

## Análisis y caracterización de la frecuencia de enlace por retro-dispersión en sistemas UHF-RFID pasivos

J. Blanco<sup>a,\*</sup>, A. García<sup>b</sup>, V. Cañas<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Grupo Autolog, Escuela Politécnica de Cuenca, Universidad de Castilla-La Mancha, Cuenca, 16071, España.

<sup>b</sup> Grupo Autolog, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, 13071, España.

### Resumen

La tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID) es clave para la visualización de cada objeto en el marco de la Internet de las Cosas. Y más concretamente, la tecnología pasiva es la más extendida e implantada, ya que un lector puede identificar multitud de etiquetas en un corto periodo de tiempo. Cada etiqueta responde al lector a través de una subportadora denominada Frecuencia de Enlace por Retro-dispersión (Backscatter-Link Frequency, BLF). Con el objetivo de caracterizar este parámetro, en este artículo se emplea un conjunto de pruebas para evaluar la aleatoriedad de valores de BLF medidos y obtenidos de etiquetas comerciales. Los resultados muestran grandes variaciones de este parámetro respecto al primer valor esperado por el lector, así como durante el proceso de comunicación. Este comportamiento puede ser aprovechado como una característica diferenciadora de cada etiqueta y puede emplearse en los procesos de comunicación u otros fines. Consiguiendo, en definitiva, etiquetas pasivas más eficientes.

### Palabras Clave:

Identificación por radiofrecuencia, etiqueta pasiva, frecuencia de enlace por retro-dispersión, dispersión de frecuencia, protocolo de comunicación, secuencias pseudo-aleatorias.

### Analysis and characterization of the backscatter-link frequency in passive UHF-RFID systems

### Abstract

Radio-frequency identification technology (RFID) is key for the visualization of each object in the Internet of Things framework. Specifically, passive technology is the most widespread type of the worldwide implemented systems, due to a reader can identify multitude of tags in a short period of time. Each tag responds to the reader at a subcarrier called Backscatter-Link Frequency (BLF). In order to characterize this parameter, a set of tests has been used in this paper to assess the randomness of measured BLF values from commercial tags. The results show great variations of this parameter comparing with the first expected value in the reader, as well as during the communication process. This behavior can be used as a distinguishing feature of each tag, in communication processes or for other purposes. Ultimately, creating and providing more efficient passive tags.

### Keywords:

Radio-frequency identification, passive tag, Backscatter-Link Frequency, frequency dispersion, protocol communication, pseudorandom sequences.

## 1. Introducción

Actualmente, nos encontramos a las puertas de la implantación real del paradigma de la Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT), en el que cualquier objeto es susceptible de estar online e interactuar con otros objetos presentes en la red. Gracias a los avances tecnológicos, los

objetos que comúnmente conocemos serán dotados de características operativas que hasta ahora nos resultarían inimaginables (Zhang et al., 2017). Esta nueva forma de trabajar con los objetos trae consigo la aparición de un aumento exponencial del volumen de información, que debe ser adecuadamente gestionado por las redes, así como un importante incremento de la operativa que deben ser capaces

\*Autor para la correspondencia: [jesus.blanco@uclm.es](mailto:jesus.blanco@uclm.es)

de realizar los dispositivos electrónicos asociados a los objetos físicos. Por lo que, por un lado, se requiere la creación de infraestructuras de red que soporten la tecnología que se implementará sobre ellas. Y por otro, se ha de reducir al mínimo posible la cantidad de operaciones que han de realizar los dispositivos, de manera que éstos sean lo más eficientes posibles.

Otro aspecto fundamental que debe tenerse en cuenta para evitar inconsistencias y errores de la red (como por ejemplo, las duplicidades) y que en definitiva, el sistema sea lo menos vulnerable posible, es que cada uno de los objetos que se encuentren en la red sean claramente identificados de forma unívoca (Badru & Ajayi, 2017). En este sentido, los estándares impulsados en torno al Código Electrónico de Producto (Electronic Product Code, EPC), desarrollados por EPCglobal® y GS1, están siendo ampliamente acogidos por la industria a nivel mundial. En estas especificaciones se detalla el uso de la tecnología de Identificación por Radiofrecuencia (Radio Frequency Identification, RFID), para hacer visibles cada uno de los objetos que participan en una red. Los estándares que describen cómo se ha de gestionar toda la información que proporcionan cada uno de los ítems identificados se recoge en el marco de trabajo de *EPC Information System* (EPCIS) (GS1, 2016).

En lo que respecta a la identificación de los objetos, la tecnología RFID pasiva es la más extendida e implantada en la industria (Badru & Ajayi, 2017). Ello es debido, en parte, al reducido coste de las etiquetas pasivas que se asocian a cada objeto que se desea identificar y a la relativa baja inversión que se ha de realizar para su implantación frente a otras alternativas de RFID. Desde sus comienzos la tecnología RFID pasiva se ha ido perfeccionando. Gracias a los avances obtenidos durante años de investigación y que se han ido recogiendo en las versiones de los estándares, actualmente la convierten en una tecnología madura y que, a pesar de sus dificultades técnicas, presenta grandes resultados. Pero que precisa de nueva revisión y cambio para adaptarse a las nuevas exigencias y demandas de los marcos de trabajo actuales, como es el caso de la IoT (White, Nallur, & Clarke, 2017).

De algunos de los trabajos desarrollados en los últimos años para mejorar la tecnología RFID pasiva, como en (Bratuz, Vodopivec, & Trost, 2014), se desprende la evidencia de que cada etiqueta pasiva de RFID responde al lector con una velocidad ligeramente distinta a la que en un principio (teóricamente) espera el lector. Este efecto es algo común a cualquier dispositivo que utiliza osciladores, debido a la propia naturaleza de los mismos. Dada la peculiaridad y particularidad de este hecho, en el presente trabajo se ha decidido medir y analizar dicha velocidad para determinar si esas variaciones pueden presentar algún patrón determinado. Y poder, dado el caso, aplicar este fenómeno a otros procesos que se llevan a cabo en las etiquetas RFID pasivas. La simplificación de los generadores de números aleatorios utilizados en las etiquetas a la vez que se mejoran sus prestaciones es una posible aplicación de este estudio. Ya que estas variaciones podrían ser utilizadas como semilla. Otra aplicación puede ser la mejora de las posibilidades de incluir encriptación en las etiquetas.

En la sección 2 del documento se explica en profundidad cómo se produce el proceso de identificación de una etiqueta pasiva de RFID, destacando especialmente el papel de la

velocidad de respuesta de cada etiqueta y la importancia de que éstas incorporen un generador de números aleatorios. En el punto 3 se describen las medidas llevadas a cabo y se muestran los resultados obtenidos. Y en el punto 4 se recogen algunas de las posibles aplicaciones que surgen a partir del presente estudio. Para finalizar, en el punto 5 se recopilan las principales conclusiones del trabajo llevado a cabo. Y se plantean una serie trabajos futuros que profundicen el presente estudio y amplíen el ámbito de aplicación de los resultados obtenidos.

## 2. La Comunicación en la Tecnología RFID pasiva

El proceso de identificación de etiquetas RFID pasivas consiste en un diálogo entre el lector y cada etiqueta mediante el que se obtienen los códigos unívocos de todas y cada una de las etiquetas presentes en el rango de cobertura del lector. Esta comunicación comienza con la emisión de una portadora a la frecuencia de trabajo por parte del lector. Sobre esta señal se modulará la codificación de los comandos que emita el lector, que serán recibidos e interpretados por las etiquetas. A su vez, la respuesta de cada etiqueta será la reflexión de la misma portadora modulada con la información que cada una de ellas deba transmitir.

Para responder físicamente al lector y dado que las etiquetas RFID pasivas carecen de fuente de alimentación independiente, cada etiqueta modula y refleja (backscatter) la señal del lector, obteniéndose en la antena del lector una señal  $a_t(t)$  definida por (1).

$$a_t(t) = x_b(t) \cdot \cos(2\pi f_c t + \theta_b) \quad (1)$$

Donde  $x_b$ ,  $f_c$ , y  $\theta_b$ , son la señal moduladora con los datos binarios de respuesta, la frecuencia de la portadora emitida por el lector y el desfase introducido por la etiqueta, respectivamente (Dawei Shen, Woo, Reed, Lippman, & Junyu Wang, 2009). Y describiéndose la señal binaria de respuesta en el lector como dos valores diferentes de intensidad de señal: el valor modulado y el no modulado.

La velocidad de transmisión a la que una etiqueta debe responder al lector, coincide con el valor de la frecuencia subportadora a la que la etiqueta pasiva modula la portadora emitida por el lector (868 MHz, banda de UHF) para elaborar la respuesta por retro-dispersión y que se denomina *Backscatter-Link Frequency* (BLF), según la especificación EPC Gen2 (GS1, 2018). Su valor se obtiene a partir de (2), donde  $DR$  (Divided Ratio) es un parámetro enviado por el lector en el comando *Query* y  $TR_{cal}$  es un intervalo de tiempo que se obtiene directamente del preámbulo que precede a dicho comando. Por tanto, el valor en frecuencia de la subportadora que contiene la información de respuesta de una etiqueta RFID pasiva, depende de la información que el lector emita y está directamente relacionada con el valor medido del intervalo  $TR_{cal}$  por parte de la etiqueta.

$$BLF = \frac{DR}{TR_{cal}} \quad (2)$$

De acuerdo con la especificación EPC Gen2 (GS1, 2018), diseñada para la banda de UHF, un lector RFID gestiona a una población de etiquetas mediante tres operaciones: *Select*, mediante la que se escoge una población determinada de

etiquetas que serán objeto de identificación; *Inventory*, mediante la que se identifican individualmente cada etiqueta seleccionada previamente; y *Access*, mediante la que el lector se comunica con etiquetas previamente identificadas.

Una vez seleccionado el conjunto de etiquetas, mediante la selección de parámetros como la sesión de lectura o los *selected* o *inventoried flags* en cada tag, la ronda de identificación comienza con el lanzamiento de un comando *Query* por parte del lector. Y que a su vez, va precedido de un preámbulo que contiene la información necesaria para que la etiqueta interprete adecuadamente la señal recibida del lector, como duración de símbolos o calibración de velocidades de transmisión y recepción. Los parámetros de este comando dictaminan qué etiquetas de las inicialmente seleccionadas participan en la ronda. Una vez el comando es recibido en la etiqueta, cada una de ellas selecciona un valor aleatorio o pseudo-aleatorio en el rango  $(0, 2^Q-1)$ , siendo  $Q$  uno de los parámetros del comando *Query*. Y carga dicho valor en un contador decreciente (*slot-counter*) que se actualiza según los comandos *QueryRep*, mediante el que se decreta valor del contador en cada etiqueta y *QueryAdjust*, que modifica el valor del parámetro  $Q$  y por tanto, obliga a la etiqueta a actualizar y cargar un nuevo valor en su *slot-counter*. Cuando dicho contador alcanza el valor de cero, cada etiqueta responde al lector un número aleatorio o pseudo-aleatorio de 16 bits denominado *Unique Identified Number (UID)* o *RN16*.

Dado que el valor que cada etiqueta carga en su *slot-counter* es un número aleatorio o pseudo-aleatorio, se presupone que cada etiqueta debería responder en un instante distinto de tiempo. Pero en la práctica este fenómeno no siempre ocurre (Solic, Maras, Radic, & Blazevic, 2017). Si el lector recibe adecuadamente una respuesta, envía a la etiqueta un comando *ACK* con su *RN16* recibido. Lo que indica que el tag ha sido correctamente inventariado por el lector y puede continuar la comunicación con la etiqueta: para identificarla o para acceder a su banco de memoria mediante las operaciones de lectura o escritura que se deseen. En cambio, si el lector no recibe adecuadamente la respuesta de la etiqueta responderá un *ACK* erróneo, por lo que el proceso de identificación no continuará. Si varias etiquetas contestan al mismo tiempo sucede una colisión, dado que el canal es ocupado por varios mensajes en el mismo instante de tiempo. Y dependiendo del tipo de colisión, el lector puede ser capaz de detectarla y resolverla. Es precisamente en este punto donde se ha desarrollado gran trabajo en los últimos años mediante aportaciones y empleo de nuevas técnicas a los protocolos anticolisión, con el fin de evitar o minimizar la aparición de este fenómeno (Bagheri, Alenaby, & Safkhani, 2017; Chen, Su, & Yi, 2017; Duan, Zhang, Wang, & Duan, 2017; Huang, Hwang, Lee, & Chung, 2017; Shoufeng, Dongchen, Xiaoyan, Shumeng, & Tinglan, 2014; Su, Sheng, Hong, & Wen, 2016; Wijayasekara et al., 2017; Yong, Qing, Lei, & Hao, 2017). Lo que se traduce en una mejora del funcionamiento del proceso de identificación de etiquetas.

En otras ocasiones otro problema que dificulta el adecuado funcionamiento del proceso de identificación es la aparición del *Efecto Captura* que se manifiesta cuando la diferencia de nivel entre las respuestas de dos etiquetas es lo suficientemente grande como para que una enmascare y prevalezca sobre la otra. De lo que resulta que el lector contesta como si únicamente una etiqueta hubiera respondido.

Dado que el *ACK* esperado es el mismo en ambos casos, las dos etiquetas se consideran identificadas, cuando en realidad el lector únicamente ha reconocido a una de ellas. Por lo que en este caso, una etiqueta queda sin identificar. En (Bratuz et al., 2014), se describe más a fondo el problema y se realizan algunas propuestas para tratar de evitarlo como el análisis en frecuencia de la señal recibida. En (Choi, Kim, & Choi, 2017) se propone la utilización de protocolos específicos para resolver el efecto captura. Y en (Wu, Wang, & Zeng, 2018) se propone un algoritmo de estimación para minimizar el efecto captura en identificaciones masivas.

Una vez la etiqueta ha sido contabilizada por el lector, se pueden suceder una serie de operaciones que implican un mayor intercambio de información entre el lector y la etiqueta, como pueden ser el acceso a diferentes partes de la memoria, escritura de datos, comprobaciones, etc. Para ello, se emplean protocolos que incluyen técnicas de autenticación y mecanismos de seguridad. Y para los cuales se requiere una mayor capacidad de cómputo y por tanto, una mayor cantidad de energía disponible para poder ejecutar las operaciones necesarias (Arjona, Simon, & Ruiz, 2018). Siendo ésta, otra de las principales limitaciones de las etiquetas RFID pasivas, puesto que únicamente se alimentan de la energía procedente de la señal de RF, emitida por el lector, y que incide sobre ellas.

Además, para poder realizar adecuadamente las operaciones anteriormente descritas y de acuerdo a la especificación EPC Gen2 (GS1, 2018), las etiquetas pasivas deben implementar un generador de números aleatorios o pseudo-aleatorios, dado que es necesario para diversas operaciones (tal y como se ha mencionado anteriormente). Por ejemplo, para generar el número que deben cargar en el *slot-counter*, o para generar la respuesta *RN16* con la que la etiqueta debe responder al lector. Únicamente en estos primeros pasos del proceso de comunicación entre lector y etiqueta, el generador de números aleatorios o pseudo-aleatorios es empleado varias veces. Y posteriormente, es usado en operaciones y algoritmos más complejos. Por lo que el generador de números aleatorios o pseudo-aleatorios que debe estar implementado en todas las etiquetas pasivas es una parte crucial de su lógica interna y que incide directamente en el adecuado funcionamiento de las comunicaciones entre lector y etiqueta.

La implementación de soluciones lógicas en circuitos integrados (chips), conlleva la aparición de incertidumbres en los valores de los distintos parámetros y operaciones. Además, debido a que las etiquetas RFID pasivas deben ser cada vez más baratas, se construyen con componentes que presentan unas tolerancias considerables. Por lo que valores como la medida del parámetro *TRcal* u otras operaciones pueden variar ligeramente de unas etiquetas a otras. E incluso producirse este efecto para una misma etiqueta en distintos instantes de tiempo. Además, entendiendo las etiquetas pasivas como un sistema aislado, carecen de referencia externa con la que poder comparar si los valores medidos o los resultados de las operaciones que realiza son correctos o se han desviado respecto al valor esperado.

Teniendo en cuenta este fenómeno y centrándonos en el hecho de que una etiqueta calcula la frecuencia de la subportadora a la que debe responder al lector en base a la información contenida en la señal que éste le envía, tal y como se recoge en la ecuación (2). Cada etiqueta contestará al

lector a una frecuencia ligeramente distinta (superior o inferior) a la esperada por el lector. Por ello, en la especificación EPC Gen2 se recoge que este valor de frecuencia de respuesta de la etiqueta (BLF) debe estar dentro de un determinado rango. Y que a su vez, este valor se mantenga estable durante la comunicación con el lector. En la Tabla 1 se muestran algunas de estas tolerancias.

Realizando un análisis frecuencial de la señal de respuesta de la etiqueta al lector, se observa como la mayor parte de la energía se concentra en torno al valor de la subportadora (BLF). Y a su vez, puede apreciarse claramente en el espectro la desviación de la subportadora respecto a la frecuencia inicialmente esperada por el lector. Por lo que analizando el espectro de todas las señales recibidas en el lector puede diferenciarse cada una de las respuestas correspondientes a cada una de las etiquetas que contestan al lector. Este comportamiento ha sido aprovechado en (Bratuz et al., 2014), donde se propone su uso para minimizar el número de colisiones entre respuestas de etiquetas así como el efecto captura. Siendo posible, gracias al análisis espectral del preámbulo de la señal que recibe el lector como respuesta. En caso de colisión o que varias etiquetas contesten en el mismo instante, el espectro de la señal muestra el número de etiquetas distintas que han participado en esa respuesta. Por lo que, el lector puede actuar en consecuencia e identificar de forma adecuada cada una de ellas.

Tabla 1: Tolerancias permitidas para el BLF (GS1, 2018).

DR	TRcal ( $\mu\text{s} \pm 1\%$ )	BLF (kHz)	Tolerancia (temp. nominal)	Variación durante la retro- dispersión
64/3	33.3	640	+/- 15%	+/- 2.5%
	33.3 < TRcal < 66.7	320 < BLF < 640	+/- 22%	+/- 2.5%
	66.7	320	+/- 10%	+/- 2.5%
	66.7 < TRcal < 83.3	256 < BLF < 320	+/- 12%	+/- 2.5%
	83.3	256	+/- 10%	+/- 2.5%
	83.3 < TRcal ≤ 133.3	160 ≤ BLF < 256	+/- 10%	+/- 2.5%
	133.3 < TRcal ≤ 200	107 ≤ BLF < 160	+/- 7%	+/- 2.5%
8	200 < TRcal ≤ 225	95 ≤ BLF < 107	+/- 5%	+/- 2.5%
	17.2 ≤ TRcal a 25	320 < BLF ≤ 465	+/- 19%	+/- 2.5%
	25	320	+/- 10%	+/- 2.5%
	25 < TRcal < 31.25	256 < BLF < 320	+/- 12%	+/- 2.5%
	31.25	256	+/- 10%	+/- 2.5%
	31.25 < TRcal < 50	160 < BLF < 256	+/- 10%	+/- 2.5%
	50	160	+/- 7%	+/- 2.5%
50 < TRcal ≤ 75	107 ≤ BLF < 160	+/- 7%	+/- 2.5%	
75 < TRcal ≤ 200	40 ≤ BLF < 107	+/- 4%	+/- 2.5%	

### 3. Análisis y Medida de la Frecuencia de Enlace por Retro-dispersión

Teniendo en cuenta la evidencia de que la subportadora con la que una etiqueta pasiva de RFID responde al lector

(BLF) presenta una desviación respecto al valor teórico al que debería responder, este fenómeno puede interpretarse como un signo de singularidad de cada una de las etiquetas que participan en el proceso de identificación.

En este trabajo se propone realizar un estudio para caracterizar este comportamiento físico y natural de las etiquetas RFID pasivas para la banda de UHF. Y poder establecer si esta característica singular de cada una de ellas puede ser empleada en los procesos de comunicación entre el lector y la etiqueta.

Dado que está probado que distintas etiquetas presentan un BLF distinto y puesto que se desea conocer el alcance y aplicabilidad de este fenómeno, este trabajo se ha centrado en el caso más restrictivo: caracterizar una única etiqueta. Y de manera que los resultados puedan extrapolarse al resto de etiquetas. Por tanto, el estudio se centra en una etiqueta comercial escogida de entre las más comunes y utilizadas en la industria.

La obtención del valor de la subportadora que contiene la información que contesta la etiqueta (BLF) se realiza directamente mediante la captura y análisis de la señal recibida de la misma. Y posteriormente, estudiando y analizando la variación de este parámetro a lo largo del tiempo y bajo varios supuestos.

#### 3.1. Configuración de la Medida

Para la obtención de los distintos valores de BLF, se va a capturar la señal de la etiqueta mediante un sistema de adquisición de datos, del que se obtiene el valor de este parámetro a partir del análisis de la señal recibida.

El equipo de medida empleado y que actúa como lector/analizador, ha sido el *RFID Xplorer* de CISC® Semiconductor. El montaje para la medida ha constado de una antena UHF tipo parche de 5 dBi, un circulator de radiofrecuencia que permite aislar la señal de transmisión de la de recepción y la unidad de adquisición de datos. Para su manejo, basta con conectarla a un puerto USB de un ordenador con capacidad suficiente para ejecutar adecuadamente el programa que recoge y analiza los datos.

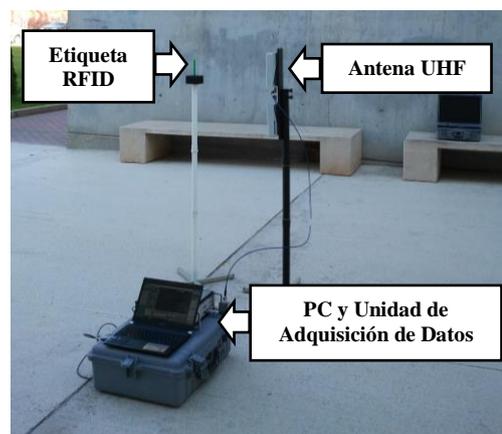


Figura 1: Ejemplo de una medida.

Para la captura de datos, la etiqueta pasiva se coloca a una distancia de 50 cm en línea recta respecto de la antena, de manera que sobre la etiqueta incida la mayor cantidad de radiación posible (Figura 1). Todas las medidas se realizan bajo condiciones de espacio libre y a una temperatura de 20°C.

Las medidas se realizan mediante el lanzamiento de una secuencia de comandos por parte del lector, que se corresponden con los empleados en un proceso de lectura habitual. Además, dado que el equipo de medida permite escoger la secuencia de comandos a utilizar, se plantea la realización dos estudios diferentes: uno para caracterizar la variación del valor de BLF de la etiqueta entre distintas respuestas independientes y otro para observar su variación al responder a distintos comandos durante el mismo proceso comunicativo (diálogo).

Durante todas las medias, el equipo de medida, que actúa como lector, ha sido configurado de modo que emite un preámbulo cuyo *TRcal* tiene una duración de 66.656  $\mu$ s y el parámetro *DR* del comando *Query* toma el valor 64/3. Por lo que teniendo en cuenta la ecuación (2), en teoría cabría esperar un valor de BLF de 320,05 kHz como subportadora de respuesta por parte de la etiqueta en todos los casos.

### 3.2. Estudio para Respuestas Independientes

Por un lado, se estudia la variación del BLF de la etiqueta para respuestas independientes (*different backcattering*). Para ello, se lanzan únicamente comandos *Query* y se mide la subportadora en la que la etiqueta ha transmitido los datos de respuesta a este comando. Con el propósito de obtener una muestra representativa del fenómeno, se han realizado 50 repeticiones independientes del proceso. Y cuyos resultados pueden verse en la Figura 2, donde se muestra el valor medio, máximo y mínimo de BLF para cada una de las veces que se ha realizado el experimento. El valor medio de BLF de todas las respuestas medidas es 425,43 kHz, siendo los valores máximo y mínimo recogidos 482,21 kHz y 300,7 kHz, respectivamente.

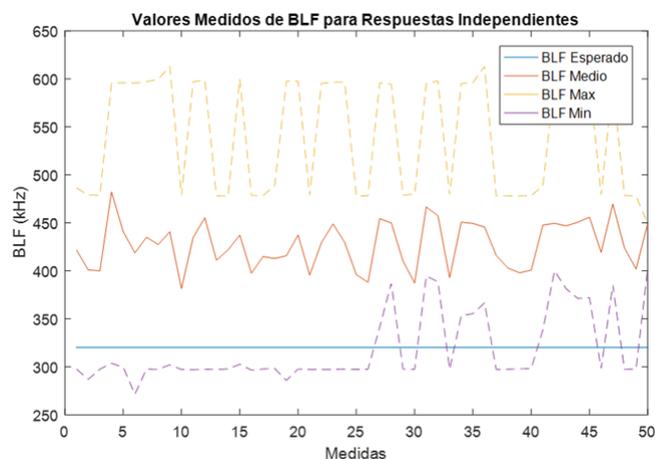


Figura 2: Resultados de la medida para respuestas independientes.

Contrastando los resultados obtenidos con las especificaciones que se supone deben cumplir las etiquetas (Tabla 1), se observa como prácticamente en la mayoría de las pruebas realizadas, la subportadora que contiene la información de respuesta de la etiqueta (BLF) excede de la tolerancia admisible ( $\pm 22\%$ ). Por lo que cabe destacar que desde este punto de vista, la etiqueta no cumple con la especificación EPC Gen2.

### 3.3. Estudio durante el Proceso de Retro-dispersión

Por otro lado, se analiza la evolución del BLF entre las distintas respuestas de la etiqueta al lector dentro de en un

mismo proceso de identificación (*during backscattering*). Para lo que se lanza la secuencia de comandos que se sucede en un proceso de identificación real: *Query – ACK – Req\_RN*, obteniéndose el valor de BLF para cada una de las respuestas a los comandos anteriores. En este caso, el proceso se ha repetido en 10 ocasiones y cuyos resultados pueden observarse en la Tabla 2. Además, se ha añadido en cada fila el margen de tolerancia que recoge la especificación EPC Gen2. Y que es el intervalo en el que se deben encontrar todos los valores de BLF durante todo el proceso de comunicación. Se puede apreciar cómo este requisito se cumple para la mayoría de los casos.

Tabla 2: Variaciones de BLF durante la retro-dispersión.

Medida	BLF (kHz) para cada comando			Margen de Tolerancia ( $\pm 2,5\%$ )	
	Query	ACK	ReqRN	Min.	Max.
1	381,05	386,52	400,31*	371,52	390,58
2	409,66	398,91	401,83	399,42	419,90
3	399,63	394,98	390,16	389,64	409,62
4	448,83	446,88	449,74	437,61	460,05
5	450,69	443,73	451,34	439,42	461,96
6	394,03	388,16	396,34	384,18	403,88
7	449,61	453,26	466,09*	438,37	460,85
8	453,45	450,63	450,39	442,11	464,79
9	401,53	394,72	409,89	391,49	411,57
10	399,58	391,81	395,01	389,59	409,57

\* fuera de rango.

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que, aunque la etiqueta no cumple con la especificación EPC Gen2 en cuanto al valor de BLF con el que responde al lector y se aleja del valor esperado considerablemente, este valor se mantiene relativamente estable una vez se ha iniciado la comunicación.

## 4. Discusión de Resultados y Aplicaciones

Los resultados obtenidos en los experimentos ponen en evidencia las grandes tolerancias existentes en las etiquetas RFID pasivas, debido en parte a su constitución física y componentes que la forman. Aun así, a pesar de la gran dispersión de los valores de BLF de la etiqueta bajo estudio, el lector ha sido capaz de interpretar la señal reflejada por la etiqueta en todos los casos. Lo que por otro lado demuestra la fiabilidad y robustez de la tecnología RFID.

Una vez caracterizado el comportamiento de este parámetro y puesto de manifiesto que lleva acarreado una gran incertidumbre, cabe preguntarse si esta peculiaridad se podría utilizar para mejorar la usabilidad y funcionamiento de la tecnología RFID pasiva. En este sentido y dado que una de las principales características obtenidas en el parámetro BLF es la incertidumbre, puede contemplarse la posibilidad de emplear este comportamiento como fuente de aleatoriedad para la generación de números pseudo-aleatorios en la etiqueta RFID pasiva.

Si comparamos la secuencia del valor medio de BLF para cada una de las medidas realizadas con una secuencia normal de números aleatorios, cuyos parámetros característicos sean la media y la desviación típica de la secuencia medida, se observa como los resultados obtenidos en las medidas pueden asemejarse a una secuencia de números aleatorios (Figura 3). Teniendo en cuenta que el presente trabajo se ha centrado en el estudio de una única etiqueta y que los valores medidos de BLF serán distintos si realizamos las medidas a otras etiquetas, se añade, si cabe, mayor incertidumbre y aleatoriedad al comportamiento de este parámetro. Por lo que no parece descabellado emplear esta variación de la BLF de una etiqueta para la obtención de números aleatorios o pseudo-aleatorios que ella misma debe generar durante los procesos de comunicación con el lector.

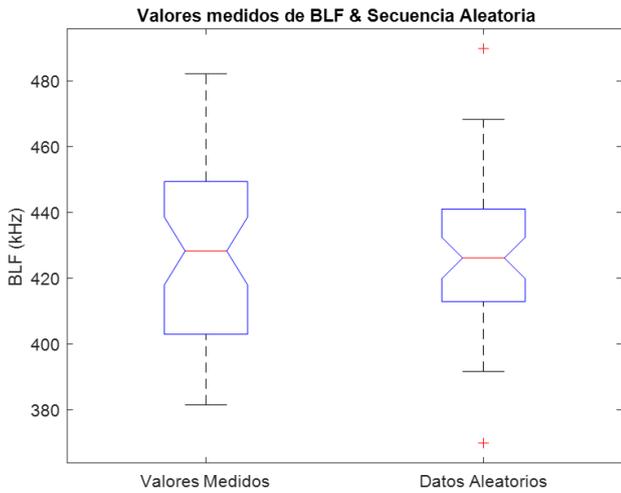


Figura 3: Comparación entre los valores medidos de BLF y una secuencia de datos aleatoria.

Conociendo que la etiqueta pasiva de RFID calcula la BLF según la ecuación (2). Y sabiendo que el  $DR$  es un parámetro fijo que puede tomar los valores de 8 y  $64/3$ . Y que el valor del  $TR_{cal}$  se obtiene a partir de la medida que la etiqueta hace sobre el preámbulo de la señal que envía el lector. Si el lector no modifica ninguno de estos parámetros, el resultado de BLF no debería variar. Pero lejos de obtenerse un valor único de BLF en los experimentos realizados, los resultados obtenidos muestran que la etiqueta calcula y responde con distinto BLF cada vez que ésta es interpelada para ello. De donde se desprende que el valor de la subportadora en la que la etiqueta contesta al lector depende directamente de la precisión en la medida del  $TR_{cal}$  y en el cálculo de la BLF.

Por un lado, el uso de componentes de bajo coste para abaratar el precio de las etiquetas, como un sistema de reloj de baja frecuencia, causa errores en las medidas de los parámetros que el lector envía a las etiquetas y contribuye a la variación en la BLF. Además, estas posibles fuentes de error se ven acentuadas por los procesos de fabricación física de las etiquetas, que introducen mayores incertidumbres (Salah, Ahmed, Robert, & Heuberger, 2015). Por otro lado, los procesos de cálculo que lleva a cabo una etiqueta deben ser sencillos, por lo que puede que la precisión con la que se calcula el valor de BLF añada nuevos errores al valor final que se obtiene para este parámetro. En la Figura 4 se representan los valores de BLF medidos frente a uno de los casos más desfavorables, como es el supuesto de que la etiqueta únicamente contemple 1 Byte para calcular el valor

de BLF (256 valores posibles). En ella se observa como incluso en este caso, la probabilidad de obtener un mismo valor de BLF es muy baja. En caso de mejorarse la precisión en el cálculo (asignando mayor cantidad de Bytes para codificar este valor), habrá más valores posibles y la probabilidad de que un valor de BLF se repitiese sería prácticamente nula. Con lo que se demuestra nuevamente que el valor de BLF que calcula una etiqueta RFID pasiva puede asemejarse a una fuente de aleatoriedad.

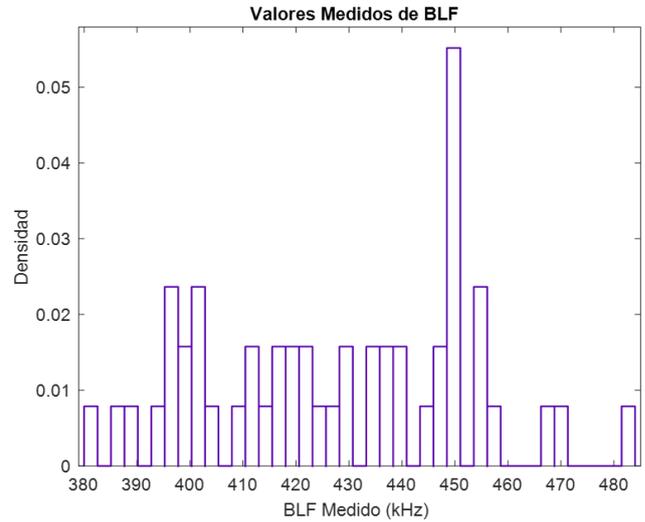


Figura 4: Distribución de los valores medidos de BLF con una precisión de 1 Byte.

A partir de los valores medidos de BLF y dadas las evidencias anteriormente mencionadas, se ha realizado una ligera transformación mediante operaciones sencillas para tratar de obtener una secuencia de números que se asemeje a una secuencia de aleatoria o pseudo-aleatoria de números en un determinado rango de interés. Esta sencilla transformación persigue el objetivo de comprobar si la variación del parámetro BLF, que a priori no sería buena, es apta para emplearse en otros ámbitos, como en los protocolos de comunicación entre etiqueta pasiva de UHF y lector RFID. Además, cabe tener en cuenta que el hecho de emplear operaciones sencillas responde al objetivo de minimizar en la medida de lo posible las operaciones lógicas que se deban realizar en las etiquetas, para que su potencial pueda ser aprovechado en otras nuevas funcionalidades.

En primer lugar, se obtiene la desviación de los valores de BLF medidos respecto al valor teórico esperado ( $BLF_{esp}$ ) tal y como se muestra en (3).

$$BLF_{diff} = BLF_{measured} - BLF_{esp} \quad (3)$$

Dado que todos los valores de  $BLF_{diff}$  se encuentran en el rango de unos 100 kHz. Y teniendo en cuenta que las etiquetas deben ser capaces de generar números aleatorios de 16 bits. Se escala y normaliza el valor de  $BLF_{diff}$  obtenido al rango  $[0, 2^{16}]$  según se describe en (4). En la Figura 5 se observa como la secuencia de números obtenida se puede asemejar a una secuencia de números aleatorios de 16 bits de una distribución uniforme discreta.

$$BLF_{NORM} = \frac{BLF_{diff} - \min(BLF_{diff})}{\max(BLF_{diff}) - \min(BLF_{diff})} \cdot 2^{16} \quad (4)$$

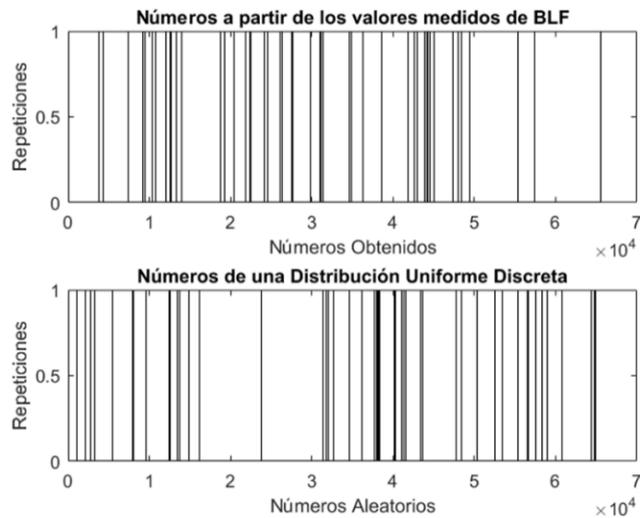


Figura 5: Comparación entre valores de  $BLF_{diff}$  normalizado y una secuencia de números aleatorios.

A la vista de los resultados anteriores, se ha estudiado la aleatoriedad de las secuencias de números obtenidos mediante varios test estadísticos. Concretamente, el estudio se ha realizado para la secuencia correspondiente a la diferencia del valor de BLF y el valor teórico esperado ( $BLF_{diff}$ ), y para la misma secuencia normalizada. En la Tabla 3 se muestran los resultados de los test anteriormente mencionados. En ella se observa como la secuencia modificada mediante operaciones sencillas (normalizada) pasa casi satisfactoriamente la mayoría de los test, mientras que la secuencia obtenida directamente a partir de los valores medidos presenta dificultades considerables en ciertos test.

Tabla 3: Resultados de las pruebas de aleatoriedad.

Test	Resultados estadísticos		
	$BLF_{diff}$	$BLF_{diff}$ normalizado	Rango de validación
$\chi^2$	16.4*	13.8	[4.1682, 14.6837]
Series	4.0816	3.3061*	[3.4895, 13.3613]
Huecos	1.7247	4.8313*	[0.21072, 4.6052]
Rachas Crecientes y Decrecientes ( $\chi^2$ )	0.10971	0.80294	[0.015971, 2.7055]
Longitud de Racha	0	-1.025	[-1.96, 1.96]
Rachas sobre y bajo la Media ( $\chi^2$ )	10.6557*	0.58862	[0.015971, 2.7055]
Longitud de Racha	2.2531*	0.18985	[-1.96, 1.96]

\*fuera de rango.

Los resultados obtenidos en los test de aleatoriedad evidencian que las secuencias de números analizadas a partir del BLF normalizado pueden asemejarse a secuencias de números pseudo-aleatorios generadas por etiquetas RFID pasivas comerciales. Por lo que, dado el caso, podría utilizarse el valor de BLF como semilla en los algoritmos de generación de números pseudo-aleatorios de las etiquetas, o incluso utilizar directamente el valor de BLF. Además, dado que este parámetro varía durante el proceso de comunicación

con el lector, tal y como ha quedado demostrado, puede emplearse como fuente de aleatoriedad para tareas más complejas que tienen lugar entre la etiqueta y el lector, como la criptografía.

## 5. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo se ha llevado a cabo un estudio para caracterizar el comportamiento de la BLF (*Backscatter-Link Frequency*) o subportadora de respuesta de una etiqueta RFID pasiva a lo largo del tiempo. Además, los resultados del presente trabajo pueden extrapolarse al resto de etiquetas RFID pasivas, dado que todas ellas se producen en masa y con los mismos componentes. Si bien los valores concretos de BLF serán distintos, lo que no cambiará será su comportamiento a lo largo del tiempo, puesto que todas las etiquetas funcionan igual.

En primer lugar, cabe resaltar que el tipo de etiqueta que se ha empleado para el estudio no cumple con la especificación EPC Gen2, en cuanto a que la etiqueta responde a una frecuencia bastante superior al valor que teóricamente debería responder, de acuerdo con los parámetros iniciales marcados por el lector al comienzo del ciclo de lectura. Además, se ha de tener en cuenta que para el estudio se ha escogido uno de los modelos de etiqueta más empleado actualmente en el mercado, por lo que de este estudio se desprende la evidencia de que las etiquetas comerciales no cumplen con la especificación que se supone deberían cumplir.

La variación respecto al valor teórico de BLF al que debería contestar la etiqueta, puede ser una evidencia de las grandes tolerancias que presentan los elementos físicos que se encuentran en las mismas. Este hecho puede ser debido, en parte, al imperativo que marca el mercado de lograr etiquetas RFID pasivas lo más baratas posibles. En contrapartida para la tecnología, esto supone que al no cumplirse fielmente todas las especificaciones, puedan producirse errores de funcionamiento. Y que, en última instancia, causan fallos de lectura y que algunas etiquetas RFID pasivas no sean correctamente identificadas.

A tenor de los resultados que se desprenden del presente trabajo, cabe plantear la posibilidad de emplear estas grandes tolerancias e incertidumbres como fuentes de aleatoriedad (semilla) para su aplicación en otros procesos que la etiqueta pasiva de RFID tiene que llevar a cabo. Además, en el caso concreto del parámetro BLF, objeto del presente estudio, se ha puesto de manifiesto cómo puede emplearse como fuente de aleatoriedad para su uso en las comunicaciones entre la etiqueta y el lector.

En este sentido, se puede contemplar la posibilidad de realizar alguna modificación en los valores de  $TR_{cal}$  medido en las etiquetas para que los valores resultantes se adecúen mejor a las exigencias de aleatoriedad que deben cumplir este tipo de fuentes, según recoge la especificación EPC Gen2. Y poder así, utilizarlos directamente como fuente pseudo-aleatoria, evitando complicar en exceso la lógica interna de las etiquetas.

En cualquier caso, puede resultar bastante interesante el estudio en profundidad de este fenómeno, ya que cada etiqueta responde con una subportadora ligeramente distinta. Lo cual, puede entenderse como una característica diferenciadora de cada una de las etiquetas que pueden estar

presentes en el área de cobertura de un lector de RFID. A partir de este trabajo, se propone la ampliación del mismo estudio para respuestas independientes con otras etiquetas, lo que permita obtener una comparación de resultados entre distintas etiquetas.

A parte de completar este estudio, también se plantea la necesidad de diseñar algoritmos sencillos que permitan emplear la variación de valores de BLF puesta de manifiesto en este estudio para otros usos. Así como estudiar la viabilidad de emplear la BLF de cada etiqueta como elemento diferenciador de cada una de ellas frente al lector en los procesos de identificación.

En definitiva, al emplear esta variación de BLF para otros fines se persigue, por un lado, contribuir a la identificación de las etiquetas y por tanto, mejorar el funcionamiento de la tecnología. Y por el otro, la creación de etiquetas pasivas más eficientes. Es decir, que posean las mismas funcionalidades, pero minimizando su carga computacional. De este modo se disminuye la energía que ha de capturar la etiqueta para realizar sus funciones. Lo que se traduce en la posibilidad de incrementar el rango de lectura de las etiquetas.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por medio de las ayudas FPU13/01582 y EST15/00367.

## Referencias

- Arjona, L., Simon, H., & Ruiz, A. 2018. Energy-Aware RFID Anti-Collision Protocol. *Sensors*, 18(6), 1904.  
DOI: 10.3390/s18061904
- Badru, A., & Ajayi, N. 2017. Adoption of RFID in large-scale organisation — A review of challenges and solutions. In *2017 IST-Africa Week Conference (IST-Africa)* (pp. 1–10). IEEE.  
DOI: 10.23919/ISTAFRICA.2017.8102394
- Bagheri, N., Alenaby, P., & Safkhani, M. 2017. A new anti-collision protocol based on information of collided tags in RFID systems. *International Journal of Communication Systems*, 30(3), e2975.  
DOI: 10.1002/dac.2975
- Bratuz, I., Vodopivec, A., & Trost, A. 2014. Resolving Collision in EPCglobal Class-1 Gen-2 System by Utilizing the Preamble. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(10), 5330–5339.  
DOI: 10.1109/TWC.2014.2350975
- Chen, Y., Su, J., & Yi, W. 2017. An Efficient and Easy-to-Implement Tag Identification Algorithm for UHF RFID Systems. *IEEE Communications Letters*, 21(7), 1509–1512.  
DOI: 10.1109/LCOMM.2017.2649490
- Choi, H., Kim, H., & Choi, S. 2017. Capture-Aware Couple-Resolution Blocking Protocol in RFID Systems. *Wireless Personal Communications*, 93(4), 969–986.  
DOI: 10.1007/s11277-016-3940-2
- Dawei Shen, Woo, G., Reed, D. P., Lippman, A. B., & Junyu Wang. 2009. Separation of multiple passive RFID signals using Software Defined Radio. In *2009 IEEE International Conference on RFID* (pp. 139–146). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RFID.2009.4911203>
- Duan, L., Zhang, X., Wang, Z. J., & Duan, F. (2017). A Feasible Segment-by-Segment ALOHA Algorithm for RFID Systems. *Wireless Personal Communications*, 96(2), 2633–2649.  
DOI: 10.1007/s11277-017-4316-y
- GS1. (2016). EPC Information Services (EPCIS) Standard.
- GS1. (2018). EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID Specification for RFID Air Interface. Version 2.1.
- Huang, K.-S., Hwang, C.-K., Lee, B.-K., & Chung, I.-H. 2017. An exact closed-form formula of collision probability in diverse multiple access communication systems with frame slotted aloha protocol. *Journal of the Franklin Institute*, 354(13), 5739–5752.  
DOI: 10.1016/j.jfranklin.2017.05.028
- Salah, H., Ahmed, H. A., Robert, J., & Heuberger, A. 2015. FFT Based Rate Estimation for UHF RFID Systems. In *Smart SysTech 2015: European Conference on Smart Objects, Systems, and Technologies* (pp. 1–5). Aachen, Germany.
- Shoufeng, W., Dongchen, Z., Xiaoyan, X., Shumeng, S., & Tinglan, W. 2014. A novel anti-collision scheme for RFID systems. In *2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT)* (pp. 458–461). IEEE.  
DOI: 10.1109/WF-IoT.2014.6803210
- Solic, P., Maras, J., Radic, J., & Blazevic, Z. 2017. Comparing theoretical and experimental results in Gen2 RFID throughput. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 14(1), 349–357.  
DOI: 10.1109/TASE.2016.2532959
- Su, J., Sheng, Z., Hong, D., & Wen, G. 2016. An Effective Frame Breaking Policy for Dynamic Framed Slotted Aloha in RFID. *IEEE Communications Letters*, 20(4), 692–695.  
DOI: 10.1109/LCOMM.2016.2521839
- White, G., Nallur, V., & Clarke, S. 2017. Quality of service approaches in IoT: A systematic mapping. *Journal of Systems and Software*, 132, 186–203.  
DOI: 10.1016/J.JSS.2017.05.125
- Wijayasekara, S. K., Robithoh, A., Sasithong, P., Vanichchanunt, P., Nakpeerayuth, S., & Wuttisittikulij, L. 2017. A Reduced Complexity of Vahedi's Tag Estimation Method for DFSA. *Engineering Journal*, 21(6), 111–125.  
DOI: 10.4186/ej.2017.21.6.111
- Wu, H., Wang, Y., & Zeng, Y. 2018. Capture-aware Bayesian RFID tag estimate for large-scale identification. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 5(1), 119–127.  
DOI: 10.1109/JAS.2017.7510757
- Yong, W., Qing, L., Lei, W., & Hao, S. 2017. Research on Anti-Collision Algorithm in Radio Frequency Identification Technology. In *2017 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)* (pp. 239–244). IEEE.  
DOI: 10.1109/IHMSC.2017.167
- Zhang, T., Li, Q., Zhang, C.-S., Liang, H.-W., Li, P., Wang, T.-M., ... Wu, C. 2017. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 18(1), 68–85.  
DOI: 10.1631/FITEE.1601650