



**IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS CLÁSICAS PARA EL SENSADO DEL
ESPECTRO BASADAS EN SDR (SOFTWARE DEFINED RADIO)**

Luis Alberto Ochoa Marín

Informe de Practica Académica para Optar el Título de Ingeniero de Telecomunicaciones

Asesor Interno:

Alexander Galvis Quintero

Docente Universidad de Antioquia

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería

Pregrado en Ingeniería de Telecomunicaciones

Medellín

2024

Cita	Ochoa Marín [1]
Referencia	[1] L. Ochoa Marín, “Implementación de técnicas clásicas para el sensado del espectro basadas en SDR (Software Defined Radio)”, Proyecto de investigación, Ingeniería de telecomunicaciones, Universidad de Antioquia, Medellín, 2023.
Estilo IEEE (2020)	



Grupo de Investigación en Telecomunicaciones Aplicadas (GITA).

Línea de Modelamiento de Sistemas de Comunicaciones.



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Eduard Emiro Rodríguez Ramírez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	4
2. INTRODUCCIÓN	5
3. OBJETIVOS	5
3.1. Objetivo General	5
3.2. Objetivos Específicos	5
4. MARCO TEÓRICO.....	6
4.1. Técnicas de sensado de espectro	6
4.2. Transformada Wavelet	7
4.3. Dispositivo de radio definidos por <i>software</i>	9
4.4. Elementos de software	10
5. TRABAJO RELACIONADO.....	12
6. METODOLOGÍA	13
6.1. Implementación de las técnicas de detección de espectro.....	13
6.1.1. Detector de energía (Energy Detector).....	13
6.1.2. Detector basado wavelet (Wavelet Based Detector):.....	14
6.2. Configuración física	15
6.3. Adquisición de datos	16
6.3.1. Adquisición de datos en pruebas preliminares	16
6.3.2. Adquisición de datos al interior de una banda específica	17
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS	20
7.1. Resultados obtenidos en las pruebas preliminares	20
7.1.1. A través del detector de energía	20
7.1.2. A través del detector Wavelet	23

7.2. Resultados obtenidos de las mediciones de ocupación de espectro al interior de una banda específica	26
7.2.1. Mediante el detector de energía	26
7.2.2. Mediante el detector basado en Wavelet.....	28
7.2.3. Comparación de métodos	29
8. CONCLUSIONES	31
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

LISTA DE TABLAS

Tabla I: Conjunto de puntos de medición propuestos en sedes de la Universidad de Antioquia en el Valle de Aburra.	17
Tabla II: Frecuencia y potencia máxima de cada señal detectada mediante detección de energía.	21
Tabla III: Frecuencia y magnitud máxima de cada señal detectada mediante Transf. Wavelet. ...	25

LISTAS DE FIGURAS

Fig. 1. Tipos de Wavelet [9].....	7
Fig. 2. Identificación de discontinuidades en la PSD mediante la Transformada Wavelet [8].....	8
Fig. 3. Placa base de la radio Ettus Research USRP 2901 [11]. (Fuente: NI®)	9
Fig. 4. Interfaz gráfica de usuario del programa GNURadio™ [12].	10
Fig. 5. Diagrama de flujo del algoritmo de sensado por detección de energía.	14
Fig. 6. Diagrama de flujo del algoritmo de sensado por transformada Wavelet.....	14
Fig. 7. Diagrama de configuración de las mediciones con el equipo Ettus USRP 2901.....	15
Fig. 8. Promedio de mediciones en la banda FM.	16
Fig. 9. Espectro de la señal sensada en la banda de downlink de 1700 MHz LTE.....	17
Fig. 10. Identificación del canal correspondiente a Tigo utilizando la transformada Wavelet.....	18
Fig. 11. Porción de espectro sin promediar y espectro promediado correspondiente a Tigo.	19
Fig. 12. Grafica de una las ventanas y los parámetros más relevantes	20
Fig. 13. Resultados preliminares mediante el detector de energía en la banda FM.	21
Fig. 14. Resultados preliminares mediante la Transformada Wavelet en la banda FM.....	24
Fig. 15. Detección de ocupación de subportadoras mediante el detector de energía.....	26
Fig. 16. Umbral vs Porcentaje de ocupación.....	27
Fig. 17. Detección de ocupación de subportadoras mediante el detector basado en Wavelet.	28
Fig. 18. Comparación de ocupación entre el detector de energía y el detector basado en Wavelet.	29
Fig. 19. Comparación en la similitud en los vectores de ocupación de ambos métodos.	30

Siglas, acrónimos y abreviaturas

SDR	Software Defined Radio
USRP	Universal Software Radio Peripheral
UHD	USRP Hardware Driver
DSP	Digital Signal Processing
FM	Frequency Modulation
FFT	Fast Fourier Transform
PSD	Power Spectral Density
SNR	Signal to Noise Ratio
BTS	Base Transceiver Station
FDD	Frequency Division Duplex
WT	Transformada Wavelet
ED	Energy Detection
LTE	Long Term Evolution

Implementación de técnicas clásicas para el sensado del espectro basadas en SDR (software defined radio)

1. RESUMEN

En la actualidad, el sensado de espectro se ha convertido en un área de investigación crucial ante la creciente demanda de ancho de banda y la saturación de ciertas porciones del espectro radioeléctrico. Esta problemática adquiere mayor relevancia con la implementación de las redes de comunicación móvil de quinta generación (5G), lo que ha generado la necesidad de actualizar políticas de distribución del espectro y asignar nuevas bandas de frecuencias para acomodar estas tecnologías emergentes.

Este trabajo propone la implementación de técnicas clásicas de sensado de espectro mediante el uso de dispositivos SDR (Software Defined Radio) con el objetivo de determinar el nivel de ocupación de este recurso en una banda específica.

La metodología propuesta incluyó dos fases principales. En la primera fase, se llevó a cabo la selección de las técnicas clásicas de sensado de espectro, revisando la literatura científica y técnica relacionada con estas técnicas, describiéndolas y seleccionando las que se implementarían con dispositivos SDR. Específicamente, se optó por el detector de energía y el detector basado en Wavelet. En la segunda fase, se procedió a la implementación práctica de las técnicas seleccionadas y se realizaron pruebas en entornos controlados y reales para determinar los niveles de ocupación en la banda de interés.

La implementación de estas técnicas permitió estimar la ocupación de espectro radioeléctrico en la banda de interés. Los resultados obtenidos demostraron la eficacia de las técnicas seleccionadas para el sensado de espectro, ofreciendo una visión detallada de la ocupación del espectro en entornos controlados y reales.

En resumen, en este trabajo se logró implementar con éxito dos técnicas clásicas de sensado de espectro mediante el uso de dispositivos SDR, brindando información que permitió caracterizar el comportamiento en el uso del recurso. Información que contribuyen significativamente y sientan las bases para futuras investigaciones y desarrollos en este ámbito.

***Palabras clave* – SDR, Técnicas de Sensado, Sensado de Espectro, Ocupación, GNURadio, Transformada Wavelet.**

2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el sensado de espectro sigue siendo un tema de investigación importante debido a la creciente demanda de ancho de banda y a la saturación que presentan algunas porciones del espectro radioeléctrico. Por consiguiente, el acceso al espectro radioeléctrico es un tema de interés y estudio, tanto para la comunidad académica como para la industria de las telecomunicaciones debido, en gran medida, a la llegada de las Redes Móviles de Quinta Generación (5G, *Fifth Generation mobile networks*). Resultados de estos estudios han permitido evidenciar la necesidad de actualizar las políticas de atribución del espectro y la asignación de nuevas bandas de frecuencias que posibiliten la implementación de estos estándares modernos [1].

Los esquemas de acceso al espectro se basan en una amplia gama de técnicas, muchas de las cuales implican el sensado del mismo. Algunas de ellas conservan orientaciones muy clásicas y otras están innovando mediante la aplicación de nuevas tecnologías como inteligencia artificial. Estas técnicas inciden en los métodos de asignación y en las posturas competitivas de los actores del mercado de acuerdo con las políticas de uso definidas por el ente regulador [2], por lo cual la gestión eficiente del espectro, que parte de su sensado, se ha convertido en uno de los requisitos más importantes para los actuales sistemas de comunicaciones inalámbricos. Por este motivo, es necesario diseñar mecanismos que permitan obtener datos reales de ocupación de espectro que se procesen y alimenten los modelos de competencia que describen el comportamiento del mercado, lo que a su vez posibilitaría la definición de políticas más flexibles y eficientes para la gestión de este recurso beneficiando a los reguladores, operadores y usuarios.

En el presente proyecto se realizará la implementación de técnicas de sensado de espectro usando Radio Definida por Software (SDR, *Software Defined Radio*), para estimar la ocupación de este al interior de anchos de banda determinados por la tecnología que opere allí y para las bandas de frecuencia de interés. El objetivo es obtener información que permita caracterizar el comportamiento del uso del recurso, de tal manera que pueda ser considerarlo en futuros proyectos para el diseño de procesos regulatorios y estratégicos en el sector de las telecomunicaciones.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Implementar técnicas clásicas de sensado de espectro mediante el uso de dispositivos SDR para determinar el nivel ocupación de este al interior de una banda específica.

3.2. Objetivos Específicos

1. Seleccionar las técnicas clásicas de sensado de espectro para su implementación en dispositivos SDR.
2. Implementar las técnicas de sensado de espectro seleccionadas utilizando dispositivos SDR y ejecutar pruebas en entornos controlados.
3. Diseñar y ejecutar las campañas de medición en entornos reales para el post-procesamiento de los datos (medidas) y estimar el comportamiento de la ocupación del espectro.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Técnicas de sensado de espectro

El objetivo del sensado del espectro es determinar el nivel de ocupación de las diferentes bandas de frecuencia mediante la detección de señales y usando diversos métodos para su análisis. En algunos casos, este proceso busca identificar oportunidades o 'agujeros' en el espectro que puedan ser usados sin causar interferencia al usuario que normalmente lo ocupa. La detección de ocupaciones en el espectro también ayuda al proceso de análisis y caracterización de este mediante la captura de observaciones adecuadas sobre los agujeros de espectro [3]. Los métodos más utilizados para el sensado son:

- **Detección de energía (*Energy Detection*):** Método de sensado que define un umbral de energía acumulada en una porción de espectro específica, determina el nivel de energía de la señal sensada (consistente en el ruido más una posible señal de información). Si el valor medido de energía de la señal supera el umbral, la porción de espectro se considerará ocupada, de lo contrario se considerará desocupada. Este método no requiere ningún tipo de información previa sobre las señales de información ni sobre la red o su operación [4], lo cual facilita su implementación y su aplicación en una amplia variedad de ambientes.
- **Detección mediante filtro acoplado (*Matched Filter Detection*):** Se usa para detectar la presencia, en la banda de interés, de una señal conocida. Se compara la señal capturada con la señal conocida para determinar si hay o no presencia de la misma en el espectro sensado, por lo que es necesario tener información precisa sobre la señal a detectar y el proceso queda ajustado a dicha señal [5].
- **Detección de ciclo estacionario (*Cyclostationary Detection*):** Las señales usadas en comunicaciones tiene la característica de ser ciclo-estacionarias, es decir, suelen repetirse cada cierto periodo. El cálculo de la autocorrelación de la señal recibida y su Transformada Discreta de Fourier (DFT, *Discrete Fourier Transform*) pueden arrojar indicios sobre la presencia o no de una señal de información. En este caso, se necesita información sobre la periodicidad de la señal a detectar y sus características particulares [6].
- **Detección basada en autocorrelación (*Autocorrelation Based Detection*):** La técnica de detección basada en autocorrelación se fundamenta en el valor del coeficiente de autocorrelación de la señal recibida. Esta técnica aprovecha las características de autocorrelación existentes en la señal transmitida y no en el ruido. En otras palabras, se utiliza para identificar patrones repetitivos dentro de la señal transmitida, lo que puede ser útil para detectar y analizar características específicas de la señal [7].
- **Detección mediante wavelet (*Wavelet Based Detection*):** Los sistemas de comunicaciones utilizan el espectro atribuido/asignado canalizándolo en porciones de tamaño fijo. La potencia al interior de cada canal de Radio Frecuencia (RF, *Radio Frequency*) se comporta de manera bastante regular dentro de su ancho de banda, pero cambia abruptamente en los bordes de este. Estos cambios abruptos pueden ser detectados utilizando este método de sensado y así determinar si hay ocupación o no de cada canal de RF o porción particular de espectro [8].

4.2. Transformada Wavelet

La Transformada Wavelet (WT, *Transformada Wavelet*) es una técnica de análisis de señales que se basa en descomponer una señal utilizando una serie de funciones base llamadas Wavelets. Estas funciones base son generadas a partir de una función madre y se caracterizan por tener aspectos de escala y tiempo.

La WT se utiliza para analizar señales en diferentes escalas de tiempo y frecuencia, lo que permite una mayor resolución en la identificación de características de la señal. La técnica se basa en el uso de ventanas escalables y moduladas que se desplazan a lo largo de la señal de interés y se calcula el espectro para cada posición. Este proceso se repite muchas veces con una ventana más pequeña o grande y el resultado final es una colección de representaciones tiempo-frecuencia de la señal, todas con diferentes resoluciones [8].

Tipos de familias de Wavelet: Diversas familias de Wavelet se distinguen entre sí debido a que cada tipo de Wavelet posee características únicas en su forma y suavidad, lo que las hace adecuadas para diferentes aplicaciones. Esto significa que se puede elegir una familia de Wavelets específica que se ajuste mejor a las características que se busca en la señal de interés.

La Fig. 1 muestra varias familias de Wavelet diferentes. Estas familias de Wavelet pueden ser de tipo discreto o tipo continuo.

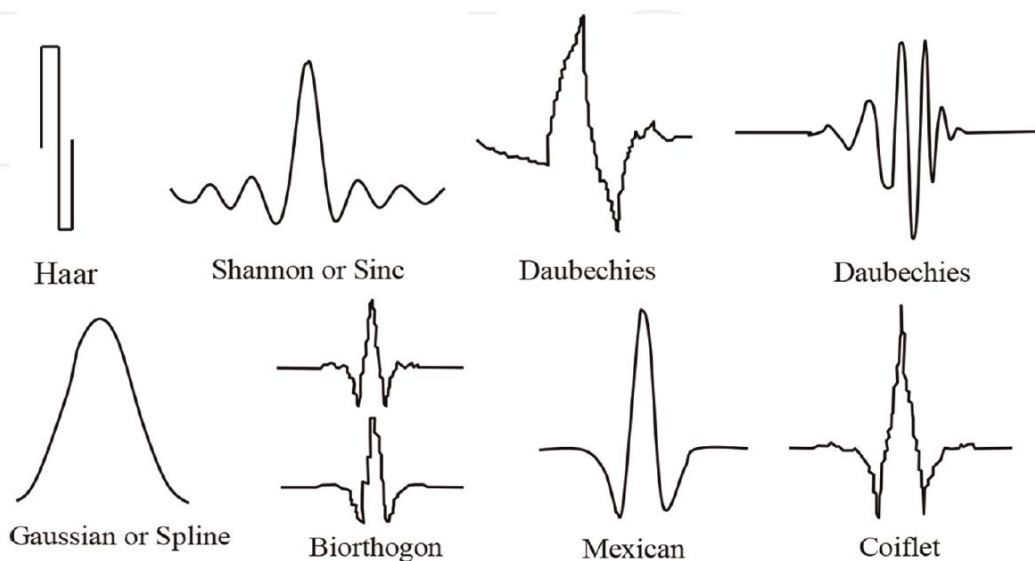


Fig. 1. Tipos de Wavelet [9].

Detección de bordes utilizando la transformada wavelet: La detección de los bordes o frecuencias límite de cada sub-banda del espectro se logra aplicando la WT, donde los cambios bruscos en la ella permiten identificar las discontinuidades en la PSD de la señal sensada. De esta manera, es importante la selección de Wavelets específicas con factores de escala variables que puedan utilizarse para detectar con precisión las discontinuidades en la PSD [9].

Además, la transformada Wavelet es capaz de mostrar los bordes de los espectros de las señales como aumentos o disminuciones bruscas en la representación de amplitud en el eje y. Esto permite determinar la ubicación de estos cambios bruscos en la WT, lo que a su vez localiza las discontinuidades en la PSD.

En la Fig. 2, se muestra un ejemplo de cómo la transformada Wavelet puede utilizarse para identificar discontinuidades en la densidad espectral de potencia (PSD) [8].

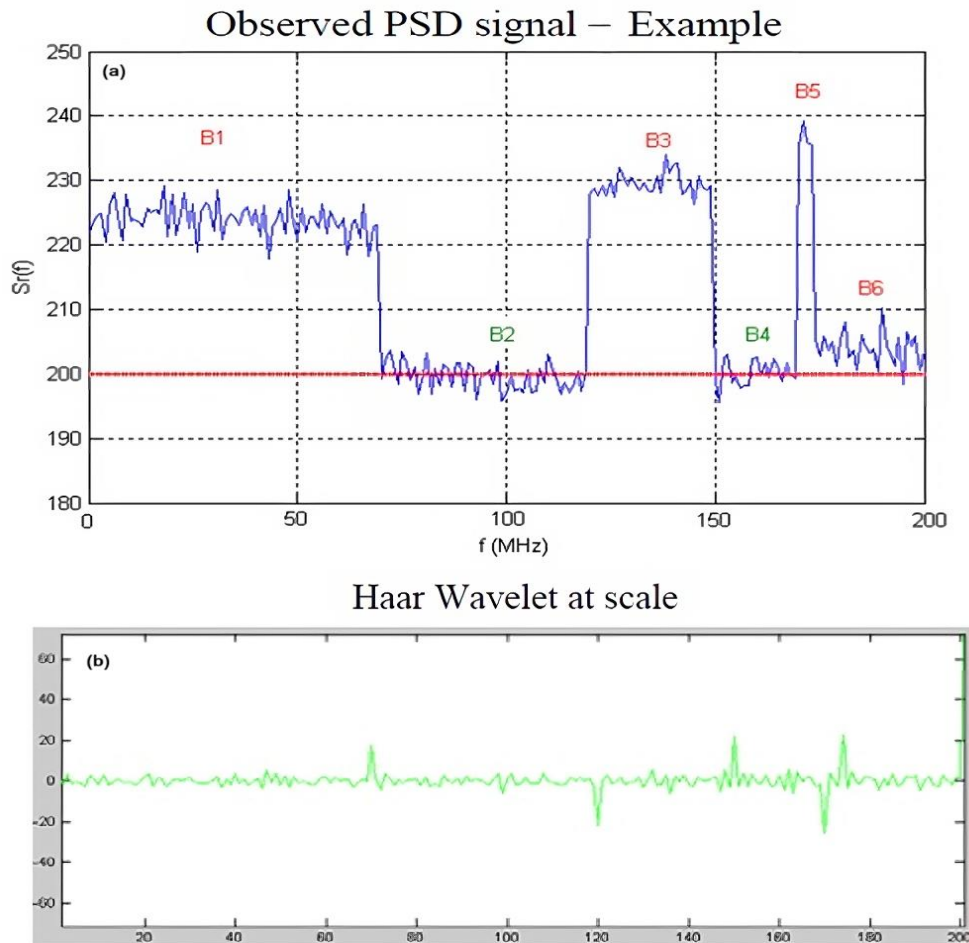


Fig. 2. Identificación de discontinuidades en la PSD mediante la Transformada Wavelet [8].

En la Fig. 2, la gráfica superior muestra la PSD de una señal con cambios bruscos entre los cuales se identifican señales que ocupan porciones de espectro marcadas como B1 a B6. Los bordes de frecuencia, que son aumentos o disminuciones bruscas en el espectro de magnitud o en la PSD de la señal. Por otro lado, la gráfica inferior muestra la WT de la misma señal. Aquí los cambios bruscos de magnitud se presentan de una manera más suavizada y fácil de interpretar. Esto demuestra cómo la WT permite determinar la ubicación de estos cambios bruscos de magnitud, lo que a su vez facilita la identificación de las discontinuidades en la PSD.

4.3. Dispositivo de radio definidos por *software*

Un SDR es un *hardware* que implementa, mediante *software*, funciones que normalmente serían llevadas a cabo por componentes de *hardware* de aplicación específica, tales como filtros, amplificadores, mezcladores, moduladores, demoduladores, codificadores, entre otros [10]. Esto permite la transmisión y recepción de señales de radio de forma flexible y programable mediante *software*. Los SDR están diseñados para operar en una amplia variedad de bandas de frecuencia y modos de transmisión, desde Frecuencia Modulada (FM, *Frequency Modulation*) hasta señales digitales de alta velocidad. Debido a su gran capacidad de procesamiento de señales y su flexibilidad para integrarse con otros sistemas, la tecnología SDR tiene diversas aplicaciones en áreas como sistemas de telecomunicaciones, radares, sistemas militares, sistemas médicos, seguridad informática, radioastronomía, medición, pruebas y monitoreo, investigación y desarrollo, entre otras.

En el presente proyecto se utilizó el SDR USRP 2901 (**USRP**, *Universal Software Radio Peripheral*), mostrado en la Fig. 3 y fabricado por Ettus Research™, una marca propiedad de National Instruments®. Ettus Research™ ofrece una plataforma compatible con **UHD** (*USRP Hardware Driver*), lo que garantiza la portabilidad del código multiplataforma, incluyendo soporte para Linux, Windows y Mac OS. Además, para el desarrollo de *software* SDR, el USRP 2901 se integra con un ambiente de desarrollo de código abierto ampliamente utilizado, denominado GNU Radio [10]. El USRP 2901 fue el SDR usado en el presente trabajo debido que este es un dispositivo de radio disponible en la Universidad de Antioquia al interior del Grupo de Investigación en Telecomunicaciones Aplicadas (**GITA**). Respecto a la plataforma de trabajo, se escogió GNU Radio por su alta compatibilidad con diferentes *hardware* basado en SDR y gracias a las flexibilidades que ofrece una herramienta de código abierto.



Fig. 3. Placa base de la radio Ettus Research USRP 2901 [11]. (Fuente: NI®)

A continuación, se describen las especificaciones y características principales del USRP 2901:

- Rango de frecuencia: entre 70 MHz a 6 GHz.
- Ancho de banda: entre 200 KHz 56 MHz.
- Número de canales: RX/TX 2/2.
- Tasa de muestreo máxima: 56 MS/s (Millones de muestras por segundo).
- Potencia máxima de salida (Pout): 20 dBm.

- Potencia máxima de entrada (Pin): -15 dBm.
- FPGA programable (*Field Programmable Gate Array*).

4.4. Elementos de software

Este proyecto se desarrolló utilizando herramientas de *software* de código abierto que incluyen el sistema operativo Linux®, la plataforma GNURadio™ y el lenguaje de programación Python™, las cuales proporcionaron un entorno de desarrollo idóneo para la realización del proyecto. Además, el USRP 2901 tiene compatibilidad con múltiples plataformas *software* y aplicaciones de procesamiento de señales como Matlab®, Simulink®, LabView®, OpenAirInterface™, permitiendo su utilización en diversas aplicaciones y plataformas de desarrollo.

- **GNURadio™:** Es un entorno de desarrollo de *software* muy utilizado para implementar sistemas de radio incorporando *hardware* SDR. GNURadio™ proporciona bloques de procesamiento de señales que habilitan la manipulación de algoritmos en tiempo real, flexibilizando las soluciones diseñadas e implementadas. La base de GNURadio™ está escrita en C++ y se apoya en la librería Volk para el procesamiento de señales. Esta combinación entre el Procesamiento Digital de Señales (DSP, *Digital Signal Processing*) y el *hardware* SDR compatible, le dan a GNURadio™ la capacidad de crear sistemas de comunicación adaptados a requerimientos específicos [12].

Además de sus capacidades de procesamiento, GNURadio™ cuenta con una intuitiva interfaz gráfica de usuario que facilita significativamente el desarrollo al reducir el tiempo necesario, simplificar las pruebas y agilizar la implementación de cambios requeridos para el proyecto.

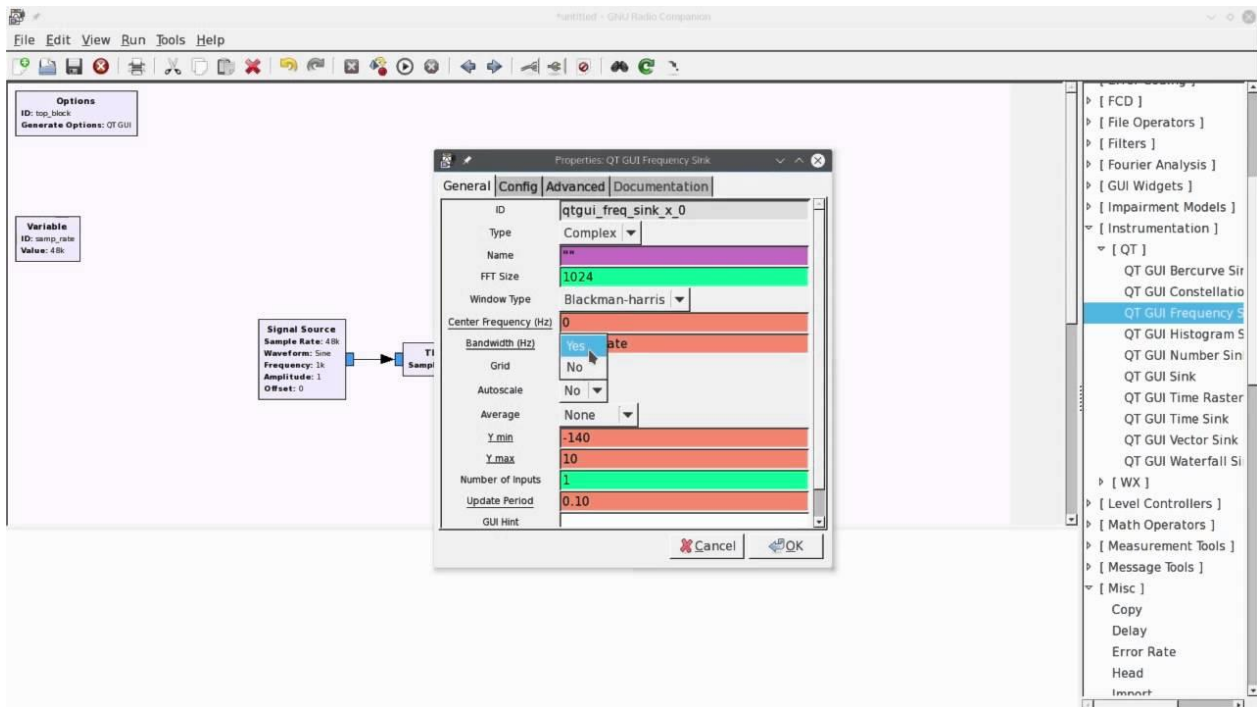


Fig. 4. Interfaz gráfica de usuario del programa GNURadio™ [12].

- **Lenguaje de programación Python™:** Python™ es un lenguaje de programación de propósito general, de código abierto y multiplataforma. Por lo tanto, es un lenguaje sencillo de utilizar, lo que lo hace una buena opción para proyectos de desarrollo de *software* de radio [13]. Además, Python™ permite adaptar algoritmos y procesos de manera ágil y eficiente, lo que resulta fundamental en el procesamiento de señales para ajustar los componentes a las necesidades específicas del proyecto.

En el marco del proyecto, Python™ se utilizó para las siguientes tareas:

- Implementación de los bloques de procesamiento de señales en conjunto con GNURadio™.
- Recopilación y análisis de datos de las señales de radio.

5. TRABAJO RELACIONADO

Hay un fuerte *background* en los temas de investigación y desarrollo del presente proyecto. En [14] y [15] abordan el problema de la detección de señales débiles en el espectro de radio utilizando técnicas de detección de energía. En ambos estudios utilizan el mismo principio fundamental de la detección de energía implementado en este trabajo, el cual se basa en calcular la energía promedio de una señal recibida en una banda de frecuencia específica y compararla con un umbral de detección para determinar si hay una señal presente. En [14] se centran en la implementación práctica de un sistema de detección de energía utilizando el *software* GNURadio™ y el *hardware* USRP, enfocado en la detección de señales en el espectro de radio en general para su uso en radios cognitivas. En [15], a diferencia de lo realizado en este trabajo, los autores se centran más en la propuesta de un algoritmo de detección de energía y su evaluación teórica, enfocado en la detección de señales en la banda ISM (2.4 GHz).

En [16] se analizan dos técnicas de detección de espectro: la detección secuencial de energía y la detección basada en características ciclostacionarias, para detectar señales de usuario primario en un entorno real. Se discute la técnica de detección de energía tradicional, que implica comparar la potencia recibida en una sub-banda de frecuencias con la varianza del ruido para detectar la ocupación del espectro. En este sentido, Krzysztof Cichoń, *et al.* proponen un enfoque adaptativo que reduce el tiempo de detección mediante un detector de energía secuencial de doble umbral. Los autores concluyen que el rendimiento de los algoritmos tradicionales de detección de energía puede ser relativamente bajo en relaciones señal a ruido bajas.

Por otro lado, en [17] realizan la implementación de la técnica de detección de energía para sensado de espectro utilizando GNURadio™ y USRP2. Los autores explican que la detección de energía es un método fiable y auténtico para sensar el espectro, ya que tiene el menor costo computacional y no requiere información previa sobre el espectro y/o las señales. Sin embargo, los autores también mencionan las limitaciones de la detección de energía, como su incapacidad para diferenciar entre usuarios primarios y secundarios y su susceptibilidad a entornos de alta intensidad de señal.

En [8] se emplea la técnica de Transformada Wavelet Continua (CWT, *Continuous Wavelet Transform*) para detectar los bordes de los subcanales en el espectro. La CWT es una expansión de dos parámetros de una señal en términos de una función base wavelet particular, lo que le permite analizar la señal en diferentes escalas y resoluciones para identificar discontinuidades y singularidades en la PSD de la señal. Bajo esta premisa, la CWT posibilita la detección de “agujeros” en el espectro (porciones no ocupadas del mismo). Además, los autores señalan que, si bien la detección de energía es un método fiable y auténtico para sensar el espectro, la técnica que usa la CWT puede ofrecer una mayor precisión y resolución en la detección de los bordes de las subbandas del espectro.

Cabe destacar que la mayoría de estos enfoques se centran en el sensado del espectro mediante la técnica de detección de energía y el detector basado en Wavelet, las cuales fueron las técnicas seleccionadas para este trabajo.

6. METODOLOGÍA

Para la selección de las técnicas clásicas de sensado de espectro, se realizó una exploración cuidadosa de la literatura científica y técnica disponible, con el objetivo de identificar y elegir las técnicas más adecuadas y viables para cumplir con los objetivos del presente trabajo.

Entre las técnicas revisadas, se destacaron dos enfoques: la técnica de detección de energía, el cual es el método más utilizado en la literatura revisada y constituye una referencia para determinar el desempeño de otros métodos y estrategias de sensado. Adicionalmente, es de fácil implementación y bajo costo computacional. Como segunda técnica, se escogió el detector basado en la transformada Wavelet.

Estas dos técnicas fueron seleccionadas como las más apropiadas y prometedoras para su integración y prueba con dispositivos SDR en el marco del proyecto de investigación por dos razones fundamentales. En primer lugar, se alinean muy bien con el objetivo del proyecto, que es determinar el nivel de ocupación en una banda de frecuencias específica. En segundo lugar, estas técnicas tienen como característica principal permitir la detección sin requerir información previa de las señales a analizar. Esto es importante, ya que pueden ser adaptadas dinámicamente a distintos entornos y tipos de señales, a diferencia de las demás técnicas revisadas, que sí requieren un conocimiento previo de las señales a analizar.

6.1. Implementación de las técnicas de detección de espectro

Para la implementación de las técnicas, primero se generó un código base como punto de partida con la ayuda de la interfaz gráfica de GNURadio, ya que esta nos permite construir un diagrama de bloques de procesamiento de señales y posteriormente obtener el código en el lenguaje de programación Python del diagrama de bloques implementado. Esta es una de las ventajas que ofrece GNURadio, dado que permite construir bloques de código de manera simple y rápida, sin la necesidad de construir el código desde cero.

6.1.1. Detector de energía (*Energy Detector*)

El diagrama de flujo general de la rutina implementada para la estimación de ocupación de espectro mediante la técnica de detección de energía se muestra en la [Fig. 5](#).

Para la detección de portadoras se realizó la segmentación de los datos capturados en ventanas de tamaño fijo, en función de la resolución de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*). El objetivo de la segmentación es procesar los datos de manera más eficiente y efectiva, mejorando la precisión en la identificación de señales y minimizando el riesgo de falsos positivos y de falsos negativos que son los más críticos en aplicaciones de radio cognitivo. Una vez segmentados los datos, se define/calcula el umbral de decisión dinámico ajustado a cada segmento de ventana, se realiza la estimación de la intensidad de las señales sensadas y se identifican los picos de magnitud en el espectro con sus correspondientes frecuencias.

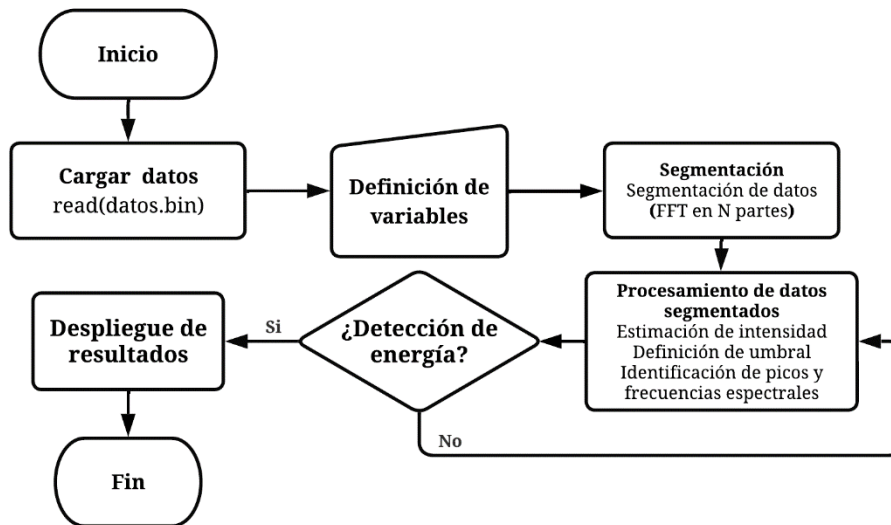


Fig. 5. Diagrama de flujo del algoritmo de sensado por detección de energía.

El cálculo del umbral se realizó siguiendo las recomendaciones de la ITU tal y como se describe en el Informe UIT-R SM.2256-1 [18]. El objetivo de la medición es detectar el mayor número posible de portadoras independientemente de su nivel, lo que requiere el uso de un umbral dinámico que se adapte al nivel real de ruido en el canal de interés. Para determinar este umbral dinámico se ha calculado el piso del ruido del canal y se ha añadido 4 dB a este. De esta manera se garantiza que se seleccionen las señales que tengan una SNR (Signal to Noise Ratio) por encima del nivel del ruido.

6.1.2. Detector basado wavelet (*Wavelet Based Detector*):

El diagrama de flujo para la estimación de ocupación de espectro mediante la técnica de detección basada en la transformada Wavelet se muestra en la Fig. 6.

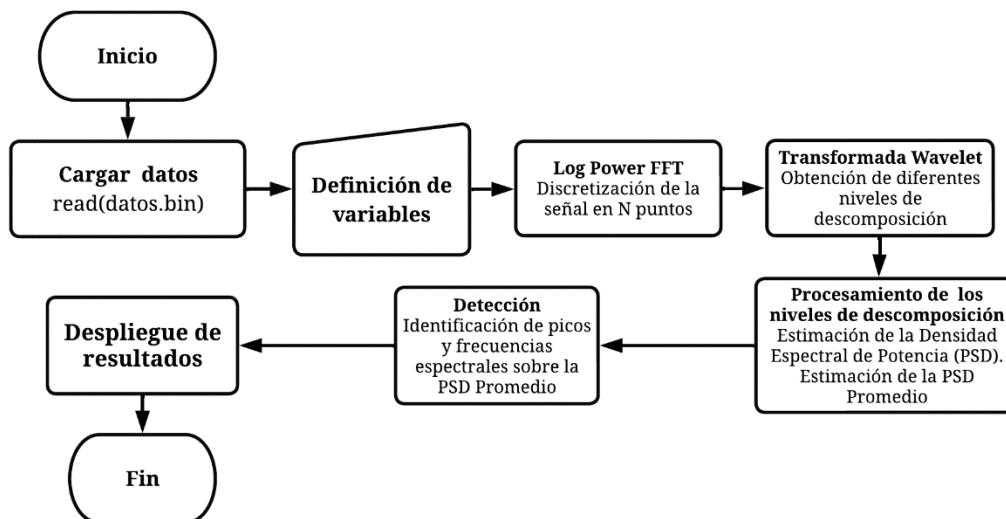


Fig. 6. Diagrama de flujo del algoritmo de sensado por transformada Wavelet.

Para la detección de portadoras, los datos se procesan para observarlos en el dominio de la frecuencia mediante la FFT. Posteriormente, se aplica la WT de la familia Haar para descomponer la señal en varios niveles. En el presente trabajo se hizo uso de la función madre Haar debido a su forma y características (ver Fig. 1), ya que es especialmente útil para detectar bordes o cambios bruscos en el espectro de magnitud de la señal de interés. Seguidamente, en cada nivel de descomposición se estimó la PSD. El objetivo de estimar la PSD en cada nivel de descomposición es obtener un promedio ponderado de las PSD de todos los niveles. El propósito con este promedio ponderado de las PSD de todos los niveles es mejorar la detección de señales débiles al combinar la información aportada por cada nivel de descomposición. Por último, se identifican los picos de potencia sobre la PSD promedio utilizando un algoritmo de detección de picos basado en umbral. En general, el enfoque propuesto en este flujo de trabajo es efectivo para detectar y analizar las señales presentes en los datos procesados.

6.2. Configuración física

La configuración física implementada para el sensado de espectro consistió en un USRP 2901, una antena monopolo y una computadora *host* para el control y configuración del dispositivo USRP. El diagrama de bloques del sistema de medición se muestra en la Fig. 7.

Como se muestra en la Fig. 7, el USRP 2901 se conectó al *host* mediante un cable USB 3.0. El computador utilizado para la medición está equipado con un procesador AMD Ryzen 3, 8 GB de RAM y sistema operativo Ubuntu 20.04. La antena monopolo se conectó al canal RX1 del USRP cuyo tipo de conector es un RF SMA de 50 ohmios. El software se desarrolló utilizando GNURadio™ basado en C++ y Python®.

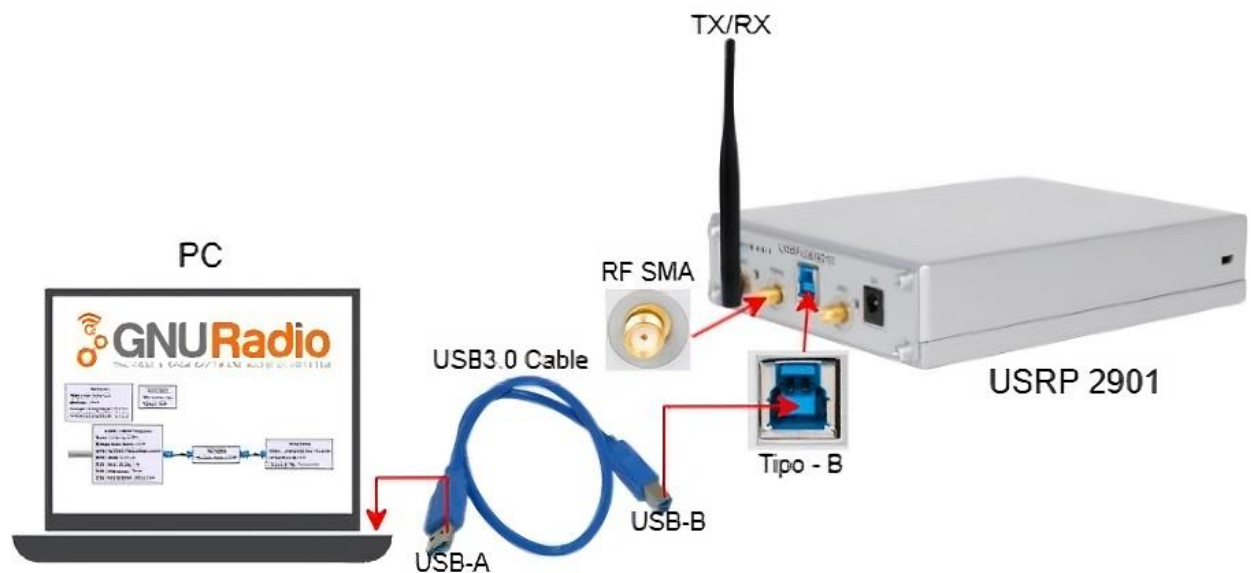


Fig. 7. Diagrama de configuración de las mediciones con el equipo Ettus USRP 2901.

6.3. Adquisición de datos

6.3.1. Adquisición de datos en pruebas preliminares

La banda en la cual se desarrollaron estas pruebas preliminares fue la banda de radiodifusión FM. Además, se realizaron mediciones y recopilación de datos en dos puntos geográficos diferentes con la misma configuración física. Una de las mediciones se llevó a cabo en un ambiente *indoor* en el laboratorio del Grupo de Investigación en Comunicaciones Aplicadas (GITA) de la Universidad de Antioquia, y la otra medición se llevó a cabo en un ambiente *outdoor* dentro del Campus Universitario. En ambos emplazamientos se realizaron pruebas de sensado de espectro para analizar las señales presentes en la banda de radiodifusión FM.

El USRP se configuró para operar en la banda de FM con una frecuencia central de 100 MHz, un ancho de banda de 40 MHz y una ganancia de recepción de 30 dB. Debido a que el USRP procesa la señal por dos canales, una en fase y otra en cuadratura (I/Q), cada canal ocupa la mitad (20 MHz) del ancho de banda total, así que siguiendo el teorema del muestreo de Nyquist [19], la tasa de muestreo del sistema se fijó a 40 MHz. Los datos capturados con el USRP se almacenaron en el archivo *data.bin* y luego se validaron y procesaron para desplegar los resultados.

La medición realizada en el interior del campus se muestra en la Fig. 8.

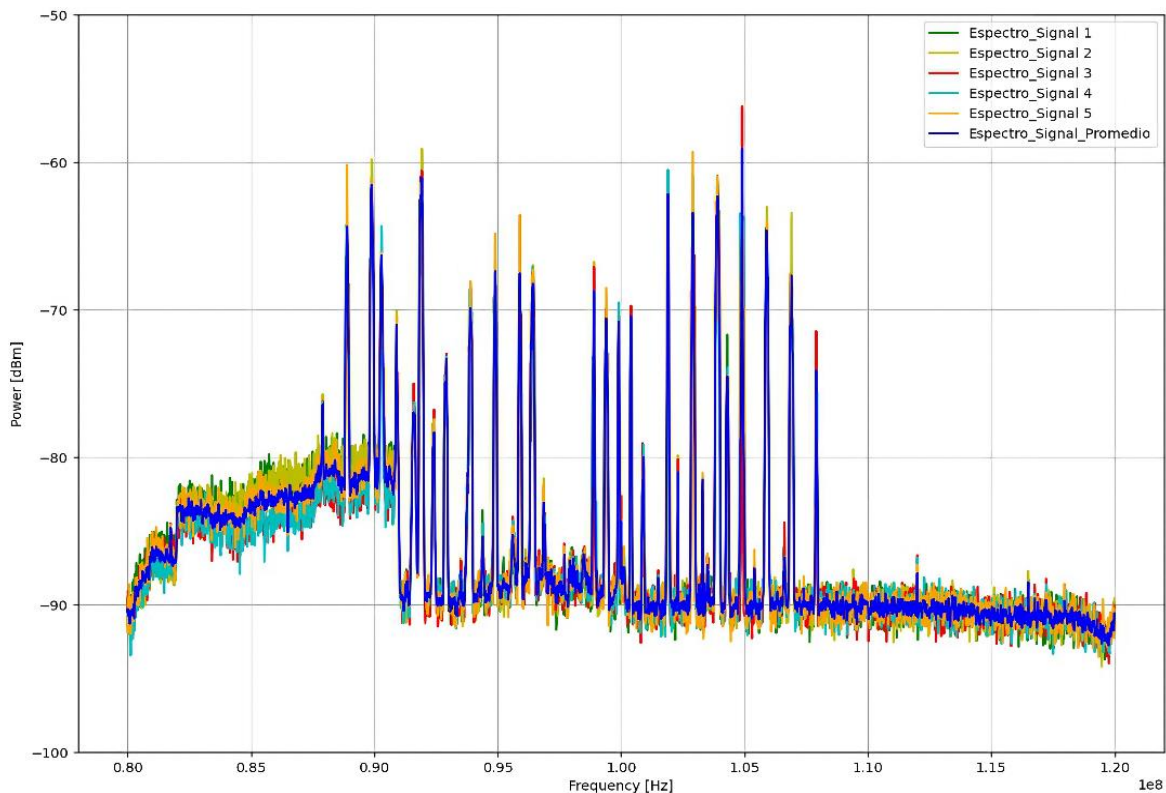


Fig. 8. Promedio de mediciones en la banda FM.

En la Fig. 8 se observan 5 capturas del espectro en la banda de FM cada 2 segundos, junto con el promedio de estas mediciones. Cada curva de color corresponde a una medición individual del espectro y la curva azul muestra la señal promediada. El cálculo de la señal promedio permitió

reducir el ruido aleatorio presente en cada medición individual y suavizar la medición para cada una de las portadoras detectadas en la banda de FM.

6.3.2. Adquisición de datos al interior de una banda específica

En esta sección del proyecto, se describe el proceso de adquisición de datos al interior de una banda de frecuencias específica. Además, en parte de las campañas de medición el objetivo fue llevar a cabo la adquisición de los datos en puntos geográficos concretos, los cuales se muestran en la [Tabla 1](#).

Tabla I: Conjunto de puntos de medición propuestos en sedes de la Universidad de Antioquia en el Valle de Aburra.

Nombre del Punto	Coordenadas (Lon , Lat)
Facultad de Medicina	-75.5663225 , 6.26124929
Ciudad Universitaria UdeA	-75.56819225 , 6.26796215
SIU UdeA	-75.5676696 , 6.2604969

En relación con lo anterior, la banda seleccionada fue la banda atribuida para la operación del estándar de telefonía móvil LTE (*Long Term Evolution*) ubicada en los 1700 MHz. Esta banda elegida está pareada, es decir, los sistemas operan en modo FDD (*Frequency Division Duplex*). Es decir, esta banda está dividida en dos subbandas, una de *uplink* (1710 – 1755 MHz) y otra de *downlink* (2110 – 2155 MHz). Se realizó el sensado sobre la subbanda de *downlink* ya que es más fácil y confiable medir en ella debido a que la transmisión se realiza desde un solo punto, desde la Estación Base Transceptora (BTS, *Base Transceiver Station*), lo que evita el problema del nodo oculto. Específicamente, se analizó la porción de espectro de 2140 a 2155 MHz, que corresponde a un ancho de banda de 15 MHz. Esta porción de espectro fue asignada en el país (Colombia) a la empresa de telecomunicaciones UNE EPM (Tigo) [22].

Una vez definida la banda de frecuencias y los puntos geográficos para las mediciones (consultar [Tabla 1](#)), se procedió a la captura de datos. Una de estas capturas realizada en Ciudad Universitaria UdeA, se muestra en la [Fig. 9](#).

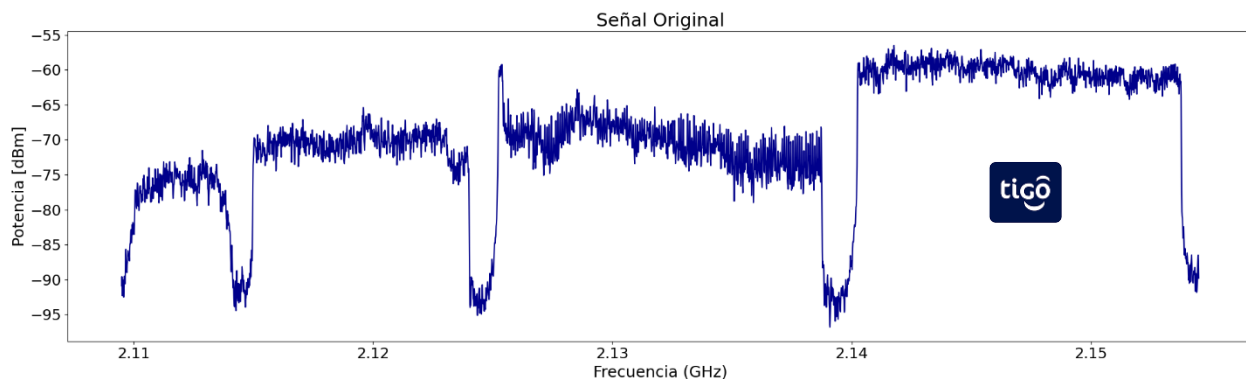


Fig. 9. Espectro de la señal sensada en la banda de *downlink* de 1700 MHz LTE.

Posteriormente, con el propósito de extraer la porción del espectro correspondiente al operador Tigo, se siguió el siguiente proceso:

- Se aplicó la WT a la señal original con 1 nivel de descomposición.
- Se identificaron los picos de la transformada wavelet.
- Se determinaron las frecuencias extremas del canal de interés (Tigo), es decir, las frecuencias que corresponden a los picos más altos de la WT.
- Se calculó el ancho de banda del canal, es decir, la diferencia entre las frecuencias extremas del canal.

Como se puede apreciar, para extraer con precisión la porción de espectro de interés (canal de Tigo) de la señal original, se recurrió a la WT. Como se mencionó en la sección 4.2, la WT es útil para descomponer una señal en componentes de diferentes escalas y detectar cambios abruptos de amplitud o magnitud, lo que puede indicar la presencia de una señal en una frecuencia específica y ocupando un ancho de banda determinado. En consecuencia y en este caso, los picos de la WT corresponden a los cambios abruptos de magnitud en el espectro de la señal, por lo que es práctico utilizarlos para determinar las frecuencias límite del canal. En la Fig. 10 se puede observar el proceso de extracción de la porción de espectro.

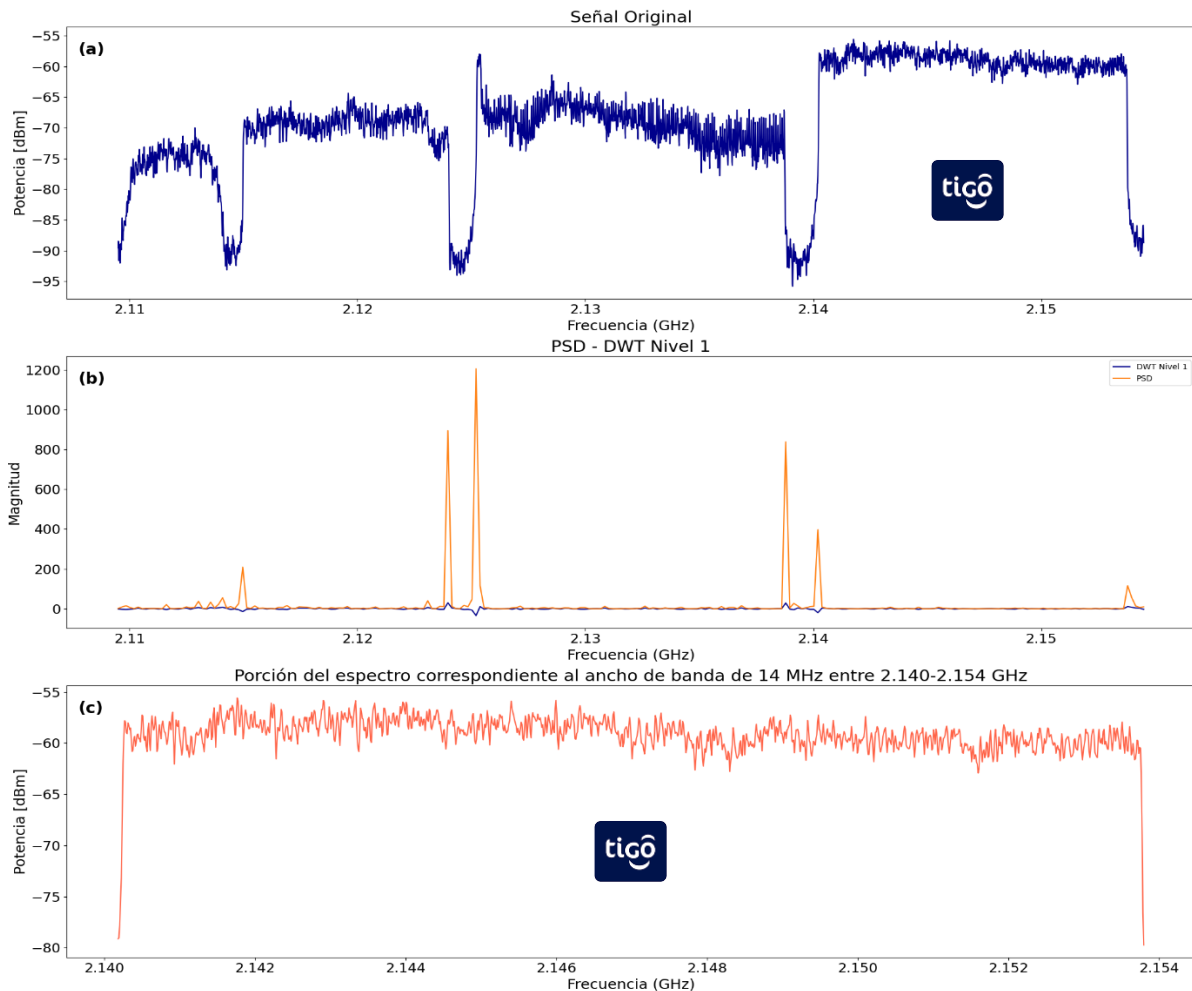


Fig. 10. Identificación del canal correspondiente a Tigo utilizando la transformada Wavelet.

En la Fig. 10, se observa cómo el uso de la transformada wavelet permite identificar los cambios bruscos de magnitud en el espectro de la señal original. Esta técnica permitió aislar con precisión la porción de espectro de 2140 a 2154 MHz correspondiente a Tigo. La gráfica 10a muestra la señal original, mientras que la gráfica 10b representa la PSD del nivel de descomposición, destacando los picos significativos que indican las frecuencias límite del canal. Finalmente, en la gráfica 10c se presenta la porción extraída del espectro, mostrando un ancho de banda claro y definido.

El paso siguiente en el proceso de adquisición de los datos, consistió en promediar las Nm muestras que se tomaron por cada 15 KHz de espectro sensado. La elección de promediar las muestras en porciones de espectro de 15 KHz se basa en las especificaciones técnicas del estándar LTE, las cuales definen una separación entre subportadoras igual a 15 KHz. Al promediar las muestras en porciones de espectro de 15 kHz, es posible obtener una estimación de la potencia de cada subportadora individual. Esto proporciona una representación más precisa de la ocupación del espectro en la banda de interés, facilitando posteriormente un análisis detallado. La Fig. 11 muestra una comparación del espectro original y el espectro obtenido después de promediar las Nm muestras.

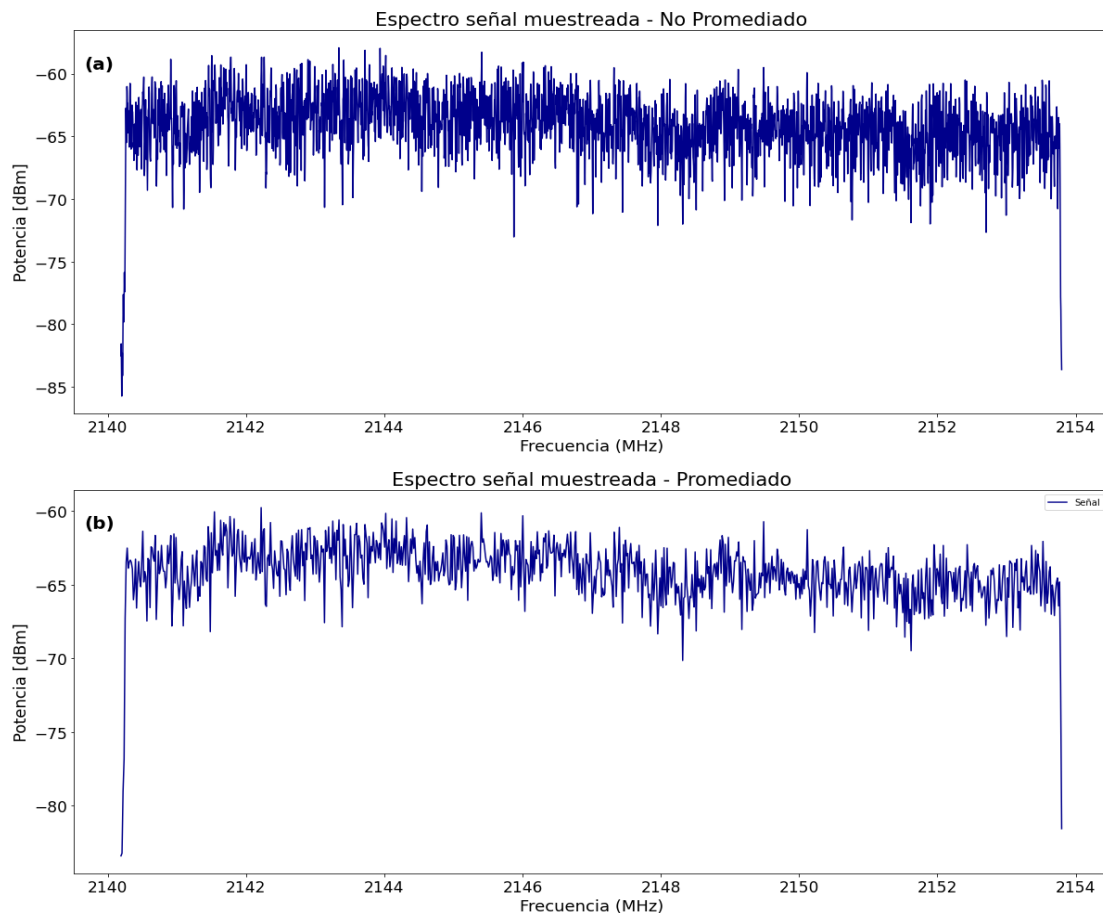


Fig. 11. Porción de espectro sin promediar y espectro promediado correspondiente a Tigo.

El espectro promediado obtenido (gráfica 11b) es el utilizado como entrada a los métodos de detección de ocupaciones.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1. Resultados obtenidos en las pruebas preliminares

Como parte de los objetivos del proyecto, se realizaron mediciones de prueba para validar y evaluar la efectividad de las técnicas implementadas en la detección de señales. Estas mediciones se llevaron a cabo dentro del campus de la Universidad de Antioquia como parte esencial del proceso de evaluación de dichas técnicas, obteniendo los siguientes resultados.

7.1.1. A través del detector de energía

Como se mencionó anteriormente en la sección 6.1.1, para este método se estableció un umbral de decisión dinámico basado en la potencia promedio más 4 dB por encima del nivel del ruido. El umbral permitió seleccionar solo aquellas ventanas que presenten una potencia máxima superior a este valor. De esta forma, se identificaron las ventanas más relevantes y se guardaron los parámetros calculados en cada una de estas ventanas en un *dataframe*. En la Fig. 12 se puede observar, como ejemplo, la gráfica correspondiente a una de estas ventanas detectadas, donde se visualiza la potencia máxima, la potencia promedio y el nivel de umbral correspondiente a esa ventana.

Ventana-> [89.76800976800976 - 90.01221001221] MHz. -> Tamaño = 0.244140625 MHz.

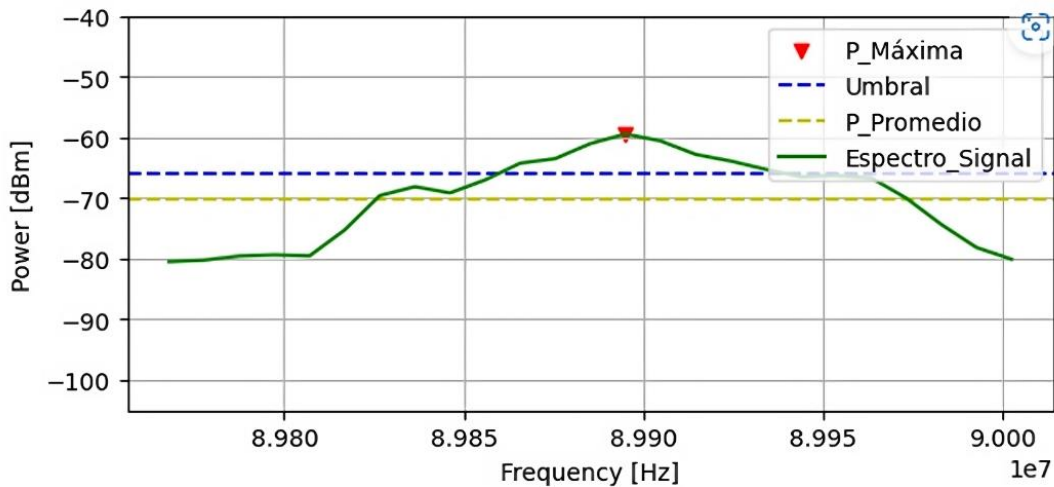


Fig. 12. Gráfica de una las ventanas y los parámetros más relevantes

La Fig. 13 muestra los resultados obtenidos mediante la técnica de detección de energía y proporciona información visual sobre cómo se lleva a cabo la distribución y la utilización de señales en esta banda en el municipio de Medellín.

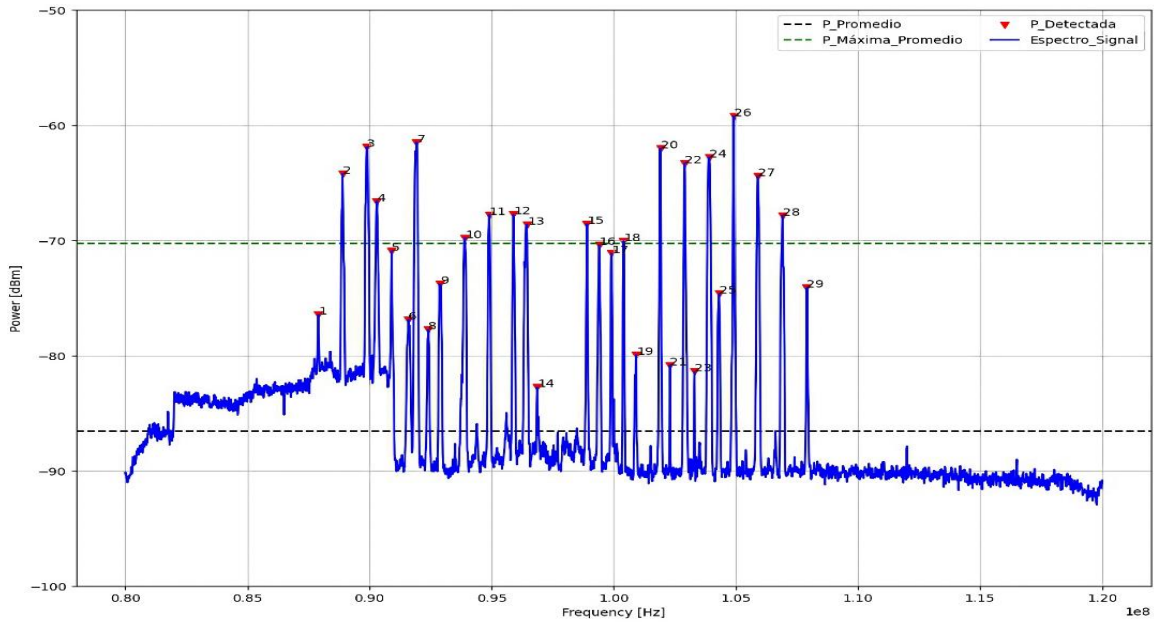


Fig. 13. Resultados preliminares mediante el detector de energía en la banda FM.

Como se muestra en la Fig. 13 el algoritmo detectó un total de 29 portadoras en la banda de FM y sus ubicaciones en la frecuencia, lo que indica un nivel de ocupación cercano al 58% en esta banda de frecuencias. Por otro lado, también se detectaron algunos huecos o “espacios blancos” en esta banda; por ejemplo, uno de 2 MHz de ancho entre 96.9 MHz y 98.9 MHz. Es importante tener en cuenta que estos huecos no necesariamente indican la ausencia de señales, ya que pueden ser el resultado de la presencia de interferencias no deseadas en la banda de FM dentro del Campus. Adicionalmente, se verifica que las señales detectadas están dentro de la banda de frecuencia de 88 MHz a 108 MHz, atribuida para el servicio de radiodifusión sonora FM según el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia (CNABF) de la ANE [20]. En la Tabla II se muestran la frecuencia y potencia máxima de las portadoras detectadas mediante la técnica de detección de energía.

Tabla II: Frecuencia y potencia máxima de cada señal detectada mediante detección de energía.

#	Freq(MHz)	Pot(dBm)	#	Freq(MHz)	Pot(dBm)
1	87.9	-76.297	16	99.4	-70.328
2	88.9	-63.061	17	99.9	-70.909
3	89.9	-61.879	18	100.4	-70.057
4	90.3	-66.248	19	100.9	-79.819
5	90.9	-70.855	20	101.9	-62.493
6	91.6	-77.285	21	102.3	-80.992
7	91.9	-61.518	22	102.9	-63.125
8	92.4	-77.636	23	103.3	-81.468
9	92.9	-73.724	24	103.9	-62.911
10	93.9	-69.659	25	104.3	-74.082
11	94.9	-66.979	26	104.9	-59.242
12	95.9	-67.222	27	105.9	-64.543
13	96.4	-68.201	28	106.9	-68.473
14	96.9	-82.843	29	107.9	-73.611
15	98.9	-68.872	--	---	---

Como se puede apreciar en la [Tabla II](#), las frecuencias detectadas se encuentran dentro del espectro atribuido para las emisoras de FM en Colombia [20]. Por otro lado, de las 29 señales detectadas en la banda de FM y mostradas en la [Tabla II](#), 27 corresponden a estaciones de radiodifusión sonora FM registradas en el listado proporcionado por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MINTIC) [21]. Sin embargo, se identificaron 2 señales en las frecuencias de 91.6 MHz y 103.3 MHz que no están registradas en el listado del MINTIC y tampoco corresponden a estaciones de radiodifusión sonora. Esta situación sugiere la posibilidad de que haya presencia de altos niveles de ruido en interferencia en esas frecuencias, con una potencia suficiente como para superar el umbral y ser detectada como una señal de información (falso positivo), lo cual puede requerir un ajuste en el umbral de decisión para evitar la detección de interferencias como señales de información. Sin embargo, también es necesario considerar la posibilidad de que alguien esté utilizando esas portadoras sin contar con la debida licencia.

Con los resultados obtenidos en estas pruebas preliminares, se pudieron destacar algunos puntos relevantes que permitieron evaluar y mejorar el funcionamiento del detector de energía.

Se revisaron aspectos como su sensibilidad y precisión para detectar señales débiles cerca del ruido. Los resultados mostraron que la técnica es capaz de detectar señales de baja potencia gracias a la segmentación de datos y el promedio de las mediciones. Sin embargo, se identificaron algunas limitaciones como, por ejemplo, que la interferencia de señales cercanas o el ruido presente pueden afectar su eficacia, especialmente en la detección de señales débiles o en entornos ruidosos, lo cual puede restringir su utilidad en la identificación de señales específicas en la banda de interés.

Adicionalmente, estas limitaciones identificadas son consistentes con los desafíos previamente señalados en la sección 5, donde se aborda la detección de señales débiles en el espectro de radio. En particular, se destaca que la interferencia de señales cercanas y el ruido son factores recurrentes que afectan la eficacia de la técnica de detección, especialmente en condiciones de relación señal a ruido desfavorables. Estas consideraciones refuerzan la necesidad de abordar las limitaciones inherentes a la detección de señales débiles en entornos prácticos mediante el detector de energía.

7.1.2. A través del detector Wavelet

Los resultados de la detección de portadoras mediante la implementación de la Transformada Wavelet y el uso de la señal madre Haar se muestra en la en la [Fig. 14](#), donde se observan 4 gráficas.

La gráfica 14a corresponde a la señal original perteneciente a la porción de espectro de la banda FM, donde visualmente se pueden identificar las diversas estaciones de radio FM como componentes de frecuencia individuales.

Por otro lado, las gráficas 14b y 14c muestran los resultados obtenidos después de aplicar la Transformada Wavelet Discreta (DWT, *Discrete Wavelet Transform*) a la señal original utilizando la familia de Wavelet Haar. La gráfica **PSD - DWT Nivel 1** muestra la PSD de la WT después de aplicar una descomposición de primer nivel y la **PSD - DWT Nivel 2** corresponde a la PSD de la descomposición de segundo nivel. Cada nivel de descomposición revela cambios bruscos de amplitud o bordes en la señal original. De esta manera, avanzar de un nivel a otro, desde la PSD DWT Nivel 1 hasta la PSD DWT Nivel 2, permite una descomposición progresivamente más detallada de la señal. Esta progresión se refleja en la representación de las componentes de frecuencia que se vuelven más finas a medida que se aumenta el nivel de descomposición. Lo anterior se debe a que cada nivel de descomposición tiene una mejor resolución que su nivel anterior, lo que resulta en una mayor capacidad para identificar cambios sutiles de amplitud y ubicarlos en la frecuencia con más precisión. Por consiguiente, el último nivel tiene una mayor resolución al capturar más muestras de la señal original, ofreciendo una perspectiva más detallada de la señal en componentes de frecuencia más finos, mientras que el primer nivel, con menos muestras, arroja componentes de frecuencia más gruesas.

En consecuencia, la gráfica 14d muestra la PSD promedio de las PSD de los 2 niveles de descomposición. Este cálculo de la PSD promedio permitió obtener una representación más general de la señal teniendo en cuenta las características de la señal en ambos niveles de descomposición.

Es importante resaltar, que la decisión de limitar la descomposición a solo 2 niveles se debió a que, observando la [Fig. 14](#), se evidencia una diferencia en resolución entre cada nivel de descomposición. Al considerar el ancho de banda de las estaciones de FM, aumentar el número de niveles de descomposición podría resultar en una pérdida significativa de información, ya que se utilizarían menos muestras por cada nivel de descomposición adicional, y por ende, menos muestras para representar cada portadora presente o ausente. Por lo tanto, limitar la descomposición a 2 niveles ayudó a capturar y preservar la información necesaria sin perder detalles importantes.

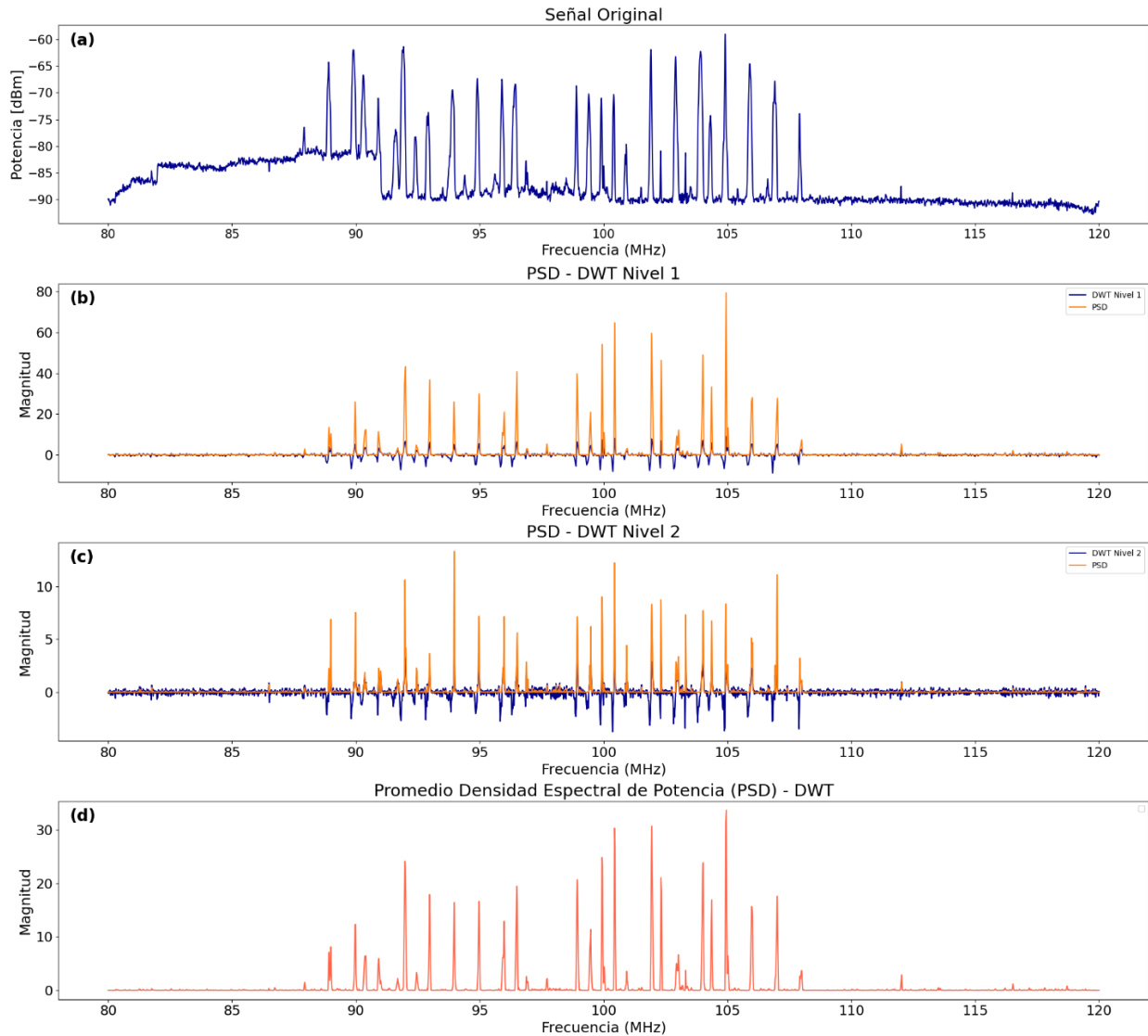


Fig. 14. Resultados preliminares mediante la Transformada Wavelet en la banda FM.

La [Tabla III](#) se muestra la frecuencia y magnitud máxima de las portadoras detectadas mediante el detector Wavelet. Como se puede observar en la [Tabla III](#), se detectaron 39 señales en la banda FM, lo que indica un nivel de ocupación cercano al 78%. En consecuencia, al comparar los resultados obtenidos con el detector basado en Wavelet y el detector de energía, se puede destacar que el detector basado en Wavelet detectó 10 portadoras más que el detector de energía. Esto sugiere que este método es mucho más sensible para detectar características de las señales cercanas al nivel del ruido que el detector de energía, pero al mismo tiempo es más sensible a los efectos del ruido y la interferencia, lo que puede conducir a falsos positivos en la detección.

Sin embargo, como resultado, 9 de las 10 nuevas señales detectadas por el detector basado en Wavelet, en las frecuencias de 93.5, 95.4, 96.4, 97.2, 98.5, 100.1, 101.5, 103.5 y 106.6 MHz, corresponden a estaciones de radiodifusión sonora FM registradas en el listado proporcionado por el MINTIC [21].

Por otro lado, de 1 de las 10 nuevas señales detectadas, en la frecuencia de 105.4 MHz, no se encontró registro de pertenecer a una estación de radiodifusión sonora FM, lo que sugiere un falso positivo en la detección debido a efectos de la interferencia y el ruido en esa frecuencia o a un uso ilegal del recurso espectral.

Tabla III: Frecuencia y magnitud máxima de cada señal detectada mediante Transf. Wavelet.

#	Freq(MHz)	Magnitud	#	Freq(MHz)	Magnitud
1	87.9	7.334	21	99.4	32.132
2	88.9	31.194	22	99.9	44.017
3	89.9	18.252	23	100.1	1.432
4	90.3	28.984	24	100.4	88.785
5	90.9	9.943	25	100.9	4.543
6	91.6	14.338	26	101.5	1.709
7	91.9	118.489	27	101.9	43.497
8	92.4	32.127	28	102.3	7.407
9	92.9	23.956	29	102.9	43.310
10	93.5	1.059	30	103.3	18.520
11	93.9	19.165	31	103.5	1.273
12	94.4	1.522	32	103.9	139.952
13	94.9	101.733	33	104.3	21.850
14	95.4	1.269	34	104.9	57.949
15	95.9	68.021	35	105.4	1.995
16	96.4	38.308	36	105.9	88.117
17	96.9	1.408	37	106.6	1.161
18	97.2	0.654	38	106.9	112.266
19	98.5	0.541	39	107.9	15.409
20	98.9	90.983	--	---	---

Al igual que el detector de energía, las pruebas preliminares con el detector basado en Wavelet permitieron destacar varios aspectos claves para su evaluación y mejora.

La transformada wavelet utilizada, el número de niveles de descomposición y el umbral de detección de picos son factores importantes que influyeron en el rendimiento y la sensibilidad del detector. Los resultados mostraron que el detector basado en Wavelet es capaz de detectar señales con una amplia gama de amplitudes, como se evidencia en la PSD promedio (ver Fig. 14). Además, la decisión de limitar la descomposición a dos niveles para evitar la pérdida de información de las señales más débiles frente a señales más fuertes cuando se promedian las PSD, mostró ser eficaz y clave para optimizar el rendimiento del detector Wavelet. En comparación con el detector de energía, el detector basado en Wavelet detectó 10 señales más, lo que sugiere una mayor sensibilidad para detectar señales cercanas al nivel de ruido. Sin embargo, el detector Wavelet tiene sus limitaciones, como la susceptibilidad a la interferencia de señales cercanas a la banda de interés. Todos estos aspectos fueron puntos muy importantes a tener en cuenta y que ayudaron a ajustar los parámetros para mejorar su rendimiento.

7.2. Resultados obtenidos de las mediciones de ocupación de espectro al interior de una banda específica

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante la aplicación de las dos técnicas de detección espectro implementadas, con el objetivo de estimar los niveles de ocupación de espectro en la banda específica previamente definida en la sección 6.3.2.

7.2.1. Mediante el detector de energía

Los resultados mediante el método de detección de energía se muestran en la Fig. 15.

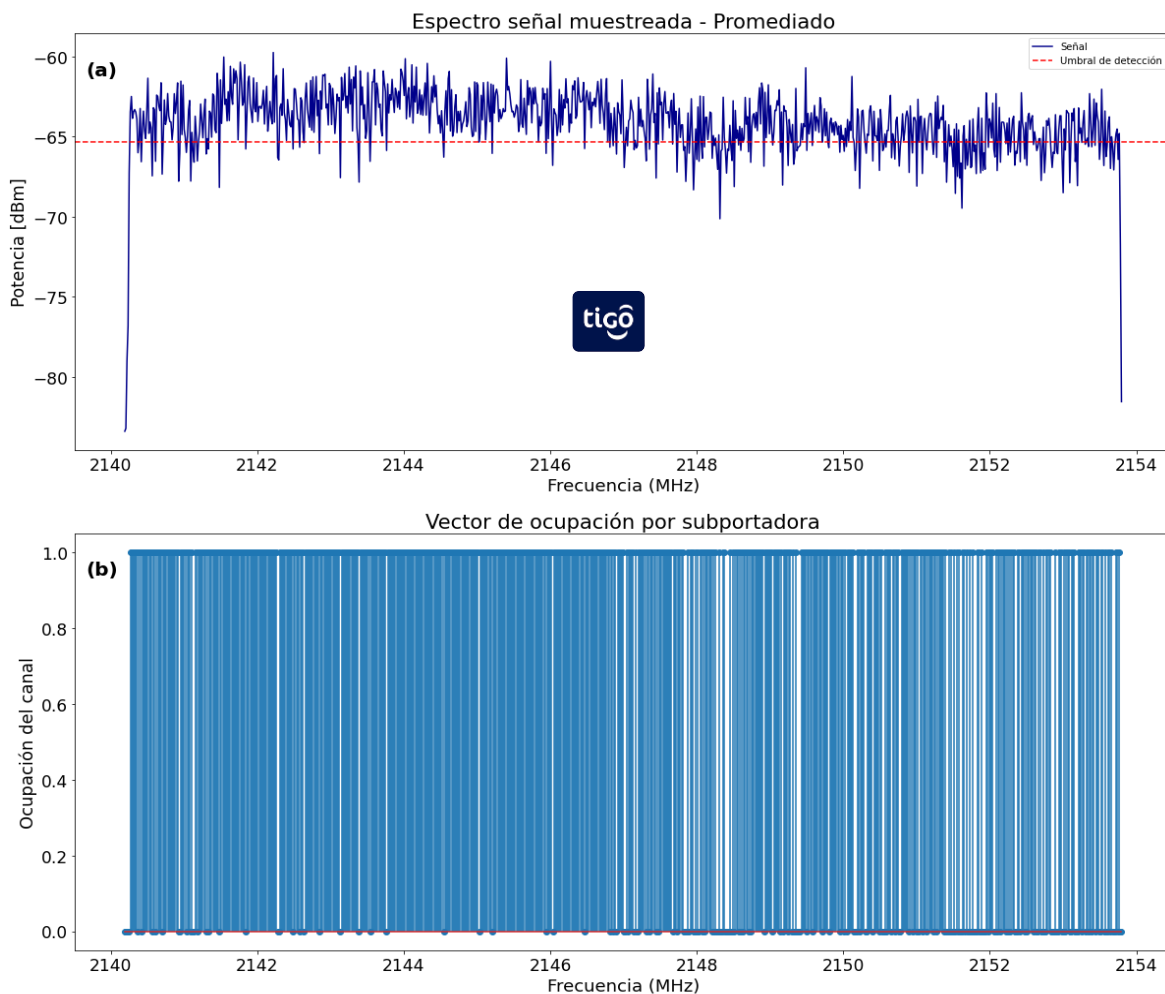


Fig. 15. Detección de ocupación de subportadoras mediante el detector de energía.

La Fig. 15 ilustra la detección de subportadoras y el nivel de ocupación estimado en la porción del espectro correspondiente a Tigo [22]. La presencia de subportadoras en el canal fue detectada en un en un instante específico, lo que significa que los resultados reflejan la ocupación en ese preciso momento. En este contexto, la gráfica 15a muestra el espectro de la señal muestreada junto con el

nivel umbral aplicado para la detección de subportadoras. Es importante mencionar que las subportadoras cuya potencia supera el nivel umbral se consideran ocupadas.

Por otro lado, la gráfica 15b presenta el vector de ocupación por subportadora. En esta gráfica, cada barra vertical indica si una subportadora está ocupada (valor 1) o desocupada (valor 0). Este resultado arrojó que aproximadamente el 78.8% de las subportadoras en el canal analizado están ocupadas en el momento específico de la medición.

Adicionalmente, se realizó una estimación del nivel de ocupación variando el umbral de detección y el resultado se muestra en la Fig. 16.

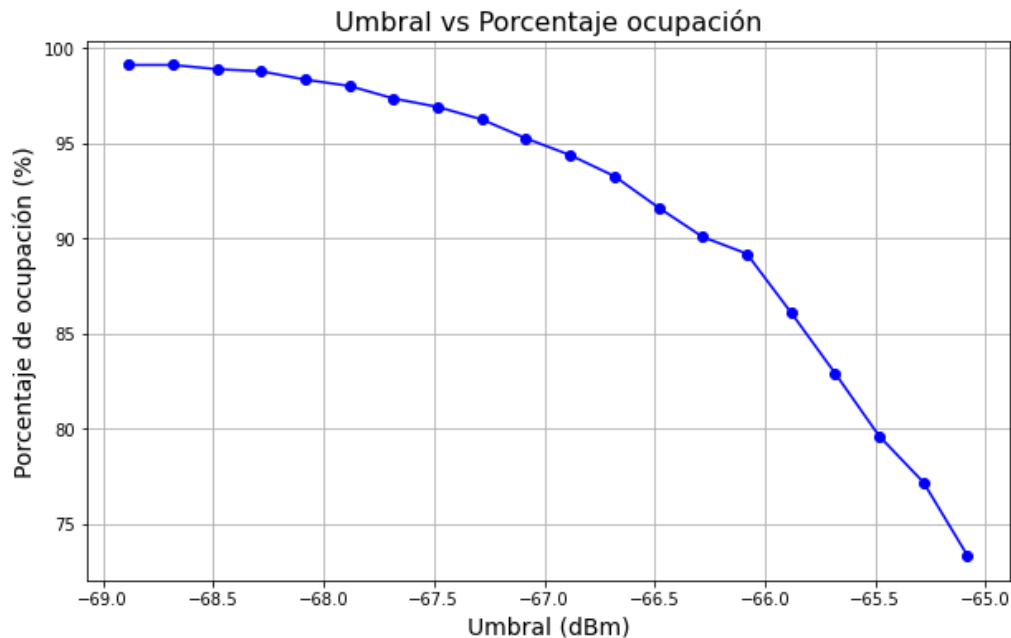


Fig. 16. Umbral vs Porcentaje de ocupación

El resultado obtenido en a Fig. 16 permitió evaluar la sensibilidad de la técnica al nivel de umbral utilizado y cómo esto afecta la ocupación detectada en la banda. La línea azul en la gráfica representa esta relación. Como se puede observar, a medida que aumenta el umbral (se vuelve menos negativo), la ocupación disminuye significativamente. Esto sugiere que, a umbrales más altos, menos subportadoras se consideran ocupadas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que un umbral demasiado bajo puede conducir a la detección de subportadoras no ocupadas como ocupadas (falsos positivos), mientras que un umbral demasiado alto podría llevar a la no detección de subportadoras que sí están ocupadas (falsos negativos, los cuales son más críticos en algunas aplicaciones). La variación puede ser dramática: si se toma un umbral de $-67 \text{ dBm} \pm 2 \text{ dB}$ ($\Delta=4 \text{ dB} \rightarrow$ factor de 2.5), el porcentaje de ocupación detectado pasa de 73% a 99%. Por ello es importante escoger un umbral óptimo que permita obtener resultados confiables en los niveles de ocupación detectados.

7.2.2. Mediante el detector basado en Wavelet

Los resultados mediante el método de detección basado en Wavelet se muestran en la Fig. 17.

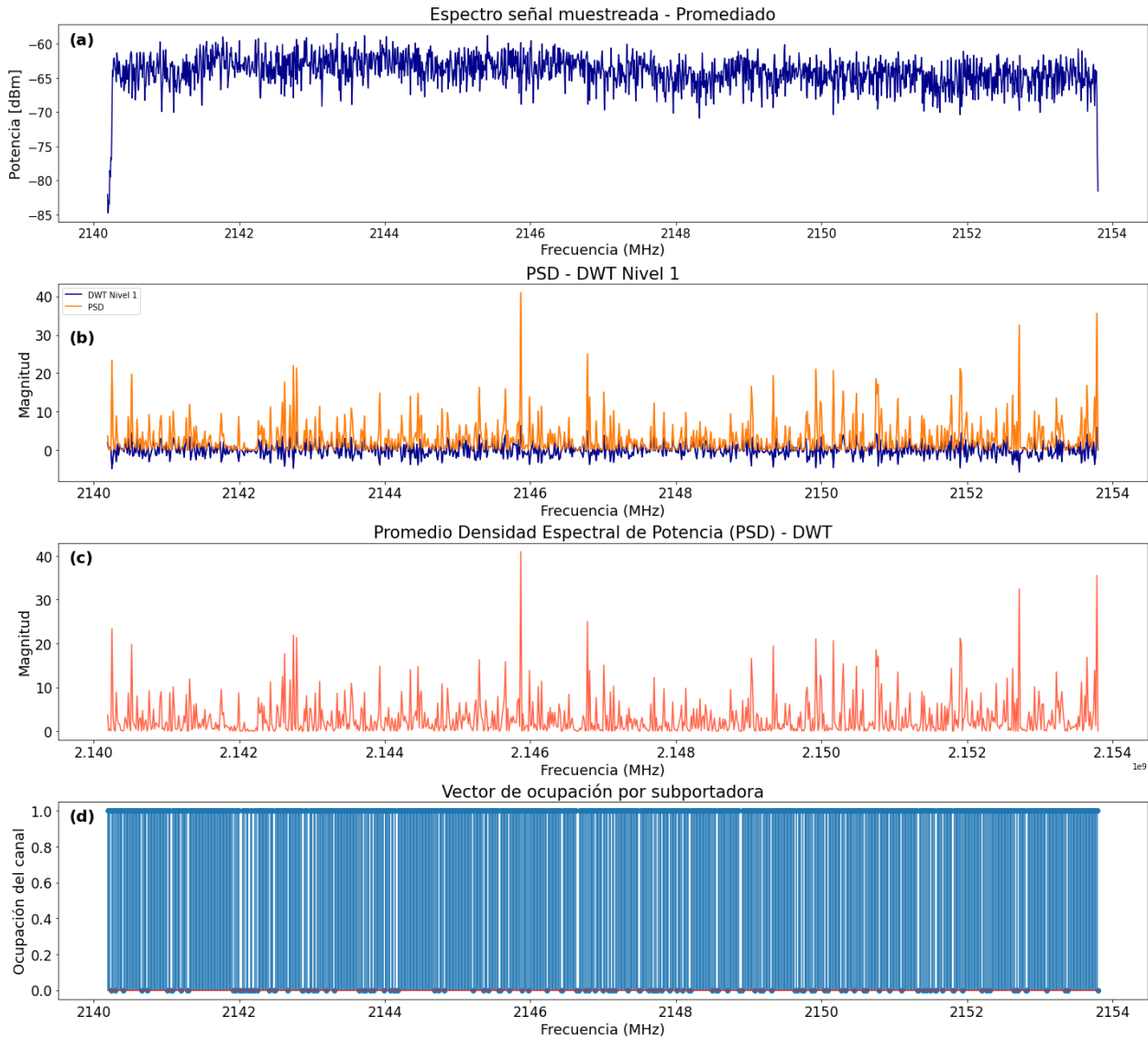


Fig. 17. Detección de ocupación de subportadoras mediante el detector basado en Wavelet.

Al igual que en la sección 7.2.1, la Fig. 17 muestra los resultados obtenidos mediante el detector basado en Wavelet, la cual proporciona una visión detallada de la detección de subportadoras y la estimación del nivel de ocupación en la banda de interés.

En este caso, para garantizar ocupación en el ancho de banda teórico de cada subportadora (15 KHz), se optó por aplicar un único nivel de descomposición, ya que este ha de reducir la resolución en frecuencia del espectro a la mitad de las muestras, como se observa en la gráfica 16b. Lo anterior obedece a que, para cada nivel de descomposición aplicado, se emplea una cantidad menor de muestras de la señal original. Por ende, si se utilizan múltiples niveles de descomposición, se podrían perder muestras e información vital de las subportadoras. Por lo tanto, se eligió un solo

nivel de descomposición para mantener la integridad de los datos y garantizar una detección precisa.

Por otro lado, la gráfica 16c, muestra la PDS obtenida a partir de los cambios bruscos de magnitud obtenidos en el nivel de descomposición. Finalmente, la gráfica 16d muestra la ocupación por subportadora, indicando aproximadamente un nivel de ocupación del 85% en el canal al momento de la medición.

7.2.3. Comparación de métodos

La Fig.18 muestra los niveles de ocupación obtenidos de ambos métodos de detección para la misma banda y el mismo conjunto de mediciones.

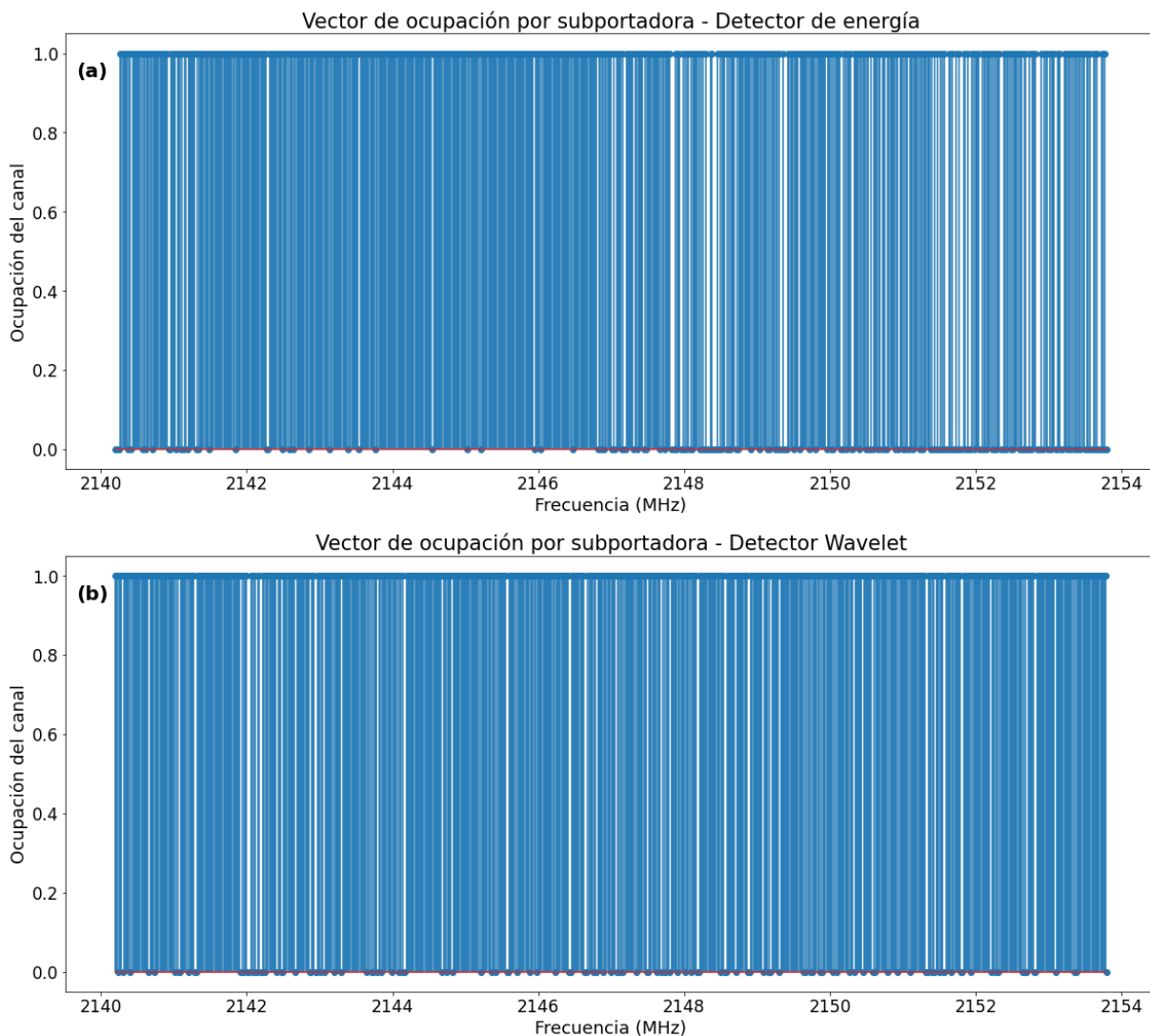


Fig. 18. Comparación de ocupación entre el detector de energía y el detector basado en Wavelet.

Como se puede apreciar, en la gráfica 18a mediante el detector de energía se obtuvo una ocupación del canal menor en comparación con el detector basado en Wavelet (gráfica 18b). Esta disparidad

se atribuye principalmente a la sensibilidad del detector de energía al umbral empleado, como se mencionó en la sección 7.1.1 (ver Fig. 16).

Esta disparidad también se puede evidenciar cuando se compara la similitud entre las estimaciones de ocupación del detector de energía y del detector basado en Wavelet a medida que se varía el umbral de detección, como se muestra en la Fig. 19.

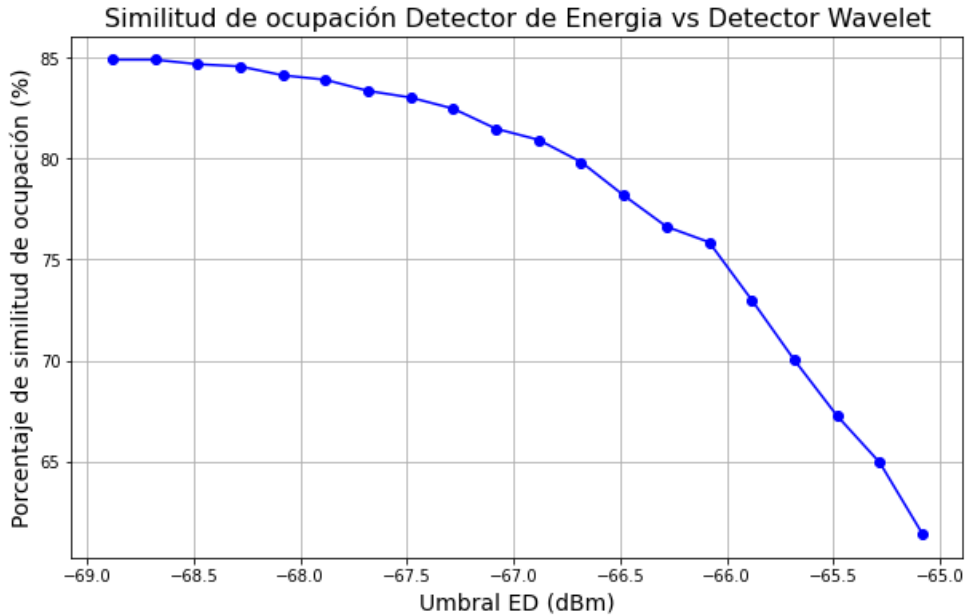


Fig. 19. Comparación en la similitud en los vectores de ocupación de ambos métodos.

Como se puede observar en la Fig. 19, a medida que el umbral aumenta, el porcentaje de similitud entre los vectores de ocupación obtenidos con cada técnica tiende a disminuir. Esta variación hace que sea más evidente la influencia del umbral en la detección de ocupaciones y a su vez cómo afecta el porcentaje de similitud entre los vectores de ocupación de ambos métodos. Este comportamiento resalta la necesidad de seleccionar un umbral óptimo que permita obtener una aproximación real en los porcentajes de ocupación calculados.

Por otro lado, el detector basado en Wavelet es sensible a la resolución del nivel de descomposición utilizado. Si la resolución es demasiado baja, se pueden perder detalles importantes en la señal, lo que puede afectar la detección de ocupaciones. Sin embargo, el detector basado en Wavelet tiene la ventaja de ser menos sensible a la interferencia y el ruido, lo que lo hace más robusto en comparación con el detector de energía.

En conclusión, tanto la detección de energía como el uso de Wavelets son técnicas útiles para la detección de ocupaciones en el espectro de radiofrecuencias. Sin embargo, es importante tener en cuenta las ventajas y desventajas de cada técnica, seleccionar la técnica más adecuada para cada aplicación específica /o definir una estrategia que las combine de manera eficiente.

8. CONCLUSIONES

Las pruebas realizadas en entornos controlados y reales mostraron que ambas técnicas son efectivas para la detección de ocupación en la banda de interés. Sin embargo, durante el desarrollo y las pruebas de las técnicas se hizo evidente que su precisión y fiabilidad para la detección de ocupaciones dependen significativamente de tres factores: los niveles de ocupación (tráfico), la relación señal a ruido e interferencia (SNIR) y el cálculo del umbral de detección.

En este contexto, la técnica de detección de energía implementada en este trabajo se destaca como una solución efectiva para la detección de ocupación en la banda de interés. Los resultados obtenidos en este estudio demostraron su capacidad para detectar portadoras incluso en condiciones de bajos niveles de recepción, lo que la hace adecuada para la mayoría de las aplicaciones. Además, la segmentación del espectro sentido en subcanales y la definición de umbrales dinámicos fueron algunas soluciones clave que permitieron mejorar la detección. Sin embargo, su sensibilidad puede verse afectada por la interferencia de señales cercanas y/o por altos niveles de ruido, lo que podría conducir a la detección de falsos positivos. Además, es crucial tener en cuenta que esta técnica solo proporciona información sobre la potencia y frecuencia la señal detectada, sin ofrecer detalles sobre su forma de onda o contenido.

En cuanto al detector basado en Wavelet, se determinó que es una solución más robusta que ofrece una mayor precisión. Esta técnica puede ser particularmente útil para identificar y diferenciar entre diferentes tipos de señales a partir de su forma de onda, lo que puede mejorar aún más la precisión y la fiabilidad de la detección de ocupaciones. Sin embargo, la selección de la wavelet adecuada y su escala pueden ser puntos críticos a tener en cuenta y que pueden afectar la detección, ya que cada banda del espectro tiene sus propias características, limitaciones y desafíos. No obstante, a pesar de estas limitaciones, su implementación en el proyecto proporcionó resultados muy prometedores en la detección de ocupaciones, ofreciendo una alternativa robusta y complementaria a la técnica de detección de energía.

En términos generales, las dos técnicas implementadas mostraron resultados satisfactorios, tanto en los aspectos evaluativos iniciales como en las mediciones concretas de ocupación, proporcionando información valiosa que permite caracterizar el comportamiento del uso del recurso espectral. En este sentido, el sentido de espectro y la detección de ocupaciones en este es un campo en constante evolución y es fundamental continuar investigando y desarrollando nuevas técnicas y soluciones para mejorar la eficiencia y precisión de los algoritmos de detección de ocupaciones en el espectro radioeléctrico.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Massaro, M., & Beltrán, F. (2020). Will 5G lead to more spectrum sharing? Discussing recent developments of the LSA and the CBRS spectrum sharing frameworks. *Telecommunications Policy*, 44(7), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.101973>.
- [2] Tsiropoulos, G. I., Dobre, O. A., Ahmed, M. H., & Baddour, K. E. (2016). Radio resource allocation techniques for efficient spectrum access in cognitive radio networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 18(1), 824–847. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2362796>.
- [3] CAPTAIN, Kamal M.; JOSHI, Manjunath V. *Spectrum sensing for cognitive radio: Fundamentals and applications*. CRC Press, 2021.
- [4] A. F. Eduardo and R. G. González Caballero, “Experimental evaluation of performance for spectrum sensing: Matched filter vs energy detector,” in *IEEE Colombian Conference on Communication and Computing (IEEE COLCOM 2015)*, 2015, pp. 1–6.
- [5] Lee, Jaekwon. Blind spectrum sensing techniques for cognitive radio system. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 2008, vol. 3, no 2, p. 117-128.
- [6] Salahdine, F., El Ghazi, H., Kaabouch, N., & Fihri, W. F. (2015, October). Matched filter detection with dynamic threshold for cognitive radio networks. In *2015 international conference on wireless networks and mobile communications (WINCOM)* (pp. 1-6). IEEE.
- [7] Salahdine, Fatima. Spectrum sensing techniques for cognitive radio networks. *arXiv preprint arXiv:1710.02668*, 2017.
- [8] S. Thilakawardana and K. Moessner, "Use of wavelet techniques in spectrum holes detection in opportunistic radio," *Mobile Communications Research Group, CCSR, University of Surrey, Guildford, UK*, 2007.
- [9] H. Monga, D. Gautam, and S. Katwal, ‘Wavelet Transform-Spectrum Sensing’, *Recent Advances in Wavelet Transforms and Their Applications*. IntechOpen, Nov. 23, 2022. doi: 10.5772/intechopen.102914.
- [10] Stewart, R. W., Barlee, K. W., & Atkinson, D. S. (2015). *Software defined radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR*. Strathclyde Academic Media.
- [11] Ettus Research, a National Instruments Brand. (2023). *USRP B200 USB Software Defined Radio (SDR) - ETTUS Research*. Ettus Research. <https://www.ettus.com/all-products/ub200-kit/>
- [12] GNU Radio - the free & open-source Radio ecosystem . (2011). GNU Radio. Recuperado el 8 de julio de 2023, de <https://www.gnuradio.org/>

- [13] M. B. Perotoni and K. M. dos Santos, "Sdr-based spectrum analyzer based in open-source gnuradio," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 20, pp. 542–555, 2021.
- [14] S. Atapattu, C. Tellambura, and H. Jiang, *Energy Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio*. New York, NY: Springer, 2014.
- [15] "Energy detection sensing based on gnu radio and usrp: An analysis study," in 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC).
- [16] A. Nafkha, M. Naoues, K. Cichon, and A. Kliks, "Experimental spectrum sensing measurements using usrp software radio platform and gnu-radio," in 2014 9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), 2014, pp. 429–434.
- [17] A. Aftab and M. N. Mufti, "Spectrum sensing through implementation of usrp2," Master Thesis, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden, 2010.
- [18] International Telecommunication Union, "Spectrum Management," Tech. Rep. ITU-R SM.2256-1, 2016. [Online]. Available: <https://www.itu.int/dms pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2256-1-2016-PDF-S.pdf>
- [19] D. A. M. Mercado and J. G. B. Pérez, "Teoría. método, análisis de Fourier y error del muestreo por desfase," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 6, no. 1, pp. 25–33, 2007.
- [20] A. N. del Espectro, "Cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencias", <https://www.ane.gov.co/SitePages/Gesti%C3%B3n%20t%C3%A9cnica/index.aspx?p=20>, 2022.
- [21] M. de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, "Radioemisoras Colombia – a_mintic - radioemisoras," <https://www.mintic.gov.co/portal/maparadio/631/w3-channel.html>, 2022.
- [22] SMTA bv, *Global Mobile Frequencies Database*, 2024. [Online]. Available: <https://www.spectrummonitoring.com/frequencies.php?market=CLM>.