

Estudio de la configuración óptima de longitud de ciclo en sistemas RFID

M^a Victoria Bueno Delgado, Javier Vales Alonso, Esteban Egea López, Joan García Haro

Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena, ETSI Telecomunicación, Plaza del Hospital n° 1, 30202, Cartagena (Murcia)

E-mail: {mvictoria.bueno, javier.vales, esteban.egea, joang.haro}@upct.es

Resumen— La tecnología RFID permite marcar items con etiquetas que pueden ser leídas a distancia mediante radiocomunicación. Los estándares de sistemas RFID especifican el uso de Aloha Ranurado por Trama (FSA) como protocolo de identificación. En este protocolo el tiempo se divide en ciclos subdivididos en *slots*. El lector indica al comienzo de cada ciclo su longitud y las etiquetas seleccionan uno de los slots para transmitir. Si el número de *slots* comparado con el de etiquetas está desequilibrado se produce una ineficiencia ya que aumenta el tiempo de lectura. En este trabajo analizamos cuál es la longitud de ciclo óptimo para los diversos tipos de lectores presentes en el mercado. Asimismo, contrastamos nuestro resultado en un validador experimental compuesto por lectores Alien 8800.

Palabras clave— RFID (Radio Frequency Identification), tags pasivos, EPCglobal Class1-Gen2.

I. INTRODUCCIÓN

LA tecnología de identificación por radiofrecuencia RFID (*Radio Frequency Identification*) permite la comunicación bidireccional entre etiquetas (*tags*) adheridas a diversos productos y dispositivos lectores. La comunicación se realiza de forma remota por radiofrecuencia y sin la necesidad de visión directa por parte del lector. Un *tag* se compone de una antena de reducidas dimensiones, un circuito electrónico simple y una pequeña memoria donde almacena información relevante sobre el objeto al cual se encuentra adherido (p. ej. precio del producto, código del proveedor, histórico de identificaciones, etc.) [1].

Una instalación de RFID está formada por uno o más lectores situados en zonas estratégicas y una población (potencialmente grande) de *tags* que entran y salen de la zona de cobertura del lector. Los *tags* en cobertura deben identificarse y enviar su información. El lector recoge dicha información y la procesa de acuerdo a necesidades de la

aplicación concreta. Los sistemas RFID se utilizan, mayoritariamente, en aplicaciones industriales (p. ej. gestión de stocks de almacenes, trazabilidad de productos) y suelen instalarse en entornos donde hay un gran número de items. Si por cada ítem es necesario un *tag*, el coste de un sistema RFID puede llegar a ser muy elevado. El coste final depende principalmente del tipo de *tag* que se utilice. Los *tags* se clasifican principalmente en dos tipos:

- Activos: poseen una fuente autónoma de abastecimiento de energía, reemplazable en la mayoría de casos. Incorporan microprocesadores y memorias de gran capacidad que, por un lado, permiten realizar tareas de lectura/escritura y procesar gran cantidad de datos, pero encarecen notablemente su coste. El alcance de estos dispositivos puede superar los 100 metros.
- Pasivos: son dispositivos muy simples sin batería propia, lo que reduce drásticamente su coste. La energía que alimenta el circuito impreso se obtiene del campo electromagnético generado por el lector que incide en el tag y genera una corriente que alimenta al circuito durante el tiempo que el *tag* está en cobertura. El rango de cobertura de estos dispositivos varía desde los pocos centímetros hasta el par de metros.

Dependiendo del tipo de aplicación y el volumen de items las empresas elegirán sistemas RFID activos o pasivos, siendo estos últimos la opción mayoritaria actualmente, además de la más extendida y estudiada [2][3][4]. Por ello, este trabajo se centra en los sistemas RFID con *tags* pasivos.

En los sistemas RFID pasivos, la comunicación entre el lector y los *tags* se realiza mediante acceso a un canal de comunicación compartido. Por ello, cuando hay un número elevado de *tags* en la zona de cobertura es necesario un mecanismo de acceso al medio (MAC) para minimizar el impacto de las colisiones que se producen por las transmisiones simultáneas. La simplicidad del hardware en los *tags* pasivos obliga a trasladar la complejidad del protocolo o mecanismo de anticollisión al lector (p. ej., la sincronización).

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos DEP2006-56158-C03-03/EQUI del Ministerio de Educación y Ciencia y TEC2007-67966-01/TCM (CON-PARTE-1) del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Asimismo, se ha desarrollado en el contexto del "Programa de Ayudas a Grupos e Excelencia de la Región de Murcia", de la Fundación Séneca, Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia (Plan Regional de Ciencia y Tecnología 2007/2010).

Los mecanismos anticolidión para sistemas RFID pasivos, incluyendo los estándares actuales, son variaciones de Aloha o Aloha ranurado por trama (FSA, *Frame Slotted Aloha*) [5], una variación de Aloha ranurado donde los *slots* están confinados en tramas consecutivas llamadas ciclos. En el proceso de identificación de un sistema RFID pasivo el lector inicia un ciclo de identificación anunciando el tamaño (en número de *slots*) de ese ciclo. Todos los *tags* en cobertura reciben esa información y escogen aleatoriamente un *slot* de ese ciclo donde transmitir su identificador.

Es evidente que el principal objetivo de los protocolos anticolidión es minimizar el tiempo de identificación de los *tags*. P. ej., en un almacén de una empresa industrial hay una cinta transportadora (Fig.1) con un sistema RFID en un punto intermedio de la cinta. Conforme la cinta se mueve, las cajas etiquetadas con *tags* van entrando a la zona de cobertura para volcar los datos del producto. El lector está configurado de forma que, mientras haya colisiones, la cinta transportadora no avanza. Este mecanismo evita que un *tag* salga de la zona de cobertura sin haber enviado la información pero a costa de parar la cinta y ralentizar el sistema. La capacidad de avance de la cinta dependerá de las prestaciones del protocolo anticolidión de lectura.



Fig. 1. Cinta transportadora con sistema RFID pasivo. La cinta se para hasta conseguir la identificación de todos los *tags*.

El principal parámetro de ajuste en los protocolos FSA es la longitud del ciclo. Las prestaciones dependerán de la relación existente entre el número de *tags* a identificarse y la longitud del ciclo. Si el número de *tags* presentes en la zona de cobertura del lector es mucho mayor que el número de *slots* de contienda, el tiempo de identificación se incrementa considerablemente ya que se producen muchas colisiones y se necesitan muchos ciclos de identificación para que todos los *tags* envíen su información correctamente. Por otro lado, si el número de *tags* es bajo pero la longitud del ciclo es elevada, se suceden muchos *slots* vacíos, lo que también incrementa el tiempo de identificación. Las mejores prestaciones requieren trabajar siempre con el número de *slots* óptimo por ciclo de tal modo que se minimice el tiempo total de identificación. Los lectores existentes en el mercado se puede clasificar según el grado de configuración por el usuario del protocolo anticolidión que implementan:

- a- Lectores de ciclo estático fijo, no configurable [6-10]. Los ciclos de identificación son de longitud fija, establecido en fábrica y no modificable. En este tipo de lectores no es posible optimizar de ningún modo la longitud de ciclo puesto que está preestablecido.
- b- Lectores de ciclo estático fijo, configurable [10-12]. Los ciclos de identificación son de longitud fija, pero el administrador del lector puede configurar dicha longitud antes de poner en funcionamiento el lector pudiendo escoger entre diferentes valores.
- c- Lectores de ciclo dinámico [10-12]. En estos equipos la longitud de cada ciclo de identificación puede variar, de tal modo que la longitud de ciclo se adapte en todo momento al mejor valor posible.

El objetivo de nuestro trabajo ha sido investigar cuál es el valor óptimo de la longitud de ciclo. Dicho criterio de optimización debe expresarse de modo diferente según el tipo de lector:

- Para lectores de ciclo estático configurable, debe seleccionarse la longitud de ciclo que minimice el tiempo de lectura para una población de N *tags*. En un caso general serán necesarios S ciclos de lectura, cada uno de ellos compuesto del mismo número K de *slots*. El tiempo de lectura será proporcional a $S \cdot K$. El objetivo es minimizar dicha función, seleccionando el K óptimo.
- Para lectores de ciclo dinámico debe escogerse la mejor longitud en cada ciclo. Es decir, debe maximizarse la *tasa de identificación* por ciclo, expresado de otro modo, el ratio entre el número de *tags* identificados N_{id} y el número K de *slots* del

$$\text{ciclo: } \frac{N_{id}}{K} .$$

En este artículo se abordan ambos problemas mediante un estudio analítico y de simulación centrado en el protocolo EPCglobal Class-1 Gen-2 [13]. Los resultados obtenidos han permitido calcular el valor óptimo de la longitud de ciclo en lectores de ciclo estático configurable y dinámico como función de la población de *tags* presentes en la zona de lectura. Adicionalmente, para validar los resultados obtenidos por análisis y simulación, éstos se han utilizado para configurar un sistema RFID pasivo real: un kit de desarrollo Alien 8800 [8], configurado como lector de ciclo estático configurable. En este sistema se han configurado distintos valores de número de *slots* por ciclo y se han obtenido tiempos medios de identificación para distintas poblaciones de *tags*. Los resultados de estas medidas experimentales demuestran que los resultados del análisis y simulación son correctos y que maximizan el número de identificaciones, minimizando el tiempo de identificación.

Por último, es necesario destacar que los resultados obtenidos en este trabajo también se pueden aplicar en los sistemas RFID pasivos con lectores tipo estático no configurable. En este caso, si el número de *slots* por ciclo es un valor fijo, y conocido, pero no configurable, se pueden modificar otros parámetros relativos al entorno donde el sistema RFID está instalado para maximizar el número de identificaciones. Tomando el ejemplo de la Fig.1, la tabla V de resultados permite obtener el número máximo de *tags* en cobertura que maximiza el número de identificaciones con el número de *slots* por ciclo establecido de fábrica. Por tanto, bastará con modificar la velocidad de la cinta para conseguir el número de *tags* en cobertura que se indica.

El resto del artículo está organizado en las siguientes secciones: La sección II introduce una breve descripción de los trabajos relacionados. La sección III describe el estándar EPCglobal Class-1 Gen-2. En la sección IV se presenta el estudio analítico del estándar orientado a lectores de ciclo estático. En la sección V se describen los escenarios simulados y los resultados obtenidos tanto para lectores de ciclo estático como dinámico. La sección VI detalla los resultados experimentales obtenidos con un sistema RFID real. Por último la sección VII resume las principales conclusiones extraídas de este trabajo

II. TRABAJOS RELACIONADOS

En la literatura científica se pueden encontrar numerosos trabajos relacionados con los sistemas RFID pasivos [14-22] donde se proponen mejoras y algoritmos de adaptación de ciclo para el estándar EPCglobal Class-1 Gen-2. En cuanto a los trabajos de sistemas RFID pasivos con lectores de ciclo estático, la mayoría de éstos presenta sus resultados de forma analítica o de simulación, sin llevar a la práctica mediante validación experimental dichos resultados. Además muchas de las mejoras que se proponen en estos trabajos implican modificaciones hardware y software que no son realizables en los sistemas RFID que se comercializan hoy en día:

- En [16] se propone que, fijado un número de *slots* por ciclo y un número de *tags* en cobertura, si se modifican ciertos parámetros del estándar se pueden obtener mejores tiempos de identificación. Sin embargo con los lectores que hoy en día hay en el mercado, el administrador no tiene acceso a la configuración de los parámetros que se proponen.
- En [17,18] se proponen protocolos anticolidión cuya implementación supone añadir hardware extra en los *tags*, lo que incrementa considerablemente el coste de los sistemas RFID, y por tanto, deja de ser un producto atractivo.

En cuanto a los lectores de ciclo dinámico, existen numerosos trabajos donde se proponen mejoras del algoritmo de adaptación de ciclo del estándar donde el lector estima el

número de *tags* que compiten en cada ciclo para obtener el número de *slots* óptimo por ciclo. [19-22]. Sin embargo, no se tiene en cuenta que, al implementar los algoritmos que proponen en el estándar EPCglobal Class-1 Gen-2, el número de *slots* óptimo que se obtiene para cada ciclo debe ajustarse a los valores que el estándar permite, por tanto, los resultados que ofrecen estos trabajos no se corresponderían con el funcionamiento real del lector.

III. PROTOCOLO EPCGLOBAL CLASS-1 GEN2

EPCglobal Class-1 Gen-2 [13] es el estándar de EPCglobal basado en FSA [5]. EPCglobal es una institución centrada en el desarrollo de estándares industriales para EPC (*Electronic Product Code*) mediante identificación por radiofrecuencia. Este trabajo se centra en el estándar para sistemas RFID pasivos Class-1 Gen-2, en la banda UHF (860MHz-930MHz). Incluye un conjunto de especificaciones hardware para *tags* pasivos y el hardware y software del sistema lector (en el cual reside toda la complejidad del sistema). Después de su publicación en el año 2005, este protocolo ha sido ampliamente adoptado por los fabricantes de sistemas RFID, siendo hoy día el protocolo mayoritario [6-12].

El proceso de identificación que define el estándar EPCglobal Class-1 Gen-2 para un sistema RFID pasivo se inicia en el instante en el que el lector monitoriza el entorno, transmitiendo paquetes *Broadcast* con el fin de detectar los *tags* en su rango de cobertura. Si aparecen *tags* en la zona de cobertura, éstos se activan por la señal electromagnética del paquete *Broadcast* y responden todos a la vez, provocando una colisión múltiple. El lector detecta dicha colisión y comienza un ciclo de identificación. En cada proceso de identificación el tiempo se distribuye en ciclos. A su vez los ciclos se subdividen en ranuras temporales, llamadas *slots* (Fig.2). Un ciclo de identificación comienza cuando el lector envía un paquete tipo *Query*, incluyendo en uno de sus campos cuatro bits, que indican el valor de $Q \in [0, \dots, 15]$ indicando que el tamaño del ciclo será de 2^Q *slots*. Los *tags* en cobertura que reciben el paquete generan un número aleatorio r dentro del intervalo $[0, 2^Q - 1]$. El valor r representa el *slot* del ciclo actual en el que el tag transmitirá su identificador $ID=r$. En cada ciclo, el comienzo de un nuevo *slot* lo indica el lector por medio del paquete *QueryRep*, exceptuando el *slot* 0, el cual se inicia automáticamente tras el envío del paquete *Query*¹. Los *tags* que compiten para identificarse utilizan un contador interno ($counter=r$) para contabilizar los *slots* que les quedan hasta alcanzar el elegido y enviar su identificador. Para ello, cada vez que les llega un paquete *QueryRep*, decrementan el contador y si éste alcanza el valor 0, envían su identificador ID , que corresponde al valor obtenido r , es decir, el *slot* elegido en el ciclo. Después de que un *tag* transmita su identificador puede ocurrir:

¹ Los paquetes *Query* y *QueryRep* permiten la sincronización entre el lector y los *tags*.

- (i) Si hay más de un *tag* que ha elegido el mismo *slot* para transmitir su identificador se producirá una colisión que el lector detectará y reaccionará enviando un nuevo paquete *QueryRep* (*slot* 0 de la Fig.2). Al recibir el paquete, los *tags* que han transmitido su identificador asumen que ha habido una colisión y actualizan su contador $counter=2^Q-1$, provocando que estos *tags* no vuelvan a competir para identificarse en ese ciclo.
- (ii) Si el lector recibe un *ID* correcto, responde con un paquete *Ack*. Todos los *tags* en cobertura recibirán el paquete, pero sólo el *tag* que envió su *ID* debe contestar enviando un paquete *Data*, p. ej. un paquete EPC. Si el lector recibe el paquete correctamente responde con un nuevo paquete *QueryRep* comenzando un nuevo *slot*. El *tag* identificado finaliza su proceso (*slot* 1 de la Fig.2). Si el lector no recibe el paquete *Data* correctamente o en un tiempo establecido, enviará un paquete *Nack*. Todos los *tags* en cobertura recibirán el paquete pero solo el *tag* que envió los datos reaccionará estableciendo su contador $counter=2^Q-1$. De esta manera el *tag* no volverá a competir por identificarse en ese ciclo (*slot* 3 de la Fig.2). Tras el paquete *Nack* el lector envía de nuevo un paquete *QueryRep* indicando un nuevo *slot*.

Quando un ciclo finaliza, el lector vuelve a enviar un paquete *Query*. Aquellos *tags* que en el ciclo anterior no lograron identificarse volverán a competir en el nuevo ciclo eligiendo un nuevo *slot* de contienda.

El mecanismo anticolidión descrito permite que el lector controle, por un lado, el número de *slots* por ciclo a través del valor *Q*. Por otro lado, tiene el control para decidir si comenzar un nuevo ciclo en un instante determinado, enviando un nuevo paquete *Query* con el mismo o un nuevo valor de *Q*. La modificación del valor de *Q* puede afectar negativamente en el tiempo de identificación de una población de *tags* en cobertura con el lector. Si se utilizan valores altos de *Q* y hay muy pocos *tags* en cobertura se suceden muchos *slots* vacíos por ciclo. Por otro lado, si *Q* se establece con un valor muy bajo y el número de *tags* en cobertura es muy alto, implica muchos *slots* con colisión por ciclo. Ambas situaciones se deben evitar ya que incrementan considerablemente el tiempo de identificación. Para ello, el estándar presenta dos alternativas de configuración en el lector.

A. Configuración *Q* estática

Todos los ciclos de identificación se establecen con el mismo valor de *Q* y este valor no cambia. Todos los sistemas RFID pasivos del mercado que implementan EPCglobal Class-1 Gen-2 presentan la configuración *Q* estática, la cual puede venir configurada de fábrica y no configurable, lo que puede provocar altos tiempos de identificación. Otros sistemas RFID pasivos del mercado si permiten la configuración por parte de un administrador del valor *Q*. Sin embargo, estos lectores no se ajustan al estándar propuesto, ya que permiten trabajar en

un rango muy limitado de *Q*, p. ej, en [12] donde $Q \in [0, \dots, 7]$.

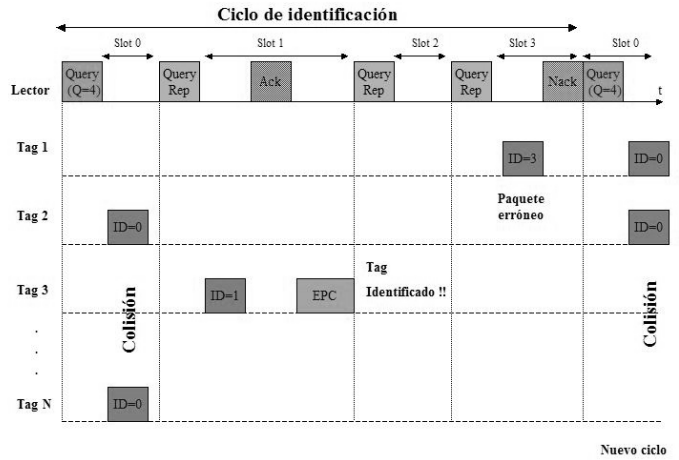


Fig. 2. Algoritmo anticolidión EPCglobal Class-1 Gen-2

B. Configuración *Q* dinámica.

El valor de *Q* se modifica ciclo a ciclo. La mayoría de los lectores siguen el mecanismo de adaptación de ciclo propuesto en el estándar y que se muestra en la Fig. 3. En cada ciclo de identificación el lector contabiliza el número de *slots* con colisión, vacíos y con identificación. Al finalizar un ciclo, de acuerdo a los valores obtenidos incrementa, decrementa o mantiene el valor de *Q* en el siguiente ciclo. Para ello se utiliza la variable $C \in (0.1, 0.5)$. El estándar no define los valores exactos de *C* a utilizar en cada caso. Sólomente recomienda utilizar valores altos de *C* en situaciones donde *Q* tenga un valor bajo y viceversa. Hoy en día esta configuración no se encuentra implementada en la mayoría de los sistemas RFID pasivos del mercado y en aquéllos donde sí lo está (p. ej. en [12]) no se indica el valor de *C* que se establece ni hay opción de que el usuario pueda configurarlo.

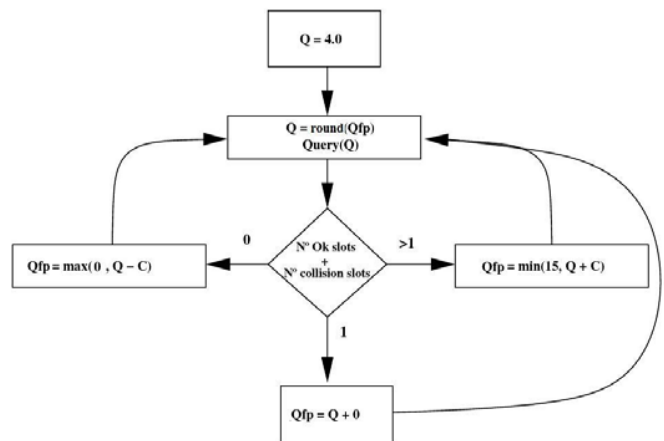


Fig. 3. Algoritmo anticolidión EPCglobal Class-1 Gen-2

El mecanismo para obtener el número de *slots* por ciclo de este algoritmo se aleja del valor óptimo de *tasa de*

identificación, es decir, el ratio entre el número de tags identificados N_{id} y el número de slots del ciclo definido para FSA [5]. EPCglobal Class-1 Gen-2 es un protocolo basado en FSA y por tanto la tasa de identificación óptima se alcanza cuando el número de tags N que compiten en un ciclo i coincide con el número de slots K en ese ciclo ($N_i=K_i$), obteniendo una tasa de identificación de $e^{-1} \approx 0.36$ para valores grandes de N . Si se conoce el número de tags que van a competir en un ciclo determinado se puede obtener el número de slots para ese ciclo que maximiza la tasa de identificación. Los lectores de ciclo dinámico que hoy en día hay en el mercado no implementan ningún mecanismo que estime el número de tags que compiten en cada ciclo.

IV. ESTUDIO ANALÍTICO EPCGLOBAL CLASS1-GEN2

En primer lugar se va a estudiar la configuración para lectores de ciclo estático y como parámetros del problema suponemos que el lector debe identificar una población de N tags y se desea buscar el número óptimo de slots K que minimiza el tiempo total de lectura.

Un proceso de identificación comienza cuando la población de N tags recibe la orden de inicio de identificación (Query) por parte del lector. Como muestra la Fig. 2, los tags seleccionan, siguiendo una distribución uniforme, un slot k , $1 \leq k \leq K$, para transmitir su identificador ID. En [3], se explica como un proceso de identificación se puede modelar como un proceso (homogéneo) de Markov $\{X_s\}$, donde $\{X_s\}$ es el número de tags no identificados en el ciclo s . El espacio de estados del proceso Markov es $\{N, N-1, \dots, 0\}$. La distribución de probabilidad de la variable μ_r que indica el número de slots que se ocupan con exactamente r tags es:

$$P_{K,N}(\mu_r = m) = \frac{\binom{K}{m} \prod_{i=0}^{m-1} \binom{N-ir}{r}}{K^N} G(K-m, N-mr, r) \quad (1)$$

donde $m=0, \dots, k$ y:

$$G(M, l, v) = M^l + \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{l}{v} \rfloor} \left\{ (-1)^i \prod_{j=0}^{i-1} \binom{l-jv}{v} \binom{M-j}{v} \right\} (M-i)^{l-iv} \frac{1}{i!} \quad (2)$$

En [3] todos los tags compiten en todos los ciclos para ser identificados. Para adaptar lo propuesto en [3] al protocolo EPCglobal Class-1 Gen-2, se utiliza la modificación propuesta en [23]. De esta forma, los tags que se identifican en un ciclo se retiran de la tienda, terminando para ellos su proceso de identificación. La matriz de transición H y las probabilidades de transición se denotan como:

$$h_{i,j} = \begin{cases} P_{K,N-i}(\mu_1 = j-i), & i < j \leq i+K \\ 1 - \sum_{k=i+1}^{i+K} h_{j,k}, & i = j \\ 0, & \text{resto} \end{cases} \quad (3)$$

donde $i = 0, \dots, N$. Como se asume un escenario donde no entran nuevos tags para identificarse, la cadena de Markov es

absorbente. Suponiendo que el proceso comienza en el estado no absorbente v_i (ningún tag identificado), el número de pasos hasta la absorción (número medio de ciclos de identificación) \bar{D}_{id} es igual a la suma de las entradas de la fila i -ésima de la matriz D que se denota como:

$$D = (I - F)^{-1} \quad (4)$$

D es la matriz fundamental de la cadena absorbente, I es la matriz identidad y F es una submatriz de H , con los estados no absorbentes de la matriz de transición H (ver [24]). En la tabla I se muestran los resultados analíticos para distintos valores de número de slots por ciclo ($K=2^Q$) y de tags. La computación de este análisis se ha realizado con la herramienta Matlab [25].

TABLA I
NÚMERO MEDIO DE CICLOS DE IDENTIFICACIÓN

Tags(N)	Número de slots (K) = 2 ^Q				
	4	8	16	32	64
10	8.2	3.67	2.44	1.89	1.54
20	60	8.56	4.11	2.76	2.15
30	630	19.6	6.15	3.60	2.61
40	8159	49.4	8.97	4.47	3.06
50	1.1 10 ⁵	138	13.03	5.424	3.465
60	1.6 10 ⁶	413.9	19.3	6.50	3.90
70	2.5 10 ⁷	1304.2	29.41	7.76	4.32
80	3.8 10 ⁸	4244.6	46.0	9.26	4.77
90	6 10 ⁹	14127	73.81	11	5.23

Evaluando el protocolo únicamente en número medio de ciclos de identificación se deduce de la tabla I que conforme aumenta el número de slots por ciclo se obtienen mejores resultados. Sin embargo, este criterio de evaluación no es correcto, ya que cada ciclo de identificación tiene una duración temporal distinta, que depende del número de slots en cada ciclo. En la tabla II se muestran los mismos resultados obtenidos en el análisis pero en número medio de slots para la identificación de todos los tags. Se observa como, dependiendo del número de tags a identificar, el número de slots utilizados para la identificación es menor con unos determinados valores de slot por ciclo, como se destaca en los cuadros marcados.

TABLA II
NÚMERO MEDIO SLOTS PARA LA IDENTIFICACIÓN

Tags(N)	Número de slots (K) = 2 ^Q				
	4	8	16	32	64
10	32.8	29.36	39.04	60.48	98.56
20	240	68.48	65.76	88.32	137.6
30	2520	156.8	98.4	115.2	167.04
40	32636	395.2	143.52	143.04	195.84
50	4.4 10 ⁵	1104	208.48	173.56	221.76
60	6.4 10 ⁶	3311.2	308.8	208	249.6
70	10 ⁸	10 ⁴	470.56	248.32	276.48
80	1.5 10 ⁹	3.3 10 ⁴	736	296.32	305.28
90	2.4 10 ¹⁰	1.1 10 ⁵	1.1 10 ³	352	334.72

Hay que tener en cuenta que en EPCglobal Class-1 Gen-2 todos los slots de un ciclo no tienen la misma duración. En la Fig. 2 se observa que un slot vacío o con colisión no tiene la misma duración que un slot con identificación/datos. Para comprobar si el criterio de evaluación por número de slots

para la identificación es correcto, es necesario obtener los resultados en tiempo medio de identificación que, para EPCglobal Class-1 Gen-2 se calcula como:

$$\bar{T}_{total} \approx \bar{D}_{id} \cdot [\bar{k}_v \cdot T_v + \bar{k}_c \cdot T_c + \bar{k}_{id} \cdot T_{id}] \quad (5)$$

\bar{k}_v , \bar{k}_c y \bar{k}_{id} corresponden al número medio de *slots* vacíos, con colisión y con identificación de un *tag*. T_v corresponde a la duración temporal de un *slot* vacío y T_c a la de un *slot* con colisión. T_{id} corresponde a la duración de un *slot* temporal con una transmisión de datos. Como el tamaño de este *slot* depende de la longitud de los datos que el *tag* envía, se asumirá su duración máxima, es decir, que todos los *tags* siempre transmiten un código completo EPC de 96 bits. Los tiempos de cada *slot* dependerán de los parámetros de los dispositivos que se asuman. P. ej., en este trabajo se han utilizado los parámetros de los dispositivos que se indican en la tabla IV. Utilizando estos parámetros y las especificaciones del estándar [13], se obtiene las siguientes duraciones de slot: $T_i = 2.505$ -ms y $T_v = T_c = 0.575$ ms. Como un *slot* vacío y con colisión tienen la misma duración temporal, la ecuación (5) se simplifica:

$$\bar{T}_{total} \approx \bar{D}_{id} \cdot [(\bar{k}_v + \bar{k}_c) \cdot T_c + \bar{k}_{id} \cdot T_{id}] \quad (6)$$

donde,

$$\bar{k}_v + \bar{k}_c = \sum_{s=1}^{\bar{D}_{id}} \frac{(k_s - n_s)}{s} \quad (7)$$

k_s es el número de *slots* de contienda en el ciclo s y n_s , $0 \leq n_s \leq N$, es el número de *tags* identificados en cada ciclo s antes de la absorción (\bar{D}_{id}). Los resultados en tiempo medio de identificación se muestran en la tabla III. Comparando la tabla II y tabla III se comprueba que el criterio de evaluación por número de *slots* para la identificación es correcto ya que los resultados son análogos

TABLA III
TIEMPO MEDIO PARA LA IDENTIFICACIÓN

Tags(N)	Número de slots (K) = 2 ^Q				
	4	8	16	32	64
10	0.0379	0.0354	0.0395	0.0494	0.0647
20	0.1742	0.0772	0.0738	0.0869	0.1110
30	1.5902	0.1476	0.1126	0.1198	0.1443
40	18.409	0.3011	0.1564	0.1555	0.1830
50	270.37	0.7223	0.2151	0.1910	0.2176
60	2.06·10 ³	2.0219	0.2914	0.2316	0.2498
70	4.23·10 ⁵	6.3209	0.3988	0.2732	0.2851
80	94.5·10 ⁶	19.758	0.5662	0.3209	0.3219
90	71.2·10 ⁸	65.765	0.8340	0.3753	0.3598

V. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El alcance del análisis desarrollado en la sección anterior está supeditado a la factibilidad de los cálculos indicados en las fórmulas (3) y (4). Las operaciones involucradas en el cálculo de estas fórmulas crece de forma exponencial con el número de *tags*. Por lo tanto, su utilización está restringida a valores de N bajos, es decir, a pequeñas poblaciones de *tags*.

Por ello, con el fin de extender los resultados obtenidos en dicho análisis, se ha desarrollado un simulador de sistemas RFID pasivos cuyo objetivo es obtener el número medio de *slots* de identificación para poblaciones grandes de *tags* en entornos donde se utilizan lectores de ciclo estático (configurables o no). Asimismo este simulador puede utilizarse para el cálculo de la longitud óptima de ciclo para lectores de tipo dinámico. Ambos resultados se muestran en esta sección.

El simulador se ha desarrollado mediante el entorno de simulación de redes de libre distribución OMNeT++ (*Objective Modular Network Testbed in C++*) [26]. OMNeT++ es un entorno de simulación por eventos discretos, modular y orientado a objetos. Para obtener resultados realistas en el simulador se han implementado los parámetros hardware de los dispositivos del kit de desarrollo Alien 8800 que se muestran en la tabla IV (el mismo hardware empleado en el validador experimental discutido en la sección VI). El simulador recolecta estadísticas del comportamiento del protocolo estándar EPCglobal Class-1 Gen-2: probabilidad de pérdida de paquete, tiempo medio de identificación, utilización del canal, número medio de ciclos de identificación, número medio de *slots* de identificación, etc.

TABLA IV
PARÁMETROS ESTABLECIDOS EN EL KIT DE DESARROLLO ALIEN 8800 Y EN LAS SIMULACIONES REALIZADAS

Parámetros	Tags pasivos	Lector/antena
Frecuencia de trabajo	UHF 868-928MHz	UHF 868-928MHz
Rango de cobertura	10cm-3m	Hasta 10m
Memoria disponible	96-256 bits	--
Modulación	ASK	ASK/PSK
Tasa Tx/Rx	40 Kbps	80Kbps
Potencia máxima de la antena	--	10 W
Ganancia antenas	--	6dBi
Máxima potencia RF del lector	--	4W

A. Escenario 1: Lector ciclo estático.

En un primer escenario se ha simulado un sistema RFID pasivo con un lector de ciclo estático que permite establecer el número de *slots* por ciclo con valores de $Q \in 0, \dots, 15$. Se ha simulado la llegada de distintas poblaciones de *tags* a la zona de cobertura para su identificación. Los resultados obtenidos de la simulación se muestran en la Fig. 4. En el eje X se representan los *tags* que en un determinado momento entran en la zona de cobertura para identificarse. El eje Y representa el número medio de *slots* por ciclo. La curva asociada a cada Q define un intervalo donde el número de *slots* para la identificación es mínimo con respecto a las otras curvas. Para la configuración óptima, los extremos de estos intervalos se corresponden con los distintos puntos de intersección de estas curvas (mostradas en la Fig. 4). De la Fig. 4 se obtiene la tabla V de donde se deduce el valor óptimo de Q para minimizar el tiempo de lectura (número de *slots*) de una población de N *tags*.

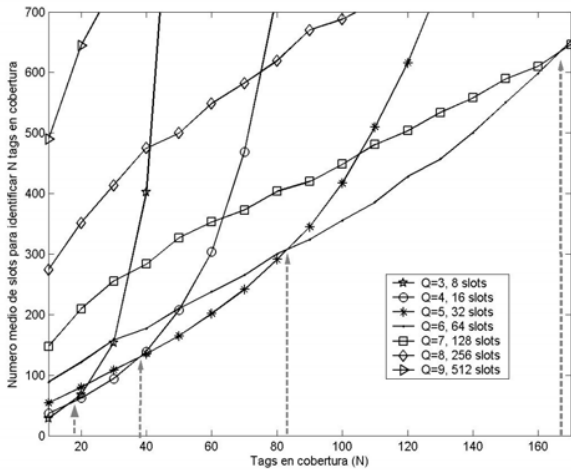


Fig. 4. Numero medio de slots vs número de tags para distintos valores de Q.

TABLA V
Q ÓPTIMA QUE MINIMIZA EL NÚMERO MEDIO DE SLOTS PARA LA IDENTIFICACIÓN

Q óptima	Nº de slots (K)= 2 ^Q	Tags en cobertura (N)
1	2	N ≤ 4
2	4	4 ≤ N < 8
3	8	8 ≤ N < 19
4	16	19 ≤ N < 38
5	32	38 ≤ N < 85
6	64	85 ≤ N < 165
7	128	165 ≤ N < 340
8	256	340 ≤ N < 720
9	512	720 ≤ N < 1260
10	1024	1260 ≤ N < 2855
11	2048	2855 ≤ N < 5955
12	4096	5955 ≤ N < 12124
13	8192	12124 ≤ N < 25225
14	16384	25225 ≤ N < 57432
15	32768	57432 ≤ N

B. Escenario 2: Lector de ciclo dinámico.

Los lectores actuales con el algoritmo de adaptación de Q recomendado en el estándar EPCglobal [13]. Este algoritmo no establece un mecanismo concreto para obtener el valor de Q que maximiza la tasa de identificación, es decir, el número de tags identificados por slot. Conocer dicha longitud es útil en escenarios donde el lector pueda conocer a priori el número de tags que compiten en cada ciclo. En este artículo no entramos en la problemática de obtener el número de tags que compiten en cada ciclo de identificación sino que se supone conocida dicha población y este trabajo se centra únicamente en el problema de la determinación de la longitud óptima de ciclo.

Se ha reutilizado el simulador del escenario previo, pero, en este caso, el número de tags contendientes es idéntico ciclo a ciclo. Como resultado se ha obtenido el valor de Q óptima la tasa media de identificación (tags identificados/número de slots) para distintas longitudes de ciclo. De las simulaciones

realizadas se extrae la Fig. 5 donde se comprueba que la máxima tasa de identificación para los distintos valores de Q es 0.36, que coincide con el mejor valor teórico de FSA. Solo se muestran los valores de Q ∈ [2,..., 7] para tener una mejor visibilidad de los resultados. De la Fig. 5 se extrae la tabla VI, donde se establece el valor óptimo de Q que maximiza el número de identificaciones en un ciclo. Los límites establecidos para cada valor de Q se han obtenido de la intersección entre dos curvas consecutivas de Q.

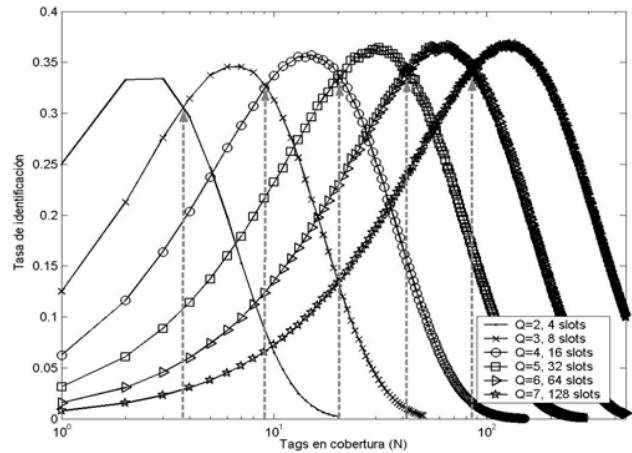


Fig. 5. Tasa de identificación vs número de tags para distintos valores de Q.

TABLA VI
Q ÓPTIMA QUE MAXIMIZA DE LA TASA DE IDENTIFICACIÓN EN UN CICLO

Q óptima	Nº de slots (K)= 2 ^Q	Tags en cobertura (N)
1	2	N ≤ 2
2	4	2 ≤ N < 4
3	8	4 ≤ N < 9
4	16	9 ≤ N < 20
5	32	20 ≤ N < 42
6	64	42 ≤ N < 87
7	128	87 ≤ N < 179
8	256	179 ≤ N < 364
9	512	364 ≤ N < 710
10	1024	710 ≤ N < 1430
11	2048	1430 ≤ N < 2920
12	4096	2920 ≤ N < 5531
13	8192	5531 ≤ N < 11527
14	16384	11527 ≤ N < 23962
15	32768	23962 ≤ N

VI. RESULTADOS EXPERIMENTALES: LECTOR ALIEN 8800

Para contrastar los resultados obtenidos en el análisis y la simulación, se han realizado unos experimentos con el sistema RFID pasivo Alien 8800 configurado como lector de ciclo estático, en la banda UHF a 868 Mhz con dos antenas de polarización circular, instaladas una frente a otra a una distancia de 2 metros, y actuando una como transmisor y otra como receptor. Los parámetros de configuración que se han establecido se muestran en la tabla IV. El protocolo de comunicaciones empleado en este sistema es EPCglobal Class-1 Gen-2 con Q estática modificable por el usuario. Este lector solo permite establecer los valores de Q ∈ [1,..., 7].

Se ha realizado el experimento con los distintos valores de Q configurables en el lector y distintas poblaciones de *tags*. Se han obtenido resultados del tiempo de identificación ya que el software del lector no permite obtener el número medio de *slots* para la identificación. Cada uno de los experimentos se ha repetido 100 veces y el valor de los resultados obtenidos se muestra en la tabla VII. Se observa como los resultados son similares a los obtenidos en el análisis de la sección IV y en la simulación de sistemas con lector de ciclo estático de la sección V. Se observa una mínima desviación de los resultados en el cuadro marcado. Hay que tener en cuenta que al realizar medidas con un sistema RFID real las condiciones ambientales, el entorno, la propagación de la señal, etc. afecta en los resultados.

TABLA VII
TIEMPO MEDIO DE IDENTIFICACIÓN EN RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tags(N)	Número de slots (K) = 2 ^Q			
	8	16	32	64
10	0.041	0.042	0.067	0.089
20	0.091	0.089	0.911	0.142
30	0.157	0.139	0.143	0.163
40	0.340	0.172	0.192	0.189
50	0.823	0.243	0.201	0.241
60	2.021	0.311	0.253	0.279
70	5.213	0.414	0.298	0.296
80	12.25	0.697	0.348	0.349
90	53.66	0.921	0.394	0.379

VII. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos analizado la configuración óptima de ciclo para lectores RFID, atendiendo a la población de *tags* a identificar. Se han analizado dos modos de funcionamiento, que se corresponden con los tipos de lectores disponibles:

- Lectores de ciclo estático, donde la longitud de ciclo no puede variarse en el proceso de lectura. Para esta configuración hemos determinado la mejor longitud de ciclo para minimizar el tiempo esperado de lectura.
- Lectores de ciclo dinámico, donde la longitud de ciclo puede variarse en cada ciclo. En este caso hemos obtenido el mejor valor de la longitud de ciclo que podemos establecer al comienzo de un ciclo donde el número de *tags* a identificar sea conocido. En este escenario maximizamos el ratio esperado de identificaciones por *slot*.

A la vista de los resultados (tablas V y VI), pueden observarse diferencias notables según el criterio escogido. Por ejemplo, en el caso estático el valor de $Q=5$ ha de emplearse para un número de *tags* entre 20 y 42. En cambio para el caso dinámico, $Q=5$ se escogerá si la población está entre 38 y 85 *tags*.

Como trabajos futuros pretendemos implementar criterios que permitan a los lectores estimar ciclo a ciclo la población de etiquetas. Junto con el criterio de selección de longitud de ciclo presentado en este trabajo, estos estimadores nos

permitirán implementar lectores de ciclo dinámico con un funcionamiento cercano al óptimo.

REFERENCIAS

- [1] Finkenzeller, K. "RFID Handbook: Radio-Frequency Identification Fundamentals and Applications", John Wiley, New York, 2000.
- [2] Shih, D., Sun, P., Yen, D., Huang, S., "Taxonomy and survey of RFID anti-collision protocols", Elsevier Computer Communications, vol. 29, pp. 2150-2166, 2006.
- [3] Vogt, H., "Efficient Object Identification with Passive RFID Tags", Lecture Notes in Computer Science, vol. 2414, pp. 98-113, 2002.
- [4] Zhou, F., Chen, C., Jin, D., Huang, C., Min, H., "Evaluating and Optimizing Power Consumption for Anti-Collision Protocols for Applications in RFID Systems", en *Proc. Int. Symposium on Low Power Electronics and Design 2004*, pp. 357-362, 2004.
- [5] Wieselthier, J. E., Ephremides, A., Michaels, L. A., "An exact analysis and performance evaluation of framed ALOHA with capture", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 37(2), pp. 125-137, 1988.
- [6] Symbol: <http://www.tecno-symbol.com/>
- [7] ThingMagic Mercury4: <http://www.thingmagic.com>
- [8] Caen: <http://www.caen.it/rfid/index.php>
- [9] Awid: <http://www.awid.com>
- [10] Samsys: <http://www.samsys.com>
- [11] Intermec Reader: http://www.intermec.es, psfiles.intermec.com/eps_files/eps_brochure/RFIDReader_brochure_web.pdf
- [12] Alien Reader: <http://www.alientechology.com/readers/index.php>
- [13] EPCglobal: Class 1 Generation 2 UHF Air Interface Protocol Standard Version 1.0.9: Gen 2. Online: <http://www.epcglobalinc.org/standards>
- [14] Kawakita, Y., Mitsugi, J. "Anti-collision performance of Gen 2 Air Protocol in Random Error Communication Link", *Proc. Int. Symposium on Applications on Internet Workshops*, pp. 68-71, 2006.
- [15] Mitsugi, J., Yumoto, Y., Hada, H., Murai, J. "Auto-ID Labs. Activities and collaborations in wireless technology for the harmonized deployment of UHF RFID system", *Auto-ID Labs Research Workshop, Zurich, 2004*.
- [16] Joe, I., Lee, J. "A novel Anti-Collision Algorithm with Optimal Frame Size for RFID System", *Fifth International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications, 2007*.
- [17] Jacomet, M., Ehram, A., Gehring, U. "Contactless Identification device with anticollision algorithm", en *Proc. of IEEE Conference on Circuits, Systems, Computers and Communications*, pp. 269273. Athens, Greece, July 1999.
- [18] Jihoon Myung, Wonjun Lee. "Adaptive Binary Splitting: A RFID tag Collision Arbitration Protocol for tag Identification". *Mobile Networks and Applications Journal*, vol. 11, pp. 711722. May 2006.
- [19] G. Khandelwal, L. Kyoungwan, A. Yener, S. Serbetli, "ASAP: A MAC Protocol for dense and Time Constrained RFID Systems", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2007, Article ID 18730, 2007.
- [20] J. Cha, J. Kim, "Novel Anti-collision Algorithms for Fast Object Identification RFID System", en *Proc. of the 11th Conference on Parallel and Distributed Systems*, vol. 2, pp. 63-67, 2005.
- [21] C. Floerkemeier, "Transmission control scheme for fast RFID object identification", en *Proc. of the Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'06)*, pp. 457-462, Pisa, Italia, Marzo 2006.
- [22] C. Floerkemeier, M. Wille, "Comparison of Transmission schemes for framed ALOHA based RFID protocols", in *International Symposium on Applications and the Internet Workshops (SAINT'06)*, pp. 92-95, Phoenix, Ariz, USA, Enero 2006.
- [23] Egea-Lopez, E., Vales-Alonso, J., Martinez-Sala, A. S., Bueno-Delgado, M. V., Garcia-Haro, J. "Performance Evaluation of non-persistent CSMA as anti-collision procedure for active RFID tags", *5th International Conference on Wired/Wireless Internet Communications (WWIC2007)*, Coimbra, Portugal, Mayo 2007.
- [24] Norris, J. R., *Markov Chains*, Cambridge University Press, 1997.
- [25] Matlab on line: <http://www.mathworks.com>
- [26] A. Vargas, "The OMNeT++ Discrete Event Simulation System", *European Simulation Multiconference ESM 2001, Prague (Czech Republic)*, Junio 2001.