciones en las que los tags están en movimiento.</p> <p>Se considerarán dos cintas transportadoras con distintas velocidades y densidad de tags por unidad de longitud, cada cinta transportadora se asocia a un lector y se buscará un reparto de recursos óptimo entre los lectores, con el objetivo de minimizar la tasa de tags que pasan por la zona de cobertura sin ser detectados.</p> <p>La metodología de trabajo estará basada fundamentalmente en simulación y se ha programado la generación automática de resultados mediante scripts.</p> <p>En este PFC se evalúan diferentes políticas de reparto para la búsqueda de los resultados óptimos en diferentes escenarios, también se estudia el efecto de los parámetros del sistema en el rendimiento de dichas políticas.</p> <p>El objetivo principal de este proyecto es encontrar los límites de operación del sistema para el cumplimiento de un objetivo de calidad determinado por la tasa de pérdidas.</p>
<b>Titulación</b>	Ingeniería Técnica de Telecomunicación, esp. Telemática
<b>Departamento</b>	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
<b>Fecha de Presentación</b>	Abril - 2013

# ÍNDICE

• <b>CAPÍTULO 1: Introducción</b>	<b>07</b>
• <b>CAPÍTULO 2: Tecnología RFID:</b>	<b>10</b>
▪ 2.1 Tecnología y evolución.	<b>10</b>
▪ 2.2 RFID: Fundamentos básicos	<b>10</b>
▪ 2.3 Principios de funcionamiento	<b>11</b>
○ 2.3.1 RFID en campo cercano	<b>12</b>
○ 2.3.2 RFID en campo lejano	<b>14</b>
▪ 2.4 Elementos de un sistema RFID	<b>17</b>
▪ 2.5 Rango de Frecuencias de un sistema RFID	<b>24</b>
▪ 2.6 Protocolos anticolidión RFID	<b>27</b>
○ 2.6.1 Asíncronos	<b>36</b>
○ 2.6.2 Síncronos	<b>38</b>
▪ 2.7 Estándares	<b>45</b>
• <b>CAPÍTULO 3: Sistema de reparto de recursos en un sistema RFID con lectores interferentes y tags móviles</b>	<b>56</b>
▪ 3.1 Descripción del problema	<b>57</b>
▪ 3.2 Aplicaciones del sistema	<b>58</b>
○ 3.2.1 Aplicaciones con uso de RFID	<b>59</b>
○ 3.2.2 Seguridad	<b>60</b>
○ 3.2.3 Seguimiento	<b>62</b>
○ 3.2.4 Autenticación	<b>64</b>
○ 3.2.5 Pago electrónico	<b>65</b>
○ 3.2.6 Entretenimiento	<b>66</b>
▪ 3.3 Descripción del simulador OMNeT++	<b>67</b>
▪ 3.4 Descripción del simulador inicial	<b>69</b>
▪ 3.5 Descripción de las diferentes variantes de simulación	<b>69</b>
▪ 3.5.1 BFSA Frame Scheduling	<b>70</b>
▪ 3.5.2 DFSA N-Slotted Scheduling	<b>77</b>
▪ 3.5.3 BFSA N-Slotted Scheduling	<b>81</b>
• <b>CAPÍTULO 4: Simulaciones y resultados:</b>	<b>82</b>
- 4.1 El Tag Loss Ratio (TLR)	<b>82</b>
- 4.2 BFSA Frame Scheduling	<b>83</b>
- 4.3 DFSA N-Slotted Scheduling	<b>87</b>

- 4.4 BFSA N-Slotted Scheduling	91
- 4.5 Comparativa de los 3 métodos	93
- 4.6 Simulaciones con cargas asimétricas	94
▪ 4.6.1 DFSA N-Slotted Scheduling con carga 60-100	94
▪ 4.6.2 BFSA N-Slotted Scheduling con carga 60-100	97
• <b>CAPÍTULO 5: Conclusión y líneas futuras</b>	<b>100</b>
• <b>CAPÍTULO 6: Bibliografía</b>	<b>103</b>
• <b>Anexo A: Acrónimos y abreviaturas</b>	<b>109</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tabla aplicaciones RFID	08
Figura 2: “Internet of things”, una nueva dimensión.	08
Figura 3. Crecimiento previsto del mercado RFID.	09
Figura 4: Sistema RFID básico "standalone"	10
Figura 5: Componentes lógicos de un tag RFID	12
Figura 6: Tag para campo cercano a 128 KHz y 13,56 MHz respectivamente	13
Figura 7: Alimentación/comunicación RFID en campo cercano a menos de 100 MHz	14
Figura 8: Tags para campo lejano a 900 MHz y 2.45 GHz respectivamente	14
Figura 9: Alimentación/comunicación RFID en campo lejano a más de 100 MHz	15
Figura 10: Modulaciones ASK y PSK en señales RFID	17
Figura 11: Reader Fijo XR480	18
Figura 12: Reader Portátil IMC9060-G	18
Figura 13: Reader fijo	19
Figura 14: Elementos que componen un tag pasivo	20
Figura 15: tag activo	21
Figura 16: tag semi activo	22
Figura 17: Ejemplo de tag pasivo	22
Figura 18: Distribución de la banda de frecuencias por zonas	26
Figura 19: Sistema de control de acceso del fabricante HID	29
Figura 20: Tag RFID para corredores	31
Figura 21: Tag y cabina de peaje de un sistema de peaje automático FasTrak	33
Figura 22: Forfait de una estación de esquí con sistema RFID para acceder a telesillas	34
Figura 23: Comunicación broadcast entre reader y tags de su zona de interrogación	37
Figura 24: Comunicación multiacceso entre reader y tags de su zona de interrogación	38
Figura 25: Taxonomía de los protocolos anticollision para tags RFID	39
Figura 26: SDMA adaptativo con antena direccional controlada electrónicamente	40
Figura 27: En FDMA se tienen varios canales frecuenciales al mismo tiempo	41
Figura 28: Canales de frecuencia disponibles en FDMA	42

Figura 29: En TDMA se usa todo el ancho de banda en cada instante dado	<b>43</b>
Figura 30: Aloha puro, Aloha ranurado y Aloha ranurado en tramas	<b>44</b>
Figura 31: Ejemplo de algoritmo splitting o segmentación	<b>49</b>
Figura 32: Ejemplo de algoritmo QT	<b>50</b>
Figura 33: En I-code los tags son colocados aleatoriamente en los slots de la trama	<b>51</b>
Figura 34: Un proceso arbitrario completo en el protocolo contact-less	<b>52</b>
Figura 35: Ejemplo del protocolo contact-less	<b>53</b>
Figura 36: Desarrollo de los estándares por frecuencias	<b>55</b>
Figura 37: Ejemplo de un código EPC	<b>59</b>
Figura 38: Protocolos de interfaz RFID	<b>60</b>
Figura 39: Clasificación de tags según EPCglobal	<b>62</b>
Figura 40: Potencia radiada equivalente permitida por la norma EN 302 208	<b>63</b>
Figura 41: Teléfono móvil con NFC	<b>64</b>
Figura 42: Uso generalizado de RFID en la logística de una compañía	<b>65</b>
Figura 43: Descripción del problema RFID abordado	<b>66</b>
Figura 44: Adaptive Q algorithm en Gen-2 protocol	<b>79</b>
Figura 45: Evolución del TLR frente a Q para diferentes cargas al sistema	<b>87</b>
Figura 46: Representación de $Q_{opt}$ frente a la carga del sistema en tag/m	<b>89</b>
Figura 47: Representación del $TLR_{opt}$ frente a la carga del sistema en tag/m	<b>90</b>
Figura 48: TLR frente a carga para diferentes valores del parámetro c	<b>92</b>
Figura 49: TLR frente a Carga para diferentes intervalos de lectura.	<b>93</b>
Figura 50: TLR frente a Carga en BFSa y DFSA	<b>94</b>
Figura 51: $TLR_{opt}$ frente a la Carga para intervalos de 1 slot entre readers	<b>95</b>
Figura 52: Comparativa algoritmos para el de reparto de recursos en un sistema RFID	<b>96</b>
Figura 53: TLR para variaciones de intervalos de slots en cinta 1 frente a los de la cinta 2 con protocolo DFSA N-Slotted Scheduling.	<b>99</b>
Figura 54: TLR para variaciones de intervalos de slots en cinta 1 frente a los de la cinta 2 con protocolo BFSa N-Slotted Scheduling.	<b>102</b>

# Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

En términos generales, la tecnología RFID (*“Radio Frequency Identification”*) permite la identificación de objetos de forma inalámbrica, sin necesidad de que exista entre el lector y el objeto contacto o línea de visión directa, requisito indispensable para otras tecnologías como la lectura láser de códigos de barras. Esta identificación se realiza mediante la incorporación o fijación de un transpondedor al objeto (*“tag”*), el cual transmite los datos que contiene cuando detecta que está siendo interrogado por un lector RFID.

Aunque la tecnología no es nueva, los avances técnicos en aspectos tales como alcance, seguridad, almacenamiento o velocidad de lectura entre otros, han suscitado el interés de la industria por ella, considerándola como el sustituto natural del código de barras dada la importante oportunidad que RFID ofrece para conseguir una importante reducción de costes en las cadenas de producción y logística. Grandes empresas internacionales con una importante carga logística o de producción han comenzado a implantar la tecnología o han exigido a sus proveedores que la incorporen, motivadas por las notables mejoras que supone su introducción para sus procesos productivos. Algunos casos ampliamente documentados son los de las empresas Wal-Mart, Metro Group, Tesco, Mark&Spencer, Departamento de Defensa de Estados Unidos, Michelin, BMW, Volvo, Hewlett-Packard, Best-Buy o Nokia.

Sin embargo, aunque la aplicación natural de esta tecnología sea dentro de la cadena de producción y distribución, diariamente aparecen nuevas aplicaciones y oportunidades de negocio alrededor de las distintas variantes de esta tecnología de identificación y su combinación con otras tecnologías. Aplicaciones sobre las que se puede encontrar una amplia bibliografía e implantaciones en distintos sectores de actividad son:

- Control de acceso: peajes de carreteras, aparcamientos, acceso a edificios, acceso a zonas restringidas.
- Prepago: peajes de carreteras, transportes (autobús, metro), pago con teléfono móvil.
- Identificación, localización y monitorización de personas, animales o materiales: en combinación con sensores (temperatura, humedad), tecnología inalámbrica (wlan) o tecnología de localización (GPS).
- Autenticidad de productos (*“anti-counterfeiting”*) o documentos.

Son tantas las posibilidades de utilización de la tecnología RFID en todos los sectores de actividad que, hoy día, se la considera uno de los pilares básicos de la siguiente evolución de las redes de comunicación, la cual ha recibido varias denominaciones (*“Internet of things”, “Ambient Intelligence”, “Ubiquitous Computing”*) aunque todas ellas se refieren al mismo concepto: la interacción automática e inteligente entre dispositivos en cualquier circunstancia o ubicación, y su comunicación con sistemas remotos de datos a través de las redes de telecomunicación.

Traditional RFID Applications	Emerging RFID Applications
Security/access control	Warehouse management
Electronic article surveillance	Supply chain management
Asset/fleet management	Reverse logistics
Mass transit	Shipment tracking
Library access	Asset tracking
Toll collection	Retail management
Animal identification	Document tracking
	Anti-counterfeit
	Advance access control
	Mass transit – monthly and single trip
	Airline baggage handling
	Aircraft parts and tools
	Healthcare applications
	Regulatory compliance
	Payments

Fuente: IBM

Fig. 1. Aplicaciones RFID.

Figura 1: Tabla aplicaciones RFID

Son tantas las posibilidades de utilización de la tecnología RFID en todos los sectores de actividad que, hoy día, se la considera uno de los pilares básicos de la siguiente evolución de las redes de comunicación, la cual ha recibido varias denominaciones (“*Internet of things*”, “*Ambient Intelligence*”, “*Ubiquitous Computing*”) aunque todas ellas se refieren al mismo concepto: la interacción automática e inteligente entre dispositivos en cualquier circunstancia o ubicación, y su comunicación con sistemas remotos de datos a través de las redes de telecomunicación.

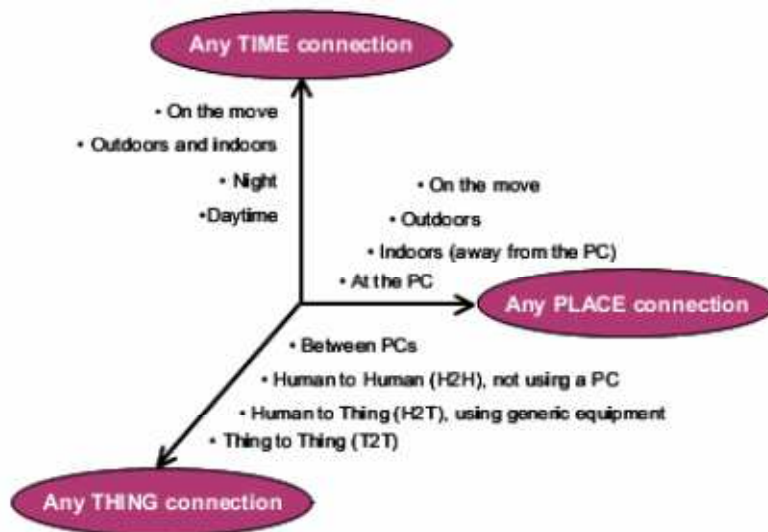
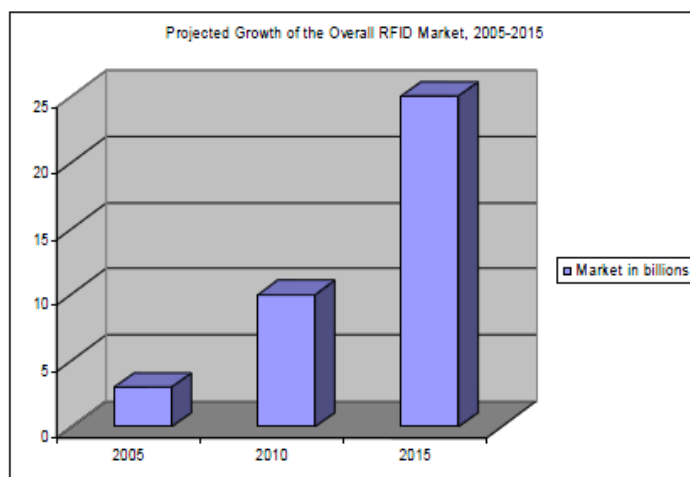


Figura 2: “Internet of things”, una nueva dimensión.



Aunque aún es necesario investigar y combinar distintas tecnologías para llegar a este nivel de conectividad (sensores, inteligencia artificial, nanotecnología, movilidad, baterías), la aportación de la tecnología RFID es clara y fundamental en esta visión del futuro de las comunicaciones: la introducción a bajo coste de un código identificativo único y universal en los objetos, el cual les permita autenticarse e interactuar con otro sistemas, tanto locales como remotos. Esta es la visión que los organismos responsables de la normalización y estandarización de RFID a nivel mundial (EPCGlobal, Auto-ID Labs, ISO) están desarrollando e intentando implantar en coordinación con todos los agentes involucrados (fabricantes, desarrolladores de software, reguladores de telecomunicaciones nacionales e internacionales).

Todas estas expectativas han contribuido a que, inicialmente, la industria estimara un enorme y rápido crecimiento del mercado y de la implantación de la tecnología RFID a nivel mundial. El volumen de negocio total derivado de la introducción de RFID, incluyendo tecnologías relacionadas, desarrollo de software y servicios especializados (consultoría, integración) es difícil de calcular, por lo que la mayoría de los análisis incluyen sólo el derivado directamente de la introducción de las etiquetas y equipos lectores RFID en las cadenas de producción y suministro de forma equivalente al código de barras.



Fuente: IDTechEx (2005)

Figura 3. Crecimiento previsto del mercado RFID.

Sin embargo, a día de hoy, aunque los analistas siguen coincidiendo en mantener las previsiones de negocio de la tecnología, los datos de actividad que muestra el mercado inducen a revisar las previsiones en el tiempo, ampliando el periodo de implantación de la tecnología a nivel mundial, dadas las barreras intrínsecas que supone no sólo en cuanto a precio (el código de barras no tiene coste y ya se encuentra implantado en todas las cadenas de producción), sino también a nivel de complejidad técnica (software y hardware) y a nivel normativo y regulatorio.

# Capítulo 2: TECNOLOGÍA RFID

## 2.1 Tecnología y evolución:

La Identificación por Radio Frecuencia (RFID, "Radio Frequency Identification") es una tecnología en evolución cuyas posibilidades de desarrollo son difíciles de calcular. La identificación y trazabilidad automática de los objetos en todo el mundo posibilita la aparición de nuevos mercados y fórmulas de negocio, y cambia la forma en que las empresas controlan sus stocks.

Una correcta comprensión de todos los factores que influyen en un sistema RFID es importante para lograr realizar adecuadamente una implantación o poder evaluar correctamente nuestras necesidades.

Con el objetivo de ofrecer una comprensión general de dichos factores, en este documento se describe todos los componentes de un sistema RFID, se revisa el estado actual de la tecnología y de los estándares a nivel mundial junto con las tendencias de la industria y se recogen las perspectivas de mercado a corto y medio plazo.

## 2.2 RFID: Fundamentos básicos

En un primer acercamiento, un sistema RFID básico se puede definir en los siguientes puntos:

- El objetivo de la tecnología es la identificación de objetos a distancia, vía radio, sin necesidad de contacto ni línea de visión directa.
- Una solución básica basada en RFID se compone de un lector con una o más antenas, etiquetas de identificación ("*tags*") y un software que realice el tratamiento de la información recogida por los lectores.

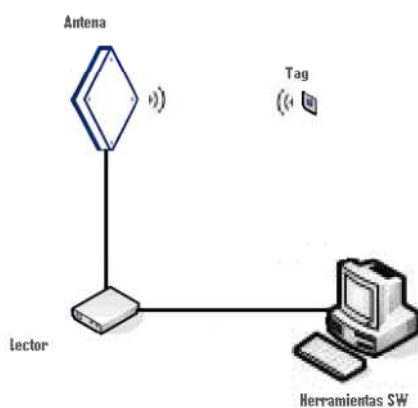


Figura 4: Sistema RFID básico "standalone"

Hay que tener en cuenta que la potencia de la tecnología RFID reside tanto en su bajo coste como en la universalidad ("*serialization*") y unicidad del código identificador del tag (EPC, "*Electronic Product Code*"), fundamentales para las aplicaciones de la cadena de suministro. Por tanto, la estandarización a nivel mundial tanto del código EPC (concebido como evolución del código UPC, "*Universal Product Code*" de los códigos de barras) como de los mecanismos para su asignación y para garantizar la interoperabilidad de los distintos sistemas es vital cuando se habla de RFID.

En los siguientes apartados se revisarán las características principales de la tecnología y de cada uno de estos componentes.

## 2.3 Principios de funcionamiento:

En pocas palabras, se podría describir el funcionamiento de un sistema RFID como el de un sistema de comunicación que se basa en la comunicación bidireccional entre un reader (interrogador) y un tag o etiqueta (transponder), por medio de ondas de radiofrecuencia.

El propósito de la antena de un tag es la de recibir la energía procedente de la señal enviada por el reader y acto seguido responder dicha señal con la transmisión de su ID. El microchip contenido en el tag es alimentado mediante la energía de la señal recibida desde la antena del tag, la cual activa el circuito electrónico y codifica la ID del tag dentro de una señal de respuesta que, por otra parte, será transmitida de vuelta a la antena del tag para ser transmitida hacia el reader en forma de respuesta a su petición.

A lo largo de la evolución del diseño de la tecnología RFID, han habido dos aproximaciones diferentes en cuanto a la entrega de la energía desde el reader hasta el tag: la inducción magnética y la captura de ondas electromagnéticas propagadas. Estos dos diseños toman las ventajas de las propiedades electromagnéticas relacionadas con las antenas de RF, estas son la propiedad de campo cercano (en inglés *near field*) y la propiedad de campo lejano (en inglés *far field*). Si una corriente alterna atraviesa una bobina, ésta creará un campo magnético alrededor de la bobina, que es el fenómeno que hace referencia al campo cercano. Este mismo circuito podría dar origen a la propagación de ondas electromagnéticas que se escaparían de la bobina/antena y se radiarían en el espacio, considerándose este término como campo lejano, el cual está estrechamente ligado con la transmisión por radio. Ambas propiedades, campo cercano y campo lejano, permiten transferir la suficiente energía como para que un tag pueda realizar su operación (normalmente entre 10  $\mu\text{W}$  y 1 mW, dependiendo del tipo de tag). Además, a través de diferentes técnicas de modulación, como pueden ser ASK, FSK o PSK, las señales en campo lejano y campo cercano pueden también transmitir y recibir datos. En la figura 5 se muestran los componentes de un tag de manera lógica. En la figura 5 hay que destacar que la bobina/antena puede tener diferentes formas, considerando que el tag sigue los principios de campo cercano si utiliza una bobina o que el tag sigue los principios de campo lejano si el tag utiliza una antena.

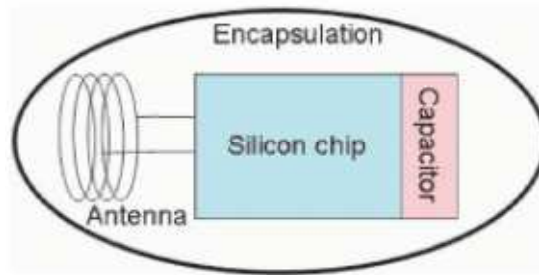


Figura 5: Componentes lógicos de un tag RFID

### 2.3.1 RFID en campo cercano

El uso del acoplamiento por campo cercano entre el reader y el tag puede ser explicado mediante las definiciones de los principios de inducción magnética postulados por la ley de Faraday. Un reader que entrega una gran corriente alterna a través de una bobina produce un campo magnético alterno alrededor de dicha bobina. Si un tag con una pequeña bobina se sitúa en ese campo magnético, aparecerá una tensión alterna a través del tag, y si esa tensión es almacenada en un condensador incorporado en el tag, se tendrá una carga almacenada de reserva la cual podrá utilizarse para alimentar el microchip del tag. Los tags que utilizan el acoplamiento en campo cercano envían los datos de vuelta al reader utilizando una modulación de carga. Debido a que cualquier corriente procedente de la bobina del tag dará lugar a su propio pequeño campo magnético, el cual se opondrá al campo del reader, la bobina del reader puede detectar este campo como un pequeño incremento de la corriente que fluye a través de ella.

Esta corriente es proporcional a la carga aplicada a la bobina del tag, de ahí el nombre de este tipo de modulación. Este es el mismo principio utilizado por los transformadores encontrados en muchos hogares hoy en día, aunque habitualmente las bobinas primarias y secundarias de un transformador están enrolladas de manera que se sitúen una junto a la otra con el fin de asegurar una transferencia eficiente de potencia. No obstante, como el campo magnético se extiende más allá de la bobina primaria, una bobina secundaria puede adquirir un poco de la energía de manera distanciada, algo similar al fenómeno que ocurre entre un reader y un tag. De esta manera, si la electrónica del tag aplica una carga a su propia antena de bobina y varía dicha carga en el tiempo, una señal puede ser codificada como pequeñas variaciones en la intensidad del campo magnético representando el ID del tag. El reader puede entonces recuperar esta señal mediante el seguimiento de los cambios en la corriente a través de la bobina del reader. Existen algunos cambios en la modulación dependiendo del número de bits de ID requeridos y del uso de bits redundantes adicionales en el código para eliminar errores producidos por el ruido del canal en la comunicación.

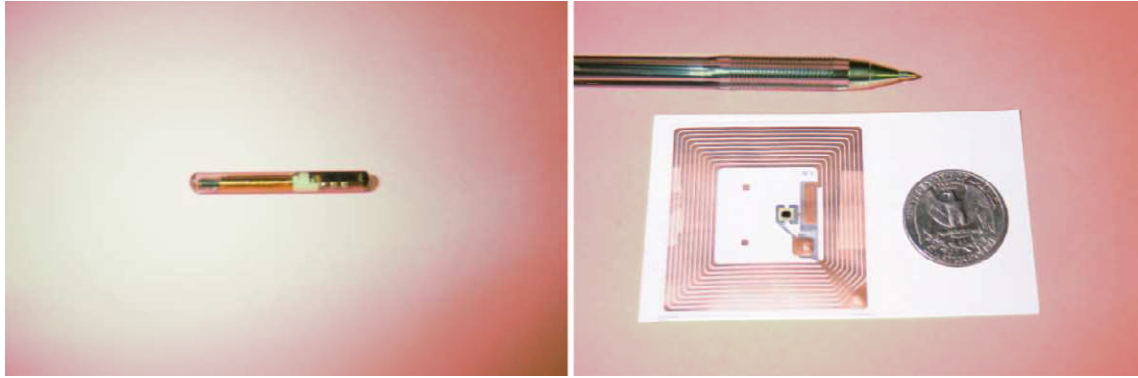


Figura 6: Tag para campo cercano a 128 KHz y 13,56 MHz respectivamente

El acoplamiento en campo cercano es la aproximación más sencilla para implementar sistemas de RFID pasivos. Esto es así porque fue la primera aproximación tomada y, como consecuencia, han aparecido muchos estándares, como la ISO 15693 y 14443, y una variedad de soluciones propietarias. Sin embargo, las comunicaciones mediante campo cercano tienen algunas limitaciones físicas. El rango para el cual se puede utilizar la inducción magnética se aproxima a  $c/2\pi f$ , donde  $c$  es una constante, la velocidad de la luz, y donde  $f$  es la frecuencia. De esta manera, si la frecuencia de trabajo incrementa, la distancia a la cual puede trabajar el acoplamiento por campo cercano disminuye. Otra limitación más del campo cercano es la limitación de energía disponible por inducción dependiente de la separación con la bobina del reader. El campo magnético se apaga con un factor de  $1/r^3$ , donde  $r$  es la separación entre el tag y el reader, a lo largo de una línea central perpendicular al plano de la bobina. De esta manera, cuando una aplicación requiere de más bits de ID o bien una discriminación existente entre diferentes tags en la misma zona de lectura en un instante de tiempo de lectura dado, cada tag necesitará una tasa de bit elevada y, por este motivo, una necesitará una frecuencia de trabajo mayor. Las presiones impuestas por este tipo de diseños pueden ser solucionadas gracias a otro tipo de diseño de sistemas RFID pasivos. Estos son los sistemas basados en los principios de comunicación en campo lejano.

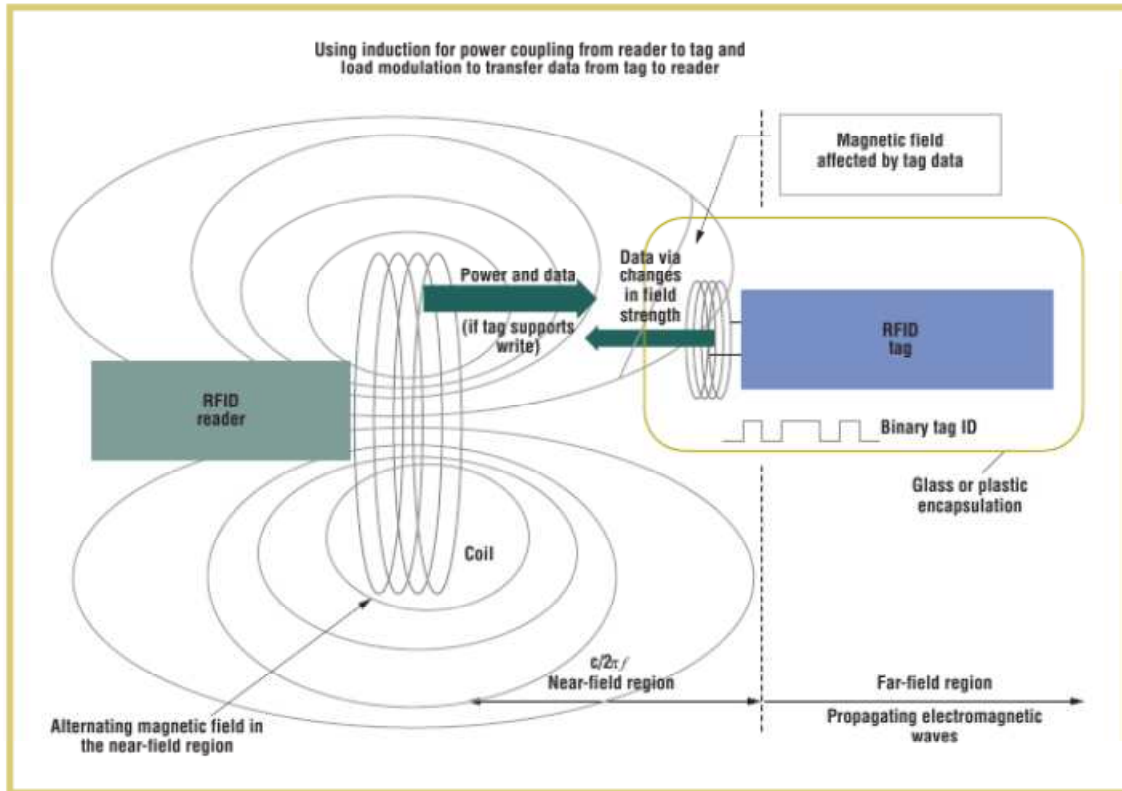


Figura 7: Alimentación/comunicación RFID en campo cercano a menos de 100 MHz

### 2.3.2 RFID en campo lejano

Los tags RFID basados en emisiones en campo lejano capturan las ondas electromagnéticas o EM que se propagan desde una antena del tipo dipolo incorporada en un reader.

Una pequeña antena dipolo en un tag recibe la energía de una diferencia de potencial alterna que aparece a lo largo de los brazos del dipolo. Un diodo puede rectificar este potencial y enviarlo a un condensador, el cual permitirá acumular la energía con el propósito de alimentar la electrónica del tag. Sin embargo, a diferencia del diseño basado en la inducción magnética, los tags están fuera del alcance del campo cercano del reader o lector, y la información no puede ser transmitida desde el tag de vuelta al reader utilizando la modulación de carga.

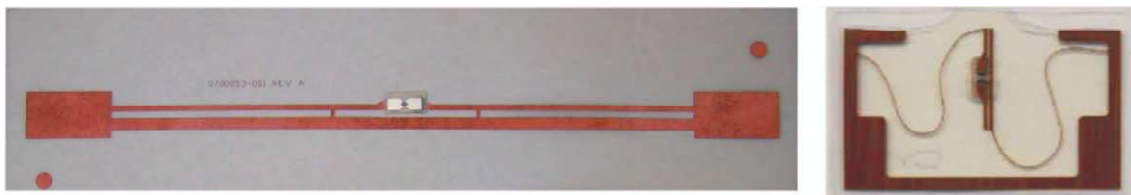


Figura 8: Tags para campo lejano a 900 MHz y 2.45 GHz respectivamente

La técnica utilizada para los tags RFID comerciales de campo lejano se denomina back scattering. Si una antena es diseñada con unas dimensiones precisas, esta puede ser sintonizada a una banda de frecuencias determinada y absorber la mayor cantidad de energía que pueda alcanzar en esa banda. Sin embargo, si existe un desajuste en la impedancia en dicha frecuencia, cierta cantidad de esa energía será reflejada de vuelta hacia el reader como pequeñas ondas que se reflejan desde la antena del tag. De esta manera, las ondas reflejadas pueden ser detectadas por el reader utilizando un receptor de radio lo suficientemente sensible. Mediante la variación en el tiempo de la impedancia de la antena, el tag puede reflejar de vuelta más o menos señal siguiendo algún patrón que codifique la ID del tag. En la práctica, se puede desajustar la antena de un tag para este propósito mediante la colocación de un transistor a lo largo del dipolo y, de esta manera, ir ajustándolo parcialmente o no. Habitualmente y como guía de diseño, los tags que utilizan los principios de campo lejano operan a más de 100 MHz, normalmente en la banda de UHF (así como 2.45 GHz). Por debajo de esta 100 MHz se considera el dominio de trabajo de los sistemas RFID basados en los principios del acoplamiento en campo cercano.

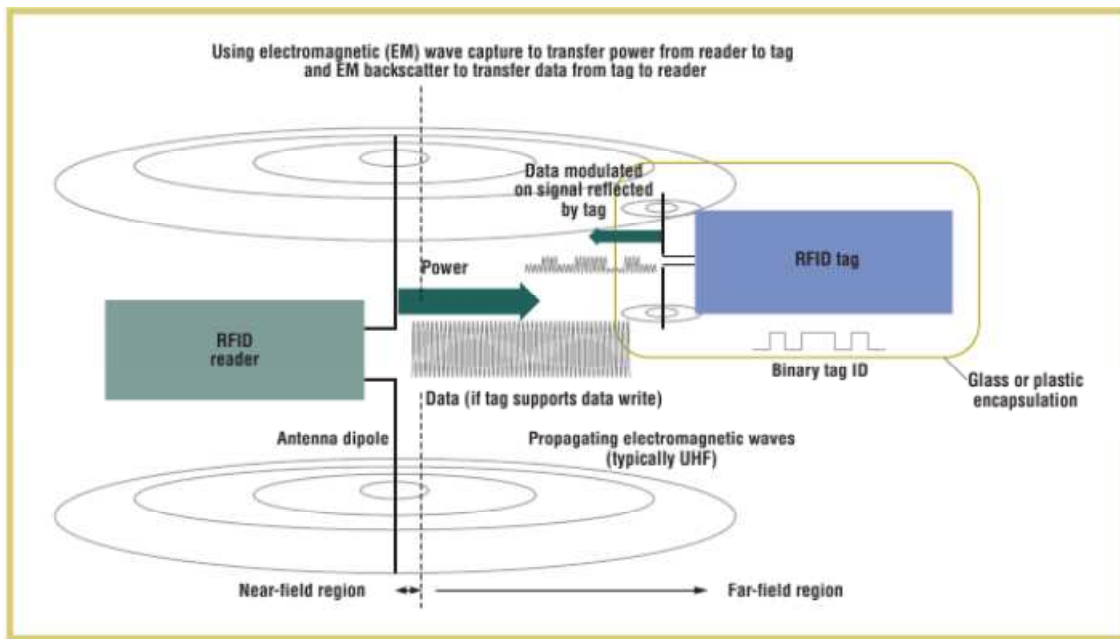


Figura 9: Alimentación/comunicación RFID en campo lejano a más de 100 MHz

El alcance o rango de los sistemas basados en campo lejano está limitado por la cantidad de energía que puede alcanzar el tag procedente del reader y también está limitado por como de sensible es el receptor de radio del reader para la señal reflejada. La señal reflejada real es muy pequeña debido a que es el resultado de dos atenuaciones, cada una basada en una ley cuadrática inversa. La primera atenuación se produce por la propagación de las ondas EM desde el reader al tag y la segunda atenuación se produce cuando las ondas reflejadas se propagan de vuelta desde el tag al reader. De esta manera, la energía de retorno es proporcional a  $1/r^4$ , donde de nuevo  $r$  es la distancia de separación entre el tag y el reader.

Afortunadamente, gracias a la ley de Moore y a las características cada vez más avanzadas en cuanto a la disminución del tamaño en la fabricación de semiconductores, la energía requerida para alimentar un tag a una determinada frecuencia continúa disminuyendo (en la actualidad a menos de unos cuantos microvatios). Así, mediante modernos semiconductores, se pueden fabricar tags que puedan ser leídos a distancias mucho más grandes que las permitidas hace unos cuantos atrás. Además, radios receptoras de readers no demasiado caras están siendo desarrolladas con mejoras en la sensibilidad con la que pueden detectar las señales reflejadas por los tags. Estas radios, a un coste razonable, pueden alcanzar niveles de potencia del orden de -100 dBm en la banda de frecuencias de 2.4 GHz. Un reader común en campo lejano puede interrogar tags a 3 metros de distancia de manera exitosa y algunas compañías dedicadas al estudio de la tecnología RFID reivindican que sus productos alcanzan rangos por encima de los 6 metros. Los trabajos realizados por la EPCglobal fueron clave para promocionar el diseño de los tags en UHF, el cual ha sido la base de los ensayos y pruebas de la tecnología RFID implantada en las empresas Wal-Mart y Tesco.

### **Técnicas de modulación utilizadas en RFID**

Los tags RFID que son diseñados para utilizar la técnica de back scattering tienen limitadas las opciones de modulación de los datos de retorno enviados desde el tag al reader. La técnica de modulación ASK es la más básica y fácil de implementar, pero como todas las técnicas de modulación de amplitud, esta aproximación es propensa a ser afectada por el ruido del canal de comunicación. Cuando la modulación de carga es utilizada para transmitir información, hay una gran variedad de opciones de modulación.

Otra técnica de modulación, la modulación PSK es mucho más robusta que la modulación ASK, y en muchos diseños, una aproximación binaria PSK(BPSK) ha sido utilizada de manera exitosa.



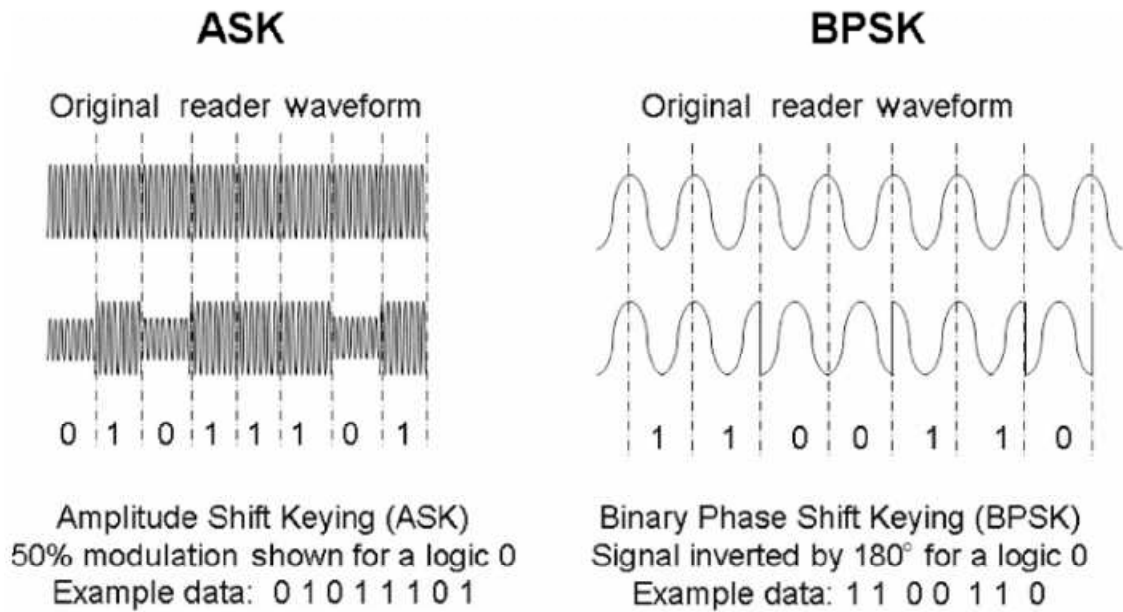


Figura 10: Modulaciones ASK y PSK en señales RFID

## 2.4 Elementos de un sistema RFID

A grandes rasgos, un sistema RFID es la comunicación entre un lector o reader y un tag, tarjeta o transpondedor inteligente a través del aire y mediante una frecuencia conocida por ambos elementos, como cualquier otra comunicación radio existente. En resumen, los lectores, antenas y tags configuran el sistema RFID básico, que puede ser ampliado por sistemas de red que tratan la información proporcionada por la RFID.

### Reader o Lector RFID

Un lector o reader RFID es realmente como una radio, como la que podemos llevar en nuestro coche, que capta o produce señales analógicas. Su funcionamiento es sencillo, el reader produce electricidad que viaja por cable a un ratio determinado, normalmente hacia una antena que radia la misma señal en el espacio a una frecuencia determinada para que otros elementos lo escuchen. No solo genera la señal que a través de las antenas se transmite en el aire, sino que también escucha las respuestas de los tags procedentes también de estas antenas. Transmite y recibe ondas analógicas que transforma en cadenas de bits de ceros y unos, bits de información digital. A veces cuando se habla de lectores, ya se entiende que también se habla de las antenas, ya que existen lectores con antenas integradas y otros que necesitan su conexión.



Figura 11: Reader Fijo XR480

Cada lector es conectado a una o más antenas (máximo según tipo de lectores). Estas tienen una ciencia propia, pero es importante conocer cómo el lector crea la señal electromagnética y la antena realiza la difusión en su zona de interrogación (campo de radio frecuencia). Además el lector también se conecta a una red de datos LAN o WAN o a un PC mediante varios tipos de interfaz como pueden ser RS-232 o Ethernet. Hay multitud de tipos de lectores: simples (un solo estándar y frecuencia), multiregionales, multifrecuencias (trabajan a diferentes frecuencias), multi protocolos, etc. La línea con mayor interés son los lectores ágiles y flexibles que pueden utilizar cualquier protocolo, región o frecuencia (HF o UHF) según su uso.

## Antenas

Son los dispositivos que permiten radiar las señales de los lectores y leer las ondas radio de los tags. Como se ha comentado en los lectores, muchas veces se habla de lector con antena integrada como si fuera un lector (ya se entiende que tiene una antena). Varias antenas pueden ser gestionadas por un único lector, en este caso sí que se distingue bien lo que es el dispositivo lector de la antena o antenas. Hay dos clases de antenas, la mayoría de veces también podemos catalogar los lectores con estos dos tipos.

- **Móviles:** normalmente se encuentran en lectores móviles con antenas integradas o son utilizadas manualmente por un operario (tipo buscador de tags). En resumen cuando la antena se mueve para identificar el tag.



Figura 12: Reader Portátil IMC9060-G

- **Fijas:** como su nombre indica son antenas fijas que se conectan a los lectores mediante cables. Un único lector puede gestionar varias antenas creando una zona de interrogación. Podemos encontrar ejemplos en las Dock door (2 antenas) para puertas o de arco (3 antenas) para cintas transportadoras.



Figura 13: Reader fijo

## Transpondedores o Tags

Cuando el lector transmite en el espacio, espera normalmente una respuesta de otro elemento para mantener la comunicación, en los sistemas RFID es el tag quien responde también denominado como etiqueta o transpondedor. Un tag RFID esta compuesto por tres partes: el chip o circuito integrado (IC), la antena y el sustrato. El chip es un minúsculo microprocesador que almacena una serie de información. También contiene la lógica de lo que hay que hacer para responder a un lector. La antena permite al chip recibir la energía y la comunicación procedente del lector para emitir la suya y poder intercambiar flujos de datos entre ellos. Destacar que los tags, opcionalmente, pueden estar encapsulados para incrementar su protección mediante plásticos, siliconas, etc.

Hay una gran variedad de tipos de tags, siendo este elemento es más difícil de decidir según la aplicación que vayamos a realizar. Podemos diferenciarlos según su fuente de energía como activos, semi activos y pasivos, según su memoria como tags de solo de lectura, tags de múltiple lectura y una sola escritura, tags de múltiples lecturas y escrituras,

etc., o bien clasificarlos según los estándares que cumplen, su ciclo de vida, su tamaño, su distancia de lectura, etc.

## Estructura del Tag

A continuación se analizarán las tres partes que componen la estructura de un transpondedor o tag de RFID pasivo: antena, IC o circuito integrado y sustrato. Para el caso de los tags semi activos o activos solo habría que añadir la fuente de alimentación. En la figura 14 se muestra un ejemplo de tag pasivo detallando cada elemento que lo compone.

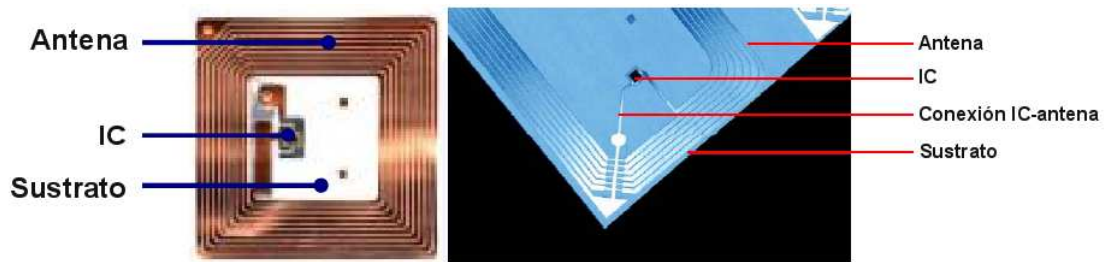


Figura 14: Elementos que componen un tag pasivo

- **IC o circuito integrado:** el chip almacena la información y ejecuta los comandos específicos. La mayoría de los tags pasivos que deben cumplir solo con la misión de identificación del producto tiene 96 bits, lo que habitualmente establece el EPC o Electronic Product Code, pero pueden tener una capacidad mayor. Como es de esperar en un tag, a mayor capacidad mayor es el coste de producción. El diseño del chip determina el tipo de memoria, es decir, si es de solo lectura o tiene la capacidad de leer y escribir.
- **Antena:** la función de la antena es absorber las ondas RF y difundir por el mismo medio la información contenida en el chip del tag. La energía para activar el chip la colecta del campo RF recibido de la emisión del reader. Según la frecuencia de la onda, el tag recibe la energía del campo magnético en HF y del campo eléctrico en UHF. A este proceso se le conoce como acoplamiento, en inglés coupling. En términos más técnicos el acoplamiento o coupling se produce cuando la energía se transfiere de un sistema a otro, en nuestro caso del aire a la antena. El tamaño de la antena es crítico para el comportamiento del tag porque normalmente determina el rango de lectura del tag. Simplemente al poner una antena más grande, esta puede recolectar mayor energía y por lo tanto puede transmitir con más potencia. Otras características de las antenas son la frecuencia de emisión y recepción, ya que podemos encontrarnos con Low Frecuency (LF) y High Frecuency (HF) donde las antenas son espirales por basarse en fenómenos puramente magnéticos, o Ultra High Frecuency (UHF) por basarse en fenómenos de naturaleza eléctrica. El tamaño también afecta a la frecuencia de emisión recepción.
- **Sustrato:** es el material que mantiene el chip y la antena juntos y protegidos. En la mayoría de los tags consiste en una fina película de plástico en la que, tanto el chip como la antena, quedan adjuntos a ella.

## Fuentes de Energía

Los tags o transpondedores se pueden clasificar según la procedencia de la energía para poder activar el chip y enviar la información como activos, semi activos y pasivos. A continuación se hablará con un poco más de detalle acerca de cada tipo.

- **Activos:** tienen una alimentación propia para el suministro de la energía. Dicha energía es utilizada para activar la circuitería del microchip y enviar la señal a la antena. Permiten una amplia cobertura de difusión de la señal, es decir, mayor alcance. Normalmente tienen una mayor capacidad de almacenar información, más allá del simple código único, como el contenido, el origen, destino, procesos realizados, etc.

También pueden llevar sensores adicionales a la propia memoria como sensores de temperatura, de velocidad, de movimiento, etc. que permiten almacenar o controlar datos vitales en algunas aplicaciones.

Estos tags son los más caros del mercado pero tienen un retorno de la inversión en muchas aplicaciones. Los ministerios de defensa de muchos países, por ejemplo, identifican los containers mediante esta tecnología para saber entre muchas otras cosas, el contenido exacto de su interior. También etiquetan elementos muy caros para su gestión de activos. Otro ejemplo, es su utilización en aplicaciones ferroviarias, donde se pueden integrar con sistemas GPS. El ejemplo más claro de tags activos es el sistema TeleTac para el pago sin parar de peajes.



Figura 15: tag activo

- **Semi activos:** utilizan una batería por separado para activar la circuitería del chip pero la energía para generar la comunicación es la que recoge de las ondas de radio del reader al igual que ocurre en los tags pasivos. Debido a la utilización de batería externa, estos tags son más grandes y caros que los pasivos, pero consiguen mejores rangos de comunicación. Al igual que en los tags activos, algunos tags semi pasivos llevan integrados sensores de temperatura, movimiento, etc. para proporcionar mayores funcionalidades.

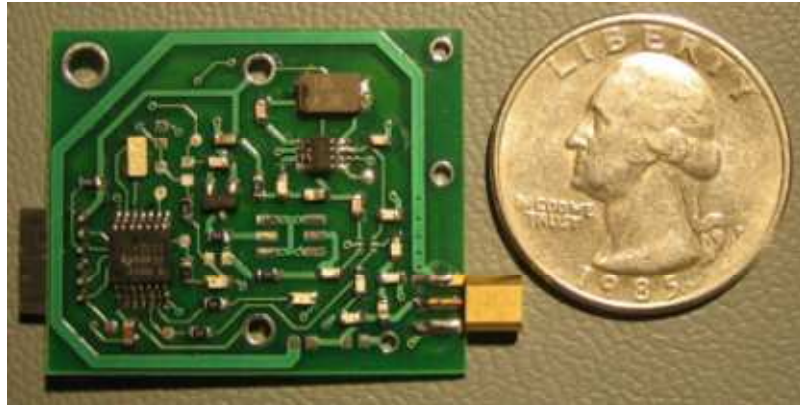


Figura 16: tag semi activo

- **Pasivos:** el propósito de este proyecto se centra en estos tags y, como se puede comprobar, ya se ha hablado con anterioridad sobre ellos. Los tags pasivos no requieren de batería, ni interna ni externa, ya que toda la energía la recoge del campo electromagnético creado por el reader o lector. Como cabe de esperar son los más económicos aunque, por otra parte, son los que tienen menor rango de comunicación, pero por su relación entre comportamiento y precio son los más utilizados u obligados a elegir.



Figura 17: Ejemplo de tag pasivo

## Tipo de Memoria

Los tags o transpondedores también se pueden clasificar según el tipo de memoria que tiene el chip contenido en el tag. De esta manera se pueden citar tres tipos de tags según su tipo memoria:

- **Solo lectura:** el código de identificación que contiene es único y no puede reescribirse. Normalmente se establece durante la fabricación del tag.
- **Múltiples lecturas y una sola escritura:** la información de identificación puede ser modificada por el reader una sola vez. Estos tags vienen sin información a la salida de fábrica y es el administrador del sistema RFID quien escribe la información de interés en el tag mediante el reader. También se les conoce como tagsWORM (Write Only Read Multiple).
- **Múltiples lecturas y escrituras:** la memoria de los tags puede ser leída y escrita múltiples veces.

## Clase

Por último, el EPCglobal, como el órgano de estandarización para la tecnología RFID para su uso con EPC ha organizado los tags en 6 clases. Se podría realizar este tipo de clasificación aunque no fuera con información EPC. Estas clases son:

- **Clase 0:** tags con memoria de solo lectura. El código EPC se codifica en la etiqueta durante el proceso de fabricación.
- **Clase 1:** tags de una sola escritura y lecturas indefinidas. Se fabrican sin código EPC y se incorpora al tag más tarde.
- **Clase 2:** tags con memoria de múltiples lecturas y múltiples escrituras.
- **Clase 3:** tags con las capacidades de la clase 2 más la fuente de alimentación que proporciona un incremento en el rango y funcionalidades avanzadas.
- **Clase 4:** tags con las capacidades de la clase 3 más una comunicación activa con la posibilidad de comunicar con otras etiquetas activas
- **Clase 5:** tags con las capacidades de la clase 4 más la posibilidad de poder comunicarse también con etiquetas pasivas.

## Middleware o Interfaz de Comunicación

Normalmente los elementos de un sistema RFID no forman un sistema aislado, sino que se conectan a sistemas de producción logística y redes datos. En esta fase entra el middleware, elemento del sistema situado entre el hardware RFID y las aplicaciones software del cliente, como por ejemplo sistemas de gestión de inventarios y operaciones relacionadas con la logística. Su función es la de gestionar todo el sistema RFID a nivel de hardware, recibir la información que envían los tags y filtrarla para solo transmitir información útil a los sistemas logísticos y empresariales. El middleware también puede ser un software diseñado expresamente para una aplicación concreta, que lo único que haga es transmitir la información recogida por los lectores a la aplicación correspondiente.





La utilización del espectro electromagnético está condicionado a las normativas de cada uno de los países. Una clasificación global y rápida es en bandas licenciadas o de pago y en bandas no licenciadas o libres. En el caso de España son de uso común o privativo, además de otras categorías. La tecnología RFID utiliza bandas comunes o no licenciadas.

Los sistemas RFID pueden utilizar diferentes frecuencias, pero generalmente las frecuencias más comunes son las frecuencias no licenciadas: Low Frequency o LF (entre 125 y 134 KHz), High Frequency o HF (13,56 MHz) y Ultra High Frequency o UHF (entre 902-928 MHz). Las microondas, situadas aproximadamente a 2,45 GHz, también son utilizadas en algunas aplicaciones. Las ondas de radio se comportan de manera diferente a diferentes frecuencias, por lo que se debe escoger la frecuencia correcta para cada aplicación.

Considerando lo citado anteriormente, a continuación se explican las características de los sistemas RFID en las tres bandas de frecuencias más utilizadas: baja frecuencia o LF, alta frecuencia o HF y ultra alta frecuencia o UHF:

- **Sistemas RFID de baja frecuencia (LF):** estos sistemas trabajan a frecuencias emitidas en un rango de 125 KHz y 134 KHz, los tags LF se caracterizan por la baja velocidad y las cortas distancias de lectura y por tener la capacidad de identificar solo un tag (no permiten la identificación múltiple de tags). Sus aplicaciones más comunes son los sistemas RFID de control de acceso y las tecnologías de control de pago. En la mayoría de ocasiones los sistemas LF no se utilizan para la identificación de tags ya que no permiten la identificación múltiple.
- **Sistemas RFID de alta frecuencia (HF):** estos sistemas trabajan a frecuencias próximas a 13.56 MHz, empleando tags con lectura a velocidad media y distancia inferior a 2 metros. Los sistemas RFID de alta frecuencia permiten identificar múltiples objetos en distancias cortas siendo, por este motivo, muy utilizado en sistemas farmacéuticos para la identificación de fármacos situados en un mismo estante o armario.

Otro motivo por el que los sistemas de alta frecuencia o HF son muy utilizados en la industria farmacéutica es porque trabajan de manera óptima en medicamentos líquidos y derivados.

- **Sistemas RFID de ultra alta frecuencia (UHF):** estos sistemas trabajan a frecuencias emitidas en un rango comprendido entre 860 y 960 MHz. Los sistemas que trabajan a esta frecuencia se han convertido en los más utilizados en los últimos años tanto por sistemas estandarizados como por sistemas propietarios sobre todo para la identificación masiva de objetos o tags ya que permiten la multilectura. Se utiliza en aplicaciones donde se deben leer masivamente varios tags a alta velocidad, además permiten lecturas a grandes distancias. Estos sistemas UHF suelen utilizar tags de tamaño mediano. Los sistemas UHF son muy utilizados en aplicaciones como cadenas de suministro, administración de activos, control de stocks y otras tareas relacionadas con la logística. También son utilizados en aplicaciones relacionadas con el control de acceso de vehículos. Por el contrario, los sistemas UHF sufren ciertas modificaciones con el contacto directo con líquidos y metales ya que es una banda de frecuencias sensible a la reflexión y a la absorción.

- Sistemas RFID de microondas:** los sistemas RFID por microondas tienen su utilización más común en frecuencias próximas a los 2.45 GHz y los 5.75 GHz. Estos sistemas de microondas permiten distancias superiores a 20 metros y elevadas tasas de transferencia en comparación a las frecuencias descritas anteriormente. Aunque estos sistemas de microondas permiten la identificación masiva de objetos a elevadas velocidades, su utilización se centra más en la identificación y seguimiento de vehículos. Como ocurre en los sistemas UHF también son sensibles a ciertos materiales como el agua o los metales debido a la absorción y a la reflexión.

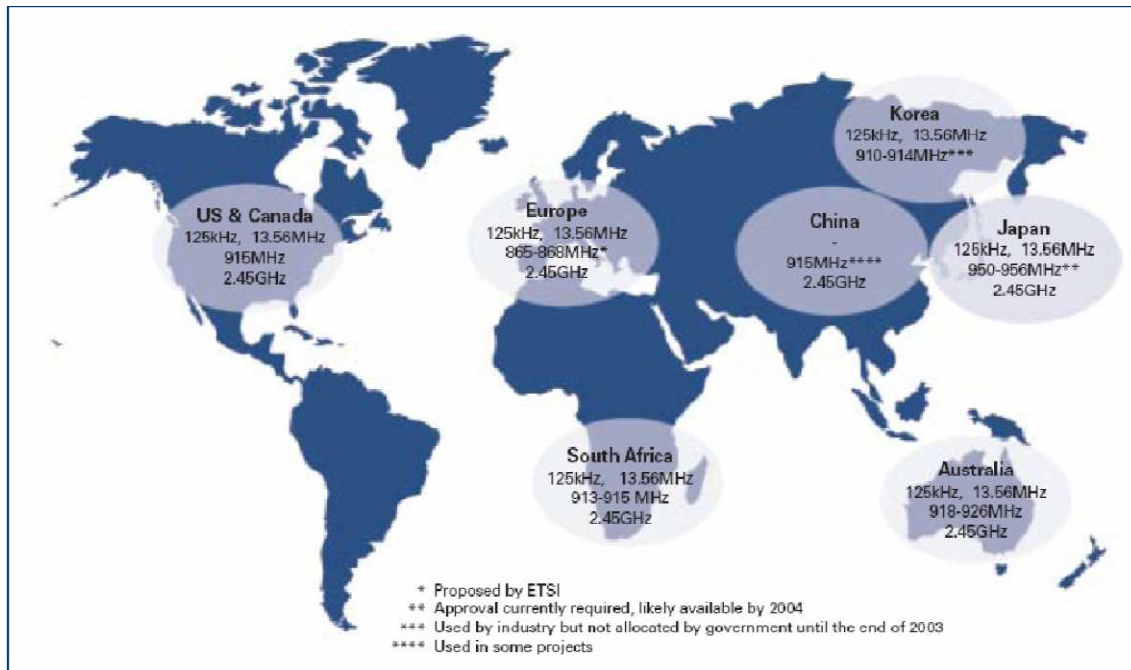


Figura 18: Distribución de la banda de frecuencias por zonas

Hay que destacar la importancia de la banda UHF en los sistemas RFID en los últimos años, ya que indudablemente ha tomado la cabeza en la carrera de los sistemas RFID.

Ciertas industrias están adoptando frecuencias diferentes a la banda UHF para sus sistemas, por ejemplo, las grandes compañías farmacéuticas, las administraciones reguladoras del control de alimentos y drogas y algunos almacenes de drogas emplean sistemas RFID en la frecuencia de 13.56 MHz (HF) para el seguimiento de fármacos con precios elevados. Existen dos razones por las que estas industrias y organizaciones emplean las frecuencias HF en lugar de las frecuencias UHF en sus sistemas de identificación. La primera es que muchos de los medicamentos y alimentos tienen un alto contenido de líquido y los sistemas en banda HF ofrecen mejores prestaciones en estas condiciones que los sistemas en banda UHF. La segunda razón cierta cantidad de objetos muy próximos entre sí unos de otros necesitan ser leídos con la suficiente precisión. Los sistemas en banda HF tienen una buena capacidad para gestionar los problemas surgidos por estas condiciones donde los objetos están muy próximos entre sí cuando se refiere a una comunicación mediante acoplamiento en campo cercano, en particular si los objetos no están en movimiento. Además, existe un grupo que apoya el uso y desarrollo de sistemas de identificación con comunicaciones en campo cercano

llamado Near Field Communication (NFC) que cuenta con el respaldo de Philips y otras marcas del sector.

## 2.6 Protocolos anticolidión RFID

Uno de los últimos objetivos marcados por la industria dedicada a la implementación de sistemas RFID es la capacidad de leer (y opcionalmente realizar el cobro) de todos los bienes etiquetados mediante tags RFID en un carrito de la compra de un supermercado, por ejemplo, mediante el procedimiento de pasar el carrito a través de un pasillo instrumentado. De esta manera, este sistema de identificación y cobro acelera la tarea de los consumidores gracias a estas zonas de chequeo y cobro reduciendo también los costes de operación. La solución a este problema en concreto o cuestiones similares a ésta podría ser el santo grial de la tecnología RFID, pero esta cuestión tiene algunas cuestiones de ingeniería que hacen de su solución una tarea difícil. Para empezar, el entorno RF dentro de un carrito de la compra, por ejemplo, suele ser muy impredecible y variable. El empaquetado de un producto en un carrito está compuesto por una gran variedad de materiales en los que se incluyen botes de metal y materiales de aluminio que pueden reflejar las señales de interrogación en unos casos y proteger objetos de estas señales en otros casos.

Además, algunos productos contienen líquidos y plásticos que podrían absorber las señales RF en la zona del espectro de microondas. Para complicar más el asunto, todos los productos se encuentran muy juntos entre sí y en configuraciones aleatorias. Algunos tags RFID adjuntos a un objeto podrían estar orientados respecto a la antena del reader de manera inadecuada, haciendo la comunicación dificultosa. Además, las antenas de los tags son habitualmente planas para permitir adherirse adecuadamente al objeto que van a identificar pudiendo no recibir la energía suficiente como para realizar sus funciones si el tag está orientado hacia el reader por el canto. Sin embargo, incluso en un entorno de radio frecuencia para un grupo de tags RFID ideal, existen todavía cuestiones de ingeniería en el diseño de readers que puedan exitosamente interrogar múltiples tags y leer con precisión todos los IDs en un intervalo relativamente corto de tiempo.

La habilidad de un reader de poder procesar una gran cantidad de tags de manera simultánea para recolectar sus datos es digno de atención. Si más de un tag está siendo identificado de manera simultánea, las señales de retorno procedentes de dichos tags pueden colisionar y cancelarse una a la otra en el reader. Esta situación provocará una retransmisión de las IDs de los tags que han participado en la colisión y dicha retransmisión provocará un desperdicio de ancho de banda y un incremento en el retardo total en la identificación de todos los objetos. De ahí que los algoritmos anticolidión entre tags y readers hayan sido revisados y reinventados para minimizar las colisiones. Si un sistema RFID puede ofrecer prestaciones con mecanismos anticolidión y detecciones combinadas con un 100% de precisión, entonces podrá proporcionar un uso eficiente y práctico en cualquier aplicación. Por tanto, el problema global es qué protocolo deberían utilizar los tags y el reader para que cada tag pueda comunicar al reader su ID lo más rápido y eficientemente posible. Por esta cuestión se

resume y clasifican los problemas de colisiones en RFID en problemas de identificación de tags y en problemas de colisión de readers.

- **Problema de identificación de tags:** está asociado en cómo se desarrolla de manera eficiente un protocolo anticolidión en tags RFID. Esta tarea puede ser delimitada como la identificación de múltiples objetos de manera segura en ausencia de grandes retardos y mediante la utilización de la mínima intensidad de señal posible en la transmisión y utilización mínima de computación. Los protocolos de acceso al medio conocidos como protocolos MAC que parecen estar orientados a este problema no pueden ser directamente utilizados en el problema de identificación de tags del que se habla en este apartado debido a varias restricciones. En los protocolos multi-acceso los principales factores de evaluación de las prestaciones incluyen el throughput, los retardos de paquetes y la estabilidad. Sin embargo, en una aplicación RFID arbitraria, el tiempo total en la identificación de todos los objetos o el tiempo consumido por los tags son más relevantes. Es decir, un retardo mínimo, consumo de energía mínimo, fiabilidad y eficiencia, independencia de la línea de visión, robustez y escalabilidad altas son algunas características deseables en un protocolo anticolidión para una comunicación entre los tags y el reader asociado. El problema de la identificación de tags se podría dividir a su vez en otros dos problemas: la interferencia entre frecuencias y la interferencia entre tags:
  - **Interferencia entre frecuencias:** la interferencia entre frecuencias ocurre cuando dos o más reader cercanos físicamente se comunican al mismo tiempo utilizando la misma frecuencia.
  - **-Interferencia entre tags:** la interferencia entre tags ocurre cuando readers vecinos intentan comunicarse con el mismo tag en el mismo instante de tiempo.
  
- **Problema de colisión de readers:** readers con zonas de interrogación que se cruzan pueden interferir uno con el otro y pueden llegar a puntos extremos en el que ninguno de los readers sea capaz de comunicarse con ningún tag localizado en sus respectivas zonas de interrogación. Los readers pueden también interferir en la proceso de operación de otro reader incluso si las zonas de interrogación de ambos no se cruzan. Dicha interferencia es debido a la utilización de las frecuencias de radio en la comunicación y es muy similar a las interferencias experimentadas en los sistemas de telefonía móvil. El problema de colisión de readers, al igual que el problema de identificación de tags, se puede dividir a su vez en otros dos problemas: la interferencia reader a reader y la interferencia reader a tag:
  - **Interferencia reader a reader:** ocurre cuando un reader transmite una señal que interfiere en la operación de otro reader impidiendo, de esta manera, que el segundo reader pueda comunicarse con los tags de su zona de interrogación.

Este tipo de interferencia ocurre cuando la señal transmitida por el reader es recibida por el segundo reader y tiene la suficiente potencia como para enmascarar o atascar la comunicación entre los tags y el segundo reader. En este tipo de interferencias, las zonas de interrogación no es necesario que se crucen.

- **Interferencia reader a tag:** este tipo de interferencia ocurre cuando un tag está simultáneamente situado en la zona de interrogación de dos o más readers y más de un reader intenta comunicarse con dicho tag al mismo tiempo. En este tipo de interferencia, cada reader podría creer que es el único reader que se comunica con ese tags, mientras que en realidad el tag está comunicándose con múltiples readers al mismo tiempo.

Como ya se ha comentado, muchas veces un sistema de RFID tiene numerosos tags o transpondedores dentro de su zona de interrogación. En este tipo de situación podemos diferenciar entre dos principales tipos de comunicación. La primera es usada para transmitir datos desde el lector al tag. El flujo de datos enviado es transmitido hacia todos los tags simultáneamente, similar a miles de equipos de radio que reciben la señal desde una estación base. Este tipo de comunicación es globalmente conocida como broadcast.

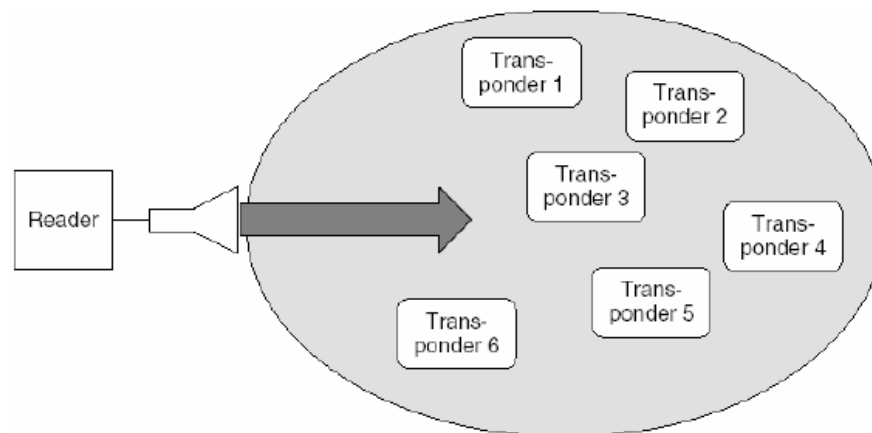


Figura 23: Comunicación broadcast entre reader y tags de su zona de interrogación

La segunda forma de comunicación supone la transmisión de datos desde muchas etiquetas, que se encuentran en la zona de interrogación, hacia el lector. Esta forma de comunicación es llamada multiacceso.

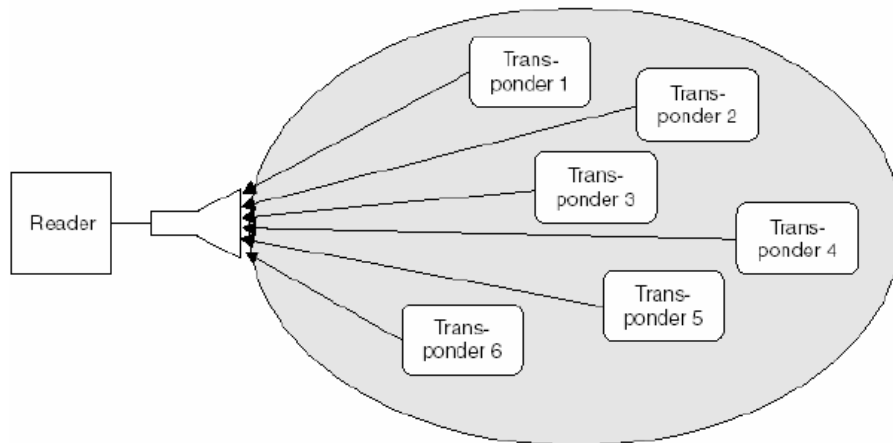


Figura 24: Comunicación multiacceso entre reader y tags de su zona de interrogación

Cada canal de comunicación tiene definida una capacidad de canal, la cual es determinada por el ratio máximo de transferencia de dicho canal de comunicación y el tiempo que está disponible. La capacidad de canal disponible debe ser dividida entre cada participante

o tag y el resultado será la cantidad de datos que puede transmitir cada tag al mismo reader sin que sufran interferencias unos por culpa de los otros. El problema del multiacceso ha existido desde hace mucho tiempo en la tecnología radio. Como ejemplo podemos fijarnos en los satélites o en las redes de telefonía móvil donde un gran número de participantes intenta acceder a un mismo satélite o estación base. Por este motivo han sido desarrollados numerosos métodos con el objetivo de separar la señal de cada participante individual de la de otro cualquiera. Básicamente existen 4 métodos diferentes: acceso múltiple por división de espacio (Space Division Multiple Access, SDMA), acceso múltiple por división de frecuencia (Frequency Division Multiple Access, FDMA), acceso múltiple por división de tiempo (Time Division Multiple Access, TDMA), y acceso múltiple por división de código (Code Division Multiple Access, CDMA); esta última también conocida como técnica del espectro ensanchado o spread spectrum.

Todos estos métodos clásicos están basados en la suposición de un flujo de datos continuo y no interrumpido desde y hacia todos los participantes. En el momento que se fija una capacidad de canal, dicha capacidad permanece fijada hasta que termina la comunicación (por ejemplo durante la duración de una llamada telefónica). Sin embargo, las etiquetas de un sistema RFID se caracterizan por periodos de actividad, intercalados con periodos de inactividad de distinta duración. La capacidad del canal tan sólo se dedica durante el tiempo justo y necesario para establecer un intercambio de datos. En el contexto RFID todos los mecanismos multiacceso anteriormente comentados se les denominará mecanismos o protocolos anticolidión.

En las secciones posteriores de este documento se hablará y describirán los métodos multiacceso que son más frecuentemente utilizados con el fin de comprender los métodos anticolidión. Estas líneas se centrarán en la clasificación y explicación de los protocolos anticolidión dirigidos al problema de identificación de tags explicado en líneas anteriores, ya que este problema es en el que se centra el sistema implementado en este proyecto fin de

carrera (para entrar en detalles sobre algoritmos y protocolos anticollisión utilizados en el problema de colisión de readers ver bibliografía). En la siguiente figura se muestra el esquema general de los protocolos anticollisión orientados al problema de identificación de tags que se van a resumir en este apartado de esta memoria.

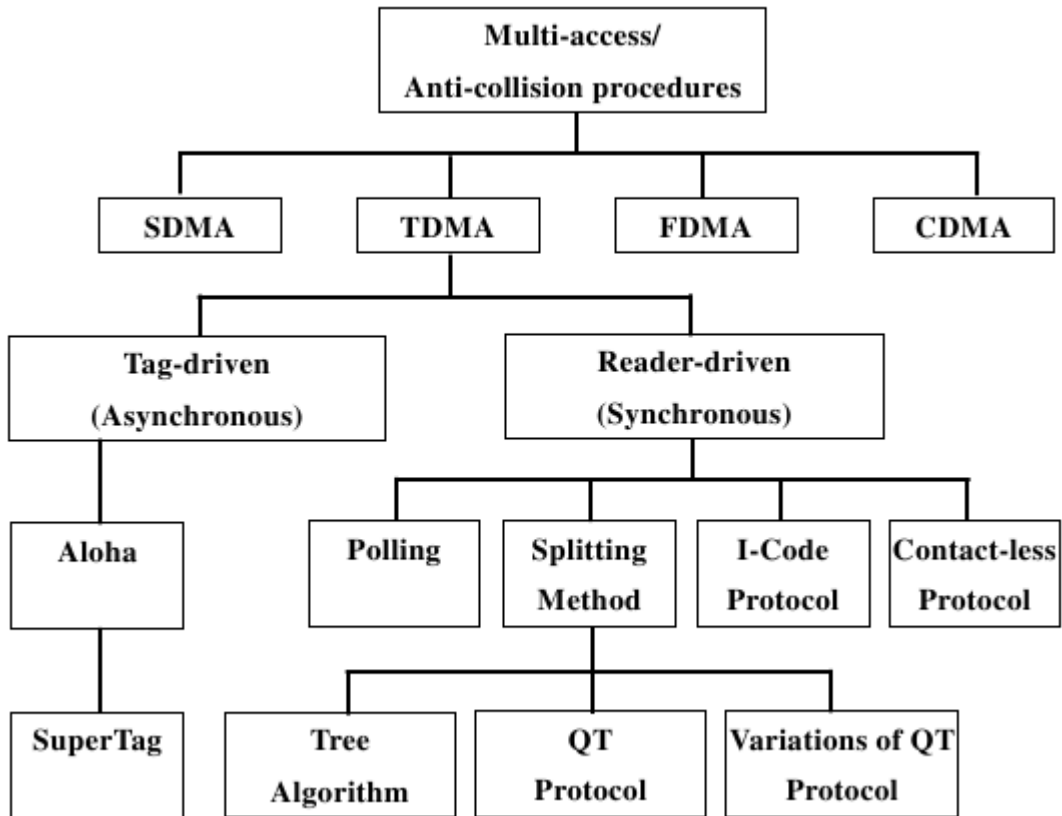


Figura 25: Taxonomía de los protocolos anticollisión para tags RFID

- SDMA:** el término acceso múltiple por división de espacio se refiere a técnicas que rehúsan un cierto recurso, en este caso la capacidad de canal, en áreas espaciales separadas. Una opción es reducir significativamente el área de lectura de un único reader, pero para compensarlo entonces se tiene que situar un gran número de readers y antenas formando arrays de manera que cubran todo el área que antes cubría el reader cuando tenía más alcance. Otra opción es usar una antena direccionable electrónicamente en el reader. De este modo se puede apuntar a los tags directamente, lo que se denomina SDMA adaptativo. De este modo varios tags pueden ser diferenciados por su posición angular en la zona de interrogación del reader y si el ángulo entre dos tags es mayor que el ancho de haz de la antena direccional usada, un mismo canal puede ser usado varias veces. Esto se puede conseguir mediante una antena formada por un array de dipolos; por esto mismo el SDMA adaptativo sólo se puede usar en aplicaciones RFID con frecuencias por encima de los 850 MHz (habitualmente en torno a 2.45 GHz). Si se usaran frecuencias menores el tamaño de los dipolos sería excesivamente grande. Cada uno de los

dipolos está colocado de manera que tiene una fase independiente de los demás dipolos. El diagrama de radiación de la antena se halla mediante la superposición de los diferentes diagramas de radiación de los dipolos situados en diferentes direcciones. Para fijar la dirección, los dipolos están alimentados por una señal de alta frecuencia de fase variable, regulada por unos controladores de fase. Con la intención de cubrir todo el espacio, se deberá escanear el área de interrogación usando la antena direccional hasta que una etiqueta sea hallada dentro del área de búsqueda del reader.

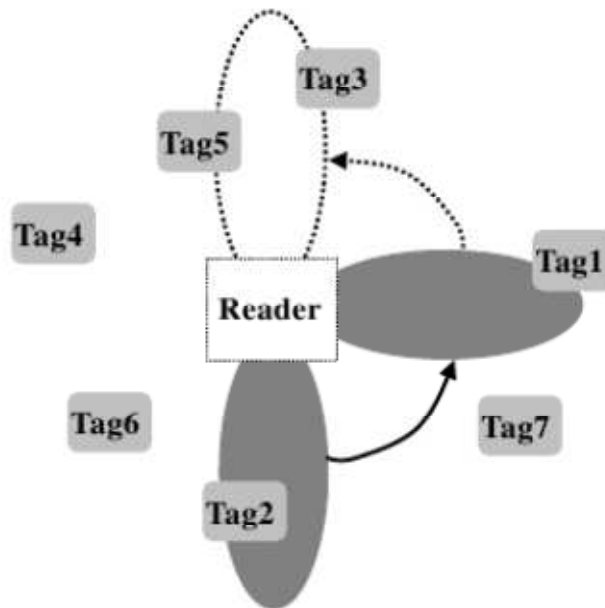


Figura 26: SDMA adaptativo con antena direccional controlada electrónicamente

Un inconveniente del SDMA es el relativamente alto coste de implementación debido al complicado sistema de la antena. El uso de este tipo de técnica anticollisión queda restringido a unas pocas aplicaciones especializadas.

- **FDMA:** el término acceso múltiple por división de frecuencia se refiere a las técnicas en las cuales varios canales de transmisión con varias frecuencias portadoras, están disponibles para los participantes en la comunicación.



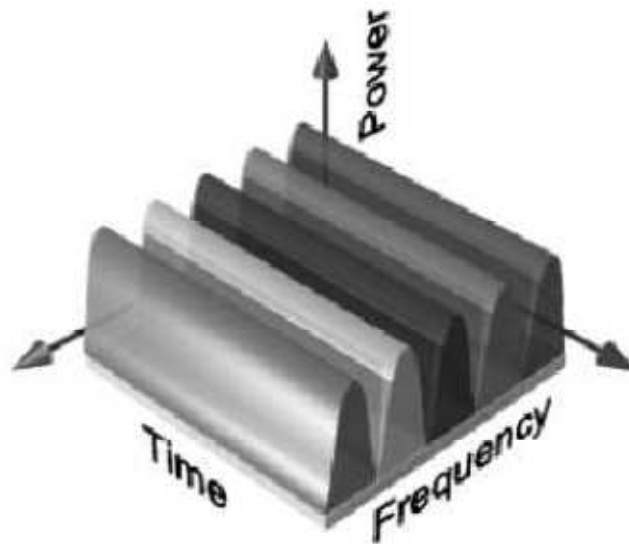


Figura 27: En FDMA se tienen varios canales frecuenciales al mismo tiempo

En los sistemas RFID esto puede ser logrado utilizando tags con una frecuencia armónica de transmisión que permita ser ajustada libremente. La energía suministrada al tag y las señales de control de transmisión tienen lugar a una frecuencia ajustada de manera óptima, a la que se denominará  $f_a$ . Los tags responden a una de las muchas frecuencias de uso disponibles,  $f_1-f_N$  tal como se muestra en la figura de abajo. De esta manera, rangos de frecuencia completamente diferentes pueden ser utilizados para transmitir datos desde los tags o hacia los tags. Por ejemplo, se puede utilizar la frecuencia de 135 kHz para la comunicación desde reader hacia los tags y varios canales de comunicación en las frecuencias entre 433 MHz y 435 MHz para las comunicaciones desde los tags hacia el reader. Uno de los principales inconvenientes de los sistemas que usan FDMA es el coste relativamente elevado que supone la fabricación los readers ya que desde su receptor tiene que permitir la recepción de todos los canales. Por tanto, este mecanismo anticollisión en RFID permanece limitado a unas pocas aplicaciones específicas.

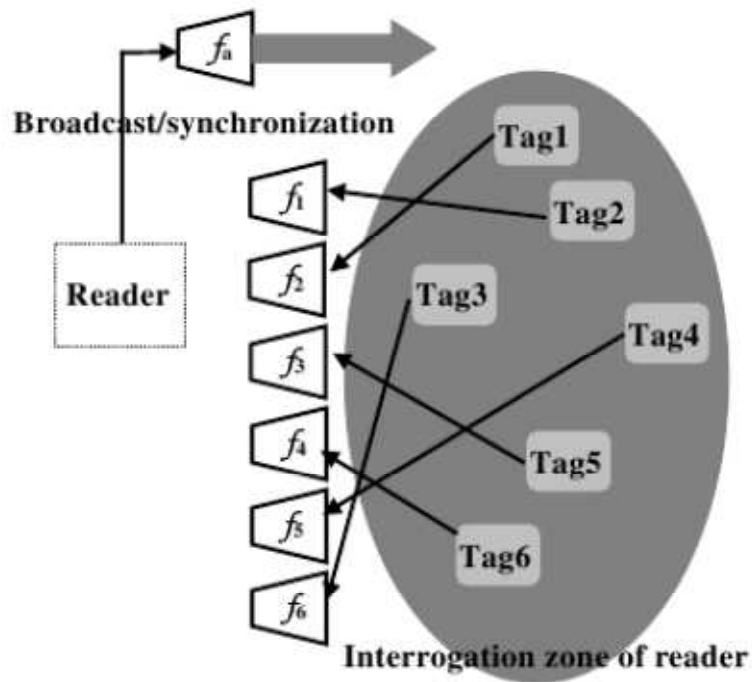


Figura 28: Canales de frecuencia disponibles en FDMA

- **CDMA:** existen actualmente un gran número de mecanismos diferentes basados en CDMA dependiendo de cómo se realiza el despliegue. Pero el factor común es que CDMA utiliza técnicas modulación por ensanchamiento del espectro (spread spectrum) basado en códigos pseudo aleatorios para difundir los datos sobre el espectro completo. Mientras que la utilización de CDMA podría ser perfecta en muchos casos, esta técnica añade demasiada complejidad y podría demandar una alta carga computacional a los tags RFID.
- **TDMA:** el término acceso múltiple por división de tiempo se refiere a las técnicas de multiacceso en las cuales la capacidad de un canal totalmente disponible es dividido cronológicamente entre todos los participantes de la comunicación. Los procedimientos TDMA están particularmente extendidos en el campo de los sistemas digitales de radiocomunicaciones móviles. En los sistemas RFID, las técnicas TDMA son el método más utilizado y con un mayor número de técnicas anticollisión (ver figura en la rama TDMA).

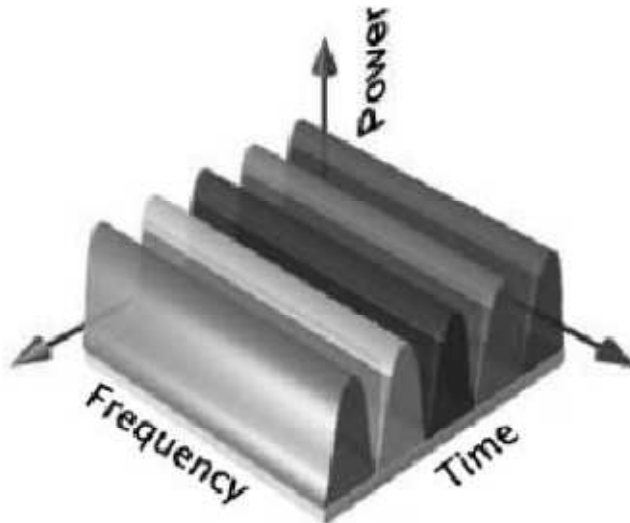


Figura 29: En TDMA se usa todo el ancho de banda en cada instante dado

Como se acaba de comentar anteriormente la mayoría de mecanismos anticolidión para RFID se basan en métodos TDMA. Sin embargo, estos protocolos se pueden dividir en procedimientos síncronos o dirigidos por el reader y en procedimientos asíncronos o dirigidos por el tag:

- **Procedimientos síncronos:** o también conocidos como procedimientos dirigidos por el reader, son aquellos mecanismos anticolidión en los cuales un reader realiza la interrogación a un tag específico mediante el uso de su número de UID. Este método anticolidión es efectivo debido a que los tags no tienen que dar vueltas y malgastar turnos comunicándose con el reader, y no tienen que depender de una transmisión no colisionada para ser identificados. En estos mecanismos un reader realiza un sondeo sobre una lista de tags. Sin embargo, estas técnicas de sondeo, también conocidas arboles de búsqueda o arboles binarios, consumen un tiempo relativamente alto y dependen de los números de UID de los tags conocidos.
- **Procedimientos asíncronos:** o también conocidos como procedimientos dirigidos por el tag, son aquellos mecanismos anticolidión en los cuales los tags situados en el área de interrogación de un reader responden en instantes de tiempo generados de manera aleatoria reduciendo, de esta manera, el riesgo de colisiones. El mecanismo conocido como Aloha es un procedimiento asíncrono y supone que un nodo transmite un paquete de datos cuando recibe un paquete de datos. Si se produce una colisión el paquete es transmitido con un retardo aleatorio.

## 2.6.1 Protocolos asíncronos

Como se ha comentado anteriormente, los procedimientos dirigidos por el tag funcionan de manera asíncrona debido a que el reader no controla la transferencia de datos durante el funcionamiento del procedimiento. Por ejemplo, en el mecanismo Aloha, un tag comienza transmitiendo tan pronto esté preparado y tenga datos para enviar. Con la suficiente energía, todos los tags envían sus IDs. Este comportamiento se le conoce como TTF o Tag Talks First, que es contrario al comportamiento conocido como RTF o Read Talk First visto en muchas implementaciones. A continuación se listarán y explicarán los principales mecanismos y protocolos basados en el protocolo Aloha, incluyendo la explicación más detallada de este último:

- **Aloha:** en este protocolo, la idea básica consiste en que, en el momento en el que el reader excita a los tags, éstos envían su ID al canal independientemente de si ya había otro tag transmitiendo. Evidentemente, la transmisión de varias IDs se puede solapar en el tiempo y provocar entonces una colisión impidiendo, en este caso, realizar una recepción correcta de ninguna de las IDs transmitidas. En el Aloha original, la información que no es transmitida con éxito simplemente se descarta.
- **Aloha ranurado:** también conocido como Slotted Aloha o SA, este mecanismo es una modificación del algoritmo Aloha original. En este nuevo método se emite periódicamente sobre el canal una referencia temporal que marca el inicio de una ranura o slot temporal. El periodo de esta señal es igual al tiempo requerido para transmitir una ID sobre el canal. Ahora, si un tag quiere transmitir su ID, se espera al inicio de la siguiente ranura temporal, de forma que solo podrá colisionar la información transmitida en el mismo slot, reduciendo así la ventana de colisión. En caso de colisión o de slot vacío, los tags esperarán un tiempo aleatorio para volver a intentarlo, empleando algún algoritmo para elegir dicho tiempo de espera. Al contrario, si en un slot se identificó un único tag, el reader le indicará que se ha identificado correctamente y dejará de competir, evitando así que vuelva a participar en el proceso de identificación. Este método tan simple, no es eficiente para un elevado número de tags, ya que el número medio de slots que necesitan para identificarse, aumenta exponencialmente, por lo tanto, no será un algoritmo escalable y necesitaremos un mecanismo de adaptación si el número de tags aumenta considerablemente.
- **Aloha ranurado por tramas:** también conocido como Frame Slotted Aloha o FSA, este mecanismo es una variante del Aloha ranurado, donde los slots están agrupados en tramas consecutivas. Cada trama equivale a un ciclo y los tags

transmiten solo una vez en cada ciclo. Existen mecanismos de adaptación, con tamaño de trama dinámico, conocidos como dynamic FSA, donde al finalizar un ciclo y en función de ciertos criterios, incrementa o decrementa el número de slots que compondrán el siguiente ciclo.

- **CSMA/CD:** o Carrier Sense Multiple Access /Collision Detect. CSMA/CD es la evolución del protocolo Aloha en el intento de resolver las bajas prestaciones de éste.

En este algoritmo, los tags que quieren transmitir sus datos primero deben determinar si el medio está ocupado o no. En función de cómo actúen, se pueden clasificar en:

- **CSMA no-persistente:** o CSMA/NP, si el canal está ocupado espera un tiempo aleatorio y vuelve a escuchar. Si detecta el canal libre, emite inmediatamente.
- **CSMA 1-persistente:** o CSMA/1P, con el canal ocupado, el tag pasa a escuchar constantemente sin esperar tiempo alguno. En cuanto lo detecta libre, emite. Puede ocurrir que, si durante un retardo de propagación posterior a la emisión de la identificación emite otro tag, se produzca una colisión.
- **CSMA p-persistente:** o CSMA/PP, después de encontrar el canal ocupado, y quedarse escuchando hasta encontrarlo libre, el tag decide si emite. Para ello ejecuta un algoritmo que dará orden de transmitir con una probabilidad  $p$ , o de permanecer a la espera con una probabilidad de  $(1-p)$ . Si no transmitiera, en la siguiente ranura temporal volvería a ejecutar el mismo algoritmo. Así hasta transmitir. De esta forma se reduce el número de colisiones.

Una vez se ha comenzado a emitir, continuará hasta transmitir la trama completa. Si se produjera una colisión la transmisión será fallida. CSMA/CD supone una mejora, puesto que un tag escucha a la vez que emite, de forma que si detecta que se produce una colisión, para inmediatamente la transmisión y por lo tanto se produce una ganancia en tiempo. Además, el número de ciclos aumenta de forma prácticamente lineal con el número de tags, luego este algoritmo sí será escalable.

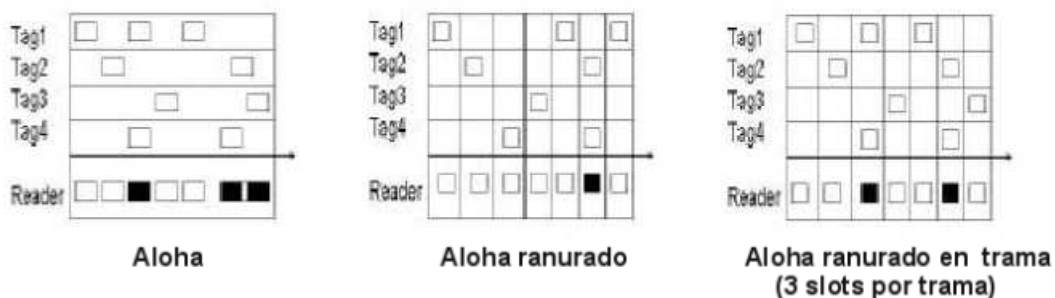


Figura 30: Aloha puro, Aloha ranurado y Aloha ranurado en tramas

- **SuperTags:** en la aproximación conocida como SuperTags, el cual también opera basándose en el principio de anticollisión de Aloha, los tags retransmiten continuamente sus IDs en intervalos aleatorios hasta que el reader les reconoce sus retransmisiones.

Tras la recepción de los datos de un tag (su ID), estos tags pueden ser silenciados u obligados a disminuir su velocidad de repetición de envío de datos.

Este método de silenciado de tags permite el cálculo correcto de muchos tags en el mismo área. Otra variación de la aproximación conocida como SuperTags implica el silenciado de todos los tags excepto de un tag el cual se lee asegurando, de esta manera, que no haya ninguna colisión. Tras un cierto periodo de tiempo, los tags silenciados son activados uno por uno hasta que todos son evaluados. En otros métodos derivados del SuperTags, el reader, mediante el envío de datos en blanco o ráfagas de energía, provoca a los tags que respondan tras un retardo generado aleatoriamente.

Por último, habría que destacar que aunque los métodos basados en Aloha pueden proporcionar altas prestaciones, no funcionarían tan bien como los métodos basados en búsqueda binaria para entornos con altas densidades de tags. Por otra parte, el nuevo protocolo EPC Generation 2.0 recomienda un mecanismo basado en Aloha, en concreto el protocolo Slotted Aloha o Aloha ranurado.

## 2.7.1 Protocolos síncronos

Los procedimientos dirigidos por el tag son normalmente muy lentos e inflexibles. Muchas aplicaciones además utilizan procedimientos que tienen al reader como máster, por lo que necesitan de procedimientos dirigidos por el reader. Estos procedimientos, como se dijo anteriormente son considerados síncronos, ya que todos los tags son controlados y chequeados mediante el reader simultáneamente. Un tag individual es primeramente seleccionado de un gran grupo de tags en la zona de interrogación del reader utilizando para ello un algoritmo en concreto estableciéndose después la comunicación entre el tag seleccionado y el reader. Los procedimientos dirigidos por reader podría subdividirse en métodos de sondeo, métodos de segmentación o splitting, protocolo I-code y protocolo sin contacto o contact-less protocol, los cuales se explicarán a continuación:

- **Métodos de sondeo o polling:** cuando un nodo máster invita a nodos esclavos a transmitir sus datos de uno en uno es habitualmente denominado sondeo o polling. El procedimiento de polling necesita una lista de todos los números de serie de los tags que participan en la aplicación. La lista puede ser obtenida de manera preprogramada o mediante un censo dinámico previo. El reader emite una señal de

radio, la cual es alcanzada por la antena del tag y esencialmente se comunica con un solo tag RFID.

Los tags RFID no transmiten sus números de serie enteros en una sola ráfaga, sino que estos responden a las señales enviadas por el reader revelándole a este último un solo dígito binario a la vez. El reader interroga a los tags RFID preguntando: ¿Qué número de serie comienza con un 1 en la primera posición? Los tags RFID que no satisfagan esta pregunta continuarán silenciados e ignorará el resto de la secuencia de preguntas, mientras que el resto de tags transmitirán una respuesta del estilo: si es correcto, de vuelta hacia el reader. De esta manera, el reader volverá a repetir la pregunta para el siguiente dígito del número de serie binario y este proceso será repetido hasta que el reader haya identificado a cada uno de los tags RFID dentro del área de interrogación.

- **Métodos de segmentación o splitting:** los nodos transmiten paquetes en ranuras temporales o slots cuando es solicitado por el nodo que recibe dichos paquetes. Si existe más de un nodo transmitiendo en un slot entonces provoca una colisión en el receptor y ninguna información útil es recibida. En este tipo de algoritmos, la resolución de colisiones divide el conjunto de nodos propensos a provocar colisiones en dos conjuntos. Los nodos pertenecientes al primer subgrupo transmiten en el primer slot. Los nodos pertenecientes al otro subgrupo esperan hasta que las colisiones entre los nodos pertenecientes al primer subgrupo se resuelvan. Si el primer subgrupo de nodos provocan otra colisión, entonces más divisiones en subgrupos se llevan a cabo. Este proceso es realizado recursivamente hasta que todas las colisiones han sido resueltas. Una vez todas las colisiones ocurridas en el primer subgrupo han sido resueltas, entonces se sigue con un procedimiento similar para el segundo subgrupo de nodos. En un sistema RFID los nodos corresponden a los tags y el receptor corresponde al reader. Los tags envían sus IDs en respuesta de la solicitud del reader.

Si todas las colisiones provocadas en el primer subgrupo se resuelven, esto implica que el reader ha identificado exitosamente a todos los tags de dicho subgrupo. Los nodos son divididos en subgrupos basándose en diferentes aproximaciones y dando lugar a los siguientes protocolos basados, todos ellos, en el método de splitting o segmentación.

- **Algoritmo de segmentación en árbol:** este algoritmo trabaja mediante la división del grupo de tags propensos a provocar colisiones en B subgrupos separados, donde B es un entero mayor que 1. Los subgrupos se van haciendo cada vez más pequeños hasta que el número de tags en un subgrupo se reduce a uno pudiendo ser el único tag identificado. Una vez que un subgrupo ha sido completamente resuelto, el resto de subgrupos se resuelven en un orden FILO (First In Last Out). Los algoritmos de esta clase pueden ser vistos

como un árbol de búsqueda. Cada división o segmentación mueve al algoritmo un nivel más abajo en el árbol. Un ejemplo se muestra en la figura 3.16 para el caso donde el número de tags es de  $m=3$ . Los nodos del árbol son etiquetados acordes a sus actividades: W, Wait; C, Collision; S, Single Reply; y Z, Zero Reply. El reader primeramente se comunica con todos los tags de su área. Los tags responden a la solicitud del reader. Todos los tags del área del reader, representados como T, son los que han provocado la colisión en el slot actual. Entonces, cada slot colisionado genera un número aleatorio entero entre 0 y  $B - 1$ . Por ejemplo, si  $B = 2$ , cada tag colisionado generaría un 0 o un 1. Teniendo en cuenta el número aleatorio anteriormente generado y que  $B = 2$ , el subgrupo evaluado es dividido en dos grupos, L y R, donde L es el grupo de tags que han generado el número 1, y R es el grupo de tags que han generado el número 0. En el siguiente slot, los tags que pertenecen al subgrupo R, podrían transmitir. Si había más de un tag en el subgrupo R, entonces podría ocurrir otra colisión. Este subgrupo de nuevo generaría otro número aleatorio y se volvería a subdividir de nuevo. Así, continuaría de manera recursiva hasta que el subgrupo se redujera hasta un solo tag, el cual transmitiría exitosamente su ID al reader y sería identificado.

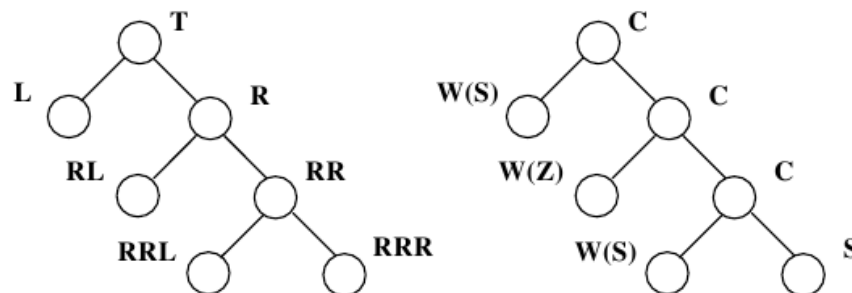


Figura 31: Ejemplo de algoritmo splitting o segmentación

El reader siempre envía información a los tags informándoles si se han transmitido cero, uno o más paquetes en el slot anterior. Esta retroinformación es requerida para que cada tag mantenga un seguimiento y un control de su posición en el árbol y pueda saber a qué subgrupo pertenece y cuándo transmitir.

Además, este algoritmo puede ser implementado mediante el uso de un contador pudiendo funcionar como si de una pila se tratase. Al ocurrir una colisión, el subgrupo es dividido y cada subgrupo resultante de tal división es después colocado en la pila. El subgrupo situado en lo alto de la pila es extraído y los tags contenidos en dicho subgrupo podrán transmitir. Cada tag puede conocer cuando transmitir si éste conoce estás posicionado su subgrupo en la pila. Cuando el tag está implicado en una colisión, éste pone el



contador a 0 o 1 dependiendo en que subgrupo ha sido colocado tras la división. Dependiendo de la contestación desde el reader, el contador de cada uno de los tags se incrementa en uno por cada colisión y se decrementa en uno por cada slot con éxito o slot estado parado. El tag solo podrá transmitir si el valor del contador es cero.

- **Protocolo QT:** también conocido como algoritmo Query Tree o búsqueda en árbol. Realiza una descripción de cada tag como  $i \in \{1, \dots, n\}$  cada uno con un único ID dado por una cadena  $\{0,1\}^k$  donde  $k$  es la longitud de la cadena que representa al ID. Una cadena binaria de  $k$ -bits únicamente identifica a un tag en concreto. El valor del parámetro  $k$  dependerá del número de objetos que se necesiten identificar solamente. El algoritmo QT consiste en rondas de solicitudes y respuestas. En cada ronda, el reader pregunta a los tags si alguno de sus IDs contiene un cierto prefijo. Si más de un tag contesta, entonces el reader sabe que hay al menos dos tags con el mismo prefijo. El reader entonces agrega un 0 o un 1 al prefijo y continúa preguntando por este prefijo alargado. Cuando un prefijo coincida con un tag únicamente, dicho tag puede ser identificado.

Además, agrandando los prefijos hasta que solo una ID de un tag coincida, este algoritmo puede descubrir todos los tags. Después de cada ciclo, el reader envía un mensaje informando a los tags el ID del tag que ha sido identificado en el ciclo anterior. Esto es así debido a que el tag que ha sido identificado exitosamente no debería transmitir en los siguientes ciclos. Destacar por último que los tags recomendados por el protocolo EPC Generation 1.0 del tipo Class 0 suelen utilizar como protocolo anticollisión el protocolo QT.

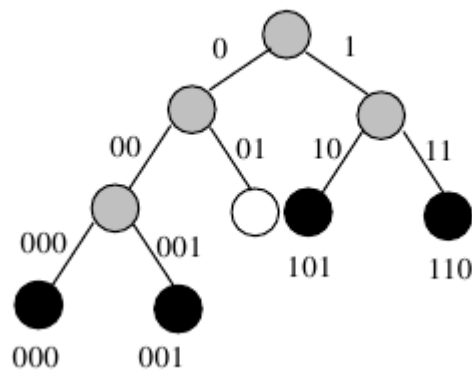


Figura 32: Ejemplo de algoritmo QT

- **Protocolo I-code:** el protocolo I-code es un protocolo estocástico para tags pasivos basado en los principios del protocolo FSA o Frame Slotted Aloha. Cada tag transmite su información en un slot temporal que escoge aleatoriamente basándose en una semilla enviada por el reader. En cada slot puede suceder: que existan slots vacíos (no

hay tag), que existan slots llenos con un único tag o que existan slots enrevesados con múltiples tags transmitiendo. El reader puede detectar la identidad del tag cuando un único tag la transmite en un slot de tiempo. Cuando más de un tag utilizan el mismo slot temporal provocan una colisión y los datos son perdidos. El reader puede variar el tamaño de la trama y la duración real de un slot se escoge de acuerdo con la cantidad de datos solicitados. En el protocolo I-code el ciclo de lectura de un tag consiste en dos pasos muy resumidos:

1. Reader  $\rightarrow$  I,  $rnd$ , N
2.  $T \rightarrow S_T(N, rnd)$  Reader:  $data_{T,I}$  para todos los tags T

En el primer paso, el reader envía una solicitud de datos a los tags mediante un broadcast. El parámetro I indica que los datos han sido solicitados especificando un intervalo de los 64 bytes disponibles en la memoria del tag;  $rnd = [0,31]$  es un valor aleatorio cuyo uso se explica más adelante y  $N \in \{1, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256\}$  es el tamaño de la trama e indica el número de slots disponibles para que los tags respondan al reader. En el segundo paso, los tags que están próximos a la antena responden, donde  $\rightarrow S$  indica que un tag responde en un slot S donde  $0 \leq S < N$ . Un tag T utiliza una función específica de tag,  $S_T$ , para procesar sobre su número de slot utilizando el tamaño de la trama y el valor aleatorio,  $rnd$ , como parámetros. El valor aleatorio supuestamente evita que ocurran las mismas colisiones de manera repetitiva.

El reader comienza haciendo una estimación del número de slots que se necesitan para identificar a todos los tags de su zona de identificación. Los tags eligen un slot aleatorio de los disponibles en un ciclo de lectura y transmiten la información solicitada por el reader. El reader detecta el número de slots mediante el uso de los números  $c = \langle c_0, c_1, c_k \rangle$ , donde  $c_0$  indica el número de slots en el ciclo de lectura en los cuales no hay ningún tag transmitiendo,  $c_1$  indica el número de slots en los cuales un único tag transmite sus datos y  $c_k$  indica el número de slots en los cuales múltiples tags transmiten sus datos.

- **Protocolo Contact-less:** el protocolo contact-less está basado en el método de segmentación o división en árbol descrito anteriormente. La idea básica es identificar un bit del código de identificación en cada paso arbitrario. Cada instancia de un proceso de identificación identificará un tag únicamente. Cada proceso arbitrario tendrá N pasos arbitrarios, donde N es el número de bits del código de identificación o ID.

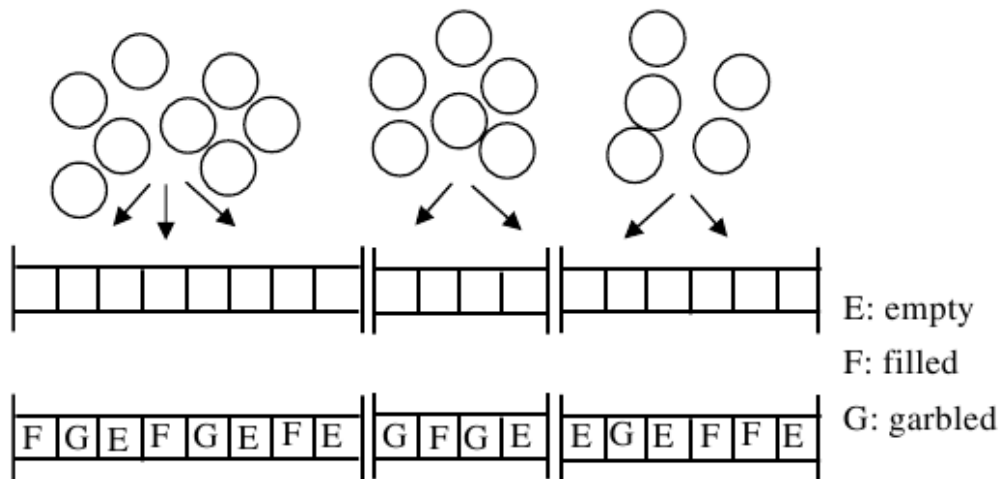


Figura 33: En I-code los tags son colocados aleatoriamente en los slots de la trama

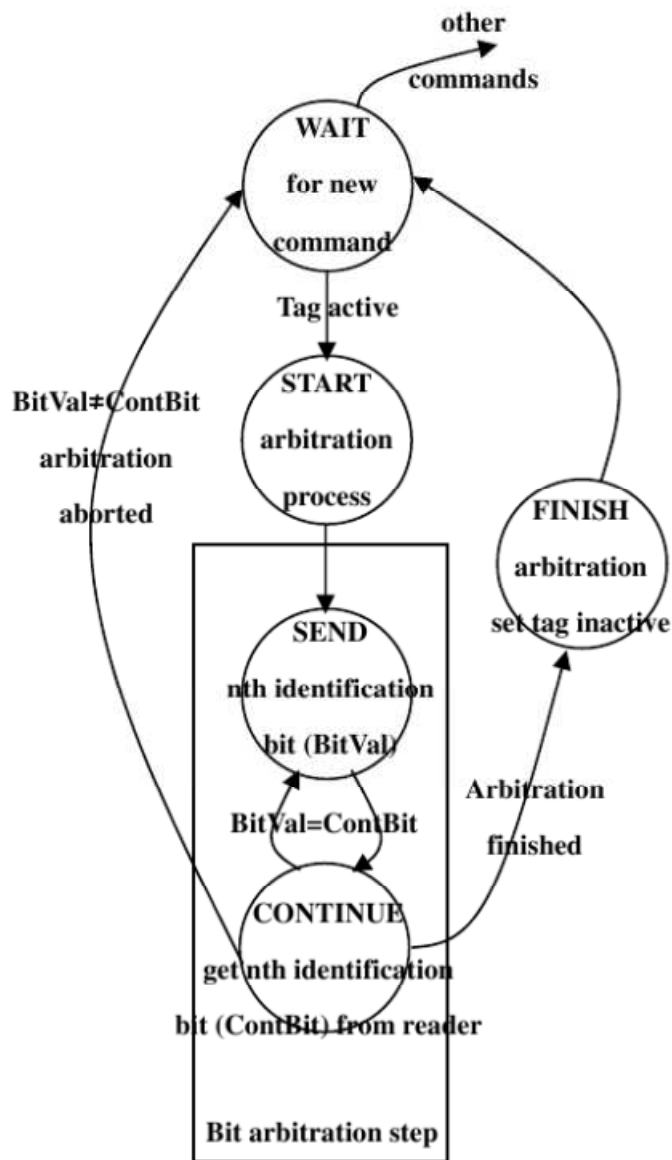


Figura 34: Un proceso arbitrario completo en el protocolo contact-less

Inicialmente, todos los tags se encuentran en estado de espera y escuchando activamente los comandos del reader tal como se explica en la figura 3.19. De esta manera, todos los tags están activos al comienzo. El reader pregunta a los tags activos acerca de la posición de un bit dado de sus códigos de identificación durante un slot temporal en un paso arbitrario. El reader puede reconocer las repuestas de todos los tags incluso aunque estos tengan diferentes bits en sus secuencias de identificación. Este paso divide a los tags no identificados en dos subgrupos, uno contiene solo ceros en la posición del bit solicitado y el otro subgrupo contiene solo unos. A este paso se le conoce como Bit-Val. El reader entonces escoge un bit de continuación (ConBit), el cual puede ser 0 o 1. El reader envía entonces el ConBit a todos los tags activos. Los tags con el mismo valor de ConBit y BitVal continuarán activos en el paso arbitrario denominado Bit y el otro grupo de tags pasarán al estado de espera. El algoritmo, de esta manera, dividirá un grupo de tags no identificados en pequeños subgrupos hasta que un tag haya sido identificado. El reader realiza este mecanismo de manera recursiva hasta que identifica a todos los tags del grupo. Un ejemplo del protocolo contact-less se muestra en la figura 3.20. Cada tag contiene un código de identificación de 4 bits. Cada tag que transmita un 0 en un paso arbitrario en concreto se pasa al grupo de tags en espera con el resto de tags esperando a otro paso arbitrario. Los tags en estado de espera han sido etiquetados como W. Las cadenas de bits adjuntas a cada nodo identifican los IDs de los tags de cada subgrupo.

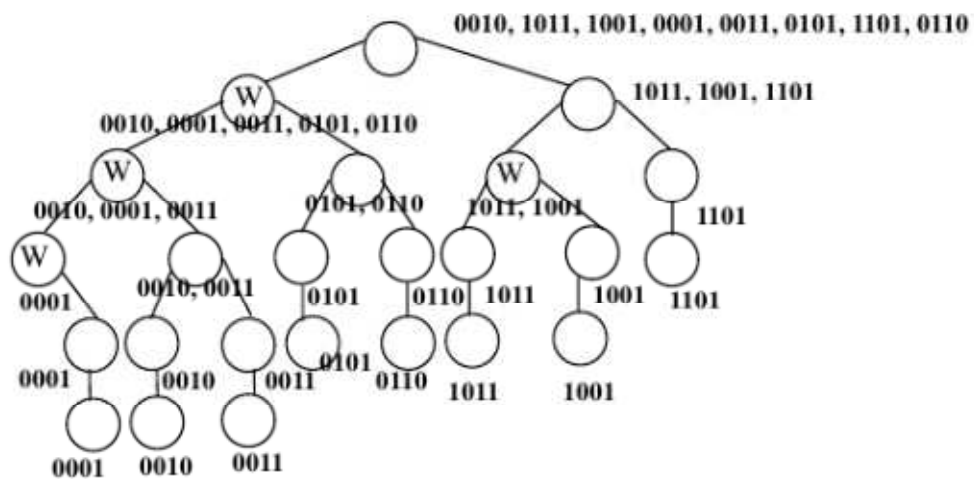


Figura 35: Ejemplo del protocolo contact-less

## 2.7 Estándares

Una vez planteados los detalles más técnicos y que son comunes para cualquier sistema que utiliza la tecnología RFID, se procede a presentar los diferentes estándares y técnicas anticolidión que más importancia están teniendo en la tecnología RFID. Hay que destacar que en el diseño de un sistema RFID, con el fin de conseguir interoperabilidad entre diferentes sistemas y conseguir una arquitectura abierta que pueda ser implementada por muchos fabricantes, se suelen seguir las pautas marcadas por un estándar en concreto. En este capítulo se presentará los estándares más importantes creados en los últimos años por organizaciones como la OSI, el EPC, la ETSI y la NFC forum. Como ocurre en otros estándares creados para otras tecnologías de comunicación éstos suelen tener mucha importancia en cómo se ha de realizar el diseño de la capa física y la capa de enlace (interfaz físico, interfaz aéreo, mecanismos de acceso al medio y anticolidión, protocolos de comunicación y funciones de seguridad).

En la tecnología RFID tiene un papel muy importante el mecanismo o protocolo anticolidión para poder proporcionar la lectura de múltiples tags y poder realizar esta tarea de la manera más rápida y precisa posible.

En lo que a regulación en RFID se refiere, no existe ninguna administración que se encargue de la regulación a nivel global de la tecnología RFID, sino que cada país tiene sus órganos propios mediante los cuales regula de un modo individual el uso que se hace de las frecuencias y las potencias permitidas dentro de su propio territorio. Algunos de los organismos internacionales que regulan la asignación de frecuencias y potencias para RFID son:

- EEUU: Federal Communications Commission o FCC.
- Canadá: Department of Communications of Canada o DOC.
- Europa: CEPT o del francés Conférence Européenne des administrations des Postes et des Télécommunications), ETSI o European Telecommunications Standards Institute y otras administraciones nacionales según el país.
- Japón: MPHPT o Ministry of Public Management, Home Affairs, Post and Telecommunication.
- China: Ministerio de la Industria de la Información
- Australia: Autoridad Australiana de la Comunicación.
- Nueva Zelanda: Ministerio de desarrollo económico de Nueva Zelanda.

En lo que al uso de frecuencias respecta, dependiendo de la banda en la que se quiera trabajar, se deberá tener en cuenta el lugar donde se encuentre y guiarse por las recomendaciones que establece cada país en cuanto a frecuencias se refiere.

## Estándares actuales para RFID

Uno de los mayores defectos de la tecnología de identificación tradicional basada en códigos de barras es la carencia de un protocolo universal real. Esta carencia se refleja, por poner un ejemplo, en la existencia de más de 200 tipos de simbología para los códigos de barra que se utilizan en la actualidad. Sin embargo, en la práctica, solamente cuatro de los esquemas de códigos de barras son los más comúnmente utilizados: UPC/EAN, Interleaved 2 de 5, Code 39 y Code 128 y, además, han sido tratados por la ISO para la creación de estándares. Como en todas las tecnologías, existe y siempre ha existido todavía bastante confusión en torno a que estándares hay. Si existen varios estándares hay que saber cuáles son interoperables entre sí y cuál será el que más interoperabilidad ofrezca consagrándose, por lo tanto, como ganador. Esta batalla entre estándares, en cualquier tecnología, provoca que se implementen este tipo de tecnologías por el miedo de las empresas.

RFID es una tecnología heterogénea con un significativo número de estándares asociados. Los estándares más relevantes describen las capas física y de enlace de datos (interfaz aéreo, anticolidión, protocolos de comunicación y funciones de seguridad). Adicionalmente los estándares RFID describen métodos de prueba y estándares de aplicación de datos (formato de identificación única, protocolo de datos e interfaces de programación de aplicación). La organización internacional sobre estándares ISO, el instituto europeo sobre estándares de telecomunicación o ETSI y la organización EPCGlobal han sido fijados para establecer amplios estándares en diversas disciplinas de la industria tecnológica.

La tecnología RFID puede beneficiarse directamente de la estandarización con el fin de asegurar su interoperabilidad, asegurar una amplia adopción por parte de la industria y expansión en los mercados. En la siguiente figura se muestra una clasificación de algunos estándares muy utilizados en la actualidad desarrollados por estas organizaciones y clasificados según la frecuencia de trabajo del sistema.

Banda de frecuencias	Nombre del estándar	Detalles
Menos de 135 KHz	ISO 18000-2	
6,765 ~ 6,795 MHz		
7,4 ~ 8,8 MHz		
13,55 ~ 13,57 MHz	ISO 18000-3	Uso común
26,96 ~ 27,78 MHz		Aplicaciones especiales
433MHz	ISO 18000-7	Tags activos en Asia
868 ~ 870 MHz	ISO 18000-6 A/B	Europa
902 ~ 928 MHz	AutoID clase 0/1	Norteamérica
860 ~ 960 MHz	EPCGlobal Gen2	Mundial
2400 ~ 2483 MHz	ISO 18000-4	
8725 ~ 5785 MHz	ISO 18000-5	Usado raramente en RFID

Figura 36: Desarrollo de los estándares por frecuencias

## Estándar ISO

ISO ha desarrollado estándares de RFID para la identificación automática y la gestión de objetos. La serie de estándares de ISO relacionada con las RFID y las frecuencias que se emplean en dichos sistemas es la serie 18000. Aunque, en el Anexo se incluye la lista completa de estándares ISO, se va a entrar en más detalle en los siguientes estándares ISO:

- **ISO 10536 Identification cards – Contactless integrated circuit cards:** norma para tarjetas de identificación inteligentes a 13,56 MHz. Describe sus características físicas, dimensiones localizaciones de las aéreas de interrogación, las señales electrónicas y los procedimientos de reset, las respuestas de reset y el protocolo de transmisión.
- **ISO 14443 Identification cards – proximity integrated circuit cards:** norma para el desarrollo de tarjetas de identificación inteligentes con rango superior a un metro, utilizando la frecuencia 13,56 MHz. Describe las características físicas, el interfaz aéreo, la inicialización y anticolisión, y el protocolo de transmisión.
- **ISO 15693 Contactless integrated circuit cards – Vicinity cards:** estándar que dicta como se desarrollan las características físicas, la interfaz aérea y los protocolos de transmisión y anticolisión para tarjetas sin contacto con circuitos integrados en la banda HF (13,56 MHz).
- **ISO 15961 RFID for item management – Data protocol: application interface:** norma dirigida a comandos funcionales comunes y características de sintaxis, por ejemplo, tipos de tags, formatos de almacenamiento de datos, o compresión de los datos. Los estándares de interfaz aérea no afectan a este estándar.
- **ISO 15962 RFID for item management – Protocol: Data encoding rules and logical memory functions:** norma dirigida al procedimiento que el sistema RFID utiliza para intercambiar información de la gestión a nivel unidad. Crea un formato de datos uniforme y correcto, una estructura de comandos y el procesamiento de errores.
- **ISO 15963 for item management – Unique identification of RF tag:** este estándar se dirige al sistema de numeración, el proceso de registro y uso del tag RFID. Se ha diseñado para el control de calidad durante el proceso de fabricación. También esta dirigido a la trazabilidad de los tags RFID durante este proceso, su ciclo de vida y control para anticolisión de varios tags en la zona de interrogación.
- **ISO 19762: Harmonized vocabulary – Part 3: radio-frequency identification:** documento que proporciona términos generales y definiciones en el área de la identificación automática y técnicas de captura de datos, con secciones especializadas en varios campos técnicos, al igual que términos esenciales para ser usados por usuarios no especializados en comunicaciones. La parte 3 es la que hace referencia a la tecnología RFID.
- **ISO 18000 Air interface standards:** diseñada para crear una interoperabilidad global, donde se define la comunicación entre los tags y los lectores. Incluyendo diferentes frecuencias de trabajo. El objetivo del estándar es asegurar un protocolo de interfaz

aérea universal. Este estándar contiene 7 partes diferentes. La primera consiste en la arquitectura del sistema RFID para la gestión unitaria. La parte 3 y 6 son las más relevantes y críticas. En la 3 se definen dos modos no interoperables aunque se han diseñado para no interferirse entre ellos. El modo 1 está basado en ISO 15693 y el modo 2 en la modulación PJM para obtener mayor tasa de bits. La parte 6 también define dos modos de operación conocidos como A y B.

## **Estándar EPC**

Igual que el UPC o Universal Product Code está relacionado con los tradicionales códigos de barras, el EPC o Electronic Product Code está relacionado con la tecnología RFID. Cuando un reader RFID escanea un tag adjunto en un producto de consumo, el tag envía un número EPC al sistema de administración de inventarios, informando a éste cuál es exactamente el producto que se acaba de leer, el lugar donde se hizo la lectura y el instante en el que se hizo la lectura. Cualquier empresa que tenga la obligación de implementar un sistema de identificación RFID necesitará utilizar el protocolo para EPC. Pero esta solución no solo se debe a la utilización de RFID, sino también a los estándares desarrollados para EPC.

A finales del año 2000, uno de los fundadores del Auto-ID Center, David Brock, escribió un libro blanco introduciendo el concepto de EPC y explicando porque el código UPC necesitaba ser reemplazado por el código EPC. En dicho libro blanco, Brock citaba al UPC como el estándar con más éxito jamás desarrollado y manifestó que la codificación y el etiquetado UPC afecta a un enorme número de elementos en una cadena de suministro. Sin embargo, la evolución de la tecnología había dejado al venerado UPC a un lado. La aparición y rápido crecimiento de Internet, la digitalización de la información, la ubicuidad, los bajos costes en informática y computación y la globalización de los negocios exigían una nueva y mejor solución basada en una infraestructura en red.

El código electrónico de producto o EPC, el cual únicamente identifica objetos y facilita el seguimiento del producto a lo largo de su vida útil, fue creado para obtener las ventajas del crecimiento de las capacidades de la banda ancha, las altas velocidades de las computadoras y el abaratamiento del almacenamiento de datos digitales. El EPC fue desarrollado por el equipo del Auto-ID Center del MIT (Instituto tecnológico de Massachusetts) para ser un código simple y extensible para hacer referencia a productos de manera eficiente y trabajar con la información en red. Esta idea fue mucho más allá de lo que UPC podía haber soñado hacer con su esquema y simbología limitada y con su capacidad de programar la información solamente una vez. Un código de barras UPC está limitado debido a que éste contiene únicamente los códigos de fabricante y del producto en sí (ver siguiente figura).



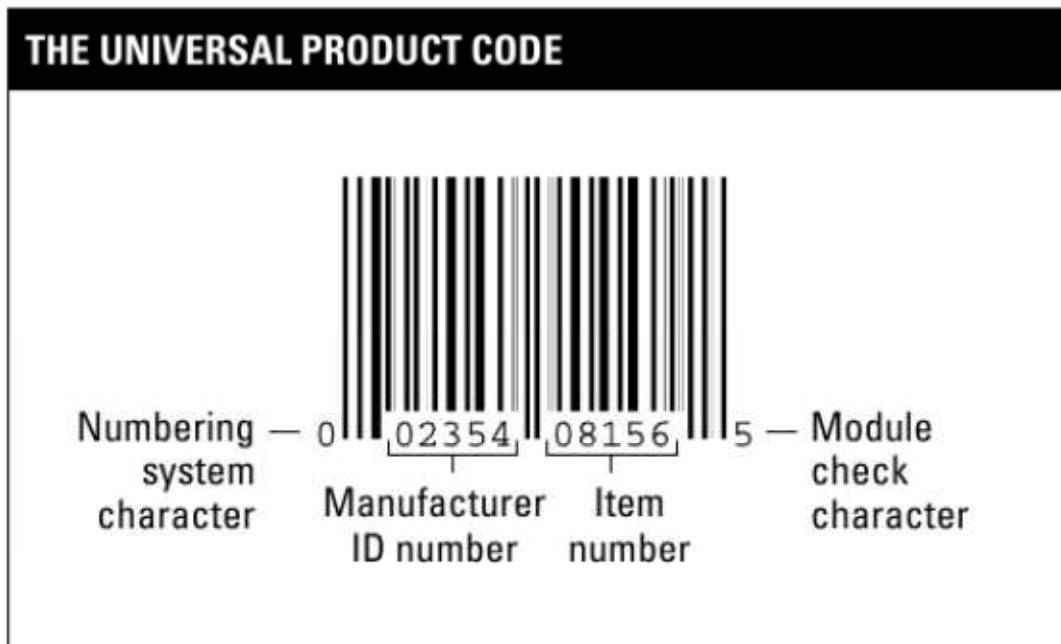


Figura: Código de barras UPC

Las líneas negras y espaciados vacíos del código de barras mantienen diferentes representaciones de los datos sobre cuál es el código numérico UPC real. Similar a las direcciones IP, el código UPC está compuesto por cuatro conjuntos de números:

- La primera parte de números consiste en un solo dígito que indica la numeración del sistema utilizado para poder interpretar los conjuntos de dígitos posteriores del código UPC. Por ejemplo, un 0 como primer número indica que los siguientes dígitos hacen representación a un código UPC regular, pero si se tiene un 5 como primer dígito, esto quiere decir que los siguientes dígitos del código UPC van a representar un cupón.
- El segundo conjunto del código está compuesto por 5 dígitos que representan el número de identificación del fabricante.
- Los siguientes 5 dígitos representan el número de identificación del objeto o producto en sí.
- Si el código UPC ha comenzado con un dígito, también puede terminar con otro conjunto de un solo dígito. Este último dígito se añade como medida de chequeo utilizada para validar la lectura en el proceso de escaneo, como si de un dígito de seguridad se tratase.

Contando con 5 dígitos como identificador de fabricante y 5 dígitos como identificador del producto, mediante UPC se pueden proporcionar solamente 10 números de sistema, 100000 identificadores de fabricante y 100000 tipos de producto por cada fabricante.

Sin embargo, el código EPC difiere del código UPC en bastantes partes. Primeramente, como en muchas otras versiones nuevas y mejoradas el código es, por lo general, más grande, de manera que permite almacenar mucha más información. La figura de abajo muestra cómo

están estructurados los datos de un código EPC. La disposición de los datos de un código EPC es similar al de un código UPC, aunque existen algunas diferencias importantes:

- **Cabecera:** es la primera diferencia que aparece en un código EPC. Este campo le indica el reader RFID que versión numérica del código EPC va a continuación. La cabecera está pensada para que un tag con código EPC puede representa una ID militar o un código FDA y no tener que utilizar una estructura totalmente diferente.
- **Administrador EPC:** este conjunto identifica a la empresa que es responsable de mantener la categoría de objeto y número de serie del objeto. Corresponde, habitualmente con el fabricante del objeto.
- **Categoría del objeto:** este conjunto hace referencia al tipo exacto de producto, de manera similar a un SKU. La categoría del objeto es usado por una entidad de gestión EPC para identificar ítems de mercado. Estos números de categoría del objeto, por supuesto, deben ser únicos dentro de cada dominio del número de administrador general.
- **Número de serie:** este conjunto representa un único identificador para el objeto dentro de cada categoría de objeto. La entidad administradora es responsable de la asignación unívoca de números seriales no repetitivos para cada instancia dentro de cada categoría de objeto.

Dependiendo del total de datos que puede contener el tag, un número EPC puede tener entre 32 a 256 bits de longitud. Esto quiere decir que es posible tener mucho más de 100000 números con respecto al sistema UPC, llegando a poder etiquetar incluso millones y trillones de objetos únicos.

El sistema EPC cubre tres áreas principales que suelen cubrir los estándares:

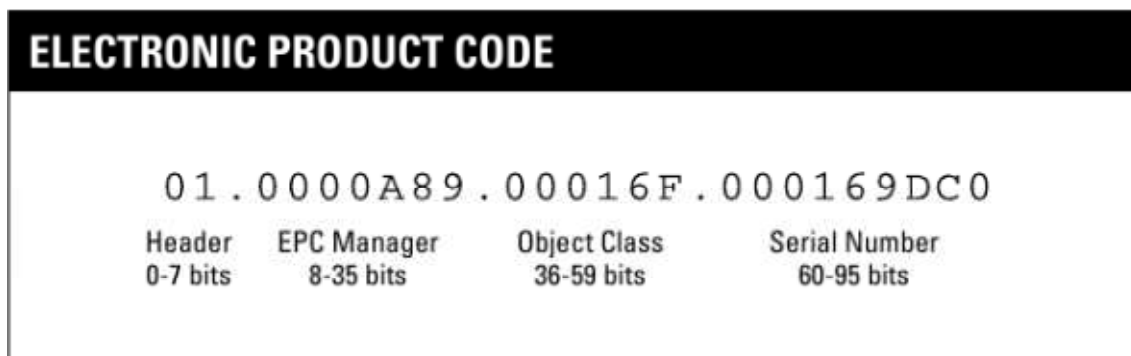


Figura 37: Ejemplo de un código EPC

<b>Table 2-2 RFID Interface Protocols</b>				
<i>Protocol</i>	<i>Corresponding Frequency</i>	<i>Capabilities</i>	<i>Pros</i>	<i>Cons</i>
Generation 1 Class 0	UHF	This is a read-only preprogrammed tag, which means that the end user can't write a new number to the tag.	Fast data communication protocol.	Preprogrammed tags increase administrative and logistics cost of affixing the correct tag to the correct item and also minimize a tag's flexibility.
Generation 1 Class 1	UHF and HF	Write once, read many (WORM)	Keep data in sequential order; manage data easier.	Can be written to only once.
ISO standard	LF, HF, and UHF	Read Only Tag Identifier with read, write, and lockable user memory to store object identifier and information.	Keep data in sequential order; manage data easier.	Does not account for the data structure but only how the tag and reader communicate.
Generation 2.0 Class 1	HF and UHF	WORM	Keep data in sequential order; manage data easier. More globally accepted protocol.	Can be written to only once.

Figura 38: Protocolos de interfaz RFID

- **El protocolo de interfaz aérea:** el protocolo de interfaz aérea ha sido fuente de muchas confusiones, consternaciones y disgustos. El protocolo Generation de EPC fue recientemente finalizado y se está pasando a su producción tras muchas revisiones y negociaciones.
- **La estructura de datos numéricos en los tags:** la estructura de datos explicada en párrafos anteriores (ver figura 3.3) es, en la actualidad, aceptada universalmente.
- **Una red para búsqueda de información de tag:** esta es la parte de estándares EPC menos aceptada y menos evolucionada. Todavía no existe una red global aceptada para EPC debido a que muchos usuarios finales están simplemente añadiendo los datos EPC a sus sistemas de intercambio electrónico de datos o sistemas EDI.

Al igual que la tecnología RFID se ha desarrollado como sustituto viable del código de barras, muchos protocolos diferentes ha vuelto a estar disponibles en el mercado, y cada protocolo nuevo realizaba alguna mejora sobre los defectos de sus predecesores. Hoy en día, las compañías que requieren de proveedores para implementar RFID han normalizado sus sistemas a un protocolo: el protocolo EPC Generation 2.0, del cual se hablará más adelante, en este apartado. Sin embargo, todavía se pueden ver tags utilizando protocolos más antiguos, por lo que es útil saber cómo reconocer estos tags. La figura 3.4 resume cuantos protocolos diferentes existen y muestra información clave acerca de cada uno.

Class 0 es el símbolo propietario del protocolo de tags preprogramados, el cual anula al usuario final a escribir un nuevo número en el tag. Los tags preprogramados incrementan ambos costes, administrativos y logísticos, de tener que fijar el tag correcto al objeto correcto y de tener que escribir sobre el tag en la misma zona de fabricación del producto a identificar. Los fabricantes asignan bloques específicos de números EPC y añaden sus propios números de producto y números de serie con el fin de crear identificadores únicos. Class 0 ha ganado mucha de su popularidad en sistemas de seguimiento y rastreo de equipajes en aeropuertos.

Sin embargo, debido a que fue un viejo estándar de Auto-ID, empresas como Wal-Mart o el DoD norteamericano solamente le hicieron soporte por un tiempo limitado.

Por otra parte, los tags del tipo Class 1 permiten a los usuarios finales a escribir los números de serie en sus tags. Pero por el contrario, cabe destacar que un reader del tipo Class 1 con la tecnología Generation 1.0 no permiten una comunicación con tags del tipo Class 0. Otro problema con los tags del tipo Class 1 con tecnología Generation 1.0 es que solamente permiten una memoria de 64 bits en el tag, limitando de esta manera el potencial del esquema numérico de los códigos EPC.

Hay que destacar los emergentes estándares ISO, pero únicamente el estándar ISO 18000-6 trata con la tecnología RFID en el rango UHF. Los estándares ISO difieren del estándar EPC en que el estándar ISO apunta únicamente a la interfaz aérea (o como los tags y los readers se hablan unos con otros), mientras que el estándar EPC apunta a otros componentes del sistema más allá de la interfaz aérea.

El grupo Auto-ID Center clasificó los tags desde los tags Class 0 hasta los tags Class 5 basados en su funcionalidad. Tags del tipo Class 0 y Class 1 fueron diseñados para ser tags de coste bajo y llegar a ser los principales conductores de la revolución de la tecnología RFID. Cuestiones confusas entre los tags Class 0 y los Class 1 y otros matices confusos entre éstos han llevado a la comunidad EPC a pedir aclaraciones. Sin embargo, como solución para mantener una misma clasificación, es decir, desde Class 0 hasta Class 1, crea una nueva generación de dichas clases, acertadamente denominada Generation 2.0 o, simplemente, Gen 2.0. Además, un tags del tipo Class 1 con Gen 2.0 todavía del tipo WORM (escritura única, lectura múltiple). De esta manera, se tiene un verdadero estándar abierto que los fabricantes pueden seguir para fabricar tags. La siguiente generación o Generation 2.0 del protocolo de EPC es mejor por cuatro razones:

- Crea un estándar global e interoperable.
- Permite que el despliegue de muchos readers para usuarios finales.
- Éste incluye funcionalidades adicionales que lo hacen técnicamente más avanzado.
- Utiliza más protocolos y mecanismos anticolidión consiguiendo velocidades y precisiones mayores.

El protocolo Class 1 Generation 2.0 es retro-compatible con los protocolos Class 1 y Class 0 Generation 1.0 y reemplazan a las especificaciones de ambas clases de tags.

El protocolo Class 1 Generation 2.0 también opera junto con el emergente protocolo del estándar ISO 18000-6, creando un estándar global y permitiendo una solución eficiente a la carencia de interoperabilidad entre los tags del tipo Class 0 y Class 1. Por otra parte, los tags que siguen a la Generation 2.0 utilizan distintos tipos de memorias:

- **Identificación de objeto (OID) en datos EPC:** la memoria OID almacena el identificador de objeto al cual se va a fijar y consiste en 16 bits de control de parámetros de protocolo, 16 bits de CRC que asegurar que no haya errores en los datos que han sido transmitidos de un tag a un reader con una precisión del 99.998%

y un identificador de objeto consistente en un código de longitud N bits (donde N es una longitud de código EPC válida).

- **Memoria de identificación de tag:** la memoria de identificación de tag ha sido incorporada dentro de los tags Class 2 Generation 2.0 de altas prestaciones, y permiten un almacenamiento de datos de tag y de fabricante.
- **Memoria de usuario:** la memoria de usuario también ha sido incorporada en los tags Class 2 Generation 2.0 de altas prestaciones y permiten el almacenamiento de datos específicos de usuario.
- **Memoria de reserva:** esta memoria es utilizada para parámetros del sistema como, por ejemplo, en passwords.

Clase	Descripción
Class 0	Pasivo, solo lectura
Class 0+	Pasivo, escritura única usando el protocolo Class 0
Class I	Pasivo, solo lectura con memoria programable no volátil
Class II	Pasivo, lectura / escritura de hasta 65 KB
Class III	Reescribible, semi-pasivo (funciona con batería, comunicación impulsada por el lector), sensores integrados.
Class IV	Reescribible, activo, "bidireccionales", pueden comunicarse con otros tags, impulsando sus propias comunicaciones.
Class V	Activo, puede comunicarse con tags de la Class IV y otros dispositivos

Figura 39: Clasificación de tags según EPCglobal

## Estándar ETSI

Actualmente existen limitaciones en Europa en lo que al uso de RFID, dentro de la banda UHF, respecta ya que por el momento se encuentra limitado a frecuencias entre los 869.40 y los 869.65 MHz. debiendo cumplir la norma EN 300 220, la cual no contempla las necesidades de RFID en la banda UHF, con una potencia radiada equivalente menor a 500 mW y un ciclo de trabajo inferior al 10 %.

La existencia de estas limitaciones dentro de la banda UHF, junto a las necesidades de un mercado que permita la libre circulación de equipos de RFID comunes para los países de la Unión Europea y la no armonización del espectro ha motivado que, en mayo de 2005, la ETSI publicara un nuevo estándar: el estándar EN 302 208.

Este nuevo estándar aumenta la banda frecuencial en la cual pueden trabajar los sistemas RFID hasta los 3 MHz (desde los 865.00 MHz hasta los 868.00 MHz), con una potencia radiada equivalente como se puede ver en la siguiente figura.

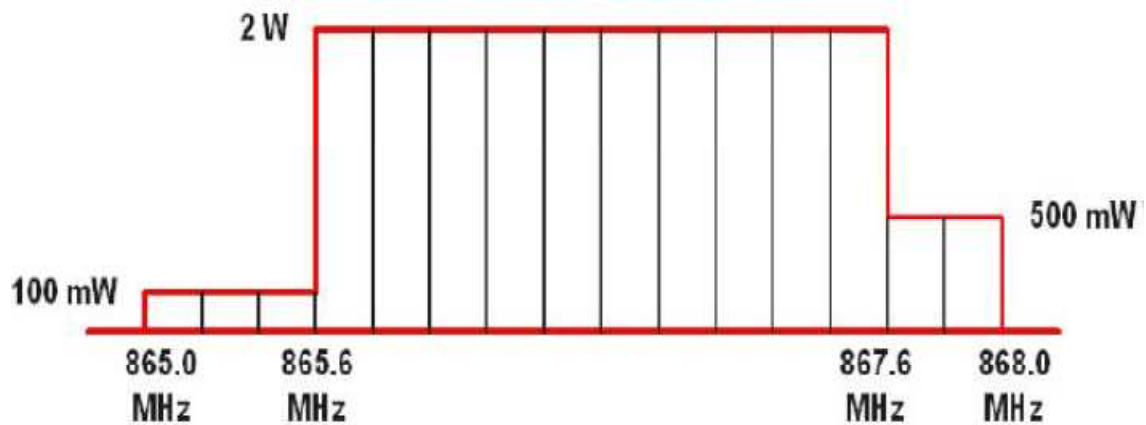


Figura 40: Potencia radiada equivalente permitida por la norma EN 302 208

Dentro de estas ventajas que proporciona la norma EN 302 208 también existen ciertas condiciones para el uso general de RFID en Europa. Una de ellas es el modo de trabajo que deben tener las etiquetas: “listen before talk”, es decir, el tag deberá permanecer en modo ‘idle’ hasta que el lector no le solicite ningún tipo de información. Esto se puede considerar totalmente lógico si tenemos en cuenta que estamos tratando con etiquetas pasivas, las cuales no tienen una fuente de alimentación propia y, por lo tanto, deben optimizar la energía de la que disponen (campo magnético generado por el lector).

Otras de las condiciones que se incluyen dentro de esta norma de la ETSI son:

- El uso de sub-bandas de 200 kHz.
- Tiempos de escucha mayores de 5 ms.
- Tiempos máximos continuados de transmisión de 4 segundos.
- Una pausa obligada de 100 ms entre transmisiones repetidas en la misma sub-banda o desplazamiento inmediato a otra sub-banda que se encuentre libre para realizar la transmisión.

## Estándar NFC

Este estándar ha sido definido por el NFC Forum, liderado por Philips, Nokia y Sony. El gran atractivo de la tecnología NFC es su sencillez de uso, ya que simplemente acercando los dos dispositivos NFC se establece el intercambio de datos sin tener que configurar manualmente la conexión. El estándar NFC engloba a la tecnología RFID, de tal forma que los dispositivos NFC trabajando en el perfil card emulation son compatibles con la infraestructura RFID instalada.

La tecnología NFC (Near Field Communication) es una tecnología de comunicación inalámbrica de corto alcance (unos 10 cm) y alta frecuencia (13,56 MHz) que permite el intercambio de datos entre dos dispositivos NFC próximos.

En los casos de uso típicos uno de los dispositivos NFC que conforma la conexión será el teléfono móvil. Los mayores fabricantes de móviles ya incorporan en su gama alta modelos

con NFC. Las aplicaciones que surgen en este escenario son el pago con móvil (por ejemplo con el servicio Google Wallet), control de accesos, tickets NFC para conciertos y eventos, pago con móvil en transporte público, pósteres interactivos, y otras muchas más.



Figura 41: Teléfono móvil con NFC

### Capítulo 3. PROBLEMA ABORDADO: Sistema de reparto de recursos en un sistema RFID con lectores interferentes y tags móviles

Tras conocer el funcionamiento teórico de los sistemas basados en la tecnología RFID se pasarán a detallar el problema que es objeto de estudio en este PFC y sus posibles soluciones.

En este capítulo se listarán y describirán brevemente las aplicaciones más comúnmente utilizadas de estos sistemas, más orientados a la identificación y seguimiento en labores logísticas y en mantenimiento y control de inventarios. Además de una descripción general del sistema en cuanto a aplicaciones, también se realizará una descripción detallada del sistema en cuanto a detalles técnicos. Es decir, se explicará cómo trabaja el sistema, cómo se ha implementado y la tecnología utilizada para esta implementación, se listarán y explicarán los parámetros utilizados en el sistema y los valores más adecuados. También se explicarán los entornos y escenarios en los que trabajará el simulador.

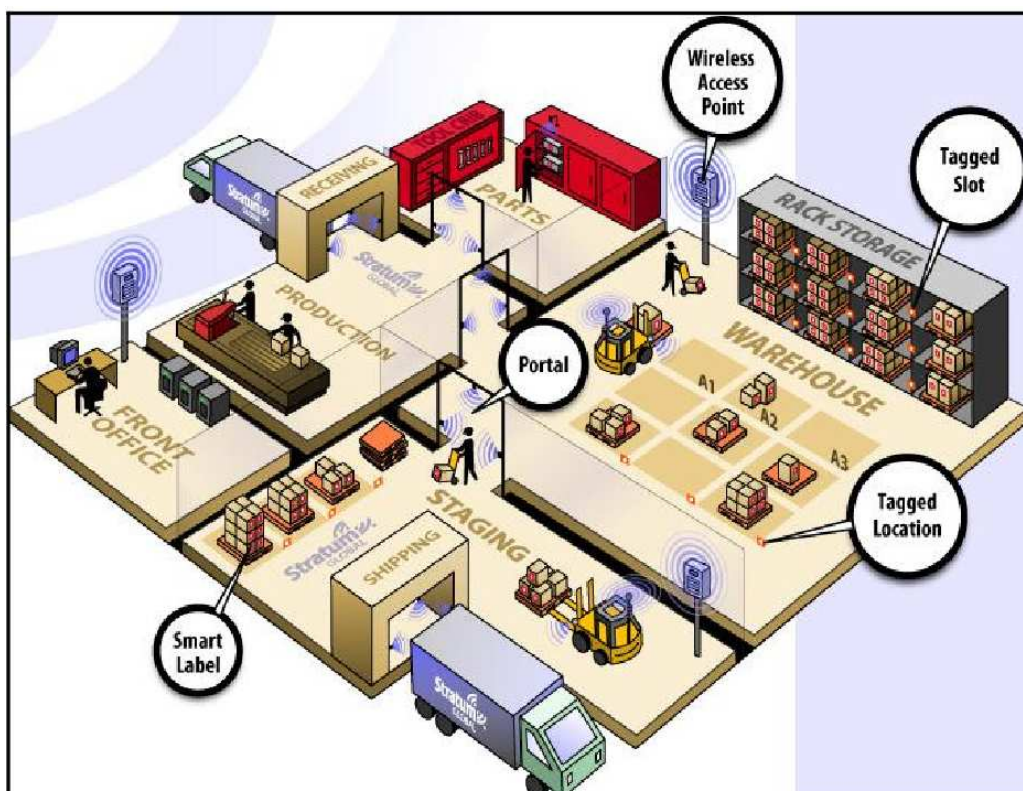


Figura 42: Uso generalizado de RFID en la logística de una compañía



### 3.1 Descripción del problema RFID abordado

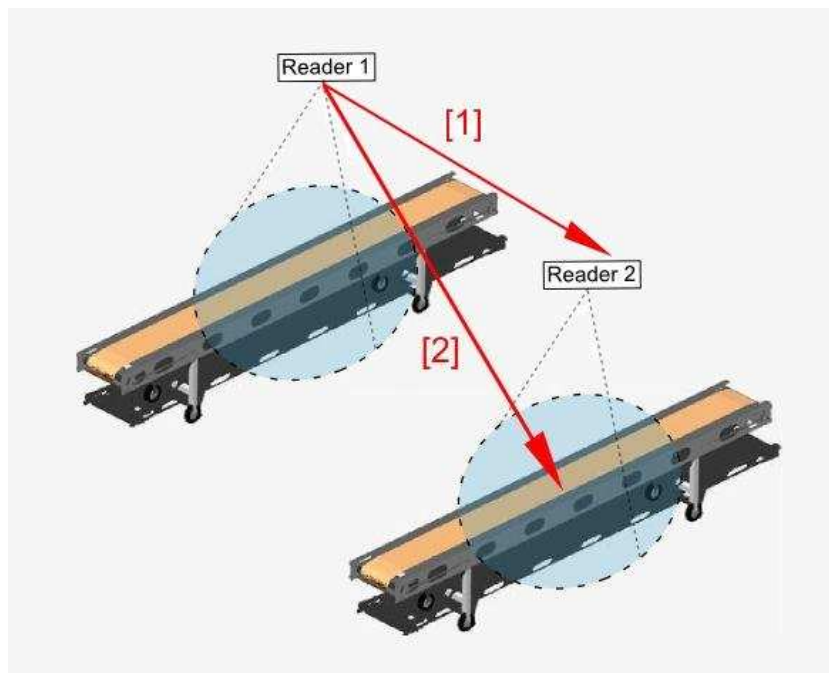


Figura 43: Descripción del problema RFID abordado

Imagínese un escenario como el de la figura. Se considerarán dos cintas transportadoras con distintas velocidades y densidad de tags por unidad de longitud. Cada cinta transportadora está asociada a un lector y está a una distancia suficiente para que cada lector no interfiera en los tags de la otra cinta transportadora. Cada cinta tiene densidades de carga independientes (en tags por metro) y los tags están en movimiento, pudiendo funcionar cada cinta a una velocidad distinta.

Los dos lectores emiten mensajes para identificar a sus tags y esperan respuesta por parte de los tags de su propia cinta. La potencia con la que transmite cada lector puede llegar a los tags de la otra cinta pero esta no es lo suficientemente potente para enmascararse con la señal del lector de su propia cinta (la señal que les llega es muy débil, mirar [2] en figura).

Otra cosa distinta ocurre cuando le llega a un lector la potencia emitida por el otro lector (mirar [1] en figura), aunque en este caso la potencia de la señal electromagnética recibida sigue siendo muy baja (como en el caso de sus tags), hay una gran diferencia, el lector tiene una sensibilidad mayor y detecta la señal pudiéndola confundir con alguno de los tags de su propia cinta.

En sistemas RFID interferentes se deben plantear mecanismos que eviten que esta interferencia afecte en la detección de los tags. Una de las técnicas es la multiplexación por división en el tiempo (TDMA). En este proyecto se va a abordar este problema en situaciones en las que los tags están en movimiento.

Cabe destacar también que cada Reader tiene un área de cobertura en el que puede leer tags. Al estar los tags en movimiento se limita el tiempo disponible en el que un tag está disponible para identificarse con éxito.

La solución adoptada para suprimir este problema es fijar turnos de funcionamiento en los que un Reader esté leyendo mientras el otro esté a la espera de su turno. Bajo estas condiciones se han implementados diferentes políticas de reparto de recursos que se presentan detalladas en los siguientes capítulos.

Se buscará un reparto de recursos óptimo entre los lectores, con el objetivo de minimizar la tasa de tags que pasan por la zona de cobertura sin ser detectados. La metodología de trabajo estará basada fundamentalmente en simulación.

## **3.2 Aplicaciones del sistema**

Actualmente, uno de los sectores donde la tecnología RFID aporta un mayor valor añadido es el de la logística, en el que su utilización se está imponiendo como tecnología básica para el desarrollo de soluciones globales para centros de almacenamiento y distribución.

El uso de esta tecnología permitiría tener localizado cualquier producto dentro de la cadena de suministro. En lo relacionado a la trazabilidad, las etiquetas podrían tener gran aplicación ya que las mismas pueden grabarse, con lo que se podría conocer el tiempo que el producto estuvo almacenado, en que sitios, etc. De esta manera se pueden lograr importantes optimizaciones en el manejo de los productos en las cadenas de abastecimiento teniendo como base el mismo producto, e independizándose prácticamente del sistema de información.

Las claves de esta adopción generalizada están en los beneficios derivados de la automatización de procesos, consiguiendo una reducción de tiempo y errores. Así mismo la mejor visibilidad de los productos a lo largo de la cadena de suministro permite el desarrollo de aplicaciones para la trazabilidad. Existen múltiples posibilidades y distintos niveles de adopción de la tecnología RFID, pudiendo etiquetarse según la aplicación, a nivel de pallet, caja o elemento. Del mismo modo, el nivel de integración con los servicios de información existentes en la empresa permite dinamizar procesos existentes como la facturación de expediciones.

El uso de la tecnología RFID en la logística ha causado un impacto en miles de compañías de todo el mundo. Su expansión se extiende poco a poco porque muchos fabricantes se enfrentan a grandes dificultades para implementar sistemas RFID. En la práctica, las cifras de lecturas exitosas están actualmente en un 80%, debido a la atenuación de la onda de radio causada por los productos y el empaquetado. Dentro de un tiempo está previsto que incluso las compañías más pequeñas sean capaces de poner tags pasivos RFID en sus transportes. Por ejemplo, desde enero de 2005, una de las compañías pioneras en el uso de la tecnología RFID en el uso de la logística, la estadounidense Wal-Mart, ha puesto como requisito a sus 100 principales proveedores que apliquen etiquetas RFID en todos sus envíos. Para poder cumplir

el requisito, los fabricantes usan codificadores/impresoras RFID para etiquetar las cajas y pallets que requieren etiquetas EPC para Wal-Mart. Estas etiquetas inteligentes son producidas integrando el RFID dentro del material de la etiqueta, e imprimiendo el código de barras y otra información visible en la superficie de la etiqueta.

Una de los sistemas RFID más extendidos en tareas de logística para la identificación de objetos son las cintas transportadoras y túneles de identificación. En estos sistemas las cajas y/o pallets formados a su vez por más objetos a identificar en su interior se desplazan por la cinta transportadora o son desplazados mediante transpaletas para pasar dentro del área de cobertura con el fin de identificar el 100% de los objetos que estas cajas o pallets contienen en su interior. El área de cobertura de estos sistemas RFID depende del rango de cobertura de las antenas que componen el reader y el número de antenas que éste contiene, siendo este área de cobertura un factor importante a la hora de conseguir una identificación de todos los objetos rápida y eficiente. La efectividad y rapidez en la identificación de todos los objetos en estos sistemas de identificación también depende de otros factores como la velocidad a la que las cajas o los pallets que contienen los objetos a identificar pasan a través de la zona de cobertura y también del número de tags que el sistema RFID tiene que identificar.

### **3.2.1 Aplicaciones con uso de RFID**

En esta sección se va a examinar la amplia variedad de aplicaciones que puede tener la tecnología RFID. Sólo se tiene que pensar en que puede solucionar esta tecnología para solucionar un problema existente en una empresa o como esta tecnología puede mejorar los procesos de dicha empresa. La posibilidad de la identificación a distancia puede ser extendida e incluir aplicaciones sensoriales para medir parámetros ambientales en el entorno y memorias de lectura/escritura. También dejar claro que no todas las aplicaciones tienen como mejor opción el uso de la tecnología RFID. Antes de entrar en más detalle y de manera breve, se listan las aplicaciones RFID por categorías:

#### **- Seguridad:**

- Control de acceso: llaves RFID e inmovilizadores.
- Verificación: procesos de control de verificación.
- Anti-robos: anti-robo en mercancías.

#### **- Seguimiento:**

- Cadena de suministro: control de almacenes e inventarios.
- Personas y animales: personal, niños, pacientes, corredores, ganado y mascotas.
- Bienes personales: equipajes en aeropuertos, cargamento y equipos.

#### **- Autenticación:**

- Dinero: billetes.
- Farmacéuticas: cajas de fármacos y drogas.

#### - Pago electrónico:

- Transporte: sistemas de peaje automáticos como FasTrak o EZ-pass.
- Control de tickets: forfaits en estaciones de esquí.
- Tarjetas de crédito/débito: el sistema PayPass de MasterCard, por ejemplo.

#### - Entretenimiento:

- Juguetes: incorporación de funcionalidades especiales.

## 3.2.2 Seguridad

Las aplicaciones RFID basadas en la seguridad se pueden dividir en tres subcategorías: Control de acceso, verificación y anti-robos.

- **Control de Acceso:** una de las primeras aplicaciones que motivaron el diseño moderno de los sistemas RFID pasivos fue el control de acceso, permitiendo sustituir llaves tradicionales basadas en sistemas mecánicos por tarjetas electrónicas basadas en la tecnología RFID. La primera ventaja es que una llave electrónica es más difícil de falsificar y es más fácil anular una tarjeta electrónica robada o en peligro, simplemente borrándola de alguna base de datos.

Esta clase de tags RF han sido mejorados desde comienzos de los años 60 y, en la actualidad, han sido ampliamente adoptados como base en los países de identificación de numerosas organizaciones de todo el planeta. Respecto a la verificación de la identidad de un empleado, éste último únicamente tiene que servirse de su tarjeta para acceder a los distintos campus, edificios, departamentos y laboratorios de su empresa, ahorrando a la empresa, de esta manera, la contratación de guardias de seguridad en todas las entradas. El rango de lectura en estos sistemas de control de acceso está limitado, habitualmente, a un pie (unos 30.48 cm.) o menos para evitar abrir una puerta de manera no intencionada y, además, proporcionar acceso sin necesidad de tener que sacar la tarjeta de la cartera o bolso donde el usuario habitualmente la guarda.

Al contrario que un sistema de control de inventario, un sistema de acceso de control basado en la tecnología RFID no es una aplicación demasiado cara. Las tarjetas de identificación tienen una larga duración y pueden incluir otras características necesarias como fotografías o envoltorios de plástico. Uno de los fabricantes más importantes de estas tarjetas electrónicas es Hughes Identification Devices (HID) que proporcionan un amplio abanico de soluciones RFID. Sus tarjetas de identificación sin contacto operan bien a 125 kHz o bien a 13.56 MHz, dependiendo de la legislación local del espectro electromagnético, y pueden almacenar entre 2 y 16 kbits de información de lectura y escritura.

Otra tipo muy común de llaves electrónicas RFID son las utilizadas en los automóviles para hacer más difícil el robo de éstos. Un ejemplo está en la marca Chrysler Jeep que incorpora un tag RFID dentro de la llave de arranque del automóvil. Una llave de arranque que no presente ese mismo tag nunca podrá arrancar impidiendo, de esta manera, su robo. Dicho automóvil solo podrá arrancar si el usuario tiene presentes la llave de arranque original con el tag RFID original que llevaba incluido al comprar el automóvil.



Figura 19: Sistema de control de acceso del fabricante HID

- **Verificación:** muchas compañías e instituciones gubernamentales emplean personal de seguridad para vigilar sus entradas y realizan chequeos periódicos para mantener seguros los edificios de dichas compañías e instituciones. A pesar de las medidas electrónicas modernas para ayudar en esta tarea, como por ejemplo el uso de cámaras de seguridad, la línea de defensa más versátil es el empleo de patrullas de seguridad que rondan periódicamente y comprueban actividades sospechosas. Tanto los empleados como la compañía de seguridad deben encontrar un método para exigir que estas medidas de seguridad se estén llevando a cabo. Un método tradicional de verificación es el uso de estaciones de registro, donde se requiere que un guardia pique una tarjeta registrando el lugar y el instante en el que se encuentra. Una alternativa más moderna es que los guardias lleven consigo un escáner RFID de mano con el cual, de manera electrónica registra el lugar y el instante en el que se encontraba en algún edificio o laboratorio de la compañía. De esta manera mediante el escáner se puede controlar si los guardias de seguridad de una empresa han estado o no en un lugar e instante determinado.
- **Anti-robo:** los mecanismos automáticos para la protección en supermercados y grandes superficies contra el robo de objetos han sido utilizados desde hace muchos años. El tag anti-robo más común es un simple dispositivo adjunto a un producto o mercancía que se desprende cuando se pasa por caja por algún empleado de la superficie. Sin embargo, en el caso de robo de un producto, el tag no es separado del objeto y activa una alarma situada a la salida del establecimiento. Este tipo de tag anti-robo es normalmente un barato circuito resonante que puede comunicar su presencia a través de una modulación por carga. Sin embargo, estos tags también pueden ser pensados como tags binarios RFID que indican su presencia cuando se les

interroga pero no aportan más información acerca de ellos, solamente su presencia. Además estos sistemas anti-robo pueden ser integrados dentro de los sistemas de control de inventarios, pudiendo utilizar la tecnología RFID para ambos propósitos en un mismo sistema integrado.

### 3.2.3 Seguimiento

Existen numerosos ejemplos de grandes organizaciones que necesitan controlar la localización de equipamiento o gente con el propósito de realizar tareas de manera eficiente.

Este es un problema logístico que a pequeña escala puede ser fácilmente solucionado por personas bien enseñadas pero que a larga escala solo puede ser solucionado eficientemente por la automatización. Por ejemplo, considere un problema de seguimiento de bienes que están esperando para el envío a otra fábrica, están en camino, acaban de llegar de algún distribuidor o es una venta que se encuentra almacenada en algún lugar de la compañía.

Estos problemas pueden ser mitigados mediante el uso de la identificación automática, las redes de ordenadores y las bases de datos informatizadas, los cuales permiten, de manera rápida, solicitar y buscar los bienes que interesan. Grandes mayoristas, organizaciones de la salud y operaciones de organizaciones militares pueden beneficiarse del seguimiento automático proporcionado por la tecnología RFID.

- **Cadenas de suministro y control de inventarios:** gracias a la administración en las cadenas de suministro existe una adopción casi generalizada de los sistemas RFID en la frecuencia de UHF. La disminución potencial de los costes operacionales de las cadenas de suministro ha sido la motivación de Wal-Mart, Tesco, Target y otras empresas mayoristas de adoptar sistemas RFID UHF en sus procesos de trabajo. Incluso en almacenes los elementos de un inventario pueden perderse o colocarse en lugares equivocados, encajando perfectamente los sistemas RFID para encontrar su localización. Esto se debe al amplio rango de lectura de los tags y a la propiedad de no necesitar una línea de visión directa con el tag. Los sistemas RFID disminuyen los errores humanos en almacenes con ambientes dinámicos o ajetreados proporcionando mayor eficiencia en las operaciones de los trabajadores.

- **Personas:** la inyección de tags bajo la piel de animales ha sido siempre socialmente mejor acogida que la inyección de tags bajo la piel de personas. Sin embargo, en la actualidad hay ejemplos de tags RFID inyectables que han sido aplicados a personas.

Inyectando un tag RFID en forma de cápsula bajo la piel de una persona le permitirá utilizar este tag como clave para poder acceder a su casa o a su trabajo. Este método de inyección de tags ha encontrado numerosas aplicaciones moralmente no muy bien vistas por la sociedad. Por ejemplo, en México el secuestro de personas por bandas es muy frecuente y la inyección de tags bajo la piel cuando una persona nace permite a los padres poder identificarlos años más tarde.

- **Pacientes sanitarios:** RFID tiene aplicaciones en la sanidad. Si a un paciente se le agrega un tag, se puede asegurar que un historial médico corresponde a dicho paciente, pudiendo administrar los medicamentos adecuados.
- **Corredores:** a partir de los años 90 los organizadores de los mayores maratones del mundo han proporcionado a los participantes tags RFID que pueden ser adheridos a los cordones de sus zapatillas deportivas. Esta medida es necesaria para mantener el seguimiento y control de 1000 corredores al mismo tiempo en una gran maratón y para saber cuando un corredor sale exactamente de la línea de salida. El sistema trabaja empleando readers RFID en la salida y llegada a meta y en algunos puntos de control a lo largo de la carrera pudiendo realizar también un control de tiempos y diferentes estadísticas.



Figura 20: Tag RFID para corredores

- **Ganado:** la dirección de una ganadería moderna requiere una contabilidad detallada de todo el ganado. Esta tarea incluye un control de las cantidades de alimento que consumen los animales y una lista de los medicamentos con los que el ganado es tratado. Mantener el seguimiento de la identidad de cada animal también es una tarea importante, ya que el uso de códigos de barras convencionales no puede ser la mejor opción en una factoría ganadera considerable.
- **Mascotas:** muchas organizaciones y empresas proporcionan servicios para la identificación de gatos y perros mediante la inyección bajo piel de un tag RFID. Si una mascota se pierde y es encontrada, las autoridades pertinentes pueden realizar un escáner al animal con la finalidad de identificarlo y conocer el nombre de los dueños y dirección de casa. En muchas comunidades y de manera obligatoria, el proceso de registro de un perro consiste en la inyección bajo la piel de un tag del tamaño de un grano de arroz. Mediante esta tecnología el tag no puede ser eliminado accidentalmente o robado, a diferencia del uso de collares para la identificación.
- **Equipaje y control en aeropuertos:** en los últimos años el mundo se ha ido concienciando del aumento de la actividad terrorista, por lo que es muy importante que en los aeropuertos exista un seguimiento de los equipajes y que éstos viajen en el identificadas automáticamente mientras están siendo llevadas hacia el avión, los

propietarios pueden tener la absoluta confianza de que el proceso se realizará sin ningún error.

Por otra parte, si un pasajero ha sido chequeado pero después, por cualquier circunstancia, no se mete en el avión, RFID puede ayudarle a localizar su equipaje en el lugar de carga de maletas. Otra ventaja más del uso de sistemas de identificación en aeropuertos es disminuir los costes asociados con la recuperación de equipajes perdidos y entrega de éstos a la dirección de sus propietarios. Por otra parte, el gobierno estadounidense también está planeando incorporar de tecnología RFID a los pasaportes estadounidenses para reducir las falsificaciones y permitir un control eficiente en sus fronteras.

### 3.2.4 Autenticación

Con el objetivo de confiar en que un determinado producto proviene de su fabricante original, es necesario tener medidas para poder validar el origen de dicho producto.

Ejemplos de mecanismos habituales de autenticación en algunas industrias son las marcas selladas para objetos fabricados con metales caros, marcas de agua en billetes o firmas de autor en pinturas de arte. Sin embargo, todas esas técnicas pueden ser falsificadas si se hace la suficiente inversión en el equipamiento apropiado.

**Dinero:** el Mu-chip de la marca Hitachi es uno de las implementaciones RFID más pequeñas con 0.4x0.4 mm y diseñado para ser leído en un rango muy cercano. Incorporar tags a los billetes permite de manera automática realizar un seguimiento entre transacciones y así proporcionar información acerca de cuándo y dónde se emplea el dinero. La Unión Europea ha considerado, para un futuro, implementar RFID en los billetes utilizados en países pertenecientes a la zona euro, introduciendo un pequeño chip entre las capas del billete. El objetivo es el de dificultar las falsificaciones y facilitar un seguimiento automático.

**Medicamentos:** las empresas farmacéuticas en la mayoría de las ocasiones se manejan en un mercado de altos valores y, por lo tanto, éstos son un objetivo para la falsificación.

Sin embargo, a diferencia de muchos productos de consumo, es muy difícil que la persona que distribuye un fármaco conozca si las pastillas encerradas en un bote son realmente las que quiere un cliente. Normalmente se confía en la reputación del farmacéutico que vende ese fármaco pero en otras áreas, como por ejemplo en Internet. En este tipo de compras, las compañías que están al otro lado pueden tener menores costes de operación y pueden proporcionar los medicamentos o drogas más baratos pero, por el contrario, el consumidor no puede tener la certeza de que está recibiendo el mismo producto por el que pagó. Utilizando paquetes bien sellados que incluyen tags RFID difíciles de sustraer con números de identificación de lote asignados por la misma industria farmacéutica que fabrica dicho fármaco es una posible solución. El número de lote entonces podría ser posteriormente leído en casa y validado online a través de Internet.



### 3.2.5 Pago electrónico

**Peajes automáticos:** en los proyectos de construcción de nuevas carreteras y puentes el uso de peajes ha sido la única manera de recuperar el capital invertido. Sin embargo, los peajes tienen inconvenientes para los conductores, como por ejemplo tener que hacer colas, esperar un tráfico demasiado lento y, por qué no, tener que dar el dinero exacto en metálico. La tecnología RFID puede reducir estos problemas.

Colocando un tag diseñado de manera exclusiva para los parabrisas de un coche y con la ayuda de un reader colocado estratégicamente en la cabina de peaje se puede de manera automática escanear el ID del tag y permitir al coche pasar o no. La tecnología de los reader de las cabinas de peaje ha sido desarrollada de manera que puedan operar a velocidades típicas de autopistas y, de esta manera, no obligar a los coches a disminuir su velocidad. Sin embargo, en la práctica la construcción de las cabinas de peaje hace que estas sean estrechas y que los automóviles deban aminorar su velocidad por razones de seguridad. En los últimos años muchas calles de los peajes han sido modificadas para proporcionar el cobro automático mediante estos sistemas de peaje automático. Por ejemplo, en las carreteras de la costa oeste de los EEUU predominan los sistemas FasTrak, mientras que en las carreteras de la costa este, predominan los sistemas EZ-pass.



Figura 21: Tag y cabina de peaje de un sistema de peaje automático FasTrak

**Tickets electrónicos:** el sistema de entradas o tickets es otro campo donde la tecnología RFID puede contribuir en su ayuda. Un ticket es un pago simbólico que permite a una persona acceder a un cierto recurso, por ejemplo, una película de cine, una exhibición o un museo. Habitualmente un ticket se vende antes del evento y, cuando es utilizado, no hace falta más dinero. Además, un ticket solo puede utilizarse una vez y normalmente tienen cierto validez temporal. El principal propósito de un ticket es proveer de acceso rápido a un evento cuando una gran cantidad de personas van a converger en el mismo lugar de celebración del evento. En el sistema habitual de tickets no existen retrasos en el pago, devoluciones o necesidad de una validación del dinero recibido. El acceso al evento se produce simplemente entregando un ticket válido.

Un ticket basado en tecnología RFID tiene grandes ventajas sobre el sistema de papel tradicional de los tickets, como por ejemplo el poder tener el ticket o tag dentro de una cartera mientras se realiza la validación y, de manera electrónica, marcar el ticket RFID como utilizado cuando se pasa a ver el evento. Además, algunos sistemas podrían almacenar tickets

virtuales de diferentes eventos y utilizar únicamente el ticket exigido. Un ticket RFID también puede ser renovado electrónicamente y, de esta manera, puede ser utilizado en múltiples ocasiones, por lo que el coste de esta tecnología puede ser compensada en comparación al coste de impresión de los tickets. En la actualidad, la tecnología RFID se utiliza mucho para tickets o entradas de elevado precio como en el caso de los forfaits de las estaciones de esquí que permiten el paso a los telesillas.



Figura 22: Forfait de una estación de esquí con sistema RFID para acceder a telesillas

**Tarjetas de crédito:** PayPass es un método de pago simbólico promovido por MasterCard para proporcionar un método rápido y práctico para la compra de productos no excesivamente caros. Para realizar una compra, el consumidor puede utilizar una tarjeta o llave PayPass basado en tecnología RFID sin contacto (siguiendo el estándar ISO 14443, el cual se explicará en la sección sobre estándares) para realizar el pago simplemente moviendo la tarjeta frente al reader.

### 3.2.6 Entretenimiento

**Juguetes inteligentes:** la naturaleza invisible de la comunicación RFID ha sido utilizada en algunos juguetes fabricados para darles cierta apariencia de que están vivos cuando se les acercan ciertos objetos.

Para finalizar este apartado, decir que la tecnología RFID se ha ido haciendo un hueco en el mercado, con un progreso espectacular en los últimos años. Muchos son los sectores que se han visto beneficiados con la incursión de nuevos sistemas de identificación basados en la tecnología RFID, como los transportes, las tarjetas inteligentes, la expedición de tickets, control de acceso, identificación de animales, identificación de contenedores, medicina o la industria del automóvil.

### 3.3 Descripción del simulador OMNeT++

El sistema de identificación RFID de tags pasivos en movimiento que se ha implementado y estudiado se podría modelar como dos cintas o dos túneles de identificación para tareas logísticas explicado en el apartado anterior. La implementación de este simulador se ha realizado de manera que deja total libertad para realizar cambios en cuanto a distribución de los objetos a identificar se refiera. Otro aspecto a tener en cuenta serán los parámetros que el usuario deberá introducir al sistema, como la velocidad de la cinta en el caso de la cinta transportadora o los parámetros de simulación.

Para la implementación de este sistema se ha utilizado el entorno ofrecido por OMNeT++, es un simulador modular de eventos discretos de redes orientado a objetos, usado habitualmente para modelar el tráfico de redes de telecomunicaciones, protocolos, sistemas multiprocesadores y distribuidos, validación de arquitecturas hardware, evaluación del rendimiento de sistemas software y, en general, modelar cualquier sistema que pueda simularse con eventos discretos. Un modelo en OMNeT++ está compuesto por módulos jerárquicos, que se comunican mediante mensajes. El módulo de nivel superior se denomina módulo de sistema, el cual contiene submódulos, los cuales también pueden contener submódulos. Se puede implementar un módulo con cualquier cantidad de niveles de módulos. La estructura de cada módulo se define mediante el lenguaje de definición de modelos NED mientras que el comportamiento y funciones de cada módulo se define mediante el lenguaje de programación orientado a objetos C++. Los módulos que contienen submódulos se denominan módulos compuestos. Existen también los módulos simples (elementos básicos) que contienen los algoritmos que permiten el funcionamiento del modelo. Son los módulos simples los que se implementan en el lenguaje C++ usando la biblioteca de simulación de OMNeT++. OMNeT++ ofrece, además de la posibilidad de implementar el modelo de un sistema, su estructura y su comportamiento, la posibilidad de poder simular su funcionamiento de manera sencilla. El sistema de simulación de OMNeT++ provee un núcleo de simulación que contiene las rutinas que controlan las simulaciones y las bibliotecas de simulación, e interfaces de usuario que son usadas para la construcción de modelos y ejecución de simulaciones. Un modelo en OMNeT++ consiste básicamente de la descripción de la topología del modelo en el lenguaje NED, la definición de mensajes y el código de los módulos simples. Los modelos en OMNeT++ tienen una estructura modular. Existen objetos básicos con una funcionalidad básica a partir de los cuales se componen módulos complejos formando una estructura jerárquica anidada.

La construcción de un modelo de simulación con OMNeT++ se resume en los siguientes pasos:

- Descripción de la estructura (módulos y relaciones) del sistema mediante el lenguaje NED.
- Implementación de los módulos simples en C++.

- Generación del modelo. Se compilan los módulos y se enlazan con la biblioteca de simulación.
- Configuración de la simulación. Se especifican los parámetros adecuados para la ejecución de la simulación.

Los módulos simples contienen los algoritmos como funciones en el lenguaje C++. Un módulo simple permite manejar los eventos y definir los estilos de procesos haciendo uso de los diferentes conceptos de la programación orientada a objetos. Los objetos usados en la simulación son representados mediante clases escritas en el lenguaje C++. Los siguientes elementos son parte de la biblioteca de simulación de OMNeT++:

- Módulos, puertas y conexiones.
- Parámetros y mensajes.
- Clases contenedoras.
- Colecciones de datos.
- Clases estadísticas.
- Clases de detección de transiciones y detección de precisiones.

La topología de un modelo es definida usando el lenguaje NED. Éste facilita una descripción modular de una red. Así, una red puede estar compuesta por la descripción de varios componentes. Los canales, módulos simples y compuestos definidos para una red pueden ser reutilizados en la descripción de otra red. Los archivos que contienen el código NED pueden ser generados utilizando un editor de textos o el editor gráfico incorporado.

Este editor es la interfaz gráfica que permite crear, programar, configurar y simular redes de comunicaciones, sin necesidad de codificar en lenguaje NED, haciendo uso de diseños gráficos. Por tanto y antes de entrar a explicar el código del simulador implementado se podría concluir que OMNeT++ ofrece un entorno idóneo para la implementación del sistema objetivo de este proyecto fin de carrera.

### 3.4 Descripción del simulador inicial

Este trabajo parte de la realización de un simulador inicial en el que se busca optimizar el sistema de identificación RFID de tags pasivos en movimiento en dos cintas transportadoras que pueden trabajar a diferente velocidad con diferentes cargas de tags (en tags por metro). A partir de este funcionamiento inicial se han implementado diferentes variaciones para observar los posibles cambios y buscar un funcionamiento óptimo del sistema. El funcionamiento inicial es una adaptación de un trabajo desarrollado por el Dr. Juan José Alcaraz Espín, profesor del departamento de Ingeniería Telemática de la Universidad Politécnica de Cartagena como trabajo de investigación de los protocolos anticolidión en la tecnología de Identificación por Radiofrecuencia o RFID. Hay que destacar el uso del protocolo Frame Slotted Aloha o FSA como protocolo anticolidión, ya que el protocolo EPC Generation 2.0 desarrollado por el EPCglobal implementa un protocolo anticolidión basado en el protocolo Frame Slotted Aloha ofreciendo óptimos resultados. Este aspecto es muy importante, ya que muchos parámetros del sistema y su funcionamiento en sí se basarán en parámetros y funcionamiento de este protocolo.

Como ya se ha comentado en el apartado anterior el sistema de identificación RFID de tags pasivos en movimiento desarrollado en este proyecto fin de carrera ha sido implementado mediante el simulador OMNeT++ utilizando el lenguaje C++ para el comportamiento y funciones del simulador y el lenguaje NED para la definición de la topología del sistema. En concreto, este sistema se compone por un único módulo simple dentro del módulo general del sistema. Es decir, el módulo simple contiene la definición de su topología en NED y la definición de su comportamiento en C++ mientras que el módulo general, al ser un módulo compuesto de OMNeT++, solamente contiene la definición de su topología en NED.

### 3.5 Descripción de las diferentes variantes de simulación

Tras el estudio de la problemática de nuestro sistema se han barajado distintas posibilidades de estudio para ir evaluando su rendimiento. La idea principal de la solución adoptada para abordar el problema es hacer funcionar a cada lector de nuestro sistema durante un tiempo determinado mientras el otro espera su turno.

Esta política de reparto de recursos se puede hacer bajo diferentes protocolos (todos ellos están basados en FSA). A continuación se expone una breve descripción de cada una de las soluciones adoptadas que serán descritas en detalle en la siguiente parte de la memoria.

- **BFSA Frame Scheduling:** La primera solución adoptada ha sido hacer funcionar a cada lector un periodo de tiempo que coincide con el tamaño de la trama que asignemos a cada lector. Se van intercambiando periodos de lectura y no se interrumpe a cada lector a mitad de cada trama. Este sistema requiere saber la carga del sistema y configurar los parámetros de forma óptima para obtener buenos resultados.

- **DFSA N-Slotted Scheduling:** Se ha implementado un funcionamiento en el que el tamaño de la trama es dinámico y no es necesario que el usuario introduzca la configuración óptima para el tamaño de trama de cada lector, es un sistema en el que se va adaptando sus parámetros a la carga que haya en el sistema en cada instante. Para mejorar los resultados, también se le ha introducido un funcionamiento en el que cada lector trabaja en ciclos de lectura determinados por grupos de slots configurables por el usuario. Se pueden hacer ciclos de lectura muy cortos (un slot cada lector) o muy largos (intervalos de lectura en cada lector de muchos slots). Posteriormente se justificará la elección de esta política de funcionamiento y las otras alternativas estudiadas.
- **BFSa N-Slotted Scheduling:** Esta solución es un híbrido de las dos anteriores, se hace funcionar al sistema con un tamaño de trama fijo en cada lector pero en este caso, el scheduling también se realiza en bloques de N slots configurables por el usuario. Es interesante estudiar esta variante porque aunque el sistema aumente en complejidad el proceso de optimización de sus parámetros, estos ofrecerán una mejora sustancial en los resultados.

### 3.5.1 BFSa Frame Scheduling

Se comienza con la implementación en OMNeT++ de un simulador que sea capaz de simular un sistema de identificación RFID de tags pasivos en movimiento en dos cintas transportadoras que pueden trabajar a diferente velocidad con diferentes cargas de tags (en tags por metro) y en que se solucione al problema de los lectores interferentes.

La primera solución adoptada consiste en hacer funcionar cada lector por turnos haciendo coincidir el periodo de funcionamiento de cada lector con el tamaño de su trama, cada lector tiene unos parámetros de configuración que trabajan con el protocolo Framed Slotted ALOHA (explicado anteriormente).

#### Parámetros y funcionamiento del simulador inicial

Los parámetros del sistema de identificación inicial se pueden dividir en tres partes: parámetros propios del sistema de identificación, parámetros propios del protocolo anticolidión Frame Slotted Aloha y parámetros propios de las simulaciones de OMNeT++.

A todos estos parámetros se les asigna un valor y se les mete al simulador mediante un fichero de configuración llamado omnetpp.ini. Los cambios en este fichero se pueden hacer manualmente o por medio de scripts que automaticen las simulaciones.

Cada uno de estos parámetros tendrá un valor en cada cinta, que será independiente del valor o los cambios que puedan ocurrir en la otra cinta. A continuación se listarán todos los parámetros utilizados en el simulador inicial y el uso que se le da a cada uno:

- **Parámetros propios del sistema de identificación:**
  - **load\_area\_length1:** o longitud del área de carga. Representa la zona donde se colocarán los tags que serán desplazados a lo largo de la cinta transportadora, pasa por la zona de cobertura para ser identificados.
  - **coverage\_length1:** o longitud del área de cobertura. Representa una zona delimitada por la cobertura de las antenas que componen cada reader RFID, es la zona en la que se pueden identificar los tags.
  - **Speed1:** o velocidad de desplazamiento de los tags. Será la velocidad a la que los tags se desplazan por cada cinta transportadora. Infiuye en los resultados porque delimita el tiempo disponible para cada tag en la zona de cobertura para su identificación.
  - **tags\_per\_load:** o tags por carga. Representa la densidad de tags que transporta cada cinta (en tags por metro). También hay que tener cuidado con este parámetro, ya que un número muy elevado de tags por cinta podría hacer que no se identificaran en su totalidad debido a la alta densidad de tags en la zona de cobertura.
  
- **Parámetros propios del protocolo anticólisi3n Frame Slotted Aloha:**
  - **Q1parameter:** o parámetro  $Q1$ . En ocasiones, en esta memoria, se denominará al parámetro  $Q$  como longitud o tamaño de trama, ya que este parámetro indica el tamaño de la trama del protocolo Frame Slotted Aloha mediante la expresi3n  $longitud\_trama = 2^Q$ . Una trama, por tanto, tendrá  $2^Q$  slots temporales, por lo que también existirá un valor del parámetro  $Q$  3ptimo que hará que el sistema complete la identificaci3n de todos los tags de manera precisa y con mayor rapidez.
  - **idle\_slot\_time:** o duraci3n de un slot vaci3. Representa la duraci3n de un slot en el cual ning3n tag desea identificarse.
  - **colission\_slot\_time:** o duraci3n de un slot con colisi3n. Representa la duraci3n de un slot en el cual dos o m3s tags desean identificarse provocando, de esta manera, una colisi3n entre dichos slots.
  - **successful\_slot\_time:** o duraci3n de un slot con 3xito. Representa la duraci3n de un slot con 3xito o slot en el que solamente un tag desea identificarse y para el cual no existirá colisi3n alguna.
  - **activation\_time:** o tiempo de activaci3n de los tags. Este parámetro representa y simula el tiempo que los tags pasivos RFID emplean en activarse tras haber recibido la se3al del reader RFID solicit3ndoles su identificaci3n.
  - **start\_offset:** o tiempo de offset. Es un intervalo de tiempo empleado al inicio de la simulaci3n para dar tiempo al sistema para que se carguen los tags en la zona de carga antes de que el reader solicite identificaci3n.

- **Parámetros propios de las simulaciones de OMNeT++:** son los parámetros contenidos en las secciones General, Tkenv, Cmdenv y Run entre otras. Estos son parámetros típicos utilizados por el simulador de OMNeT++. En estos parámetros se le indica a OMNeT++ el sistema que tiene que simular, la duración de la simulación, el modo en que se va a simular, el número de simulaciones que realizará, etc.

Existen numerosos parámetros para configurar una simulación en OMNeT++, todos explicados en el manual de usuario de OMNeT++.

- **Otros parámetros:**
  - **batch\_time:** o duración de lote. Representa la duración total de un lote para poder realizar medidas estadísticas por lotes durante la simulación.
  - **max\_error:** o error máximo. Representa el error máximo cometido por el intervalo de confianza al realizar el proceso de medidas estadísticas por lotes.
  - **file:** representa el nombre del fichero donde se volcarán los datos solicitados de la simulación.

Antes de comenzar a explicar el funcionamiento del código del sistema de identificación de tags en movimiento hay que destacar que en el código se emplea una estructura para los tags, declarada mediante la directiva *struct tag\_id*. En esta estructura se definen las propiedades que va a contener cada tag. De esta manera, un tag contiene el instante de entrada a la zona de cobertura, dado por la variable del tipo *double t\_in*; una variable booleana, la variable *identified*, que indica que está identificado en caso de valer 1 o, por el contrario, indica que no está identificado en caso de valer 0; una variable entera que indica el slot seleccionado por el tag para identificarse, dado por la variable *selected\_slot*; y un número de tag que sirve como contador de tags, dado por la variable de tipo *long counter*. La estructura *tag\_id* será común a los tags de ambas cintas puestos que son iguales.

También destacar la utilización para cada cinta de tres instancias de la clase list proporcionada por la librería STL de C++. De estas tres listas dos de ellas serán listas de estructuras del tipo *tag\_id* y una de ellas será una lista de enteros. Merece la pena hacer una distinción de cada una de estas listas y que quede clara su principal función puesto que se les hará referencia

En concreto las listas de estructuras *tag\_id* serán las estructura *load\_area*, la cual representa el área de carga y, por tanto, contiene tags o estructuras *tag\_id*, y la estructura *coverage\_area*, la cual representa el área de cobertura y, por tanto, también contiene tags o estructuras *tag\_id*. La tercera lista, llamada *selected\_slots*, sirve como memoria para llevar un control de los slots en los que los tags quieren transmitir su identidad y, como se ha dicho antes, únicamente contiene números enteros, en concreto números enteros entre 1 y 2<sup>Q</sup>.



En OMNeT++ todo sistema bajo simulación comienza con el método `initialize()` que suele ser utilizado para inicializar los valores a los parámetros, inicializar valores de otras variables y objetos, y para programar los eventos con los que comenzará a funcionar el sistema. Una vez asignados los valores de los parámetros del sistema a cada variable mediante el fichero de inicialización `omnetpp.ini` y asignados los valores a otras variables y objetos útiles, el funcionamiento del sistema comienza con la programación de eventos. La programación de eventos en OMNeT++ se realiza mediante la función `scheduleAt()`, que toma como parámetros un mensaje y el instante del evento. El mensaje se crea previamente mediante la clase `cMessage`, proporcionada por la librería de programación de OMNeT++ y para el instante del evento siempre suele utilizarse la función `simTime()` de la librería proporcionada por OMNeT++, la cual devuelve el instante actual de la simulación (para este caso en concreto sería 0 segundos ya que se encuentra en el método `initialize()`). Estos dos eventos llevan a ejecutar el método `loadTags1()` y `loadTags2()` en primer lugar y el método `frameStart()` en segundo lugar. Esto es así porque se tiene en cuenta el tiempo de activación o `activation_time` y el offset de comienzo o `start_offset` para que primero se carguen los tags en cada área de carga y les dé tiempo a introducirse en el área de cobertura y, de esa manera, no comience a trabajar el mecanismo anticolidión sin ningún tag en el área de cobertura. Hay que destacar que estos los eventos programados se introducen en la lista de eventos futuros o FEL (Future Event List) del simulador de OMNeT++. En el método `initialize()` también se programa otro evento futuro llamado `newBatch()`, y está relacionado con el cálculo estadístico por lotes. Es un método que va calculando el TLR (Tag Loss Ratio) cada cierto tiempo en la simulación. Desde este método se programan cuatro eventos futuros cuyo funcionamiento se pasará a detallar a continuación (los primeros elementos en la FEL son un mensaje de `LOAD_MESSAGE` para cada cinta, un mensaje `FRAME_START` y un mensaje `BATCH`). Una vez terminado el método `initializa()` el sistema pasa al método `handleMessage()`. Cada vez que llega un mensaje este se introduce en la FEL y son tratados por orden en el método `handleMessage()`, este le dice al sistema qué método ha de ejecutar cuando le lleva un mensaje generado por un evento. El método `handleMessage()` analiza de que tipo es el mensaje recibido y ejecuta un método u otro en función del tipo de mensaje recibido. A continuación se detallarán los tipos de mensajes relevantes con los que trabaja este simulador:

- **LOAD\_MESSAGE:** Se carga un mensaje de este tipo para cada una de las cintas cada vez que se quieren introducir tags en nuestro sistema. Este mensaje se trata llamando al método `loadTags()` para crear en cada cinta tantos tags como indique la variable `"tags_per_load"` del fichero de configuración `omnet.ini`. A su vez este mensaje creará eventos futuros de dos tipos, uno denominado `TAG_IN` para introducir y configurar cada tag en nuestro sistema y otro denominado `TAG_OUT` para hacer las comprobaciones que el simulador estime oportunas y sacar a los tags de nuestro sistema. Estos eventos futuros programados para cada tag representan la entrada de cada tag a la zona de cobertura y utilizan un mensaje del tipo `tag_in`. Además en el método `loadTags()` también se les asignan valores a las variables propias de los tags (recordar que un tag es un `struct tag_id`), como por ejemplo el instante de entrada a

la zona de cobertura, el valor false para la variable identified, el valor 0 para la variable selected\_slot o el valor correspondiente a la variable counter. También se llena la lista load\_area, que como se dijo, representaba el área de carga, con estos tags ya programados. Por último, también se vuelve a reprogramar un evento del tipo load\_message para que se vuelvan a cargar otra remesa de tags en un intervalo de tiempo dado por la variable load\_time.

- **TAG\_IN:** Este mensaje se trata cargando el método tagIn(), su utilidad es pasar los tags del área de carga (*load\_area*) al área de cobertura (*coverage\_area*), en esta zona los tags pueden ser tratados. Desde este método también se programa un mensaje TAG\_OUT que nos avise cuándo un mensaje sobrepasa nuestra zona de cobertura que tiene como duración un valor dado por la variable time\_under\_coverage, la cual depende de la longitud del área de carga y de la velocidad. Destacar que el método tag\_In() se repetirá tantas veces como tags entren a la zona de cobertura.
- **TAG\_OUT:** Cada vez que un tag sobrepasa el área de cobertura debido a la velocidad de desplazamiento que este tiene nos llega un mensaje de este tipo. Su tratamiento es llamar a la función tagOut() que retirará el tag de nuestra lista *coverage\_area* y actualizará tanto los contadores de tags salientes como los contadores que controlen los tags sin identificar o identificados (las variables *outgoing\_tag\_counter* y *unidentified\_tags* son importantes para poder calcular el rendimiento del sistema).
- **FRAME\_START:** Este mensaje se trata con el método frameStart(). Con este método se comienza el funcionamiento del protocolo anticolidión implementado para este sistema mediante el protocolo Frame Slotted Aloha (FSA), se ha explicado el funcionamiento teórico de este protocolo anteriormente y ahora pasaremos a explicar su implementación en este proyecto. Cabe destacar que cada mensaje FRAME\_START va asociado a una cinta transportadora, y cuando termina de tratarse una trama completa de una cinta se lanza un mensaje FRAME\_START en la otra.

El método frameStart() comienza limpiando de contenido la lista de números enteros denominada selected\_slots y poniendo a cero la variable slot\_counter. Tras este paso previo de inicialización, se realiza una especie de escaneo de la zona de cobertura, es decir, se recorre la lista llamada coverage\_area asociada a la cinta que estemos analizando posición por posición comprobando que tags están identificados y cuáles no, es decir, se comprueba el valor de la variable de tag identified. Cada vez que se encuentra en la lista que representa el área de cobertura un tag no identificado (identified con valor false) se escoge, para cada tag no identificado, un valor aleatorio entre 1 y  $2^0$  que se le asignará a dicho tag en la variable selected\_slot y que representa el slot elegido por el tag para identificarse. Dicho valor aleatorio también se introducirá en la lista de números enteros selected\_slots, que servirá para llevar un control de todos los números de slot elegidos por los tags para identificarse en este ciclo del protocolo FSA. Una vez introducidos todos los valores aleatorios que representan los números de slots elegidos por los tags para identificarse en la lista selected\_slots, dicha lista es ordenada de menor a mayor mediante la función sort() y se le eliminan los números de slots repetidos mediante la función unique(). Tras esto el método frameStart() asociado a esta cinta ejecutará su método nextSlot().

El método `nextSlot()` representa a grandes rasgos el salto al siguiente slot en el que puede haber una identificación por algún tag. En este método, para comenzar, se comprueba si existen slots elegidos por algún tag en la lista `selected_slots`. Para ello, simplemente se comprueba si la lista `selected_slots` está vacía o no mediante la función `empty()`. En caso de que dicha lista se encuentre vacía indica que todos los tags se han identificado y no existe ningún slot en el que algún tag quiera transmitir sus datos para identificarse. En este caso se programaría un evento mediante un mensaje del tipo `frame_start` en un instante de tiempo en el que habría que tener en cuenta el valor `activation_time` y el valor `next_frame_time`. El valor de `next_frame_time` representa el tiempo que le quedaba a la trama inmediatamente anterior para finalizar, por lo que se realiza el recuento de slots vacíos mediante la diferencia entre el último slot utilizado por un tag y  $2^Q$  que es el número del último slot de la trama. La programación de un nuevo evento tipo `FRAME_START` representa el comienzo de una nueva trama, se van alternando tramas completas cada lector. Por el contrario, en el caso de que la lista `selected_slots` no se encuentre vacía se programa un evento mediante un mensaje `QUERY_RESPONSE` que representa la solicitud de un tag para poder transmitir su identidad. Para ello, primero se calcula el instante para el que va a ser programado dicho evento. Para este cálculo se realiza la diferencia entre el siguiente slot escogido por un tag para identificarse, dado por `netx_ID_slot` y previamente extraído dicho valor de la primera posición actual de la lista `selected_slots`, y el slot actual, dado por la variable `slot_counter`, que controla cual es el slot en el instante de tiempo actual. De esta manera, se programa un evento tipo `QUERY_RESPONSE` para el siguiente slot temporal que se pasa a detallar su funcionamiento a continuación.

- **QUERY\_RESPONSE:** Este mensaje se trata con el método `queryResponse()` que se explicará a continuación. Para comenzar, en dicho método se comprueba si en la lista `selected_slots` existen elementos o slots elegidos por los tags para transmitir. Solo en caso de no estar vacía dicha lista, se inicializa a 0 la variable `contending_tags`, la cual indica si hay una contienda entre 2 o más tags que quieren identificarse en el mismo slot, cuyo valor sería mayor que 1, o no hay ninguna contienda, cuyo valor sería 0 o 1. El valor de la variable `slot_counter` se actualiza con el primer slot de la lista `selected_slots`, el cual indica el slot actual que se está procesando. Además, dicho elemento o slot se extrae de la lista. Una vez realizado este paso, se comprueba el área de cobertura recorriendo uno por uno los elementos de la lista `coverage_area` de la cinta que toque para comprobar qué tags de esa lista tienen como valor de la variable `selected_slot` el mismo valor que la variable `slot_counter`. Es decir, este paso comprueba que tags de la zona de cobertura han escogido el slot actual que se está procesando para identificarse. El valor de la variable `contending_tags` al finalizar este método tendrá el número de tags que desean transmitir en el slot actual. Una vez se comprueba qué tags de la zona de cobertura desean identificarse en el slot actual se analiza el valor de la variable `contending_tags` para comprobar si existe o no colisión, o si, por el contrario, realmente ningún tag desea identificarse. Si el valor de la variable `contending_tags` es 0, quiere decir que ningún tag desea identificarse en el

slot actual, por lo que se pasa al slot siguiente, es decir, se ejecuta el método `nextSlot()`. Si el valor de la variable `contending_tags` es 1 y al tag todavía no le ha dado tiempo a salir de la zona de cobertura, quiere decir que únicamente ese tag se identificará exitosamente. En este caso, el valor de la variable `identified` de dicho tag se pone a `true` y el valor de la variable `selected_slot` se pone a 0 para que dicho tag ya no se tenga en cuenta en la identificación.

También se programa un evento mediante un mensaje del tipo `END_ID_PACKET`.

Este evento tendrá como nombre `end id slot`, en caso de que la identificación se haya realizado con éxito o si no tendrá el nombre `end contention slot`, en el caso de que la identificación no se haya podido realizar con éxito debido a una colisión entre dos o más tags que desean identificarse. De esta manera, en caso de que el valor de la variable `contending_tags` sea mayor que 1, quiere decir que ha existido una colisión entre dos o más tags. En este caso se programa un evento mediante un mensaje del tipo `END_ID_PACKET` indicando que la identificación no se ha realizado con éxito, para el cual el evento tendría de nombre `end id slot`, o indicando que la identificación no se ha realizado con éxito debido a una colisión, para el cual el evento tendría de nombre `end contention slot`.

Una vez llegado al evento tipo `end id slot`, lo que querrá decir que se ha realizado la identificación con éxito, se ejecutará, mirando el método `handleMessage()`, el método `endOfIdPacket()`, el cual simplemente ejecuta el método `nextSlot()` para avanzar al siguiente slot en la simulación. Si por el contrario, se llega a un evento tipo `end contention slot`, lo que quiere decir es que la identificación no se ha realizado con éxito debido a alguna colisión, por lo que también se ejecutará, mirando el método `handleMessage()`, el método `endOfIdPacket()`, el cual simplemente ejecuta el método `nextSlot()` para avanzar al siguiente slot en la simulación.

- **BATCH:** Este es un mensaje que se va encolando periódicamente para extraer datos estadísticos. Llama al método `newBatch()` y principalmente evalúa las pérdidas del sistema y reúne datos de interés. El periodo de cada lote lo podemos configurar mediante la variable `batch_time` y el número de lotes (batches) lo podemos limitar mediante una variable denominada `max_iterations` en el fichero de configuración `omnet.ini`.

Los mensajes anteriormente explicados pueden ir asociados a una cinta transportadora o a la otra, en el código se denota con el número de cinta que estamos tratando al final del nombre del mensaje.

Todos estos mensajes se irán repitiendo a lo largo de la simulación. Dependiendo de los valores de los parámetros del sistema (parámetro `Q` que representa el tamaño de cada trama, velocidad, `tags_per_load`, tiempos de slot del protocolo FSA, etc) se producirán más o menos colisiones en la zona de cobertura, por lo que dependerá de estos parámetros que al final de la simulación hayan más o menos tags sin identificar.

Es importante destacar que por el funcionamiento teórico de este algoritmo, cada vez que termina un mensaje `FRAME_START` en un lector, empezará el `FRAME_START` asociado al otro lector, y así lo hará sucesivamente hasta que acabe la simulación.

### 3.5.2 DFSA N-Slotted Scheduling

Una vez que se ha explicado en profundidad el funcionamiento de nuestro simulador, a continuación se expondrán razonadamente los cambios que se pueden introducir en este sistema y qué mejoras aporta.

Tras evaluar el sistema BFSA Frame Scheduling se ha optado por variar el protocolo con el que los reader tratan a sus tags. En algunas ocasiones el lector no conoce el número de tags que están compitiendo, para ajustar el tamaño de trama de forma óptima. La solución normalmente consiste en utilizar algún mecanismo para estimar el número de tags compitiendo. En este escenario se simulará el heurístico utilizado por el protocolo EPC Gen 2 cuyo algoritmo se muestra en la siguiente figura:

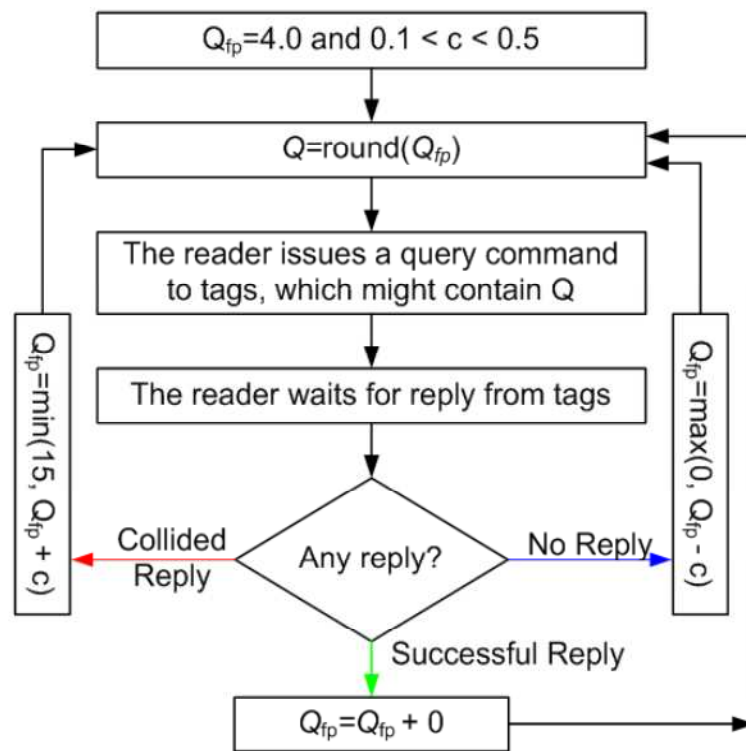


Figura 44: Adaptive Q algorithm en Gen-2 protocol.

La variante fundamental con este algoritmo es que se utilizan tres parámetros para controlar el tamaño de cada trama:  $Q$ ,  $Q_{fp}$  y  $c$ . Con estas variables podemos ir controlando tanto el tamaño de la trama de cada reader como la velocidad con la que queremos que cada trama pueda cambiar de tamaño. El tamaño de trama en cada ciclo se establece como  $K=2^Q$ , por tanto sólo se utilizan tamaños potencia de dos (Lo mismo que pasaba con BFSA).

Gen-2 diseña un algoritmo de  $Q$  adaptativa para ajustar el tamaño de trama dinámicamente de acuerdo a la lógica ilustrada en la figura de arriba. En este diagrama de flujo, la variable  $Q_{fp}$  es un valor auxiliar de  $Q$  para ir representando los valores intermedios que puede ir tomando

nuestra trama. El valor de  $Q$  es determinado en base al entero más próximo de  $Q_{fp}$ . Las variaciones que puede sufrir  $Q_{fp}$  se detallan a continuación:

- **Respuesta con colisión:** Esto significa que más de un tag ha seleccionado la ranura temporal actual y hay colisión. Una vez detectada se incrementa la variable  $c$ . Tras esta operación comprobamos que  $Q_{fp}$  no supere el límite superior de nuestro algoritmo, que en este caso será de 15. El valor de  $Q$  será el entero más cercano a  $Q_{fp}$ . Esto se hace con la operación  $Q = \text{round}(Q_{fp})$ .
- **Sin respuesta (El canal está inactivo):** Esto significa que ningún canal ha elegido esta ranura y  $Q_{fp}$  es decrementada por  $c$ . Tras esta operación, si  $Q_{fp}$  es negativo, se deja a  $Q_{fp}$  con el valor mínimo de 0. Tras esto actualizamos el valor de  $Q$  con  $Q = \text{round}(Q_{fp})$ .
- **Respuesta con éxito:** Esto significa que solo un tag quiere transmitir en esta ranura temporal. Tanto  $Q_{fp}$  como  $Q$  permanecen con el mismo valor.

El valor inicial de  $Q$  ( $Q_0$ ) suele ser 4, y los valores más comunes para  $c$  suelen estar en el rango (0.1, 0.5). De acuerdo a este algoritmo  $Q$  siempre será un valor entero entre 0 y 15 en todo momento. Como  $c$  es menos que 1, hay tres posibilidades tras cada actualización del tamaño de trama:  $Q$  se incrementa en 1,  $Q$  se decrementa en 1 o su valor no varía.

## PROBLEMÁTICA Y SOLUCIONES ADOPTADAS

Una primera implementación básica de este algoritmo ha dado unos resultados peores a los obtenidos por el algoritmo BFS Frame Scheduling. Se revisó en detalle el funcionamiento de este algoritmo en nuestro sistema para poder mejorar su rendimiento a partir de algunas modificaciones.

El principal problema encontrado en este algoritmo es que el tamaño de trama de cada Reader no converge a su tamaño de trama óptimo, esto es debido principalmente a que en este sistema los tags son móviles y permanecen un tiempo finito en nuestro sistema para poder ser leídos, haciendo que, aparte de que hayan las colisiones esperadas, alguno de los tags salen del sistema antes de que terminen de ser identificados. La trama va variando según las condiciones de carga del sistema pero no es capaz de adaptarse convenientemente para determinadas situaciones.

Cada trama puede tener un valor de  $Q$  que va de 0 a 15, por lo tanto cada Reader puede disponer de  $K=2^0$  a  $K=2^{15}$  slots temporales. Cada cierto tiempo entran a nuestro sistema un nuevo lote de tags que distribuyen en cada cinta un número determinado de tags a una determinada densidad (en tags por metro). Nuestro simulador no es capaz de adaptarse al tamaño de trama óptimo antes de que los tags se vayan del sistema, por lo que durante ciertos periodos de tiempo, gran parte de las pérdidas se deben a que la  $Q$  no es óptima para esa carga y está sufriendo un proceso de adaptación del tamaño.

Se consigue una mejora sustancial de los resultados limitando el tamaño inferior que puede tener  $Q$ , de esta forma se consigue que la trama no se haga demasiado pequeña y los cambios en  $Q$  se hacen antes para adaptarse a la carga actual.

Un primer cambio adoptado en el algoritmo del simulador ha sido limitar el tamaño inferior de cada Reader a 4. El tamaño de cada trama sigue variando de acuerdo al algoritmo original pero tiene una cota inferior para el valor mínimo de Q. Se ha optado por la utilización de este valor porque estudiando todas las cargas entrantes al sistema para diferentes tamaños de trama se llega a la conclusión de que un valor más pequeño de Q no mejora las pérdidas del sistema y en cambio sí que reduce los cambios que tiene que hacer Q cuando hay colisiones.

Hemos estudiado diferentes variantes de este algoritmo DFSA y se ha estudiado más en profundidad el que teóricamente nos aporta unos mejores resultados. Estas son las variantes que podemos introducir:

**Caso 1)** La primera solución adoptada ha sido hacer funcionar a cada lector un periodo de tiempo que coincide con el tamaño de la trama que asignemos a cada lector. Se van intercambiando periodos de lectura y no se interrumpe a cada lector a mitad de cada trama.

Tanto  $Q_1$  como  $Q_2$  siguen con los valores que tenían cuando se interrumpió su trama. Este algoritmo es poco eficiente porque cuando se reanuda el proceso de lectura en un lector el tamaño de trama no es el óptimo y se producen muchas colisiones. El algoritmo no es eficiente aumentando mucho las pérdidas sobre todo en la reanudación de cada proceso de lectura.

**Caso 2)** Otra mejora consiste en que se cada lector pasa el turno de lectura cuando cambie el tamaño de su trama. Este algoritmo tampoco es eficiente porque puede haber ciclos en los que un tamaño de trama funcione bien en un lector y el otro tenga que estar esperando a su turno un elevado tiempo. Cuando le toque el turno al otro lector puede ser que tenga un alto número de tags perdidos o un alto número de tags sin identificar en su zona de cobertura.

**Caso 3)** Se le ha introducido un funcionamiento en el que cada lector trabaja en ciclos de lectura determinado por grupos de slots configurables por el usuario. Se pueden hacer ciclos de lectura muy cortos (un slot de lectura para cada lector) o muy largos (intervalos de lectura en cada Reader de muchos slots). Lo que nos da este algoritmo es la capacidad de poder repartir el tiempo de lectura de cada parte del sistema adaptándose a diferentes carga y condiciones (velocidad de cada cinta, áreas de cobertura, repartos asimétricos de recursos, etc...). Otra ventaja de este algoritmo es que podemos hacer ciclos cortos de lectura para dar cobertura a todos los tags y que no abandone ninguno nuestro sistema sin que pase por este algoritmo de identificación.

Lo bueno de esta forma de reparto de recursos junto al límite inferior del tamaño de Q es que se disminuyen los cambios bruscos del tamaño óptimo de cada trama y cada Reader puede presentar mejorar resultados a condiciones más adversas.

Antes de este reparto de recursos se había optado por hacer un scheduling similar pero haciendo una división del tiempo disponible para para Reader, este reparto presenta mejores resultados debido a que no se deja interrumpen slots temporales a mitad de un ciclo de lectura.

Se ha estudiado más en profundidad este tercer caso debido a que presenta las siguientes ventajas con respecto a BFSA Frame Scheduling:

- Tamaño de trama dinámico que se adapta a cada carga del sistema, no es necesario que el usuario introduzca la configuración óptima para el tamaño de trama de cada lector.
- Presenta unas pérdidas menores que el BFSA Frame Scheduling para las diferentes cargas del sistema.
- Presenta grandes mejoras en el estudio de cargas asimétricas para cada cinta introduciendo nuevas variables de estudio.

Los cambios en el código para implementar este algoritmo se realizan principalmente en los mensajes FRAME\_START, NEXT\_SLOT y QUERY\_RESPONSE. La forma de entrar los tags al sistema y su distribución en la cinta es la misma que en el caso de BFSA.

El principal cambio en FRAME\_START y NEXT\_SLOT es la introducción del algoritmo DFSA explicado anteriormente para que la trama sea de un tamaño variable. También se ha hecho un bucle para que el tamaño de los intervalos de lectura de cada Reader pueda ser configurado desde omnet.ini. En el funcionamiento del programa, ahora surgen nuevas combinaciones de llegada de mensajes que serán tratadas correctamente cuando toque (ahora es posible que a mitad del proceso de lectura de un reader el otro lector quiera empezar una trama nueva, por ejemplo). También se ha modificado la forma de pasar cada slot temporal, antes se podía dejar pasar el tiempo equivalente a un número de slots inactivos para agilizar los mensajes, ahora hay que ir

En el mensaje QUERY\_RESPONSE, los principales cambios son la modificación del tamaño de trama para según qué respuesta (colisión, no hay respuesta o la identificación ha sido correcta), la forma de pasar el contador de slots y la limitación del tamaño mínimo de cada trama para mejorar los resultados al utilizar este algoritmo.

A este algoritmo se le ha denominado **DFSA N-Slotted Scheduling** por su forma de funcionamiento. Posteriormente se podrán ver detallados los resultados del estudio de este algoritmo.



### 3.5.3 BFSA N-Slotted Scheduling

Dados los buenos resultados del DFSA N-slotted Scheduling se ha procedido a estudiar una variable del primer sistema BFSA Frame Scheduling con las mejoras que hemos introducido en el anterior algoritmo.

En este caso, ambos lectores tendrán un tamaño de trama fijo, configurable desde fichero omnet.ini, con el que podremos trocear cada trama en slots, y hacer que se alterne en bloques de N slots entre los Readers. Lo que conseguimos de esta manera es tener un sistema con el que podamos tener optimizado en todo momento todos los parámetros de configuración. Al tener un tiempo de funcionamiento de cada reader configurable, puede hacerse muy corto, y por tanto, se puede disminuir los tags que abandonan nuestra área de cobertura sin pasar por nuestro sistema de identificación.

En este caso, la optimización de los resultados se hace más compleja debido a que los resultados son sensibles a un mayor número de variables, ya que, aparte de las variables explicadas anteriormente, ahora hay que añadir optimizar las Q para cada lector y el intervalo de slots que permanecerá activo cada lector.

Este estudio aporta una configuración óptima del sistema si se conocen los datos de carga de nuestro simulador. Como se verá más adelante, este sistema aporta unas mejoras cuantiosas en los resultados para que merezca la pena su estudio.

La principal desventaja con respecto a DFSA N-Slotted Scheduling es que necesitamos saber la densidad de tags en cada cinta para un reparto óptimo de los recursos, en caso de que no sea así, una mala configuración nos dará unos resultados muy malos.

# Capítulo 4: SIMULACIONES Y RESULTADOS

En este capítulo se explicarán detalladamente las simulaciones realizadas por el sistema desarrollado y los resultados obtenidos. Se explicarán que parámetros se han de tener más en cuenta para cada simulación y estudio, y se concluirán los valores de los resultados obtenidos para cada caso. Los resultados se mostrarán gráficamente para ver de manera más fácil y rápida el comportamiento del sistema de identificación de tags en movimiento ante la variación de algunos de sus parámetros, como pueden ser la cantidad de tags, el tamaño de la trama, etc.

Hay que destacar que la mayoría de simulaciones y obtención de resultados se han automatizado mediante scripts escritos en lenguaje Perl para poder realizarlos y obtenerlos de manera más cómoda y rápida. Para la obtención de gráficas también se han utilizado scripts, los cuales se pasan a la aplicación para el pintado de gráficas GNUPlot. Para realizar algunas gráficas un poco más complejas nos hemos ayudado de Matlab.

Durante todo este capítulo se estudiarán los resultados obtenidos de las simulaciones mediante la demostración de gráficas y se llegarán a unas conclusiones sobre dichas la tendencia de dichas gráficas. Los parámetros estudiados en las simulaciones estarán relacionados con el número de tags no identificados en el sistema de identificación desarrollado. Es decir, el sistema deberá de realizar el recuento del número de tags identificados y no identificados que salen del área de cobertura a una velocidad dada por este último parámetro. Por tanto, como se dijo antes, el número de tags no identificados será dependiente de otros parámetros del sistema como la velocidad o el tamaño de trama que tendrá cada lector en un momento determinado. Es decir, el estudio de la cantidad de tags identificados y no identificados se realizará variando cada vez un parámetro como puede ser el parámetro de longitud de trama Q de cada lector otros parámetros que se explicará en cada apartado.

## 4.1 El Tag Loss Ratio (TLR)

La medida más importante que se ha estudiado en este proyecto fin de carrera está relacionada con el número de tags no identificados y, por tanto, también con el número de tags identificados exitosamente. Este parámetro se le conoce como Tag Loss Ratio o TLR y es el resultado de la división entre el número total de tags que han salido del sistema sin identificar, es decir, el número total de tags que han salido del área de cobertura sin identificar entre el número total de tags que han salido del sistema, es decir, el número total de tags que han salido del área de cobertura. De esta manera, el TLR representa la media de tags sin identificar en el sistema durante toda la simulación mediante su media aritmética.

Es decir, se calculará el Tag Loss Ratio o TLR mediante la expresión matemática siguiente:

$$\text{TLR} = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ de tags sin id}}{\text{N}^{\circ} \text{ total de tags}}$$

Dentro del código C++ desarrollado para el sistema se conoce a un tag no identificado como un tag que tiene su variable booleana `identified` con el valor `false`.

Además, se utilizará la variable `unidentified_tags` para tener un control en el código de los tags sin identificar o tags que salen sin identificar de la zona de cobertura. Por otra parte, se utilizará la variable `outgoing_tag_counter` para tener un control de los tags totales que salen del sistema, es decir, número total de tags que salen de la zona de cobertura. De esta manera se calculará el TLR utilizando la variable TLR y asignándole el resultado de la división entre la variable `unidentified_tags` y la variable `outgoing_tag_counter`.

Cada una de estas variables tiene otra variable homónima para cuantificar los datos de cada cinta y vendrán identificadas por su número de cinta al final del nombre de la variable.

## 4.2 BFSA Frame Scheduling

En este apartado se realizará el cálculo del número de tags sin identificar y del Tag Loss Ratio o TLR para un reparto de recurso en el que cada cinta trabaja con el protocolo BFSA Frame Scheduling explicado anteriormente. Además de dicho cálculo se representará gráficamente el TLR obtenido mediante la aplicación para dibujar gráficas GNUPlot. De esta manera, se comprobará el comportamiento de dicho TLR para los parámetros más influyentes, como la velocidad de desplazamiento de los tags o el parámetro Q del protocolo FSA. A continuación se listan los estudios realizados en este apartado para la distribución simétrica de tags en cada cinta y se explican a continuación en distintos subapartados:

- Cálculo y representación del TLR frente a Q para diferentes valores de carga al sistema.
- Cálculo y representación del Q óptimo frente a la variación del parámetro densidad de tags por cinta.
- Cálculo y representación del TLR óptimo frente a la variación del parámetro densidad de tags por cinta.

### **Cálculo y representación del TLR frente a Q para diferentes valores de carga al sistema.**

El objetivo de este apartado es conocer el TLR o Tag Loss Ratio (proporción de tags perdidos o no identificados). En concreto se quiere conocer la evolución del TLR en función del parámetro Q, que representa el tamaño de trama, y mostrarlo para diferentes densidades de tags en cada cinta con el objetivo de conocer cuál es su comportamiento. Una vez conseguido estos objetivos se podrá tener la suficiente información como para elegir el parámetro Q que nos proporcione un tamaño de trama adecuado para conseguir una baja proporción de tags sin identificar a la salida del sistema o TLR. Para alcanzar estos objetivos se mantendrán

siempre fijos los siguientes parámetros del sistema, cabe destacar que la distribución de los parámetros en cada cinta es simétrica:

- Longitud del área de carga de cada cinta: 1 metro.
- Longitud del área de cobertura de cada cinta: 2 metros.
- Velocidad de cada cinta transportadora: 1 m/s
- Tiempo para los slots inactivos: 2 ms.
- Tiempo para slots con colisión: 2 ms.
- Tiempo slots con leído con éxito: 4 ms.
- Tiempo de activación de cada lector: 2 ms.
- Máximo error permitido: 0.005
- Parámetro Q o tamaño de trama para cada lector: entre 1 y 10.
- Densidad de tags por cinta: Se han obtenido resultados para densidades de 10 a 200 tag por metro en intervalos ascendentes de 10 tag/m

A continuación se expone los resultados de un conjunto de muestras significativas:

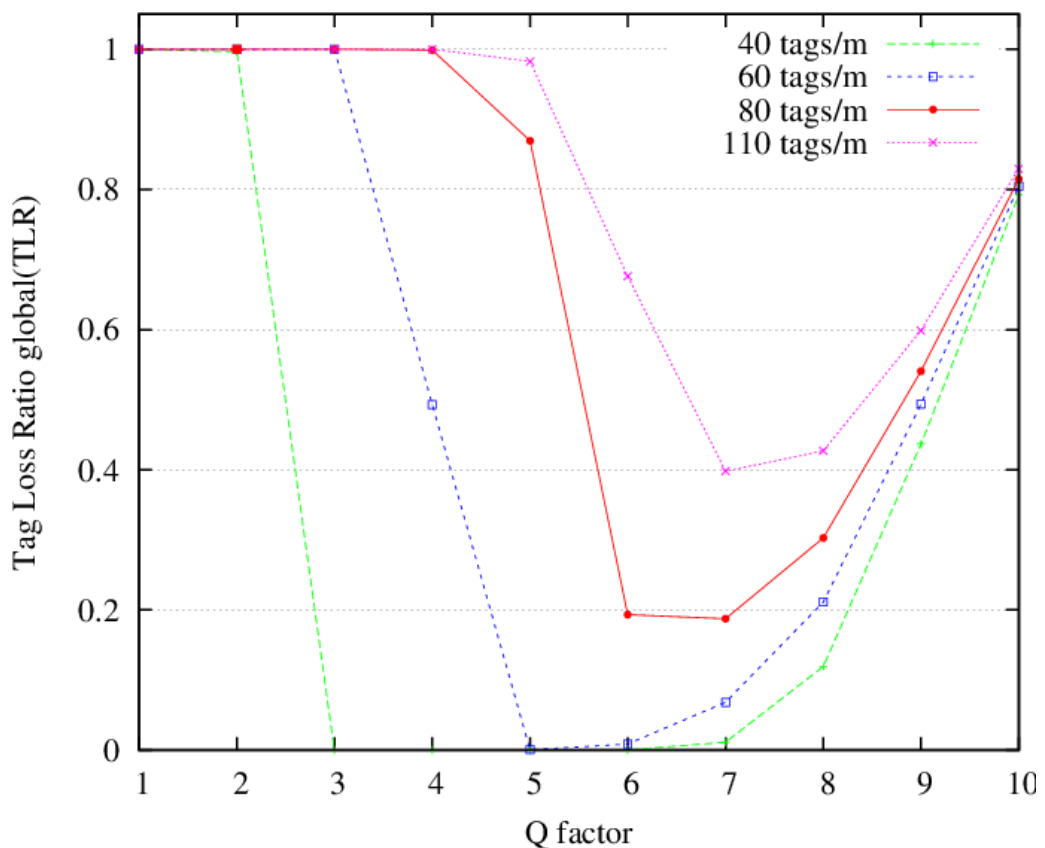


Figura 45: Evolución del TLR frente a Q para diferentes cargas al sistema

Para la obtención de esta gráfica se han automatizado diferentes simulaciones por medio de scripts en PERL que nos han facilitado los resultados en ficheros con extensión .dat. Gracias a esto, los ficheros de resultados obtenidos se mostrarán conjuntamente en una gráfica con el programa de libre distribución GNUPlot.

Según esta gráfica, el tamaño de trama (el parámetro Q) influye en el TLR. A simple vista todas las curvas tienen en común un intervalo de valores del parámetro Q en el que el TLR deja de ser 1 y baja a valores iguales a cero o cercanos. El tamaño de este intervalo depende de la densidad de tags por cinta y de la velocidad, siendo mayor cuanto menor es el valor de ambos parámetros. La forma de las curvas obtenidas se podría explicar de la siguiente manera: estableciendo un valor de Q demasiado pequeño, se tendrá un tamaño de trama pequeño y, como consecuencia, habrá tantas colisiones entre los tags que el sistema no tendrá tiempo suficiente para identificar a muchos tags, por lo que habrá una proporción muy grande de tags que salen de la zona de cobertura sin ser identificados, obteniendo un TLR elevado. Por otro lado, si se establece un valor del parámetro Q demasiado alto, el tamaño de trama será muy elevado provocando, de esta manera, que los tiempos asignados a los tags aún no identificados sean demasiado elevados y dichos tags se escapen de la zona de cobertura como no identificados, obteniendo un TLR elevado. Hay que aclarar que a cada tag no identificado se le asigna un número aleatorio de slots, comprendido entre 0 y  $2^Q$  slots, el cual indica el tiempo que tendrán que esperar antes de solicitar su identificación. Se considera una colisión cuando a dos o más tags se les asigna el mismo número aleatorio.

Como se puede observar en la gráfica, el valor del TLR varía cuando cambia el tamaño de trama de cada lector. A cada carga introducida en el sistema hay una serie de valores de Q que hacen que las pérdidas sean mínimas, a estos valores de Q los llamaremos  $Q_{opt}$  (tamaños de trama óptimos). Si hay más de un valor mínimo de TLR para una determinada carga, el valor de  $Q_{opt}$  tendrá más de un valor que nos dará unas pérdidas mínimas.

A partir de unas pérdidas de 0.2 consideraremos que los resultados son lo suficientemente malos para implementar este mecanismo a un sistema real. Buscamos optimizar el mayor número de densidad de tags con unas pérdidas lo más pequeñas posible.

### **Cálculo y representación del Q óptimo frente a la variación del parámetro densidad de tags por cinta.**

El objetivo en este apartado es el de conocer el Q óptimo, definido este como el valor de Q con el que se consigue el mínimo TLR para cada configuración del sistema. En concreto se obtendrá el Q óptimo en función de la densidad de tags entrante en cada cinta. Además, posteriormente se obtendrá su correspondiente TLR óptimo en función de la densidad de tags por cinta.

Los resultados de este apartado se obtendrán a partir de los ficheros de resultados de las simulaciones del apartado anterior. Dentro de los ficheros .dat de nuestras simulaciones se ha almacenado los valores de TLR cuando se variaba tanto la carga al sistema como el tamaño de trama de cada lector. El objetivo de este apartado es ofrecer una gráfica en la que visualmente se vea la evolución del tamaño de trama y que nos dé una gráfica que nos

permita configurar rápidamente el tamaño de cada trama para obtener unas pérdidas mínimas sabiendo la carga de entrada de cada cinta.

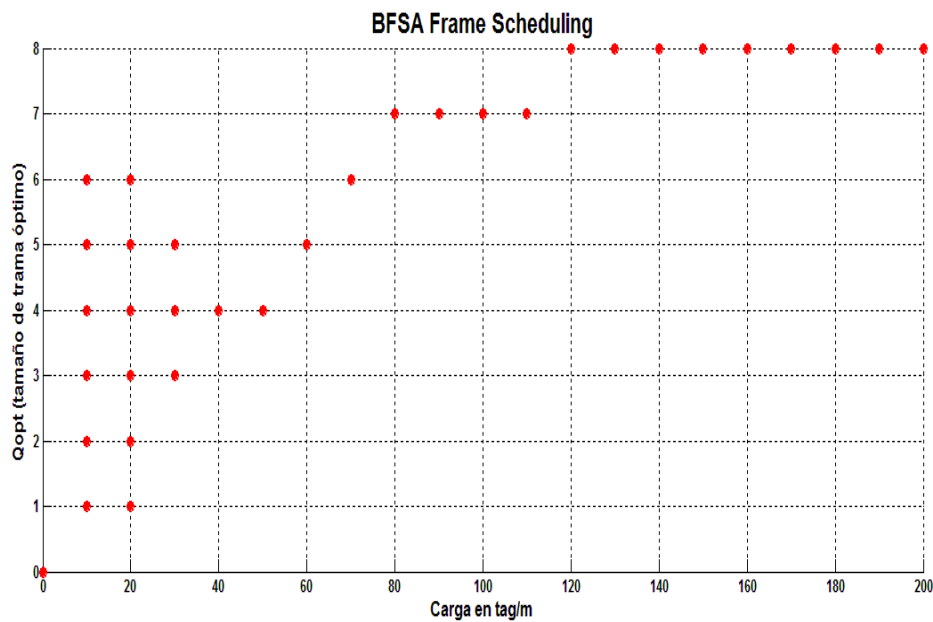


Figura 46: Representación de  $Q_{opt}$  frente a la carga del sistema en tag/m

En esta gráfica se observa que hay más de un valor de  $Q_{opt}$  para algunas cargas, esto ocurre cuando para diferentes configuraciones del tamaño de cada trama el TLR se hace cero. En caso de que se pueda elegir libremente el tamaño de trama es aconsejable escoger el mayor de ellos, debido a que se adaptará mejor a cambios de la carga que entre al sistema y minimizará los intercambios de tiempo de lectura que realizan los Readers (se hace funcionar a cada lector un periodo de tiempo que coincide con el tamaño de la trama que asignemos a cada lector, no se interrumpe a cada lector a mitad de una trama).

Por último y para concluir este apartado, el parámetro  $Q$  óptimo o longitud de trama óptima tiende a aumentar conforme aumenta la densidad de tags.

### **Cálculo y representación del TLR óptimo frente a la variación del parámetro densidad de tags por cinta.**

El objetivo de este apartado es conocer el TLR óptimo para las diferentes cargas que se introduzcan en nuestro sistema. El  $TLR_{opt}$  es el mínimo TLR de entre todas las configuraciones disponibles para una misma carga. En este caso, la variable más sensible de nuestro sistema a estos cambios es el tamaño de trama de cada lector.

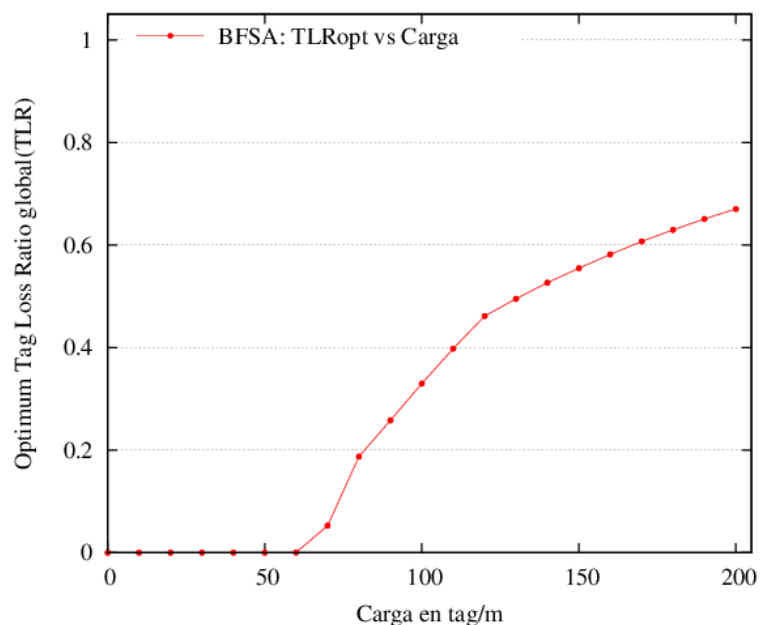


Figura 47: Representación del  $TLR_{opt}$  frente a la carga del sistema en tag/m

En esta gráfica se observa una evolución ascendente de las pérdidas. Se logra mantener un TLR igual a cero hasta una densidad de 60 tags por metro en cada cinta. A partir de ahí las pérdidas se van haciendo más grandes con una evolución ascendente del TLR.

De esta gráfica concluimos que el régimen de trabajo óptimo del algoritmo BFSa Frame Scheduling es para una carga de trabajo entre 0 y 60 tags por metro. En esa franja tenemos un buen funcionamiento del sistema sin que hayan pérdidas, a partir de ahí las pérdidas se disparan. Cuando la carga sobrepasa los 80 tags/m en cada cinta, el  $TLR_{opt}$  sobrepasa el 20%, lo que hace la utilización de este sistema no aconsejable a partir de esa carga.

### 4.3 DFSA N-Slotted Scheduling

Con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos con el algoritmo BFSa Frame Scheduling surge la idea de utilizar el algoritmo DFSA N-Slotted Scheduling, este protocolo puede darnos libertad a la hora de introducir diferentes cargas a nuestro sistema y puede simplificar la elección de los diferentes parámetros de simulación.

Para la obtención de los resultados de este apartado también se han utilizados diferentes scripts en PERL y la potencia de representación de datos que nos presta GNUPlot. En este apartado sigue siendo el TLR el parámetro más relevante a estudiar.

Anteriormente se han explicado en profundidad los cambios que se le han realizado al algoritmo original DFSA para adaptarlo a nuestro sistema y reducir las pérdidas. A continuación se expondrán las siguientes simulaciones estudiadas:

- Cálculo y representación del TLR frente a la carga introducida al sistema para diferentes valores del parámetro  $c$ .
- Cálculo y representación del TLR frente a la carga introducida a cada cinta transportadora para diferentes intervalos de slots.
- Comparación del rendimiento de DFSA N-Slotted Scheduling frente a BFSA Frame Scheduling.

Para entender bien este apartado es recomendable recordar la explicación que se hizo en esta memoria del algoritmo DFSA N-Slotted Scheduling. Los principales parámetros de los que dependía este algoritmo era de:

- $Q$ : Es el tamaño de trama de cada lector.
- $Q_{fp}$ : Es el tamaño intermedio que va tomando el tamaño de cada trama.
- $c$ : Es un parámetro que está acotado entre  $[0.1, 0.5]$  y nos modificará la velocidad a la que el sistema varía el tamaño de su trama.

### **Cálculo y representación del TLR frente a la carga introducida al sistema para diferentes valores del parámetro $c$ .**

En este apartado se justificará la elección de un determinado valor del parámetro  $c$  para las posteriores simulaciones y evaluaciones.

Los parámetros relevantes de esta simulación son las siguientes:

- Longitud del área de carga de cada cinta: 1 metro.
- Longitud del área de cobertura de cada cinta: 2 metros.
- Velocidad de cada cinta transportadora: 1 m/s
- Tiempo para los slots inactivos: 2 ms.
- Tiempo para slots con colisión: 2 ms.
- Tiempo slots con leído con éxito: 4 ms.
- Tiempo de activación de cada lector: 2 ms.
- Máximo error permitido: 0.005.
- Tamaño de trama mínimo para cada lector:  $Q = 4$ .
- Intervalos de slots de lectura en cada Reader: 1 slot.
- Densidad de tags por cinta: Se han obtenido resultados para densidades de 10 a 200 tag/m en intervalos ascendentes de 10 tag/m



La gráfica resultante de estos parámetros de configuración es la siguiente:

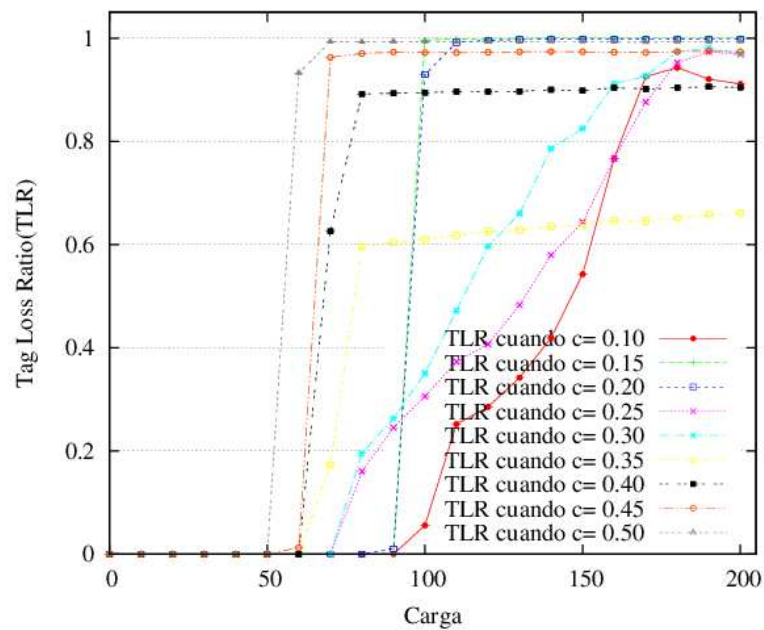


Figura 48: TLR frente a carga para diferentes valores del parámetro c.

Se observa que los mejores resultados se obtienen cuando utilizamos el menor de los valores posibles para c (en este caso  $c=0.1$ ). A partir de esta gráfica, la elección del mejor valor de c no deja dudas, en el caso de que queramos las pérdidas mínimas hay que utilizar el valor de  $c=0.1$  para una densidad de carga en cada cinta entre 0 y 160 tags/m. A partir de 160 tags/m se obtienen mejores resultados con  $c=0.35$  pero conviene recordar que estos valores son lo suficientemente malos para que este sistema no tenga mucha utilidad en esas condiciones (las pérdidas superan el 60% de las muestras).

Conviene también comentar que en este protocolo, el TLR obtenido para cada caso es siempre el óptimo, ya que cada trama variará su tamaño de forma automática por el sistema para adaptarse a las condiciones de cada situación.

### **Cálculo y representación del TLR frente a la carga introducida a cada cinta transportadora para diferentes intervalos de slots.**

A partir de la gráfica del apartado anterior se deduce que nos interesa quedarnos con la gráfica de  $c=0.10$ . Como este sistema puede trabajar con diferentes intervalos de slots de lectura en cada Reader, se va a estudiar qué ocurre cuando cambiamos estos intervalos de slots con una carga simétrica en cada cinta.

Las condiciones de simulación serían parecidas a las del apartado anterior aunque en esta ocasión se añade un barrido con la variable que distribuye los intervalos de slots que puede utilizar cada Reader y se fija el parámetro c con un valor de 0.1 en cada lector.

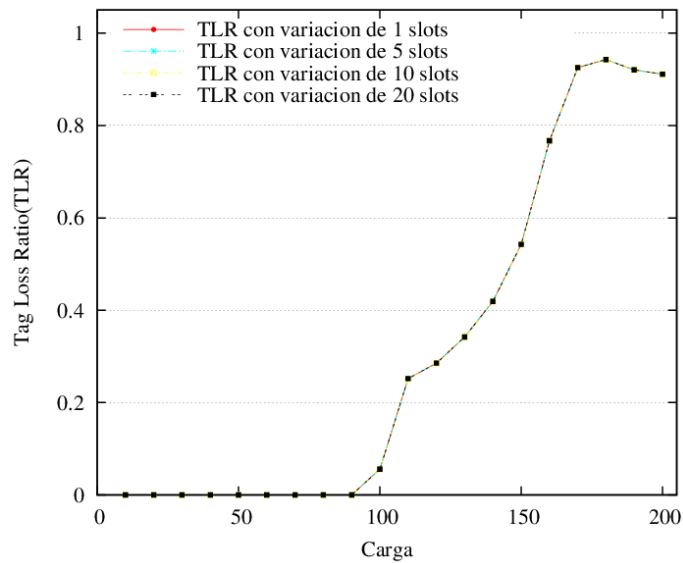


Figura 49: TLR frente a Carga para diferentes intervalos de lectura.

De esta gráfica se deduce que en este caso al variar los slots no varían las pérdidas del sistema. Esto es debido a que las cargas introducidas a cada cinta son las mismas y por tanto los resultados son los mismos. Este parámetro será muy importante cuando queramos reducir las pérdidas en un sistema con cargas asimétricas (como se verá más adelante).

### Comparación del rendimiento de DFSA N-Slotted Scheduling frente a BFSA Frame Scheduling.

Este apartado tiene el objetivo de evaluar la mejoría del cambio de protocolo de comunicación entre los readers y comentar las principales ventajas e inconvenientes que aporta cada uno.

A continuación exponemos ambas gráficas de forma conjunta:

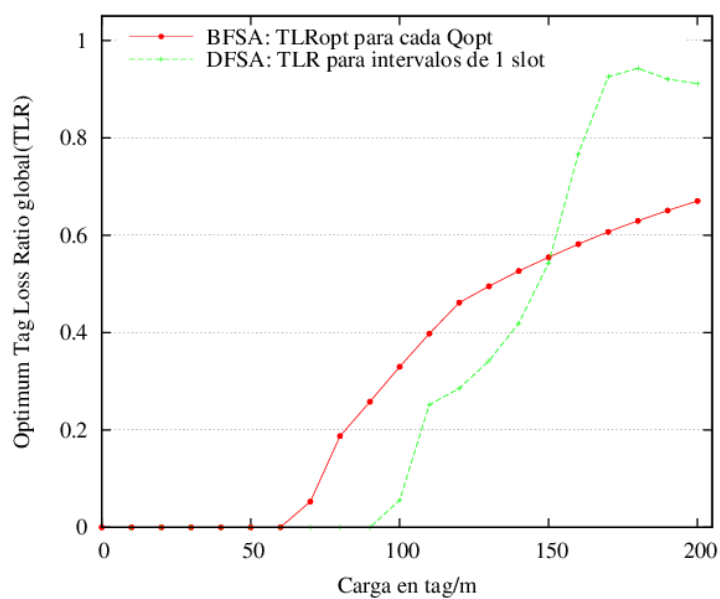


Figura 50: TLR frente a Carga en BFSA y DFSA.

El cambio de algoritmo de BFSa a DFSa nos ha aportado una mejora del funcionamiento de nuestro sistema. Se ha aumentado el régimen de trabajo sin pérdidas ya que se ha pasado de poder llegar hasta a una densidad de 60 tags/m a poder alcanzar una densidad de 90 tags/m, esto supone una mejora del 50% de la carga a nuestro sistema. Aunque el sistema BFSa implementado nos ofrece mejores resultados a partir de 150 tags/m, estos valores están muy por encima de lo exigible a un sistema de este tipo y ambos protocolos ofrecen resultados demasiado malos en esas condiciones.

La principal mejora de los resultados de este algoritmo se debe a los ciclos cortos de lectura, de esta manera se le da mayor cobertura a todos los tags de ambas cintas y hace que sea más difícil que un tag abandone nuestro sistema sin que pase por el algoritmo de identificación de su reader.

DFSa no solo aporta esas mejoras en los resultados de TLR, sino que con la utilización de nuestro este algoritmo se gana también en facilidad de configuración, ahora no hace falta estudiar cada carga del sistema y configurar los diferentes parámetros de configuración para obtener las pérdidas mínimas, el sistema por sí mismo irá cambiando sus parámetros relevantes y se irá adaptando a sus necesidades. Con la misma configuración, este algoritmo ofrece mejores resultados a cargas escalables.

El inconveniente que tiene la implementación DFSa N-Slotted Scheduling es que todavía es un sistema mejorable, ya que, aunque hemos reducido mucho las pérdidas, el tamaño de trama no termina de converger en todo momento al tamaño de trama óptimo debido al tiempo finito que los tags están en la zona de cobertura, por lo que este algoritmo sigue teniendo margen de mejora. Otro inconveniente es que al aumentar el número de intervalos que intercambia cada lector para su proceso de lectura, se aumenta la probabilidad de error en la comunicación entre Readers.

## 4.4 BFSa N-Slotted Scheduling

El objetivo de utilizar este algoritmo es aunar las ventajas de los otros dos algoritmos estudiados. Se puede aprovechar la ventaja que supone que cada lector funcione durante cortos periodos de tiempo para reducir el número de tags que pasan por su zona de cobertura sin identificar. Además, conociendo la carga que hay en cada cinta se puede configurar los parámetros del sistema para que todos tengan un valor óptimo en todo momento.

En este caso se hace un tamaño de trama fijo y se hace el scheduling como en el caso del DFSa N-Slotted Scheduling, es decir, se puede configurar los intervalos de lectura de cada Reader (en slots), ambos Readers pueden tener diferentes valores en este parámetro para adaptarse a cargas asimétricas. El principal caso de estudio en este caso será el siguiente:

- Cálculo y representación del  $TLR_{opt}$  frente a la carga introducida a cada cinta transportadora.

## Cálculo y representación del $TLR_{opt}$ frente a la carga introducida a cada cinta transportadora

Para este cálculo, dada una carga determinada entrante a nuestro sistema se han ido fijando diferentes parámetros de configuración (como el tamaño de cada trama o el número de slots) y se han ido escogiendo los resultados con el  $TLR$  mínimo.

El cálculo en este caso también se ha hecho mediante scripts en PERL y la representación se ha realizado en GNUPlot. Los parámetros de simulación relevantes son los siguientes:

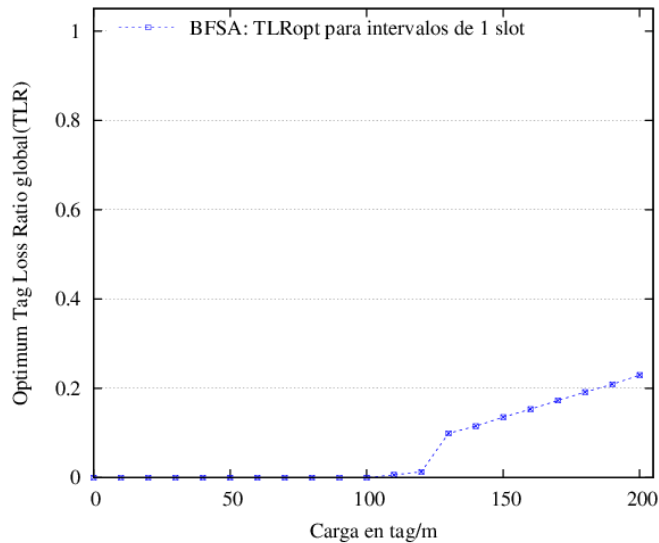


Figura 51:  $TLR_{opt}$  frente a la Carga para intervalos de 1 slot entre readers.

Se puede observar a partir de la gráfica que se han obtenido unos resultados bastante positivos. La perfecta adaptación de los parámetros de configuración de nuestro sistema a cada carga y los cortos periodos de lectura de cada Reader han hecho que el  $TLR_{opt}$  para cada carga sea pequeño. Se consigue un funcionamiento perfecto (sin pérdidas) hasta los 100 tags/m, pero incluso a 110 y 120 tags/m las pérdidas son tan pequeñas que en algunos casos se podrían considerar casi nulas (para 110 tags/m el  $TLR$  vale 0.00611842 y para el caso de 120 tags/m el  $TLR$  vale 0.0128216).

El principal inconveniente de utilizar este protocolo es que hay que conocer la carga de nuestro sistema para poder optimizarlo de forma adecuada y que para cada carga el valor del  $TLR$  no se puede obtener de forma inmediata, sino que tiene que pasar por un proceso de optimización que nos diga el mejor tamaño de trama.

Cabe destacar que en este caso también hay tamaños de trama óptimos para cada carga, pero en algunos casos estos no coinciden con los de BFS Frame Scheduling debido al diferente funcionamiento de cada sistema.

## 4.5 COMPARATIVA DE LOS 3 MÉTODOS

En este apartado se hará una comparativa del rendimiento de los tres protocolos estudiados hasta ahora y las características que puede ofrecer cada uno.

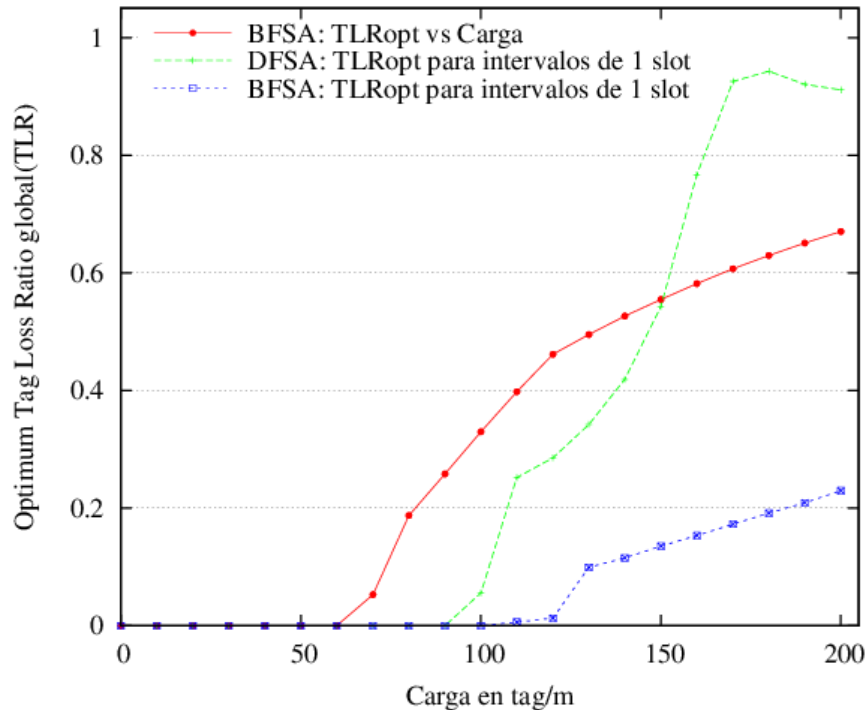


Figura 52: Comparativa algoritmos para el de reparto de recursos en un sistema RFID

En esta gráfica se observa que el rendimiento obtenido por BFSa N-Slotted Scheduling es muy superior al de los otros dos algoritmos (BFSa Frame Scheduling y DFSa N-slotted Scheduling), esto es debido a que este sistema recoge las principales virtudes de cada uno de los otros dos sistemas y las implementa de forma satisfactoria. Este algoritmo es capaz de llegar a un rendimiento de trabajo de 100 tags/m sin pérdidas, y de alcanzar los 120 tags/m con unas pérdidas muy pequeñas (para 110 tags/m el TLR vale 0.00611842 y para el caso de 120 tags/m el TLR vale 0.0128216).

No obstante cada algoritmo presenta una serie de características que pasamos a detallar a continuación:

- **BFSa Frame Scheduling:** Es el algoritmo a partir del cual ha empezado nuestro estudio, los otros dos algoritmos estudiados le han superado en rendimiento pero este sistema es una buena opción si no tenemos unas características muy exigentes o si tenemos problemas con la comunicación entre readers, ya que este algoritmo realiza menos intercambios de lectura que los otros dos.
- **DFSa N-Slotted Scheduling:** La principal mejora de este algoritmo con respecto al anterior es la mejora en los resultados debido a su funcionamiento por intervalos de slots configurables y un tamaño de trama dinámico. Aporta también una mejora en la facilidad de configuración, tiene menos parámetros que configurar y estos no varían

con cada carga, lo que le convierte en un sistema fácilmente escalable y sencillo de configurar por parte de cualquier operario. El funcionamiento de cada reader en slots configurables hará que este sistema funcione bien con cargas asimétricas como se verá más adelante.

- **BFSA N-Slotted Scheduling:** Es el sistema que mejor ha minimizado las pérdidas en nuestro estudio. Aporta los mejores resultados a costa de aumentar la complejidad de la optimización de los diferentes parámetros del sistema. La posibilidad de poder adaptar manualmente cada uno de los parámetros a cada carga y el funcionamiento de cada reader en ráfagas de slots configurables hará que este sistema también sea un buen protocolo para utilizarlo en situaciones de carga asimétrica.

## 4.6 SIMULACIONES CON CARGAS ASIMÉTRICAS

Una de las principales ventajas que ofrece el poder hacer un reparto de la carga asignando intervalos de lectura asimétricos en cada cinta es una mejor adaptación a escenarios en los que cada cinta tiene densidad de tags por metro diferente. A continuación se expondrá el proceso de optimización para este caso en el supuesto que estemos trabajando con DFSA N-Slotted Scheduling o BFSA Frame Scheduling. Las cargas elegidas para ilustrar este proceso de optimización son una cinta con carga de 60 tags/m y otra con 100 tags/m.

Hemos dividido el estudio de cargas asimétricas en los siguientes apartados:

- **DFSA N-SLOTTED SCHEDULING CON CARGA 60-100**
- **BFSA N-SLOTTED SCHEDULING CON CARGA 60-100**

### 4.6.1 DFSA N-SLOTTED SCHEDULING CON CARGA 60-100

**Cálculo y representación del TLR frente a diferentes intervalos de slots en cada cinta para un protocolo DFSA N-Slotted Scheduling.**

El objetivo de este apartado es describir el proceso a seguir en el caso de querer optimizar nuestro sistema para cargas asimétricas. Como se ha comentado, la carga elegida es de 60-100 tags/m para cada cinta.

La distribución de los parámetros en cada cinta se ha realizado de la siguiente manera:

- Longitud del área de carga de cada cinta: 1 metro.
- Longitud del área de cobertura de cada cinta: 2 metros.
- Velocidad de cada cinta transportadora: 1 m/s
- Tiempo para los slots inactivos: 2 ms.
- Tiempo para slots con colisión: 2 ms.
- Tiempo slots con leído con éxito: 4 ms.

- Tiempo de activación de cada lector: 2 ms.
- Máximo error permitido: 0.005.
- Tamaño de trama mínimo para cada lector:  $Q = 4$ .
- Intervalos de slots de lectura en cada Reader: Se ha obtenido resultado para todas las combinaciones de 1 a 20 slots en cada cinta.
- Densidad de tags por cinta: Se ha fijado una cinta con carga de 60 tags/m y otra con 100 tags/m.

Para cada cinta transportara se hará un barrido de todas las combinaciones de intervalos de slots que puedan darnos unos buenos resultados. A continuación se muestra la gráfica con los resultados:

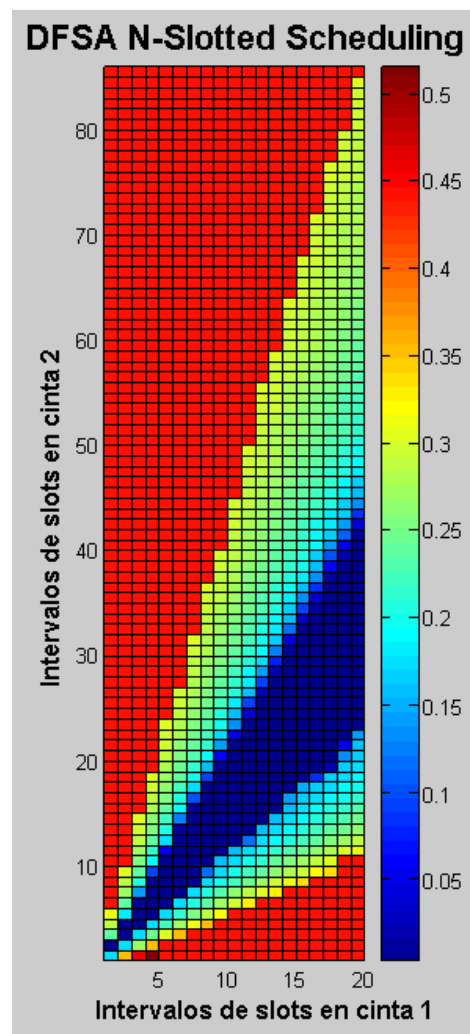


Figura 53: TLR para variaciones de intervalos de slots en cinta 1 frente a los de la cinta 2 con protocolo DFSA N-Slotted Scheduling.

A partir de este apartado, las simulaciones para obtener buenos resultados requieren una alta carga computacional por lo que también se ha intentado ofrecer un método que reduzca lo menos posible el tiempo de espera de resultados. Para este caso, tras un pequeño estudio

inicial para conocer cómo podría ser la evolución de los valores, unas primeras simulaciones nos revelaban que los datos más interesantes (combinaciones con  $TLR = 0$ ), suelen encontrarse en torno a la diagonal que se mostrará en la gráfica.

Es por ello por lo que se han realizado los barridos de las simulaciones partiendo de la diagonal (mismo número de intervalos de slots en la cinta 1 y en la 2), tras obtener este TLR, se va recorriendo cada eje hacia arriba o hacia abajo sacando todos los valores de TLR hasta que se sobrepase un límite, impuesto en una de las condiciones de simulación para que los resultados sean válidos (para este caso,  $TLR < 0.3$ ).

Las simulaciones se han hecho con nuestro simulador en OMNeT++, los scripts para automatizar las simulaciones y reducir la carga computacional se han hecho en PERL (se ha implementado en este lenguaje el algoritmo para el cálculo del TLR a partir de la diagonal, como se ha explicado anteriormente), y la representación final se ha hecho en MATLAB.

Se ha elegido MATLAB para la representación debido a la complejidad de la gráfica, como se observa, es una gráfica bidimensional en la que cada cuadrado coloreado de la gráfica nos da información de 3 valores numéricos. Visualmente es como si se cogiera una gráfica en 3D y se aplastara hasta quedar como un solo plano, tal y como es común ver en representaciones topográficas. Esto se ha hecho con la ayuda de la función "`pcolor()`" que nos proporciona dicho software.

Entrando a analizar lo que es la gráfica, se observa que para cada combinación de intervalos de slots de lectura en cada cinta transportadora hay una franja en la que el TLR se hace mínimo. Esta franja se va haciendo más grande conforme vamos aumentando el eje x. Al aumentar los intervalos que le damos a una cinta, las combinaciones que obtenemos para obtener un TLR mínimo aumentan y tenemos un colchón más grande de buenos valores para configurar nuestro sistema. Es aconsejable escoger un valor intermedio de estas franjas de valores para asegurarnos unos mejores resultados ante pequeñas variaciones en las condiciones del sistema.

En esta gráfica también se observa que la evolución de las pérdidas se realiza de forma progresiva, el TLR va aumentando su valor poco a poco, y la evolución de los buenos resultados tiende a separarse de la diagonal conforme evolucionan los datos de simulación. Este lóbulo de buenos resultados (la parte azul de la representación) tiene longitud finita, ya que a partir de cierto tiempo de simulación de la cinta 1, la otra cinta perderá tags sin identificar debido a que durante el tiempo que el tag ha estado en su sistema, este Reader no ha dispuesto de ningún slot para su proceso de identificación.

De este apartado se pueden sacar las siguientes conclusiones, para cada carga asimétrica a nuestro sistema existe un reparto óptimo de los recursos que proporciona unas pérdidas mínimas. Con el proceso de optimización de este apartado se obtiene un rango de valores con los que el sistema funciona satisfactoriamente en unas condiciones. Al haber margen de elección para elegir los intervalos de slots que se van intercambiando cada Reader, es aconsejable escoger un valor intermedio del lóbulo de  $TLR_{opt}$ , esto nos proporcionará robustez en los resultados para las pequeñas variaciones que puedan ocurrir en las condiciones del sistema.



## 4.6.2 BFSA N-SLOTTED SCHEDULING CON CARGA 60-100

### **Cálculo y representación del TLR frente a diferentes intervalos de slots en cada cinta para un protocolo BFSA N-Slotted Scheduling.**

El objetivo de este apartado es describir el proceso de optimización de nuestro sistema para cargas asimétricas cuando utilizamos el protocolo BFSA N-Slotted Scheduling. Como se ha comentado anteriormente, la carga elegida para este estudio es de 60-100 tags/m para cada cinta. Se ha elegido la misma carga que en el apartado de DFSA N-Slotted Scheduling para poder comparar los resultados y comentar las diferencias entre ellos.

La distribución de los parámetros en cada cinta se ha realizado de la siguiente manera:

- Longitud del área de carga de cada cinta: 1 metro.
- Longitud del área de cobertura de cada cinta: 2 metros.
- Velocidad de cada cinta transportadora: 1 m/s
- Tiempo para los slots inactivos: 2 ms.
- Tiempo para slots con colisión: 2 ms.
- Tiempo slots con leído con éxito: 4 ms.
- Tiempo de activación de cada lector: 2 ms.
- Máximo error permitido: 0.005.
- Parámetro Q o tamaño de trama para cada lector: Combinaciones entre 1 y 10.
- Intervalos de slots de lectura en cada Reader: Se ha obtenido resultado para todas las combinaciones de 1 a 20 slots en cada cinta.
- Densidad de tags por cinta: Se ha fijado una cinta con carga de 60 tags/m y otra con 100 tags/m.

Para cada cinta transportara se hará un barrido de todas las combinaciones de intervalos de slots que puedan darnos unos buenos resultados. En esta ocasión, para cada combinación de intervalos de slots hay que hacer un barrido con todos los tamaños de trama posibles para cada carga para obtener unas pérdidas mínimas. A continuación se muestra la gráfica con los resultados:

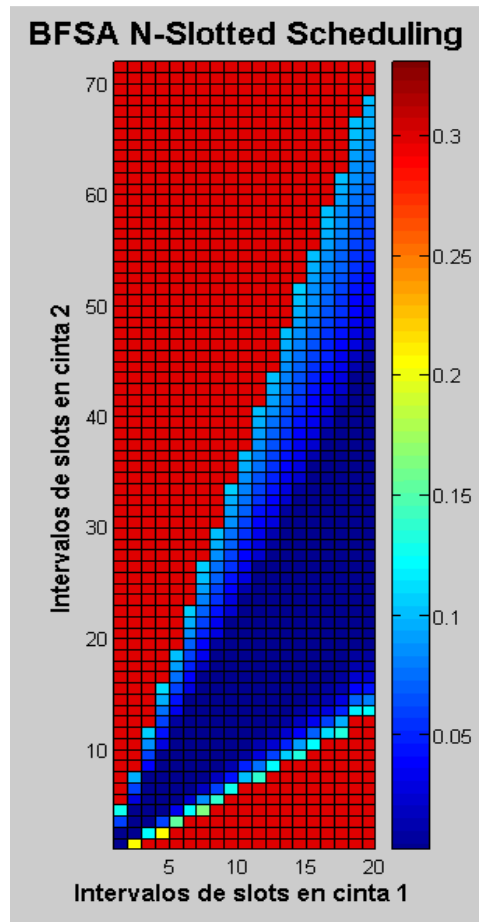


Figura 54: TLR para variaciones de intervalos de slots en cinta 1 frente a los de la cinta 2 con protocolo BFSA N-Slotted Scheduling.

Para la obtención de esta gráfica también se ha hecho uso de las mismas herramientas: OMNeT++, PERL y MATLAB.

El script en PERL de este apartado, aparte de automatizar la obtención de resultados para las diferentes variantes de simulación, también implementa la obtención de resultados a partir de la diagonal de la gráfica (como se ha explicado en el anterior apartado, se han realizado los barridos de las simulaciones partiendo de la diagonal, tras obtener este TLR, se va recorriendo cada eje hacia arriba o hacia abajo sacando todos los valores de TLR hasta que se sobrepase un límite, impuesto en una de las condiciones de simulación para que los resultados sean válidos (para este caso,  $TLR < 0.2$ )). En este script, aparte de trabajar con el algoritmo que trabaja a partir de la diagonal como en el anterior caso, para cada par de valores de "Intervalos de slots en cinta X" hay que hacer todas las combinaciones de valores del tamaño de trama que utiliza cada lector para que nos de unas pérdidas mínimas. Tras obtener todos los resultados de esas simulaciones, este script implementa un algoritmo de búsqueda y ordenación de los resultados para minimizar el tiempo que hay que utilizar después para adecuar el formato de los resultados para su correcta representación.

Analizando la gráfica, la disposición de los resultados de estas simulaciones es similar al del anterior apartado, pero con mejoras sustanciales. En ambos casos se observa cómo hay un

lóbulo principal en el que el TLR se hace cero, pero en este caso este lóbulo es mucho más ancho y está más cerca de la diagonal principal. Esto es debido a una mejor adaptación de los tamaños de trama de cada Reader, en esta gráfica, el sistema converge al tamaño de trama óptimo para cada combinación porque se han tenido en cuenta todos los tamaños posibles para ir representando cada valor. Esta tarea nos ha llevado un alto cargo computacional ya que para cada cuadrado de la gráfica, el resultado no es inmediato como en el caso de DFSA, sino que se han realizado muchas simulaciones con las combinaciones de tramas del primer lector (desde  $Q_1=1$  a  $Q_1=12$ ) con los tamaños de trama del segundo lector (desde  $Q_2=1$  a  $Q_2=12$ ), tras esto se representa solo el mejor de los valores posibles.

El lóbulo de  $TLR = 0$  de esta gráfica, al igual que en el caso de DFSA N-Slotted Scheduling, también es finito, ya que a partir de ciertos valores de intervalos de slots en la cinta 1, hace que se pierdan tags en la cinta 2 por no disponer de ningún slot para su proceso de identificación durante el tiempo que el tag permanece en nuestro sistema.

Como conclusión a este apartado podríamos decir que un estudio más en profundidad del el protocolo BFSA N-Slotted Scheduling cuando en el sistema hay cargas asimétricas nos permite conocer un mayor intervalo de valores de los parámetros de configuración en los que se obtiene un TLR mínimo. Al igual que en el caso anterior, es recomendable escoger un valor intermedio para los intervalos de slots de cada cinta cuando se disponga de varios valores posibles, ya que esto hará que el resultado sea más fiable ante pequeños errores en los cálculos.

La razón por la que escoger DFSA N-Slotted Scheduling en el caso de tener cargas asimétricas es si las condiciones de nuestro sistema sean cambiantes o desconocemos la carga a cada cinta, entonces es más aconsejable utilizar este protocolo ya que se adapta mejor a los cambios y además, hace más sencilla su configuración.

Las razones para escoger BFSA N-Slotted Scheduling en el caso de tener cargas asimétricas es si sabemos con precisión la cada carga entrante al sistema ya que permite obtener unos mejores resultados y se puede obtener menor TLR a mayores cargas. Esta mejora supone un alto cargo computacional para configurar correctamente los parámetros de simulación y este sistema reacciona de forma no deseable a variaciones en sus condiciones iniciales (si la configuración actual del sistema no es correcta para unas determinadas condiciones los resultados son bastantes malos).

## Capítulo 5: CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS

A raíz de las simulaciones y estudios realizados en este proyecto fin de carrera para un sistema RFID con lectores interferentes y tags móviles se podría concluir que todos los parámetros comentados a lo largo de esta memoria tienen un papel importante y pueden dar como resultado un comportamiento mejor o peor si no se les asignan un valor adecuado.

Se ha comenzado el estudio con la implementación del protocolo BFSA Frame Scheduling con el que se solucionaba el principal problema de nuestro estudio: realizar un sistema de reparto de recursos en un sistema RFID con lectores interferentes y tags móviles. Se ha comprobado la necesidad de tener configurado correctamente los parámetros de simulación de este protocolo para que las pérdidas sean mínimas y se ha mostrado como se puede llegar hasta 60 tags/m en cada cinta sin obtener pérdidas en nuestro sistema.

Una vez analizado este problema y sus resultados se ha buscado variantes para su mejorar su rendimiento. En un primer momento se ha elegido el algoritmo DFSA y se ha demostrado como haciendo algunas variantes en este algoritmo se puede adaptar a las condiciones de nuestro sistema. Este nuevo algoritmo, que se bautizó como DFSA N-Slotted Scheduling, ha conseguido mejorar en un 50% la cantidad de tags que podemos identificar sin sufrir ninguna pérdida y, además, ha simplificado la elección de los parámetros de configuración. Este algoritmo también presenta unos buenos resultados frente a la variación de las condiciones iniciales de carga sin necesidad de reconfigurar los parámetros del sistema.

Por último, se ha estudiado el protocolo BFSA N-Slotted Scheduling para mejorar el anterior algoritmo, en el anterior caso se ha visto que el tamaño de trama no convergía al tamaño óptimo por lo que se ha decidido realizar una variable de este algoritmo que sabiendo la carga entrante, se configure de manera óptima para obtener los mejores resultados. En este caso, se ha conseguido alcanzar unas cargas del sistema por encima de todo lo visto anteriormente hasta llegar a 100 tags/m en cada cinta sin pérdidas, este sistema incluso puede llegar a 120 tags/m con un TLR de solo 0.0128216. Como se ha visto en los resultados de las simulaciones, la mejora en los resultados ha venido de la mano de conocer en todo momento las condiciones del sistema y permitir una adaptación perfecta. También se ha visto como este protocolo es muy sensible a variaciones a su carga, y una configuración para una determinada carga presenta bastantes pérdidas si se cambia su configuración a una no óptima.

Nuestro estudio también ha contemplado un proceso de optimización del sistema para cargas asimétricas. Tomando como ejemplo una carga de 60-100 tags/m para cada cinta, se ha explicado los pasos de este proceso de optimización tanto para DFSA N-Slotted Scheduling como para BFSA N-Slotted Scheduling y ha mostrado los parámetros relevantes de cada uno de los resultados. En conclusión, cada estudio nos proporciona unos valores de configuración con los que se consigue que en el sistema haya unas pérdidas mínimas. En el caso de BFSA N-Slotted Scheduling, el lóbulo en el que el TLR se hace mínimo es mayor que en el caso de DFSA N-Slotted Scheduling, pero su carga computacional es mucho mayor y es más sensible a posibles cambios en los parámetros de configuración del sistema (si se varía el tamaño de

alguna trama o la carga de algún sistema, las pérdidas aumentan mucho). La principal ventaja de BFSA N-Slotted Scheduling es que puede conseguir mejores resultados para más combinaciones de cargas del sistema.

Las pérdidas de este sistema funcionando con cada protocolo aumentan al aumentar la velocidad de cada cinta y disminuyen al aumentar el área de cobertura de cada reader, si se pretende estudiar unas determinadas cargas con las que en este estudio presenten malos resultados, se puede adaptar alguno de estos parámetros para que los resultados sean satisfactorios.

Existe un rango de valores, normalmente intermedios, para los cuales el parámetro Q del protocolo FSA en el que el TLR es más apropiado que para otros valores, normalmente muy altos o muy bajos, de Q. Destacar también como un aumento de la longitud del área de cobertura hace que disminuya el TLR pero que, un valor excesivo en la longitud del área de cobertura no disminuye el valor del TLR sino al contrario.

En cuanto a las líneas futuras, se podría hacer un estudio exhaustivo de la robustez de cada algoritmo a diferentes variantes en las condiciones de simulación. También, para cada uno de los protocolos explicados, se podría realizar un estudio completo de todas las combinaciones de cargas asimétricas siguiendo los pasos explicados en este proyecto.

Otra línea de investigación para este proyecto podría ser el estudio de otros protocolos anticolidión como los comentados en el apartado "Protocolos anticolidión RFID". Otras líneas futuras podría ser la implementación de este sistema, pero utilizando tres o más readers e implementando algún protocolo avanzado de anticolidión más orientado al uso de varios readers como protocolos de aprendizaje HiQ (Hierarchical Q-learning), redes neuronales, algoritmos genéticos, algoritmos de templado simulado, etc. Se podría estudiar el límite de readers que pueden trabajar juntos para unas determinadas condiciones.

En la literatura científica se pueden encontrar numerosos protocolos para sistemas RFID de identificación/ anticolidión, cuyo principal objetivo es minimizar el tiempo medio de identificación de los tags y conseguir la mayor eficiencia en la identificación de los tags. Sin embargo, los sistemas RFID actuales se basan en el estándar mundialmente reconocido y adoptado EPCglobal Class-1 Gen-2, el cual recomienda el uso de un protocolo anticolidión basado en el protocolo Frame Slotted Aloha o FSA.

Otra línea de investigación futura para el sistema implementado de identificación de tags pasivos RFID en movimiento sería la implementación de un modelo de transmisión radio más realista, teniendo en cuenta expresiones y fenómenos de la transmisión y la propagación de ondas electromagnéticas y, de esta manera, teniendo en cuenta un plano en tres dimensiones más realista. Así, el desplazamiento de los tags en este sistema y, por tanto, su velocidad tendrían todavía más influencia en el estudio del sistema, ya que las señales enviadas por el reader RFID hacia los tags podrían no ser recibidas por algunos de estos tags de manera correcta y, por tanto, el reader podría no recibir respuesta de algunos de los tags que se encontrasen en su área de cobertura. Por lo tanto, este sistema, por lo general, vería aumentada su complejidad, tanto en su funcionamiento como en el aumento de sus

parámetros, pero esta complejidad se vería recompensada con un estudio más realista y preciso de lo que pudiera ser un sistema de identificación en la práctica.

## Capítulo 6: BIBLIOGRAFÍA

- [1] Performance Analysis of RFID Generation-2 Protocol,  
Chonggang Wang, Mahmoud Daneshmand, Kazem Sohraby, Bo Li,  
IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS, VOL. 8, NO. 5, MAY 2009
- [2] Specification for RFID Air Interface  
EPCglobal Inc., 2005
- [3] The RFID Handbook,  
K. Finkelzeller,  
2nd edition, Wiley, 2003, ISBN 0-470-84402-7.
- [4] UPC Symbol Specification Manual,  
Uniform Code Council, Inc.,  
Dayton, OH, May 1995.
- [5] Thinking in C++,  
Burce Eckel,  
2nd edition, Volume 1 and Volume 2, 2000.
- [6] Discrete-event system simulation,  
Banks, J.,  
Prentice-Hall, 2001.
- [7] RFID: Tecnología, aplicaciones y perspectivas  
Whitepaper LIBERA, 2010
- [8] Programming Perl,  
Larry Wall, Tom Christiansen and Randal Schwartz,  
2nd edition, September 1996.
- [9] Gnuplot in Action,  
Philipp K. Janert,  
Manning Publication Co. ISBN 978-1-933988-39-9.
- [10] The magic of RFID,  
R. Want,  
ACM Queue Magazine, Oct 2004.
- [11] RFID Explained: A primer on Radio Frequency Identification Technologies,  
Roy Want,  
1a Edición, Morgan & Claypool Publishers, 2006.
- [12] An Introduction to RFID Technology,  
R. Want,  
IEEE CS and IEEE ComSoc, Mar 2006

[13] EPCglobal Homepage,  
[www.epcglobalinc.org](http://www.epcglobalinc.org)

[14] Tecnología RFID: Introducción,  
[www.rfid-magazine.com](http://www.rfid-magazine.com)



