

ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES FM UTILIZANDO SDR PARA UNA SOCIEDAD INFORMATIZADA

MSc. Ing. Felipe Juglar Tamayo Suárez¹

¹Radiocuba, Calle Habana # 406 e/ Obispo y Obrapía. Habana Vieja. La Habana.

¹e-mail: juglar@gtmo.radiocuba.cu, juglar@nauta.cu, felipejuglar@gmail.com

RESUMEN

En el presente artículo se analizan, en el espectro, las señales moduladas en frecuencia con el objetivo de revisar el rendimiento de estos sistemas para garantizar la calidad del servicio en la empresa Radiocuba. El dispositivo NooElec NESDR Nano 2-Tiny Black RTL-SDR USB Set (RTL2832U + R820T2), se ha utilizado para analizar los niveles de intensidad de campo, características estereofónicas de la señal FM en la transmisión, la desviación de frecuencia en la modulación, la situación de la banda de guarda, interferencias de canales adyacentes e interferencias co-canal. Se han destacado características de la señal FM y de la tecnología SDR que ayudan a comprender estos sistemas. Utilizando el software TVSharp con el dispositivo, se ha visualizado la señal de video de televisión analógica, observándose que el desarrollo del software alcanzado hasta hoy, ha introducido nuevos beneficios para la configuración de este mismo elemento de hardware, que facilitó la comprobación de señales de televisión analógica, lo que no se concibió en el diseño original del dispositivo. Se demodula el audio correspondiente al video analógico de cada canal, utilizando el software SDR Console v3.0.7. El parámetro densidad espectral de potencia se ha observado en la frecuencia conocida de un transmisor digital, aunque el dispositivo no facilitó las señales televisión digital-DTMB sin modular. En este documento se ofrece también una perspectiva del significado que adquiere para una sociedad informatizada el empleo del radio definido por software como una opción accesible para analizar situaciones que muchas veces requieren equipos muy costosos.

PALABRAS CLAVES: Frecuencia modulada, Radio definido por software, Sociedad informatizada.

SPECTRAL ANALYSIS OF FM SIGNALS USING SDR FOR THE HIGH-TECH SOCIETY

ABSTRACT

In this article, the frequency-modulated signals have been analyzed in the spectrum, with the aim of reviewing the performance of these systems to guarantee the quality of the service in the Radiocuba company. The NooElec NESDR Nano 2-Tiny Black RTL-SDR USB Set device (RTL2832U + R820T2) has been used to analyze the levels of field strength, characteristic that defines the composition of the stereo FM sign in the transmission, the frequency deviation in the modulation, the situation of guard band, adjacent channel interference and co-channel interference. Have been shown features of the FM sign and the SDR technology that help to understand these systems. Using the TVSharp software with the same device, the analogical television video signal has been visualized, observing that the development of the software reached until today, has introduced new benefits for the configuration of this same hardware element, which facilitated the verification of signals from analogical television, which was not conceived in the original design of the device. The audio corresponding to the analog video of each channel is demodulated, using the SDR Console v3.0.7 software. The power spectral density has been observed at the known frequency of a digital transmitter, although the device did not provide digital television-DTMB signals without modulating. This document offers a perspective of the meaning that acquires the information in society through the employment of SDR like an accessible option to analyze situations that many times require very expensive equipment.

KEY WORDS: Frequency-modulated, Informatized society, Software-defined radio.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad especialmente en el mundo científico de las telecomunicaciones, repercute por su grandeza la tecnología del radio cognitivo, por sus siglas en inglés, CR. Es llamativo como esta tecnología ha representado novedad científica desde hace varios años atrás (década de los 90s). En este momento continúa llamando la atención a científicos e investigadores de las telecomunicaciones a nivel internacional, por sus constantes avances tecnológicos en los logros que se han evidenciado en su multifuncionalidad. Escenario que ha sido posible gracias al constante desarrollo de “software” asociados a elementos de hardware que han permitido la introducción de nuevas prestaciones en la configuración de un mismo elemento de hardware. O sea, han sido posible gracias a la evolución del radio definido por software (SDR). Esta tecnología ha demostrado una evolución adaptativa y constante.

El CR, es un radio que desarrolla un modelo basado en razonamiento para lograr un nivel específico de competencia dentro de las transmisiones por radio, como se destaca en [1]. La tecnología del radio cognitivo ha adquirido un importante significado para la evolución tecnológica en el mundo. Sin embargo, quedan muchos países sin acogerse al estándar IEEE 802.22, especificado en [2], donde se detalla el despliegue y explotación de las redes de acceso regional inalámbrico, por sus siglas en inglés, WRANs. Esto principalmente porque la asignación estática del espectro actualmente reglamentada favorece a los usuarios primarios que hoy, en muchos casos, comercializan a conveniencia este recurso natural agotable (espectro radio eléctrico). Este ambiente se vincula al despliegue de la banda ancha móvil en el mundo, que impone, por demanda de usuario, más y más información, lo que se traduce en más y más, espectro radioeléctrico. En Cuba un acceso dinámico al espectro reglamentado a priori beneficiaría sin dudas el desarrollo de una tecnología que impulsará el proceso de informatización de la sociedad.

La motivación que da origen a este trabajo se encuentra precisamente en el estudio del radio cognitivo y el radio definido por software, notando el vínculo que sugiere el desarrollo de esta tecnología con la empresa Radiocuba. Este estudio le permite al autor identificar una opción muy económica y eficaz para garantizar calidad de servicio en sistemas de, frecuencia modulada, por sus siglas en inglés FM, al accionar accesible, rápido y cómodo cuando se detectan errores. Esto se puede hacer extensivo a otros sistemas obteniendo el dispositivo SDR junto al software adecuado para el sistema deseado.

Actualmente es necesario reconsiderar una y otra vez la asignación dinámica del espectro. Se analizan hoy las bandas asignadas a los sistemas de TV en VHF/UHF entre los 54 MHz y los 862 MHz [1], [2], [3], [4]. Esta realidad llama la atención de la empresa Radiocuba, como usuario licenciado en Cuba en estas bandas de frecuencias. Se hace interesante pues innegablemente facilita el desarrollo tecnológico del país, así como consecuentemente posibilita seguridad y protección del espectro radioeléctrico en proyección de utilizarlo, además, en interés de contrarrestar emisiones no deseadas de un interferente, al tener el espectro más ocupado, con cierto nivel de potencia; pero además monitorizado. Aún el CR no es una realidad en los sistemas comerciales [5]; pero sí, el radio definido por software.

Este documento se nutre de un conjunto de artículos y documentos normativos que tratan por separado, tanto la reglamentación para el servicio de radiodifusión sonora para FM en Cuba expuesta en [6], como la tecnología de radio cognitivo descrita en, [1], [3], [7], [8]. Analizándose las categorías y características de las técnicas de detección del espectro para redes de radio cognitivo, observando su evolución en [9] respecto a [1] con el desarrollo del radio definido por software. Detallándose el dispositivo NooElec NESDR empleado en este trabajo. Enfocándose ante todo en los parámetros a chequear de la señal FM y en el dominio para la explotación de la tecnología SDR. Basándose en esta literatura se monitorizan en el espectro señales con modulación FM, con el objetivo de auto-controlar el desempeño de estos sistemas con la intención de garantizar calidad de servicio en la empresa Radiocuba.

En este trabajo se logra vincular utilidades del empleo del SDR, como herramienta de monitorización, para garantizar la calidad del servicio, así como una supervisión constante del sistema permitido. Una percepción bastante específica del SDR como núcleo que permite la tecnología para el CR se encuentra [1].

2. CONDICIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL MODULADA EN FRECUENCIA

En este trabajo se chequean los parámetros básicos de la señal FM, según lo expuesto en la resolución No. 80/2002 que establece el reglamento para el servicio de radiodifusión sonora en frecuencia modulada (FM) [6]. Donde se utiliza para la radiodifusión de FM una parte de la banda VHF, la cual se encuentra desde los 88 MHz hasta los 108 MHz. En esta banda es posible utilizar 100 canales de radiodifusión de FM, iniciando en los 88,1 MHz hasta los 107,9 MHz, enumerados desde el 201 al 300, con una separación entre dos canales adyacentes de 200 kHz y una desviación de frecuencia de 75 kHz. En este espectro se definen “bandas guardas” de 25 kHz ubicadas en el extremo superior y extremo inferior del canal, con el objetivo de minimizar la interacción con las frecuencias moduladas de canales

adyacentes, dejando 50 kHz de “banda de guarda” entre los límites de variación de frecuencia de las portadoras de dos canales adyacentes.

La FM es una técnica de modulación que se emplea generalmente en muy altas frecuencias por sus siglas en inglés, VHF. Se utiliza este tipo de modulación por la alta fidelidad que se logra en la radiodifusión de la música y la voz. Se emplea también para la transmisión del sonido en la televisión analógica. En esta transmisión la información de audio modula en frecuencia la sub-portadora de audio, la cual se encuentra a 4.50 MHz de la sub-portadora de video y a 5.75 MHz del inicio del canal de televisión de 6 MHz. La técnica de modulación en frecuencia permite transmitir información mediante la variación de frecuencia de una onda portadora.

En la radiodifusión de FM, la señal moduladora de frecuencia se compone con la suma del canal izquierdo y derecho, se agrega además un tono piloto de 19 kHz. Luego se modula en doble banda lateral, una señal diferencia de ambos canales a 38 kHz y se le añade a la moduladora anterior, obteniendo así compatibilidad con receptores antiguos mediante una implementación del demodulador muy sencilla. El sintonizador FM decodifica la señal y separa el canal de audio izquierdo y el derecho.

En este documento se analiza la presencia de emisión del tono piloto de 19 kHz en cada una de las señales FM chequeadas. El tono piloto tiene la función de informar al receptor de que la emisión es estéreo, permitir regenerar la sub-portadora de la “señal resta” a 38 KHz que no se emite por modular con doble banda lateral con portadora suprimida (DSBSC) y permitir regenerar además la sub-portadora del servicio de datos (RDS) a 57 kHz que no se emite por modular en doble banda lateral con portadora suprimida (DSBSC). El receptor duplica la frecuencia del tono piloto y lo usa como frecuencia de referencia para de-modular la información estéreo. Importante notar que la señal MPX o señal estéreo múltiplex, es la señal de la que se alimenta el transmisor por lo que es la misma que se transmite y la que se recibe en el receptor. Esta señal contiene las señales de audio Suma y Resta, anteriormente señaladas, además la del servicio de datos RDS y la señal del servicio SCA orientado al sector profesional. La señal MPX permite modular todas estas señales bajo una única frecuencia portadora y tiene un ancho de banda de 100 kHz. Como división frecuencial de la señal MPX se encuentra de 30Hz a 15 kHz la señal suma o señal del canal principal (L+R), a los 19 kHz el tono piloto estéreo, de 23 kHz a 53 kHz la señal resta (L-R) representando la diferencia de las señales de audio derecho e izquierdo que modula a la sub-portadora suprimida de 38 KHz que a su vez modula a la portadora FM.

Ciertamente una transmisión FM no depende de la generación oportuna y precisa del tono piloto, pero definitivamente la recepción estereofónica de la señal si depende. Si no se transmite el tono piloto de 19 kHz, no será posible finalmente, que el receptor regenere la portadora de 38 kHz, que se ahorró en la transmisión, por lo que no podrá sintonizar con una señal resta a los 38 kHz (que no fue formada) por lo que no existirá un sonido estereofónico en el receptor de FM.

El sonido estereofónico en el receptor de FM define en gran medida la calidad del servicio al usuario, por lo cual se convierte en un aspecto que la empresa Radiocuba está en el deber de garantizar. En la práctica el chequeo de estos parámetros exige la utilización de analizadores de espectro, equipos profesionales para monitoreo remoto (Golden Eagle), y otros, en todos los sitios donde se desee monitorizar la señal. Este escenario complejiza y encarece el control de calidad del servicio. Para lo cual se ofrece una respuesta eficiente y menos costosa con el empleo de dispositivos de radio definido por software, que llegan a desarrollarse como una necesidad para la evolución del Radio Cognitivo.

3. RADIO COGNITIVO

Según la cita de Haykin en [1] y su visión en [8], el radio cognitivo es un sistema de comunicaciones inalámbricas inteligente, consciente de su entorno y que emplea cierta metodología para aprender de su entorno y adaptar su estado interno a las variaciones estadísticas en los estímulos de radiofrecuencia de entrada. Haciendo los correspondientes cambios en tiempo real, a parámetros de operación como la potencia de transmisión, frecuencia portadora y tipo de modulación. Todo con el objetivo de hacer un uso eficiente del espectro y proporcionar una comunicación altamente confiable, explotando los conceptos alcanzados por Shannon en su segundo teorema.

Existen características elementales de un sistema de radio cognitivo, dentro de las que se tiene en cuenta la percepción que obtiene del entorno en el que opera, mediante técnicas de detección de espectro, además, del reconocimiento del entorno y de sus propias capacidades y recursos, incluyendo la posibilidad de variar y adaptar, los parámetros de transmisión/recepción de forma inteligente. Estos sistemas tienen la posibilidad de actuar tanto de emisor como de receptor, de forma autónoma. Esta tecnología permite la incorporación de sensores de localización, algoritmos de inteligencia artificial, protocolos de comunicación y protocolos de negociación. La definición exacta de cada una de estas características se puede encontrar en [7].

El radio cognitivo debe detectar los huecos espectrales o espacios libres en el espectro para así trasladar su servicio a la frecuencia libre detectada, que pudiera ser licenciada pero no estar siendo explotada, lo que permite a estos dispositivos, con facilidad de actuar como usuarios secundarios, realizar un uso más eficiente del espectro. Siempre teniendo la obligación de abandonar la frecuencia cuando sea solicitada por el usuario primario que será aquel para el cual está licenciada la frecuencia. La figura 1, a continuación, muestra mediante un esquema la situación espectral de la cual debe tener conocimiento el radio cognitivo para adaptarse al entorno. Se puede observar como la utilización de un canal varía en el tiempo, como puede variar también en el tiempo la potencia empleada en un mismo canal.

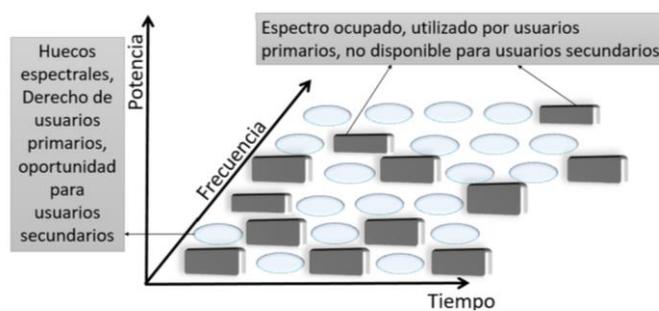


Figura 1: Situación espectral de referencia para el Radio Cognitivo.

El radio cognitivo soportado sobre una plataforma de radio definido por software permite el empleo oportunista de los huecos espectrales, también llamados espacios blancos, por sus siglas en inglés WS, del inglés White Spaces, existentes en el espectro de los usuarios primarios o usuarios licenciados. Esta tecnología es capaz de utilizar los huecos espectrales implementando las técnicas de acceso dinámico al espectro.

Acceso dinámico al espectro

Las técnicas de acceso dinámico al espectro, puntualizadas en [8] y en [10], constituyen un elemento clave en la implementación de la tecnología del radio cognitivo, pues tienen el reto de encontrar la manera de compartir el espectro eficientemente sin causar interferencias a los usuarios primarios y permitir a los usuarios secundarios servicios de calidad, cuando utilicen las bandas de frecuencias licenciadas.

Para el acceso dinámico al espectro se utiliza el modelo de acceso determinístico del espectro, el cual utiliza un modelo jerárquico de acceso que permite al radio cognitivo, monitorizar y detectar el medio radioeléctrico en busca de señales que indiquen si están libres o utilizadas las frecuencias en el espectro analizado, de forma que posibilite coexistir los sistemas con menor probabilidad de error. El radio cognitivo identifica, además, la potencia de señal a emplear y el tiempo que puede ocupar la frecuencia disponible en vista a cumplir los requisitos de relaciones de protección, exigidos puntualmente.

Para utilizar completamente los escasos recursos del espectro, con el desarrollo de la tecnología de radio cognitivo se hace necesario el acceso dinámico al espectro como una oportunidad prometedora de incremento del uso eficiente del espectro, con lo cual se permite a usuarios inalámbricos no licenciados, también conocidos como usuarios secundarios, acceder dinámicamente a las bandas licenciadas que son las ocupadas por los poseedores legales del espectro o también conocidos como usuarios primarios.

Las redes de acceso dinámico al espectro, por sus siglas en inglés DSANs, también conocidas como neXt Generations (xG) networks, habilitan el empleo eficiente del espectro para los usuarios de la red mediante técnicas de acceso dinámico al espectro y arquitecturas de red heterogéneas. La figura 2, a continuación, muestra características que definen las DSANs y de interés para la distribución dinámica del espectro, en la que se considera un escenario general

con usuarios primarios múltiples y usuarios secundarios múltiples. Diferente a la tradicional asignación espectral estática, entre diferentes estaciones base o sistemas en redes celular.

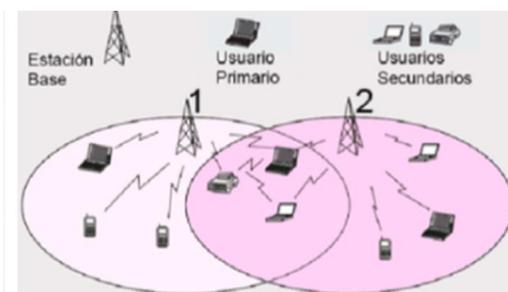


Figura 2: Arquitectura de una red de acceso dinámico al espectro.

La asignación estática del espectro evita hoy obtener una eficiencia espectral ilimitada en sistemas que necesitan para su mejor desempeño utilizar también frecuencias que han sido asignadas a otros sistemas en su entorno. No obstante estas son frecuencias que además de encontrarse sin utilizar por un tiempo previamente coordinado, permitirían mediante una asignación dinámica del espectro, a los sistemas denotados como usuarios secundarios del espectro; ventajas para obtener mayor flujo de información. De esta forma se satisface a mayor cantidad de usuarios del sistema de telecomunicaciones, favoreciendo el proceso de informatización de la sociedad y el acceso a internet a más personas, lo que finalmente sería traducido en mayor calidad de servicio.

Se ha especificado en ciertas bibliografías, por ejemplo, en [1], que el radio definido por software representa el núcleo que permite la tecnología para el desarrollo del radio cognitivo. Sin embargo, el desarrollo práctico del concepto puro del radio cognitivo no se ha podido realizar hasta hoy, debido a obstáculos técnicos como por ejemplo el desempeño insatisfactorio de los algoritmos de detección de espectro, lo que se puntualiza en [9]. No obstante, hoy se evidencia el progreso de la quinta generación de telefonía móvil en el mundo como una de las ventajas de la evolución que ha logrado el radio cognitivo con el desarrollo progresivo en la explotación del radio definido por software.

4. RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE

El radio definido por software, por sus siglas en inglés SDR, del inglés Software Defined Radio, es un elemento de hardware, en el que se implementan mediante software funciones que generalmente se llevan a cabo por hardware como son los filtros, mezcladores, amplificadores, moduladores/demoduladores y detectores. En estos dispositivos la mayoría de los parámetros de la capa física son definidos por software. La figura 3 muestra a continuación la estructura básica de un sistema SDR. La etapa de RF se encarga de la transmisión y recepción de señales de radiofrecuencia para adecuarlas y convertirlas a frecuencia intermedia en recepción, y en transmisión amplificar y modular las señales de IF y luego adecuarlas para su transmisión.

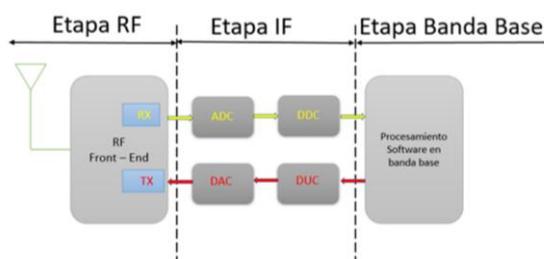


Figura 3: Estructura básica de un sistema SDR.

El empleo del SDR en las comunicaciones móviles contemporáneas de 4ta y 5ta generación permite fácil actualización y flexibilidad, contexto que trae consigo grandes beneficios para la operación de estos sistemas.

La fácil operatividad, la portabilidad y variadas prestaciones de los elementos de hardware que representan a estos dispositivos permiten en la actualidad diversas aplicaciones y utilidades a disposición de la sociedad. Esto facilita con el empleo de elementos de hardware como el que se detalla a continuación cumplir el objetivo de este trabajo.

Elemento de hardware

Un dispositivo de radio cognitivo, el cual se considera elemento de hardware, es un sistema de radiofrecuencia capaz de variar sus parámetros de transmisión basándose en su interacción con el entorno en el que opera. Para estos dispositivos se determina la capacidad cognitiva y la auto-reconfiguración, como dos características básicas [1]. La capacidad cognitiva, está dada por poseer tecnología para capturar la información de su entorno de radiofrecuencia e identificar las partes del espectro que no estén siendo utilizadas. La figura 4, muestra un dispositivo SDR, no llega a ser un dispositivo CR. Se puede decir que representa un elemento de hardware en evolución.



Figura 4: Ejemplo de dispositivo SDR.

Este es un dispositivo multipropósito de gran utilidad, perteneciente a la tecnología SDR. Su funcionalidad generalmente depende de la aplicación informática que lo soporte; en su estructura de hardware cuenta con un chipset RTL2832U, que ha tomado auge en este campo por sus excelentes prestaciones y principalmente por su bajo coste. NooElec NESDR Nano 2 -Tiny Black RTL-SDR USB Set (RTL2832U + R820T2) con capacidad de frecuencias de 25 MHz – 1750 MHz sin huecos dentro de ese rango, con antena MCX y control remoto, es un sintonizador que tiene mejoras en cuanto a sensibilidad de recepción y SNR, comparado con los dispositivos que emplean R820T (muy superior en cuanto a relación precio - desempeño). El chip Realtek RTL 2832U es un demodulador COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) que soporta la interfaz USB [11]. La figura 5, muestra, diferentes vistas del dispositivo, incluyendo la antena que lo acompaña, la cual se utilizó en este trabajo para lograr el análisis.



Figura 5: Vistas del dispositivo RTL-SDR USB Set (RTL2832U + R820T2) y su antena MCX.

Existen diversas utilidades para este dispositivo, por ejemplo, como receptor multi-modo de AM, WFM, NFM, DSB, USB, LSB, DRM, CW, y de casi todos los modos digitales de radioaficionados. Es posible utilizarlo además para grabar el espectro con un ancho de banda de 2 MHz, visualizar la TV analógica en blanco y negro, seguir diferentes tecnologías de sistemas trunking. Recibir GPS en tiempo real, recibir AIS, ADS-B y ACARS y ubicarlos en un mapa, analizar el espectro con múltiples funcionalidades, realizar monitoreo remoto a través de la red de datos, recibir imágenes meteorológicas de los satélites de la NOAA, decodificar las señales de los beepers, globo sondas, telemetría de varios satélites, etc.

Software utilizado

La instalación del dispositivo se realiza utilizando el sistema operativo Windows 10, aunque existen software que ofrecen más funcionalidades sobre Linux, para cumplir el objetivo del trabajo fue suficiente el trabajo sobre Windows 10. Luego de realizar el procedimiento de instalación de los drivers del dispositivo mediante la herramienta de software

(nesdr_driver_installer_for_windows) “Zadig” para un sistema operativo de 64 bits. Posteriormente se descargan e instalan los instaladores del software SDR Console v3.0.7 del 2 de abril de 2019, y se realiza el análisis objetivo de este trabajo. Se emplea además el software TVSharp con el cual se visualiza el video de la TV analógica, aunque en blanco y negro, pero que evidencia la transmisión del video.

El desarrollo de software con mejoras es constante, por lo que es posible descubrir nuevas aplicaciones para un mismo dispositivo con solo actualizar el software, lo que representa precisamente una de las características de este tipo de elementos de hardware. La figura 6 muestra a continuación los iconos de los “software” utilizados en este trabajo.



Figura 6: Iconos de los Software TV Sharp, SDR Console (v3).

5. ANÁLISIS ESPECTRAL

En este trabajo se realiza un análisis espectral, utilizando el dispositivo Nooelect NESDR mostrado en la figura 5, mediante una monitorización desde la PC donde se instala el dispositivo y se efectúa la manipulación de “software” asociados que facilitan su uso. Es posible la implementación de este mecanismo de forma remota, como se puede ver en [12], lo cual sin lugar a dudas elevaría la utilidad del dispositivo facilitando su monitorización desde toda la red de datos. Esta opción se convierte en una línea futura de desarrollo para este trabajo pues aún es necesario agrupar todos los elementos de hardware necesarios para implementar una monitorización remota que permita desde el centro de dirección de la división Guantánamo de la empresa Radiocuba, supervisar el sistema FM en la ciudad de Guantánamo.

En la monitorización espectral realizada se analizan parámetros básicos del espectro de la transmisión de la señal FM, como los niveles de intensidad de campo, características estereofónicas en la radiodifusión, desviación de frecuencia en la modulación, banda de guarda, interferencias de canal adyacente, interferencias co-canal. Se visualizan además las señales de video de TVA, mediante el software TVSharp y se de-moduló el audio correspondiente a cada video analógico, utilizando el software SDR Console v3.0.7 empleado también en el análisis espectral para FM. Es válido puntualizar que no se intentó obtener condiciones de recepción excepcionales; las condiciones de recepción adquiridas fueron suficientes para ilustrar la ocupación del espectro y analizar las características y parámetros determinantes de las señales analizadas en este trabajo. La figura 7 muestra a continuación la situación espectral de la emisora provincial de Guantánamo, CMKS, en la frecuencia 95,5 MHz.

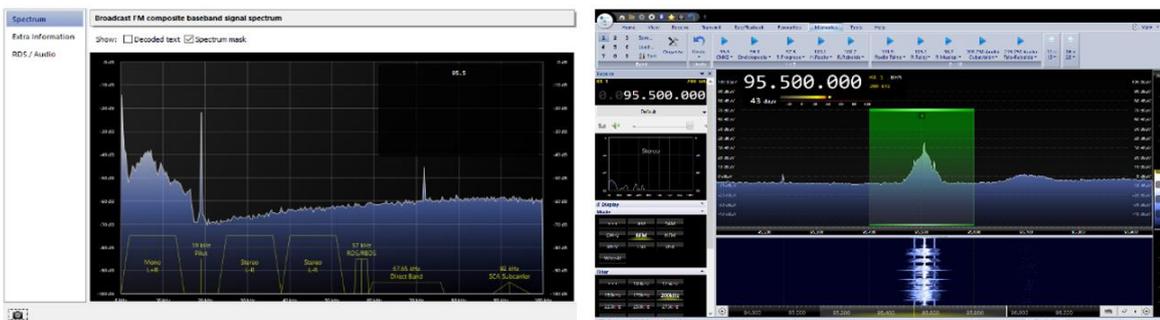


Figura 7: Situación espectral emisora provincial CMKS, en la frecuencia 95,5 MHz.

En la figura 7 se aprecia una señal evidentemente de radiodifusión de FM con generación de tono piloto, por lo que es una señal estereofónica, con la formación de la sub-portadora de 38 KHz y por tanto del canal resta (L-R) con la

información estereofónica, sin contenido RDS, ni SCA según el display de espectro de audio recibido. Se evidencia un nivel de intensidad de campo de 47dBμv. Se observa en torno al ancho de banda de 200 KHz un comportamiento adecuado de la desviación de frecuencia en la modulación pues no existen picos de variación de frecuencia que sobrepasen los 75 KHz. No se observa interferencia de canal adyacente y no existe interferencia co-canal, lo cual es posible apreciarlo en la imagen ubicada en la parte derecha de la figura 7.

La figura 8 muestra a continuación la situación espectral de la emisora Radio Enciclopedia en la provincia de Guantánamo, en la frecuencia 96,3 MHz.



Figura 8: Situación espectral emisora Radio Enciclopedia, en la frecuencia 96,3 MHz.

En la figura 8 se aprecia una señal de radiodifusión de FM sin generación de tono piloto (lo cual se observa en la imagen izquierda de la figura), por lo que no es una señal estereofónica. En este caso no será posible la formación de la sub-portadora de 38 KHz, por lo que no existe una señal con información estereofónica, ni posibilidad de emitir contenido RDS, ni SCA. Se evidencia un nivel de intensidad de campo de 27dBμv (en imagen derecha). Se observa en torno al ancho de banda de 200 kHz un comportamiento inadecuado en la desviación de frecuencia en la modulación con picos de variación de frecuencia que sobrepasan los 75 kHz. Observándose interferencias de este canal en los canales adyacentes y no existe interferencia co-canal.

La figura 9 muestra a continuación la situación espectral de la emisora Radio Progreso en la provincia de Guantánamo, en la frecuencia 97.5 MHz. En esta figura los parámetros de la señal MPX se observan muy semejantes a los observados en la figura 7, una señal estereofónica modulada en frecuencia. Se evidencia un nivel de intensidad de campo de 31dBμv. Se observa en torno al ancho de banda de 200 kHz una desviación de frecuencia alrededor de los 75 kHz. No se observa interferencia de canal adyacente y no existe interferencia co-canal.

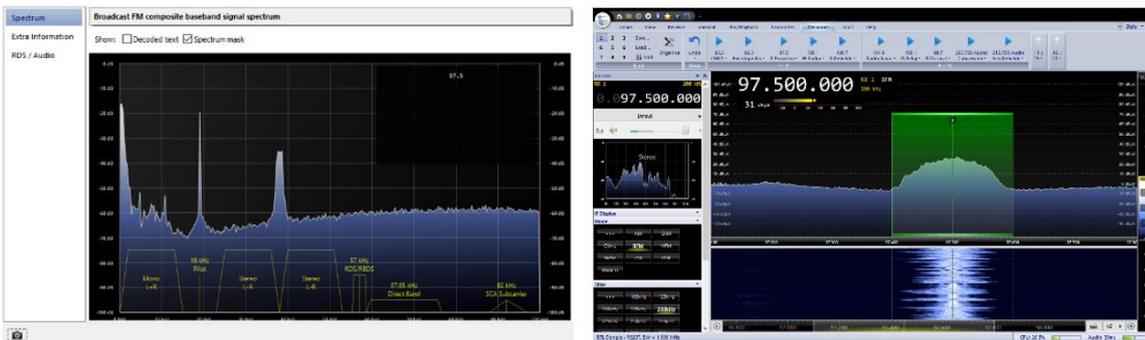


Figura 9: Situación espectral emisora Radio Progreso, en la frecuencia 97,5 MHz.

La figura 10 muestra a continuación la situación espectral de la emisora Radio Musical en la provincia de Guantánamo, en la frecuencia 98.5 MHz. En esta figura se define una señal de radiodifusión de FM sin generación de tono piloto, por lo que no se realizará una recepción estereofónica, ya que no se emite una información estereofónica. Se observa en el ancho de banda de 200 KHz un comportamiento adecuado de la desviación de frecuencia en la modulación pues no existen picos de variación de frecuencia que sobrepasen los 75 KHz. Se observa actividad en los canales adyacentes,

debido a armónicos no deseados de otras emisoras, probablemente debido al bajo nivel de intensidad de campo recibido en la frecuencia analizada, aunque no se evidencian interferencias de canal adyacente ni co-canal. Se registra un nivel de intensidad de campo de $25\text{dB}\mu\text{v}$.



Figura 10: Situación espectral emisora Radio Musical, en la frecuencia 98,5 MHz.

En la figura 11 a continuación se muestra la situación espectral de la emisora Radio Rebelde en la provincia de Guantánamo y se manifiesta una señal de radiodifusión de FM con generación de tono piloto estéreo, por lo que es una señal estereofónica, con la formación de la sub-portadora de 38 kHz y por tanto del canal de la señal resta (L-R) con la información estereofónica, sin contenido RDS, ni SCA. Se evidencia un nivel de intensidad de campo de $32\text{dB}\mu\text{v}$. Se observa en torno al ancho de banda de 200 kHz un comportamiento adecuado de la desviación de frecuencia en la modulación, existen picos de variación de frecuencia sobre los 75 kHz sin sobrepasar este valor, lo que permite que la banda guarda de 25 kHz, ubicada después de los 75 kHz de desviación, actúe correctamente minimizando la interacción con las frecuencias moduladas de canales adyacentes. No se observa interferencia de canal adyacente y ni co-canal. Se observa alrededor de la portadora en un span de 700 kHz, un espectro limpio y libre de interferencias.

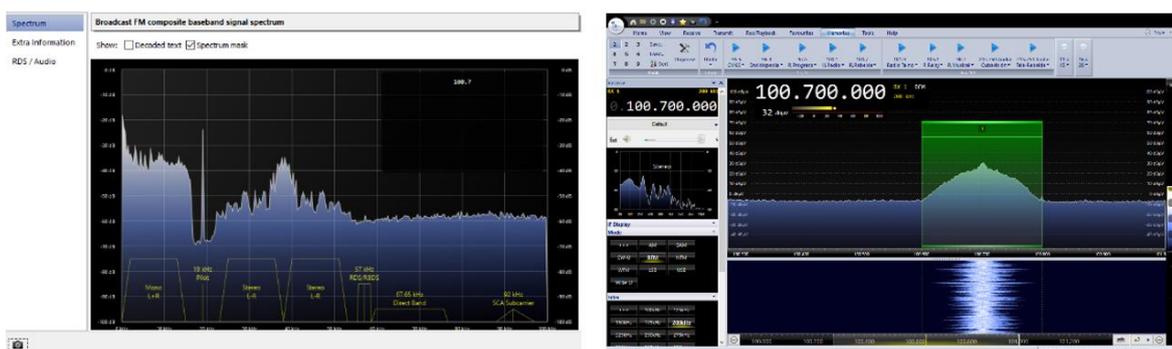


Figura 11: Situación espectral emisora Radio Rebelde, en la frecuencia 100,7 MHz.

La figura 12 muestra a continuación la situación espectral de la emisora Radio Habana Cuba en la provincia de Guantánamo, en la frecuencia 101.9 MHz y en ella se observa una señal de radiodifusión de frecuencia modulada sin generación de tono piloto, la cual no ofrecerá una recepción estereofónica, ya que no se emite una información estereofónica. Se observa en el ancho de banda de 200 kHz un comportamiento inadecuado de la desviación de frecuencia en la modulación pues los picos de variación de frecuencia que se evidencian son muy cortos, apenas de 40 kHz. Se observa actividad en el canal adyacente superior, pero no se evidencian interferencias de canal adyacente, ni interferencia co-canal. Se registra un nivel de intensidad de campo de $33\text{dB}\mu\text{v}$.

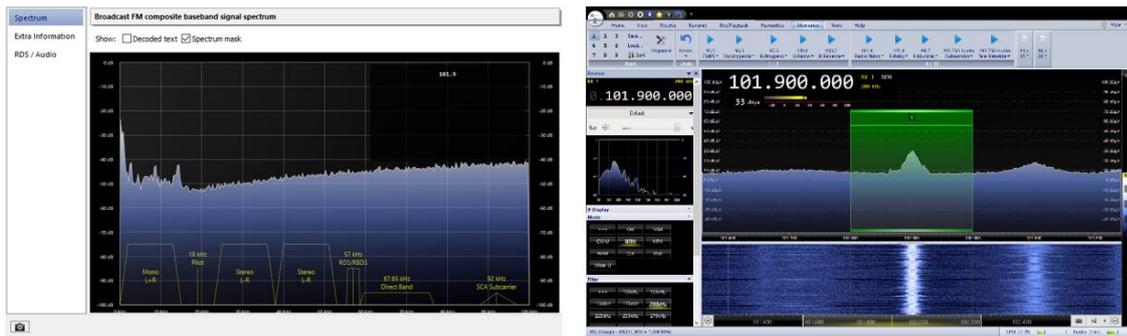


Figura 12: Situación espectral emisora Radio Habana Cuba, en la frecuencia 101,9 MHz.

La figura 13 muestra a continuación la situación espectral de la emisora Radio Reloj en la provincia de Guantánamo, en la frecuencia 105.1 MHz. En esta figura se observa una señal de radiodifusión de FM con generación de tono piloto, pero con un corrimiento en la generación del tono piloto de aproximadamente 4 kHz, cuando solo, le es admisible un corrimiento de 2 KHz. El corrimiento del tono piloto por encima de los 2 kHz provoca que se genere la portadora de la “señal resta” lejos de los 38 KHz, no logrando que sea posible la incorporación del audio estéreo a la señal FM de-modulada. Se evidencia un nivel de intensidad de campo de 47dB μ v. Se observa en torno al ancho de banda de 200 KHz una desviación de frecuencia en la modulación muy precisa sobre los 75 kHz, evidenciándose los 25 KHz de banda guarda a extremos de la banda. No se observa interferencia de canal adyacente y no existe interferencia co-canal.



Figura 13: Situación espectral emisora Radio Reloj, en la frecuencia 105,1 MHz.

La figura 14 muestra a continuación la situación espectral de la portadora de audio en la transmisión de TV analógica correspondiente al CH-11 y al CH-18, que transmiten la programación de los canales de Cubavisión y Educativo I respectivamente en la ciudad de Guantánamo. En esta figura se aprecian señales con modulación de frecuencia que evidentemente no corresponden al servicio de radiodifusión de FM, pues se encuentra fuera de la banda de frecuencias asignadas para la radiodifusión de FM entre los 88 MHz y los 108 MHz. Se observa que estas señales se encuentran en la banda III y banda IV de la TV, exactamente en la ubicación de la portadora de audio de CH-11 (imagen ubicada en la parte izquierda de la figura 14) y CH-18 (las imágenes ubicadas en el centro y en la parte derecha de la figura 14) que transmiten en la provincia Guantánamo la programación de los canales Cubavisión y Educativo I respectivamente.

En la imagen izquierda de la figura 14 que hace referencia al CH-11 se evidencia la portadora, justo en la frecuencia que le corresponde, sin embargo, las imágenes correspondientes al CH-18 muestran un corrimiento de 16 KHz en la frecuencia portadora de audio, situación que no evita la de-codificación, pero si disminuye en cierta medida el nivel de audio de-codificado (percibiéndose en un volumen bajo). No se evidencian interferencias de canal adyacente, ni interferencias co-canal en ningún caso. Se registra un nivel de intensidad de campo de 41dB μ v para el CH-11, 47dB μ v para CH-18 en la imagen del centro de la figura 14 y 41dB μ v para CH-18 en la imagen ubicada a la derecha de la figura 14.



Figura 14: Situación espectral del audio de Cubavisión y Educativo I en CH-11 y CH-18.

La figura 15 visualiza a continuación la situación espectral del canal 40, que transmite televisión digital en el municipio Guantánamo. Esta situación espectral se obtuvo con el dispositivo NooElec NESDR Nano 2. El cual es un dispositivo que no fue diseñado para la de-modulación de señales de TVD del estándar DTMB. Sin embargo, permite distinguir la presencia de una notable densidad espectral de potencia, en la frecuencia central del canal digital analizado, evidenciando su existencia. El span máximo alcanzado con el dispositivo utilizado es de 3 MHz, por lo que no fue posible visualizar en una misma ventana todo el canal.

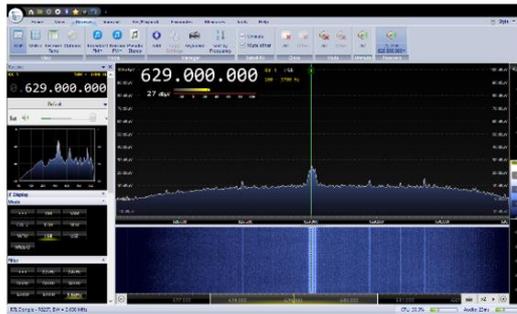


Figura 15: Espectro obtenido con el dispositivo NESDR para un canal de TVD-DTMB.

La figura 16 muestra a continuación, (en la imagen ubicada en su parte derecha) el espectro obtenido con el software SDR Console v3.0.7 con un span de 3 MHz alrededor de la portadora de video del CH-11 en transmisión analógica; en la imagen ubicada a la izquierda se visualiza el video correspondiente al CH-11, logrado con el software TVSharp.

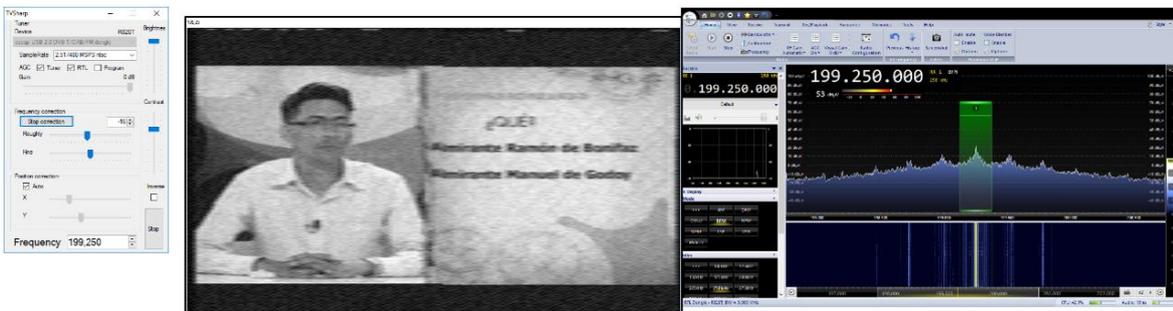


Figura 16: Imagen del video y espectro obtenido con el dispositivo NESDR, utilizando TVSharp y SDR Console v3.0.7 respectivamente.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se creó un vínculo de la tecnología SDR con la necesidad de monitorización, y auto-control de la empresa Radiocuba sobre señales de FM y TV. Se realizó un análisis espectral con el dispositivo NooElec NESDR

Nano 2–Tiny Black RTL-SDR USB Set (RTL2832U + R820T2) que permitió dirigir el trabajo de los especialistas de FM y TV en la empresa a corregir los problemas encontrados en la radiodifusión, concluyéndose en un servicio de mayor calidad. Aunque este análisis espectral pudo realizarse con un analizador de espectro profesional, intencionalmente se lograron los resultados con este dispositivo en contraste con las facilidades que ofrece una sociedad informatizada. Ofreciendo una solución mediante una tecnología de bajo coste, efectiva y que necesita dominarse para desarrollarse, en intención de lograr una transformación digital. Se demuestra así que es posible utilizar a nivel profesional, el SDR como una opción muy económica para garantizar calidad de servicio.

REFERENCIAS

- [1] J. Aguilar, A. Navarro, «Radio cognitiva–Estado del arte». *Sistemas & Telemática*, vol. 9, n.º 16, pp. 31-53, 2011.
- [2] «IEEE 802.22: Working group on wireless regional area networks, Enabling Spectrum Sharing and Rural Broadband Wireless Access Using Cognitive Radio Technology in White Spaces Recipient of the IEEE SA Emerging Technology Award», Mar. 10, 2016. <http://www.ieee802.org/22/>.(accedido Mar. 10, 2019).
- [3] K. Kimani, M. Njiraine, «Cognitive Radio Spectrum Sensing Mechanisms in TV White Spaces: A Survey». *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 8, n.º 6, pp. 3673-3680, 2018.
- [4] J. Arellanos, «Radios Cognitivos: Conectividad en zonas rurales utilizando espacios blancos de TV». Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, 2014.
- [5] M. Shikh-Bahaei, Y. Choi, D. Hong, «Wireless Communications and Mobile Computing». Editorial, Full-Duplex and Cognitive Radio Networking for the Emerging 5G Systems, Vol 2018, Article ID 8752749, 2 pages.
- [6] «R 80-02: Reglamento para el servicio de radiodifusión sonora en frecuencia modulada (FM), La Habana, Cuba, 2002», Ene. 8, 2019. http://www.mincom.gob.cu/R_80-02.pdf. (accedido Ene. 8, 2019).
- [7] A. Ali, M. Husain, M. Reisslein, «Cognitive Radio for Smart Grids: Survey of Architectures, Spectrum Sensing Mechanisms, and Networking Protocols ». *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 18, n.º 1, pp 860-898. 2016.
- [8] S. Haykin, «Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications». *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol.23, n.º 2, pp 201-220, 2005.
- [9] P. Kryszkiewicz, A. Kliks, A. Kubacz, H. Bogucka, G. Koudouridis, «Research Article: Context-Based Spectrum Sharing in 5G Wireless Networks Based on Radio Environment Maps ». *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, n.º 3217315, 15 pages, 2018, doi.org/10.1155/2018/3217315.
- [10] Z. Ji, K. Ray, «Dynamic Spectrum Sharing: A Game Theoretical Overview». *IEEE Communications Magazine*, vol. 5, n.º 0163-6804/07, pp 88-94, 2008.
- [11] M. Puerto, «Estudio piloto de los demoduladores de la serie RTL de Realtek para la Radio Definida por Software». Tesis de grado, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2014.
- [12] I. Santiago, S. Vidal, F. Martínez, «Analizador de espectro con función de monitoreo remoto mediante radio definida por software». *Pistas Educativas*, vol.40, n.º 130, pp 1125-1140, 2018, ISSN: 2448-847X.

SOBRE LOS AUTORES

Felipe Juglar Tamayo Suárez, nació el 19 de Octubre de 1977, en Santiago de Cuba, Cuba. Actualmente vive en la ciudad de Guantánamo. Se graduó de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica en la Universidad de Oriente, Junio de 2007. En Agosto del mismo año comenzó a ejercer como Especialista Principal en Tecnología de las Comunicaciones en la empresa Radiocuba, Guantánamo, donde se mantiene hasta hoy. Obtuvo en Mayo de 2018 el grado científico de Máster de “Sistemas de Telecomunicaciones”, graduado en la Universidad de Oriente. En la actualidad basa su línea de investigación en garantizar la calidad del sistema de TVD en Cuba.