


Información General

Facultad CIENCIAS NATURALES E INGENIERIA			
Programa Académico: INGENIERIA DE TELECOMUNICACIONES		Grupo(s) de Investigación: GNET	
Nombre del semillero /Sigla: Semillero de Sistemas de Telecomunicaciones /SISTEL		Fecha creación: 12 de Febrero de 2015	
		Regional: Bucaramanga	
Líneas de Investigación: Comunicaciones inalámbricas - Protocolos de Transmisión y Recepción			
Áreas del saber (1)			
1. Ciencias Naturales	2. Ingeniería y Tecnologías		
3. Ciencias Médicas y de la Salud	4. Ciencias Agrícolas		
5. Ciencias sociales	6. Humanidades		

Información del Director del Proyecto

Nombre: JOHAN LEANDRO TELLEZ GARZON		No. de identificación y lugar de expedición: 1101753049	
Nivel de Formación Académica: Doctorado en Ingeniería Eléctrica con énfasis en el Área de Redes y Telecomunicaciones; Maestría en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones; e Ingeniero en Telecomunicaciones			Asesor
		X	Líder de semillero
Celular:3017023213		Correo Electrónico: jtellez@correo.uts.edu.co	

Información de los autores

Nombre	No. Identificación y lugar de expedición:	Celular	Correo Electrónico

Proyecto

1. Título del Proyecto: ANÁLISIS Y MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO Y LA COGNICIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA	Modalidad del Proyecto (2)				
	PA	PI	TG	RE	Otra. Cuál?
2. Planteamiento de la Problemática: Las comunicaciones inalámbricas son una de los más importantes éxitos de la ingeniería y no solo desde el punto de vista científico sino también en términos de penetración en el mercado e impacto en la sociedad (Molisch, 2011). Grandes compañías han resultado de la comercialización de productos inalámbricos y estos productos son dominantes económicamente. El éxito de esta tecnología se debe principalmente a su practicidad, para las personas estar comunicado de forma simple, segura y sin cables que incomoden es imprescindible. Son variados los usos de las comunicaciones inalámbricas y es posible encontrarlas desde radioenlaces terrestres o satelitales hasta comunicaciones de corto alcance entre computadores y dispositivos móviles celulares. Tecnologías como WiFi, GSM, UMTS, Bluetooth, etc. son reconocidas mundialmente y su importancia es indiscutible. Además, otrastechnologías como redes de sensores inalámbricos (WSN) han comenzado a surgir de la mano del internet de las cosas (IoT) y de la automatización industrial y de hogares.					

Por otro lado, surgen constantemente nuevas aplicaciones y servicios que generan que los usuarios demanden mayores anchos de banda a expensas de un espectro radioeléctrico cada vez más competido. Dos situaciones son identificadas, por un lado el uso del espectro radioeléctrico debe ser optimizado para aprovechar al máximo los recursos y además los requerimientos de ancho de banda cada vez más exigentes de los usuarios deben ser soportados. De acuerdo con (Hossain, 2015), para mejorar la eficiencia y la utilización del espectro radioeléctrico el esquema de licencias del espectro debe modificarse para adoptar un modelo dinámico de gestión del espectro. De tal modo que los nuevos sistemas inalámbricos independiente de su aplicación deben tener nuevas y mejoradas funcionalidades cognitivas que permitan utilizar mejor los recursos disponibles, adaptarse al ambiente cambiante y proporcionar una comunicación con mayor ancho de banda. Algunas de estas nuevas funcionalidades cognitivas son analizadas en el trabajo de (Zhang, Long, & Wang, 2013).

En este contexto, temas de investigación relacionados al análisis de desempeño; a la búsqueda de nuevos métodos de acceso; a la implementación de funcionalidades cognitivas; a la búsqueda de nuevo hardware/software; al uso de radio definido por software (SDR) en los sistemas inalámbricos deben ser investigados en el semillero SISTEL. Los integrantes de SISTEL deben entender los problemas asociados al desarrollo de nuevos métodos de comunicación inalámbrica y proponer soluciones que ayuden a mejorar el rendimiento de estos sistemas.

3. Antecedentes:

El espectro de radiofrecuencia es un recurso preciado y altamente competido que es gestionado por organismos de control estatales como la agencia nacional del espectro (ANE) en Colombia y la comisión federal de comunicaciones (FCC) en los Estados Unidos. Las cuales usan un esquema de asignación estático canales que genera un uso no optimizado del espectro de radio (Akyildiz, Lee, Vuran, & Mohanty, 2008).

Como consecuencia la investigación científica en este tema se ha inclinado a la búsqueda de mecanismos de cognición en los radio o redes inalámbricas, concepto comúnmente conocido como radio cognitivo (CR – cognitive radio). Esta tecnología permite un uso más comprensible y flexible del espectro de radio disponible a través de un esquema de asignación espectral dinámico (DSA – dynamic spectrum access) que diferencia dos tipos de usuarios: primarios y secundarios (Wang & Liu, 2010). Así, es posible equipar los usuarios secundarios con funcionalidades de cognición para que de una forma adecuada aprovechen los canales de usuarios primarios sin afectarlos significativamente.

CR ha permitido crear novedosas ideas de acceso y uso de recursos en los sistemas inalámbricos en todos sus niveles. Desde redes de acceso inalámbrico a internet para hogares como es el caso de estándar IEEE 802.22 (Cordeiro, Challapali, Birru, & Shankar, 2005) hasta la implementación de cognición en redes de sensores inalámbricos (WSN – wireless sensor networks) para usos industriales o domésticos. La cognición en los sistemas inalámbricos es un tema que debe ser eje de investigación del semillero SISTEL, ya que optimizar el uso de espectro de radio es fundamental y además mejorar el rendimiento y escalabilidad de los sistemas inalámbricos es una tarea de desafío constante gracias a los nuevos servicios, nuevas aplicaciones y en general nuevos requerimientos de ancho de banda de los usuarios.

En (Wang & Liu, 2010), son presentados conceptos fundamentales de radio cognitivo y algunos de los principales adelantos desde el punto de vista de detección espectral, asignación dinámica del espectro, control de potencia, enrutamiento y compartición espectral (spectrum sharing).

Un resumen de las principales estrategias de control de acceso al medio (MAC – médium Access control) para redes de radio cognitivo es presentado en (Domenico, Strinati, & Benedetto, 2010), donde se realiza una clasificación de estas estrategias considerando la complejidad, el tipo de arquitectura, el nivel de cooperación con la red y como es el manejo dado a la transferencia de datos y señalización.

Con respecto a las redes de sensores inalámbricos, la incorporación de funcionalidades cognitivas es un aspecto tecnológico investigado actualmente y cuyo objetivo es buscar optimizar el consumo energético (aspecto imprescindible en este tipo de redes) y aumentar la coexistencia de este tipo de redes en la banda industrial médica y científica (ISM – Industrial scientific and medical band) o incluso la operación en otras bandas relacionadas a usuarios primarios, ejemplo, banda de televisión.

En (Ahmad, Ahmad, Rehmani, & Hassan, 2015), es presentada una revisión que junta los conceptos CR y WSN (CWSN – cognitive wireless sensor networks) y presenta las tres formas de asignación de recursos de radio en este tipo de redes más usadas: centralizada, distribuida y basada en cluster (agrupaciones de sensores). Además de presentar los criterios (y ejemplos asociados a estos) de optimización para la asignación de recursos de radio: energía, maximización de rendimiento, garantía de calidad y servicio (QoS – quality of service).

Las aplicaciones y desafíos más importantes relacionados con CWSN son analizados en el trabajo de (Joshi, Nam, & Kim, 2013). Donde se identifican aplicaciones potenciales de CWSN como: militares y de seguridad pública; salud; domótica y aplicaciones en interiores; altos anchos de banda (por ej., streaming); vigilancia en tiempo real (por ej., monitoreo de tráfico o de biodiversidad, etc.); redes vehiculares y de transporte; u otro monitoreo de múltiples propósitos. Las implicaciones de investigar para analizar y mejorar el desempeño de los sistemas inalámbricos no solo es una cuestión tecnológica o científica sino que también tiene un impacto económico para la sociedad ya que optimizar los sistemas inalámbricos y optimizar el uso del espectro de radio se puede reflejar en mayores anchos de banda a menores costos para los usuarios. Así, es necesario que los estudiantes del programa de Telecomunicaciones de las UTS encuentren soluciones a estos temas mediante trabajos teóricos y experimentales enfocados a mejorar el rendimiento de las redes inalámbricas mediante estrategias cognitivas.

4. Justificación:

Con este proyecto, el semillero SISTEL, pretende establecer un mecanismo para motivar investigación en varias de estas nuevas tendencias en comunicación inalámbrica, enfocando en la búsqueda metodologías, algoritmos o prototipos fundamentados en radio cognitivo para mejorar y optimizar el rendimiento de los sistemas inalámbricos y del uso de los recursos del espectro.

Este proyecto ayudara al estudiante vinculado al semillero a aprender conceptos y tecnologías que permitan complementar los conocimientos adquiridos en sus estudios acerca de las tecnologías inalámbricas desde varias capas del modelo OSI.

Desde la perspectiva institucional pueden ser obtenidos varios beneficios ya que mediante la búsqueda de soluciones en estos temas pueden ser obtenidos productos de investigación en forma de artículos, poster y prototipos que ayudan a dar mayor visibilidad de las UTS a nivel científico y académico, aspecto relevante en aras de la acreditación institucional.

Otra justificativa es el hecho que este tipo de investigación puede permitir dar un mejor uso al espectro y proporcionar un mecanismo de asignación más dinámico e inteligente de recurso del espectro de radio a instituciones como la ANE, las cuales requieren adaptarse a las nuevas tendencias tecnológicas y su vez garantizar que el recurso estatal que administran sea explotado de la mejor forma.

5. Marcos Referenciales:

Los temas que se asocian a este proyecto están relacionados a tres temas esenciales: las comunicaciones inalámbricas, radio cognitivo, redes inalámbricas de sensores y los parámetros de rendimiento.

Comunicaciones Inalámbricas

Los temas asociados a las comunicaciones inalámbricas son extensos, en el libro de (Molisch, 2011) son estudiados varios aspectos fundamentales que empiezan desde las aplicaciones, los tipos de servicio, los requerimientos y otros aspectos económicos y sociales relacionados a las comunicaciones inalámbricas. También es importante conocer algunos desafíos técnicos asociados a los canales inalámbricos que hacen más desafiante y compleja la comunicación en comparación con los métodos cableados, esto es, propagación de múltiples caminos (fading), interferencia entre símbolos (ISI), asignación de frecuencias, re-uso de frecuencias y ruido.

Los mecanismos de propagación, las antenas, la descripción estadística de los canales inalámbricos y sus diversas versiones y los modelos de canal son esenciales para diseñar y mantener enlaces inalámbricos. Adicionalmente, temas base de la teoría de comunicaciones inalámbricas son: transceptores de radio, el procesamiento de señales, formatos de modulación, procesamiento banda base y banda pasante, diversidad, codificación de canal, codificación de voz y ecualizadores. Finalmente otros temas asociados e igual de importantes son:

- Métodos de Acceso Múltiple
- Sistemas de espectro ensanchado
- Multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM)
- Sistemas de múltiples antenas
- MIMO

Por otro lado, los estándares asociados al área de comunicaciones inalámbricas son estudiados en (Molisch, 2011), siento que, algunos de los más importantes tienen que ver con las comunicaciones celulares, como es el caso de UMTS o 3GPP, otros están relacionados a la transmisión de datos en diferentes niveles de cobertura, WiMaX, IEEE 802.11, 802.15, etc.

Radio cognitivo

El uso eficiente del espectro de radio disponible es un requisito clave para el diseño de un sistema inalámbrico, ya que el espectro es un recurso finito y altamente competido. Debido a las características de propagación de las ondas electromagnéticas, las frecuencias entre 10 MHz y 6 GHz son de más interés para las comunicaciones inalámbricas. Este rango puede parecer grande, pero debemos tener en cuenta que se utiliza para una gran variedad de servicios inalámbricos y que, además, los rangos de frecuencia más bajos (hasta 1 GHz), que son los más adecuados para aplicaciones de gran alcance, ofrecen poco ancho de banda. Los aspectos regulatorios usan un esquema de asignación estático de recursos, donde un canal es dedicado en forma exclusiva a un usuario primario (PU), entretanto, algunas bandas del espectro son abiertas para uso como es el caso de la banda ISM. Esta situación genera dos problemas fundamentales relacionados al uso del espectro de radio: algunas bandas son usadas de forma exagerada por muchos servicios y otras bandas pueden experimentar desperdicio de recursos. Como alternativa para mejorar este problema surge el concepto de radio cognitivo inicialmente definido por (Mitola & Maguire, 1999) y que consiste en que usuarios secundarios (SU) de radio pueden adaptar sus parámetros para aprovechar las oportunidades de comunicación disponibles dejadas por otros PU. Algunas definiciones que deben ser consideradas en CR son:

- 1) un radio cognitivo, adapta todos sus parámetros de transmisión al ambiente, i.e., modulación, método de acceso múltiple, codificación, frecuencia central de trabajo, ancho de banda y tiempos de transmisión. Para conseguir este grado de cognición es difícil en el sentido práctico
- 2) acceso dinámico al espectro, es un esquema usado por los usuarios de radio para que se les atribuya canales de forma temporal y dinámica para comunicación considerando su nivel de cognición o consultando una entidad encargada que gestiona los recursos del espectro de radio

SDR

Un aspecto cada vez más importante es que los dispositivos de radio reducen cada vez más los elementos de hardware necesarios para su operación, remplazándolos con algoritmos (software) ejecutados en módulo de procesamiento digital de señal, esto es posible gracias a que el procesamiento de señales en banda pasante se realiza por medio de hardware y que el procesamiento banda base es realizado en el dominio digital. Este concepto se denomina radio definido por software (SDR – software defined radio) y es la base de la mayoría de dispositivos actuales, desde computadores portátiles hasta Smartphones. Además, SDR es el mecanismo base de CR ya que permite cambiar, por ejemplo, la modulación, la frecuencia o la potencia de transmisión en tiempo real.

Detección espectral

Un aspecto importante en CR es detectar la presencia de otros usuarios presentes en el ambiente. La detección espectral consiste en identificar cuales partes del espectro no están siendo usadas por PU en el plano tiempo-

frecuencia. Los métodos de detección espectral tienen muchos desafíos asociados: fading y la dificultad en detectar radios que actúan la mayoría del tiempo como receptores. Varios de los métodos de detección son: detección por energía, filtro acoplado (matched filter), característica ciclo estacionaria y detección wavelet.

Estándares Inalámbricos

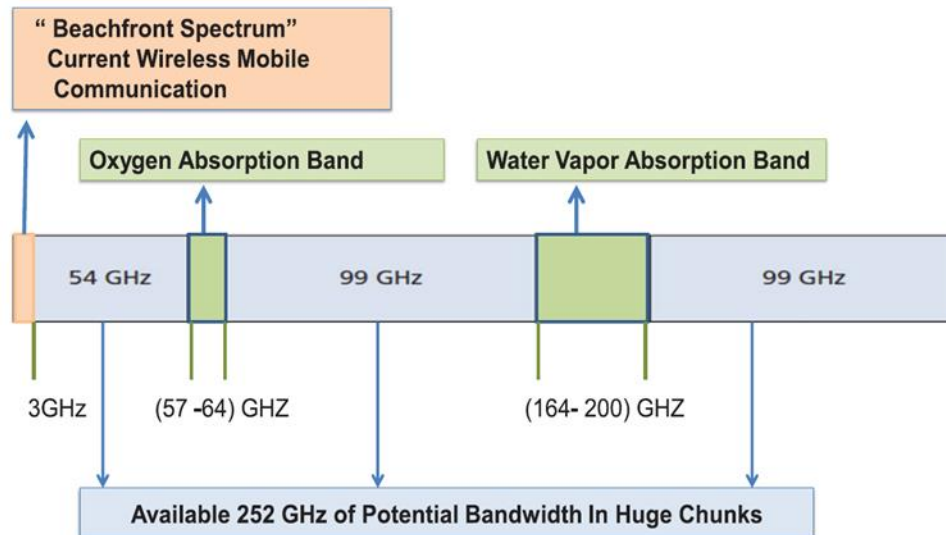
Los estándares de comunicación inalámbrica permiten crear un ambiente donde diversos fabricantes puedan operar entre sin ningún problema de operatividad. El éxito y la gran acogida de las tecnologías inalámbricas no solo se debe a la simplicidad y practicidad a la hora de uso, también está relacionado a los estándares de telecomunicaciones que garantizan la interoperabilidad global, algunos de los más importantes esfuerzos de estandarización están relacionados a las redes móviles o a las redes de datos, por ejemplo:

- GSM
- UMTS
- LTE
- IEEE 802.11
- IEEE 802.15
- IEEE 802.22

Redes 5G

Las redes móviles de quinta generación pueden proporcionar altas tasas de transmisión (del orden de Gbps) con retardos extremadamente bajos, incrementos en la cantidad de usuarios y aumentos en la calidad de servicio comparado a los actuales estándares 4G.

Además, 5G proporciona un escenario ideal para el surgimiento de nuevos servicios y aplicaciones multimedia. En el trabajo (Agiwal, 2016) son descritas algunas de las principales características diferenciadoras de 5G. Iniciando por los cambios en el red de acceso de radio (RAN) la cual explora nuevos horizontes en el espectro de radio, i.e., ondas milimétricas (ver Figura).



Otros avances tecnológicos de la tecnología 5G que ayudan a mejorar la experiencia y aumentar la eficiencia en el uso del espectro y el espacio son: diseño de antenas direccionales, algoritmos de beamforming que permiten modificar el diagrama de radiación de las antenas y los sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Mas detalles de el método MAC y los esquemas de multiplexado son discutidos en (Agiwal, 2016).

Redes inalámbricas de sensores (WSN)

Las redes inalámbricas de sensores se están convirtiendo en una parte integral de los procesos del ser humano en el futuro cercano ya que tienen aplicaciones en una amplia variedad de campos, e.g., salud, seguridad, militar, monitoreo ambiental, domótica, etc. (Ahmad, Ahmad, Rehmani, & Hassan, 2015). Las redes WSN son redes colectivas, donde los sensores individuales considerando sus capacidades de detección/medición y sus capacidades de procesamiento cooperan para de forma cooperativa comunicar datos hacia un sistema de control principal (Modieginyane, Letswamotse, Malekian, & Abu-Mahfouz, 2018). Así, los sensores deben tener la capacidad de ajustarse de forma cooperativa a las funcionalidades que rigen la política de la WSN. Una red WSN está formada por dos tipos de nodos: sensores que son dispositivos distribuidos dotados de elementos de medición de variables o actuación y que se distribuyen en un determinado ambiente; y un coordinador que actúa como elemento central de control de la red y es el encargado de captar todos los datos enviados por sensores. Antenas

Las antenas son otro aspecto investigado en este proyecto ya que estas juegan un papel fundamental en el buen desempeño de un sistema inalámbrico. En el libro de Balanis de 2005 son mostrados los principales aspectos de operación de las antenas y se presentan las principales antenas usadas en los sistemas inalámbricos haciendo un detallado análisis de cada una de estas.

6. Objetivo General y Objetivos específicos:

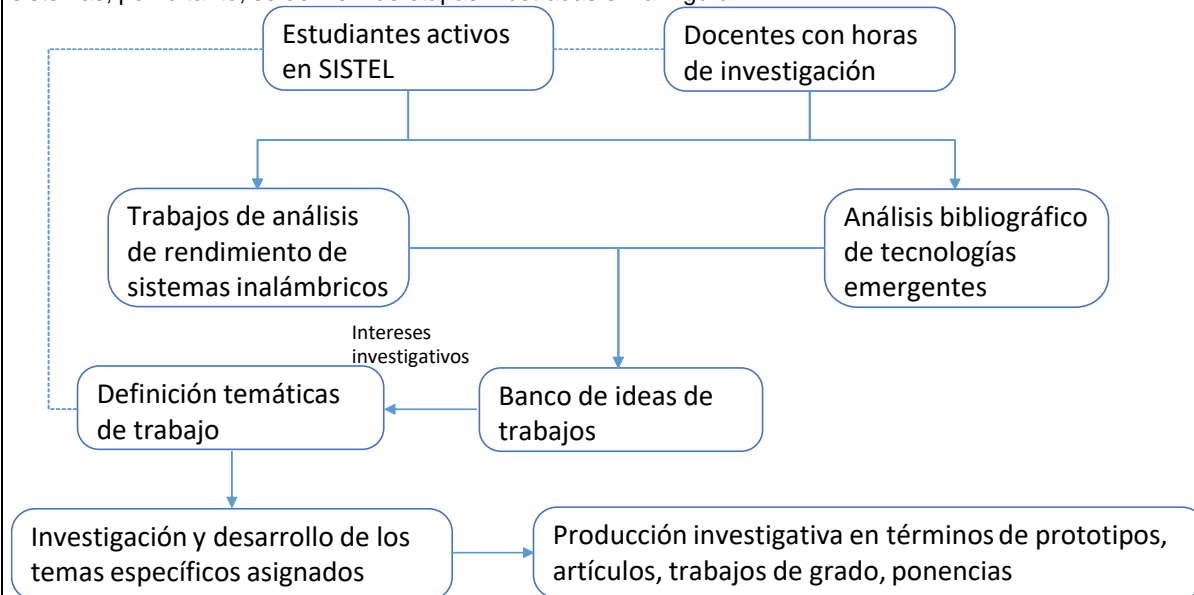
Analizar y mejorar el rendimiento de los sistemas de comunicación inalámbricos mediante el desarrollo de nuevos métodos o prototipos de comunicación que permitan optimizar los recursos disponibles en términos de hardware, software, energía y espectro radioeléctrico.

Objetivos Específicos

- Identificar los principales avances y desafíos en el área de las comunicaciones inalámbricas mediante análisis bibliográficos relacionados a los temas asociados a los sistemas inalámbricos.
- Analizar las características de operación de los sistemas de comunicación inalámbrica actual para compararlos con las nuevas tendencias en comunicación inalámbrica.
- Realizar análisis de rendimiento de los sistemas de comunicación inalámbrica para entender las limitaciones que presentan en cuanto a ancho de banda, adaptabilidad al ambiente cambiante, consumo energético, escalabilidad y confiabilidad.
- Proponer estrategias cognitivas en los dispositivos y sistemas inalámbricos con la finalidad de optimizar los recursos disponibles en términos de espectro, energía y ancho de banda

7. Metodología:

La metodología de este proyecto tiene el objetivo de incentivar las habilidades investigativas de los alumnos del programa de Telecomunicaciones y además permitir desarrollos en el área de las comunicaciones que ayuden a mejorar el rendimiento de los sistemas inalámbricos y dar un mejor uso a los diversos recursos asociados a estos sistemas, por lo tanto, se definen las etapas mostradas en la Figura 2.



En cuanto a los recursos de hardware y software usados para el desarrollo del proyecto se requieren, estaciones de cómputo para el laboratorio de radiocomunicaciones (como no se dispone de estas, se usaran temporalmente las disponibles en el laboratorio de Cisco. Además se requieren dispositivos radios definidos por software y otros dispositivos programables:

- Substratos dieléctricos
- 6 módulos SDR que permitan transmisión y recepción
- 10 estaciones de cómputo con mínimo Core i5, 8GB RAM y 1TB de disco
- 20 Nodos Sensores Inalámbricos
- 10 modulos ESP8266
- Demás elementos necesarios

Impacto esperado

Los resultados que se pretenden conseguir con el desarrollo del proyecto son los siguientes:

- Un buen desarrollo en la gestión, ejecución y evaluación general del proyecto a través del cumplimiento de los objetivos planteados.
- Analizar el funcionamiento y el rendimiento de los sistemas de comunicación inalámbricos para identificar problemas asociados a estas redes.
- Proponer metodologías en redes inalámbricas que permitan la localización y rastreo de objetos (tracking) en ambientes exteriores e interiores.
- Implementar funcionalidades cognitivas en redes inalámbricas de sensores para disminuir el consumo energético aumentando así el tiempo de vida de las baterías de alimentación de cada sensor.
- Implementar funcionalidades cognitivas en redes WSN y WLAN para aumentar la coexistencia de dispositivos en la banda abierta ISM de 2.4 GHz.
- Implementar funcionalidades cognitivas para permitir a redes o usuarios inalámbricos actuar como usuarios secundarios a fin de explotar los canales en otras bandas de usuarios primarios sin afectar en ningún modo el rendimiento de estos últimos.

- Proponer investigaciones para familiarizar a los integrantes del semillero con el uso de radio definido por software en aras de disminuir el uso de hardware y promover más el uso de algoritmos software de procesamiento digital de señal.

8. Avances realizados:

Actualmente en el contexto del semillero se realizan los siguientes trabajos investigativos relacionados a la búsqueda de sistemas inalámbricos más eficientes, específicamente, se está trabajando en el desarrollo de antenas para aplicaciones en la banda de las comunicaciones celulares y para televisión digital terrestre. En el contexto de las redes WSN, se están realizando trabajos para la localización de objetos en ambientes indoor (interiores) y se están desarrollando mecanismos para el control de la potencia de transmisión (TPC) a fin de disminuir el consumo energético de los nodos sensores.

Es importante resaltar que este F-IN-02 describe una agrupación de proyectos o trabajos de investigación que realizan varios estudiantes o grupos de estudiantes. Cada vez que se termine uno de estos trabajos se generara un F-IN-03 como informe final. A seguir se enumeran describen algunos trabajos ya finalizados que serán descritos más detalladamente es sus respectivos F-IN-03:

- Selección adaptativa de potencia de transmisión considerando el LQI.

Además, algunos proyectos de investigación que se encuentran en curso son:

- Radio receptor de señales para la banda VHF usando el dispositivo RLL2832U
- Transmisión de espectro ensanchado de secuencia directa usando la tecnología de Radio Definido por Software.
- Sistema de monitoreo de la localización de vehículo motorizado para acciones antirrobo de activación o desactivación remota mediante acceso inalámbrico móvil.
- Implementación de un escenario de pruebas GPON FTTH para el laboratorio de Telecomunicaciones de las Unidades Tecnológicas de Santander – UTS.
- Monografía de Antenas Inteligentes: características, técnicas, aplicaciones y desafíos técnicos futuros.

9. Resultados esperados:

Los resultados que se esperan con este proyecto son: a) la identificación por parte de los integrantes del semillero de los principales problemas o desafíos que enfrentan las comunicaciones inalámbricas para dar continuidad a los nuevos requerimientos de servicio y al aumento en la cantidad de usuarios; b) el estudio de las nuevas tecnologías que permiten mejorar los sistemas inalámbricos desde sus diversos ámbitos; c) proponer métodos, algoritmos, metodologías o prototipos fundamentados en las nuevas tendencias o avances en el área de comunicaciones inalámbricas para mejorar los servicios que se prestan o el rendimiento de las redes y sistemas de comunicación inalámbrica actuales; y d) generar documentos en términos de formatos de grado, artículos, posters u otros donde se expliquen los conceptos usados para el desarrollo de los diversos trabajos propuestos en el semillero.

10. Cronograma:

A seguir se presentan los cronogramas asociados a este proyecto, el primero tiene que ver con las actividades generales para llevar a cabo el proyecto y el segundo se relaciona a los trabajos individuales que deben realizar los estudiantes, es posible que el tiempo sea extendido defendiendo de la complejidad del tema asignado y del compromiso de los involucrados en el desarrollo del tema asignado. (ver Fig. 3 y 4)

Actividades semillero	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10
Reuniones docentes y alumnos										
Reuniones semillero										
Trabajos de análisis de rendimiento de sistemas inalámbricos										
Análisis bibliográfico de tecnologías										
Definición de temáticas de trabajo										
Redacción del informe de resultados										

Actividades trabajo específico	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4
Reuniones semillero				
Investigación bibliografica del tema asignado				
Desarrollo de los temas específicos asignados				
Implementacion del prototipo o metodologia				
Redacción del producto investigativo				

12. Bibliografía:

- Agiwal, M. (2016). Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 18, NO. 3,.
- Ahmad, A., Ahmad, S., Rehmani, M. H., & Hassan, N. U. (2015). A survey on radio resource allocation in cognitive radio sensor networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 888-917.
- Akyildiz, I. F., Lee, W. Y., Vuran, M. C., & Mohanty, S. (2008). A survey on spectrum management in cognitive radio networks. IEEE Communications Magazine.

Cordeiro, C., Challapali, K., Birru, D., & Shankar, S. (2005). IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios. In First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2005, (págs. 328-337).

Domenico, A., Strinati, E. C., & Benedetto, M. G. (2010). A survey on MAC strategies for cognitive radio networks. IEEE Communications surveys & tutorials, 21-44.

Hossain, E. N. (2015). Evolution and future trends of research in cognitive radio: a contemporary survey. Wireless Communications and Mobile Computing, 1530-1564.

Joshi, G., Nam, S., & Kim, S. (2013). Cognitive radio wireless sensor networks: applications, challenges and research trends. Sensors, 11196-11228.

Mitola, J., & Maguire, G. Q. (1999). Cognitive radio: making software radios more personal. IEEE personal communications, 13-18.

Modieginyane, K. M., Letswamotse, B. B., Malekian, R., & Abu-Mahfouz, A. M. (2018). Software defined wireless sensor networks application opportunities for efficient network management: A survey. Computers & Electrical Engineering, 274-287.

Molisch, A. F. (2011). Wireless communications. John Wiley & Sons.

Wang, B., & Liu, K. R. (2010). Advances in cognitive radio networks: A survey. IEEE Journal of selected topics in signal processing, 5-23.

Zhang, Z., Long, K., & Wang, J. (2013). Self-organization paradigms and optimization approaches for cognitive radio technologies: a survey. IEEE Wireless Communications, 36-42.

(1) Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE)

(2) PA: Plan de Aula, PI: Proyecto integrador, TG: Trabajo de Grado, RE: Reda