

¿Has escuchado hablar de los huecos espectrales del Wi-Fi?

Jesús René González Torres

Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Azcapotzalco
jesus.glezt09@gmail.com

Genaro Hernández Valdez

Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Azcapotzalco
ghv@azc.uam.mx

Mario Alberto Ramírez-Reyna

Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Azcapotzalco
ma.ramirez@correo.ler.uam.mx

Resumen

El espectro radioeléctrico es esencial para nuestras comunicaciones diarias, permitiendo desde llamadas telefónicas hasta conexiones Wi-Fi. Sin embargo, no siempre está completamente ocupado, existen *huecos espectrales*, es decir, frecuencias no utilizadas en momentos y lugares específicos. Este artículo explora qué son dichos huecos en redes Wi-Fi y cómo pueden identificarse. Utilizando receptores de radio definidos por *software*, se pueden medir las potencias en los canales Wi-Fi para detectar períodos de inactividad. Identificar estos huecos abre la puerta a un uso más eficiente del espectro disponible.

Palabras clave

Espectro radioeléctrico, huecos espectrales, Wi-Fi y periodo de inactividad.

Abstract

The radio spectrum is essential for our daily communications, enabling everything from phone calls to Wi-Fi connections. However, it is not always fully occupied; there are “spectrum holes,” that is, frequencies unused at specific times and locations. This article explores what these gaps are in Wi-Fi networks and how they can be identified. By using *software*-defined radio receivers, it is possible to measure the power levels in Wi-Fi channels to detect *idle* periods. Identifying these spectrum holes opens the door to a more efficient use of the available spectrum.

Keywords

Radio spectrum, spectrum holes, Wi-Fi, idle period.

Introducción

¿Por qué son importantes los huecos espectrales?

En redes inalámbricas como Wi-Fi, el canal no permanece ocupado continuamente. Existen lapsos —conocidos como *huecos espectrales* o *espacios en blanco*— en los que no se registra transmisión activa. Detectarlos y caracterizarlos permite aprovechar mejor el espectro, posibilitando aplicaciones de radio cognitiva, internet de las cosas (IoT) o conectividad rural, sin interferir con los usuarios primarios.

¿Qué es el espectro radioeléctrico?

Cada vez que una persona realiza una llamada, envía un mensaje o reproduce un video en su dispositivo está utilizando un recurso esencial: el espectro radioeléctrico. Según el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT, s.f.), este espectro abarca todas las ondas electromagnéticas entre 3 kHz y 300 GHz que se propagan sin guía física. Estas ondas transportan información de forma inalámbrica y, dependiendo de su frecuencia, pueden recorrer grandes distancias o transmitir datos de alta velocidad.

El espectro es limitado y valioso. Si dos servicios usan la misma frecuencia al mismo tiempo y en el mismo lugar puede generarse interferencia, como ocurre cuando se superponen estaciones de radio. Para evitarlo, organismos reguladores —como el IFT en México— asignan bandas específicas a servicios como la telefonía móvil, televisión o GPS; además, subastan licencias que garantizan un uso ordenado.

Con el despliegue de tecnologías como 5G, IoT y comunicaciones satelitales, la demanda de espectro se incrementa, por ello, se ha explorado el uso compartido del mismo, en donde distintas tecnologías conviven sin interferencia. Asimismo, se desarrollan investigaciones sobre el uso de bandas en el rango de terahercios para nuevas aplicaciones.

Tecnología Wi-Fi

El término Wi-Fi se refiere a una tecnología de comunicación inalámbrica definida en el estándar IEEE 802.11, la cual permite la conexión de dispositivos a través de ondas de radio, sin cables, siendo ampliamente utilizada en hogares, oficinas y espacios públicos.

Una característica clave del Wi-Fi es que opera en bandas no licenciadas, principalmente en 2.4 GHz y 5 GHz, lo que significa que pueden ser utilizadas por cualquier dispositivo compatible sin necesidad de permiso especial. Es una banda que no es licenciada y consecuentemente puede ser compartida por diversas aplicaciones.

La adopción del estándar IEEE 802.11 a finales de los años noventa marcó el inicio de la era Wi-Fi en aplicaciones comerciales y domésticas.¹

Definición y relevancia de los huecos espectrales

Los huecos espectrales (*spectrum holes* o *white spaces*) son porciones del espectro disponibles pero no utilizadas en determinados momentos o ubicaciones. Aunque el concepto se originó en el contexto de la televisión analógica, actualmente se aplica también a redes Wi-Fi y otros servicios inalámbricos (Bayhan, 2017). En una red doméstica, por ejemplo, canales como el 6 u 11 pueden estar libres si no hay transmisiones activas en ellos.

En la Figura 1 se presentan mediciones del canal 6 en distintos momentos. En la traza amarilla se observa actividad, mientras que en la naranja hay ausencia de señal, lo que representa un hueco espectral. Estos espacios pueden aprovecharse por dispositivos secundarios siempre que no interfieran con los transmisores principales.

Aunque este texto se centra en cómo detectar los huecos espectrales, vale la pena resaltar que identificarlos y aprovecharlos correctamente es fundamental para optimizar el uso del espectro, reducir la congestión en las redes inalámbricas y habilitar tecnologías como la radio

¹ Entre los principales impulsores del Wi-Fi se encuentra Cees Links, quien lideró el equipo de Lucent Technologies responsable de las primeras soluciones comerciales basadas en IEEE 802.11. Más información en su perfil: <https://www.linkedin.com/in/cees-links>

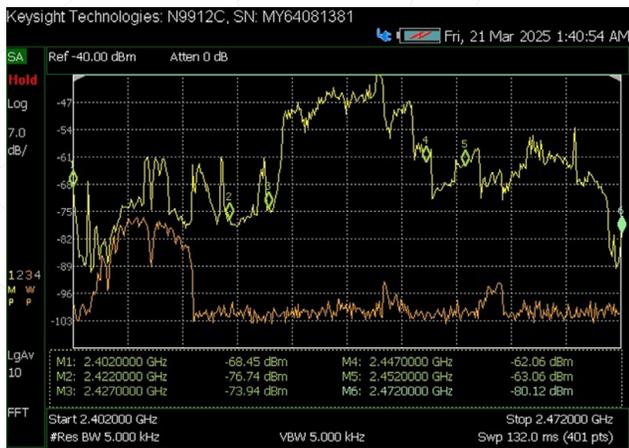


Figura 1. Dos mediciones que ejemplifican el uso del espectro de los canales 1, 6 y 11 de una red Wi-Fi que opera en la banda de los 2.4 GHz. Los intervalos de frecuencia que delimitan los marcadores M1 y M2, M3 y M4, M5 y M6 corresponden, respectivamente, a los canales 1, 6 y 11 de la red Wi-Fi. Por otra parte, el intervalo de frecuencia que delimitan los marcadores M2 y M3 (M4 y M5) es la separación (banda de resguardo) entre los canales 1 y 6 (6 y 11).

cognitiva, que hacen posible una gestión más eficiente y dinámica de estos recursos limitados.

En la Figura 1 también podemos observar dos mediciones del espectro en diferentes instantes de tiempo. La gráfica en amarillo muestra que, en ese momento, los canales 1, 6 y 11 (el canal 1 va de los 2402 MHz a los 2422 MHz; el canal 6, de los 2427 MHz a los 2447 MHz, y el canal 11, de los 2452 MHz a los 2472 MHz) están siendo utilizados, por lo tanto, se observa un cierto nivel de potencia.

Por otro lado, la gráfica en naranja muestra que solamente el canal 1 está en uso, mientras que los canales 6 y 11 no presentan potencia transmitida por algún dispositivo Wi-Fi, por lo tanto, representan dos huecos espectrales.

Estas mediciones indican que no siempre se está utilizando la red Wi-Fi en su totalidad, en consecuencia, podrían diseñarse mecanismos que permitan aprovechar esos huecos espectrales. Por ello, en la siguiente sección se detallará una metodología para identificarlos.

Cabe mencionar que la gráfica mostrada en la Figura 1 representa la potencia instantánea en el canal, la cual se obtuvo con el analizador de espectros FieldFox de Keysight Technologies. Sin embargo, las mediciones de potencia promedio del canal se realizaron utilizando el dispositivo de radio definido por software (SDR) modelo ADALM-Pluto del fabricante Analog Devices.

Detección de los huecos espectrales en Redes Wi-Fi
 Para detectar los huecos espectrales se diseñó una estrategia para medir la potencia del espectro (lo cual es una manera de saber si está siendo utilizado o no). Como toda señal de radiofrecuencia, la señal de Wi-Fi debe alcanzar cierto nivel de potencia para considerarse una transmisión activa; para esto se usó un modelo bastante simple pero poderoso: el modelo ON/OFF. Así podemos ver el canal como un interruptor:

- ON → Hay señal, canal ocupado.
- OFF → No hay transmisión, canal libre, *hueco espectral*.

Este método nos permite detectar cuándo el canal está activo y cuándo está inactivo (conocido en inglés como *idle period*), para así aprovechar su uso (esto es lo que significa utilizarlo de manera oportunista). En la Figura 2 se puede ver una representación gráfica de cómo se utilizan a lo largo del tiempo (eje horizontal) los canales 1, 6 y 11 de una red Wi-Fi. La altura de las cajas verdes de la Figura 2 representa el nivel de potencia (eje vertical)

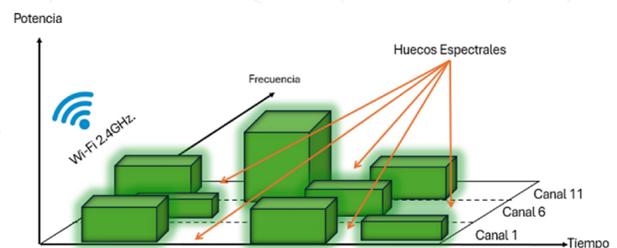


Figura 2. Representación gráfica del funcionamiento de los canales 1, 6 y 11 de una red Wi-Fi en 2.4 GHz.

de los componentes de frecuencia que se transmiten en cada canal. Las cajas verdes representan el tiempo durante el cual el canal está siendo ocupado y el espacio entre estas cajas verdes representa los periodos de inactividad en el canal (huecos espectrales) (Figura 1).

¿Cómo capturamos estos datos?

Para monitorear lo que pasa en el canal utilizamos un SDR. Este dispositivo nos permite monitorear y medir en tiempo real qué ocurre en el espectro de radiofrecuencias (Manco et al., 2022).

Usando el programa de uso libre GNU Radio, configuramos los parámetros del SDR para medir la potencia de los canales Wi-Fi. Para realizar esta medición se requiere ajustar los siguientes parámetros:

- Selección del canal. Se debe elegir un canal para enfocarnos en una parte específica del espectro (por ejemplo, podríamos seleccionar el canal 11).
- Frecuencia central. Es la frecuencia central del canal Wi-Fi cuya potencia queremos medir (por ejemplo, a partir de la Figura 1 se puede deducir que la frecuencia central del canal 11 es 2462 MHz).
- Ancho de banda del canal. Es el ancho de banda que estamos midiendo (para el canal 11 es 20 MHz, este ancho de banda está delimitado por los marcadores M5 y M6 en la Figura 1).
- Tamaño de la ventana de observación. Se refiere a durante cuánto tiempo analizamos los datos. Las mediciones se realizaron durante las 24 horas del día.

¿Y qué hicimos con los datos?

Después de recopilar las mediciones de potencia, creamos histogramas como el de la Figura 3, que nos muestra la frecuencia normalizada con la que ocurren diferentes niveles de potencia en un determinado canal de la red Wi-Fi. En esta figura, el eje horizontal representa los niveles de potencia presentes en el canal 1 de la red Wi-Fi, mientras que el eje vertical representa la frecuen-

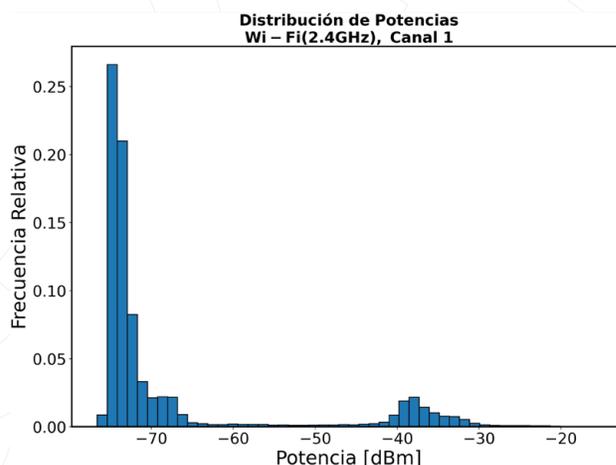


Figura 3. Distribución de potencias en el canal 1 de la red Wi-Fi 2.4 GHz.

cia con la que ocurrieron esos valores. Asimismo, podemos visualizar claramente los intervalos de potencia que separan los estados activos (ON) de los inactivos (OFF).

Por ejemplo, al analizar la Figura 3 identificamos un patrón claro:

- Cuando hay transmisión activa, la potencia se concentra en el intervalo que va de los -29 dBm a los -45 dBm (es importante mencionar que, en escala logarítmica, -29 dBm es una potencia mayor a -45 dBm).
- Cuando el canal está inactivo, la potencia desciende hasta aproximadamente -70 dBm, que corresponde a la potencia de señales no deseadas conocidas como ruido (imagínese, -70 dBm en escala lineal es tan pequeño como 0.0000001 miliwatts). ¡Es prácticamente un susurro en el espectro!

En la misma figura, se observa que alrededor de -70 dBm existe una mayor cantidad de mediciones en comparación con -40 dBm, lo que indica que el canal pasa la mayor parte del tiempo sin transmitir datos. Esto abre la posibilidad de utilizar estos huecos espectrales para otras aplicaciones (Rajandekar y Sikdar, 2016; Rastegardoost y Jabbari, 2017).

¿Cómo distingue Wi-Fi los períodos de actividad e inactividad?

Para determinar con precisión cuándo el canal está en uso y cuándo permanece libre, se establece un umbral de decisión que permite clasificar su estado en dos categorías principales:

- Período de transmisión activa. El canal está ocupado y en uso.
- Períodos de inactividad (hueco espectral). No hay transmisión, lo que abre la posibilidad de aprovechar estos huecos espectrales para otras aplicaciones.

El umbral seleccionado para esta clasificación es -50 dBm, un valor que se encuentra dentro del intervalo definido por la norma IEEE 802.11. Este umbral actúa como la línea de corte a partir de la cual el sistema interpreta que el canal está ocupado por una transmisión de datos. Si la potencia del canal es mayor a -50 dBm indica que el canal está en período de transmisión activa (*busy period*), de lo contrario, está en período de inactividad (*idle period*).

Sin embargo, para que redes secundarias aprovechen los huecos espectrales de la red Wi-Fi, no sólo es fundamental detectarlos sino también medir y caracterizar su duración (Cruz et al., 2025). La duración del hueco espectral (*idle period*) se define como el intervalo de tiempo durante el cual un canal permanece en período de inactividad. En una próxima entrega sobre este tema, se explicará la metodología para medir y caracterizar la duración de los huecos espectrales, lo cual es esencial para desarrollar estrategias que permitan un uso dinámico del espectro sin causar interferencia excesiva entre las redes que lo comparten.

Conclusión

En este artículo de divulgación técnica se ha definido el espectro radioeléctrico conforme a la descripción del IFT, destacando su relevancia como recurso limitado y esencial para las comunicaciones inalámbricas. Particular atención se prestó a los huecos espectrales, entendidos como períodos de inactividad en ciertas bandas de

frecuencia, cuya identificación y aprovechamiento representan una vía prometedora para mejorar la eficiencia en el uso del espectro.

Se introdujo el caso particular de las redes Wi-Fi, subrayando su operación en bandas no licenciadas —como las de 2.4 GHz— y resaltando las implicaciones de su naturaleza compartida. Este entorno, donde múltiples dispositivos pueden acceder libremente a los canales, se presenta como un escenario ideal para observar el comportamiento dinámico del espectro y explorar mecanismos de acceso oportunista.

Asimismo, se explicó un método práctico para detectar huecos espectrales en redes Wi-Fi, basado en el uso de un SDR y en la aplicación de un modelo ON/OFF que permite distinguir entre estados de transmisión activa y de inactividad. Mediante la recolección de datos y el análisis de histogramas de potencia, se demostró empíricamente la presencia de huecos espectrales en canales utilizados cotidianamente, lo cual confirma la viabilidad de aprovechar dichos espacios para otras aplicaciones sin generar interferencia.

Como perspectiva futura, se destaca la importancia de medir y modelar con precisión la duración de los huecos. Este análisis es fundamental para el desarrollo de estrategias más robustas de acceso cognitivo al espectro, lo que permitiría no sólo mejorar la eficiencia en su uso, sino también habilitar nuevas aplicaciones en contextos como el IoT, zonas rurales con conectividad limitada y sistemas de comunicaciones de emergencia que requieren canales disponibles de forma dinámica y confiable.

Referencias

- Cruz, F. A., Castellanos, S. L., Hernández, G. y Rivero, M. E. (2025). Distribution and moments of the idle period and interarrival time in the G/M/1 queueing system. *IEEE Access*, 13, pp. 34887-34902.
- Ericsson. (2023). *Ericsson Mobility Report Q2 2023 update*. [HTTPS://WWW.ERICSSON.COM/EN/REPORTS-AND-PAPERS/MOBILITY-REPORT/REPORTS](https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports).
- Instituto Federal de Telecomunicaciones. (s.f.). *Espectro radioeléctrico*. [HTTPS://WWW.IFT.ORG.MX/ESPECTRO-RADIOELECTRICO/GENERALIDADES](https://www.ift.org.mx/espectro-radioelectrico/generalidades)

Manco, J., Dayoub, I., Nafkha, A., Alibakhshikenari, M. y Thameur, H. B. (2022). Spectrum sensing using software defined radio for cognitive radio networks: a survey. *IEEE Access*, 10, pp. 131887-131908.

Rajandekar, A. y Sikdar, B. (2016). Characterization of white spaces in Wi-Fi networks for opportunistic M2M communications. *IEEE Transactions on Communications*, 64(12), pp. 5125-5135.

Rastegardoost N. y Jabbari B. (4-8 de diciembre de 2017). *Wi-Fi white spaces for opportunistic LTE-U* [Documento]. 2017 IEEE Global Communications Conference, Singapore.

Tlouyamma, J. y Velempini, M. (2021). Channel selection algorithm optimized for improved performance in cognitive radio networks. *Wireless Personal Communications*, 119, 3161-3178.