

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y FACULTAD
DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

MÁSTER EN INFORMÁTICA INDUSTRIAL

“Optimización de sistemas cognitivos de radio (CRSN) mediante EVM, aplicado a redes inalámbricas de sensores móviles.”

Curso 2012/2013

Alumno:

Francisco Manuel Acacio Fernández

Directores:

José Antonio Gázquez Parra
Nuria Novas Castellano



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES
Departamento de Ingeniería



TRABAJO FIN DE MÁSTER
MÁSTER EN INFORMÁTICA INDUSTRIAL
POSGRADO EN INFORMÁTICA

OPTIMIZACION DE SISTEMAS COGNITIVOS DE
RADIO CRSN MEDIANTE EVM, APLICADO A
REDES INALAMBRICAS DE SENSORES MOVILES

Francisco Manuel Acacio Fernández

Dirigida por: Dr. José Antonio Gázquez Parra y Dra. Nuria Novas Castellano

Almería, Septiembre 2013

TRABAJO FIN DE MÁSTER
MÁSTER EN INFORMÁTICA INDUSTRIAL
POSGRADO EN INFORMÁTICA



OPTIMIZACION DE SISTEMAS COGNITIVOS DE
RADIO CRSN MEDIANTE EVM, APLICADO A
REDES INALAMBRICAS DE SENSORES MOVILES

por

Francisco Manuel Acacio Fernández

Para la obtención del

Título del Máster en Informática Industrial

Posgrado en Informática

Director

A blue ink signature consisting of several overlapping loops and lines.

Dr. José Antonio Gázquez Parra

Director

A blue ink signature with a prominent loop and a horizontal line at the end.

Dra. Nuria Novas Castellano

Autor

A blue ink signature with a large, complex loop structure.

Francisco M. Acacio Fernández

**OPTIMIZACION DE SISTEMAS COGNITIVOS DE RADIO CRSN MEDIANTE EVM,
APLICADO A REDES INALAMBRICAS DE SENSORES MOVILES**

Índice

<u>I.</u>	<u>Introducción</u>	1
<u>II.</u>	<u>Medida de la calidad de las comunicaciones</u>	13
<u>III.</u>	<u>Materiales y métodos</u>	17
<u>IV.</u>	<u>Análisis de las propiedades del canal.</u>	19
<u>V.</u>	<u>Optimización del protocolo de comunicaciones</u>	29
<u>VI.</u>	<u>Conclusiones</u>	33
	Referencias	35
	Experiencia personal.....	37

Índice de figuras

FIGURA 1. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA RADIO COGNITIVA	3
FIGURA 2. VALORES DE CALIDAD DE UNA SEÑAL DE TDT	13
FIGURA 3. DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN PARA UNA SEÑAL CON POCO RUIDO	14
FIGURA 4. DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN PARA UNA SEÑAL CON MÁS RUIDO	14
FIGURA 5. GENERADORES DE SEÑAL, ANALIZADOR VECTORIAL Y GENERADOR DE RUIDO 18	
FIGURA 6. ESCENARIO GENERAL.....	19
FIGURA 7. ESCENARIO BÁSICO.....	19
FIGURA 8. RUIDO A -130 dBm, SEÑAL DE PORTADORA A -60 dBm SIN PORTADORA INTERFERENTE	20
FIGURA 9. RUIDO A -130 dBm, SEÑAL DE PORTADORA A -60dBm CON PORTADORA INTERFERENTE DE -32 dBm	21
FIGURA 10. RUIDO A -80 dBm, SEÑAL DE PORTADORA A -60 dBm Y SIN PORTADORA INTERFERENTE	21
FIGURA 11. RUIDO A -80 dBm, SEÑAL DE PORTADORA A -60 dBm CON PORTADORA INTERFERENTE DE -32 dBm	22
FIGURA 12. RUIDO A -69 dBm, SEÑAL DE PORTADORA A -60 dBm Y SIN PORTADORA INTERFERENTE	23
FIGURA 13. RUIDO -69 dBm, SEÑAL DE PORTADORA A -60 dBm Y CON PORTADORA INTERFERENTE DE -32 dBm	23
FIGURA 14. RUIDO A -66 dBm, SEÑAL DE PORTADORA A -60 dBm Y SIN PORTADORA INTERFERENTE	24
FIGURA 15. RUIDO A -66 dBm, SEÑAL DE PORTADORA A -60 dBm Y CON PORTADORA INTERFERENTE DE -32dBm	25
FIGURA 16. REPRESENTACIÓN DEL EVM RESPECTO AL SNR CON INTERFERENCIA	26
FIGURA 17. REPRESENTACIÓN DEL EVM RESPECTO AL SNR SIN INTERFERENCIA.....	27

FIGURA 18. EVM Y SNR PARA UNA SEÑAL DE -60 DBM SIN PORTADORA INTERFERENTE	27
FIGURA 19. EVM Y SNR PARA UNA SEÑAL DE -60DBM Y PORTADORA INTERFERENTE DE - 32 DBM.....	28
FIGURA 20. SNR PARA LA SEÑAL DIGITAL DE -60 DBM RESPECTO AL NIVEL DE RUIDO ...	28
FIGURA 21. EVM RESPECTO AL NIVEL DE RUIDO CON Y SIN INTERFERENCIA.....	29
FIGURA 22. ALGORITMO BÁSICO PARA GESTIÓN DE INFORMACIÓN EN LOS NODOS	30
FIGURA 23. REPRESENTACIÓN PARA LA SIMULACIÓN DEL ESCENARIO BÁSICO BÁSICO....	31
FIGURA 24. SIMULACIÓN DEL ESCENARIO BÁSICO	31
FIGURA 25. REPRESENTACIÓN PARA LA SIMULACIÓN DEL ESCENARIO GENERAL	32
FIGURA 26. SIMULACIÓN DEL ESCENARIO GENERAL	32

Índice de tablas

TABLA I. CLASIFICACIÓN DE RADIO COGNITIVA	4
TABLA II. NIVEL DE EVM PARA UNA SEÑAL DE -60 DBM PARA DISTINTOS NIVEL DE RUIDO	25
TABLA III. NIVEL DE EVM PARA UNA SEÑAL DE -60 DBM PARA DISTINTOS NIVEL DE RUIDO Y UNA SEÑAL INTERFERENTE DE -32 DBM	26

Agradecimientos

Agradezco a mi familia, padres, tías, mujer, hija e hijo, a todos por su paciencia e incomodidades ocasionadas en todos muchos momentos y especialmente en aquellos instantes que les causé alguna o más de una molestia, a todos ellos por su incondicional apoyo y tiempo que muy seguramente les he restado.

Especialmente para los directores del trabajo por su profesionalidad, comprensibilidad, paciencia y dedicación, por todo el tiempo empleado, molestias que pueda haberles causado y apoyo mostrado durante estos meses. A los muchos profesores que me han enseñado mucho y a los pocos profesores que me han enseñado poco. A todos aquellos compañeros como Javi y Vicente que han compartido su tiempo, y me animaron a empezar esta etapa y a seguir adelante.

Y agradecimientos a la sociedad y al mundo laboral que aporta la mejor experiencia y base de conocimiento posible. Disculpas por cualquier error tipográfico que pueda haber quedado oculto y gracias a todos aquellos que hayan dedicado parte de su tiempo en prestar atención a todo o parte de este trabajo.

Gracias a todos y a cuantos han participado y han hecho posible llegar hasta aquí.

Gracias a todos y por todo, os aseguro que no lo olvidaré.

OPTIMIZACION DE SISTEMAS COGNITIVOS DE RADIO CRSN MEDIANTE EVM, APLICADO A REDES INALAMBRICAS DE SENSORES MOVILES

Francisco Manuel Acacio Fernández

Máster en Informática Industrial. Escuela Politécnica Superior y Facultad de Ciencias Experimentales
Universidad de Almería
Almería. España

Abstract: Since origins of radio communications, these have been constantly evolving. Different ways have accompanied to signal transmissions, always with one objective, to facilitate communication and use all resources. Thus, we find different modulations, streaming audio, video and data. At present, digital communications are imposed over analogic communications. The analogic transmission is remaining by inertia in some services. Recently, cognitive radio has have a great interest as an evolution of previous technologies, which leads us to analyze in this document, attempting to provide or contribute to improve it, supplemented with measurements of error vector magnitude (EVM) and applying it in a sector of interesting evolution, the wireless sensors networks.

Resumen: Desde los orígenes de las comunicaciones por radio, estas han estado en constante evolución. Diferentes tipos y formas de emitir han acompañado a las transmisiones de señales, siempre con un objetivo claro, facilitar la comunicación y aprovechar los recursos disponibles. Así encontramos diferentes tipos de modulaciones, transmisiones de audio, de video y de datos. En la actualidad se están imponiendo las transmisiones digitales sobre las transmisiones analógicas que permanecen por inercia en algunos servicios. Recientemente ha despertado gran interés la radio cognitiva como evolución de las anteriores tecnologías, lo que nos lleva a analizarla en este trabajo, intentar aportar o contribuir para mejorarla, complementándola con medidas de la magnitud del vector de error (EVM) y aplicándola en un sector de interesante evolución como las redes inalámbrica de sensores móviles.

Keywords:

Cognitive Radio, mobile wireless sensor networks, EVM, vector signal generator, vector signal analyzer.

Palabras Claves:

Radio cognitiva, redes inalámbricas de sensores móviles, EVM, generador de señal vectorial, analizador de señal vectorial.

I. Introducción

Desde los orígenes de las comunicaciones por radio, estas han estado en constante evolución. Diferentes tipos y formas de transmitir han acompañado a las transmisiones de señales, siempre con un objetivo claro, facilitar la comunicación y aprovechar los recursos disponibles. Así encontramos diferentes tipos de modulaciones, transmisiones de audio, de video y de datos. En la actualidad se están imponiendo las transmisiones digitales sobre las transmisiones analógicas que

permanecen por inercia en algunos servicios. Recientemente ha despertado gran interés la radio cognitiva como evolución de las anteriores tecnologías, lo que nos lleva a analizarla en este trabajo.

El primer concepto de radio cognitiva o *Cognitive Radio* (CR) la expusieron por J. Mitola y G. Q. Maguire, en el año 1995 en la referencia [1]. En este trabajo se establecía como objetivo establecer una evolución de la tecnología de radio hacia una plataforma de radio definida por software. Esto implica un sistema de ‘caja negra’ reconfigurable, donde inalámbricamente el sistema puede modificar de forma automática sus parámetros de

comunicación dependiendo de las demandas de la red y de los usuarios conectados. La Radio cognitiva es ejemplo de la comunicación inalámbrica en la cual tanto las redes como los nodos inalámbricos cambian los parámetros de transmisión o de recepción para ejecutar su cometido de forma eficiente sin interferir con usuarios autorizados. La alteración de parámetros está basada en la observación de varios factores del entorno interno y externo, tales como el espectro de radiofrecuencia, el comportamiento del usuario o el estado de la red. Además establece que los usuarios no legitimados para unas frecuencias, podrían saltar a otra banda de frecuencias para seguir transmitiendo. Y por tanto, aprovechar mejor los huecos temporales en el espectro electromagnético, uno de los fundamentos básicos de la radio cognitiva.

Este concepto se basaba en la idea de que las bandas de la telefonía móvil están sobrecargadas en la mayor parte del mundo, a diferencia de la banda de radioaficionados o las frecuencias de localización están siendo bastante desaprovechadas. La asignación de frecuencias fijas dentro del espectro producen que las frecuencias se encuentren prácticamente en desuso, y las frecuencias asignadas a servicios específicos, no puedan ser usadas por usuarios sin la correspondiente autorización, incluso si la transmisión de estos no introdujera ninguna interferencia ni molestia en el canal.

En la referencia [1] los autores resumen entendiendo que los radios de software se están emergiendo como plataformas para sistemas de comunicaciones personales multimodo y multibanda. La etiqueta radio es el conjunto de bandas de Radio Frecuencia (RF), interfaces de aire, protocolos y patrones espaciales y temporales que moderan el uso del espectro radioeléctrico. La Radio Cognitiva amplía el razonamiento basado en modelos de dominios de radio sobre tales etiquetas. Mejora la flexibilidad de los servicios personales a través de un lenguaje de representación del conocimiento de radio o *Radio Knowledge Representation Language* (RKRL). Este lenguaje representa conocimiento de la etiqueta de radio, dispositivos, módulos de software, propagación, redes, necesidades de los usuarios, y los escenarios de aplicación de una manera que apoya el razonamiento automatizado acerca de las necesidades del usuario. Esto permite llevar a cabo negociaciones expresivas entre pares sobre el uso del espectro radioeléctrico respecto al espacio, tiempo y contexto del usuario. Con RKRL, los agentes de radio cognitiva pueden manipular activamente la pila

de protocolos para adaptar las etiquetas conocidas para satisfacer mejor las necesidades del usuario. Esto transforma los nodos de radio de ejecutores ciegos de protocolos predefinidos a agentes inteligentes conscientes del dominio de la radio que buscan formas de ofrecer los servicios que el usuario quiere, incluso si el usuario no sabe cómo obtenerlos. Finalmente establecen las bases para definir un sistema cognitivo, ya que ni existe un lenguaje estándar ni una estructura en el dominio del tiempo, para ello plantean un escenario posible y analiza los diferentes lenguajes que se pueden emplear. Establece la representación del dominio de los servicios de información.

Se obtiene como resultado un nuevo lenguaje RKRL con 41 micro-palabras; exponen conocimiento sobre ecualizadores; plantean una jerarquía de inferencia espacial entre hardware y software; establecen un modelo con mensaje, marco, trama, campo, bytes; definen un ciclo cognitivo.

Las radios cognitivas se basan globalmente en el esquema de la Figura 1, donde el sistema inicia su funcionamiento mediante una detección del espectro para ello deben ser capaces de detectarlo sin usarlo y utilizándolo y siempre sin provocar interferencias a otros usuarios. Para su implementación se puede utilizar tres técnicas distintas según se configure: por transmisión (determinar si hay una señal de algún usuario utilizando una parte concreta del espectro), por cooperación (intercambiando de forma periódica información con otros nodos, sobre la detección de frecuencias en uso) y basada en interferencias mediante la escucha de las emisiones propias del nodo para ver si están interferidas.

En la segunda etapa, Administración del espectro, adjudica un ancho de banda según la calidad del servicio a proporcionar, para ello utiliza la movilidad del espectro tanto en transmisión como en recepción o comparten el espectro, este último hay que establecer un método esquemático de distribución del espectro que sea equitativo y justo para todos los usuarios de radio cognitiva sin interferir en las transmisiones de los usuarios legítimos. Éste es uno de los mayores retos a la hora de diseñar las radios cognitivas.

Respecto a la evolución de la arquitectura de la radio cognitiva en [2] el autor resume entendiendo que la comunidad de investigación de radio ha adoptado la radio cognitiva para la gestión dinámica del espectro radioeléctrico y

mejorar la utilización del espectro, por ejemplo, en las bandas *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) y como usuarios secundarios en las bandas de TV sin usar. Pero las necesidades del usuario inalámbrico móvil no se han dirigido siguiendo el concepto de la alta calidad de la información *Quadrature or In fase* (QoI) como una función de ajuste del lugar, tiempo y entorno (por ejemplo, los desplazamientos, compras, o la necesidad de asistencia médica). Este trabajo considera la evolución de la arquitectura de radio cognitiva o *Cognitive Radio Architecture* (CRA) en el contexto de casos de uso que motivan tal como la seguridad pública y los espacios sensibles para caracterizar CRA con una perspectiva interdisciplinaria donde la percepción máquina visual, acústica, del habla y dominios de texto en lenguaje natural proporcionan a la detección automática situaciones estereotipadas. Permite a los nodos de radio seleccionar entre las bandas de radio y modos más inteligentemente y permite a las redes inalámbricas cognitivas ofrecer mayor QoI dentro de las limitaciones sociales y técnicas, haciendo las más rentables a través de la inteligencia computacional distribuida e integrada.

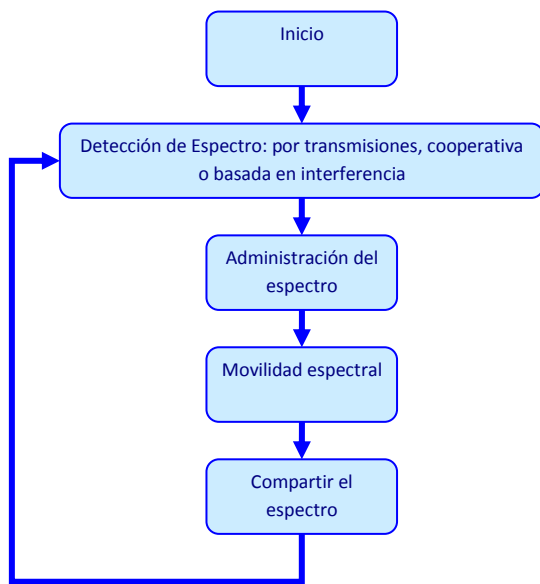


Figura 1. Esquema de funcionamiento de la Radio Cognitiva

Plantea lo que hace como el estudio de la situación de las arquitecturas introduciéndonos desde el prototipo inicial CR1 pasando por la radio definida por software o *Software Defined Radio* (SDR), las CRA o arquitectura de radio cognitiva hasta las tecnologías de lenguaje

humano. Luego partiéndose y basándose en una arquitectura SDR y un SCA o arquitectura de comunicación por software, con una infraestructura por capas y con *Application Programming Interface* (APIs), evolucionamos de acuerdo con la mejora del QoS hacia el acceso al espectro dinámicamente o *Dynamic Spectrum Access* (DSA) o arquitectura DSA Haykin. La iCRA y el ciclo cognitivo ideal y la evolución de CRA en redes nos dirige hacia las redes inalámbricas cognitivas *Cognitive Wireless Network* (CWN). La evolución de las arquitecturas se ha visto influenciada por los casos y los parámetros de uso con conocimiento de la localización, conocimiento del espectro y subasta del espectro o frecuencias, por factores como las necesidades de los usuarios, manipulación del espectro, pila de protocolos. Los factores comerciales afectan de manera considerable en la evolución, siendo influenciados por *Hight Definition TeleVision* (HDTV), DBS, *Wireless Local Area Network* (WLAN), WIFI, Zigbee, *Bluetooth*, *Ultra Wide Band* (UWB), *3ª Generation* (3G), *World Wide Interoperability for Microwave Access* (WIMAX). Analiza el entorno CRA en visión artificial y traducción entre el lenguaje de las máquinas y el humano. Para valorar la calidad de la información en la arquitectura se deben tener en cuenta los parámetros QoS/QoI, la cantidad, la precisión, exactitud y oportunidad, validación y detalles. Para ello analiza parámetros de uso y unos conceptos de calidad de la información. Y concluye que la evolución de las arquitecturas debe ir destinada a mejorar la información sobre localización de usuarios, preferencias y situación actual para interactuar adecuadamente en el siguiente instante de tiempo.

Actualmente se puede hacer una clasificación para radios cognitivas como se muestra en la Tabla I.

Aunque inicialmente la radio cognitiva se pensó como una ampliación de la radio definida por software (Radio cognitiva completa) la mayor parte del trabajo de investigación actualmente se centra en la radio cognitiva detectora del espectro, particularmente en la utilización de bandas de TV para la comunicación. El problema esencial de la radio cognitiva detectora del espectro es el diseño de dispositivos detectores de alta calidad y algoritmos para intercambiar los datos de detección del espectro entre nodos. Esto implica unas técnicas más sofisticadas de detección de espectro y requiere que la información sobre el estado del espectro se intercambie regularmente entre los nodos, el incremento del número de

nodos que cooperan en la detección disminuye

la probabilidad que haya detecciones falsas [3].

Tabla I. Clasificación de Radio Cognitiva

Clasificación	
Según el conjunto de parámetros a considerar para alterar las condiciones de la red	<u>Radio cognitiva completa</u> : donde cualquier parámetro observado en un nodo inalámbrico y/o una red se tiene en cuenta a la hora de tomar decisiones sobre el cambio de parámetros de transmisión y/o recepción Radio cognitiva detectora del espectro: se toman las decisiones basándose solamente en el estado del espectro de radiofrecuencia
Según la banda del espectro utilizado	<u>Radio cognitiva de banda bajo licencia</u> : cuando es capaz de usar bandas asignadas a usuarios bajo licencia, además de la utilización de bandas de libre uso. <u>Radio cognitiva de banda de libre acceso</u> : Cuando la radio cognitiva solo puede utilizar las partes de libre acceso del espectro de radiofrecuencia.

Este concepto ha revolucionado hacia la red cognitiva o *Cognitive Network* (CN) como una red capaz de percibir las condiciones actuales para planificar, decidir y actuar según esas condiciones, aprendiendo de las consecuencias de sus actos mientras sigue un plan pre-establecido. Este concepto establece un bucle cognitivo que percibe las condiciones externas, planifica sus acciones de acuerdo a las señales de entrada y a unas políticas de red, decide cual es el escenario que mejor se adecúa a sus condiciones y finalmente actúa. El sistema aprende de los resultados de sus acciones pasadas para mejorar su comportamiento futuro. Estos conceptos y términos establecidos los podemos aplicar a la radio, para obtener la base de los principios de radio cognitiva e ir ampliando sus aplicaciones y configuración [4].

Sobre las redes de sensores de radio cognitiva, en [5] se explica la arquitectura de red, áreas de aplicación, ventajas, principios de diseño de la redes de sensores de radio cognitivos para redes de sensores inalámbricos usando acceso al espectro de forma dinámica DSA. Los autores resumen entendiendo que el acceso al espectro dinámico se presenta como una promesa y una comunicación eficiente del espectro para redes de sensores con recursos limitados múltiples saltos inalámbricos, debido a su natural comunicación orientada a eventos, que generalmente produce el tráfico a ráfagas dependiendo de las características de los eventos. Además, el acceso al espectro oportunista también puede ayudar a realizar el despliegue de redes de sensores múltiples superpuestos, y eliminar la colisión y la contención excesiva demora incurrida por el despliegue del nodo denso. Incorporando la capacidad de la radio cognitiva en redes de sensores se obtiene un nuevo paradigma de redes de sensores (es decir, redes de sensores de radio cognitiva). En este artículo se presentan los principales principios de diseño, ventajas

potenciales, áreas de aplicación y arquitecturas de red de *Cognitive Radio Sensor Networks* (CRSNs). Los protocolos de comunicación existentes y los algoritmos ideados para las redes y redes inalámbricas de sensores de radio cognitiva se analizan junto con las vías de investigación abiertas para la realización de CRSNs.

Los autores analizan las ventajas de las redes inalámbricas de sensores o *Wireless Sensor Network* (WSN) en acceso dinámico, usado el canal más oportuno, facilidad de adaptabilidad, superponer el despliegue de redes, comunicación en diferentes espectros con regulaciones diferentes, ya que los cuadros nacionales de atribuciones de frecuencias están diferenciados en varias regiones.

Para ello establece una arquitectura, una estructura del nodo hardware y una topología para CRNS, se encuentran diferentes escenarios como aplicaciones para sensores en interiores, aplicaciones multimedia, aplicaciones de sensores heterogéneos de varias clases, aplicaciones de vigilancia en tiempo real. Se utiliza la gestión del espectro dinámico mediante la detección del espectro aplicado a filtros adaptados, a detección de energía, función de detección y nivel de interferencia. Para investigar en técnicas de detección híbrida, detección cooperativa y detección basada en estadísticas de usuarios principales. Además de la detección se tomarán unas decisiones de espectro basadas en parámetros de decisión y en distribución de datos de control, para conseguir unos saltos, usos del espectro y un *handoff* que facilite la movilidad.

Además en las comunicaciones en CRSN se analizan las diferentes capas de redes. La capa física donde se posibles líneas de investigación son la transmisión basada en SDR, en el diseño de formas de onda óptimas y control de potencia adaptativa; en la capa de

enlace de datos además del control de errores y acceso al medio, hay líneas abiertas en soluciones para mínimas superposición de comunicaciones, solución acceso al medio para redes Novel y el ciclo oportuno. Para la capa de red las líneas a seguir son el enrutamiento del espectro de forma más eficiente, marco analítico para el enrutamiento optimizado, y el enrutamiento adaptativo según el QoS. Para la capa de transporte la fiabilidad del espectro asignado, el transporte cognitivo confiable y el transporte de energía eficiente. Para la capa de aplicación hay que mejorar el costo de la comunicación, y desarrollar esquemas que permitan edición en muestreos y eventos de señal basados en la disponibilidad del espectro.

El resultado que obtienen en este artículo los autores es estudiando las CRSNs incorporadas a las WSNs, comenta las ventajas y limitaciones de las CRSN, analiza la aplicación de las técnicas existentes a la radio cognitiva y WSN para las CRSN. Deja ver el enorme potencial de las CRSN y motiva para investigar en esta dirección.

En este trabajo se va utilizar la radio cognitiva en la aplicación una red de sensores inalámbrica o WSN, es una red de procesadores muy pequeños a los que llamaremos nodos y que van a estar equipados con sensores, para realizar una o más funciones en común. Las redes de sensores están formadas por un grupo de sensores con ciertas capacidades sensitivas y de comunicación inalámbrica los cuales permiten formar redes 'ad-hoc' sin infraestructura física pre-establecida ni administración central.

El uso de las redes de sensores viene utilizándose recientemente para adquisición y tratamiento de datos con diferentes tipos de aplicaciones y en diferentes entornos como pueden ser los industriales, domóticos, militares, medio ambientales, etc; siendo caracterizadas por su fácil instalación y modo de funcionamiento autoconfigurable. Sus funcionalidades con servicios de emisión, recepción y encaminamiento de datos hacia el destino deseado, así como registrar datos referentes a los nodos, gestionar eficientemente la energía y obtener una autonomía considerable; convierte a este tipo de redes en una alternativa y una solución práctica para cualquier tipo de aplicaciones con sensores.

Se está investigando por todo el mundo sobre las redes de sensores. La red de sensores hasta la fecha más grande consistió de 800 nodos y fue puesta en servicio el 27 de agosto

de 2001 en la Universidad de Berkeley para demostrar la potencia de esa técnica en una presentación. Algunas aplicaciones por ejemplo son *Berkeley Motes*, *Pico-Radio*, *Smart-Dust* y *WINS*.

Los nodos WSN están típicamente organizados en uno de tres tipos de topologías de red de datos: en estrella (cada nodo se conecta directamente al *gateway*), en árbol (cada nodo se conecta a un nodo de mayor jerarquía en el árbol y después al *gateway*) y de malla que ofrece mayor confiabilidad, los nodos se pueden conectar a múltiples nodos en el sistema y pasar los datos por el camino disponible.

Un nodo WSN contiene varios componentes técnicos. Estos incluyen el radio, batería, microcontrolador, circuito analógico y una interfaz a sensor. Cuando utilice tecnología de radio WSN, debe hacer compensaciones importantes. En sistemas alimentados con batería, altas tasas de datos y uso frecuente de radio consumen mayor energía. Debido a que la tecnología de vida de la batería y manejo de potencia están en constante desarrollo y debido al ancho de banda IEEE 802.11 disponible, WiFi es una tecnología interesante.

Para extender la vida de la batería, periódicamente un nodo WSN se enciende y transmite datos alimentándose del radio y posteriormente apagándose para conservar energía. La tecnología de radio WSN debe hacer eficiente la transmisión de una señal y permitir al sistema regresar al modo 'sleep' con un uso mínimo de energía. Esto significa que el procesador involucrado debe ser capaz de despertar, encenderse y volver a 'sleep' de manera eficiente. La tendencia del microprocesador para WSN incluye la reducción de consumo de energía mientras mantiene o incrementa la velocidad de procesador. Parecido a su opción de radio, la compensación de consumo de energía y velocidad de procesamiento es clave al seleccionar procesador para WSN. Esto hace a la arquitectura x86 una opción difícil para dispositivos alimentados con batería.

Continuando con la literatura científica de observamos diversidad de citas de importante trascendencia, fundamentales para el desarrollo tecnológico e interés para nuestro trabajo.

Sobre las redes de sensores cognitivos y asignación y enrutamiento de canales dinámicamente, en [6] los autores resumen entendiendo que con el aumento del número de

sensores inalámbricos o dispositivos de medición, la cantidad de datos detectados que se utilizan en la comunicación inalámbrica se convierte en una parte importante de muchas aplicaciones. La tecnología de radio cognitiva se puede utilizar para facilitar el despliegue de un sistema de sensores con un ancho de banda eficiente. En este trabajo, se propone un conjunto de datos y el marco de la difusión de los sistemas de sensores de radio cognitiva para aprovechar al máximo los recursos inalámbricos mientras se mantiene una topología conectada fiable y eficiente para cada canal. En el marco propuesto, cada nodo sensor selecciona un canal teniendo en cuenta la utilización del canal del principal usuario y la conectividad de la red. De este modo, la recopilación y difusión de datos se pueden realizar con una alta fiabilidad y breve retraso de tiempo mientras evitamos un efecto dañino en los usuarios primarios. Y utilizan simulaciones por ordenador para evaluar el marco propuesto los autores proponen un marco o protocolo dinámico en redes cognitivas de sensores para asignación de un canal y enrutamiento.

El protocolo propuesto se basa en diferentes principios. El diseño se establece partiendo de que se tiene como elementos los usuarios primarios, secundarios y el *gateway*. Plantean canales de control, primarios y secundarios.

Mensajes de solicitud de asignación de canal, con una lista de canales asignados, donde el *gateway* informa de los canales y el ancho de banda, cada nodo incorpora la información del salto para llegar al *gateway* y del coste.

Mensajes de notificación de información de canal para saber cómo llegar al *gateway*. Donde especifica la dirección del *gateway*, la lista para llegar al *gateway*, el canal, el ancho de banda posible y el coste hasta el *gateway*. Cada 200 milisegundos compara todos los *Channel Information Notification* (CIN) recibidos para decidir sobre el canal a elegir.

La detección de canal y estimación del ancho de banda posible la realiza cada nodo mediante el parámetro de relación de tiempo de canal libre *Channel Idle Time Ratio* (CITR) que junto con la capacidad de ancho de banda del canal, obtendremos el ancho de banda posible de un canal en un instante. Para periodos de 50 milisegundos y actualizándose de acuerdo con los dos últimos valores.

La selección de la ruta para los nodos sensores se realiza según la información

contenida en los mensajes CIN con menor número de saltos. Para la reasignación del canal de los usuarios primarios se utiliza un mensaje de indicación cambio de canal *Channel Change Indication* (CCIND) emitido por el *gateway* o por cualquier nodo sensor.

Se debe conseguir una ruta de lazo abierto hacia el *gateway* mediante el uso de mensajes CIN. El *gateway* puede usar mensajes *multicast* para contactar con un nodo y después *unicast* para comunicarse.

Los autores realizan una simulación con 50 nodos diferentes donde 3 son usuarios primarios y el flujo de *Constant Bit Rate* (CBR) de 200 Kbps cada uno y un tamaño de paquete para los datos del sensor de 512 bytes. Los nodos pueden conmutar entre un canal de control y 2 canales de datos. El nodo *gateway* tiene 3 transmisores y los nodos solo 1 transmisor. Usan el modelo de propagación de Nakagami y el acceso al medio de acuerdo con el IEEE 802.11 a 11 Mbps. El tiempo de simulación es de 150 segundos y comparan el protocolo propuesto *Dinamic Channel Assignment and Routing* (DCAR) con dos alternativas: único canal, donde todos utilizan el mismo canal, y canal aleatorio donde cada nodo selecciona aleatoriamente un canal.

Los resultados de la simulación indican que en DCAR la relación de entrega de paquetes no se ve negativamente afectada por el aumento del flujo de datos de cada sensor. Pero para los casos de único canal y canal aleatorio se observa que a partir de 12 Kbps se aprecian efectos perjudiciales disminuyendo claramente la relación de paquetes entregados, tanto para usuarios primarios como usuarios secundarios.

Los resultados de los retardos para diferentes tasas de datos de los sensores muestran que para DCAR se mantiene por igual para diferentes valores, mientras que aumenta considerablemente para los otros casos a partir de 10 Kbps.

Para flujo de mensajes *broadcast* también afecta negativamente respecto a la tasa de paquetes difundidos, obteniendo peores resultados que para DCAR. Para futuros estudios plantea realizarlos con nodos reales y en movimiento.

Sobre las WSN con repetidores cognitivos, en [7] los autores resumen entendiendo que el aumento anticipado de la densidad de las redes inalámbricas de sensores hace que compartan tanto el espectro de acceso sin licencia como el espectro con licencia. La tecnología clave para

la compartición del espectro en este escenario son las redes de radio cognitiva. Los escenarios de retransmisión cognitivos, donde un usuario cognitivo (sin licencia) ofrece servicios de retransmisión a otro usuario con licencia (primario), se han propuesto como un método para aumentar las posibilidades de espacios en blanco del espectro. Se desarrolla un marco de red de sensores inalámbricos que contiene un usuario cognitivo (nodo sensor), con datos sensibles al retardo y la potencia limitada. El usuario cognitivo ofrece una capacidad de retransmitir el tráfico primario cuando la conexión primaria falla en su entrega. El usuario cognitivo utiliza un mecanismo de programación que concede prioridad al tráfico retransmitido sobre su propio tráfico. En este marco, se permite que el usuario cognitivo controle el volumen del tráfico retransmitido a través de un parámetro de control de admisión. El objetivo del nodo sensor (usuario cognitivo) es minimizar la retención de tráfico, sujeto a ciertas variaciones de potencia para retransmitir el tráfico primario. Las contribuciones clave en este trabajo son el desarrollo del trabajo mencionado anteriormente, el establecimiento de una formalización matemática para este problema, la derivación de expresiones matemáticas para el consumo medio de energía, el retraso medio de los paquetes y la solución para el problema de optimización, desarrollado mediante la búsqueda de un valor para el parámetro de control de admisión que minimiza el retraso de tiempo mientras satisface las restricciones potencia. Para ello se formula un protocolo para retransmitir o asistir a los nodos de una red de sensores inalámbrica. Esto mejora y favorece en situaciones de nodos con baja potencia o nodos sin cobertura. Posteriormente formula el problema optimizándolo y analiza el rendimiento.

Analizando cómo lo hacen encontramos que para conseguir un protocolo en el que se pueda aplicar la retransmisión cognitiva hay que incorporar algunas variantes al protocolo existente. En la capa de acceso al medio, *Media Access Control* (MAC), los usuarios primarios deben contener un *buffer* para los paquetes de datos a enviar. Los usuarios cognitivos tendrán dos *buffers*, uno para los paquetes propios y otro para los que tenga que retransmitir. Para acceso al medio se utiliza un *slot* de tiempo con prioridad a los usuarios primarios. Y se utilizan mensajes *ACKnowledgement* (ACK) para confirmar la llegada correcta del paquete al destino, y mensajes *Not ACKnowledgement* (NACK) para el caso contrario.

En la capa física se incorporan también algunas mejoras como son la ganancia del canal de radio. Cada enlace está afectado por el ruido gaussiano blanco aditivo *Additive Gaussian White Noise* (AWGN). Y se consigue una transmisión segura cuando la relación señal ruido *Signal Noise Ratio* (SNR) en el i -ésimo enlace, supera un umbral preestablecido.

La estrategia de colas consiste en transmitir, en los nodos cognitivos, primero el tráfico de los nodos primarios o tráfico para retransmisión del *buffer* de paquetes ajenos. Esto se conoce como retransmisión cognitiva priorizada *Prioritized Cognitive Relay* (PCR).

Para optimizar este protocolo es importante minimizar el retraso en la retransmisión de los paquetes del *buffer* de paquetes ajenos de los nodos cognitivos, con objeto de reducir la potencia total consumida por los nodos cognitivos o secundarios.

El resultado que obtienen explica que si tenemos que el factor f^* es una fracción de los paquetes primarios no entregados en el *buffer* de retransmisión de los nodos cognitivos, su valor estará entre 0 y 1. Si $E[D_s]$ es el retardo medio en el tráfico secundario. Se obtiene que para f^* próximo a 1 se obtiene el mínimo de retardo y el máximo de coste de potencia de retransmisión. Pero modificando los parámetros de control de admisión, podemos obtener diferentes resultados.

Sobre las WSN y la estructura de red para obtener datos con retardo, en [8] los autores resumen entendiendo que las redes de sensores inalámbricas utilizan un gran número de nodos de sensores inalámbricos para recoger información de su zona de detección. Los nodos de sensores inalámbricos son dispositivos con pilas. El ahorro de energía es siempre crucial para la vida útil de una red de sensores inalámbricos. Recientemente, se han propuesto numerosos algoritmos para resolver el problema de ahorro de energía en redes de sensores inalámbricos. Sin embargo, en estos algoritmos la eficiencia de recolección de datos esta generalmente relacionada con una mayor vida útil de la red. Hay una gran necesidad de desarrollar redes de sensores inalámbricos con algoritmos de optimización de prioridades basadas en otros aspectos además del ahorro de energía. Así, se propone una estructura de red de recogida de datos con retardo para redes de sensores inalámbricos. El objetivo de la estructura de la red propuesta es reducir al mínimo los retrasos en los procesos de recopilación de datos de las redes de sensores

inalámbricos. Dos algoritmos de formación de redes están diseñados para la construcción de la estructura de la red propuesta, con un enfoque centralizado y descentralizado. El rendimiento de la estructura de la red propuesta se evalúa utilizando simulaciones por ordenador. Los resultados de simulación muestran que, cuando se comparan con otras estructuras de red comunes de redes de sensores inalámbricos, la estructura de la red propuesta es capaz de reducir de manera significativa los retrasos en el proceso de recopilación de datos.

Para reducir el consumo de energía en las redes de sensores adoptan algoritmos de *clustering* que organiza los nodos de sensores en *cluster*, con sus nodos cabecera y el resto de los nodos. Se basan en las redes de sensores como *Simple Chain* (SC) o red de canal simple, *Minimum Spanning Tree* (MST) o red de mínimo árbol expandido, *Collection Tree Protocol* (CTP) o protocolo de árbol de colección y *MultipleCluster 2 Hop* (MC2H) o redes de dos saltos y múltiples *clusters*; y los algoritmos de clustering tales como LEACH, PEGASIS, PEDAP; propone una estructura de red en árbol formada por miembros *clusters*, *cluster* cabecera y estación base, comparándola con el resto de tipos de redes enumeradas anteriormente. Como algoritmo de formación de red propone uno de enfoque de arriba-abajo centralizado y uno de enfoque abajo-arriba descentralizado.

La propuesta de dos algoritmos con enfoque distinto simulados en redes desde 4 a 64 nodos con saltos de 4 en 4. Se clasifican en 2 tipos, tipo I o estructura de red de simple *cluster* y tipo II o estructura de red múltiple *cluster*. Analizamos el *Data Collection Time* (DCT) o el tiempo de colección de datos promediado, la distancia de comunicación de la red y el *time slots*.

El resultado es que la estructura de red propuesta es eficiente en términos de DCT respecto al resto de estructuras, además reduce importantemente el tiempo de colección de datos DCT, mientras mantiene la distancia de comunicación y el tiempo de vida de la red en valores aceptables.

Sobre los huecos del espectro para radios cognitivas con transmisión direccional asistida por repetidor, en [9] los autores resumen entendiendo que *Spectrum Hole* (SH) se define como una banda de espectro que puede ser utilizado por los usuarios sin licencia, el cual es un recurso fundamental para los sistemas de radio cognitiva. La mayor parte de las

contribuciones que encuentra SH por detección es si una señal primaria está presente o ausente, y luego tratar de acceder a los mismos para que el CR y usuarios primarios utilicen las bandas del espectro, ya sea en diferentes intervalos de tiempo o en diferentes regiones geográficas. Se propone un nuevo esquema con retransmisión o repetidores direccionales para usuarios de CR para explotar nuevas oportunidades de espectro, se le llama SH espacial. Se puede proporcionar una mayor eficiencia del espectro por la coexistencia de los usuarios primarios y usuarios de CR en la misma región, tiempo y banda del espectro. En particular, cuando no aparece un espectro oportuno para un enlace directo desde un transmisor CR a un receptor CR, el esquema puede establecer la comunicación a través de enlaces indirectos, es decir, otros usuarios CR actúan como estaciones de retransmisión para ayudar a la comunicación mediante el uso de otros dominios espaciales. Además, se analizan las probabilidades de éxito de la comunicación de los usuarios de CR para demostrar que la eficiencia espectral se puede mejorar considerablemente con el esquema expuesto.

Plantean SH como una región de frecuencias que se comparte en el tiempo, para ello hay que utilizar técnicas tradicionales de detección de señales, como filtros, detectores de energía y detectores de características ciclo estáticos principalmente. SH es comúnmente utilizada por CR y es fundamental que no produzca interferencias a los usuarios principales. Ahora se propone SSH o *Spatial Spectrum Holes* (SSH), en diferentes dominios espaciales con la ayuda de repetidores, técnicas de transmisión direccional y múltiples antenas. SSH en redes CR. Es decir, un esquema de transmisión CR direccional asistido por repetidor. Partimos que tenemos dos escenarios. Uno donde los usuarios cognitivos y los usuarios primarios utilizan la misma banda del espectro, el mismo área geográfica y diferentes *slots* de tiempo. Los usuarios cognitivos transmiten cuando no lo hacen los usuarios primarios. Este esquema es llamado TSH o *Temporal Spectrum Hole*. El segundo escenario los usuarios cognitivos y los usuarios primarios utilizan la misma banda del espectro en diferente área geográfica. Este esquema es llamado GSH o *Geographic Spectrum Hole*.

El esquema propuesto se hace de acuerdo con dos sistemas. Un sistema básico y un sistema avanzado.

- El sistema básico introduce el principio de transmisión CR asistida por repetidor para SSH.

- El sistema avanzado desarrolla un esquema para usuarios CR que tienen posibilidad de realizar transmisiones direccionales.

En el sistema básico tenemos que un usuario CR puede actuar de repetidor. Luego forma una región con repetidor. El parámetro a estudiar es SCP o *Successful Communication Probability*.

En el sistema avanzado tenemos que un usuario CR además de actuar de repetidor puede transmitir direccionalmente. Luego tenemos un esquema de repetidor asistido con transmisión direccional. Desde el punto de vista del enlace o repetidor puede distinguirse que existe una transmisión directa o una transmisión de dos saltos o más. Encontraremos casos como en *slots* de tiempo consecutivos múltiple y multiplexación del espectro entre usuarios CR.

Se analiza SCP de la transmisión direccional asistida por repetidor. Se analiza SCP de la multiplexación del espectro. Se analiza la compensación entre el rendimiento alcanzable y SCP. Se concluye que la transmisión direccional obtiene un buen SCP. Cuantos más saltos de repetidor, más complicado es el protocolo involucrado y disminuye el rendimiento de CR. La estrategia de repetidor apropiada debe ser aplicada de acuerdo con los escenarios de aplicación.

Sobre las comunicaciones inalámbricas dúplex con repetidor, diseño y análisis de rendimiento de corte, en [10] los autores resumen entendiendo que la comunicación inalámbrica bidireccional ha recuperado mucha atención recientemente sobre los canales de retransmisión, y las técnicas de codificación de red se han adoptado para mejorar la eficiencia espectral. En la literatura, la mayoría de las obras suponen el conocimiento de la información de estado del canal en el transmisor *Channel State Information at the Transmitter* (CSIT) y se enfocaron principalmente a esquemas de codificación de red de tres pasos *three-step Network Coding* (NetC) y codificación de dos etapas de superposición *two-step Superposition Coding* (SupC). Este trabajo se dirige a los sistemas sin CSIT y explora en detalle las características y limitaciones de SupC y NetC bajo los dos marcos de dos y de tres etapas. Se considera el tráfico bidireccional de misma relación y se proporciona un estudio comparativo de los esquemas. Se evaluó el máximo '*goodput*' y robustez hasta discrepancias conocidas del canal. Los resultados clave incluyen

teóricamente regiones de corte derivadas, el rendimiento y el análisis del papel complementario de NetC y SupC. Las características especiales del marco de tres etapas y un protocolo simple pero eficiente, *Adaptive Relay-assisted and Direct Transmission* (ARDT), transmisión directa adaptativa asistida por repetidor, que aprovecha inteligentemente el enlace directo en ausencia de CSIT. La asignación de potencia óptima en la retransmisión también se deriva del esquema SupC de tres etapas aprovechando la reciprocidad del canal (sin necesidad de CSIT). Una ventaja significativa de ARDT se demuestra en el esquema SupC de dos etapas. Se incorporan resultados numéricos junto con extensos análisis.

Una vez repasados los trabajos existentes sobre las situaciones sin CSIT o información de estado del canal en el transmisor, respecto a las comunicaciones bidireccionales inalámbricas, transmisiones en 4 saltos de tiempo así como en 3 saltos, las redes codificadas NetC sobre campo de Galois GF(2), referenciando también sobre decodificación y retransmisión DF en 3 saltos, amplificación y retransmisión en 2 saltos, comparativa de ventajas entre NetC y SupC, comparación entre NetC 3 saltos y SupC 2 saltos y que el desvanecimiento del canal afecta a la relación de errores de los paquetes.

Repasando las referencias en situaciones con CSIT pueden ser en enlaces directos o repetidos, esquemas basados en NetC de 3 saltos.

Se describe un modelo del sistema con un marco de 3 pasos y otro de 2 pasos, asumiendo información de estado del canal en el receptor CSIR pero sin CSIT, canal cuasi-estático, transmisión libre de errores, sin exceder capacidad de Shannon, misma transmisión en todos los nodos. Precodificación de los mensajes repetidos. Para una mejor eficiencia espectral el enlace directo solo puede usarse en 3 saltos, resultando difícil la comparación con la transmisión en 2 saltos. Los esquemas de codificación de red se presentan de dos tipos en esquemas de dos saltos y en esquemas de tres saltos. Los esquemas de dos saltos son dos: NETC sobre *Direct Forward* (DF) y SupC sobre *Amplify-and-Forward* (AF). Los esquemas de tres saltos son tres: NetC sobre GF(2), SupC con asignación de potencia óptima *Optimal Power Allocation* (OPA) con mensaje decodificado en el repetidor (SupC-I), y SupC con asignación de potencia óptima OPA basado en AF sin decodificar mensaje (SupC-II). Híbridos los dos últimos.

El resultado es que las regiones de corte son caracterizadas teóricamente y hace una comparativa del rendimiento de SupC y NetC bajo los diferentes marcos y modos híbridos. Evalúa el 'goodput' o cantidad de información útil entregada. Evalúa una topología con dos posiciones, la posición 1 con el repetidor posicionado en el punto medio de la distancia entre dos nodos y la posición 2 con el repetidor posicionado en un punto retirado y a igual distancia de los nodos, y para todos los canales con efecto 'fading Rayleigh'. Se obtiene que el modelo híbrido propuesto tiene el máximo 'goodput' y robustez. El protocolo ARDT proporciona un enorme rendimiento impulsado por la explotación eficiente del enlace directo. Combinando las dos técnicas se obtiene un esquema superior a cualquier otro. Respecto al máximo alcanzable de 'goodput' y los efectos de la relación señal ruido SNR, destaca que para niveles de 20dB de SNR el máximo 'goodput' lo consigue NetC pero para 30dB y superiores lo consigue SupC, por lo para explotar estos dos esquemas se propone el modelo híbrido. Algo semejante ocurre en marcos de tres saltos. Para el marco ARDT en enlace directo incrementa un 20% el 'goodput' máximo y para repetidor en la posición 2 con 30dB de SNR ahorra sobre 10dB de potencia de transmisión. Además el protocolo ARDT junto con el modelo híbrido de NetC y SupC tiene superior rendimiento en todos los casos.

Sobre los sistemas de radio cognitiva en forma de cooperación, asignación de potencia y elección de repetidor rápidamente, en [11] los autores resumen entendiendo que en este trabajo, se investiga la selección de repetidor y la asignación de potencia para maximizar el rendimiento del sistema limitando las interferencias a los usuarios registrados (primarios) en sistemas de radio cognitiva. Como estos dos problemas se acoplan entre sí, primero desarrollamos un enfoque óptimo basado en el método dual y a continuación, propone un enfoque óptimo para reducir la complejidad, mientras mantiene un rendimiento razonable. A partir de los resultados de la simulación, los enfoques propuestos puede aumentar el rendimiento del sistema en más de un 50%.

Describe un escenario establecido por una estructura de una red CR cooperativa, formado por tres nodos, cada nodo se conecta con un par de nodos, con canales ortogonales, usando el protocolo de repetidor amplifica y retransmite AF, y la selección de repetidor basado en información de estado del canal CSI, se asigna

una potencia en el nodo CR origen para evitar interferencias y por razones de capacidad de batería. En el escenario también existen otros usuarios CR y usuarios receptores primarios que no hay que interferir. La ganancia para el canal es conocida y constante en los nodos fuentes y la señal recibida puede estar alterada por el ruido gaussiano blanco aditivo AWGN.

Con esto desarrollan un algoritmo con un enfoque óptimo y otro con enfoque sub-óptimo de baja complejidad para selección del repetidor.

Los algoritmos se comparan con los enfoques de selección de repetidor aleatorio con asignación de potencia óptima OPA y con asignación de potencia semejante *Equal Power Allocation* (EPA). Se realiza la simulación con límites de interferencia de 1mW, canales de banda ancha, coeficientes de la distribución del 'Fading Rayleigh' en el canal son independientes, los usuarios CR están uniformemente distribuidos entre fuentes y destinos, que el exponente de las pérdidas de trayecto de propagación es 4 y que la pérdida media por sombras es de 6 dB. El límite de potencia de transmisión para cada usuario repetidor es de 0.5 W y el número de candidatos repetidores es de 20. El esquema óptimo logra un 50% más de rendimiento que el esquema de selección de repetidor aleatorio con OPA. El esquema sub-óptimo logra un 15% menos rendimiento que el esquema óptimo pero con muchísima menos complejidad. OPA logra más rendimiento sobre EPA especialmente en potencias bajas. Para potencia total de 1W y el número de repetidores candidatos es de 20, el rendimiento 'throughput' se incrementa con la potencia; y comparando para potencias totales de 4W, 2W, 1W y 0.5W vemos que el enfoque sub-óptimo se comporta mejor respecto al enfoque óptimo cuando el número de usuarios candidatos es menor.

Sobre medidas y análisis de canales de repetidor en entornos interiores, en [12] los autores resumen entendiendo que en esta contribución, el escenario de medición de canal de retransmisión está diseñado para entornos interiores basados en la tecnología de medición de *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) virtual, y tres tipos de enlaces de retransmisión que se miden por separado en la plataforma de medición de canal en tiempo real en 2.5GHz. Se analizan las características de desvanecimiento o 'fading' por sombra y correlación del canal de retransmisión. Se indica el porcentaje de error de 'fading' por sombra entre cada salto y otras cinco distribuciones estándar, consideran que el

método de descripción tradicional del *fading* por sombra en el canal de sin retransmisión no es del todo coherente en el canal de retransmisión. Además, obtienen la matriz de los coeficientes de correlación de diferentes enlaces de retransmisión y dos saltos del mismo enlace de retransmisión. A través del análisis de la matriz de los coeficientes de correlación, encuentran que la correlación entre los canales de retransmisión es más fuerte y más regular en comparación con el canal de sin retransmisión. Los resultados del análisis de los datos de las medidas verifican que el método virtual es razonable. Mientras tanto, los resultados de investigación de características de la retransmisión presentan una base importante para el estudio del modelado del canal de transmisión y el ‘*layout*’ espacial.

Se analiza las medidas en entornos internos con tecnología virtual MIMO, con una plataforma en 2.5 GHz y analizar las características de *fading* por sombra y correlaciones de canal. Para ello se plantea la plataforma de medidas formada por la parte transmisora, parte receptoras, parte de antenas y el sistema de control. El esquemas de medidas se establece como una estructura de canales de repetidor virtuales, a una distancia de λ medios o media longitud de onda, para la frecuencia de 2.5 GHz, 6 cm aproximadamente. Con esto se puede construir la matriz de canal H_{ij} entre la estación origen y destino. Formula un escenario de medidas formado por varias habitaciones y un pasillo con puertas para el acceso a las habitaciones. Se distribuyen las estaciones origen y destino para que no se vean directamente y puedan usar para comunicarse dos repetidores que no se ven entre sí, pero que cada uno ve a ambas estaciones. En definitiva es como tener cuatro enlaces posibles en el campo de visión *Line Of Sight* (LOS) y un enlace que no está en el campo de visión *NotLine Of Sight* (NLOS).

Analizan la caracterización paramétrica del canal del repetidor tanto a nivel de ‘*shadow fading*’ como la correlación del repetidor. Para el ‘*shadow fading*’ obtienen la señal de banda base equivalente $h(t)$ independiente de la función de densidad de probabilidad con la distribución estándar $f(r)$, se analizan junto con cinco modelos clásicos de *fading*, *fading Ricean*, *fading Nakagami*, *fading Rayleigh*, *fading Weibull*, *fading Lognormal*. Para obtener la respuesta impulsiva y las curvas estadísticas de la *Probability Distribution Function* (PDF) y *Cumulative Distribution Function* (CDF) sobre las señales medibles y deducir el porcentaje de error de ambas funciones de distribución. Para

la correlación se considera un sistema de transmisión AF, obtiene la matriz de transferencia del canal entre estación origen y destino, y posteriormente la matriz de coeficientes de correlación entre cada uno de los enlaces.

Respecto a las medidas, cuando caracterizan el ‘*shadow fading*’, en canal NLOS se aproxima al *fading Rayleigh* y el canal con LOS se aproxima más a *fading Ricean*, en los resultados de las medidas no es así, analizando las funciones PDF y CDF, encontrar que el enlace de dos saltos a través del repetidor 1 se acerca a la distribución de Weibull y el enlace de dos saltos a través del repetidor 2 se acerca más a la distribución de Ricean. El enlace NLOS entre estación origen y destino *Source Station- Destination Station* (SS-DS) se acerca más a la distribución de Ricean en vez de a la distribución de Rayleigh. La diferencia entre los enlaces de dos saltos o de los repetidores, es que están afectados por la dispersión y reflexión en las trayectorias, ya que para el caso del repetidor 1 es más directa.

Respecto al análisis de la correlación del canal del repetidor, tenemos dos caminos con 2 enlaces cada uno que son dos espacios de matrices H_1 y H_2 , y tenemos cuatro enlaces que son cuatro matrices complejas (h_1, h_2, h_3, h_4). Cada enlace con 4 canales adyacentes y la matriz con 16 coeficientes de correlación. Su representación destaca por una diagonal, lo que indica que estos coeficientes son de similares características. La correlación para el enlace sin repetidor, nos deja una representación donde no se diferencia tanto la diagonal del resto, luego indica que la correlación es mucho más pequeña.

Sobre comunicaciones inalámbricas limpias o ecológicas, en [13] los autores resumen entendiendo que las comunicaciones inalámbricas verdes han recibido considerable atención recientemente con la esperanza de encontrar nuevas soluciones para mejorar la eficiencia energética de la ubicuidad de las aplicaciones inalámbricas. En este trabajo, se argumenta y se muestra que la transmisión de la señal ‘*Time-Reversal*’ (TR) es un paradigma ideal para las comunicaciones inalámbricas verdes debido a su naturaleza inherente para aprovechar plenamente la energía que nos rodea en el ambiente, aprovechando la propagación de múltiples rutas para recoger toda la energía de la señal, que de otra manera se habría perdido, en la mayoría de los paradigmas de comunicación actuales. Una tecnología inalámbrica verde debe garantizar un bajo consumo de energía y baja

contaminación de radio para los demás usuarios. En este trabajo, se muestra a través del análisis teórico, simulaciones numéricas y medidas experimentales, que la comunicación inalámbrica TR, en comparación con la transmisión directa convencional y utilizando un receptor de barrido (*Rake*), pone de manifiesto la reducción de la potencia de transmisión significativamente, logra mejorar los niveles de interferencias, y expone gran ganancia de diversidad de trayectorias múltiples. Como tal, es un paradigma ideal para el desarrollo de los sistemas inalámbricos verdes. Los análisis teóricos y simulaciones numéricas muestran un orden de magnitud de la mejora en términos de reducción de potencia de transmisión y reducción de las interferencias. Las medidas experimentales en entornos interiores típicos también demuestran que la potencia de transmisión con la transmisión basada en TR puede ser del orden de un 20% menor que los sin TR, y el promedio de las interferencias de radio (por lo tanto la contaminación de radio) incluso en un área cercana pueden ser de hasta 6 dB menos. Una fuerte correlación en el tiempo se encuentra para ser mantenido en el canal de trayectorias múltiples, incluso cuando el ambiente es variable, indica que una alta eficiencia de ancho de banda se puede lograr en las comunicaciones de radio TR.

Sobre la asignación de canal y potencia para un rendimiento eficiente de la energía en redes de radio cognitivas asistidas por repetidor y basadas en el coste de la energía, en [14] los autores resumen entendiendo que en un escenario de retransmisión de cooperación con varias bandas del espectro, modelando los nodos de una red de vendedores de energía, una potencia conjunto y un esquema de asignación de canales basados en los precios de la energía que es propuesta para la retransmisión paralela para alargar la vida útil de la red de cooperación teniendo en cuenta la variante de transmisión de potencia y disponibilidad de espectro. Las soluciones de asignación de potencia óptima entre el nodo fuente y el nodo de retransmisión se obtienen mediante un algoritmo dual basado en programación óptima de potencia, y el rendimiento de extremo a extremo de la transmisión en paralelo que se cumple con los criterios de costes mínimos del sistema *Minimum System Cost* (MSC). La superioridad del sistema de MSC sobre otros esquemas se ha verificado por los resultados cuantitativos.

Partiendo de la introducción de las redes de radio cognitivas, de los esquemas asignación de canal y selección de repetidor, criterios de consumo mínimo de energía *Minimum Energy*

Cost (MEC), propone un esquema de asignación de canal y potencia basado en el precio de la energía para conseguir el máximo tiempo de vida posible de la red y compara el rendimiento del esquema con otros esquemas mediante simulación.

Se asume un escenario dado por usuarios primarios que pueden ser estaciones base y radios cognitivas (CR origen, CR destino y CR repetidora). Consideran unas características del canal (*fading*, pérdidas y ruido) y restricciones de potencia. Plantea el esquema de coste mínimo del sistema con una función del coste total en base a una solución de asignación de potencia óptima y dada por un algoritmo de programación de potencia óptima *Optimal Power Schedule* (OPS). Simula el tiempo de vida de la red cooperativa para dos casos diferentes. Un caso de porción fija donde cada transmisión tiene un tráfico idéntico y un caso de porción variable donde cada transmisión puede variar la relación de tráfico. Estudian sobre la transmisión directa, dual, el esquema MEC y el esquema MSC.

Los resultados de la simulación que se muestran del tiempo de vida de la red respecto a varias transmisiones de datos muestran que el esquema MSC obtiene mejores datos.

Respecto a las redes de radio cognitivas asistidas con repetidor y asignación de potencia eficiente, en [15] los autores resumen entendiendo que se considera un modelo de radio cognitiva donde los usuarios secundarios *Secondary Users* (SUs) aplican retransmisión cooperativa para cumplir con la demanda de comunicación. Especialmente, con una restricción, que la interferencia producida en los usuarios primarios *Primary Users* (PUs) se mantenga en un umbral tolerable, investigan el problema de maximización del rendimiento del sistema durante la retransmisión de repetición cognitiva. Con el fin de hacer que el problema formulado sea más fácil para resolver, las expansiones Maclaurin se emplean como sustituciones. Por otra parte, basado en la teoría de optimización convexa, un algoritmo de asignación de potencia iterativa entre las alimentaciones del nodo fuente secundario y el nodo de repetidor, se desarrolla para obtener la solución óptima. Ejemplos numéricos son proporcionados para ilustrar el comportamiento de convergencia rápida del algoritmo propuesto y también se presenta la superioridad de la aplicación de retransmisión cooperativa en las redes de radio cognitiva.

Plantean un modelo de sistema dado por un escenario síncrono, fijado por una señal de GPS para que todos los nodos tengan conocimiento del principio y fin del 'slot' de tiempo. La información de estado del canal es perfecta. El usuario secundario transmisor S_{IX} tiene el *Channel State Information* (CSI) de todos los usuarios para determinar la potencia de transmisión, luego se obtiene las medidas de nivel del espectro. Se modela el escenario obteniendo la matriz de coeficientes del canal equivalente, expresa el rendimiento *throughput*, restringe la potencia interferente, pero como las expresiones cuadráticas y la complejidad representan un problema, pero bajo algunas condiciones se puede obtener una solución óptima mediante un método convexo y un algoritmo iterativo.

Mediante la simulación se puede obtener la convergencia del rendimiento de la capacidad del enlace hacia un valor de reiteraciones para diferentes umbrales de interferencias, y que a partir de un valor entre 10 y 20 iteraciones el rendimiento converge a valores fijos. Lo mismo ocurre con el coeficiente de Lagrangian, obtenido en el algoritmo iterativo. Además comparando varios protocolos se observa que el protocolo cooperativo NAF-propuesto tiene mejor rendimiento *throughput* para diferentes umbrales de potencia. Además comparan la potencia de interferencia a la que converge finalmente respecto al número de iteraciones que se obtiene en el algoritmo propuesto y en el algoritmo Maxmin, es igual y se obtiene en menos iteraciones y siempre menor o igual que el umbral. Luego el algoritmo obtiene la solución óptima.

II. Medida de la calidad de las comunicaciones

Mediante el estudio desarrollado se pretende investigar en un método que permita mejorar el rendimiento del uso del espectro en RC mediante la medición de la calidad de la comunicación que se desarrolla en los apartados siguientes. En la bibliografía hay mucho interés por encontrar un método o sistema de medición de la calidad de las comunicaciones que nos permitan poder valorar de forma equitativa y cualitativa las nuevas aportaciones que los diferentes investigadores desde el punto de vista de protocolos de enrutamiento o sistemas de ahorro de energía para permitir comunicaciones sin interferencias a otros usuarios autorizados, de largo alcance y durabilidad.

Las redes inalámbricas utilizan transmisiones digitales y por tanto como cualquier emisión digital podremos medir tanto la calidad de la señal portadora o de radio frecuencia, como la calidad de la señal moduladora o datos, ver Figura 2. Para medir el nivel de señal recibida entre otro tipo de unidades es comúnmente utilizable expresar el valor en microvoltios y escala logarítmica (dBuV), y la relación de la portadora respecto al nivel de ruido (C/N) expresada en decibelios (dB). Respecto a los datos se puede medir su calidad mediante parámetros como la relación de error de modulación MER expresado en decibelios.

Como ejemplo se puede apreciar claramente para señales de televisión digital, que aunque presentan otras características, muestran claramente mediante la instrumentación correspondiente los parámetros de calidad que hemos expuesto anteriormente. En la Figura 2, se pueden observar los parámetros que obtenemos en un medidor de campo para un canal de televisión de la cual podemos ver si recibimos un nivel de señal de radiofrecuencia de mayor o menor calidad en base a los parámetros de nivel la señal y de la relación señal ruido. El nivel de calidad de la señal moduladora lo determinamos por los parámetros de pantalla como relaciones de error.



Figura 2. Valores de calidad de una señal de TDT

En la Figura 3 podemos observar el diagrama de constelación de los datos obtenidos para el tipo de modulación de la señal que estamos recibiendo, (64QAM) para el estándar de televisión digital terrestre, apreciando que incluso con buenos niveles de calidad de la señal demodulada, que existen pequeños errores en los puntos de la constelación.



Figura 3. Diagrama de constelación para una señal con poco ruido

Y cuando la tasa de error aumenta y el ruido es más alto, se refleja claramente en el diagrama de la constelación, (ver la Figura 4).

El EVM (*Error Vector Magnitude*) es una medida de la precisión, o de calidad de una señal digital, con que una radio está transmitiendo datos dentro de la constelación. Depende del ruido, distorsiones, interferencias, etc. Se expresa en decibelios o en tanto por ciento. Se utiliza en cualquier tipo de transmisión digital que se pueda representar mediante un diagrama de constelación.



Figura 4. Diagrama de constelación para una señal con más ruido

El diagrama de la constelaciones la representación de una señal digital tal como modulación *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) o *Frequency Shift Keying* (FSK). Muestra la señal como un diagrama de dispersión bidimensional en el plano complejo y en instantes de muestreo de símbolos. Es decir, representa los símbolos posibles que pueden ser seleccionadas en un esquema de modulación como puntos en el plano complejo. Los diagramas de constelación pueden ser usados

para reconocer el tipo de interferencia o la distorsión en una señal.

Un símbolo de transmisión se representa como un número complejo y la modulación de una señal como coseno y seno con las partes real e imaginaria (respectivamente), y el símbolo puede ser enviado con dos portadoras en la misma frecuencia. Se hace referencia a menudo como portadoras en cuadratura y se demodulan independientemente estas dos portadoras. Este es el principio básico para la modulación en cuadratura. Para la modulación de fase, la fase del símbolo de modulación es la fase de la portadora final. Como los símbolos se representan como números complejos, pueden ser visualizadas como puntos en el plano complejo. Los ejes real e imaginario se llaman eje I (*In fase*) y eje Q (*Quadrature*). Cuando representamos varios símbolos en un diagrama de dispersión se produce el diagrama de constelación. Los puntos en un diagrama de constelación se llaman puntos de la constelación. Y el conjunto de símbolos de modulación forman el alfabeto de modulación.

Supongamos que estamos transmitiendo a través de una constelación 16-QAM y representamos los símbolos en el plano IQ. Pero la transmisión en el mundo real (no es ideal), y por tanto no se transmite en el punto ideal del plano IQ. Partimos de 16 símbolos diferentes, con 4 bits por símbolo. Si estamos transmitiendo el símbolo [0000] de forma ideal tendrá siempre una posición. Pero no siempre vamos a transmitir exactamente el símbolo que queremos enviar. La diferencia entre el vector de la señal deseada (ideal) y el vector de señal real es el vector de error, y la magnitud del vector de error. Si tenemos ruido en el sistema se perturba la señal. EVM no es ruido. Ruido surge de alguna fuente externa y se puede reducir a través de promediado u otras técnicas. EVM se mide en dB, como en: $EVM = -21$ dB. Esto significa que el vector de error tiene una magnitud que es 21 dB menor que el vector de la señal promedio (la energía media por símbolo que se transmite). Luego podemos escribir EVM matemáticamente como:

$$EVM(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{error}}{P_{referencia}} \right) \quad (1)$$

$$EVM(\%) = \sqrt{\frac{P_{error}}{P_{referencia}}} * 100 \% \quad (2)$$

Además la antena puede afectar significativamente al EVM. Ya que la impedancia de la antena se presenta como una carga. Cuando la antena tiene una mala adaptación de impedancia, tendrá una alta

Voltaje Standing Wave Radio (VSWR), provocando una gran cantidad de energía que será reflejada de tal manera que la calidad de la señal se degrada, provocando un EVM más alto de lo normal. Por lo tanto, cuando una antena varía la adaptación de impedancia, el equipo de radio puede detectar rápidamente este fallo.

La magnitud del vector de error es una medida utilizada para cuantificar el rendimiento de un transmisor de radio digital o receptor. Una señal enviada por un transmisor ideal o recibida por un receptor tendría todos los puntos de comunicaciones digitales. El EVM transmisor se puede medir por equipos especializados, que demodula la señal recibida de una manera similar a cómo un verdadero demodulador de radio lo hace. Una de las etapas en un proceso de demodulación es la manipulación por desplazamiento de fase típica produce una corriente de puntos que se pueden utilizar como una estimación razonablemente fiable de la señal transmitida ideal en el cálculo de EVM. La constelación en los valores ideales, las imperfecciones (por ejemplo, fugas de portadora, baja relación de rechazo de imagen, ruido de fase, etc.) causan que los puntos de la constelación se desvíen de las localizaciones ideales. EVM es una medida para saber si los puntos están muy lejos de los puntos ideales.

El ruido, la distorsión, las señales espúreas, y la fase de ruido pueden degradar el EVM, luego EVM proporciona una medida global de la calidad para su usar en comunicaciones digitales. El EVM del transmisor se puede medir usando equipos especializados, que demodula la señal recibida de una manera similar a como lo hace un demodulador. Una de las etapas en un típico proceso de demodulación produce un *stream* de puntos de I-Q que se pueden utilizar como una estimación razonablemente fiable de la señal transmitida ideal en el cálculo de EVM.

Entre los métodos propuestos descritos algunos en el apartado anterior se va a tratar la medida del vector de error.

El parámetro EVM indica el efecto que produce el ruido en el error de símbolos, tanto si tenemos un canal con ruido como si tenemos un nivel bajo de señal, es decir, como si la señal que recibimos se aproximara al nivel de ruido. En ambos casos la magnitud del vector de error será mayor que en los casos donde el ruido sea prácticamente nulo. Luego tendremos un vector que une el punto teórico deseado o posición sin ningún ruido y el punto real con ruido. El módulo del vector será un escalar con mayor

valor para casos con mayor ruido y con menor valor para casos con menor ruido. Es deseable un valor lo más próximo a cero, que significaría que no existe ruido.

Sobre el cálculo de EVM en señales moduladas de banda ancha, en [16] los autores resumen entendiendo que se presenta una normalización que facilita el cálculo de la magnitud del vector de error (EVM) a partir de mediciones. Se deriva de la definición de EVM para una norma común en la industria de una ecuación más básica. Comparamos EVM para diversos tipos de modulación para una potencia símbolo media dada en condiciones de distorsión simples.

En este artículo se plantean EVM o magnitud del vector de error, los tipos de *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) y el estándar IEEE 802.11a de 5GHz, la representación común de los símbolos demodulados para los tipos de modulación digital mediante los diagramas de constelación, mostrando la constelación ideal, la constelación normalizada que son los valores RMS de los símbolos medidos y los valores de los símbolos ideales. Las normalizaciones de las representaciones de las medidas en términos de voltaje y de la misma forma para el caso ideal representando con valores entero para cada símbolo de la constelación. Consecuentemente podemos obtener el EVM normalizado. Para el estándar IEEE 802.11a tenemos 52 subportadoras, un número de símbolos por paquete y un número de tramas recibidas. Luego podemos obtener el EVM en RMS. Con la restricción que 4 subportadoras pilotos son moduladas en BPSK y las 48 restantes en cualquier modulación. Así analiza para un escenario sin distorsión, los efectos de provocar distorsión en un canal simple en EVM para diferentes tipos de modulación.

A partir de la señal de un generador de señal vectorial o *Vector Signal Generator* (VSG), genera una señal modulada según el estándar IEEE 802.11a-1999, separa dos muestras y una de ella se introduce a un sintonizador de impedancia que introduce un cambio de fase y distorsión a la señal modulada, recombinando la señal distorsionada y la señal sin distorsionar para mostrar en un analizador de señal vectorial VSA. Analizamos el EVM en el VSA para los distintos tipos de modulación. Y calcula el EVM normalizado mediante un paquete comercial.

El resultado que obtienen en este artículo demuestra que la normalización definida hace posible la comparación directa de EVM para los

diferentes tipos de modulación, para una potencia media de símbolo dado. Mientras en EVM hay cambios, entre las dos configuraciones, pocos cambios se producen entre los diversos tipos de modulación. Los valores de EVM, tanto para los casos de baja y alta distorsión variaron en menos de 0,05 %. En una escala que muestra 0-1 % EVM para casos baja o de 0-2 % EVM para casos de alta EVM, los puntos trazados se asemejan a una línea plana. Partiendo del EVM del 'datasheet' del paquete comercial que es menor de un uno por ciento, el EVM normalizado para el caso sin distorsión está dentro de este rango para los diferentes tipos de modulación. De igual forma, para el caso con distorsión. Así demuestra que la normalización de los símbolos medidos y diagramas de constelación posibilita el cálculo del EVM. Basado en multiplicar las tensiones de fase y de cuadratura para cada símbolo medido o ideal en la constelación por un factor que produce una amplitud media cuadrática del símbolo con un valor de uno.

Consejos que podemos tener en consideración para hacer e interpretar medidas de EVM, en [17] los autores resumen entendiendo que las mediciones de la magnitud del vector de error (EVM) pueden proporcionar una gran cantidad de información sobre el rendimiento de los transmisores y receptores de comunicaciones digitales. Con el uso apropiado, EVM y las mediciones relacionadas pueden determinar exactamente el tipo de degradaciones presentes en una señal y puede incluso ayudar a identificar sus fuentes. En primer lugar una medida de la calidad de la señal, EVM proporciona tanto una figura sencilla cuantitativa para una señal modulada digitalmente, y una metodología de gran alcance para descubrir y atacar las causas subyacentes de degradaciones de la señal y la distorsión. Las medidas de EVM están creciendo rápidamente en aceptación, siendo ya la medición de la calidad de modulación requerida en estándares tecnológicos importantes como 3GPP, WCDMA y IEEE 802.11a/b/g WLAN, y están a punto de aparecer en varias normas futuras. Esta nota de aplicación ofrece consejos útiles que ayudarán a hacer y entender con precisión las mediciones de EVM.

Consejo 1: EVM y las diversas pantallas de medición relacionados son sensibles a cualquier defecto de señal que afecta a la magnitud y la fase de una señal para cualquier formato demodulación digital.

Consejo 2: Las mediciones de EVM para cuantificar los errores en la demodulación digitales pueden proporcionar visión de gran

alcance en el rendimiento de un receptor de radio digital.

Consejo 3: Mejorar el valor de EVM como indicador de la calidad de la modulación mediante compensación en el instrumento de medición.

Consejo 4: Confirmar o descartar la presencia de ruido de fase, modulación de fase incidental y problemas de AM residuales, mediante la resolución de EVM en su magnitud y componentes de error de fase y comparar sus tamaños relativos rápidamente.

Consejo 5: La mejor manera de verificarla mayoría de impedimentos de I/Q es ampliar la escala de la constelación y ver las métricas de EVM.

Consejo 6: Pequeños errores en la velocidad de símbolos se pueden caracterizar por una forma de "V" visto en la magnitud del vector de error en función del tiempo de visualización.

Consejo 7: El principal indicador de un coeficiente alfa erróneo y ventanas incorrectas es un EVM grande entre los símbolos y un EVM pequeño en los puntos de símbolo en la pantalla de la magnitud del vector de error en función del tiempo.

Consejo 8: La mejor manera de determinar si un estímulo en el canal está presente es mirando la pantalla del espectro de vector de error.

De acuerdo con las características del parámetro EVM que hemos analizado, así como la situación actual de las redes de inalámbricas de sensores y de la radio cognitiva, se observa claramente que podemos aplicar dicho parámetro para detectar y evaluar la magnitud del error. El Error de los datos nos viene producido por niveles de señal próximos al ruido, por portadoras interferentes o por usuarios que están usando el canal. Es decir, podemos tener un nivel de señal de portadora muy bueno, pero tener una tasa de error de datos muy alto. Así con el parámetro EVM vamos a medir la cantidad de error de datos para tener un valor por el cual decidir o evaluar si un canal es mejor que otro.

Para esto vamos a plantear un escenario básico formado por dos nodos que se comunican mediante dos posibles caminos. Es un escenario básico ya que el resto estarán formados por más de un escenario de este tipo. Para determinar qué camino es el mejor para comunicarnos

vamos a utilizar el parámetro EVM. Con este escenario vamos a analizar de forma práctica los resultados que obtendremos para diferentes niveles de ruido. Recordamos que colisiones de transmisión en el canal y uso de un canal que está siendo utilizado por un usuario legitimado o no, lo debemos considerar como ruido. Por tanto es fundamental analizar la situación en el escenario básico.

Con la ayuda de un generador vectorial de señal tomaremos una señal de nivel fijo y asumimos que el canal está libre de ruidos, atenuación despreciable, sin fenómenos de fading y misma variación de tiempo para los diferentes caminos o canales. Utilizaremos un portadora de la señal de 2.430 MHz y nivel de -60dBm con una modulación de 16QAM y relación de símbolos de 5.5 Msymb/sg. Con un generador de ruido mezclamos las señales y analizaremos los parámetros resultantes. Así mismo, analizaremos los efectos que pueden producir otras señales que no son de banda ancha ni están centradas en nuestra señal o portadora. Concretamente una señal fuera de canal, a 5 MHz de nuestra portadora pero con un nivel muy superior al nuestro.

Una vez realizadas estas pruebas pretendemos conseguir unas conclusiones para poder aplicar a un algoritmo y utilizar el parámetro EVM para determinar el mejor canal que se puede asignar para una comunicación en redes de sensores inalámbricas, obteniendo un método general y sencillo que no dependa de implementaciones y funcionalidades de fabricantes concretos que aplican en su instrumentación.

III. Materiales y métodos

En este trabajo se realiza una fase experimental, donde se prueban y verifican las características de los caminos de la señal en un escenario modelo.

Para la realización de las pruebas de laboratorio es necesario disponer de instrumentación especial de señales y telecomunicaciones, en el Grupo de Investigación Electrónica Comunicaciones y Telemedicina junto con el Laboratorio de Electrónica Avanzada y Señales, se disponen de los instrumentos necesarios, concretamente:

- I. Generadores Vectoriales de Señales, son instrumentos con la capacidad de generar señales de alta frecuencia moduladas digitalmente y con cualquier tipo de

modulación. La modulación I-Q permite generar cualquier estándar de modulación digital. Se han utilizado los siguientes modelos:

- Generador Vectorial Rohde&Schwarz modelo SMIQ06B, con un margen de frecuencia de 300KHz a 6,4 GHz, permite generar señales con modulación analógica y digital, con todos los estándares (GSM, *Bluetooth*, 4QAM, 16QAM, etc.) y la posibilidad de definir el tipo de modulación digital que se desee. También pueden programarse el resto de parámetros de la señal como la amplitud entre -127 dBm y 16 dBm, la sincronización pulsada, la generación de patrones de datos para modular señales digitales, la entrada de datos externos etc.
- Generador Vectorial Agilent modelo N9310A, con margen de frecuencia de 9 KHz a 3 GHz, permite la generación de señales moduladas analógicamente y digitalmente I-Q.

- II. Analizador Digital de Espectros, estos equipos permiten analizar en tiempo real una señal en el dominio de la frecuencia y además en el dominio de la modulación y de la modulación digital. Pueden recibir una señal modulada digitalmente, demodularla, extraer los datos en tiempo real, y calcular los parámetros de definición y calidad de la señal, como la relación señal a ruido, el EVM o magnitud del vector de error, este importante parámetro permite conocer el error posicional de los símbolos recibidos dentro de la constelación, valores de EVM superiores al 20 % significan que los símbolos se sitúan en áreas adyacentes a la suya y por tanto no se pueden transmitir datos correctamente.

Para este trabajo se ha utilizado el Analizador Vectorial de Espectros Agilent modelo CXA N9000A con un margen de frecuencia de 9 KHz a 3 GHz. Permite trabajar en dominio de la modulación digital en tiempo real con la aplicación empotrada VSA (*Vector Signal Analyzer*). También se puede manejar remotamente como una maquina IP. También este equipo permite observar gráficamente la constelación de los símbolos recibidos en tiempo real a la vez que el espectro o la definición de múltiples pantalla con datos y gráficas a la carta.

III. Generadores de Ruido, este tipo de instrumento permite la generación de ruido ergódico de amplitud y margen de frecuencia definida y plana. Estos instrumentos son más complejos de realización y por tanto más caros, cuanto mayor sea el ancho de banda de ruido, la potencia de ruido y la resolución de nivel de ruido.

Para las pruebas se ha empleado el Generador Noisecom modelo NC6113A, tiene un margen de frecuencia de 1 MHz a 3 GHz. La potencia de ruido es de 15 dBm, el atenuador permite hasta 100 dB de atenuación en pasos de 1 dB. También dispone de un combinador de señales que permite la introducción de una señal externa, a la cual se suma el ruido del

generador, en el nivel deseado y la salida de dicha señal mezclada con el ruido para ser usada. Esta característica es sumamente útil para el trabajo de este proyecto, ya que permite ensayar escenarios donde se contaminan señales por ruido, ya sea por la distancia, por obstáculos o por interferencias en banda ancha.

También son útiles y necesarios instrumentos accesorios como combinadores individuales y atenuadores programables para poder inyectar otras señales interferentes en el camino de comunicaciones y de esta forma recrear características reales de los escenarios abiertos, que son susceptibles de interferencias.

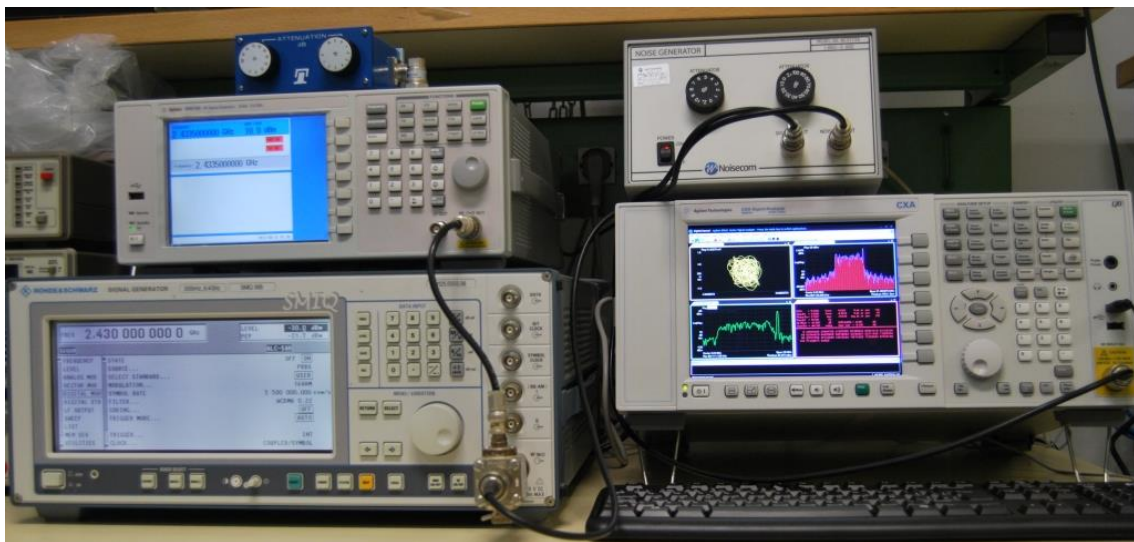


Figura 5. Generadores de señal, analizador vectorial y generador de ruido

En la Figura 5, se muestra una fotografía del puesto de trabajo donde se ha realizado la fase experimental, a la izquierda se sitúan los generadores de señal, unidos mediante un combinador, que permite generar una señal modulada deseada y otra interferente, a la derecha en la parte superior está el generador de ruido que vuelve a combinar el conjunto anterior de señales/interferencia con ruido programado. En la parte inferior derecha está el analizador vectorial de señales, se puede apreciar en un *array* de 2x2 gráficas el espectro señal+ruido+interferencia, la constelación de símbolos recibidos en modulación 16 QAM a 2.43 GHz, el gráfico de error EVM y una tabla con magnitudes numéricas que muestra la relación S/N, la magnitud EVM, y otros datos de interés.

El método experimental, pretende determinar en el laboratorio los datos obtenidos mediante simulación y establecer un estudio comparado que permita verificar la validez de los modelos usados en este trabajo.

Para ello se prepara el conjunto de dos generadores con un combinador que suponen la fuente de señal deseada, que se supone parte del nodo 1 (Figura 2), sobre dicha señal modulada digitalmente que parte del generador 1 (SIMQ6) que porta la información deseada se aplican a través del combinador externo y por medio del otro generador (N9310) una señal interferente de amplitud controlada y por medio del generador de ruido y del combinador interno del mismo se vuelve a combinar dicha señal

deseada con el ruido de amplitud variable del generador de ruido, ello suponen los impedimentos del camino entre el n1 y el nodo n2.

Para determinar las propiedades del escenario, se efectúan una serie de medidas con diversas amplitudes de ruido y con la presencia o no de señales interferentes adyacentes, variando la amplitud del ruido, desde una señal sin ruido hasta que el vector EVM supere el 20% (señal degradada) , posteriormente se repiten las pruebas con la presencia de señal interferente y de esta forma se obtienen relaciones entre la relación S/N del canal directo y la magnitud del vector de error EVM para diversas situaciones, que luego son comparadas con el camino libre de ruido e interferencias a través de un nodo repetidor 'n3'. De esta forma se puede concretar el protocolo de conmutación a través de repetidor y efectuar comparaciones de los escenarios simulados.

Para plantear el escenario posible en una red de sensores inalámbricos partimos especificando los tipos de nodos que nos encontraremos. Lo normal será encontrarnos con tres tipos de nodos. El nodo *gateway* o servidor, los nodos primarios que se conectan con el servidor a través de la estación repetidor, los nodos fuentes que generan el tráfico de datos y que pueden establecer la comunicación con los nodos primarios o a través de uno o varios nodos repetidores. La comunicación entre la estación repetidor y el servidor se realizará en canales diferentes que entre la estación repetidor y el nodo primario que esté en la zona de cobertura. La comunicación entre los nodos primarios y los nodos fuentes se realizarán en otra frecuencia si se encuentran en la zona de cobertura del otro. Caso contrario se comunicarán a través de otro nodo repetidor que se encuentre en la zona de cobertura de ambos y en el mismo canal.

IV. Análisis de las propiedades del canal

La comunicación en el escenario la podemos plantear como comunicación de nivel simple donde cada nodo solo se comunica con el nodo servidor y puede estar dentro de la zona de cobertura o no, y se usa un canal o varios canales. También podemos plantear una comunicación a doble nivel donde los nodos primarios y el nodo servidor se comunican, además hay comunicación entre los nodos primarios y los nodos secundarios, y se usa un canal o varios canales. También podemos

plantear una comunicación de nivel superior donde se comunican el nodo servidor y los nodos primarios, los nodos primarios y los nodos secundarios, y los nodos secundarios entre sí, con uno o varios canales.

Por tanto, el problema con el que contamos es la comunicación con todos los nodos de la forma más rápida posible. Si necesitamos comunicación desde el servidor o nodo central con los nodos de sensores, encontraremos que podemos establecer una comunicación en un salto o en varios saltos. Entendiendo por salto la comunicación a través de otro nodo o sensor. Luego hay que optimizar una topología de protocolo para comunicar un nodo central con un número de nodos donde algunos no se ven entre sí y necesitamos nodos que actúen de repetidor.

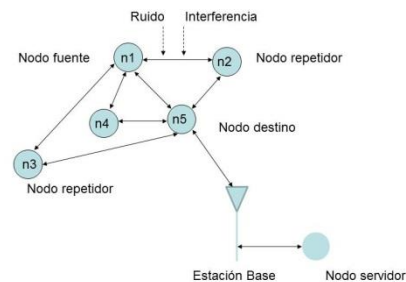


Figura 6. Escenario general

La Figura 6, muestra un diagrama ejemplo de la aplicación funcional de los equipos de laboratorio, representando el escenario general. El escenario básico que contienen la mayoría de los casos y a partir del cual se pueden obtener el resto de situaciones lo expresamos en la Figura 7 como una abreviación del general puesto que incluye los casos mínimos y necesarios para nuestro estudio.

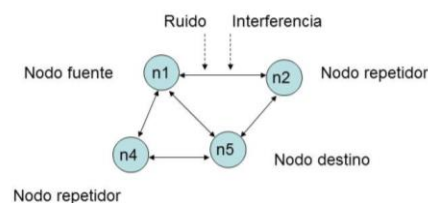


Figura 7. Escenario básico

Una vez planteado el escenario se simula mediante el uso de la instrumentación anteriormente expuesta obteniéndose los siguientes resultados que se muestran en las

figuras, tablas y gráficas que detallamos a continuación y así analizamos el comportamiento de los canales de comunicación para nuestro escenario.

Así, vamos a introducir el parámetro EVM como un elemento más sencillo para medir la relación de señal ruido y monitorizar la calidad de comunicación.

Si analizamos los resultados obtenidos en las pruebas con generadores y analizador observamos lo siguiente:

Si generamos una señal de 2,430 GHz de nivel de radiofrecuencia de -30 dBm modulada

en 16QAM con una señal de 5,5 MSymb/s sin codificar.

Al aplicar una señal de ruido plano de -130 dBm es decir, casi al nivel de ruido, obtenemos la Figura 8 como captura de la pantalla del VSA, donde tenemos 4 subventanas. Tal como habíamos especificado anteriormente en la subventana A tenemos el diagrama de la constelación de la señal demodulada. En la subventana B aparece el espectro en el dominio de la frecuencia. En la ventana C tenemos el espectro de error vectorial de la modulación. En la subventana D tenemos diferentes parámetros de la señal demodulada, así como los datos

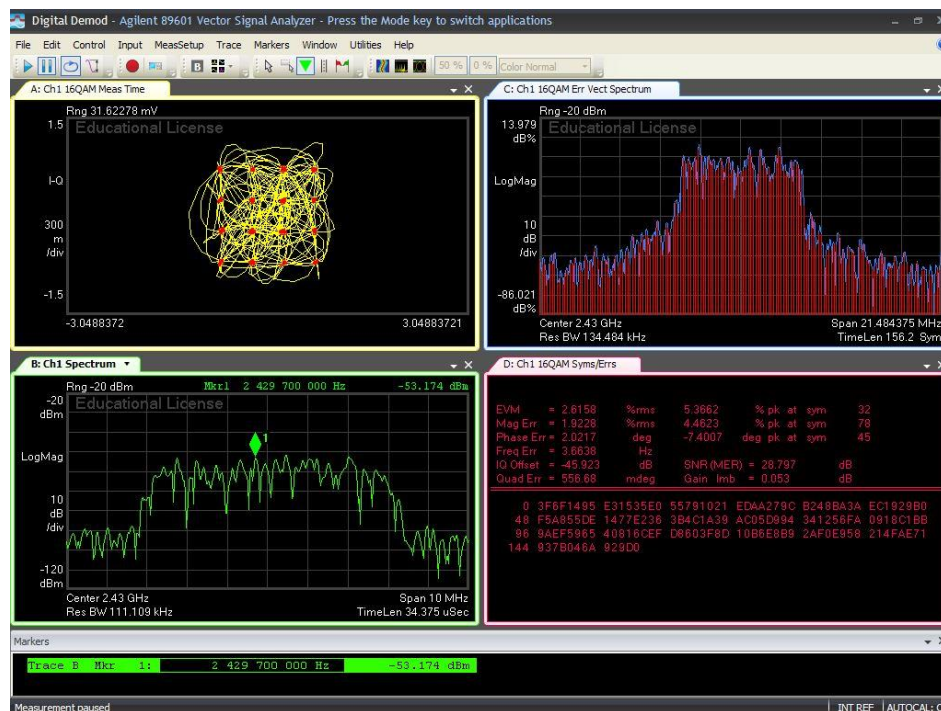


Figura 8. Ruido a -130 dBm, señal de portadora a -60 dBm sin portadora interferente

obtenidos de dicha señal. Parámetros a destacar son el EVM y el SNR. Se puede apreciar que el EVM o magnitud de error es pequeña y el SNR es grande. Debido a que tenemos un nivel de ruido bajo luego y no afecta en gran medida a nuestra señal. Este sería el caso para escenarios donde las colisiones de señales de transmisión las realizan nodos que están muy distantes y el receptor cerca de uno de ellos.

En la Figura 9 tenemos la misma situación anterior pero con una portadora interferente a 5 MHz del centro de nuestra señal, es decir en 2,435 GHz. Como se puede observar en la subventana del espectro. En este caso la magnitud de error aumenta con relación a la situación del caso de la Figura 8 debido a una señal interferente y de mayor nivel. EVM sube de 2.61 % a 3.65 % y el SNR pasa de 28.79 dB a 26.33 dB. Este es el caso para la recepción de

dos nodos como en el caso anterior uno cercano y otro lejano y una señal externa al sistema en frecuencia próxima.

En la Figura 10 tenemos el ruido inyectado del generador a -80 dBm, manteniendo el resto de los parámetros de la señal portadora y moduladora y sin señal interferente. Lo que nos da una menor SNR y una apariencia de que la señal portadora es de menor nivel. El valor de SNR pasa de 28,97 dB en el anterior caso a 21,52 dB en este caso. Es como si estuviésemos emitiendo con menos potencia. El valor del parámetro EVM pasa de 2,61 % en el anterior caso a 6,20 %. Esto indica que tenemos mayor tasa de error. Así se puede apreciar en el diagrama de constelación donde muchos puntos se distancian de la posición ideal y la 'nube' resultante no está tan limpia como

antes. Esta figura refleja el caso cuando recibimos una señal de un nodo de nuestro sistema y hay otro nodo emitiendo una señal y que provoca una colisión. Este nodo que provoca la colisión está en distancia más próximo que en el caso anterior, más lejano que el nodo de la señal portadora, no podemos

recibir ni decodificar su señal por tener menor nivel, la consideramos ruido. También puede ser otro usuario externo que está ocupando el canal. Es por tanto, que debido a que la señal portadora tiene un cierto valor mayor en nivel sobre la señal que considero ruido, puedo utilizar dicha portadora.

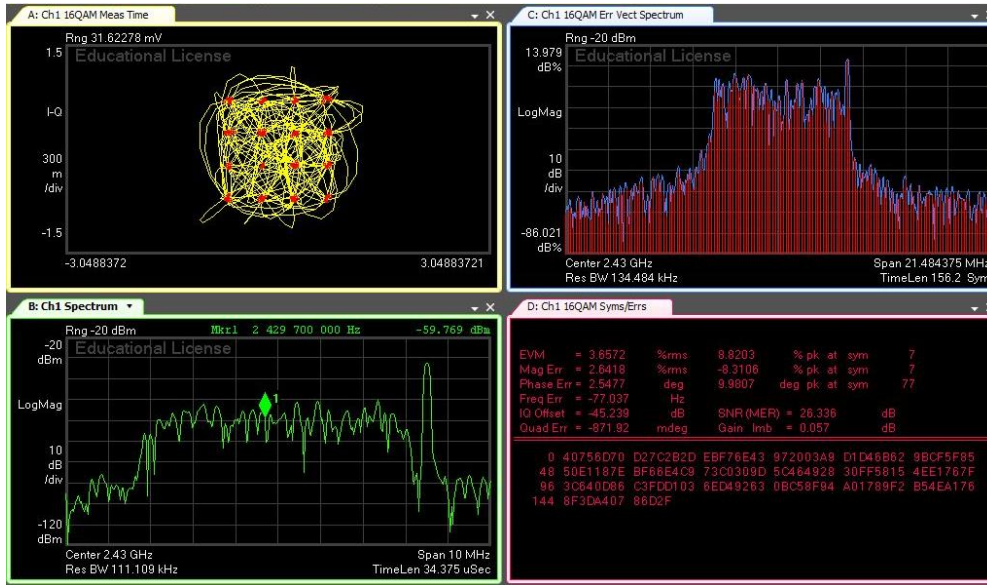


Figura 9. Ruido a -130 dBm, señal de portadora a -60dBm con portadora interferente de -32 dBm

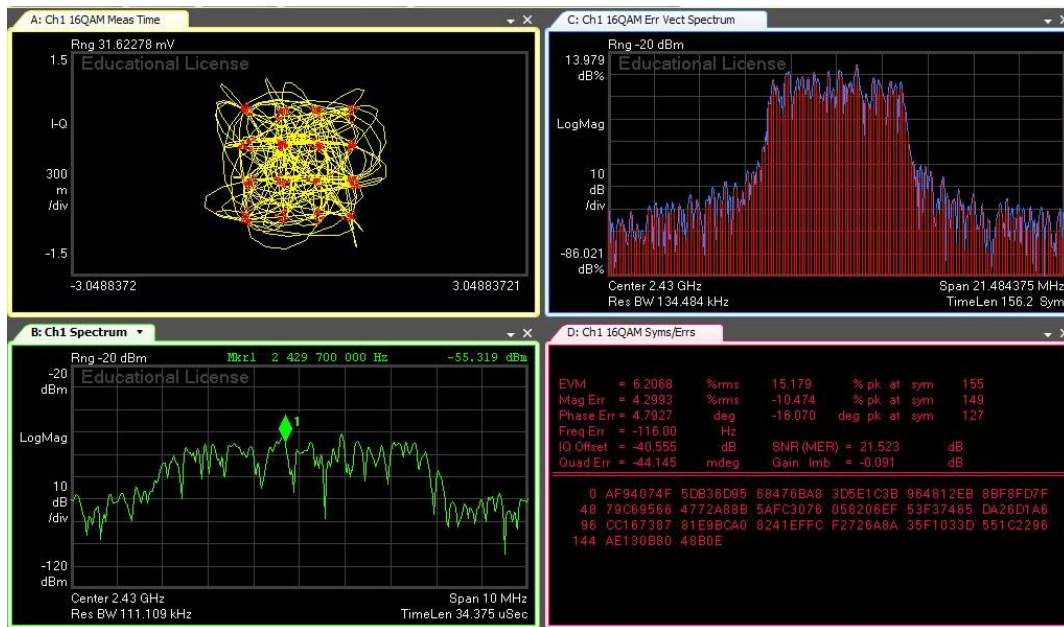


Figura 10. Ruido a -80 dBm, señal de portadora a -60 dBm y sin portadora interferente

En la Figura 11, se representa el caso semejante al anterior donde tenemos el ruido inyectado del generador a -80 dBm, manteniendo el resto de los parámetros de la

señal portadora y moduladora, pero ahora inyectamos una señal interferente de menor ancho de banda y de nivel superior, concretamente de un valor de -32 dBm. Lo que

nos provoca unos efectos semejantes al caso de la Figura 10. El valor de SNR es algo menor que para el caso donde no tenemos interferencia. El valor del EVM es semejante debido al instante de la captura. Es como si estuviésemos emitiendo con un poco de menos potencia. Esta figura refleja el caso cuando recibimos una señal de un nodo de nuestro sistema, hay otro nodo emitiendo una señal que

provoca una colisión y una señal de otro tipo o sistema que interfiere nuestra comunicación. Por tanto, debido a que la señal portadora tiene un cierto valor mayor en nivel sobre la señal que considero ruido y la señal interferente no provoca un excesivo aumento de la tasa de error, puedo utilizar dicha portadora ya que obtengo información o datos y la tasa de error es aún aceptable.

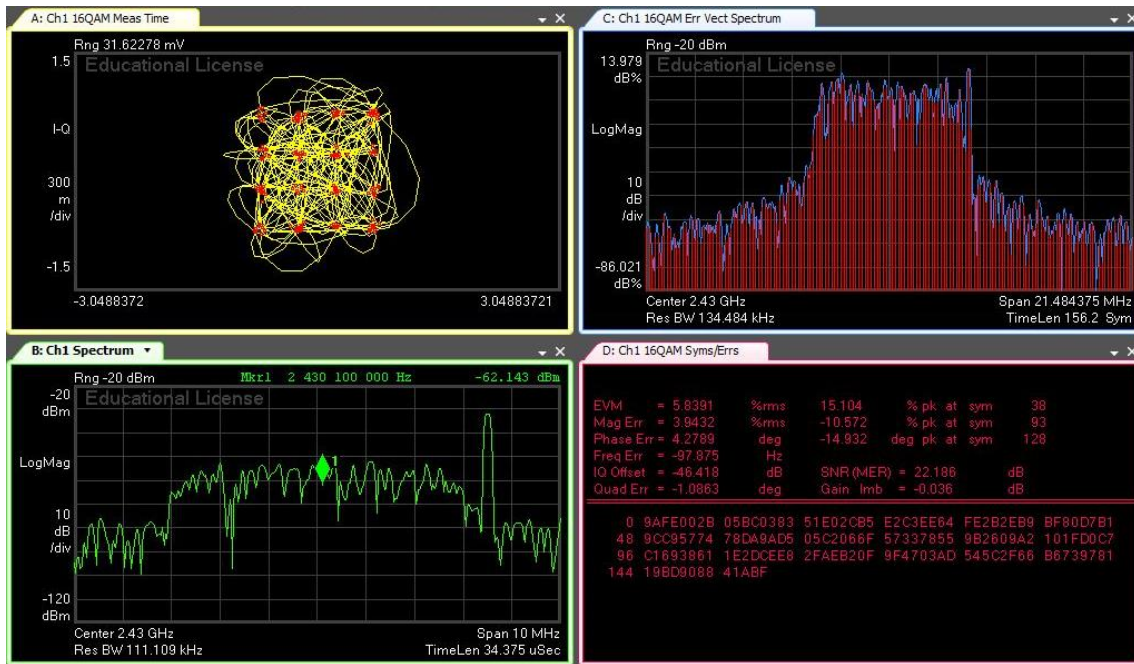


Figura 11. Ruido a -80 dBm, señal de portadora a -60 dBm con portadora interferente de -32 dBm

En la Figura 12 tenemos el caso donde el ruido inyectado del generador es -69 dBm, manteniendo el resto de los parámetros de la señal portadora y moduladora y sin señal interferente. Luego el nivel de ruido se aproxima bastante al nivel de nuestra portadora. Lo que nos da menor valor de SNR y una apariencia de que la señal portadora es de nivel aún menor que para anteriores casos. Ahora el valor que obtengo de SNR ha bajado a 13,63 dB. Es como si estuviésemos emitiendo con menos potencia. El valor del parámetro EVM ha subido a 14,91 %. Esto indica que tenemos mayor tasa de error. Así se puede apreciar en el diagrama de constelación, donde muchos puntos se separan mucho de la posición ideal. En la constelación ya se aprecia mucho ruido, y los puntos se separan unos de otros. Esta figura refleja el caso cuando recibimos una señal de un nodo de nuestro sistema y hay otro nodo

emitiendo una señal de un nivel considerable y que provoca una colisión. También puede ser otro usuario externo que está ocupando el canal a una distancia próxima o con potencia considerable para nuestro sistema. Aún puedo obtener información pero con bastantes errores pero estamos entrando en un nivel crítico.

En la Figura 13 tenemos el caso anterior de la Figura 12 donde el ruido inyectado del generador es -69 dBm, manteniendo el resto de los parámetros de la señal portadora y moduladora y con una señal interferente de -32 dBm. A la situación crítica le añadimos una interferencia que hace que el valor de SNR baja 11,5 dB. El valor del parámetro EVM ha subido a 18,52 %. Esto indica que tenemos mayor tasa de error. Así se puede apreciar en el diagrama de constelación, la constelación no

está claramente definida y los puntos se mezclan

unos con otros.

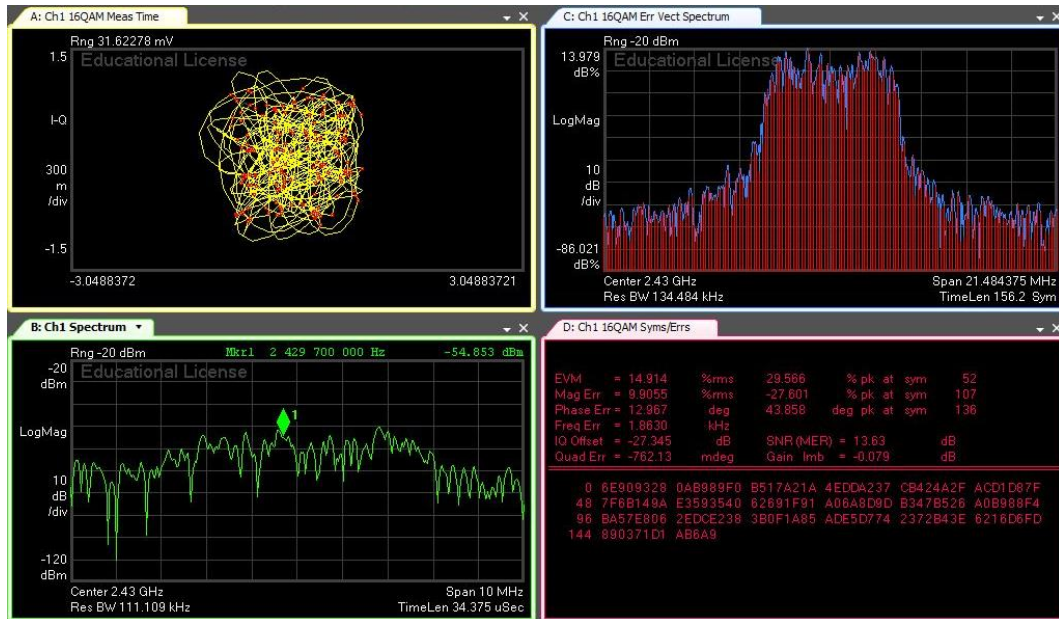


Figura 12. Ruido a -69 dBm, señal de portadora a -60 dBm y sin portadora interferente

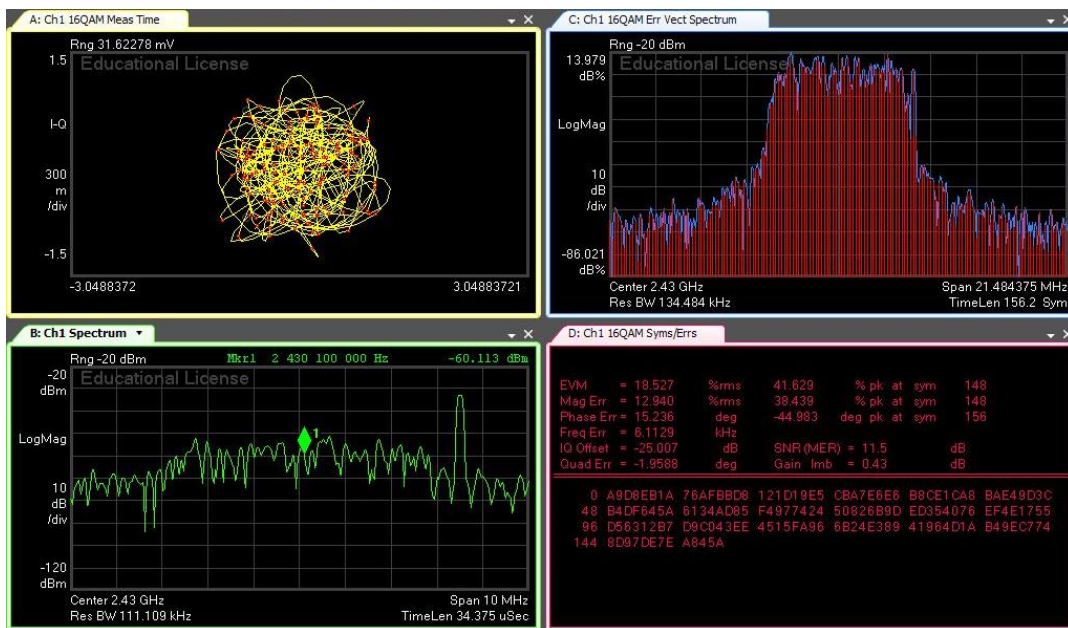


Figura 13. Ruido -69 dBm, señal de portadora a -60 dBm y con portadora interferente de -32 dBm

En la Figura 14 tenemos el caso donde el ruido inyectado del generador es -66 dBm se aproxima bastante al nivel de -60 dBm de nuestra portadora de datos, manteniendo el resto de los parámetros de la señal portadora y moduladora y sin señal interferente. Luego el nivel de ruido es casi el nivel de nuestra

portadora. El valor de SNR baja a 10,17 dB. El valor del parámetro EVM ha subido a 20,08 %. En la subventana A observamos el diagrama de constelación apreciando que cada punto está repartido, se mezclan unos con otros y no se puede diferenciar una constelación clara. Esta figura refleja el caso cuando recibimos dos

señales de dos nodos a semejante distancia en nuestro sistema. No podrá obtenerse información de ninguno, ni incluso de la portadora de datos que suponemos la más cercana.

En la subventana C tenemos el espectro en el dominio de la frecuencia, barrido centrado en 2,43 GHz y un span de 10 MHz, donde se puede

observar que la señal portadora de -60 dBm está encubierta por el nivel de ruido de -66 dBm.

En la subventana D observamos los diferentes parámetros de la señal recibida, junto con los datos que conseguimos decodificar que como hemos expuesto contendrán gran cantidad de errores.

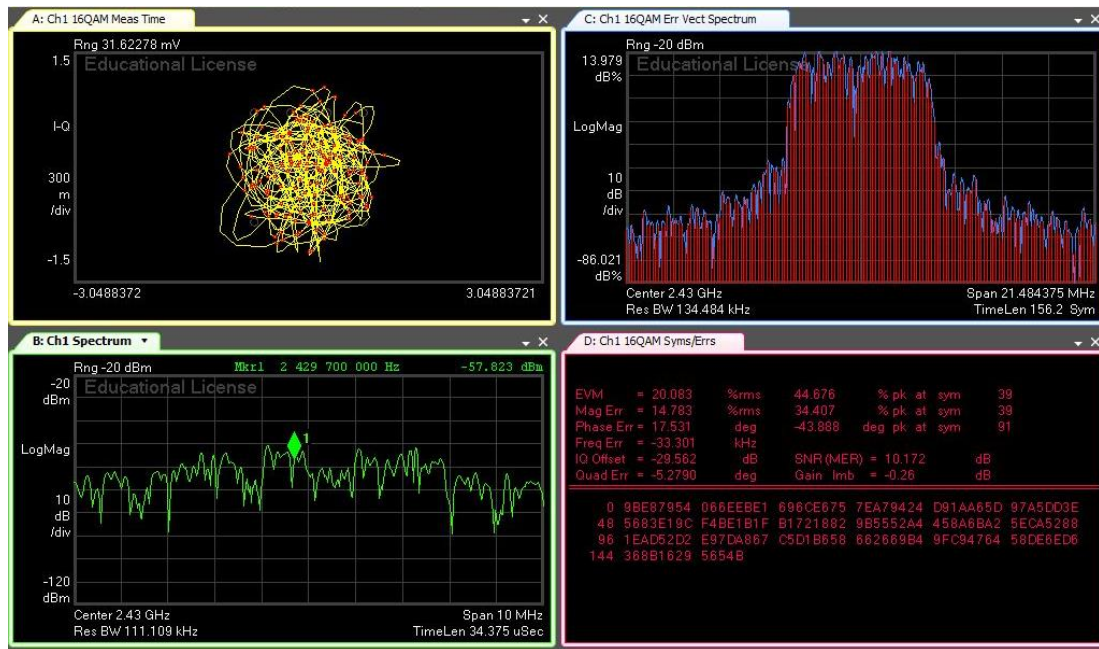


Figura 14. Ruido a -66 dBm, señal de portadora a -60 dBm y sin portadora interferente

En la Figura 15 tenemos el caso anterior donde el ruido inyectado del generador es -66 dBm se aproxima bastante al nivel de -60 dBm de nuestra portadora de datos, manteniendo el resto de los parámetros de la señal portadora y moduladora y con una señal interferente de -32 dBm. Ahora el valor de SNR es 10,26 dB. El valor del parámetro EVM es de 20,66 %. Son valores próximos a los del caso anterior, ya que como anteriormente los valores y la situación es tan desfavorable con tal nivel de la tasa de errores, que la portadora interferente apenas afecta a dicha tasa. Es decir, que la contribución de errores por interferencia cuando hay muchos errores por ruido, no es apreciable. En la subventana A se puede apreciar el diagrama de constelación de la señal recibida, donde cada punto está repartido sin definir una constelación claramente, es decir, se mezclan unos con otros

ya que se alejan de los puntos o localización ideal de la constelación y no es establece la constelación deseada, para obtener los símbolos transmitidos.

La tabla que relaciona estos y más casos con sus valores y resultados de EVM y SNR se muestra a continuación, para la señal portadora de datos que obtenemos mediante el generador de señales vectoriales a un nivel de -60 dBm y diferentes valores de ruido, sin aplicar señal interferente. Ver Tabla II. Cabe recordar que el SNR es una característica de la señal y el EVM es un valor obtenido. Por tanto, en la Tabla II representamos los resultados obtenidos para los distintos niveles de ruidos, desde -130 dBm hasta -66 dBm, para la señal portadora con un nivel recibido fijo de -60 dBm y como resultado obtenemos los valores de EVM y SNR.

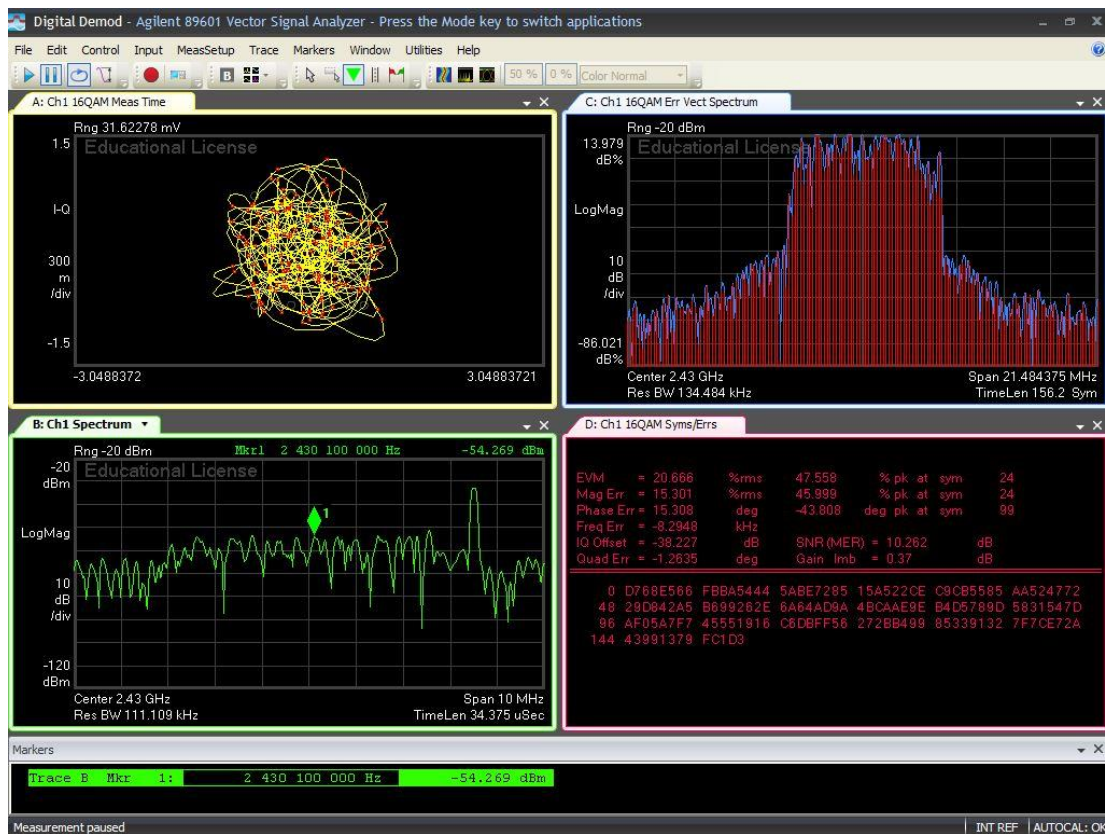


Figura 15. Ruido a -66 dBm, señal de portadora a -60 dBm y con portadora interferente de -32dBm

Tabla II. Nivel de EVM para una señal de -60 dBm para distintos nivel de ruido

Ruido (dB)	Señal Portadora(-dBm)	EVM(%)	SNR (dB)
-130	60	2.6158	28.797
-80	60	6.2068	21.523
-75	60	8.1425	19.165
-73	60	10.234	17.269
-71	60	12.638	15.501
-70	60	13.353	14.778
-69	60	14.914	13.630
-68	60	19.480	11.452
-67	60	19.398	11.736
-66	60	20.083	10.172

En la Tabla III tenemos una señal portadora de datos que obtenemos mediante el generador de señales vectoriales, para un nivel de -60 dBm y diferentes valores de ruido, y

aplicando una señal interferente como hemos visto anteriormente de un nivel de -32 dBm.

Tabla III. Nivel de EVM para una señal de -60 dBm para distintos nivel de ruido y una señal interferente de -32 dBm

Ruido (dB)	Señal Portadora(-dBm)	Señal Interferente(-dBm)	EVM(%)	SNR (dB)
-130	60	32	3.6572	26.336
-80	60	32	5.8391	22.186
-75	60	32	8.0273	19.334
-73	60	32	10.259	17.504
-72	60	32	11.343	16.308
-71	60	32	13.135	14.898
-70	60	32	14.605	13.999
-69	60	32	18.527	11.5
-68	60	32	18.415	11.627
-67	60	32	19.680	11.907
-66	60	32	20.666	10.262

De acuerdo con estos niveles podemos obtener las siguientes gráficas. En la Figura 16 relacionamos EVM con SNR cuando insertamos una portadora interferente. Se puede apreciar que son inversamente proporcionales y que

cuando EVM sube SNR baja. Recordar que todas las gráficas están obtenidas para una señal de la portadora de -60 dBm y frecuencia de 2,430 GHz y demás parámetros especificados anteriormente.

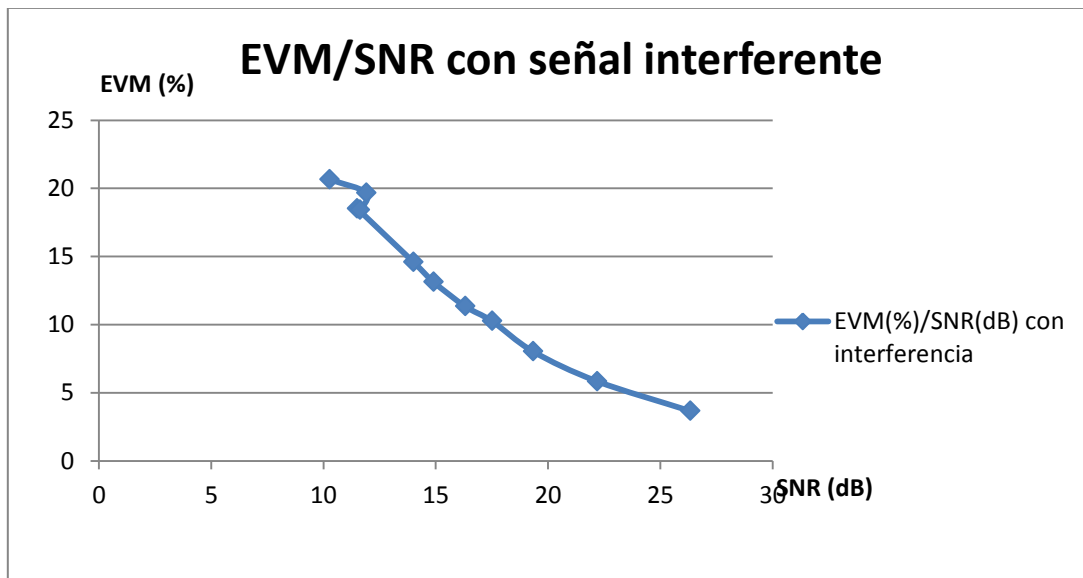


Figura 16. Representación del EVM respecto al SNR con interferencia

En la Figura 17 relacionamos EVM con SNR sin portadora interferente. Al igual que

antes se apreciar que son inversamente proporcionales. A mayor valor de EVM, el valor

de SNR es menor y de forma viceversa, para mayores valores de SNR tenemos menores

valores de EVM.

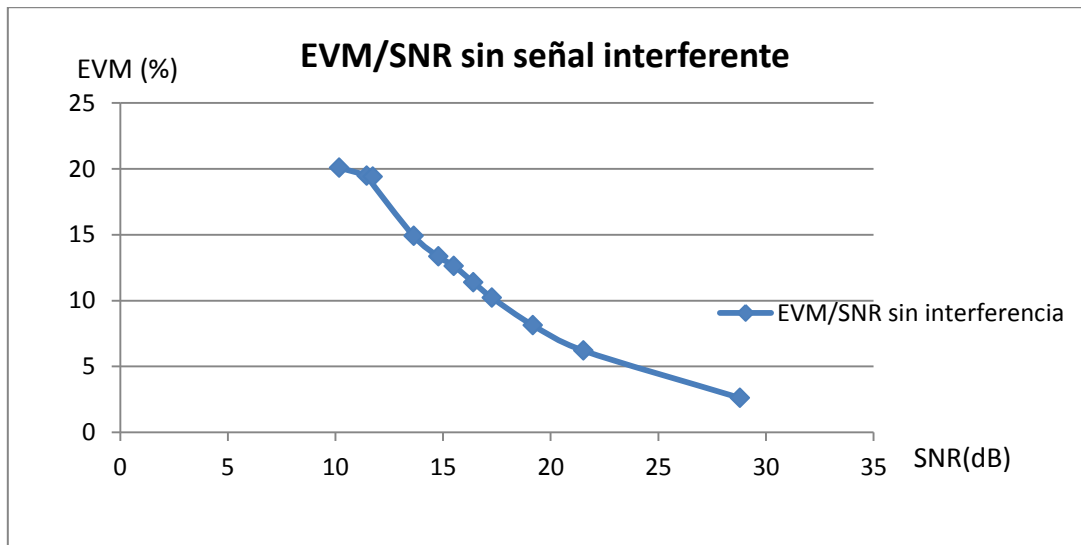


Figura 17. Representación del EVM respecto al SNR sin interferencia

En la Figura 18 comparamos EVM y SNR sin portadora interferente respecto a diferentes valores de ruido. Tenemos dos curvas, la curva con cuadrados representa los valores de SNR y la curva de rombos que representa los valores de EVM. Al igual que antes, pero con mayor claridad, se aprecia que EVM y SNR son parámetros inversamente proporcionales, para la señal portadora de nivel fijo conforme va subiendo el nivel de ruido desde niveles de

-130 dBm que es un nivel próximo a niveles de ruido térmico, observamos en la gráfica que el nivel de SNR va decreciendo y el nivel de EVM o magnitud del error va subiendo. Observamos también que EVM tiene un margen de variación entre valores próximos a cero y valores sobre 20 dB. SNR tiene un margen de variación entre valores en el entorno de 30 hasta valores sobre 10 en %.

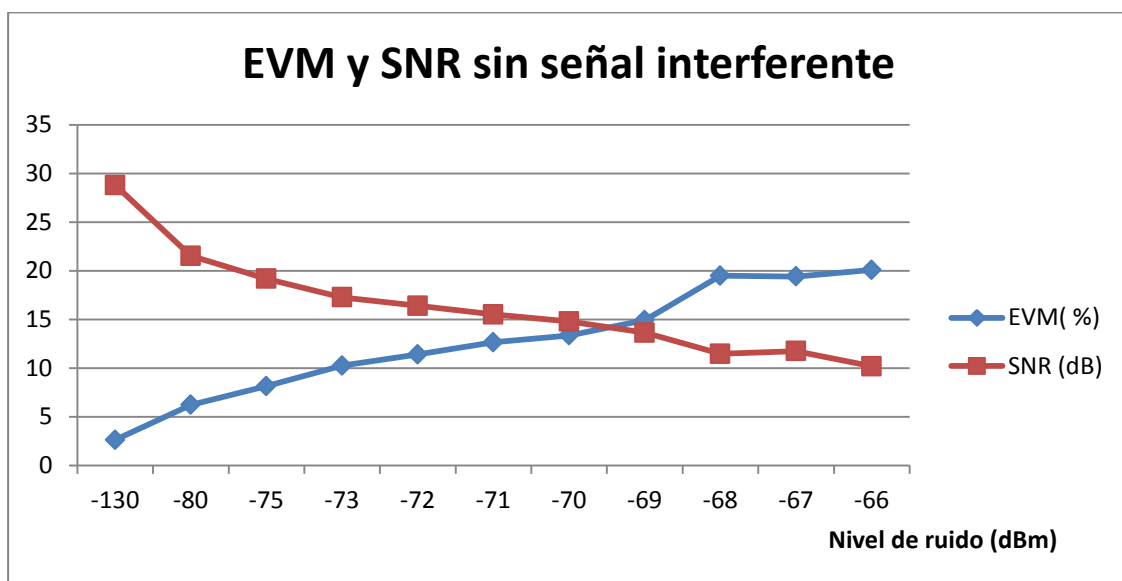


Figura 18. EVM y SNR para una señal de -60 dBm sin portadora interferente

En la Figura 19 comparamos EVM y SNR respecto a diferentes valores de ruido, pero con

la presencia de una portadora interferente. Tenemos dos curvas, la curva con cuadrados

representa los valores de SNR y la curva de rombos que representa los valores de EVM. Al igual que antes, pero con mayor claridad, se aprecia que EVM y SNR son parámetros

inversamente proporcionales. Ahora se aprecia que la curva que representa a SNR tiene los valores más bajo y lo que provoca que se crucen las dos curvas en valores de ruido más bajos.

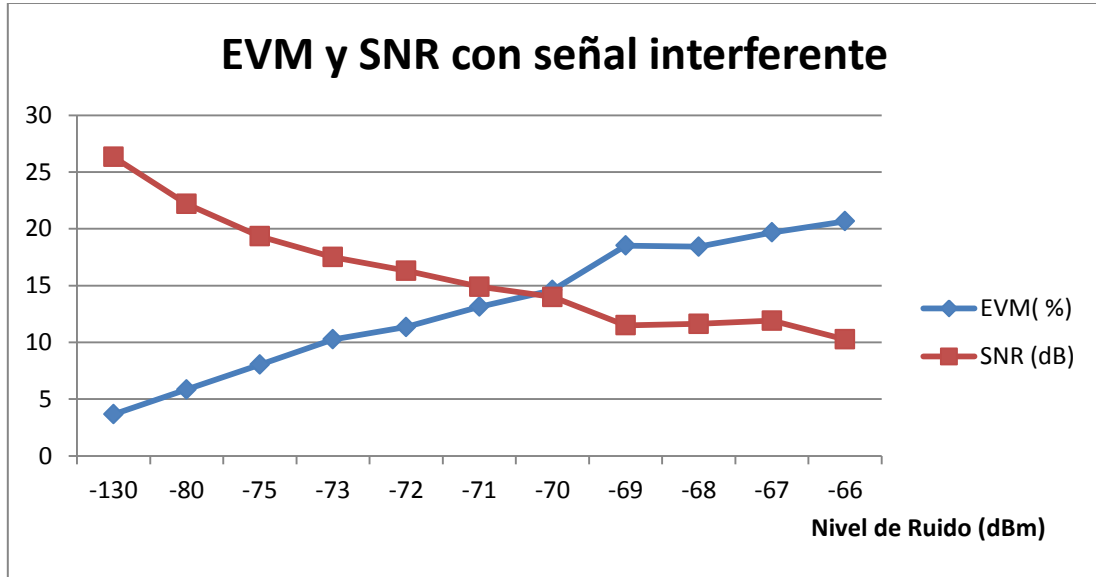


Figura 19. EVM y SNR para una señal de -60dBm y portadora interferente de -32 dBm

En la Figura 20 analizamos el parámetro SNR para diferentes valores de ruido mediante dos curvas, una con presencia de señal interferente y otra sin señal interferente. Como es de lógica, se aprecia que cuando no hay señal

interferente el valor de SNR es más alto que cuando hay presencia de señal interferente, aunque la gráfica muestra que la diferencia no es muy sustancial.

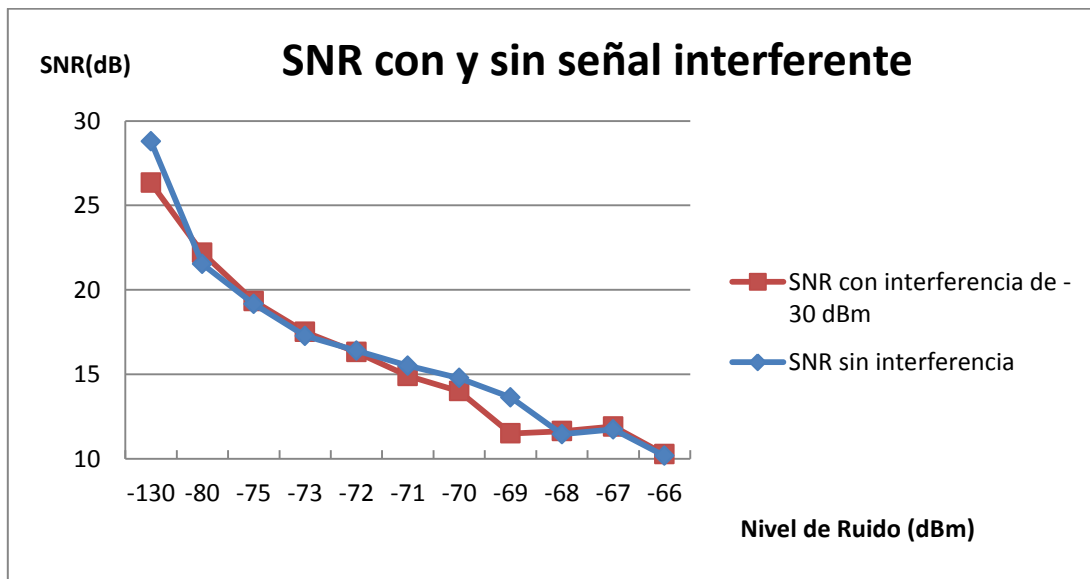


Figura 20. SNR para la señal digital de -60 dBm respecto al nivel de ruido

En la Figura 21 analizamos el parámetro EVM para diferentes valores de ruido en las situaciones distintas, una con presencia de señal interferente y otra sin señal interferente. Como es de lógica, se aprecia que cuando no

hay señal interferente el valor de EVM es ligeramente más bajo que cuando hay presencia de señal interferente, aunque la gráfica muestra que la diferencia no es muy sustancial.

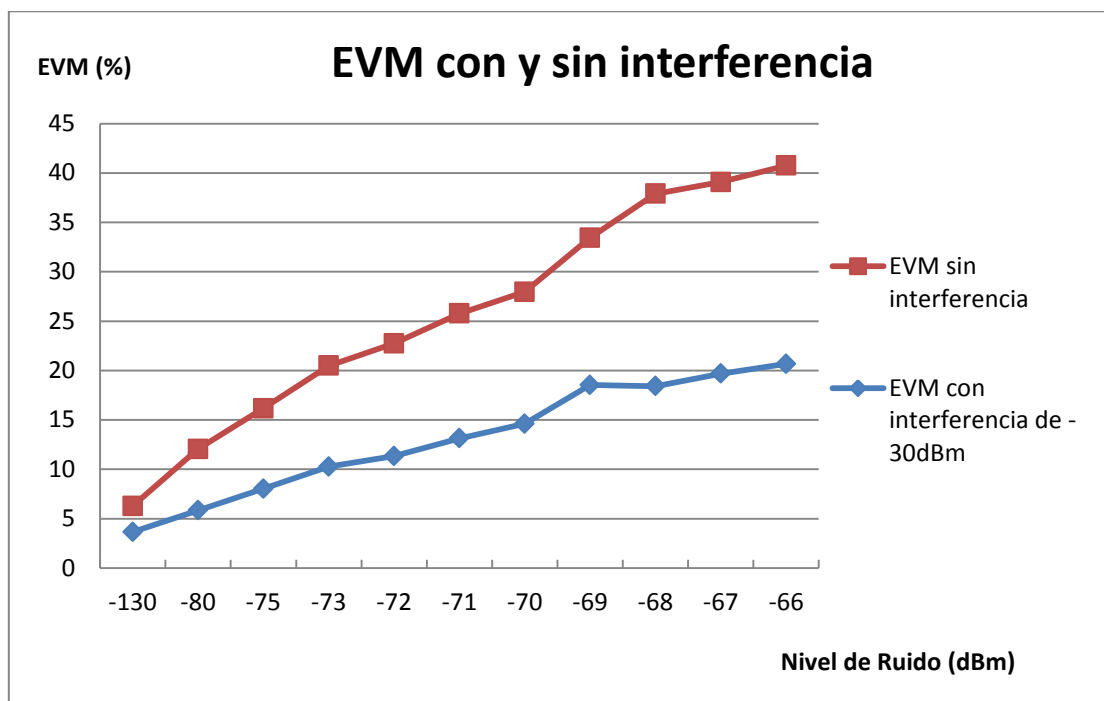


Figura 21. EVM respecto al nivel de ruido con y sin interferencia

V. Optimización del protocolo de comunicaciones

Una vez analizada la situación que se nos plantea en los canales antes la presencia de más de una señal simultáneamente y por tanto conocidos ciertos parámetros en las situaciones tanto especiales como normales, nos queda obtener un método para optimizar o elegir el camino más favorable, idóneo para nuestro caso, o con menos tasa de error de acuerdo a la información con que contamos con el estado del canal. Recordemos que las pruebas prácticas analíticas que hemos realizado contemplan prácticamente todos los casos.

Por tanto plantearemos un algoritmo para selección del camino adecuado, asumiendo que transmitiremos con potencia fija en todos los nodos y de acuerdo a nuestro escenario. Para esto será necesario disponer de una tabla de

enrutamiento debiendo ser de forma dinámica y que se establece de forma automática.

Se plantea una tabla de enrutamiento dinámica dado que tendremos situaciones cambiantes en el tiempo, por lo que será necesario ir actualizando periódicamente el estado del sistema y sus parámetros, luego se gestionará una nueva tabla cuando se pierda la comunicación con algún nodo, o se detecte una nueva situación.

Básicamente planteamos un algoritmo para seleccionar el camino adecuado basado en los conceptos principales de obtener el parámetro EVM, realizar la tabla de enrutamiento, elegir el camino adecuado, gestionar la demanda de petición de envío para nodos repetidores y gestionar el envío de datos para nodos fuentes. Como es lógico, necesitamos un algoritmo o protocolo sencillo y robusto, que sea capaz de manejar las situaciones pero que no suponga excesiva carga de trabajo, para el sistema. Por lo que planteamos la gestión de un nodo en sus mínimas funciones a realizar, obtener datos y enviarlos, o recibir datos y enviarlos. Para saber

dónde los tenemos que enviar nos ayudamos de una tabla de enrutamiento y de los parámetros de EVM de los canales. La tabla de enrutamiento contendrá los parámetros mínimos para obtener los caminos posibles. Es decir, nombre de los nodos conectados y el EVM del canal. Ya que un canal será mucho mejor que otro si su magnitud de error o EVM es menor, y caso de tener el mismo EVM con dos saltos, será mejor camino el que tenga mejor EVM en el primer salto. Una vez llegado el mensaje al

nodo destino, que es el nodo más cercano a la estación base o repetidora que está conectada con el servidor, se habrán solventado todos los problemas de conectividad y el mensaje llegará con suma facilidad al servidor.

El algoritmo básico que refleja las principales funcionalidades de los nodos para su adecuada adaptabilidad dinámica del sistema, la reflejamos en el algoritmo de la Figura 22.

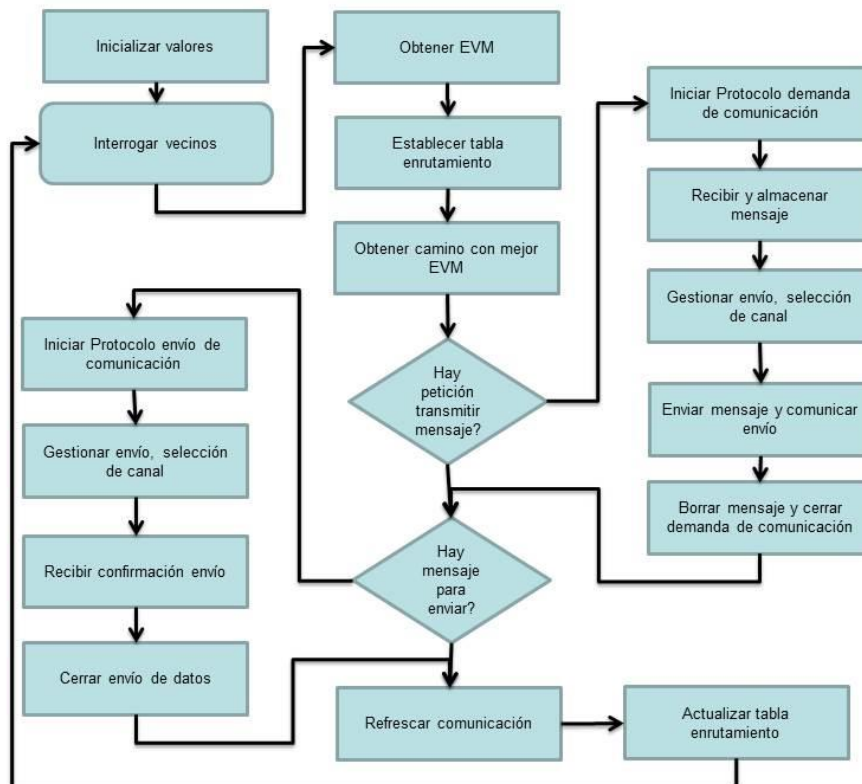


Figura 22. Algoritmo básico para gestión de información en los nodos

Para prueba del sistema se han simulado los escenarios de la Figura 6 y Figura 7 anteriormente expuestas. Recordemos que la Figura 6 representa el escenario general formado por los nodos fuente, repetidores y destino conectados con la estación base y servidor. En la Figura 7 se representa el escenario formado por los nodos fuente, repetidores y destino. Para la simulación se ha realizado una pequeña aplicación implementada en C-Sharp del paquete de Microsoft Visual C# 2010 Express. En la aplicación se simula cualquier escenario formado por nodos, que los representamos como círculos, enlazados por canales, que los representamos por líneas que unen los círculos. Evidentemente como se ha visto anteriormente cada canal de comunicación posee su EVM, lo que provoca que para llegar a

un nodo siguiente tengamos una tasa de error. Si tenemos un salto para llegar al nodo destino tendremos contar con el máximo de la tasa que es la suma. Tendremos que elegir una ruta dependiendo del EVM de los canales con los nodos que exista enlace o comunicación. En la Figura 23 creamos el escenario básico con el nodo fuente a la izquierda, los enlaces a dos nodos repetidores y un enlace al nodo destino. Como es lógico el EVM de los canales de los nodos repetidores es mucho menor que el EVM con el nodo destino. Por lo tanto, en la simulación que nos representa la Figura 24 se observa la ruta elegida o más óptima, que une a los nodos coloreados en verde. Luego el camino que se determina más óptimo en un determinado instante de tiempo para enviar el mensaje desde el nodo fuente al nodo destino con las

condiciones del sistema y de los canales, es el representado en color verde y que nos

actualizará la tabla de enrutamiento.

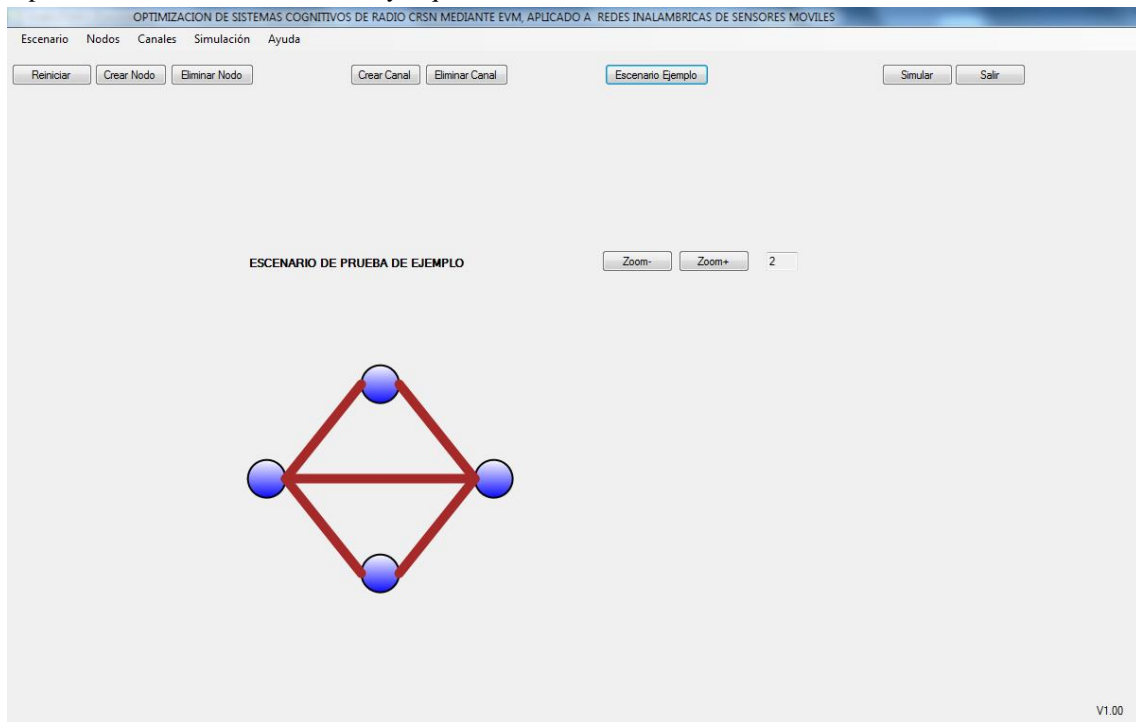


Figura 23. Representación para la simulación del escenario básico

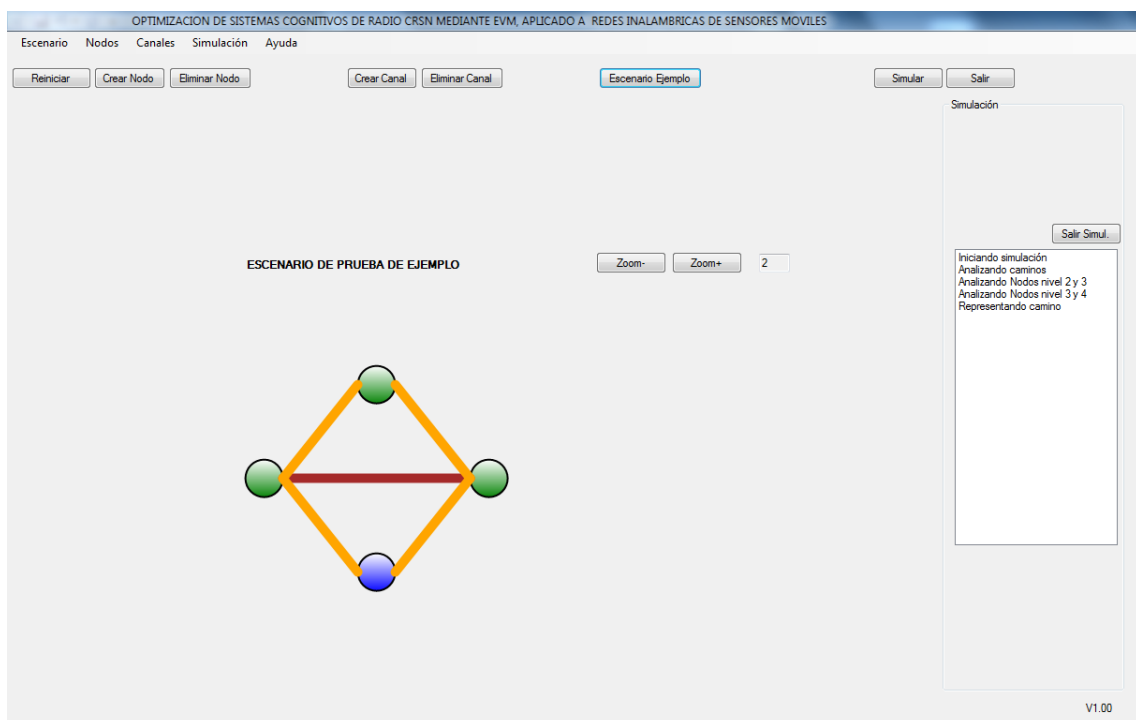


Figura 24. Simulación del escenario básico

Para el caso del escenario general se puede aplicar la simulación como se observa en la

Figura 25. Tenemos que el nuevo escenario está formado por el escenario básico más dos nuevos

nodos en el siguiente nivel enlazados con el nodo destino del anterior caso, y uno de ellos está conectado con otro nodo de siguiente nivel que representa al nodo servidor. Es simplemente la extensión o ampliación del escenario básico. En el momento de la simulación se aprecia

cómo se obtiene la ruta más óptima para el enlace desde el nodo fuente al servidor. En la Figura 26, el camino óptimo se representa con los nodos en color verde como para el caso del escenario básico.

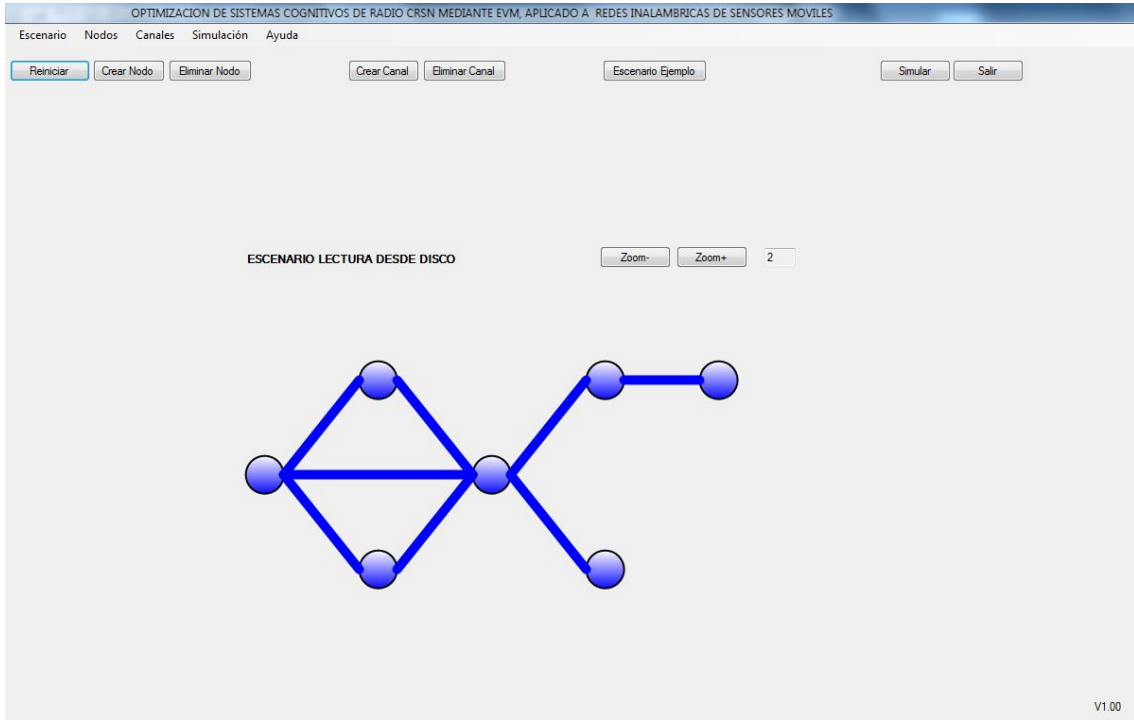


Figura 25. Representación para la simulación del escenario general

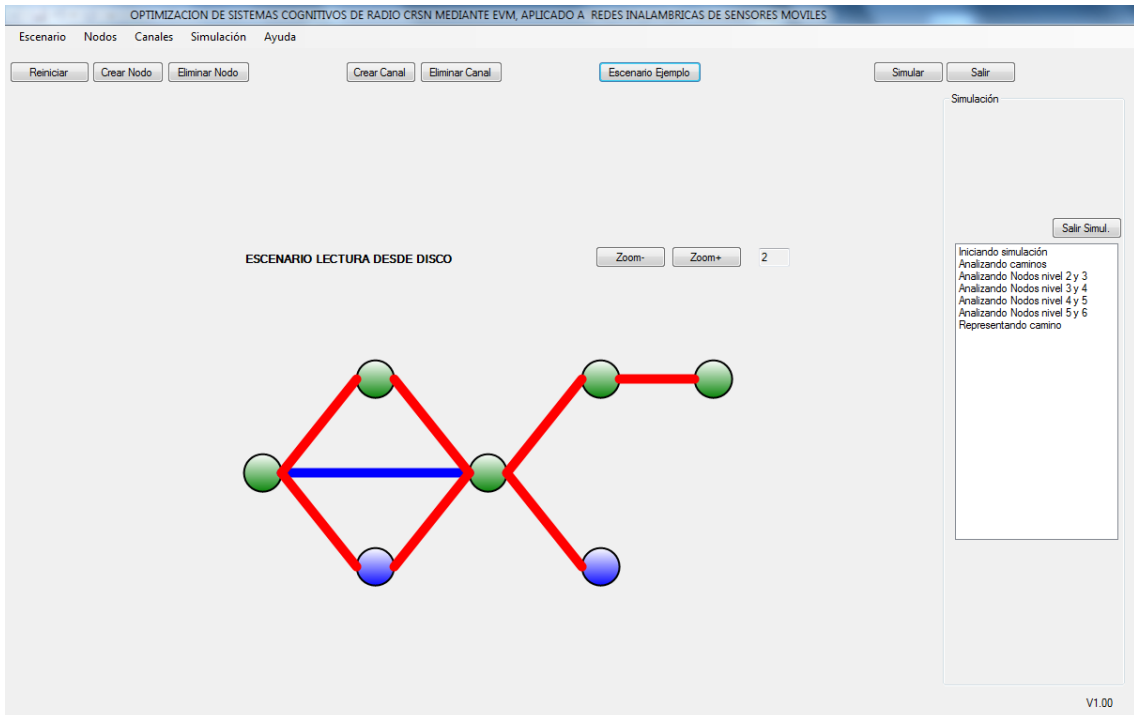


Figura 26. Simulación del escenario general

VI. Conclusiones

Las redes inalámbricas de sensores móviles por sus características son una serie de nodos sensoriales de carácter móvil y portátil. Lo que implica que la localización física puede variar con el tiempo y cambiar de posición o sin cambiar pueden variar sus parámetros dependiendo del entorno que le rodea. Dada esta variación de condiciones instantáneas o parámetros en función del tiempo y puesto que para la comunicación utilizan el espectro radioeléctrico que también puede ser dinámico, nos encontraremos con situaciones cambiantes. Las comunicaciones digitales son utilizadas en estos ambientes o entornos. Esto implica que el entorno que nos plantean los sistemas cognitivos de radio es el más idóneo para el desarrollo de dichos sistemas WSN. Pero las necesidades de implementar protocolos que simplifiquen los sistemas de comunicación, protocolos que impliquen un coste mínimo de comunicación ya que tenemos que ahorrar energía, facilitar el enrutamiento, facilitar la asignación de canales, asegurar el envío de mensajes y minimizar los errores en transmisión y recepción. Para mejorar y optimizar las comunicaciones digitales, en relación con los errores normalmente se utilizan métodos de recuperación y corrección de errores de información. Caso de los sistemas convolucionales, sistemas lineales, aplicación de algoritmos de Viterbi, etc. El uso de estos sistemas o algoritmos tiene un coste de procesamiento, de energía, de implementación a nivel más alto del nivel físico. Para esto intentamos mejorar a nivel físico un método que nos mejore la tasa de errores. En este trabajo aprovechamos la utilidad del parámetro EVM para detectar la mejor conexión donde se encuentre el canal con menor tasa de error. Esto nos confiará un sistema de comunicación inalámbrica lo más fiable posible. Contribuirá al envío de los datos con más facilidad, mejorar la tasa de fallos, menos nivel de potencia, menos obligación de corregir o recuperar los datos. Para todo ello hemos analizado el comportamiento de nuestro escenario para una frecuencia de 2,43 GHz y una señal digital de 16QAM. Hemos analizado los efectos de

aumento del nivel de ruido y de interferencias para un nivel de señal recibida de -60 dBm/Hz. A partir de los parámetros que obtenemos con la instrumentación obtenemos las características del canal y observamos los niveles para los cuales la información y la tasa de errores es crítica, con lo que podemos actuar según el parámetro EVM para seleccionar el camino adecuado. Se ha implementado un algoritmo para aplicar de forma adecuada y optimizada las características de los parámetros de las transmisiones digitales, recordando siempre que la relación de señal ruido es una característica de las transmisiones radioeléctricas, mientras que el nivel de EVM es un parámetro que se mide en el nodo receptor, aplicando para mejora y simplicidad en las comunicaciones y facilitar el desarrollo de los sistemas WSN, pudiendo llegar a generalizarse para sistemas de transmisión digital evitando funcionalidades específicas de fabricantes que son tan costosas y poco conocidas.

En futuros trabajos se puede abordar la creación de modelos matemáticos específicos para la simulación numérica de escenarios controlados por estos algoritmos de optimización y crear plataformas piloto para la evaluación a largo plazo de escenarios reales.

Referencias

- [1] J. Mitola; G.Q. Maguire. Cognitive radio: making software radios more personal. *Personal Communications, IEEE*, vol. 6 (4), pp.13-18. Aug 1999. doi: 10.1109/98.788210.
- [2] J. Mitola III; Cognitive Radio Architecture Evolution; Proceeding of the IEEE Vol. 97 (4); April 2009.
- [3] J. Hillenbrand; T.A. Weiss; F.K. Jondral. Calculation of detection and false alarm probabilities in spectrum pooling systems. *IEEE Communications Letters*, vol. 9 (4), pp. 349-351. April 2005. doi: 10.1109/LCOMM.2005.1413630.
- [4] R.W. Thomas; L.A. DaSilva; A.B. MacKenzie. Cognitive networks. *Proceedings of the First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Baltimore, MD, USA, November 8–11. 2005.
- [5] O. B. Akan, O. B. Karli, and O. Ergul; Cognitive Radio Sensor Networks; *Middle East Technical University*. Agosto 2009.
- [6] C. Wu, S. Ohzahata, T. Kato; Dynamic Channel Assignment and Routing for Cognitive Sensor Networks; *International Symposium on Wireless Communications Systems*. 2012. DOI 10.1109/ISWCS.2012.6328335
- [7] M. Elsaadany, M. Abdallah, T. Khattab, M. Khairy, M. Hasna; Cognitive Relaying in Wireless Sensor Networks: Performance Analysis and Optimization; *Global Communications Conference, Globecom2010*, pp.1-6. 2010.
- [8] C.T. Cheng, C. K. Tse, F. C. M. Lau; A Delay-Aware Data Collection Network Structure for Wireless Sensor Networks; *IEEE sensors journal*, vol. 11 (3), pp. 699-710. Marzo 2011.
- [9] G. Zhao, J. Ma, G. Y. Li, T Wu, Y. Kwon, A. Soong, C. Yang; Spatial Spectrum Holes for Cognitive Radio with Relay-Assisted Directional Transmission; *IEEE transactions on wireless communication*, vol. 8 (10), pp. 5270-5279. Octubre 2009.
- [10] E. S. Lo, K. B. Letaief; Design and Outage Performance Analysis of Relay-Assisted Two-Way Wireless Communications; *IEEE transactions on communication*, vol. 59 (4), pp. 1163-1174. Abril 2011.
- [11] L. Li, X. Zhou, H. Xu, G. Y. Li, D. Wang, A. Soong; Simplified Relay Selection and Power Allocation in Cooperative Cognitive Radio Systems. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 10 (1). Enero 2011.
- [12] P. Wang, Y. Zhou, X. Yin, X. Huang, and F. Liu; Measurement and Analysis of Relay Channels in Indoor Environments; *Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2010 6th International Conference on*, pp.1-5. Agosto 2009.
- [13] B. Wang, Y. Wu, F. Han, Y.-H. Yang, K. J. Ray Liu; Green Wireless Communications: A Time-Reversal Paradigm; *IEEE journal on selected areas in communications*, vol. 29 (8), pp. 1698-1710. Septiembre 2011.
- [14] G.Y. Zhang, Z. Hu, C.R. Wang, G.Y. Li and H. Tian; Joint power and channel allocation for energy-efficient performance of relay-assisted cognitive radio networks based on energy pricing; *Electronics letters*, vol. 46 (23), pp.11. Noviembre 2010.

- [15] Z. Liu, Y. Xu, D. Zhang, S. Guan; An Efficient Power Allocation Algorithm for Relay Assisted Cognitive Radio Network; *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing WCSP 2010*. 2010.
- [16] M. D. McKinley, K. A. Remley, M. Myslinski, J. S. Kenney, D. Schreurs, B. Nauwelaers; EVM Calculation for Broadband Modulated Signals; *64th ARFTG Conf. Dig. Orlando, FL*, pp. 45-52. Diciembre 2004.
- [17] Agilent Technologies Inc.; 8 Hints for Making and Interpreting EVM Measurements. 20 Mayo 2005; 5989-3144EN.

Experiencia personal

Durante este trabajo he aplicado la experiencia adquirida durante el periodo de docencia, he intentado aportar algo nuevo y sobre todo he descubierto nuevas características de las últimas tecnologías de la electrónica y de la informática aplicada a la industria.

En las asignaturas se estudian y analizan aspectos teóricos y prácticos. En las prácticas se intentan plasmar estos aspectos en el ámbito de la docencia de la asignatura. En este trabajo se intenta llegar a un objetivo abarcando ámbitos distintos, aportando y colaborando hacia el objetivo de la investigación.

Así a lo largo del proyecto he experimentado diversas fases. En una fase inicial, había que asimilar los conceptos, analizar artículos, establecer los objetivos y aportaciones. La siguiente fase es el manejo de la instrumentación y análisis de los resultados. Después hay una fase de desarrollo, implementación, cambios y perfilar la implementación de acuerdo con los objetivos. Por último, hay que documentar lo realizado, elaborar la maqueta, presentación y exposición. De este modo, si evaluamos cada una de estas fases podemos decir que la fase inicial ha sido fácil pero lenta, ya que había que recopilar conceptos y el trabajo de muchos investigadores para conocer el punto de situación actual. El objetivo principal no era muy difícil debido a la cercanía el trabajo laboral, si bien representa enormes diferencias. La última fase de documentación, como en cualquier trabajo, se enfoca siempre como cualquier recta final debido a la proximidad del resultado. En definitiva, ha sido una experiencia interesante y agradable. Sin duda algo que volvería a repetir.

Desde los orígenes de las comunicaciones por radio, estas han estado en constante evolución. Diferentes tipos y formas de emitir han acompañado a las transmisiones de señales, siempre con un objetivo claro, facilitar la comunicación y aprovechar los recursos disponibles. Así encontramos diferentes tipos de modulaciones, transmisiones de audio, de video y de datos. En la actualidad se están imponiendo las transmisiones digitales sobre las transmisiones analógicas que permanecen por inercia en algunos servicios. Recientemente ha despertado gran interés la radio cognitiva como evolución de las anteriores tecnologías, lo que nos lleva a analizarla en este trabajo, intentar aportar o contribuir para mejorarla, complementándola con medidas de la magnitud del vector de error (EVM) y aplicándola en un sector de interesante evolución como las redes inalámbrica de sensores móviles.

Since origins of radio communications, these have been constantly evolving. Different ways have accompanied to signal transmissions, always with one objective, to facilitate communication and use all resources. Thus, we find different modulations, streaming audio, video and data. At present, digital communications are imposed over analogic communications. The analogic transmission is remaining by inertia in some services. Recently, cognitive radio has have a great interest as an evolution of previous technologies, which leads us to analyze in this document, attempting to provide or contribute to improve it, supplemented with measurements of error vector magnitude (EVM) and applying it in a sector of interesting evolution, the wireless sensors networks.

