

SpuR - A System for Spectral Signature Recognition of Chipless RFID Tags Using Software-Defined Radio

Marcelo Frate , Robson João Gregório Rodrigues , Gilberto de Tadeu Santos Souza ,
Euclides Lourenço Chuma  and Leonardo Lorenzo Bravo Roger 

Abstract—To solve problems related to Radio Frequency Identification, as well as to develop new technologies and applications with chipless RFID tags, this article describes the development of an innovative reader system based on Software-Defined Radios. Called SpuR, the system proposes a method of reading the spectral signature of RFID tags chipless, using general purpose hardware, reconfigurable by software, and operating in a wide frequency range without the need to change the reading equipment. This approach allows the accurate reading and identification of different types of chipless tags, using a classification procedure, by Euclidean distance, comparing them with a previously stored database.

Index Terms—Software-Defined Radio, Radio definida por software, SDR, RDS, Spectral Signature, Firma Espectral, ADALM-PLUTO, Chipless, Etiqueta sin chip, RFID, SpuR.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de Identificación por radiofrecuencia (RFID), así como la teledetección, están ganando la atención de investigadores y empresarios de todo el mundo y los sistemas basados en etiquetas sin *chip* de RFID ofrecen identificación única sin la necesidad de ningún circuito integrado (*chip*) haciendo parte de la estructura de la etiqueta (*tag*). Las etiquetas sin *chip* de RFID mantienen la información binaria de los objetos etiquetados utilizando una firma espectral, grabada en el *hardware* de los elementos resonantes y el sustrato dieléctrico utilizado en su construcción [1]. Esta construcción hace que la falsificación de las etiquetas sin *chip* de RFID sea inviable. Con un costo en el rango de \$ 0.01 USD son significativamente más baratos que las etiquetas basadas en *chips* que están en el rango de \$ 0.10 USD [2] y también son más resistentes a las variaciones de las condiciones climáticas del ambiente en el que operan [3]. Otro factor importante es que las etiquetas sin *chip* pueden ser impresas en sustrato de papel o plástico, facilitando aún más su fabricación y reduciendo los costos [4], [5].

Para la lectura e identificación de etiquetas sin *chip*, algunos artículos complementan la investigación y establecen el estado

del arte. Tres artículos ejemplifican esta evolución: Divarathne y Karmakar (2015), presentan una técnica de detección de etiquetas sin *chip* basada en el método de máxima probabilidad o *Maximum-Likelihood (ML)* [6]. Yang *et al.* (2016), propusieron la primera *Unclonable Chipless RFID (UCR)* que genera intrínsecamente una identificación única a partir de variaciones de fabricación y aplica el método ML para identificar etiquetas sin *chip* [7]. Y Yang *et al.* (2017), se utiliza el método ML y el UCR en el desarrollo de una nueva forma de identificación única para *blisters* de pastillas aplicadas en la industria farmacéutica [8].

Pero a pesar de todo el avance, todavía se utiliza un sistema con *hardware* dedicado y específico para cada lectora, por lo tanto no es flexible y tiene un costo relativamente alto. Es decir, una lectora diseñada para una determinada aplicación, funcionando en un rango de frecuencia, no puede ser utilizada para otra aplicación en un rango de frecuencia diferente.

En busca de soluciones para este problema, investigadores están desarrollando lectoras para etiquetas sin *chip* de RFID, basadas en los dominios del tiempo, de la frecuencia o híbrido y sus arquitecturas se basan en los conceptos de onda continua de frecuencia escalonada, *Stepped Frequency Continuous Wave (SFCW)* o onda continua modulada en frecuencia, *Frequency-Modulated Continuous Wave radar (FMCW)*, utilizando diferentes métodos de codificación binaria y son capaces de operar en una amplia gama del espectro de frecuencia utilizando antenas *Ultra Wideband (UWB)* [4].

Otra tecnología emergente está contribuyendo a solucionar esta cuestión, los sistemas de Rádio Definida por Software (RDS), son más flexibles que los sistemas dedicados, ya que pueden ser programados para realizar una amplia variedad de tareas, permitiendo que los usuarios adapten el sistema a necesidades específicas. Son escalables, permiten el aumento de capacidad de procesamiento y almacenamiento, ofrecen mayor conectividad, permitiendo la comunicación y el intercambio de información, además de reducir los costos involucrados en cuanto a mantenimiento y desarrollo de nuevas funcionalidades [9], [10].

En este contexto, una nueva investigación presenta soluciones específicas con nuevos modelos de etiquetas, donde los autores proponen un sensor que utiliza etiqueta sin *chip* de RFID basadas en el acoplamiento de *microstrip* [11]. O con sistemas basados en el método ML y *hardware* de alto costo, donde los autores presentan un lector de etiquetas sin *chip* RFID, basado en estimación de máxima verosimilitud e

Marcelo Frate, IFSP, e-mail:frate@ifsp.edu.br.

Robson João Gregório Rodrigues, IFSP, e-mail:robsonr@ifsp.edu.br

Gilberto de Tadeu Santos Souza, Thales Alenia Space, e-mail:gilbertotsouza@gmail.com

Euclides Lourenço Chuma, Senior Member, IEEE y Linköping University - Sweden e-mail: euclides.chuma@ieee.org

Leonardo Lorenzo Bravo Roger, FT - Facultad de Tecnología - UNICAMP, e-mail:leobravo@unicamp.br.

Manuscript received April 12, 2023; revised Jun 26, 2023.

implementado con la ayuda de GNU Radio y el USRP X300 que cuesta más de \$7,500.00 USD [12]. También hay estudios donde los autores presentan una revisión muy completa y buscan dar una visión general de los métodos de lectura, procesamiento y arquitecturas de equipos relacionados con la detección y decodificación de respuesta de etiquetas sin *chip* de RFID [13].

El presente artículo tiene como objetivo, demostrar la efectividad del nuevo sistema lector de etiquetas sin *chip* de RFID basado en RDS (SpuR), que se propone en este trabajo. Se trata de un nuevo sistema lector basado en el reconocimiento de la firma espectral de etiquetas sin *chip*, que al ser implementado con RDS, tiene como gran ventaja ser ajustable por programación. El SpuR, disponible en <https://github.com/marcelofrate/SpuR>, realiza las principales funciones de una lectora tradicional, con la diferencia de que atiende a un amplio rango de frecuencia, además de ser un sistema reconfigurable. Es decir, con un solo *hardware* de propósito general que cuesta aproximadamente \$230.00 USD, se pueden leer e identificar diferentes tipos de etiquetas sin *chip* de RFID, que pueden operar en diferentes rangos de frecuencia.

A diferencia de los artículos que demuestran sus contribuciones utilizando etiquetas de un único tipo, en este trabajo se utilizaron diversos modelos de etiquetas sin *chip* de RFID, proporcionados por la comunidad académica a través de publicaciones científicas [14]–[18]. Solo para efectos de posibilitar la construcción y utilización de los diversos modelos, se eligieron las etiquetas diseñadas para el sustrato FR4 debido a su bajo costo y mayor disponibilidad.

II. METODOLOGÍA

Como base para el desarrollo del sistema SpuR, se utilizó la herramienta de desarrollo GNU Radio, sus bloques de procesamiento de señales configurables y *scripts* en Python para la transmisión y recepción de las señales analógicas.

Específicamente, SpuR fue diseñado para ser un sistema capaz de digitalizar linealmente el ancho de banda total disponible por el *hardware* utilizado (ADALM-PLUTO), transmitiendo una señal de interrogación del tipo *chirp*. Después de ser recibida por la etiqueta sin *chip* objetivo, esta señal es reflejada o retro transmitida por la misma con modificaciones en su amplitud y frecuencia, variando según las características específicas y exclusivas de cada etiqueta sin *chip*. El sistema SpuR lee las variaciones de la señal recibida, es decir, la firma espectral de la etiqueta sin *chip* objetivo, que luego se almacena y se compara con una base de datos previamente grabada en el sistema, para que se realice la identificación exclusiva de la etiqueta.

Para ello se implementaron las funciones básicas de un lector de RFID con modulación FMCW, basado en el funcionamiento de la teoría del radar, presentado por Sundaresa *et al.* (2015) [19]. Utilizando este método, una onda continua sinusoidal fue modulada en frecuencia, utilizando un *Voltage-Controlled Oscillator (VCO)* controlado por una señal diente de sierra, similar a la presentada en la Fig. 1 mostrada en el dominio del tiempo.

Como resultado, se genera un señal de interrogación del tipo *chirp*. La Fig. 2 muestra el espectro de la señal FMCW casi plano en toda la banda de frecuencia establecida por la capacidad del *hardware* utilizado (70 MHz a 6 GHz), siendo el ancho de banda suficiente para interrogar las etiquetas. Esta señal es radiada en dirección al objetivo por la antena de transmisión (Tx) de la placa RDS (señal de interrogación) y la señal recibida en la antena de recepción (Rx) es la señal retrotransmitida o reflejada por la etiqueta sin *chip* objetivo (señal de respuesta).

Se eligió un *hardware* de propósito general, el (ADALM-PLUTO), un *Field Programmable Gate Array (FPGA)* de RDS que tiene canales de recepción y transmisión independientes y puede funcionar tanto en *half duplex* como en *full duplex*, permitiendo la comunicación bidireccional en diferentes bandas del espectro de frecuencia, lo que permite la configuración y el desarrollo de aplicaciones capaces de actuar entre 70 MHz y 6 GHz [20].

Es importante señalar que el *hardware* utilizado no permite la lectura directa del rango de frecuencia, osea, mismo que la frecuencia de trabajo puede ser cualquier valor entre 70 MHz e 6 GHz, una vez seleccionada una frecuencia de operación, la barradura alrededor de esa frecuencia escogida está limitada a un ancho de banda de 56 MHz. Por lo tanto, fue necesario desarrollar un software para controlar la frecuencia inicial de la señal a transmitir, con el fin de barrer todo el rango de frecuencia disponible, en pequeños intervalos de hasta 56 MHz. Los siguientes son los pasos detallados del programa propuesto:

- 1) El sistema SpuR inicia la programación, define los parámetros de frecuencia, generando la señal a transmitir. Como alternativa al VCO, se puede generar una señal de alto nivel, amplitud constante, pero modulación continua en frecuencia (FMCW), con una frecuencia inicial de 70 MHz.
- 2) La señal generada se aplica a la entrada de la antena transmisora (Tx).
- 3) Por cable, la señal se dirige al puerto 1 (entrada) del resonador, donde sufre cambios de amplitud y frecuencia, variando según las características específicas y exclusivas de cada etiqueta sin *chip*. Por el puerto 2 (salida del resonador), la señal regresa, vía cable, a la entrada de antena del (Rx) del ADALM-PLUTO.
- 4) Los valores de frecuencia y amplitud de la señal recibida en el receptor son almacenados en la memoria del equipamiento.
- 5) El proceso de almacenamiento de la señal proveniente del resonador ocurre paso a paso. Es decir, el software para cada paso, repite las tareas de 1 a 4 hasta barrer completamente el espectro de 70 MHz a 6 GHz. El paso de frecuencia se define previamente en la configuración inicial del sistema y puede ajustarse a voluntad.
- 6) El sistema SpuR lee las variaciones de la señal recibida, la cual por ser única para cada etiqueta es llamada "firma espectral" de la etiqueta sin *chip*.
- 7) Utilizando un procedimiento de clasificación, que utiliza la medida de la distancia euclidiana, el sistema SpuR compara la firma espectral medida con una base de datos

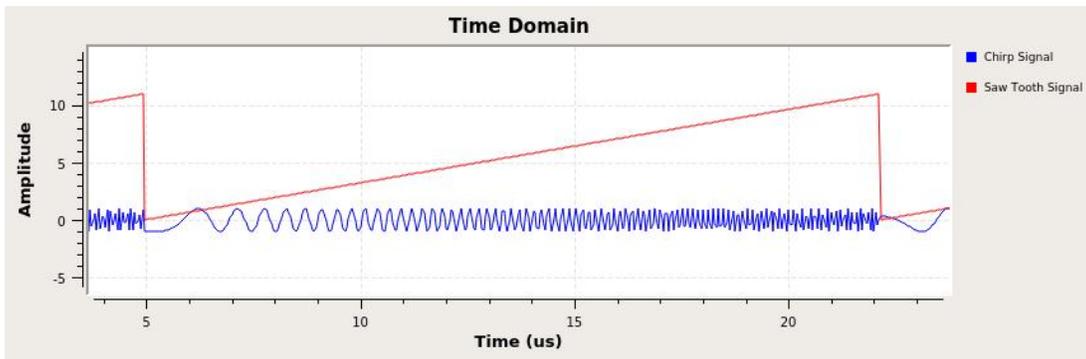


Fig. 1. En rojo, la señal de diente de sierra que controla el VCO y en azul, la señal FMCW obtenida, que se utiliza como señal de interrogación transmitida por la antena Tx.

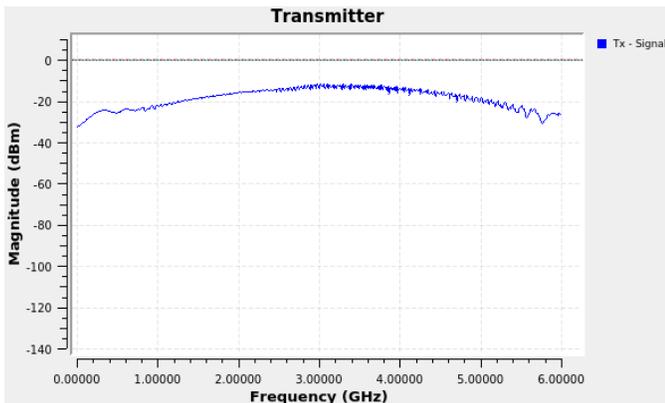


Fig. 2. Espectro del señal de interrogación transmitido por la antena Tx.

registrada previamente en el sistema, de modo que se realiza la identificación única de la etiqueta sin *chip*.

En pocas palabras, el algoritmo 1 del programa creado en GNU Radio establece los requisitos previos del sistema, como los límites de la capacidad del *hardware* utilizado (de 70 MHz a 6 GHz) y la cantidad de puntos a comparar a través del número de pasos que en este caso fue de 1MHz.

Cuanto menor sea el paso, mayor será el número de puntos leídos, lo que implica en un mayor tiempo de lectura y reconocimiento de la etiqueta. En este caso, el programa comienza la lectura en 70 MHz y se realiza una nueva lectura cada 1 MHz, totalizando 5931 puntos de lectura, finalizando en 6 GHz y todos los valores obtenidos se almacenan en el *array*.

El resultado de la programación propuesta es la lectura de la firma espectral de la etiqueta sin *chip* de RFID (objetivo) y la comparación de los valores obtenidos con la base de datos previamente almacenada, permite la identificación única de cada etiqueta sin *chip* del sistema, utilizando para eso un procedimiento de clasificación por distancia euclidiana, según (1)

$$d(A, B) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_k - y_k)^2} \quad (1)$$

Dado que, en (1), A representa el *array* con los valores

Algorithm 1 Calcular la distancia euclidiana

Require: $70MHz \leq f \leq 6GHz$;

Require: $Steps \leftarrow 1MHz$

- 1: $f \leftarrow 70M$
 - 2: $f2 \leftarrow 6G$
 - 3: $S \leftarrow 1M$
 - 4: **function** SWEEPER(*ampl*)
 - 5: **while** $f \leq f2$ **do**
 - 6: $x \leftarrow Array(Freq)$;
 - 7: $y \leftarrow Array(Mag)$;
 - 8: $f \leftarrow f + S$;
 - 9: **end while**
 - 10: **end function**
 - 11: Compare and Compute Euclidean Distance:
 - 12: $d(A, B) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_k - y_k)^2}$;
 - 13: **return** (*Tag ID*);
-

correspondientes a la firma espectral de la etiqueta sin *chip* del objeto a ser sensorado. y B representa el *array* de la etiqueta almacenada en la base de datos, x_k representa los valores de la frecuencia (eje horizontal), mientras que y_k representa los valores de la magnitud (eje vertical) y n el total de muestras recolectadas.

El método de clasificación, por distancia euclidiana, es un procedimiento de clasificación supervisado. donde el valor más pequeño calculado de esta distancia entre los puntos de los *arrays* A y B permite comparar las firmas espectrales de la etiqueta medida con las almacenadas. Es decir, los puntos preestablecidos para realizar el cálculo son los valores de frecuencia y magnitud de las etiquetas sin *chip* medidos y almacenados.

III. RESONADORES

Las firmas espectrales de las etiquetas son definidas por la respuesta en frecuencia de sus respectivos resonadores. Se utilizaron 4 modelos de resonadores correspondientes a diferentes etiquetas, y todas fueron numeradas para su identificación y comparación en el sistema SpuR. Estos resonadores difieren de las etiquetas sin *chip* solo en que no tienen antenas de transmisión y recepción, lo que permite realizar las pruebas directamente a través de un cable. Esta metodología de pruebas

se adoptó porque permite probar de manera confiable la efectividad del sistema SpuR propuesto en la lectura e identificación de las firmas espectrales de cada resonador/etiqueta.

A. Modelo 1

Basado en Santos-Souza *et al.* (2014) [14], el resonador número 1 como se muestra en la Fig. 3, donde los autores presentan el diseño de resonadores en espiral para diferentes frecuencias dependiendo de la longitud de la espiral, en este caso resonando a 1.83 GHz y su firma espectral se muestra en la Fig. 4.

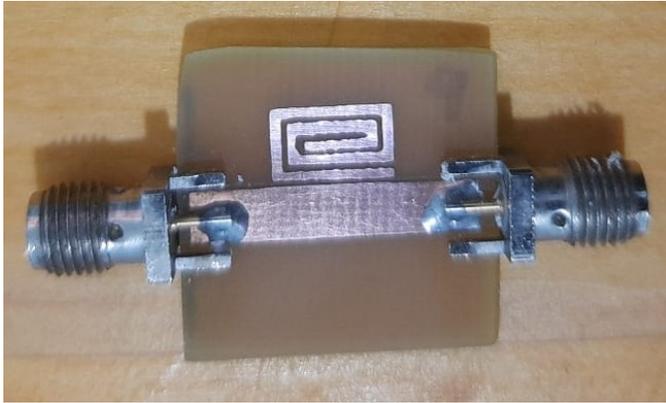


Fig. 3. Resonador N° 1

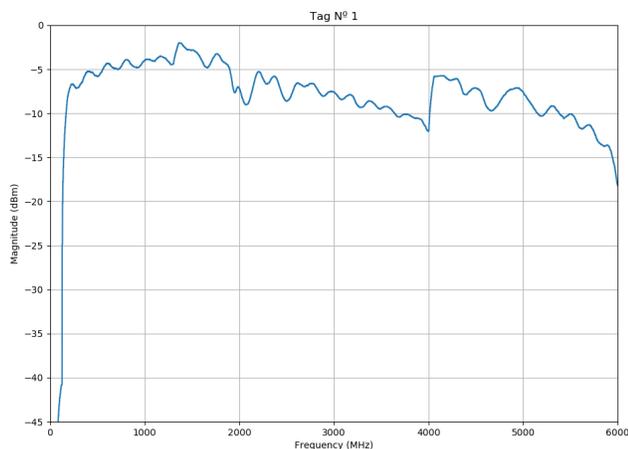


Fig. 4. Firma espectral medida, etiqueta N° 1

B. Modelo 2

Basado en Prabavathi y Rani (2019) [16], fue reproducido el resonador número 2, una etiqueta multiresonadora, con ranuras en forma de “L” en la línea de transmisión, de 10 bits, que opera en el rango de 2 GHz a 4 GHz y fue reproducida según la Fig. 5 y su firma espectral se presenta en la Fig. 6.

C. Modelo 3

Basado en Haraz (2022) [17] y Sumi *et al.* (2014) [21], fue reproducido el prototipo de la Fig. 7, referenciado como

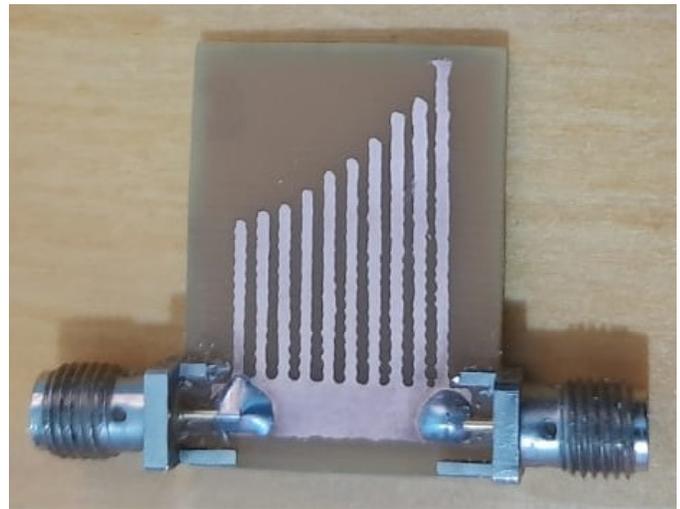


Fig. 5. Resonador N° 2

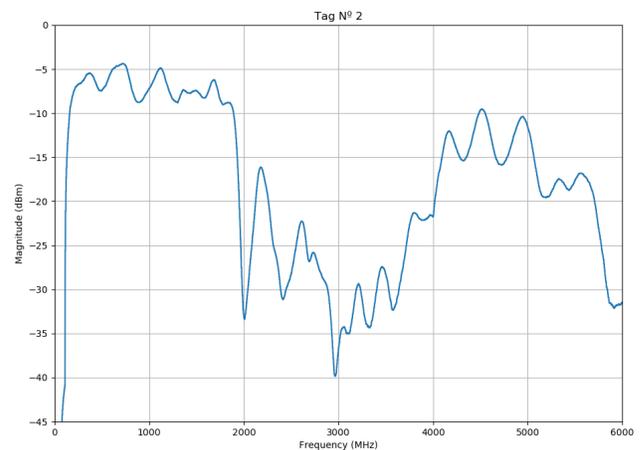


Fig. 6. Firma espectral medida, etiqueta N° 2

etiqueta 3, que es un multiresonador en forma de “E” en cascada con respuestas equivalentes a 8 bits en el rango de frecuencia de 3 GHz a 4 GHz, y su firma espectral se presenta en la Fig. 8.



Fig. 7. Resonador N° 3

D. Modelo 4

Basado en Vena *et al.* (2012) [18], fue fabricado el resonador de la Fig. 9, este resonador número 4 opera en el rango

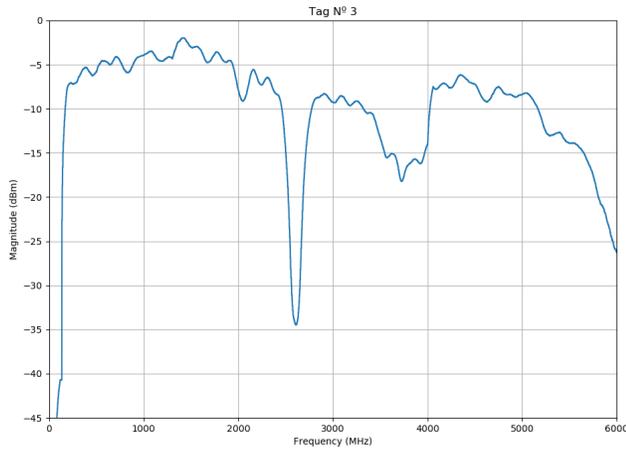


Fig. 8. Firma espectral medida, etiqueta N° 3

de frecuencia de 2 GHz a 4 GHz y permite la codificación de 20 bits dentro de una etiqueta sin *chip* de tamaño $70 \times 25 \text{ mm}^2$ y su firma espectral se presenta en la Fig. 10.

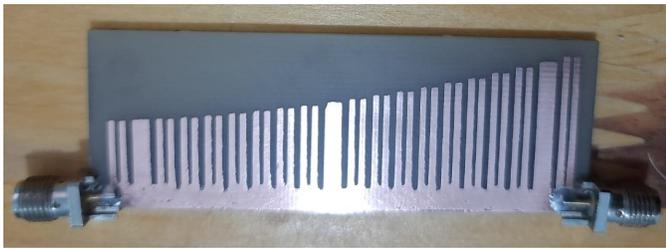


Fig. 9. Resonador N° 4

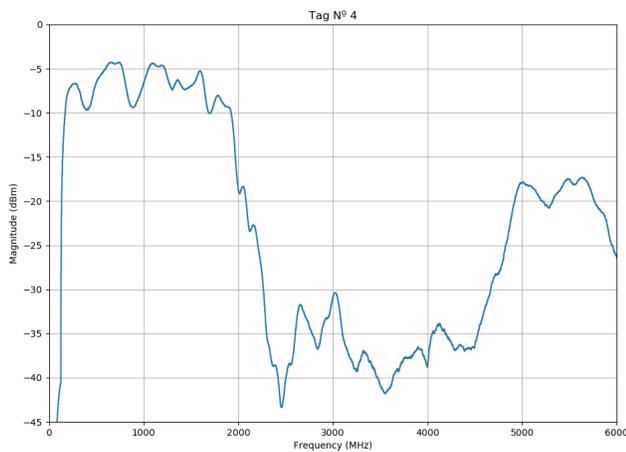


Fig. 10. Firma espectral medida, etiqueta N° 4

Es importante destacar que cualquier otro modelo de resonador/etiqueta puede ser utilizado de la misma manera que los modelos presentados aquí, que estos modelos fueron elegidos para ser reproducidos en este trabajo debido al uso del sustrato FR4 en sus diseños, también disponible en nuestro laboratorio y por la simplicidad de construcción. Además, el desarrollo de las etiquetas no forma parte del alcance de este trabajo, solo se utilizaron para validar el uso del sistema SpuR.

Los resonadores presentados aquí son reproducciones hechas a partir de la información obtenida en las publicaciones citadas, pero incluso si fueran copias fieles de los resonadores originales, sus firmas espectrales serían diferentes debido a posibles variaciones en las características eléctricas del sustrato, y es precisamente esto lo que caracteriza de forma exclusiva a cada etiqueta sin *chip*.

Si se utilizara un sistema de lectura que identificara los bits de forma individualizada, el sistema podría identificar de forma incorrecta las copias de las etiquetas como si fueran la etiqueta original. Por el contrario, el sistema SpuR propuesto aquí y su método de lectura basado en la identificación de la firma espectral íntegra de la etiqueta, aumenta la seguridad ofreciendo una mayor capacidad y diversidad de etiquetas en comparación con los sistemas existentes, demostrando la eficacia del reconocimiento exclusivo de etiquetas sin *chip*.

IV. RESULTADOS

El Sistema SpuR, utilizando GNU Radio, crea una señal tipo *chirp*, modulada en frecuencia, transmitiendo hacia la etiqueta sin *chip* objetivo, a través de la antena de transmisión (Tx) de la placa RDS (ADALM-PLUTO), actuando en el rango de 70 MHz a 6 GHz. Si esta señal se refleja desde una etiqueta sin *chip* de RFID, el receptor (Rx) debe recibir la señal atrasada, atenuada o modificada en función de las características de la etiqueta, como se presenta en Karmakar *et al.* (2016) [3].

Una vez que se tiene una base de datos con todos los valores de las etiquetas almacenados, el sistema SpuR mediante el método de clasificación por distancia euclidiana, es capaz de compararlos con los nuevos valores obtenidos mediante la lectura de la etiqueta objetivo, tomando la decisión sobre su identificación correcta. La Tabla I muestra el cálculo realizado de la distancia euclidiana entre todas las etiquetas leídas. A partir de esta relación entre los valores de la lectura realizada y las etiquetas almacenadas en la base de datos, se obtiene el grado de similitud entre ellos, cuanto menor sea la distancia entre los elementos, mayor será la probabilidad de que la identificación de la etiqueta sea correcta.

TABLA I
CÁLCULO DE LA DISTANCIA EUCLIDIANA

	Firma Espectral (BD)			
Medición	Etiqueta 1	Etiqueta 2	Etiqueta 3	Etiqueta 4
Etiqueta 1	17.2976	27.4213	54.7570	44.3150
Etiqueta 2	28.3558	18.3346	52.5020	44.3990
Etiqueta 3	57.0443	52.7965	26.1402	37.7658
Etiqueta 4	46.7612	43.8953	36.8815	17.7476

Las Figs. 11, 12, 13 y 14, muestran la comparación de las firmas espectrales recibidas directamente de las etiquetas sin *chip* de RFID (Tag leída, color naranja) y los valores de amplitud versus frecuencia encontrados en la base de datos (BD, color azul), confirmando que el sistema SpuR es capaz de identificar, dentro de la base de datos, el patrón correspondiente a la firma espectral recibida de cada etiqueta específica. En todos los casos, la identificación de la etiqueta fue correcta. Es posible percibir pequeñas variaciones en los valores comparados en todos los gráficos, debido a que cada

vez que se realiza la lectura se obtienen valores diferentes, una variación normal y característica de los sistemas de radiofrecuencia.

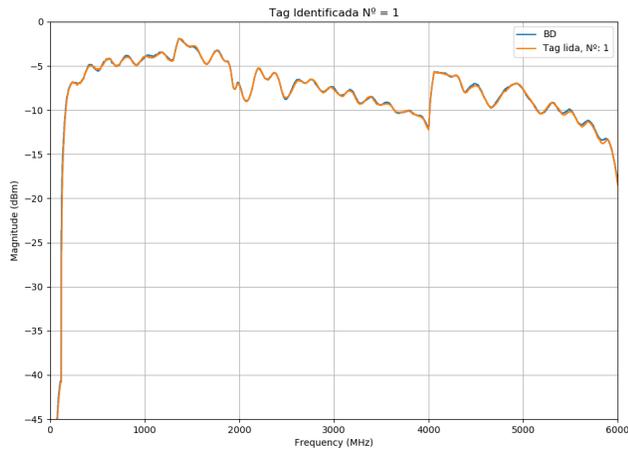


Fig. 11. Comparación de las firmas espectrales, en naranja, la obtenida al procesar el SpuR, a partir de la señal recibida de la etiqueta N° 1 y en azul, la firma almacenada en la base de datos.

La tecnología RFID sin *chip* está ganando terreno en áreas como la atención médica, la biomedicina y la Internet de las cosas (IoT), donde la RFID basada en *chip* es limitada [2]. Con la creciente eficiencia de las técnicas de fabricación aditiva (AMT), la RFID sin *chip* se está utilizando en redes celulares 5G e IoT de onda milimétrica, recolección y almacenamiento de energía, front-end de comunicación de retrodispersión, componentes de RF pasivos, interconexiones, paquetes, estructuras que cambian de forma, y sensores. Además, la RFID sin *chip* se utiliza en aplicaciones como la comunicación inalámbrica de baja latencia, la ubicación precisa, las capacidades de largo alcance, las densas redes de sensores inalámbricos y la alimentación de estos sistemas RFID de energía ultrabaja de próxima generación a través de la red eléctrica inalámbrica 5G [22].

De esta forma, la principal ventaja del sistema SpuR propuesto es la capacidad de ser reconfigurable por software, adaptándose a la realización de lecturas e identificación de etiquetas cuyas anchuras de banda específicas pueden ser diferentes entre sí, siempre que operen entre 70 MHz y 6 GHz. Esto es radicalmente diferente de los sistemas tradicionales de identificación de etiquetas sin *chip*, donde todas las etiquetas deben operar en el mismo ancho de banda y la operación del sistema de identificación se limita a el ancho de banda específico de las etiquetas.

Así, SpuR puede proporcionar a la comunidad científica una nueva posibilidad de identificación por radiofrecuencia de etiquetas sin *chip* de RFID, que pueden operar en diversas bandas de frecuencia sin necesidad de cambiar los equipamientos lectores. Además, se espera como trabajos futuros, hacer que el sistema SpuR sea capaz de identificar una etiqueta sin *chip* de RFID utilizando antenas para la comunicación con el ADALM-PLUTO, reconocer simultáneamente los diversos tipos de sensores acoplados, así como los valores leídos, ofreciendo mayor precisión y detalles específicos de cada

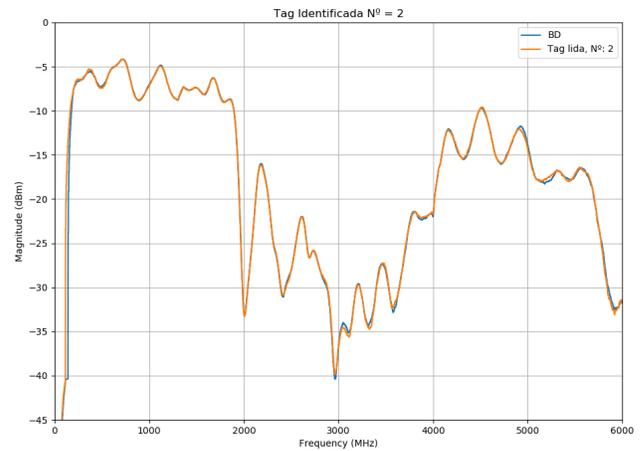


Fig. 12. Comparación de las firmas espectrales, en naranja, la obtenida al procesar el SpuR, a partir de la señal recibida de la etiqueta N° 2 y en azul, la firma almacenada en la base de datos.

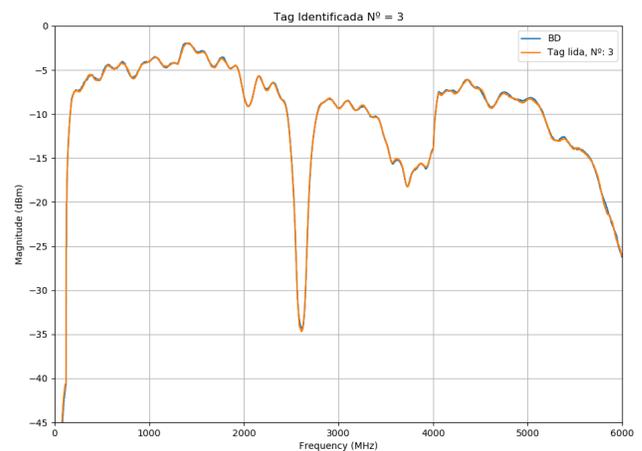


Fig. 13. Comparación de las firmas espectrales, en naranja, la obtenida al procesar el SpuR, a partir de la señal recibida de la etiqueta N° 3 y en azul, la firma almacenada en la base de datos.

etiqueta, como por ejemplo la aproximación del rango de frecuencia en el que cada etiqueta opera.

Para ello, es necesario ampliar el número de etiquetas y, en consecuencia, la base de datos crecerá proporcionalmente. Por lo tanto, el sistema SpuR podrá evolucionar utilizando conceptos de Inteligencia Artificial (AI) o métodos y técnicas de aprendizaje automático (*Machine Learning*) para hacerlo escalable, como lo demostraron Thomas y Kurian (2023) [23] y con un mejor rendimiento como lo presentó Rather *et al.* (2023) [24].

En este contexto, existen varios estudios que demuestran el funcionamiento y variedad de técnicas que pueden mejorar el rendimiento y la precisión en el reconocimiento de patrones. Artículos de diferentes áreas, como los presentados por Chuma e Iano (2021) [25], Martín Merino *et al.* (2022) [26] y Seal *et al.* (2021) [27] traen estudios y propuestas que pueden ayudar en el desarrollo de nuevas funcionalidades, aún inexploradas con el conjunto de hardware aquí utilizado.

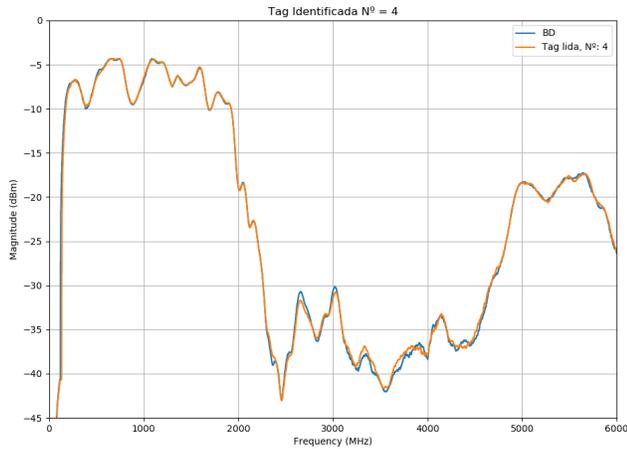


Fig. 14. Comparación de las firmas espectrales, en naranja, la obtenida al procesar el SpuR, a partir de la señal recibida de la etiqueta N° 4 y en azul, la firma almacenada en la base de datos.

V. CONCLUSIONES

El sistema SpuR propuesto, que utiliza (ADALM-PLUTO), *hardware* de propósito general, de bajo costo que se puede reconfigurar por completo mediante software, demuestra su capacidad para digitalizar linealmente todo el amplio rango del espectro de frecuencia operativa de esa plataforma, esto es, de 70 MHz a 6 GHz, a pesar de que su capacidad de ancho de banda de barradura está limitado a 56 MHz, siendo este un mérito de la estrategia de programación de su algoritmo. El artículo trae además algunas otras contribuciones, una de ellas consiste en que el sistema permite realizar la lectura de la información binaria almacenada en el *hardware* de cualquier tipo de etiqueta sin *chip*, siempre que esta opere en el amplio rango de frecuencias del (ADALM-PLUTO), eso significa que se trata de un sistema universal de lectura de etiquetas sin *chip* y no de un lector de etiquetas específicas. Otra importante contribución es que la estrategia de lectura desarrollada está basada en la decodificación de la firma espectral completa y no en la tradicional técnica de decodificación bit a bit, lo que permite la identificación de la etiqueta como fuente radiadora. Si se lleva en cuenta que la firma espectral es un atributo propio de cada etiqueta, se comprenderá la importancia de la contribución antes mencionada, ya que la identificación correcta de las fuentes emisoras de señales de radio ocupa el interés principal cuando se quieren evitar fraudes en un sistema de sensores por radiofrecuencia. Dicho en otras palabras, si se clonase una etiqueta sin *chip* y con ella se sustituyera la etiqueta original, el sistema SpuR, podrá evolucionar para ser capaz de detectar ese fraude, aunque la etiqueta clonada tuviera la misma información binaria que la etiqueta original, por el hecho de que su firma espectral sería diferente a la de la etiqueta original y no aparecería en el banco de datos, impidiendo su identificación a través del algoritmo de distancia euclidiana, propio del SpuR. En esencia, el SpuR es un lector de firmas espectrales y no simplemente un lector de la información binaria de las etiquetas. Otras ventajas adicionales que pueden mencionarse también: el SpuR permite operar simultáneamente con etiquetas cuyas anchuras de banda de operación pueden ser

diferentes entre sí, aumentando la capacidad de codificación binaria de los sistemas de RFID sin *chip*, antes limitados por el número de bits que podían codificarse en el ancho de banda común que necesariamente poseían todas las etiquetas de un determinado sistema. Finalmente, se destaca que todo eso se consigue sin necesidad de cambiar el *hardware* del sistema lector.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se está realizando con el apoyo de la Coordinación de Perfeccionamiento del Personal de Educación Superior – Brasil (CAPES), Código de Financiamiento 001 y FAPESP.

REFERENCES

- [1] S. Preradovic and N. Karmakar, *Multiresonator-Based Chipless RFID - Barcode of the Future*. New York: Springer, 1a edición ed., 03 2012.
- [2] A. Subrahmannian and S. K. Behera, "Chipless rfid: A unique technology for mankind," *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 6, pp. 151–163, 2022.
- [3] N. C. Karmakar, E. M. Amin, and J. K. Saha, *Chipless RFID sensors*. New Jersey: John Wiley & Sons, 1 ed., 2016.
- [4] J. Aliasgari, M. Forouzandeh, and N. Karmakar, "Chipless RFID Readers for Frequency-Coded Tags: Time-Domain or Frequency-Domain?," *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 4, no. 2, pp. 146–158, 2020.
- [5] M. Garbati, E. Perret, and R. Siragusa, *Chipless RFID Reader Design for Ultra-Wideband Technology: Design, Realization and Characterization*. Elsevier, 2018.
- [6] C. Divarathne and N. Karmakar, "An advanced tag detection technique for chipless rfid systems," in *2015 European Microwave Conference (EuMC)*, pp. 251–254, IEEE, 2015.
- [7] K. Yang, D. Forte, and M. M. Tehranipoor, "Ucr: An unclonable chipless rfid tag," in *2016 IEEE International Symposium on Hardware Oriented Security and Trust (HOST)*, pp. 7–12, IEEE, 2016.
- [8] K. Yang, U. Botero, H. Shen, D. Forte, and M. Tehranipoor, "A split manufacturing approach for unclonable chipless rfids for pharmaceutical supply chain security," in *2017 Asian Hardware Oriented Security and Trust Symposium (AsianHOST)*, pp. 61–66, IEEE, 2017.
- [9] J. Mitola, "The software radio architecture," *IEEE Communications Magazine*, vol. 33, no. 5, pp. 26–38, 1995.
- [10] B. Riyanto, A. Z. Langi, A. Kurniawan, E. Marpanaji, A. Mahendra, and T. Liung, "Software architecture of software-defined radio (sdr)," *ITB Research Center on ICT*, 2006.
- [11] L. Liu and L. Chen, "Characteristic analysis of a chipless rfid sensor based on multi-parameter sensing and an intelligent detection method," *Sensors*, vol. 22, no. 16, 2022.
- [12] G. Wan, M. Zhang, W. Li, and L. Chen, "A novel detection method based on maximum-likelihood estimation decoding of a 6-bit chipless radio frequency identification coded tag," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–11, 2020.
- [13] K. R. Brinker and R. Zoughi, "A review of chipless rfid measurement methods, response detection approaches, and decoding techniques," *IEEE Open Journal of Instrumentation and Measurement*, vol. 1, pp. 1–31, 2022.
- [14] G. T. Santos-Souza, A. A. d. C. Alves, L. L. Bravo-Roger, and H. E. Hernández-Figueroa, "Numerical determination of frequency guard band resonances for chipless rfid tags," in *2014 IEEE Brasil RFID*, pp. 10–12, IEEE, 2014.
- [15] G. d. T. S. Souza, "Nova etiqueta chipless de rfid com comunicação redundante," Master's thesis, Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Limeira, 2015.
- [16] P. Prabavathi and S. S. Rani, "Design of frequency-signature based multiresonators using quarter wavelength open ended stub for chipless rfid tag," in *2019 National Conference on Communications (NCC)*, pp. 1–6, 2019.
- [17] O. M. Haraz, "Design of 8-bit chipless printable rfid tags via spectral signature encoding for low-cost identifications," *Wireless Personal Communications*, vol. 122, no. 3, pp. 2657–2665, 2022.

- [18] A. Vena, E. Perret, and S. Tedjini, "A fully printable chipless rfid tag with detuning correction technique," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 209–211, 2012.
- [19] S. Sundaresan, C. Anjana, T. Zacharia, and R. Gandhiraj, "Real time implementation of fmcw radar for target detection using gnu radio and usrp," in *2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSPP)*, pp. 1530–1534, IEEE, 2015.
- [20] "ADALM-PLUTO Overview," 2020. Acesso em: 03 junho 2022.
- [21] M. Sumi, R. Dinesh, C. Nijas, S. Mridula, and P. Mohanan, "High bit encoding chipless rfid tag using multiple e shaped microstrip resonators," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 61, pp. 185–196, 2014.
- [22] C. A. Lynch, A. O. Adeyeye, A. Eid, J. G. Hester, and M. M. Tentzeris, "5g/mm-wave next generation rfid systems for future iot applications," in *2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, pp. 77–80, IEEE, 2021.
- [23] A. Thomas11, J. Kurian, A. Thomas, and J. Kurian, "Interception amelioration of chipless rfid tags using deep learning techniques," *Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 05, 2023.
- [24] N. Rather, R. B. V. B. Simorangkir, J. Buckley, B. O'Flynn, and S. Tedesco, "Evaluation of machine learning models for a chipless rfid sensor tag," in *2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–5, 2023.
- [25] E. L. Chuma and Y. Iano, "A movement detection system using continuous-wave doppler radar sensor and convolutional neural network to detect cough and other gestures," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 2921–2928, 2021.
- [26] M. Martín Merino, A. J. López Rivero, V. Alonso, M. Vallejo, and A. Ferreras, "A clustering algorithm based on an ensemble of dissimilarities: An application in the bioinformatics domain," *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, vol. 7, no. 6, pp. 6–13, 2022.
- [27] A. Seal, E. Herrera Viedma, *et al.*, "Performance and convergence analysis of modified c-means using jeffreys-divergence for clustering," *IJIMAI*, vol. 7, no. 2, pp. 141–149, 2021.



Marcelo Frate Master in Computer Science, from the Federal University of São Carlos, UFSCAR (2017), Specialist in Training in Distance Education, from the Paulista University, UNIP (2011), Graduated in Computer Science from Faculdades Renascentista, UNIESP (2006) and Graduated in Network and Internet Administration, from Universidade Nove de Julho, UNINOVE (2002). He is currently a doctoral student at the Faculty of Technology at Unicamp (FT) in the area of concentration in Information and Communication Systems and

EBTT Professor in Exclusive Dedication Regime at the Federal Institute of Science and Technology Education of São Paulo (IFSP). He has experience in Computer Networks, working mainly on the following topic: OrchFlow-An architecture for orchestrating OpenFlow networks with multiple controllers.



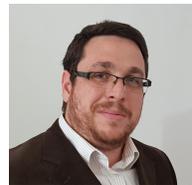
Robson Rodrigues Master in Technology (2023) - UNICAMP, degree in Informatics (2017) - IFSP, Specialization in Systems Engineering (2015) - ESAB, Technologist in Informatics - Fatec (2011). He served as a Computer Technician at the Federal Institute of Education, Science and Technology of São Paulo-Câmpus Itapetininga. Currently he is Professor EBTT, of Programming and Database, Federal Institute of Education, Science and Technology of São Paulo-Campus of Itapetininga. He has experience in the field of Computer Science, with an

emphasis on Programming and Databases.



Gilberto de Tadeu Santos Souza Ph.D. in Technology with an emphasis on Information and Communication Systems (2019), Master in Technology and Innovation (2015), and graduated in Telecommunications Technology (2012)), where all titles were obtained at UNICAMP - University of Campinas. He has experience in R&D of electronic hardware (PCBs), RF and microwave (up to 40 GHz) using Mentor Xpedition Designer/Layout, Altium Designer, ANSYS HFSS e CST Studio software. His latest research has been related to the development

of new RF devices and sensors for Chipless RFID Systems. Currently working at Thales Alenia Space on analog, digital and RF PCB projects for the space sector.



Euclides Lourenço Chuma is a postdoctoral researcher at the University of Linköping - Sweden. IEEE Senior Member (2022). Chair IEEE Sensors Council South Brazil Chapter and Chair IEEE Systems Council South Brazil Chapter. Associate Editor at IET Circuits, Devices & Systems. His expertise includes telecommunications, sensors, IoT, AI, healthcare, photonics, electromagnetism, antennas, wireless energy transfer, etc.



Leonardo Lorenzo Bravo Roger Graduated in Telecommunications Engineering - Universidad de Oriente (Cuba, 1985), Master in Telecommunications Engineering - Universidad de Oriente (Cuba, 1998) and PhD in Electrical Engineering from the State University of Campinas (Brazil, 2003). He obtained the title of Livre Docência at the State University of Campinas (Brazil, in November 2018). He is currently Associate Professor MS 5.1 at the Faculty of Technology at UNICAMP. He works preferably in the following areas: Radio Frequency

Sensing, Radio Frequency Machine Learning Systems (RFMLS), Antennas, Radio Frequency Technologies, Microwaves, Radio Frequency Identification (RFID), Terahertz Identification (THID), Metamaterials and Nanotechnology, Electronics Radiofrequency, Wireless Sensor Networks, Mobile Communications, Optical Communications, Finite Element Simulations, Ultrashort Pulse Propagation and Plasmonic Waves, Radio Wave Propagation, Applied Electromagnetism. He has 53 published scientific articles, 26 of them in specialized journals and 1 accepted for publication.