



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES.**

**TEMA: SIMULACIÓN DEL DESPLIEGUE DE REDES BAJO EL
ESTANDAR 802.11 ah (WIFI HALOW) PARA APLICACIONES
IOT.**

AUTOR: GUADALUPE RAMOS JUAN CARLOS.

DIRECTOR: ING. VEGA CHRISTIAN.

SANGOLQUI

2017



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "SIMULACIÓN DEL DESPLIEGUE DE REDES BAJO EL ESTANDAR 802.11 ah (WIFI HALOW) PARA APLICACIONES IOT" realizado por el señor JUAN CARLOS GUADALUPE RAMOS, ha sido revidado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor JUAN CARLOS GUADALUPE RAMOS para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 19 de Diciembre del 2016

Ing. Christian Vega.

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, JUAN CARLOS GUADALUPE RAMOS, con cédula de identidad N° 0604136820, declaro que este trabajo de titulación "SIMULACIÓN DEL DESPLIEGUE DE REDES BAJO EL ESTANDAR 802.11 ah (WIFI HALOW) PARA APLICACIONES IOT." ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 09 de Diciembre del 2016

Juan Carlos Guadalupe Ramos

0604136820



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, JUAN CARLOS GUADALUPE RAMOS, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "SIMULACIÓN DEL DESPLIEGUE DE REDES BAJO EL ESTANDAR 802.11 ah (WIFI HALOW) PARA APLICACIONES IOT." cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 09 de Diciembre del 2016

Juan Carlos Guadalupe Ramos

0604136820

DEDICATORIA

La presente Tesis es dedicada especialmente a mis padres Ramón Vicente y Lourdes Marilú, por ser unas excelentes personas, ejemplo a seguir de superación y perseverancia, durante mi vida han sido mi guía para conseguir todos los objetivos propuestos y me han brindado una buena formación que me ayudado a que sea una persona de bien, segura de sí misma, decidida y con alta autoestima.

A mis hermanos Mónica Alexandra y Ramón Fernando por aconsejarme y ayudarme en los momentos necesarios de mi vida y por al apoyo e interés puesto para que culmine con éxito el presente proyecto de grado.

AGRADECIMIENTO

A Dios y la Madre Dolorosa del Colegio por llenar mi vida de dicha y bendiciones, permitiéndome tener a mis padres y hermanos quienes me brindaron su aliento y apoyo constante para poder culminar con éxito mis estudios y por ende este proyecto.

A mis maestros y compañeros quienes contribuyeron en mi formación, en especial a mi Director Ing. Christian Vega, que gracias a su disposición y sus conocimientos han sabido guiarme como profesor y como amigo para la realización y culminación del presente trabajo.

Angie Johanna quien me ha demostrado siempre su apoyo incondicional.

Para todas estas personas gracias de todo corazón.

INDICE DE CONTENIDO

Contenido	
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	¡Error! Marcador no definido.
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
INDICE DE CONTENIDO	vii
INDICE DE TABLAS	x
INDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
SIGLAS Y ABREVIATURAS	xv
CAPITULO I	1
INTRODUCCION	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Antecedentes	3
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
CAPITULO II	6
EL ESTANDAR 802.11 ah (WiFi-Halow)	6
2.1 Introducción al Estándar 802.11 ah	6

2.2	Usos del Estándar 802.11 ah.....	7
2.3	Arquitectura	9
2.3.1	Capa Física	9
2.3.2	Capa MAC.....	15
2.4	Internet de las Cosas IoT.....	29
2.5	Aplicaciones para 802.11 ah - Smart City.....	31
2.5.1	Salud.....	32
2.5.2	Petrolera.....	33
2.5.3	Agricultura	34
2.6	Relación con otros estándares	35
2.7	Generalidades de seguridad.....	37
CAPITULO III.....		39
SIMULACIÓN DEL ESTANDAR 802.11 AH		39
3.1	Canal Inalámbrico.....	39
3.1.1	Desvanecimiento.....	40
3.1.2	Modelado del canal inalámbrico	42
3.2	Simulación del estándar IEEE 802.11 ah.....	47
3.2.1	Parámetros generales	47
3.2.2	Estructura del Programa	48
3.3	Resultados Obtenidos.....	57
3.3.1	Simulación MODELO A.....	57
3.3.2	Simulación MODELO B.....	61
3.3.3	Simulación MODELO C.....	65
3.4	Análisis de resultados:.....	69

CAPITULO IV.....	72
MARCO LEGAL EN EL ECUADOR.....	72
4.1 Ley Especial de Telecomunicaciones.....	72
4.2 Plan Nacional de Frecuencias	79
4.3 Atribución.....	79
4.4 Derechos y Obligaciones del Usuario	80
CAPITULO V.....	80
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
5.1 CONCLUSIONES.....	81
5.2 RECOMENDACIONES.....	82
BIBLIOGRAFÍA.....	83
ANEXOS.....	1

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Velocidad de datos para un canal de 2 Mhz.....	14
Tabla 2 Clasificación de modelos	42
Tabla 3 Condiciones Modelo A.....	57
Tabla 4 Datos Ingresados Modelo A	57
Tabla 5 Condiciones Modelo B.....	61
Tabla 6 Datos Ingresados Modelo B	61
Tabla 7 Condiciones Modelo C.....	65
Tabla 8 Datos Ingresados Modelo C	65
Tabla 9 Comparación de resultados.....	69

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Red Inteligente	8
Figura 2 Red de backhaul	9
Figura 3 Canalización IEEE 802.11 ah en USA	11
Figura 4 Espectro especificado en la Canalización IEEE 802.11	12
Figura 5 Estructura AID.....	16
Figura 6 Diagrama de segmentación de página.....	19
Figura 7 Entrega de datos enlace ascendente y descendente	24
Figura 8 Comparación de la cabecera MAC	25
Figura 9 Formato de la trama NDP ACK.....	27
Figura 10 Velocidad de intercambio de tramas	28
Figura 11 Internet de las Cosas	30
Figura 12 Smart City	32
Figura 13 Salud Inteligente	33
Figura 14 Industria Petrolera.....	34
Figura 15 Agricultura Inteligente	35
Figura 16 Mimo ac	37
Figura 17 Etapas de un sistema de comunicación inalámbrico	39
Figura 18 Desvanecimiento plano y desvanecimiento selectivo	40
Figura 19 Sistema MIMO 2x2.....	43
Figura 20 Parámetros AoA y AoD	45
Figura 21 Escenario MU-MIMO.....	46
Figura 22 Matriz MU-MIMO.....	47
Figura 23 Diagrama de bloques del sistema 802.11 ah	48
Figura 24 Diagrama de flujo simulación del sistema 802.11 ah	49
Figura 25 Ingreso de datos Modelo A	58
Figura 26 Datos Ingresados Modelo A.....	59
Figura 27 Enlace Tx1 y Tx2 – Rx1 y Rx2 Usuario 1.....	59

Figura 28 Enlace Tx1 y Tx2 – Rx1 y Rx2 Usuario 2.....	60
Figura 29 Enlace Tx1 – Rx1 Usuario 3	60
Figura 30 Resultados Modelo A.....	61
Figura 31 Ingreso de datos Modelo B	62
Figura 32 Datos Ingresados Modelo B.....	63
Figura 33 Enlace Tx1 y Tx2 – Rx1 y Rx2 Usuario 1.....	63
Figura 34 Enlace Tx1 y Tx2 – Rx1 y Rx2 Usuario 2.....	64
Figura 35 Enlace Tx1 – Rx1 Usuario 3	64
Figura 36 Resultados Modelo B.....	65
Figura 37 Ingreso de datos Modelo C	66
Figura 38 Datos Ingresados Modelo C.....	67
Figura 39 Enlace Tx1 y Tx2 – Rx1 y Rx2 Usuario 1.....	67
Figura 40 Enlace Tx1 y Tx2 – Rx1 y Rx2 Usuario 2.....	68
Figura 41 Enlace Tx1 – Rx1 Usuario 3	68
Figura 42 Resultados Modelo C.....	69
Figura 43 Comparación Data Rate.....	70
Figura 44 Comparación Capacidad del Canal	70
Figura 45 Comparación Eficiencia del Sistema.....	71
Figura 46 Niveles de Organización	75

RESUMEN

Las Telecomunicaciones han evolucionado de una manera que jamás hubiéramos imaginado. Al principio, los avances se daban lentamente. Hoy en día la innovación y la comunicación se producen a gran velocidad. El rápido desarrollo de Internet hace necesario diseñar sistemas de comunicaciones que operen en diferentes espectros inalámbricos como alternativa a los sistemas de acceso inalámbrico altamente congestionados, considerando principalmente contar con una tecnología inalámbrica de bajo consumo de energía, confiable y disponible. Wi-Fi ha evolucionado de conexiones lentas a una tecnología conectiva increíblemente versátil y juega un papel integral en la vida de cientos de millones de personas, que buscan la mejora casi constantemente. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE ha desarrollado modificaciones al estándar original IEEE 802.11 para lograr mayores prestaciones y utilidades expuestas en el estándar 802.11ah. En el presente proyecto se recopila, procesa y sistematiza la información referente al estándar 802.11 ah (WiFi-HaLow), detallando características propias de la capa física y capa MAC. Se desarrolla la simulación del estándar 802.11ah utilizando el software computacional MATLAB, obteniendo resultados que permiten evaluar su funcionamiento y rendimiento para su futuro despliegue. Finalmente se analiza el marco legal y regulatorio vigente en el Ecuador referente al estándar 802.11, presentando las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el desarrollo del presente proyecto.

Palabras Claves:

- **IOT: INTERNET DE LAS COSAS**
- **WIFI HALOW**
- **802.11 AH**
- **ESTÁNDAR IEEE**
- **REDES INALÁMBRICAS**

ABSTRACT

Telecommunications has evolved in a way we would never have imagined. At first, progress was slow. Today innovation and communication occur at a high speed. The rapid development of the Internet makes it necessary to design communications systems that operate in different wireless spectra as an alternative to highly congested wireless access systems, mainly considering a reliable, available and low power wireless technology. Wi-Fi has evolved from slow connections to incredibly versatile connective technology and plays an integral role in the lives of hundreds of millions of people, who are looking for almost constant improvement. The IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers has developed modifications to the original IEEE 802.11 standard to achieve greater benefits and utilities in the 802.11ah standard. This project compiles, processes and systematizes information regarding the 802.11 ah (WiFi-HaLow) standard, detailing characteristics of the physical layer and MAC layer. It develops the simulation of the 802.11ah standard using the MATLAB computer software, obtaining the results that allow the operation its operation and the performance for its future deployment. Finally, it analyzes the legal and regulatory framework in force in Ecuador regarding the 802.11 standard, presenting the conclusions and recommendations obtained in the development of this project.

Keywords:

- **IOT: INTERNET OF THINGS**
- **WIFI HALOW**
- **802.11 AH.**
- **STANDARD IEEE**
- **WIRELESS NETWORK**

SIGLAS Y ABREVIATURAS

ARPANET:	Advanced Research Projects Agency Network.
IoT:	Internet de las cosas.
INEC:	Instituto Nacional de Estadísticas y Censo.
TICs:	Tecnologías de la Información y Comunicación.
Wi-Fi:	Wireless Fidelity.
M2M:	Maquina a Maquina.
IEEE:	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
LAN:	Red de Área Local.
WLAN:	Red de Área Local Inalámbrica.
PHY:	Capa física.
MAC:	Control de Acceso al Medio.
AP:	Punto de Acceso.
Kbps:	Kilobites por segundo.
OFDM:	Multiplexación por división de frecuencia ortogonal.
MiMo:	Múltiple entrada Múltiple salida.
MCS:	Secuencia Espacial.
NSS:	Número de flujos espaciales.
NDBPS:	Numero de bits de datos por símbolo.
IG:	Intervalo de guarda.
ISI:	Interferencia entre símbolo.

AID:	Identificador único.
TIM:	Identificador de tráfico.
IE:	Elemento de información.
PS:	Ahorro de energía.
TWT:	Tope del tiempo de vigilia.
PND:	Paquete de datos nulo.
EDCA:	Canal de acceso distribuido mejorado.
RAW:	Ventana de acceso restringido.
RA:	Asignación de recursos.
UDI:	Indicación de subida de datos.
FC:	Control de tramas.
QoS:	Calidad de servicio.
HT:	Alto rendimiento.
ID:	Campo de duración.
ACK:	Acuse de recibo.
CTS:	Clear to send.
SIFS:	Espacio corto entre tramas.
WWW:	World Wide Web.
RFID:	Identificador de radio frecuencia.
NFC:	Comunicación de corto alcance.
Ts:	Tiempo de símbolo.
Tc:	Tiempo coherente.

CAPITULO I

INTRODUCCION

Las Telecomunicaciones han evolucionado de una manera que jamás hubiéramos imaginado. Al principio, los avances se daban lentamente. Hoy en día la innovación y la comunicación se producen a gran velocidad. Desde su humilde comienzo como Advanced Research Projects Agency Network (ARPANET) en 1969, que interconectaba unos pocos sitios, hoy se predice que Internet interconectará 50 000 millones de objetos para el año 2020.

En la actualidad, el Internet proporciona conexiones globales que hacen posible que exista la navegación web, los medios sociales y los dispositivos móviles inteligentes. El rápido desarrollo de Internet hace necesario diseñar sistemas de comunicaciones que operen en diferentes espectros inalámbricos como alternativa a los sistemas de acceso inalámbrico altamente congestionados. (Lapuente, 2013)

El despliegue de dispositivos medidores inteligentes inalámbricos está aumentando y se espera que este tipo de dispositivos inunden el mercado en un futuro próximo que compiten por el mismo espectro inalámbrico. Existe un desafío importante de encontrar tecnologías apropiadas y de bajo costo para el acceso a servicios de banda ancha ya no solo en las zonas urbanas y urbano-marginales sino más bien en toda la expansión incluso a las zonas rurales. (S. Aust, 2012)

El Internet de las Cosas (IoT) supone un avance con gran impacto sobre la sociedad y los negocios. Más de mil millones de usuarios de todo el mundo utilizan Internet tanto en su vida laboral como en la social y gracias a la tecnología wireless se han ampliado las posibilidades de interacción con la Red a cualquier lugar en cualquier momento. (Network, 2013)

1.1 Descripción del problema

Según datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), luego del Censo de población de noviembre de 2010, el 66,70% de la población ecuatoriana reside en zonas urbanas; la gran demanda poblacional de servicios eléctricos y de telecomunicaciones, frente a la cantidad de habitantes, ambientes de oficina, unidades educativas, universidades, edificios y viviendas, genera la necesidad de buscar soluciones que permitan optimizar no solo los espacios, sino también los servicios de redes y telecomunicaciones, propendiendo así a un eficaz y eficiente ahorro de energía eléctrica; sin que este ahorro de energía eléctrica implique que la prestación de servicios de banda ancha se vea afectado. (INEC, 2010)

En la actualidad, el Ecuador tiene una densidad Nacional de líneas Activas de 113,12%, donde se distribuyen en Terminales Publicas con el 0,65%, Líneas Activas de Datos 5,4%, Líneas Activas de Voz 107.1 % a Enero del 2014, todos estos datos distribuidos en las distintas operadoras existentes. Sin especificar la distribución por provincias, pero se asume que la mayor demanda se concentra en las ciudades de Quito y Guayaquil. (ARCOTEL, 2014)

Con una población total de 14.483.499, es necesario identificar soluciones tecnológicas que permitan optimizar los servicios de modo que el acceso de la población urbana a las TICs sea más eficiente energéticamente y eficaz tecnológicamente, además, de las ventajas que estas representan para el desarrollo local e inclusión de los ciudadanos, tal como lo señala la Constitución de la República del Ecuador, la Ley Especial de Telecomunicaciones al manifestar el derecho al Servicio Universal y el plan nacional del Buen Vivir. (INEC, 2010)

1.2 Antecedentes

Las Tecnologías de la Información y Comunicación se han convertido en una herramienta indispensable para el intercambio de información, la convergencia de servicios como televisión, telefonía, mensajería entre otros hacia una única red de comunicaciones hace que la Internet sea parte fundamental de nuestras vidas. Las redes inalámbricas cuentan con una multitud de ventajas, desde resolver el problema del espacio hasta reducir los costos de instalación, ya que se prescinde de los cables. Sin duda alguna, esta y otras muchas ventajas han hecho que en la actualidad esta tecnología no falte en empresas y casas e incluso en establecimientos públicos. (Asensio, 2006)

Wi-Fi ha evolucionado de conexiones lentas a una tecnología conectiva increíblemente versátil y juega un papel integral en la vida de cientos de millones de personas, que buscan la mejora casi constantemente. El rápido desarrollo de Internet de las Cosas (IoT) y las comunicaciones Máquina a Máquina (M2M) hacen necesario diseñar sistemas de comunicación que operen en diferente espectro inalámbrico como alternativa a los sistemas de acceso inalámbrico altamente congestionados. (S. Aust, 2012)

Los avances en la tecnología de red inalámbrica y la mayor estandarización de los protocolos de comunicación permiten recoger datos de los sensores y dispositivos inalámbricos identificables en casi cualquier lugar en cualquier momento. A medida que la información y las personas están cada vez más conectadas, la tecnología sirve como herramienta de colaboración y toma de decisiones en un mundo donde converge lo físico con lo digital. (Network, 2013)

Es de gran importancia contar con una tecnología inalámbrica de bajo consumo de energía, confiable y disponible que se pueda utilizar en cualquier lugar y en cualquier momento sin agotar la batería de los dispositivos, logrando una cobertura satisfactoria y una mayor velocidad de transmisión de datos.

IEEE ha desarrollado un estándar de LAN inalámbrica (WLAN), 802.11ah que define un sistema inalámbrico que funciona en las bandas de frecuencia por debajo de 1 GHz, bandas que son exentas de licencia. Gracias a las características de propagación favorables de los espectros de baja frecuencia, 802.11ah puede proporcionar mayor rango de transmisión en comparación con los convencionales 802.11 WLAN que funcionan a 2,4 GHz y 5 GHz.

802.11ah puede ser utilizado para diversos fines, incluyendo redes de sensores de gran escala, punto de acceso, y al aire libre Wi-Fi para la descarga de tráfico celular. El Estándar 802.11ah (WiFi - HaLow) aprobado y puesto en ejecución a principios del 2016 ha adoptado algunas mejoras para cumplir con los requisitos de los sistemas esperados.

Estas mejoras incluyen características de ahorro de energía, el apoyo de un gran número de estaciones, mecanismos eficientes de acceso y mejoras de rendimiento, por lo que promete ser la herramienta que facilitará el acceso a la banda ancha a toda la Sociedad de la Información en el Ecuador.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Simular el estándar 802.11 ah (WiFi-HaLow), mediante el estudio de bandas, frecuencias, zonas de cobertura, regulación vigente, a fin de posibilitar el acceso a las TICs acorde con el plan nacional del buen vivir.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Recopilar, procesar y sistematizar la información referente al estándar 802.11 ah (WiFi-HaLow), protocolos, topologías, seguridades que permitan sustentar la investigación.
- Simular utilizando el software Matlab el estándar 802.11 ah, creando escenarios ideales y no ideales, obteniendo resultados como Data Rate, capacidad del canal y eficiencia del sistema que permitan evaluar su funcionamiento y rendimiento para su futuro despliegue.
- Analizar el marco legal y regulatorio vigente en el Ecuador de 802.11 ah y las potencialidades para el mejoramiento de la Sociedad de la Información.

CAPITULO II

EL ESTANDAR 802.11 ah (WiFi-Halow)

2.1 Introducción al Estándar 802.11 ah

El estándar IEEE 802.11 surge en el año 1997 definiendo las características de una Wireless Local Area Network (WLAN), actualmente operan a 2.4 GHz y 5 GHz, convirtiéndose en una de las tecnologías inalámbricas más populares en ambientes interiores gracias a su alta velocidad de datos, fácil implementación y bajo costo.

IEEE 802.11ah es un estándar emergente de LAN inalámbrica (WLAN), define un sistema inalámbrico que funciona en bandas inferiores a 1 GHz exentas de licencia. Gracias a las características de propagación favorables de los espectros de baja frecuencia, 802.11ah puede proporcionar un alto rango de transmisión en comparación con las redes WLAN 802.11 convencionales que funcionan a 2,4 GHz y 5 GHz. (Weiping Sun, 2013)

802.11ah puede ser utilizado para diversos fines, incluyendo redes de sensores a gran escala, punto de acceso de rango extendido y WiFi al aire libre para descarga de tráfico celular. La utilización excesiva y los despliegues irregulares de las redes han dado lugar a la saturación de los espectros de 2,4 GHz y 5 GHz.

IEEE 802.11ah con el objetivo de mejorar el rendimiento del sistema ha diseñado una nueva capa física (PHY) basado en el IEEE 802.11ac, que es otra modificación de la familia 802.11 creado para WLAN de alto rendimiento. Aparte

del diseño de la capa PHY, también realizó mejoras en la capa Medium Access Control (MAC) para aumentar el rendimiento del sistema.

Por las características favorables de propagación de un espectro de frecuencia baja, el sistema 802.11ah proporciona un gran alcance de transmisión en comparación con las actuales redes WLAN 802.11 que operan a 2,4 GHz y 5 GHz brindando así grandes propiedades de cobertura de bajo costo y convirtiendo al sistema 802.11ah altamente atractivo para las grandes redes de sensores como por ejemplo una red inteligente, donde el número de dispositivos que participan podría ser mucho mayor que la del actual sistema de 802.11.

Los dispositivos de destino en las redes de sensores es probable que sean dispositivos que funcionen con baterías, y por lo tanto, la característica de ahorro de energía se vuelve mucho más crítico para el rendimiento de 802.11ah. Con el fin de hacer frente a tales requerimientos esperados, algunas mejoras se han considerado en el diseño de la capa MAC de 802.11ah en términos de ahorro de energía. (Weiping Sun, 2013)

2.2 Usos del Estándar 802.11 ah

Las características de 802.11ah lo hacen atractivo para diversos fines. Las categorías generales de los casos de uso incluyen las redes de sensores, redes WiFi de alcance extendido. Cada vez más empresas de servicios públicos comienzan a desplegar un gran número de sensores inalámbricos alrededor de sus infraestructuras de servicios públicos. (Vegt, 2011)

Dichas redes se denomina redes inteligentes, cuyas funciones son supervisar el estado en tiempo real de varios servicios públicos e informar a la empresa y los usuarios finales de su estado de uso, por ejemplo, gas, agua y consumos de energía. El número de dispositivos que participan en la red

inteligente es mucho más alta que en las redes tradicionales WLAN 802.11, y el rango de transmisión requerida de los dispositivos involucrados también es mucho más amplio que en las tradicionales redes WLAN 802.11. (David E. Cypher, 2014)

En sistemas de 1 GHz, debido a una mejorada característica de propagación, la cobertura de transmisión puede ser mucho más amplia, lo que permite soportar más dispositivos en una sola red. IEEE 802.11ah ha incluido la aplicación de sensores y medidores como uno de los principales casos de uso. (Vegt, 2011)

La Figura 1 muestra un escenario simple de una red inteligente. En el escenario propuesto, existe un punto de acceso AP 802.11ah colocado al aire libre, y las estaciones, tales como medidor de gas, medidor de potencia, y el contador de agua, están desplegados en la zona interior. Los dispositivos de automatización distribuida, cuya función es aumentar la fiabilidad y la utilización de la infraestructura existente, se despliegan en las regiones exteriores. En la parte exterior, se requiere la cobertura del punto de acceso hasta 1 km, mientras que la tasa de datos se asume de 100 kbps para este caso de uso. (Halasz, 2010)

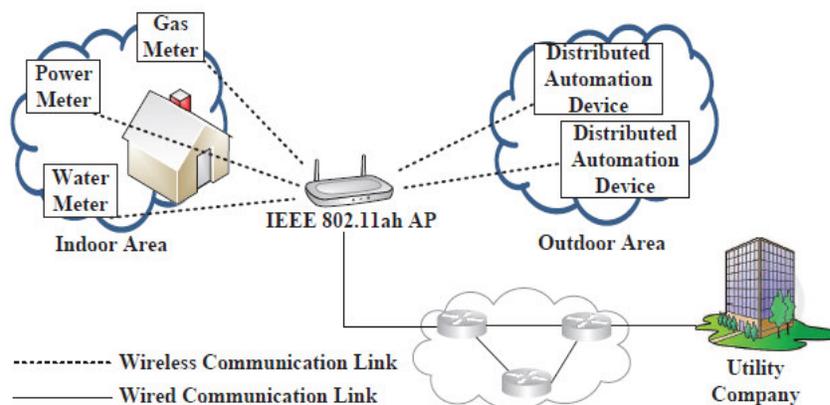


Figura 1 Red Inteligente

Fuente: (A.C., 2010)

Para la red entre los sensores y recolectores de datos se utilizara IEEE 802.15.4g que proporciona un enlace para el sensor principal y IEEE 802.11ah va a proporcionar el enlace inalámbrico para acomodar el tráfico generado por los sensores. (Std., 2012)

La gran cobertura de los sistemas de 1 GHz permiten realizar un diseño sencillo a la red para enlazar los puntos de acceso IEEE 802.11ah como por ejemplo utilizar una red inalámbrica en forma de malla. La Figura 2 ilustra una red de backhaul (retorno) inalámbrico, compuesto por IEEE 802.11ah como punto de acceso.

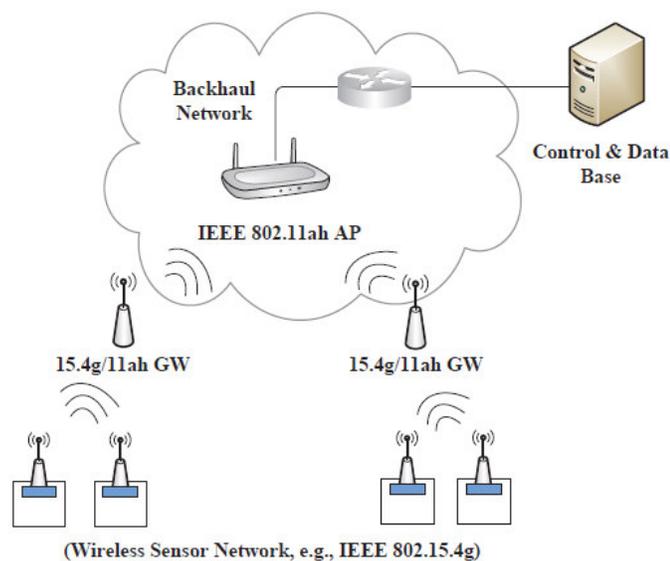


Figura 2 Red de backhaul

Fuente: (A.C., 2010)

2.3 Arquitectura

2.3.1 Capa Física

La capa física PHY de 802.11ah se basa en la operación y funcionamiento de su antecesor IEEE 802.11ac, obteniendo una mejora en su canalización y brindando varios tipos de modos de transmisión. Como una evolución del estándar 802.11n, para lograr mayores velocidades de datos, 802.11ac ofrece 80 MHz, 160 MHz en adición a los 20 MHz y 40 MHz de ancho de banda de canal del 802.11n.

IEEE 802.11ah define anchos de banda para canales de 2 MHz, de 4 MHz, 8 MHz y 16 MHz, define al canal de 1 MHz con el propósito de brindar una cobertura extendida. (Weiping Sun, 2013)

2.3.1.1 Canalización

Las bandas menores a 1 GHz disponibles son diferentes dependiendo la administración de cada país, y por lo tanto, 802.11ah IEEE ha definido la canalización sobre la base de los respectivos espectros inalámbricos disponibles en varios países, principalmente en los Estados Unidos, Corea del Sur, China, Europa, Japón y Singapur entre otros.

Se expone la canalización en los Estados Unidos en la Figura 3, se toma una banda de 26 MHz entre 902 MHz y 928 MHz disponible en los EE.UU., en consecuencia, el número de canales disponibles de 1MHz es de 26. Con el fin de lograr un mayor ancho de banda, 802.11ah mantiene el mismo método de unión de canales como en 802.11n y 802.11ac, es decir, varios canales más estrechos adyacentes se unen entre sí para producir un canal más ancho.

Como resultado tenemos que 1 canal de 2 MHz se compone de dos canales de 1MHz adyacentes. Del mismo modo, los anchos de banda más amplios son conformados a través de la unión de canales. El canal más ancho conformado en los EE.UU. es un canal de 16 MHz, que es también el ancho de banda más amplio en el sistema 802.11ah. (A.C., 2010)

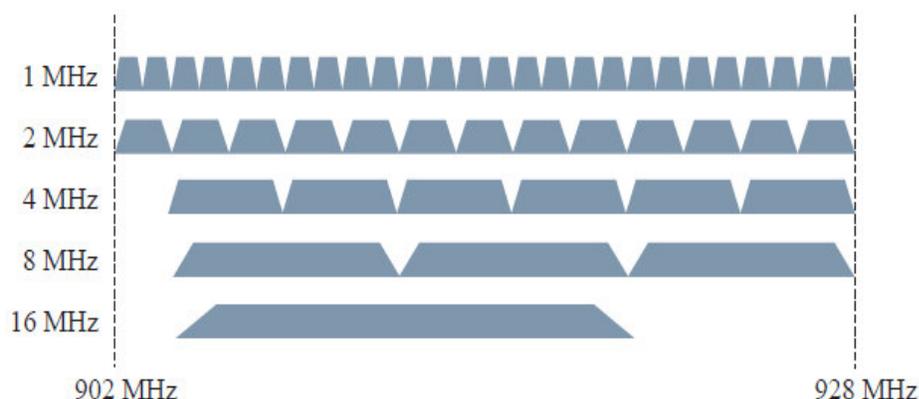


Figura 3 Canalización IEEE 802.11 ah en USA

Fuente: (A.C., 2010)

La canalización en Corea del Sur, que inicia a partir de 917,5 MHz y termina en 923,5 MHz define el ancho de banda de 6 MHz. La razón de la frecuencia de 0,5 MHz de desplazamiento es para reducir la posible interferencia mutua con sistemas heredados inalámbricos a frecuencias más bajas. (S. Aust, 2012)

Los espectros disponibles definidos en la canalización 802.11ah para Europa, China, Japón son desde 863 a 868 MHz, 755 a 787 MHz, 916,5 a 927,5 MHz, respectivamente, y en Singapur, los espectros especificados se componen de dos bandas de frecuencias no contiguas, es decir, 866 a 869 MHz y 920 a 925 MHz, además, en Japón, también hay un desplazamiento de 0,5 MHz, ya que las regulaciones del espectro japonés especifican las frecuencias centrales del espectro en lugar de inicio y fin de frecuencia. (ARIB, 2008)

Estos espectros son canalizados en base a las mismas reglas que se muestra en el caso de los EE.UU., es decir, dividir las bandas de radio en múltiples canales de 1 MHz y lograr mayor ancho de banda de canal a través de la unión de canales.

Sin embargo, ya que varios países involucrados tienen diferentes regulaciones y espectros disponibles, el ancho de banda de canal máximo obtenido por la unión de canales podría ser diferente.

En consecuencia, los anchos de banda de canal máximo en Corea del Sur, Europa, China, Japón, Singapur serían de 4 MHz, 2 MHz, 8 MHz, 1 MHz y 4 MHz, respectivamente.

La Figura 4 muestra los espectros menores a 1 GHz especificados en la canalización 802.11ah con respecto a los países involucrados. (Weiping Sun, 2013)

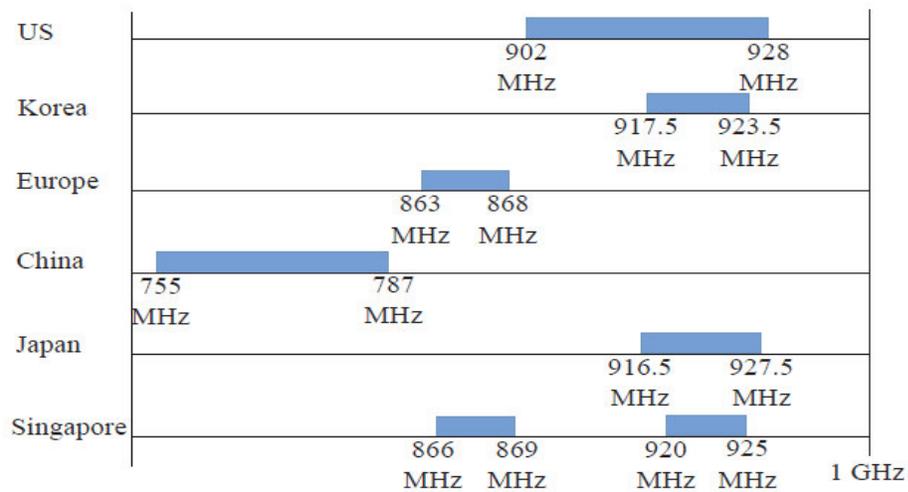


Figura 4 Espectro especificado en la Canalización IEEE 802.11ah

Fuente: (A.C., 2010)

2.3.1.2 Modos de Transmisión

En 802.11ah los canales de 1 MHz y 2 MHz han sido adoptados como anchos de banda de canal común de tal manera que las estaciones de 802.11ah tienen que soportar las recepciones de ellos. El diseño de la capa PHY se puede clasificar en 2 categorías.

La primera categoría es el modo de transmisión para un ancho de banda de canal igual o mayor 2 MHz y la segunda categoría de transmisión para un ancho de banda de canal de 1 MHz

Para el primer modo de transmisión mayor o igual a 2 MHz, 4 MHz, 8 MHz y 16 MHz la capa PHY está diseñada usando las técnicas de la capa PHY de 802.11ac. Técnicas como la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) y de entrada múltiple salida múltiple (MIMO) han sido adoptados, y el enlace descendente MIMO multiusuario (DLMU-MIMO) que se introduce en primer lugar en el 802.11ac, también es empleado por el sistema 802.11ah.

En la tabla 1 se muestra las correspondientes velocidades de los datos utilizando el canal de 2 MHz con una única secuencia espacial (MCS). (NSS) representa el número de flujos espaciales, que es 1 en este caso. (NSD) denota el número de subportadoras utilizadas en la transmisión de datos. En el canal de 2 MHz, la transformada rápida de Fourier (FFT) se utiliza para generar un símbolo OFDM, el número de subportadoras utilizadas para la transmisión de datos es de 52. (NDBPS) indica el número de bits de datos por símbolo, que es calculado por el número de bits de datos por subportadora por símbolo multiplicado por el número de subportadoras de datos. (Weiping Sun, 2013)

Data Rate representa las velocidades de datos correspondientes, que se calculan como el número de símbolos por segundo multiplicado por NDBPS. Un intervalo de guarda (IG) es una parte de un símbolo OFDM que contiene datos redundantes, que se usa para prevenir la interferencia entre símbolos (ISI) en una transmisión OFDM. En el caso de la adopción de IG corto de 4 us, la duración de un símbolo OFDM se convierte en 36 us, mientras que, cuando se utiliza IG normal de 8 us, la duración del símbolo OFDM se convierte en 40 us. En consecuencia, las tasas de datos obtenidos mediante la adopción de los resultados a corto IG son de aproximadamente el 11% de la tasa de datos obtenidos en comparación con el caso de la adopción de IG normal. (A.C., 2010)

Tabla 1

Velocidad de datos para un canal de 2 Mhz

MCS Index	Modulation	Code Rate	N_{SD}	N_{DBPS}	Data Rate (Mbps)	
					Normal GI	Short GI
0	BPSK	1/2	52	26	0.65	0.72
1	QPSK	1/2	52	52	1.3	1.44
2	QPSK	3/4	52	78	1.95	2.17
3	16-QAM	1/2	52	104	2.6	2.89
4	16-QAM	3/4	52	156	3.9	4.33
5	64-QAM	2/3	52	208	5.2	5.78
6	64-QAM	3/4	52	234	5.85	6.5
7	64-QAM	5/6	52	260	6.5	7.22
8	256-QAM	3/4	52	312	7.8	8.67
9	256-QAM	5/6			Not valid	

Fuente: (A.C., 2010)

Para el canal de 1 MHz, el número de subportadoras de datos por símbolo OFDM es 24, es menor de las subportadoras de datos en canales de 2 MHz. La razón es que cuando dos canales más estrechos adyacentes se unen entre sí para producir un canal más ancho, el número de subportadoras de

datos se convierten en más del doble ya que la banda de guarda entre los dos canales unidos se puede quitar.

El objetivo de diseño de canal de 1 MHz es ampliar el alcance de transmisión. Con este fin, un nuevo índice de MCS, que se llama MCS 10, se incluye para la transmisión de largo alcance, además de los MCS de 802.11ac. Este MCS no es más que un modo de MCS 0 con 2x repetición, por el que el rango de transmisión se puede ampliar desde la repetición de símbolos incrementando la fiabilidad de la transmisión inalámbrica aún más.

2.3.2 Capa MAC

Para el diseño de la capa MAC IEEE 802.11 ah ha mejorado algunas características en comparación con el existente 802.11 relacionadas con el soporte de gran número de estaciones, ahorro de energía, mecanismos de acceso al medio y mejoras de rendimiento. (Weiping Sun, 2013)

2.3.2.1 Soporte a un gran número de estaciones

En un sistema 802,11, un punto de acceso (AP) agrega un identificador (AID), a cada estación durante la etapa de asociación. En una red determinada, el AID es un identificador único, a través del cual el AP puede indicar sus estaciones asociadas. El número posible de estaciones asociadas a un punto de acceso se encuentra sobre las 2007 en relación al estándar 802.11 que limita la duración del mapa parcial de bits virtuales, indicador de tráfico (TIM) y elemento de Información (IE), donde cada bit indica la AID de la estación correspondiente. (IEEE, 2012)

El TIM IE se utiliza para apoyar la administración de energía en las estaciones. Un AP es probable que esté asociado con muchas más estaciones en relación al estándar 802.11, y por lo tanto, 802.11ah ha aumentado el número de soporte de estaciones para satisfacer los requisitos esperados.

Para aumentar el número de estaciones soportables una estructura jerárquica AID se ha definido para 802.11ah como se muestra en la Figura 5. Se compone de 13 bits con lo cual el número de estaciones que se puede expresar corresponde a $2^{13} - 1 = 8191$.

Se compone de cuatro niveles jerárquicos, página, bloque, sub-bloque y el índice de la estación en el sub-bloque. Es decir cada estación pertenece a un determinado sub-bloque, y cada sub-bloque pertenece a un determinado bloque. Del mismo modo, varios bloques forman una página, que es el nivel más alto que puede contener hasta 2048 estaciones.

Esta estructura jerárquica AID nos permite indicar más estaciones con una longitud dada de mapa de bits virtuales parcial. Por ejemplo, cuando tenemos que indicar múltiples estaciones, simplemente podemos incluirlos en un bloque o un sub-bloque y utilizar el ID de bloque o el ID de sub-bloque para indicarlo en lugar de incluir la totalidad del AID.

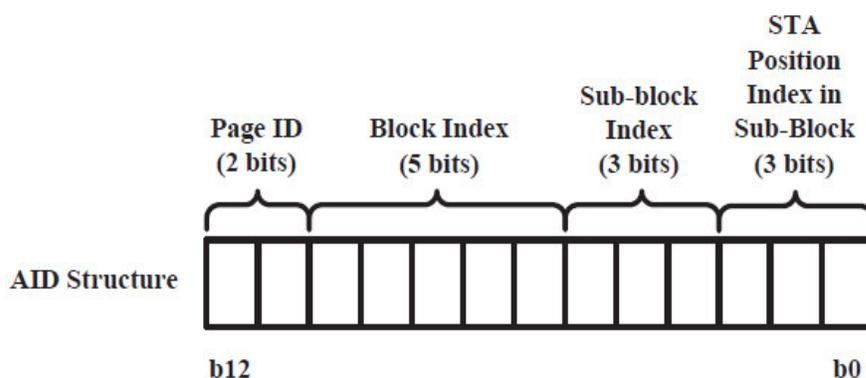


Figura 5 Estructura AID

Fuente: (A.C., 2010)

Existen estaciones con diferentes patrones de tráfico y diferentes localizaciones. Realizando la agrupación de estas estaciones de base con respecto a algunas propiedades específicas, el recurso inalámbrico podría utilizarse de manera más eficiente.

Como principio conocido, la estructura jerárquica puede ser adoptada para facilitar la agrupación, de manera que la característica de la estructura jerárquica AID, realiza la agrupación de las estaciones mucho más fácil. La agrupación puede ser utilizada para diversos fines, tales como mejoras de ahorro de energía, la asignación de recursos y el acceso eficiente al canal.

2.3.2.2 Ahorro de Energía

El estándar 802.11 define dos modos de administración de energía. En el modo activo una estación enciende continuamente sus componentes de radio es decir, permanece en estado de vigilia, de tal manera que detecta la señal entrante todo el tiempo y también puede transmitir y recibir señales.

Con el modo de ahorro de energía, una estación alterna entre el estado despierto y el estado dormido, donde la estación en el estado dormido apaga los componentes de radio de manera que no puede detectar las señales entrantes en absoluto. Cuando hay paquetes destinados a una estación en el estado de dormido, el AP detiene los paquetes hasta que la estación entre al estado despierto y solicite la entrega del tráfico en espera.

En el sistema 802.11, el AP transmite periódicamente la trama beacon, que contiene TIM IE. El campo de mapa de bits virtuales parcial en el TIM IE transmite la información de la existencia de tráfico en espera con destino a las estaciones de ahorro de energía.

Una estación de ahorro de energía necesita despertar periódicamente para recibir la trama beacon, en base a la cual se puede comprobar la

existencia de los paquetes almacenados temporalmente destinados a sí mismo. Si se reconoce la existencia de tráfico en espera, la estación transmite una trama de control de ahorro de energía (PS) para el AP y solicitar la entrega de los paquetes almacenados temporalmente. (Weiping Sun, 2013)

Después de terminar la recepción de los paquetes almacenados temporalmente, la estación de ahorro de energía puede volver a su estado dormido. Sin embargo, varios fenómenos indeseables pueden ocurrir, cuando existe un gran número de estaciones de una red. Una es que la longitud de la trama beacon podría llegar a ser muy larga debido a la excesiva duración del mapa parcial de bits virtuales en TIM IE.

Si la cantidad del tráfico en el buffer es muy grande para ser alojado dentro de un intervalo de la trama beacon algunas estaciones de ahorro de energía inevitablemente se mantienen en estado de vigilia hasta completar las recepciones de sus paquetes almacenados temporalmente. (A.C., 2010)

Con el fin de resolver los problemas antes mencionados, 802.11ah introduce un mecanismo llamado TIM y segmentación de página que funcionan de la siguiente manera. En primer lugar, un punto de acceso divide todo el mapa parcial de bits virtuales correspondiente a una página en múltiples segmentos de página, y cada trama beacon se encarga de llevar el estado de almacenamiento en el búfer sólo de un segmento de página determinada. En consecuencia cada estación de ahorro de energía se despierta en el momento de transmisión de la trama beacon que lleva la información de espera de los segmentos que pertenece.

Un nuevo IE llamado segmento de recuento se define para entregar la información de segmentación, como por ejemplo el número resultante de los segmentos después de la segmentación de página y el límite de cada segmento de página.

DTIM beacon es una trama que incluye la entrega TIM (DTIM), es decir, que es un tipo especial de TIM IE utilizada para indicar el estado de espera del grupo de paquetes abordo, es decir, difusión y multidifusión paquetes. Después de una transmisión DTIM beacon, el AP transmite todo el grupo de paquetes en espera. En general, todas las estaciones de ahorro de energía se despiertan para recibir la trama beacon DTIM para que no se pierda el grupo de paquetes en espera.

Con el fin de permitir que las estaciones de ahorro de energía conozcan de antemano la información de segmentación, el segmento de IE está contenido en cada trama beacon DTIM que es transmitido periódicamente durante varios intervalos de la trama beacon. La Figura 6 ilustra el uso de la TIM y la segmentación de página.

Se presenta una página que se compone de 32 estaciones y cada página se divide en 4 segmentos de página con un intervalo DTIM beacon que consta de 4 intervalos de trama beacon en este ejemplo. (Weiping Sun, 2013)

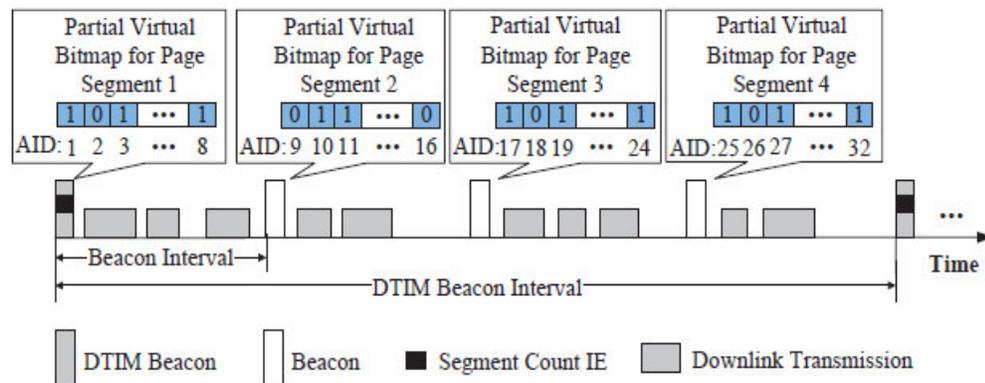


Figura 6 Diagrama de segmentación de página

Fuente: (A.C., 2010)

Cada segmento de página lleva una trama beacon secuencial que se utiliza para dar cabida a la entrega de tráfico del segmento de página correspondiente. Las estaciones de ahorro de energía se despiertan a tiempo para recibir la DTIM beacon y luego a través de la información transmitida en el segmento de recuento pueden reconocer qué beacon contiene el mapa parcial de bits virtuales y al segmento de página que pertenecen.

Posteriormente, las estaciones de ahorro de energía pueden volver al estado dormido y despertar de nuevo en el momento que deben consultar la transmisión de la trama beacon. Como resultado, la longitud de cada trama beacon puede acortarse debido a que el campo de mapa parcial de bits virtual de la TIM IE en este caso sólo indica un cierto segmento en lugar de toda la página.

Después de la recepción de la DTIM beacon, las estaciones de ahorro de energía sólo pueden estar despiertas para la trama beacon con sus segmentos afiliados y permanecer en estado dormido durante los otros periodos de la trama beacon, a través del cual se puede ahorrar el consumo innecesario de energía durante el estado de vigilia excesiva.

En un sistema 802.11ah, las estaciones de ahorro de energía se pueden clasificar en dos clases. La primera clase se llama estación TIM, que es similar al concepto de modo de ahorro de energía del estándar 802.11. Es decir, la información del paquete de espera de las estaciones está incluida en el TIM IE.

Por otra parte, especialmente para dispositivos de baja potencia como sensores, 802.11ah define otro modo de ahorro de energía, en donde la información de almacenamiento del búfer no se incluye en TIM es decir, no hay necesidad que se despierte periódicamente para la recepción de trama beacon.

La estación que funciona en este modo se denomina estación no TIM, y al operar como una estación no TIM, la estación puede ahorrar aún más el consumo de energía en comparación con las estaciones TIM, ya que puede mantenerse en estado dormido durante un período más largo sin preocuparse de la recepción de la trama beacon. (Evgeny Khorov, 2015)

2.3.2.3 Canal de Acceso

802.11ah ha introducido nuevos mecanismos de acceso de canal para las estaciones de TIM y estaciones no TIM. Para las estaciones no TIM, el AP en cualquier momento al despertarse puede permitir que se le solicite transmitir tráfico de espera del enlace descendente o transmitir tráfico del enlace ascendente.

Sin embargo, podría ser mucho tráfico incontrolable en estas estaciones no TIM, que probablemente produzcan una degradación del rendimiento de la red. Por ejemplo, si un gran número de estaciones despiertan al mismo tiempo, la contención entre estas estaciones podría tener resultados como retrasos de acceso al canal excesivos o incluso colisiones.

Para hacer que el tráfico de las estaciones no TIM se encuentre bajo control, 802.11ah AP puede dejar que se despierten en un momento predefinido para que el tiempo de atención de estas estaciones no TIM y sus intentos de acceso al canal se separen temporalmente. Para intercambiar la información de la llamada de sincronización entre el AP y las estaciones, 802.11ah ha definido un IE llamado Tope Tiempo de vigilia (TWT), que permite controlar la petición de asociación y la respuesta de asociación de las tramas.

En TWT IE, hay cuatro campos, el tipo de solicitud, el tiempo de vigilia de destino, la duración mínima de atención y el intervalo de despertar, que se utilizan para determinar cuándo y con qué frecuencia una estación despierta para realizar transmisiones en el enlace descendente o en el enlace ascendente.

Cuando hay paquetes para una estación no TIM en espera, el AP puede enviar a la estación una trama de control llamado Paquetes de Datos Nulo (PND) que defina el marco de paginación y su tiempo de vigilia de destino, permitiendo obtener la información del estado de almacenamiento en el búfer.

Si la estación reconoce la existencia de los paquetes almacenados temporalmente después de recibir con éxito el marco de paginación PND, puede entonces solicitar la entrega de los paquetes almacenados temporalmente mediante la transmisión de una trama PS. Si el marco de paginación NDP no se transmite por el AP en el momento de despertarse la estación puede transmitir la trama por el enlace ascendente si el canal está inactivo.

Para las estaciones de TIM, además de los mecanismos de acceso existentes basados en la contención del canal, por ejemplo, Canal de Acceso Distribuido Mejorado (EDCA), 802.11ah ha centrado sus esfuerzos en la definición de un nuevo tipo de mecanismo de acceso al canal libre de contención, que está motivado por el aumento del nivel de contención y la gravedad de los problemas de terminales ocultos debido al aumento del número de estaciones que participan en una red. (A.C., 2010)

Un concepto llamado ventana de acceso restringida (RAW) se ha propuesto. Un Raw es un tiempo de duración compuesto de varias ranuras de tiempo. Un AP puede indicar a una estación de TIM un intervalo de tiempo durante el cual se permite a la estación transmitir o recibir paquetes. RAW puede ser utilizado para diversos fines.

Por ejemplo, se puede asignar a un grupo de estaciones de TIM que tienen paquetes de datos de enlace ascendente o enlace descendente o ser reservado para los marcos de control, por ejemplo, PS. Además, con el fin de indicar los parámetros relacionados con la asignación de RAW, por ejemplo, la hora de inicio RAW, la duración de RAW, así como las ayudas de las estaciones a las que se asigna el RAW, se propone conjunto de parámetros RAW (RPS) IE. El RPS IE se incluye opcionalmente en una trama beacon, y cada estación puede reconocer el RAW asignado a través de RPS.

Es más eficiente asignar ranuras de tiempo sólo a las estaciones que están preparadas para transmitir o recibir, en lugar de todas las estaciones de TIM. Con el fin de permitir que el AP pueda gestionar de forma adaptativa la asignación de RAW, aparece un nuevo marco de gestión denominada asignación de recursos (RA), que contiene la información de programación de cada estación, a través del cual la estación puede aprender el intervalo de tiempo durante el cual se le permite llevar a cabo el acceso al medio para la transmisión en el enlace ascendente o en el enlace descendente.

El marco AR es transmitido al comienzo de cada RAW y todas las estaciones asignadas a ese RAW tienen que despertar para recibirlo. 802.11ah añade un campo especial llamado Indicación de subida de datos (UDI) en el marco de PS. La UDI se utiliza para indicar la existencia de la trama de enlace ascendente de una estación, y una estación sin trama de enlace descendente congestionada, puede enviar el PS con el campo de la UDI igual a 1, para solicitar la ranura de tiempo para su transmisión de enlace ascendente. Después de recibir el PS y la UDI PS, el punto de acceso puede determinar cómo programar las transmisiones de enlace ascendente y descendente de manera eficiente, y la información de programación está contenida en el marco de la AR.

La Figura 7 ilustra los procedimientos de entrega de paquetes del enlace ascendente y del enlace descendente mediante la aplicación del concepto RAW. Durante el primer RAW, es decir, sin formato 1, el AP asigna a cada estación TIM un intervalo de tiempo para la transmisión PS. Denotamos el campo PS con UDI 1 para diferenciarlo de un marco PS normal. La estación con la AID 1, que no se encuentra congestionado con tráfico de enlace descendente, envía un UDI para solicitar recursos a tiempo para su transmisión de enlace ascendente, y las estaciones con AID 2, AID 3 y AID 5 tienen marcos PS normales para la transmisión durante el intervalo de tiempo asignado a excepción de la estación con AID 4.

El comportamiento inesperado de la estación con la AID 4 de no transmitir una trama PS normal, puede ocurrir debido a la operación asincrónica de las estaciones con su AP asociado o la recepción errónea de una trama beacon. Durante RAW 2, en primer lugar, el punto de acceso transmite una trama de RA para la entrega de la información de programación para las estaciones con la AID 1, la AID 2, la AID 3, y la AID 5, y después de ello, estas estaciones realizan la transmisión en el enlace ascendente o descendente durante los intervalos de tiempo asignados, respectivamente.

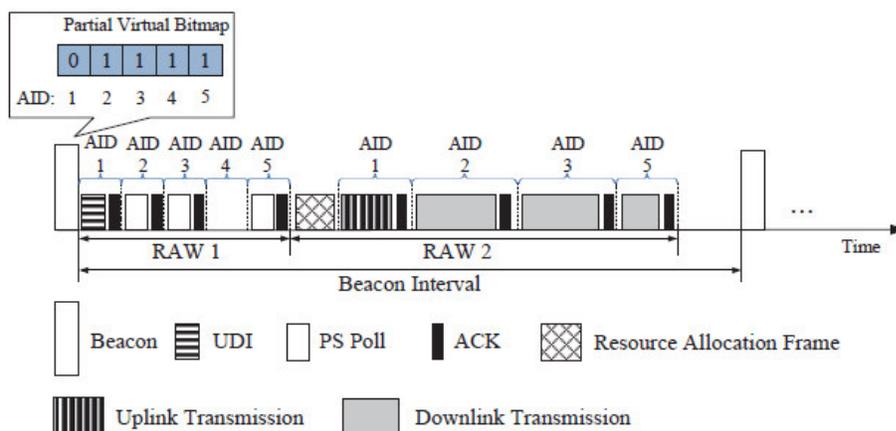


Figura 7 Entrega de datos enlace ascendente y descendente

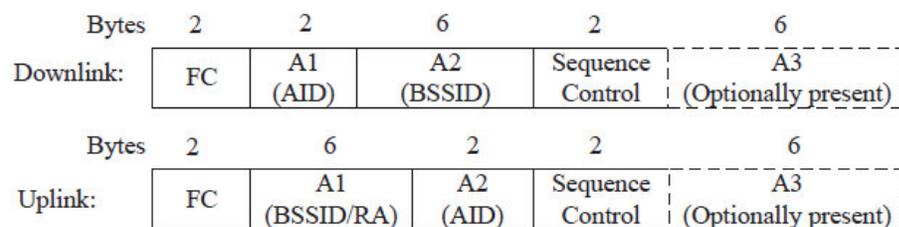
Fuente: (A.C., 2010)

2.3.2.4 Mejoras de Throughput

Se ha diseñado formatos de trama más compactos para reducir los gastos generales de protocolo, y en consecuencia, se cuenta con un formato más corto de cabecera MAC. La Figura 8 compara el formato corto de cabecera de MAC y el formato de la cabecera MAC 802.11.



(a) Legacy 802.11 MAC header format.



(b) 802.11ah short MAC header format.

Figura 8 Comparación de la cabecera MAC

Fuente: (A.C., 2010)

Para el enlace descendente, la dirección 1, que es la dirección MAC de destino en la cabecera MAC 802.11, se sustituye con AID de la estación de destino en el formato de la cabecera corta MAC. Del mismo modo, en el caso de enlace ascendente, la dirección 2, que es la dirección MAC de la estación de origen en el encabezado MAC 802.11, se sustituye con AID de la estación de origen en el encabezado MAC corta.

En la cabecera MAC corta, el campo de control de secuencia se mueve antes de campo de dirección 3. El campo de dirección 3 se incluye opcionalmente en la cabecera MAC corta y su inclusión se indica mediante el bit de indicación de Control de Tramas (FC).

Alguna información necesaria contenida en el campo calidad de servicio (QoS) y el campo de alto rendimiento (HT) se mueve al campo (SIG) en la cabecera PHY y las otras partes innecesarias se eliminan de tal manera que no hay QoS y campos HT presentes en la cabecera MAC corta. Otra cosa a tener en cuenta es que no hay un campo de duración ID en la cabecera MAC corta por lo que la detección de portadora virtual no funciona cuando se usa cabecera MAC corta.

Mediante la sustitución de los 6 bytes de dirección MAC con 2 bytes AID y la eliminación de duración / ID, calidad de servicio, y los campos HT, es posible ahorrar al menos 12 bytes de cabecera tanto en enlace ascendente y descendente.

Este tipo de cabecera MAC corta se debe utilizar después del procedimiento de asignación de la AID, y se diferencia de la cabecera MAC 802.11 mediante el establecimiento de un nuevo valor de versión del protocolo en el campo FC.

En el estándar 802.11, en el preámbulo de la cabecera MAC se incluye el acuse de recibo (ACK) y el campo de secuencia de verificación de trama (FCS). Con el fin de acortar la trama ACK, 802.11ah ha propuesto un nuevo formato ACK llamado paquete de datos nulo (NDP) en el que la cabecera de MAC y el campo FCS se eliminan de tal manera que la trama contiene sólo el campo de la cabecera de PHY, como se ilustra en la Figura 9. Además, el marco de NDP ACK se identifica por un valor reservado de MCS, que se indica en el campo SIG de la cabecera de PHY.



Figura 9 Formato de la trama NDP ACK

Fuente: (A.C., 2010)

IEEE 802.11 ah ha modificado otras tramas de control en el formato NDP para reducir la sobrecarga del protocolo, como el bloque ACK, Clear to send (CTS) y PS, estas tramas de control se indican con otros valores reservados en MCS.

En el estándar 802.11ah define un nuevo mecanismo de acceso al medio, eliminando el retardo de acceso al canal y la sobrecarga de la transmisión de ACK, aumentando el rendimiento. En la norma 802.11, el método de realimentación de un receptor puede ser solicitado por el transmisor a través del campo de indicación ACK. El campo de indicación ACK de 2 bits puede expresar 4 diferentes valores, tres de los cuales habían sido ya definidos para indicar métodos de retroalimentación como ACK normal, ACK de bloque, y sin respuesta, respectivamente, mientras que el último había sido reservado para uso futuro.

802.11ah define el valor reservado para indicar otro método de retroalimentación. Con este método, si el receptor tiene un marco de destino para el transmisor, puede notificar la recepción exitosa mediante la transmisión de su trama de datos en lugar del ACK o ACK de bloque. Del mismo modo, si el transmisor recibe correctamente las tramas de datos del receptor, puede responder con su trama de datos en lugar de otras tramas de control, y la brecha entre cada transmisión está limitada al espacio corto entre tramas (SIFS).

Este método se llama intercambio de tramas de velocidad. Se acelera el intercambio de tramas entre AP y las estaciones, ya que los retrasos generales

del ACK y de acceso de canal se eliminan. La Figura 10 ilustra un ejemplo de transmisiones secuenciales entre un punto de acceso y una estación usando el intercambio de tramas de velocidad.

Cuando un transmisor, es decir, una estación o AP, establece los bits de indicación ACK para solicitar una trama de datos como retroalimentación de transmisión en lugar de otros métodos de retroalimentación, el receptor correspondiente, es decir, AP o una estación, responde con las tramas de datos hasta que no hay paquetes para transmitir.

Mediante la aplicación de este método, se obtiene una ganancia de rendimiento por la reducción de gastos generales, el ahorro de energía de las estaciones es superior ya que en este caso, el tiempo para el estado despierto se reduce en comparación con las transmisiones de datos normales.

El esquema de intercambio de las tramas de velocidad es más eficaz cuando hay un número similar de paquetes en el enlace ascendente y en el enlace descendente, ya que la transmisión de ACK no podría ser sustituido a menos que existan más paquetes de datos disponibles.

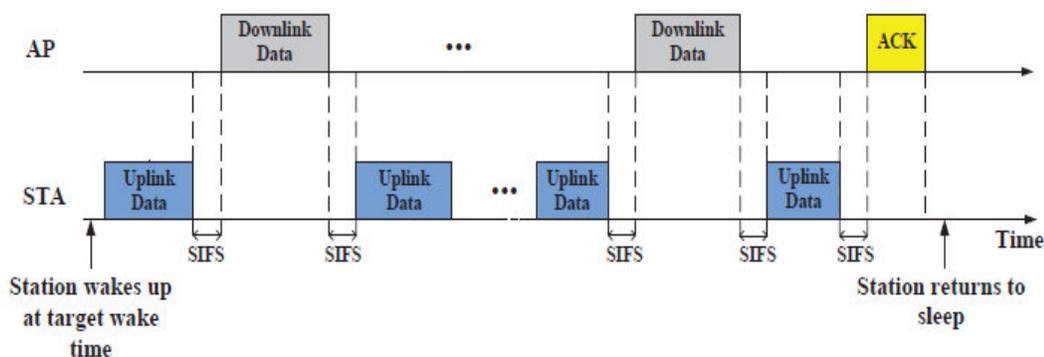


Figura 10 Velocidad de intercambio de tramas

Fuente: (A.C., 2010)

2.4 Internet de las Cosas IoT

Después de la red de redes World Wide Web, WWW y del Internet móvil, estamos inmersos en una tercera y potencialmente más disruptiva fase: el llamado Internet de las Cosas IoT. IoT hace referencia a un mundo conectado hasta el último extremo, donde objetos y seres físicos interactúan con entornos virtuales de datos en el mismo espacio y tiempo.

Soñamos con poder medir y controlar por completo nuestro entorno. Esto será posible usando la información extraída a través de millones de sensores que poblarán cada rincón de nuestro entorno y que podrán estar integrados en cualquier objeto de nuestra vida cotidiana. Sin embargo, conseguir esto va a requerir una estructura tremendamente compleja: Internet de las Cosas. Su planificación y ejecución están dando ya sus primeros pasos.

La introducción de redes de sensores inteligentes el adjetivo smart - inteligente, se usa con mucha profusión en el mundo tecnológico ya ha comenzado para las mismas cosas que ya se estaban midiendo con menos inteligencia: energía, transporte, procesos industriales, etc. Pero probablemente las aplicaciones más profundas, innovadoras y exitosas del IoT no existan aún ya que la plataforma tecnológica necesaria para que éstas vean la luz aún no está desarrollada por completo. (Network, Madrid Network, 2013)

Lo que sí parece claro es que todos los sectores económicos van a verse afectados de alguna u otra forma por este fenómeno y que Internet de las Cosas sí que va a ser claramente monetizable, al ofrecer servicios que pueden en principio, mejorar la calidad de vida de los usuarios, por los que estarían dispuestos a pagar.

Imaginemos una ciudad del futuro. Una ciudad inteligente en la que los teléfonos móviles abren puertas, los sensores detectan fugas en las cañerías y las vallas publicitarias cambian sus anuncios de acuerdo con el perfil de

consumidor de las personas que pasan por esa calle. Pequeños sensores que permiten medir la temperatura de una habitación o el tráfico de taxis por las calles o cámaras de seguridad que velan por la seguridad en los edificios.

Todo esto es el Internet de las Cosas IoT. Literalmente, consiste en que las cosas tengan conexión a Internet en cualquier momento y lugar. En un sentido más técnico, lo que da lugar a IoT es la integración de sensores y dispositivos en objetos cotidianos que quedan de esta manera conectados a Internet a través de redes fijas e inalámbricas. (Network, Madrid Network, 2013)

El hecho de que Internet esté presente al mismo tiempo en todas partes, permite que la adopción masiva de esta tecnología sea más factible. Dado su tamaño y coste, los sensores son fácilmente integrables en hogares, entornos de trabajo y lugares públicos. De esta manera, cualquier objeto es susceptible de ser conectado y “manifestarse” en la Red. Fuente: (Network, Madrid Network, 2013)

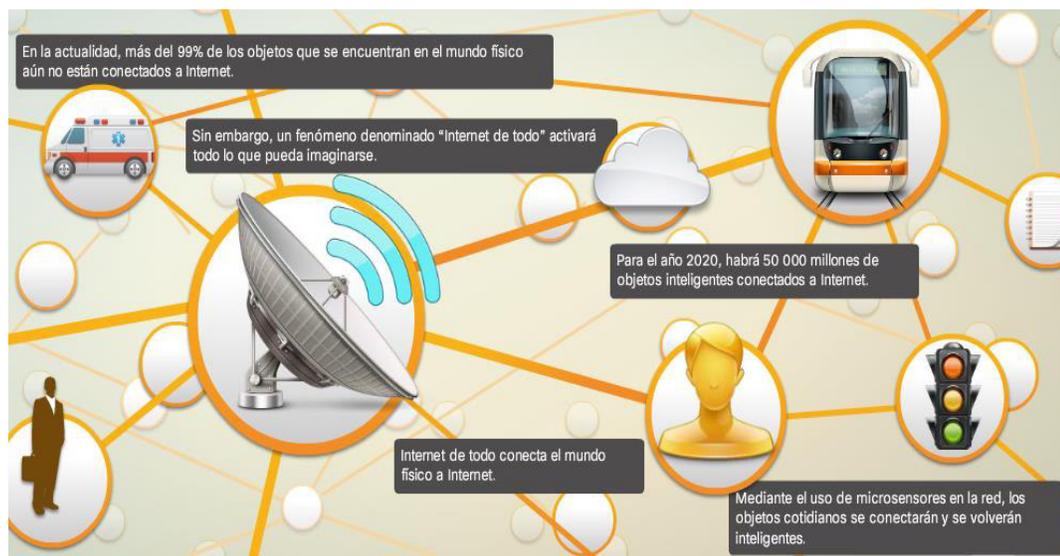


Figura 11 Internet de las Cosas

Fuente: (CISCO)

2.5 Aplicaciones para 802.11 ah - Smart City

Se define Smart City como aquella ciudad que usa las TIC para hacer que tanto su infraestructura crítica, como sus componentes y servicios públicos ofrecidos, sean más interactivos, eficientes y los ciudadanos puedan ser más conscientes de ellos.

Disponer de una Smart City ayuda a la gestión automática y eficiente de las infraestructuras y servicios urbanos, lo que redundará en la reducción del gasto público, la mejora de la calidad de los servicios prestados, la mejora de la información a los ciudadanos y la mejora en la toma de decisiones. Además, la propia plataforma Smart City constituye en sí una vía para la innovación, favoreciendo la incubación de nuevos negocios e ideas. (Telefónica, 2011)

Son muchos los tipos de iniciativas que se enmarcan dentro de un proyecto global de Smart City. Los ejes en los que suele incidir un proyecto de Smart City tienen que ver con la movilidad urbana, la eficiencia energética y en general, la gestión sostenible de los recursos, la gestión de las infraestructuras de la ciudad, el gobierno participativo y la seguridad pública así como con las áreas de salud, educación y cultura. Un objetivo de Smart City es tener una visión holística de la ciudad que permita ir desplegando servicios según prioridades sin que ello suponga tener silos de información que comprometan el desarrollo futuro de la Smart City y sus servicios. (Telefónica, 2011)

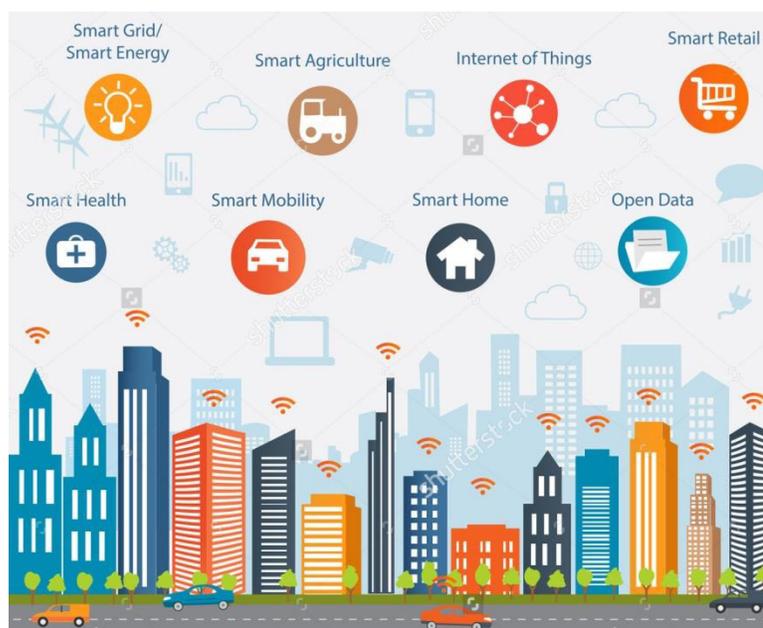


Figura 12 Smart City

Fuente: (Monicaodo)

2.5.1 Salud

En el área sanitaria existen y se desarrollan muchas aplicaciones, con la posibilidad de utilizar el teléfono celular con capacidades de sensor RFID como una plataforma para el monitoreo de los parámetros médicos y fármacos. Las enormes ventajas deben ser consideradas en primer lugar en la prevención y fácil control, teniendo un impacto fundamental en nuestro sistema social, y en segundo lugar en caso de accidentes y la necesidad de diagnóstico ad hoc.

La combinación de sensores, RFID, NFC, Bluetooth, ZigBee, 6LoWPAN, WirelessHART, ISA100, WiFi permitirá significativamente mejor medición y control de métodos de funciones vitales (temperatura, presión arterial, frecuencia cardíaca, los niveles de colesterol, glucosa en la sangre etc.). Se espera que se convierta en una tecnología de bajo costo y con soporte incorporado para la conectividad de red y monitoreo remoto. (Jurado Pérez, 2014)



Figura 13 Salud Inteligente

Fuente: (Wang, 2016)

2.5.2 Petrolera

La industria del Gas y el petróleo está utilizando arquitecturas escalables que consideran la posibilidad de plug-and-play ID nuevos métodos combinados con detección/accionamiento integración con la infraestructura de Internet de las Cosas, e integran el monitoreo inalámbrico personal petrolero en situaciones críticas en tierra o mar adentro, seguimiento de contenedores, seguimiento de los tubos de perforación, cadena, componentes, monitoreo y manejo de equipo fijo. (Jurado Pérez, 2014)



Figura 14 Industria Petrolera

Fuente: (TECPE, 2016)

2.5.3 Agricultura

Las regulaciones para la trazabilidad de los animales de agricultura y sus movimientos requieren el uso de las tecnologías, como mucho, haciendo posible la detección de tiempo real de los animales, por ejemplo durante los brotes de enfermedades contagiosas (Jurado Pérez, 2014)



Figura 15 Agricultura Inteligente

Fuente: (MEXICAMPO, 2015)

2.6 Relación con otros estándares

802.11ac es el antecesor y la actual evolución de la norma Wi-Fi, que promete ofrecer altas velocidades de datos y mantener significativamente mayor rendimiento y latencia inferior a los estándares existentes para Wi-Fi.

También se denomina como "Gigabit Wi-Fi", ya que puede ofrecer velocidad de datos máxima de 6,93 Gbps en modo de ancho de banda de 160MHz. Siendo la velocidad inalámbrica generalmente el producto de tres factores:

- Canal de Banda Ancha (Channel Bandwidth)
- Técnicas de modulación (Modulation Techniques)
- Número de Flujos (Number of Spatial Streams)

El concepto principal de la introducción de 802.11ac es la solución al problema de mejorar las tasas de datos y reducir la latencia, brindando para esto las siguientes características:

- Operación en la banda de 5GHz obligatorio.
- Orden Superior de Modulación.
- Multi MIMO de usuario (MU-MIMO).
- RTS / CTS con indicación de Ancho de Banda.
- Compatibilidad hacia atrás (versiones anteriores de 802.11).

802.11ac obligatoriamente debe operar solamente en la banda 5 GHz, ya que se ha reducido relativamente interferencia y un mayor número de canales que no se solapan disponibles en comparación con la banda de 2,4 GHz. 802.11ac permite mayor ancho de banda por ende mayores velocidades de datos que deben alcanzarse; 802.11ac introduce 80MHz y 160MHz en ancho de banda de canal, además de 20Mhz y 40Mhz en 802.11n.

En cuanto a la modulación 802.11ac aumentó la configuración de la constelación a 256-QAM que aumenta la velocidad de datos en un 33% con respecto a 802.11n. Cada símbolo representa 8 bits codificados.

802.11ac es el primer estándar Wi-Fi que introdujo MIMO multiusuario (Superior MIMO Order). En MU-MIMO, el AP puede servir a múltiples STA (estaciones) simultáneamente.

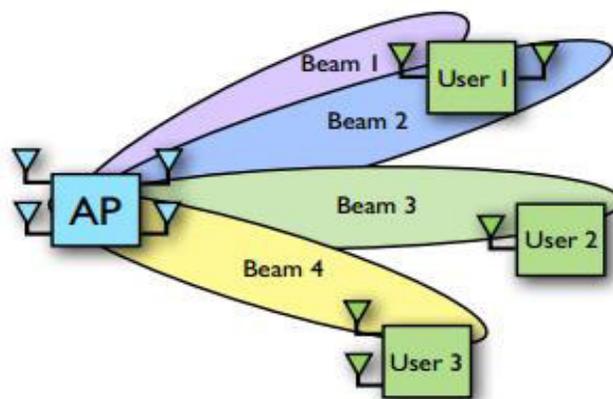


Figura 16 Mimo ac

Fuente: (TECHNOLOGY)

Su punto de acceso (AP) es capaz de utilizar sus recursos de antena para transmitir múltiples tramas para diferentes clientes, todo al mismo tiempo y en el mismo espectro de frecuencia; en el modo multi-usuario, la enmienda 802.11ac soporta hasta cuatro flujos que sirven a cuatro usuarios diferentes al mismo tiempo. El AP tiene que saber la información de estado de canal de todos los usuarios con el fin de disminuir la cantidad de interferencia inter-usuario generada por los múltiples flujos simultáneos.

2.7 Generalidades de seguridad

Los algoritmos actuales de seguridad se siguen prestando para el estándar 802.11 ah con las características tales como:

- Confidencialidad de datos
- Autenticación
- Protección de Repetición.

Los dispositivos pueden ser de bajo costo y tienen capacidades limitadas en términos de poder de cómputo, almacenamiento disponible y fuga de energía; no siempre se puede asumir que se tiene una base informática de confianza ni un generador de autenticación aleatorio de alta calidad.

Estas restricciones limitan la elección de los algoritmos y protocolos criptográficos e influyen en el diseño de la arquitectura de seguridad debido a que el establecimiento y mantenimiento de las relaciones de sesión entre los dispositivos deben abordarse con cuidado.

Un mecanismo se basa en la criptografía de clave simétrica y utiliza claves que son proporcionados por los procesos de capas superiores. El mecanismo supone una implementación segura de las operaciones de cifrado y almacenamiento seguro y auténtico del material clave.

El mecanismo criptográfico proporciona combinaciones particulares de los siguientes servicios de seguridad:

- a) La confidencialidad de los datos: La garantía de que transmite la información sólo se da a conocer a las partes para la que está destinada.
- b) La autenticidad de los datos: Aseguramiento de la fuente de la información transmitida y de ese modo que la información no se ha modificado en tránsito.
- c) La protección de repetición: Se brinda la seguridad de que la información no se ha duplicado.

CAPITULO III

SIMULACIÓN DEL ESTANDAR 802.11 AH

3.1 Canal Inalámbrico

El medio por el cual viajan las señales desde un transmisor a un receptor, siendo el medio de transmisión el aire. En este tipo de comunicaciones la señal enviada se ve afectada por fenómenos como el ruido, pérdida de la trayectoria, dispersión, reflexión, múltiples reflexiones, absorción, entre otros. Los fenómenos se generan debido a la presencia de obstáculos en el canal inalámbrico.

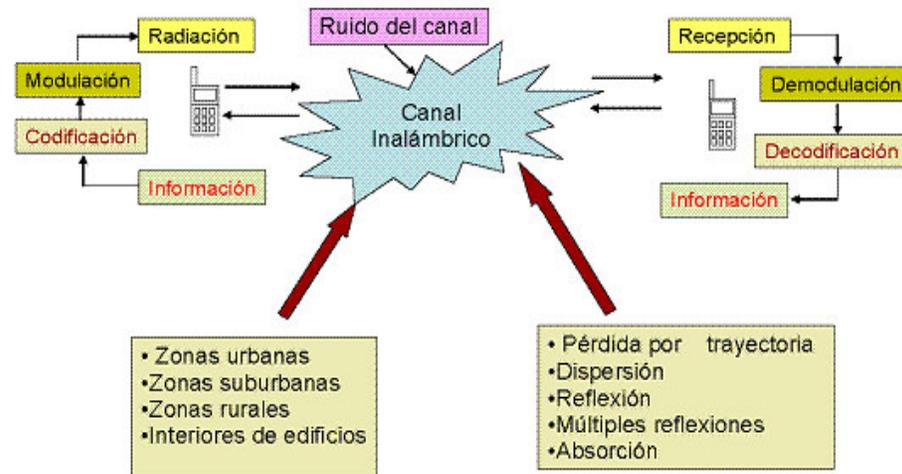


Figura 17 Etapas de un sistema de comunicación inalámbrico

Fuente: (A.C., 2010)

3.1.1 Desvanecimiento

Es una variación temporal de la amplitud, fase y polarización de la señal recibida con relación a la señal nominal debido al trayecto de propagación, la señal se atenúa debido a la pérdida en el espacio, los obstáculos y resistencia que debe traspasar durante toda su trayectoria hasta que llega a su destino. Dicho desvanecimiento se refleja como una mala potencia recibida en el terminal receptor. (Desvanecimientos Radioenlaces, 2016)

3.1.1.1 Tipos de desvanecimiento

El desvanecimiento a gran escala representa la atenuación de la potencia promedio de la señal en función de la distancia recorrida, siempre que dicha distancia sea mucho mayor a la longitud de onda ($d \gg \lambda$) y el desvanecimiento a pequeña escala describe la rápida variación de la amplitud y de la fase de una señal en un pequeño periodo de tiempo o durante una distancia corta con relación a su longitud de onda λ .

El desvanecimiento plano (Flat Fading) se presenta cuando el ancho de banda coherente es mayor que el ancho de banda de la señal $B_c > B_s$, el desvanecimiento selectivo (Selective Fading) se presenta cuando el ancho de banda coherente es menor al ancho de banda de la señal $B_c < B_s$.

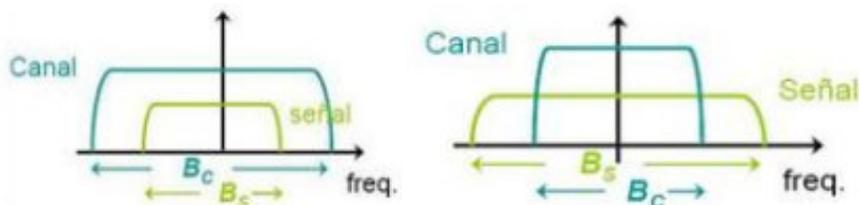


Figura 18 Desvanecimiento plano y desvanecimiento selectivo

Fuente: (Desvanecimientos Radioenlaces, 2016)

El desvanecimiento rápido (Fast Fading) ocurre cuando el tiempo de símbolo es mucho mayor al tiempo coherente $T_s > T_c$ y el *desvanecimiento Lento (Slow Fading)* cuando el tiempo de símbolo es mucho menor al tiempo coherente $T_s < T_c$.

3.1.1.2 Modelos de desvanecimiento

El Modelo de Desvanecimiento Rayleigh se produce cuando no existe línea de vista (NLOS) entre el transmisor y el receptor. La función densidad de probabilidad que describe la distribución de Rayleigh viene dada por la siguiente relación matemática.

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad r \geq 0$$

Donde:

r = Envoltente de la señal recibida

$\frac{r^2}{2}$ = Potencia instantánea.

σ^2 = Potencia media de la señal.

El Modelo de Desvanecimiento de Rician implica que existe un trayecto predominante o un trayecto con línea de vista (LOS), este modelo es utilizado en ambientes abiertos o en ambientes cerrados. La función de densidad de probabilidad de la distribución Rice es descrita viene dada por la siguiente relación matemática.

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(r^2+A^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right), \quad r \geq 0, A \geq 0$$

Donde:

r = Representa la envoltente de la señal recibida

$2\sigma^2$ = Potencia media de la señal multitrayecto

Ar = Amplitud pico de la señal dominante.

I_0 = Función de Bessel modificada de primera especie.

$\frac{r^2}{2}$ = Potencia Instantanea.

3.1.2 Modelado del canal inalámbrico

Para el diseño de un sistema de comunicación inalámbrico se requiere conocer en detalle la propagación de las señales por el canal. Los canales inalámbricos utilizan diversidad de antenas en transmisión y recepción por lo que para la caracterización del canal se debe relacionar los distintos subcanales generados entre antenas y los factores propios que afectan en una transmisión.

El estándar IEEE 802.11ah se basa en su antecesor 802.11ac, el cual utiliza el Modelo Medbo para definir los ambientes en los cuales se produce la transmisión, y el Modelo de Saleh Valenzuela que presenta componentes multitrayectoria.

Tabla 2

Clasificación de modelos

Entorno	Condición	Modelo	Número de Clústers
Desvanecimiento plano	LOS / NLOS	A	1
Residencial	LOS / NLOS	B	2
Residencial / Oficina pequeña	LOS / NLOS	C	2

Fuente: (Schumacher, 2004)

Clúster: Es la agrupación de múltiples componentes de potencia de la señal que llegan al receptor

3.1.2.1 Sistema MIMO

Los modelos de canal 802.11n fueron originalmente diseñados para sistemas MIMO 4*4, y se basan en el modelo de correlación de canal de Kronecker. Los modelos de canal 802.11ah utilizan el modelo idéntico de correlación de canal de Kronecker para simulaciones de canales MIMO de orden superior.

La correlación se presenta como un parámetro clave en el uso de múltiples antenas dado que condiciona la eficiencia de los sistemas. Está influenciada por diversos factores, principalmente por las características físicas de las antenas en el transmisor y en el receptor, por ejemplo: la topología de los arreglos de antena transmisor y receptor, la separación entre las antenas, el AoA y AoD, el diagrama de radiación, la dispersión angular, entre otros. La dispersión angular es un parámetro que permite determinar cómo se agrupan las múltiples trayectorias sobre una dirección. (Miguel Velasco, 2014)

Para un sistema MIMO formado por 2 antenas receptoras (m) y dos antenas transmisoras (n), donde d es la separación de las antenas transmisoras y Δr es la separación de las antenas receptoras. Cada uno de los subcanales h_{mn} relacionan las antenas transmisoras con las antenas receptoras.

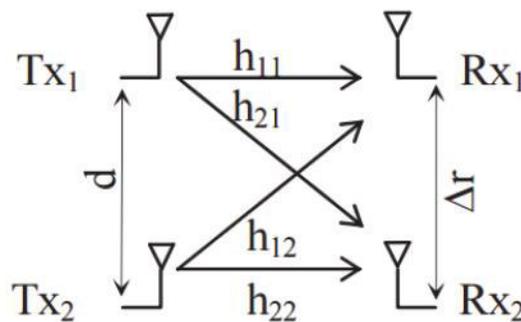


Figura 19 Sistema MIMO 2x2

Fuente: (Miguel Velasco, 2014)

El grado de independencia para un sistema MIMO 2x2 entre los enlaces, está definido por la matriz de correlación R , donde ρ_{ij}^{pq} representa el coeficiente de correlación entre h_{ij} y h_{pq} donde i, p son antenas receptoras y j, q son antenas transmisoras.

$$R = \begin{bmatrix} \rho_{11}^{11} & \rho_{11}^{12} & \rho_{11}^{21} & \rho_{11}^{22} \\ \rho_{12}^{11} & \rho_{12}^{12} & \rho_{12}^{21} & \rho_{12}^{22} \\ \rho_{21}^{11} & \rho_{21}^{12} & \rho_{21}^{21} & \rho_{21}^{22} \\ \rho_{22}^{11} & \rho_{22}^{12} & \rho_{22}^{21} & \rho_{22}^{22} \end{bmatrix}$$

Si se considera el comportamiento de los canales como un proceso estacionario, la correlación depende únicamente de la distancia de separación entre las antenas y no de su posición por lo que se puede expresar la matriz de correlación de la siguiente manera:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{11}^{12}(\Delta r) & \rho_{11}^{21}(0) & \rho_{11}^{22}(\Delta r) \\ \rho_{12}^{11}(\Delta r) & 1 & \rho_{12}^{21}(-\Delta r) & \rho_{12}^{22}(0) \\ \rho_{21}^{11}(0) & \rho_{21}^{12}(-\Delta r) & 1 & \rho_{21}^{22}(\Delta r) \\ \rho_{22}^{11}(\Delta r) & \rho_{22}^{12}(0) & \rho_{22}^{21}(\Delta r) & 1 \end{bmatrix}$$

El coeficiente de correlación viene dado por la siguiente expresión:

$$\rho_{x,y} = \langle x|y \rangle = \frac{E[x \cdot y] - E[x] \cdot E[y]}{\sqrt{(E[|x|^2] - |E[x]|^2) \cdot (E[|y|^2] - |E[y]|^2)}}$$

Donde x, y son las envolventes de la tensión medida, correspondiente a h_{ij} y h_{pq} respectivamente y $E[]$ es el valor esperado. El modelo de Kronecker o de correlación separable asume que la correlación en transmisión es independiente del receptor, la correlación en recepción es independiente del

transmisor, AoA y AoD se suponen separables, por lo tanto la ecuación de la matriz de correlación se obtiene: (Schumacher, 2004)

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_t \otimes \mathbf{R}_r$$

Donde:

\otimes : Representa el producto de Kronecker.

N_t : Número de antenas transmisoras.

N_r : Número de antenas receptoras.

R_t : Representa la matriz de correlación en el transmisor, de tamaño $N_t \times N_t$.

R_r : Representa matriz de correlación en el receptor, de tamaño $N_r \times N_r$.

3.1.2.2 Parámetros para MU-MIMO

El parámetro AoA define el ángulo con el que llegan las componentes de la señal a los receptores con respecto a un plano de referencia, por otro lado, el ángulo AoD establece el valor del ángulo de salida de la señal desde el transmisor.

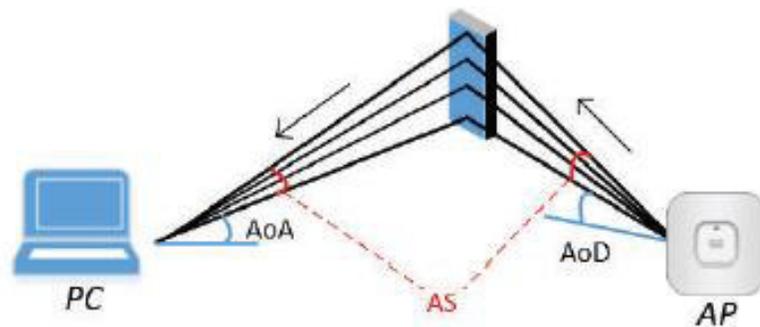


Figura 20 Parámetros AoA y AoD

Fuente: (Miguel Velasco, 2014)

Para obtener el sistema MU-MIMO, se genera ángulos offset que son desplazamientos pseudo aleatorios dependiendo de la cantidad de usuarios, estos ángulos se adicionarán a los valores AoA y AoD ya existentes en

802.11n. Los canales multiusuario son modelados para cada cliente aplicando un desfase aleatorio uniforme de $\pm 180^\circ$ a los ángulos AoA y AoD de cada modelo para condiciones de LOS y NLOS. (Schumacher, 2004)

Se presenta un escenario MU-MIMO *downlink*, que consta de un AP y tres estaciones separadas espacialmente. Se asume que el AP tiene N antenas transmisoras (N_{tx}), las tres estaciones poseen N antenas receptoras (N_{rx1} , N_{rx2} y N_{rx3} respectivamente). En el canal MU-MIMO se puede considerar que se tiene tres canales SU-MIMO independientes entre el AP y cada estación, denotado como $H1$, $H2$ y $H3$ respectivamente. Cada canal SU-MIMO asume diferentes correlaciones espaciales, tanto para el AP como para las estaciones. La correlación espacial entre las antenas de diferentes estaciones se asume como cero.

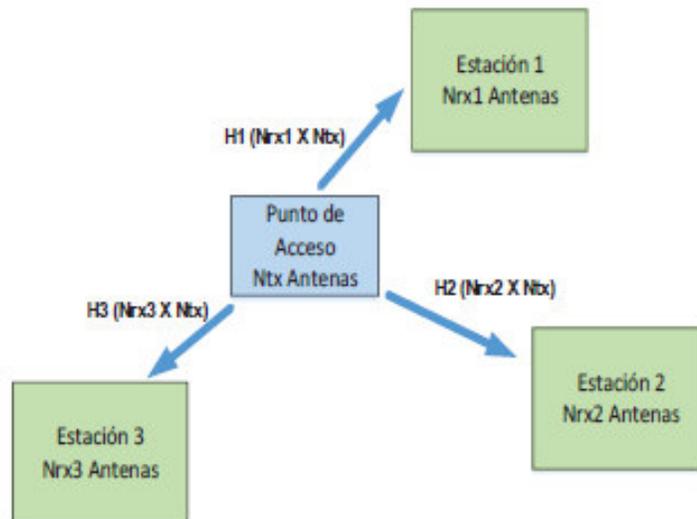


Figura 21 Escenario MU-MIMO

Fuente: (Breit, 2009)

Para generar el canal MU-MIMO se agrupan los canales SU-MIMO de cada estación (H1, H2, H3), obteniendo una matriz del tamaño $(N_{rx1} + N_{rx2} + N_{rx3}) \times N_{tx}$

$$H_{MU-MIMO}^{[(N_{rx1} + N_{rx2} + N_{rx3}) \times N_{tx}]} = \begin{bmatrix} H1 (N_{rx1} \times N_{tx}) \\ H2 (N_{rx2} \times N_{tx}) \\ H3 (N_{rx3} \times N_{tx}) \end{bmatrix}$$

Figura 22 Matriz MU-MIMO

Fuente: (Breit, 2009)

3.2 Simulación del estándar IEEE 802.11 ah

3.2.1 Parámetros generales

La simulación se realizará con los modelos A, B y C, los cuales tienen condiciones de LOS o NLOS, además de contar con las variables suficientes para la simulación de un canal de comunicaciones con modelos de desvanecimiento de Rician y Rayleigh.

El modelo A cubre escenarios flat fading, mientras que B y C son selectivos en frecuencia. Se aplicará un desvanecimiento tipo Rayleigh para los modelos A y C, el modelo B tendrá un desvanecimiento tipo Rician.

Se dispone de un máximo de 4 usuarios, se establece un máximo de 3 spatial streams por usuario y 8 spatial streams en el transmisor (AP).

El número de antenas en el transmisor será igual a la suma de las antenas de cada receptor. Se emplean anchos de banda de canal de 2, 4, 8 y 16 MHz. Los índices MCS están en el rango de 0 a 9. Este dato conjuntamente con la cantidad de spatial streams, el número de subportadoras de datos OFDM y el ancho de banda de canal permiten calcular el valor de data rate del sistema.

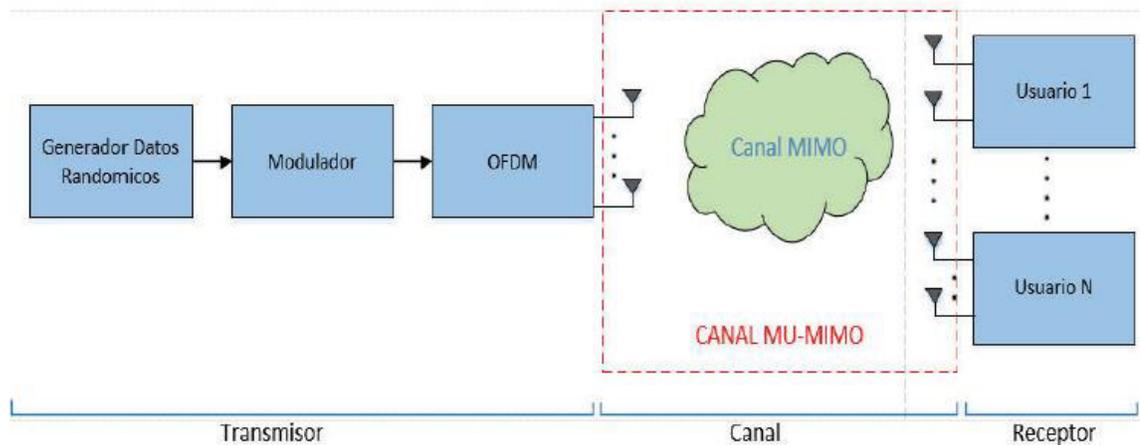


Figura 23 Diagrama de bloques del sistema 802.11 ah

Fuente: (Llangarí Felipe, 2016)

3.2.2 Estructura del Programa

El programa de simulación del estándar 802.11 ah está compuesta por funciones que realizan una tarea específica, a continuación se presenta el diagrama de flujo del mismo.

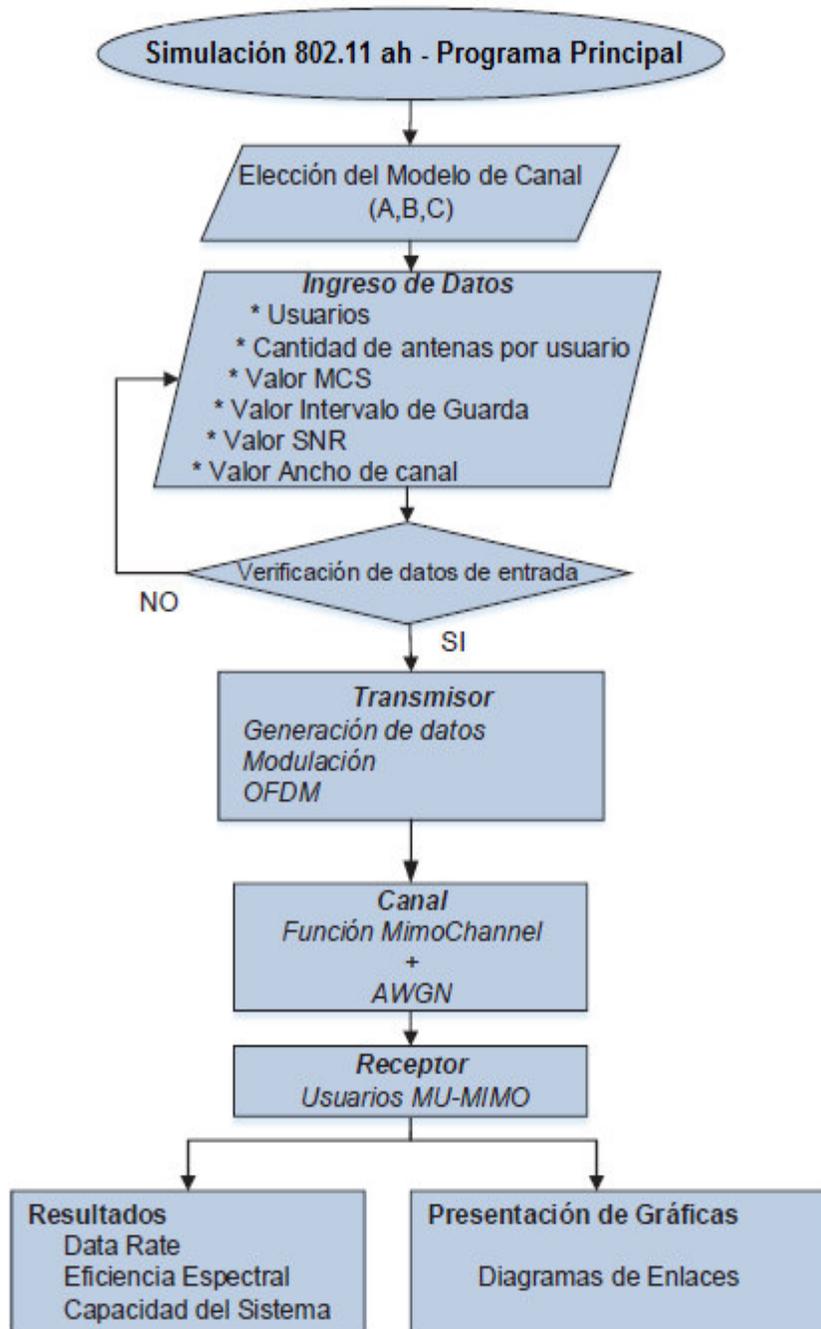


Figura 24 Diagrama de flujo simulación del sistema 802.11 ah

Fuente: (Llangarí Felipe, 2016)

3.2.2.1 Función Principal

La función Principal realiza la elección del modelo de canal (A, B o C), los cuales permiten simular entornos con las condiciones de LOS/NLOS. Esta función verifica el dato ingresado y una vez seleccionado el modelo se encarga de llamar a las funciones específicas de cada modelo de canal.

3.2.2.2 Función Usuarios

En esta función se ingresa la cantidad de usuarios (1 - 4) donde 4 es la cantidad máxima que permite el estándar 802.11ah para poder representar MU-MIMO, en caso de exceder o errar en estos valores se debe reintentar el ingreso.

3.2.2.3 Función Antenas

La función Antenas_Tx_Rx define el número de antenas según el valor ingresado en la función Usuarios, con la condición de 3 antenas máximo por usuario y donde el número de antenas en el AP es la suma de las antenas de cada usuario.

3.2.2.4 Función MCS

La función MCS permite ingresar el índice MCS disponible para el estándar 802.11ah.

3.2.2.5 Función Intervalo de Guarda

En esta función se solicita que se ingrese el valor del intervalo de guarda, para 802.11ah, la función consta de una sentencia que verifica el valor ingresado.

3.2.2.6 Función Valor SNR

La función Valor_SNR solicita el ingreso del valor de SNR. Este valor debe estar entre 0 y 50 dB. El valor de SNR se utiliza para el cálculo de capacidad del canal y en la función AWGN.

3.2.2.7 Función BW Modelo A

En esta función se ingresa el valor de ancho de banda de canal (2, 4, 8, 16MHz), y permite la ejecución de las funciones que dependen del valor ingresado.

3.2.2.8 Función BW Modelo B

En esta función se ingresa el valor de ancho de banda de canal (2, 4, 8, 16 MHz) y permite llamar a las funciones que dependen del valor ingresado, El modelo B tiene dos clusters por lo cual las funciones para los ángulos AoA y AoD se originan según el ancho de banda y el cluster.

3.2.2.9 Función BW Modelo C

En esta función se ingresa del valor de ancho de banda de canal (2, 4, 8, 16 MHz) y permite llamar a las funciones asociadas al modelo C. El modelo C de forma similar al modelo B consta de dos clústers por lo cual las funciones de ángulos AoA y AoD se forman dependiendo el ancho de banda y el clúster.

3.2.2.10 Función Generación Ángulos Offset

Para simular MU-MIMO, se debe generar ángulos *offset* para cada usuario, los cuales se añaden a los ángulos AoA y AoD establecidos para cada modelo.

3.2.2.11 Función Ángulos Modelo A

La función `Angulos_Modelo_A` permite adicionar los valores de ángulos *offset* para cada usuario a los ángulos AoA y AoD del modelo A, Este modelo cuenta únicamente de un clúster por lo cual la función es similar para todos los anchos de banda.

3.2.2.12 Función Ángulos Modelo B y C

En el modelo B, para añadir los ángulos *offset* de cada usuario a los ángulos AoA y AoD se ha dispuesto de funciones que dependen del valor de ancho de banda de canal y del clúster ya que la longitud de los vectores de AoA y AoD son diferentes. Las funciones para 2 MHz y 4 MHz son similares

3.2.2.13 Función `comm.OFDMModulator`

La función `comm.OFDMModulator` es propia de Matlab®, y simula el efecto de OFDM para el estándar 802.11ah, esta función depende del ancho de banda de canal y del número de antenas de los usuarios.

3.2.2.14 Función Generar Datos

Esta función, crea datos aleatorios que será la información que se transmite en el sistema para cada usuario y se genera por medio de la siguiente instrucción:

```
Datos_RX_1 = randi([0 Mod-1],Ntramas*NDatos,1,RX_1)
```

Donde:

<code>randi :</code>	Función de Matlab para generar número aleatorios.
<code>[0 Mod-1]:</code>	Se generan datos aleatorios del 0 hasta el valor de modulación ingresado – 1, por ejemplo: si el MCS ingresado es 7 se tiene una Modulación de 64 QAM y, por lo tanto se obtendrá números aleatorios entre 0 y 63.
<code>Ntramas:</code>	Se ha seleccionado un valor de 500 tramas.
<code>NDatos:</code>	Este valor se obtiene de la función <code>OFDMModulator</code> . Representa el número de subportadoras de datos que tiene cada ancho de banda de canal.
<code>RX_1:</code>	Es el número de antenas para el usuario 1

3.2.2.15 Función Modulación

Esta función realiza la modulación de los datos generados para cada usuario, para ello se utiliza la sentencia *qammod* de Matlab®.

$$\text{Datos_Mod_1} = \text{qammod}(\text{Datos_RX_1}(:,\text{Mod}))$$

Donde:

qammod:	Función de Matlab® para modular en cuadratura.
Datos_RX_1(:):	Datos aleatorios generados para el usuario 1.
Mod:	Orden de la modulación.

3.2.2.16 Función Matriz Correlación

Esta función se crea para cada modelo y contienen los parámetros de cada uno de ellos. El modelo A tiene un solo clúster por lo cual se determina una sola función que no depende del valor de ancho de banda. Para los modelos B y C que tienen 2 clústers cada uno, se asignan funciones para cada ancho de banda. Una vez que se ingresa el modelo, el valor del ancho de banda de canal y el número de usuarios, se determinan las funciones de matriz de correlación en función de estos parámetros.

3.2.2.17 Función para calcular la Matriz de Correlación

Esta función determina las matrices de correlación en transmisión y recepción para cada usuario. La función es la siguiente:

function [TxCorrelationMatriz_1, RxCorrelationMatriz_1]

3.2.2.18 Función comm.MIMOChannel

La función *comm.MimoChannel* es propia de Matlab®, permite generar y simular la transmisión de una señal a través de un canal MIMO en desvanecimiento de *Rayleigh* o *Rician*, donde para realizar la correlación espacial la función utiliza el modelo de Kronecker.

3.2.2.19 Función OFDM MIMO

Esta función depende de los resultados generados por las funciones: Modulación, comm.OFDMModulator y comm.MIMOChannel. El procedimiento de esta función es modular en OFDM los datos de entrada y su resultado ingresarlo por el canal MIMO de manera independiente para cada usuario.

3.2.2.20 Función AWGN

Por medio de esta función se adiciona ruido AWGN al resultado obtenido del proceso OFDM_MIMO, se usa la función *awgn* de Matlab® que utiliza el valor de SNR en dB.

3.2.2.21 Función Resultados

Esta función calcula los valores de Data Rate, Capacidad del Canal y la Eficiencia del Sistema basándose en las siguientes fórmulas.

- Data Rate:

$$Ncbps_1 = Nbpscs * NDatos$$

$$Ndbps_1 = Ncbps_1 * Coding$$

$$Data_rate_1 = \frac{Ndbps_1}{ts} * RX_1 * ig$$

Donde:

Nbpscs	Bits codificados por subportadora
Ncbps_1	Bits codificados por símbolo OFDM
NDatos	Subportadoras de datos
Ndbps_1	Bits de datos por símbolo OFDM
Coding	Valor de code rate
RX_1	Número de antenas
ts	Duración del símbolo 4μseg
ig	Intervalo de guarda (1 = 800 nseg, 1.1= 400 nseg)
Data_rate_1	Velocidad de transmisión

- Capacidad del Canal:

$$C = BW * \log_2 (1 + SNR_Valor)$$

Donde:

C	Capacidad del Canal
BW	Ancho de banda de canal
SNR_Valor	Relación señal al ruido

- Eficiencia del Sistema:

$$E = \frac{Data_rate}{BW}$$

Data_rate	Velocidad de transmisión del sistema
E	Eficiencia del Sistema
BW	Ancho de banda de canal

3.3 Resultados Obtenidos

3.3.1 Simulación MODELO A

Tabla 3

Condiciones Modelo A

CONDICIONES INICIALES	
MODELO	A
DESVANECIMIENTO	FLAT FADING – DESVANECIMIENTO PLANO
DESVANECIMIENTO	RAYLEIGHT – NLOS
NUMERO MAXIMO DE USUARIOS	4

Tabla 4

Datos Ingresados Modelo A

DATOS INGRESADOS	
ELECCIÓN DE MODELO	A
NUMERO DE USUARIOS	3
NUMERO DE ANTENAS POR USUARIO (MAXIMO 3 POR USUARIO Y 8 EN TOTAL)	2
	2
	1

VALOR DE MCS	6
INTERVALO DE GUARDA	400
VALOR DE SNR	23
VALOR DE ANCHO DE CANAL	8

Se realizó el ingreso de los datos en el software Matlab obteniendo las siguientes graficas y resultados:

```
Command Window
Elección de Modelo A.

Ingrese el número de usuarios: 3

Ingrese el número de antenas del primer usuario: 2
Ingrese el número de antenas del segundo usuario: 2
Ingrese el número de antenas del tercer usuario: 1

Ingrese el valor de MCS (Esquema de Modulación y Codificación): 6
El valor de Modulación es 64 QAM.
El valor de Codificación es 3/4.

Ingrese el intervalo de guarda (400 o 800)ns: 400

Ingrese el valor de SNR en dB: 23

Ingrese el valor de ancho de canal (2, 4, 8, 16 Mhz): 8
```

Figura 25 Ingreso de datos Modelo A

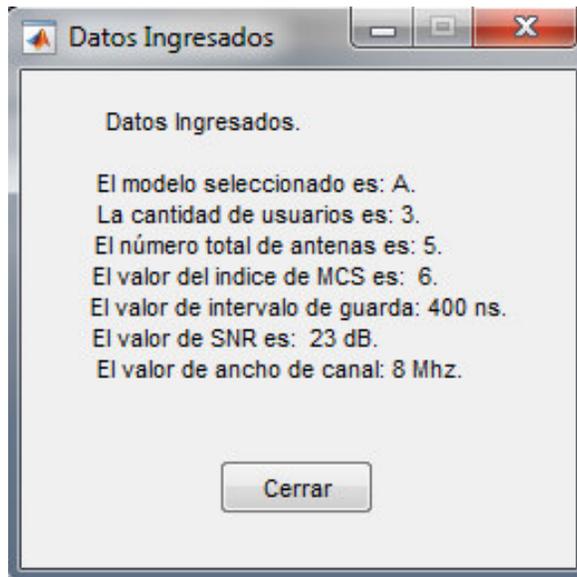


Figura 26 Datos Ingresados Modelo A

Graficas obtenidas:

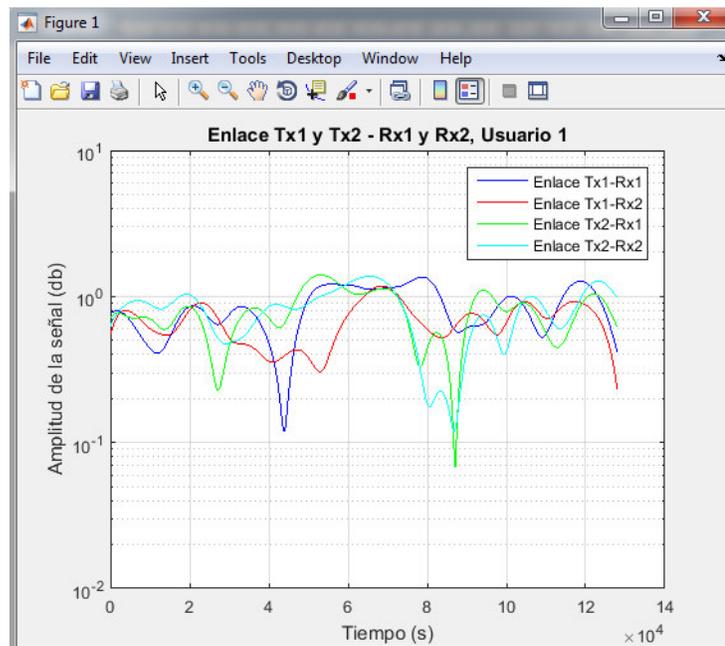


Figura 27 Enlace Tx1 y Tx2 – Rx1 y Rx2 Usuario 1

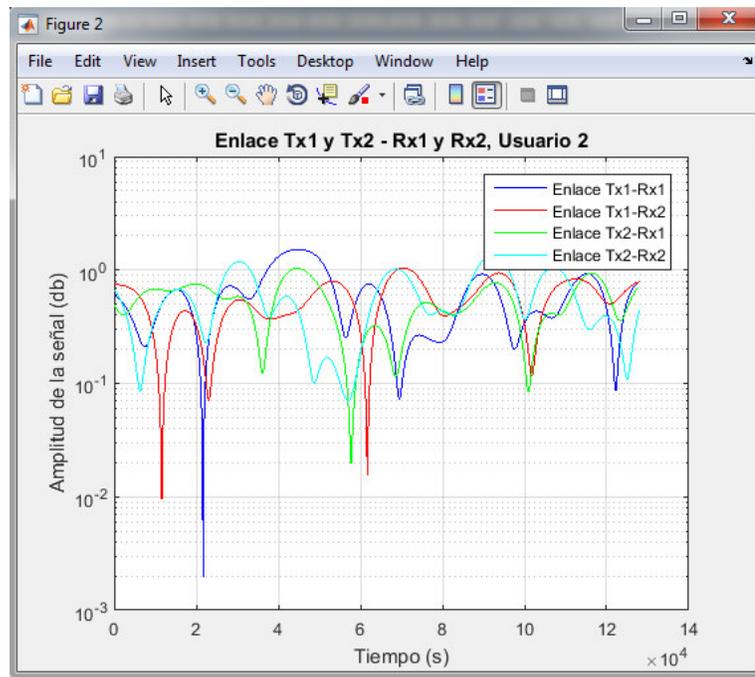


Figura 28 Enlace Tx1 y Tx2 – Rx1 y Rx2 Usuario 2

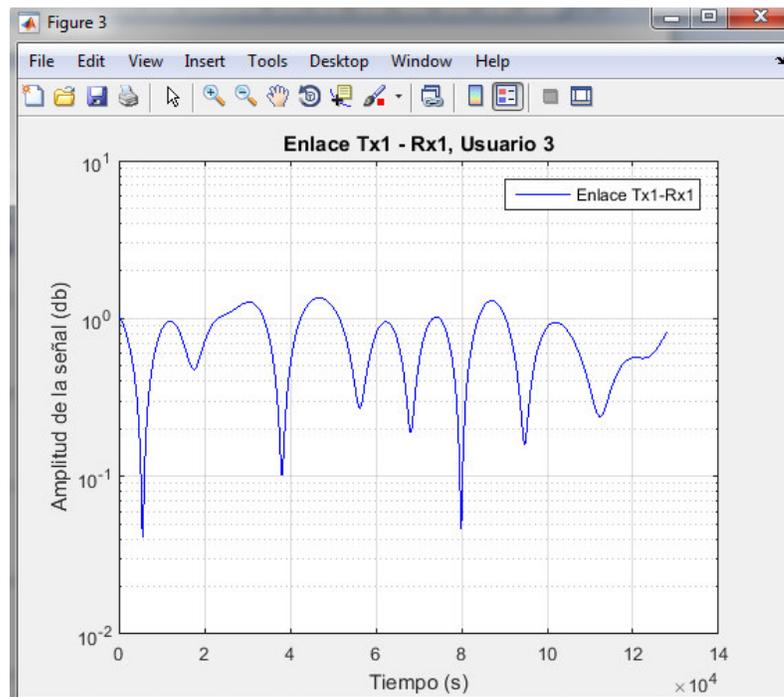


Figura 29 Enlace Tx1 – Rx1 Usuario 3



Figura 30 Resultados Modelo A

3.3.2 Simulación MODELO B

Tabla 5

Condiciones Modelo B

CONDICIONES INICIALES	
MODELO	B
DESVANECIMIENTO	SELECTIVO EN FRECUENCIA
DESVANECIMIENTO	RICIAN – LOS
NUMERO MAXIMO DE USUARIOS	4

Tabla 6

Datos Ingresados Modelo B

DATOS INGRESADOS	
ELECCIÓN DE MODELO	B
NUMERO DE USUARIOS	3
	2

NUMERO DE ANTENAS POR USUARIO (MAXIMO 3 POR USUARIO Y 8 EN TOTAL)	2
	1
VALOR DE MCS	6
INTERVALO DE GUARDA	400
VALOR DE SNR	23
VALOR DE ANCHO DE CANAL	8

Se realizó el ingreso de los datos en el software Matlab obteniendo las siguientes graficas y resultados:

```

Command Window
Elección de Modelo B.

Ingrese el número de usuarios: 3

Ingrese el número de antenas del primer usuario: 2
Ingrese el número de antenas del segundo usuario: 2
Ingrese el número de antenas del tercer usuario: 1

Ingrese el valor de MCS (Esquema de Modulación y Codificación): 6
El valor de Modulación es 64 QAM.
El valor de Codificación es 3/4.

Ingrese el intervalo de guarda (400 o 800)ns: 400

Ingrese el valor de SNR en dB: 23

Ingrese el valor de ancho de canal (2, 4, 8, 16 Mhz): 8

```

Figura 31 Ingreso de datos Modelo B

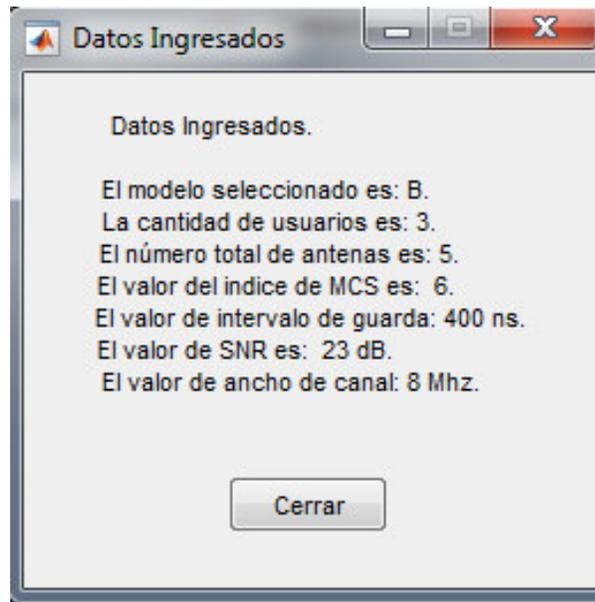


Figura 32 Datos Ingresados Modelo B

Graficas obtenidas:

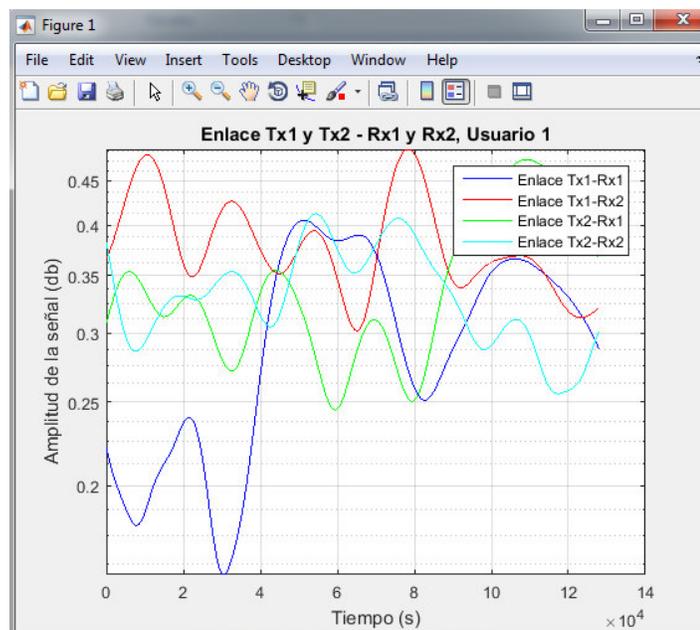


Figura 33 Enlace Tx1 y Tx2 – Rx1 y Rx2 Usuario 1

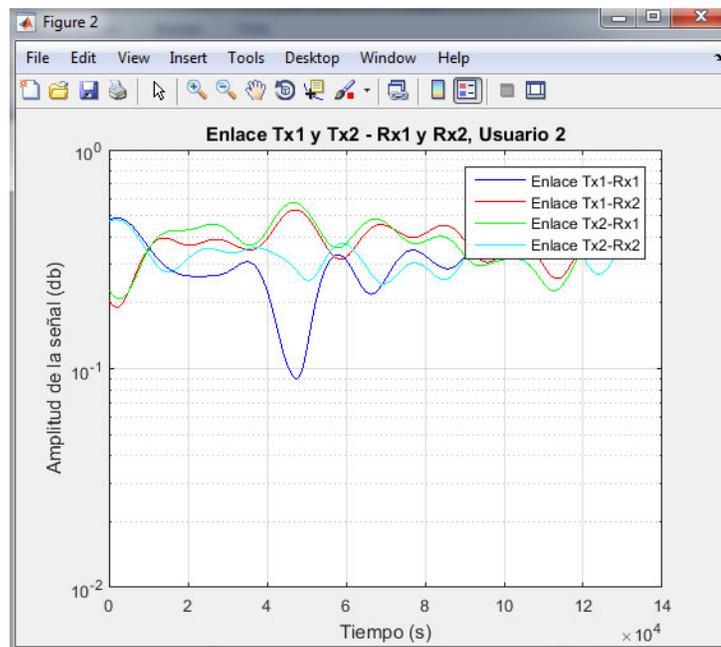


Figura 34 Enlace Tx1 y Tx2 – Rx1 y Rx2 Usuario 2

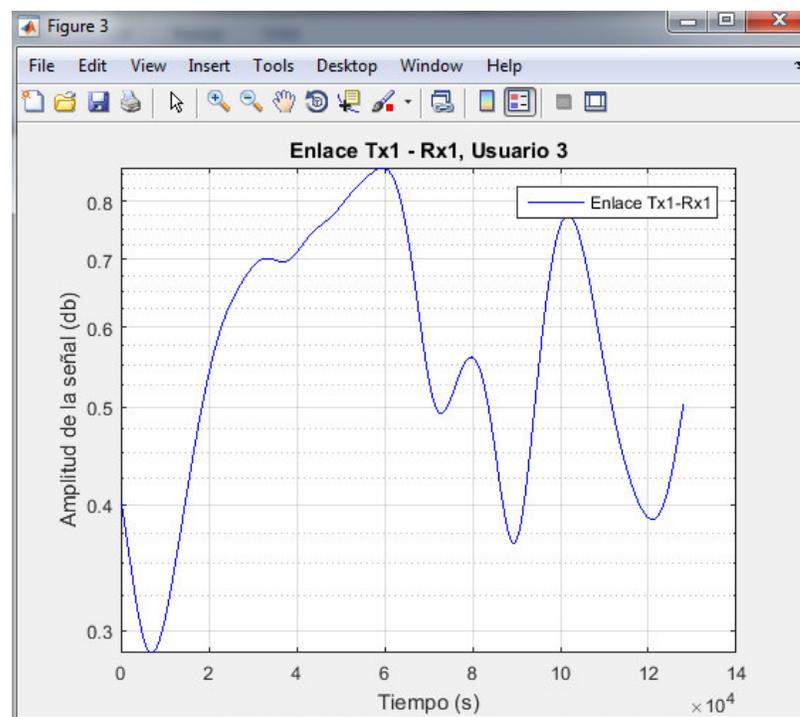


Figura 35 Enlace Tx1 – Rx1 Usuario 3



Figura 36 Resultados Modelo B

3.3.3 Simulación MODELO C

Tabla 7

Condiciones Modelo C

CONDICIONES INICIALES	
MODELO	C
DESVANECIMIENTO	SELECTIVO EN FRECUENCIA
DESVANECIMIENTO	RAYLEIGHT – NLOS
NUMERO MAXIMO DE USUARIOS	4

Tabla 8

Datos Ingresados Modelo C

DATOS INGRESADOS	
ELECCIÓN DE MODELO	C

NUMERO DE USUARIOS	3
NUMERO DE ANTENAS POR USUARIO (MAXIMO 3 POR USUARIO Y 8 EN TOTAL)	2
	2
	1
VALOR DE MCS	6
INTERVALO DE GUARDA	400
VALOR DE SNR	23
VALOR DE ANCHO DE CANAL	8

Se realizó el ingreso de los datos en el software Matlab obteniendo las siguientes graficas y resultados:

```

Command Window
Elección de Modelo C.

Ingrese el número de usuarios: 3

Ingrese el número de antenas del primer usuario: 2
Ingrese el número de antenas del segundo usuario: 2
Ingrese el número de antenas del tercer usuario: 1

Ingrese el valor de MCS (Esquema de Modulación y Codificación): 6
El valor de Modulación es 64 QAM.
El valor de Codificación es 3/4.

Ingrese el intervalo de guarda (400 o 800)ns: 400

Ingrese el valor de SNR en dB: 23

Ingrese el valor de ancho de canal (2, 4, 8, 16 Mhz): 8

```

Figura 37 Ingreso de datos Modelo C

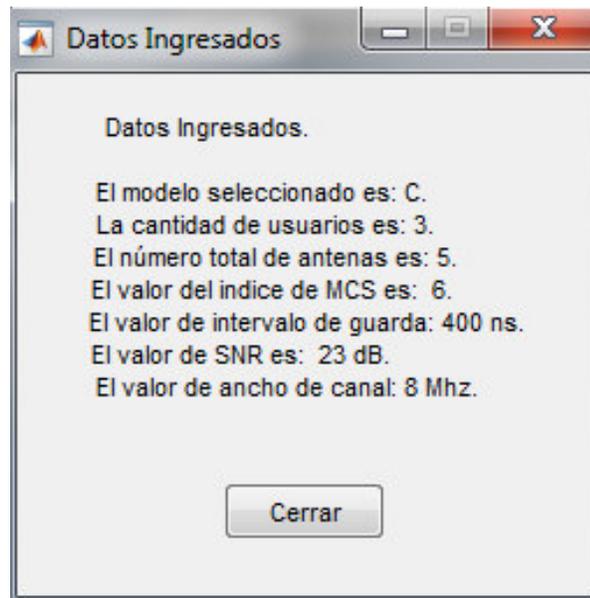


Figura 38 Datos Ingresados Modelo C

Graficas obtenidas:

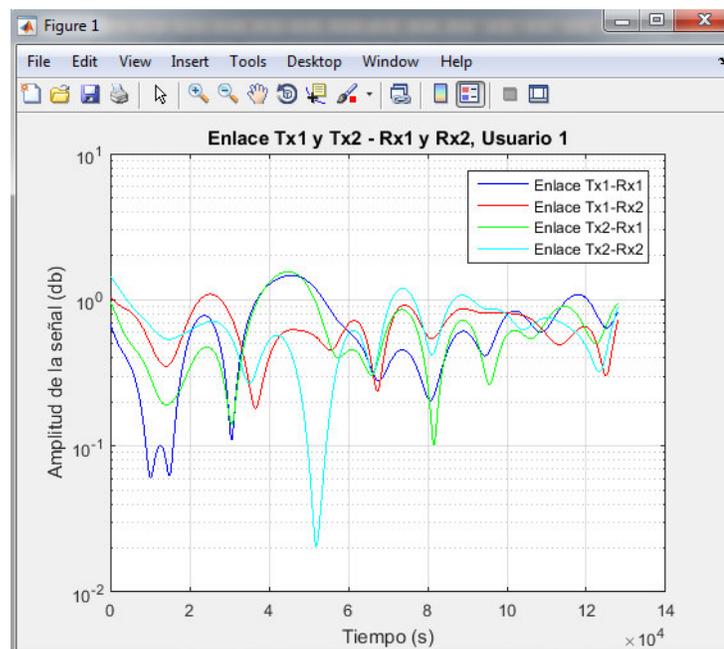


Figura 39 Enlace Tx1 y Tx2 – Rx1 y Rx2 Usuario 1

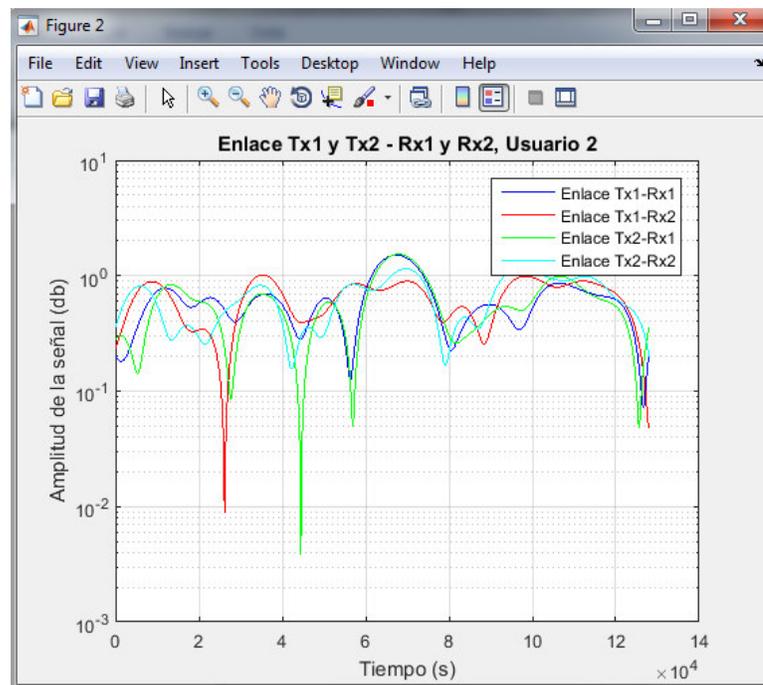


Figura 40 Enlace Tx1 y Tx2 – Rx1 y Rx2 Usuario 2

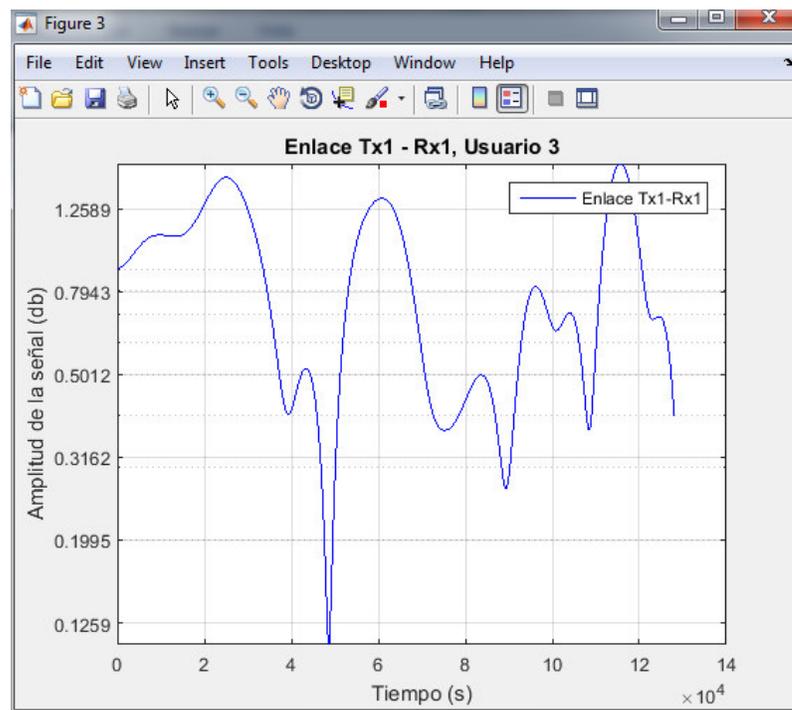


Figura 41 Enlace Tx1 – Rx1 Usuario 3



Figura 42 Resultados Modelo C

3.4 Análisis de resultados:

Se presentan los resultados de la simulación desarrollada para los modelos A, B y C, comparando los valores obtenidos como Data Rate, Capacidad de Canal y Eficiencia del Sistema.

Tabla 9

Comparación de resultados

MODELO	DATA RATE	CAPACIDAD DEL CANAL	EFICIENCIA DEL SISTEMA
A	1.097e09 bps	4.589e07 bps	54.844
B	1.316e09 bps	5.506e07 bps	65.813
C	1.117e09 bps	4.894e07 bps	58.500

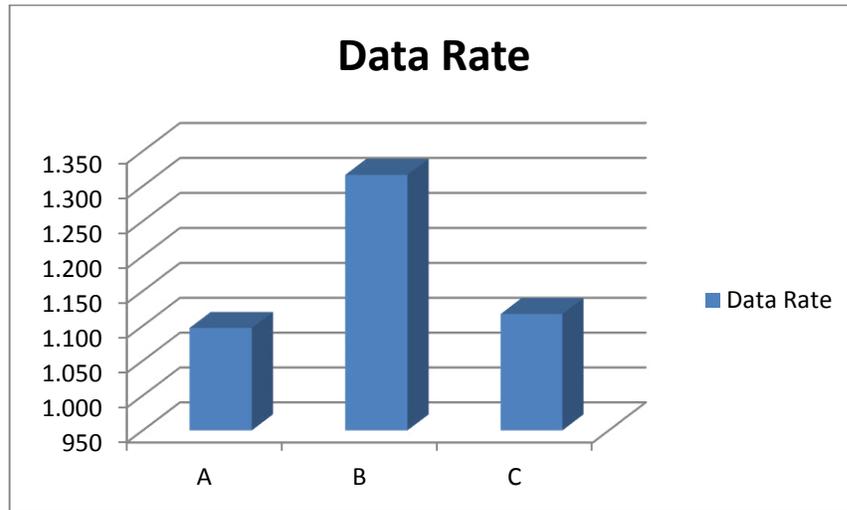


Figura 43 Comparación Data Rate

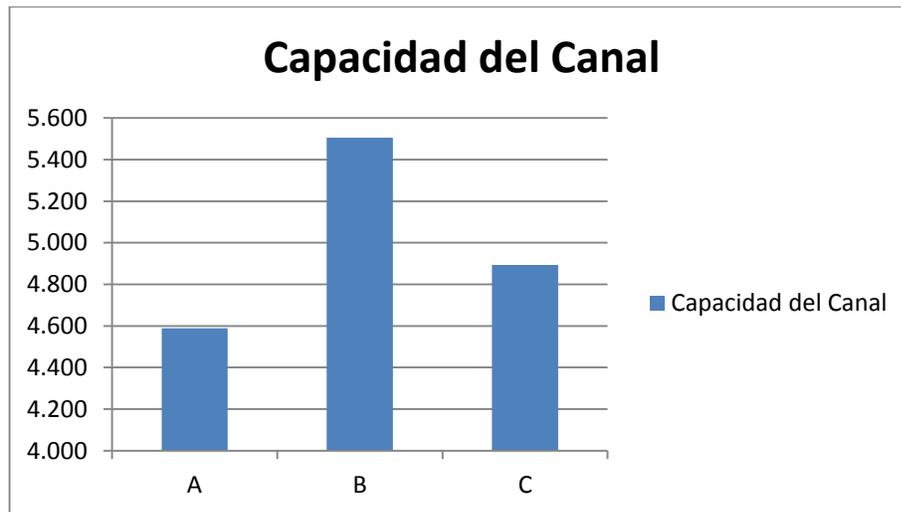


Figura 44 Comparación Capacidad del Canal

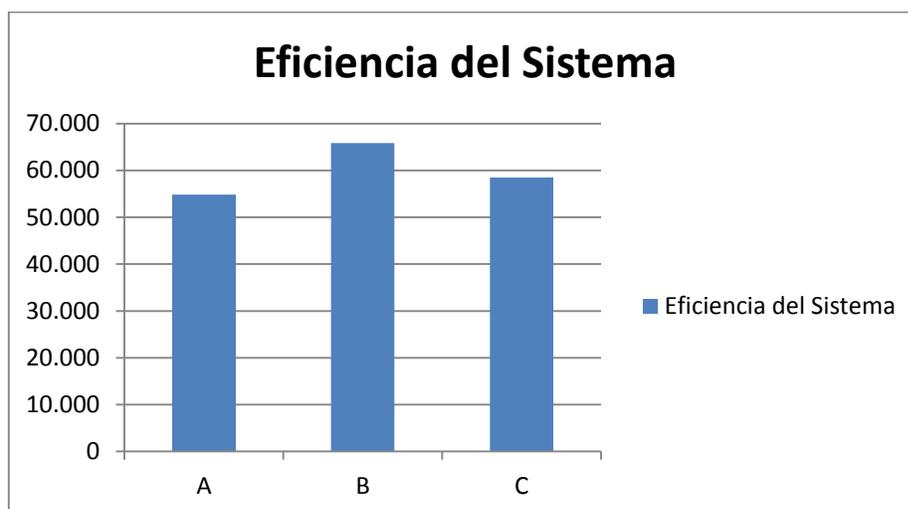


Figura 45 Comparación Eficiencia del Sistema

Se determina que el Modelo B para los datos específicos ingresados y con las condiciones iniciales expuestas, es el que brinda un mejor enlace para la transmisión de datos entre los usuarios ya que presenta un mayor valor de data rate, una mayor capacidad del canal y una mayor eficiencia del sistema en comparación con los modelos A y C.

En las graficas se observa que existe una variación en la amplitud de la señal de cada usuario en el momento de la transmisión y recepción esto producido por las condiciones especificas de cada modelo como tipo de desvanecimiento utilizado, si presenta línea de vista o no, lo cual permite recrear escenarios muy cercanos a la realidad.

Existen periodos de tiempo en los cuales la amplitud de la señal no presenta una variación muy marcada con lo cual se podría decir que llega a tener una estabilidad dentro del funcionamiento del sistema.

CAPITULO IV

MARCO LEGAL EN EL ECUADOR

El propósito de este capítulo es mostrar de forma resumida como está constituida la estructura institucional que gestiona las políticas públicas de interés de las telecomunicaciones, dado que esta información es básica para entender la dinámica de su formulación y posible implementación de nuevas tecnologías como es este caso para 802.11 ah (Wifi-Halow) así como para empujar cualquier iniciativa de incidencia social respecto de ella.

Al respecto es necesario precisar que, salvando la Comisión de Conectividad, no existen organismos o instituciones del Estado exclusivamente dedicados a definir e implementar políticas públicas de TIC, sino que tales políticas son dictadas y ejecutadas por las instituciones creadas para gestionar el tema de las telecomunicaciones en general. Es por esa razón que para efectos de identificar al decisor o decisores públicos en materia de políticas de tecnologías de la información es necesario examinar la estructura institucional que gestiona las políticas de telecomunicaciones. (DerechoEcuador, 2001)

4.1 Ley Especial de Telecomunicaciones

Constituye el marco legal del sector de las Telecomunicaciones en el país, mediante el cual, se establece, una innovación indispensable que se da con la finalidad de adecuar la regulación y expansión de los sistemas radioeléctricos de acuerdo con la importancia, complejidad, magnitud,

tecnología siendo su principio general la libre competencia en la prestación de servicios.

En el Ecuador no existe una normativa que regule cada uno de las tecnologías de banda ancha, la única regulación existente para este tipo de aplicaciones es la publicada en el Registro Oficial N° 143 del 11 de noviembre del 2005, cuyo objetivo fundamental es la regulación de los sistemas de radiocomunicaciones que utilizan técnicas de Modulación Digital de Banda Ancha.

La regulación publicada en este Registro Oficial está dada por el MINTEL, ente de regulación, además se hace referencia al Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT, en lo referente a la implementación y operación de Sistemas de Modulación Digital de Banda Ancha.

Dentro de esta regulación están los requisitos que se necesitan cumplir para la operación de este tipo de sistemas, como:

- Los lineamientos para la administración y el uso de las frecuencias (ancho de banda en el que se puede operar).
- La normalización y homologación de los equipos terminales.
- Las condiciones en las que se proporcionan los diferentes servicios de telecomunicaciones
- Tarifas por concesiones y autorizaciones propuestas para la instalación y explotación de los sistemas de telecomunicaciones.
- Derechos y obligaciones del usuario.

Se crean organismos destinados a la planificación, administración y control del sector de las telecomunicaciones.

Esta estructura institucional en el Ecuador está bajo el MINTEL y tiene principalmente tres niveles desde la lógica de la planificación en políticas públicas:

- En el nivel superior, dedicado principalmente a establecer, en representación del Estado, las políticas públicas y normas de regulación, se encuentra en el Consejo Nacional de Telecomunicaciones CONATEL que ahora según los nuevos cambios es parte del ARCOTEL (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones).
- En el siguiente, dedicado expresamente a la ejecución de las políticas de telecomunicaciones establecidas por el CONATEL, se encuentra la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones pertenecientes al ARCOTEL.
- En este nivel, dedicado principalmente al control y supervisión de los actores que intervienen en la realización de las actividades de telecomunicaciones, se encuentra la Superintendencia de Telecomunicaciones o SUPERTEL, la cual también ahora es parte del ARCOTEL.

En efecto, aunque por una parte la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones e incluso la Superintendencia de Telecomunicaciones, ahora adscritas al ARCOTEL requieren, por el mandato de la ley, de la aprobación o validación del MINTEL para realizar ciertos actos jurídico-administrativos, por otra parte la propia ley las define como organismos que gestionan autónomamente a sus competencias. (ARCOTEL-Historial , 2015)

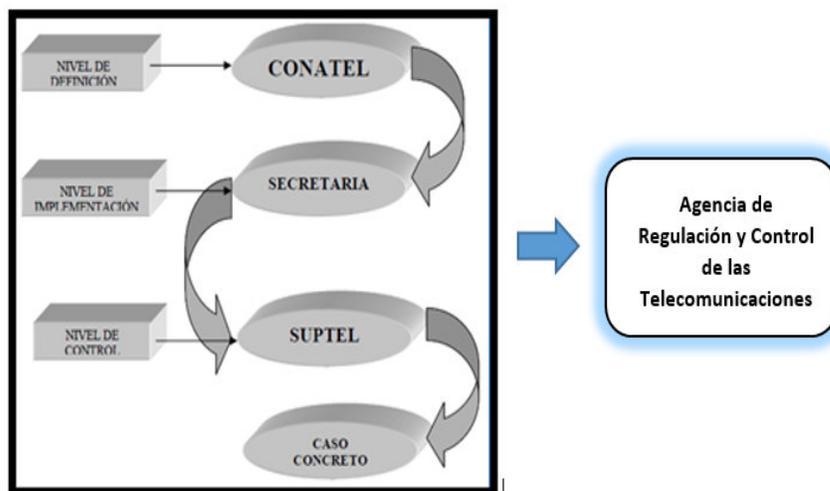


Figura 46 Niveles de Organización

Fuente: (ARCOTEL-Historial , 2015)

En teoría este diseño de la estructura institucional tiene ciertamente una relación jerárquica en términos de planificación, ejecución y control, como se mencionaba anteriormente (en materia de política pública de telecomunicaciones), que puede ser graficada con la figura de una espiral que va de la macro planificación al caso concreto o específico; sin embargo, esto no implica que exista una relación interinstitucional de total subordinación en términos jurídico-administrativos hasta el 2014, puesto que en el año 2015 se unificaron en la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones las entidades siguientes:

- La Superintendencia de Telecomunicaciones (SUPERTEL)
- La Secretaria Nacional de Telecomunicaciones (SENATEL)
- El Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL)

El reglamento general a la ley especial de telecomunicaciones (publicado en el registro oficial 404 del 4 de septiembre de 2001), establece como competencia de la secretaria Nacional de Telecomunicaciones; “proponer el MINTEL los estándares y anteproyectos de la normativa necesaria para asegurar el adecuado funcionamiento, homologación, conexión e interconexión de las redes de telecomunicaciones”

La Secretaria Nacional de Telecomunicaciones ahora adscrita al ARCOTEL presentó un proyecto de regulación bajo el título de “Norma para la implementación y operación de sistemas de modulación digital de banda ancha inalámbrica”, basado en la necesidad de establecer los límites y los márgenes de potencia para la utilización de las diferentes bandas de frecuencia independientemente del tipo de tecnología que se utilice dentro del espectro radioeléctrico, protegiendo a los servicios que se establecen a título primario.

Luego del análisis correspondiente se aprobó la norma para la implementación y operación de sistemas de modulación digital de banda ancha, lo cual implicó la modificación del plan nacional de frecuencias para darle coherencia, todo esto está vigente a partir de noviembre de 2005.

De acuerdo con la legislación vigente, el espectro radioeléctrico es un recurso natural limitado perteneciente al dominio público del estado. La planificación, administración y control de su uso corresponden al estado a través del MINTEL y la actual Agencia de Regulación y Control de las telecomunicaciones (la Secretaria Nacional de Telecomunicaciones, la Superintendencia de Telecomunicaciones), observando las normas y recomendaciones de la Unión Internacional de telecomunicaciones (UIT).

En el país todavía no existe un marco regulatorio a los sistemas inalámbricos, pero actualmente se está trabajando en el Plan Nacional de Desarrollo de las Telecomunicaciones PNDT 2007-2012 en el espectro radioeléctrico actual de 8.3KHz a 3000GHz.

Fuente: (PlanNacionalTelecomunicaciones , 20014)

Este plan tiene por finalidad dotar al país de un sistema de telecomunicaciones capaz de satisfacer las necesidades de desarrollo para establecer sistemas de comunicaciones eficientes, económicas y seguras.

Las estrategias del presente plan están enmarcadas en el desarrollo armónico de todos los sectores relacionados, principalmente en los menos atendidos, fundamentalmente porque ellos marcaran el paso en el desarrollo de nuestra sociedad; de tal forma que, el impulso de la aplicación de nuevas tecnologías tales como fibra óptica residencial (FTTH), redes de fibra óptica metropolitana, televisión de alta definición (HDTV), redes de nueva generación (NGN), Wi-Max, WRAN (IEEE 802.22), Li-Fi (IEEE 802.15.7), IEEE 802.20 televisión por IP (IPTV), internet de banda ancha, voz sobre IP (VoIP), software libre y nuevas modalidades de trabajo como: el comercio y el gobierno electrónico, fortalecimiento del NAP nacional, para optimizar el intercambio del tráfico de internet originado y terminado en el Ecuador etc.

Los objetivos que se contemplan en el plan exigen un cambio sustancial en el marco legal de las telecomunicaciones, que requiere de la elaboración y aprobación de una ley de telecomunicaciones que entre otros contemple:

- Normas claras para el desarrollo de las actividades de telecomunicaciones.

- Determine con exactitud el alcance de la regulación que el estado ejercerá en el sector.
- Proteger el interés de los usuarios a través de los organismos de regulación y control.
- Garantizar una atención eficiente al usuario, una regulación, además de un control centrado en procurar su bienestar y el de la sociedad en la que habita.
- Incentivar la inversión para fortalecer el servicio universal.
- Facilitar la cobertura de los servicios de telecomunicaciones en sectores sociales y geográficos que no son atractivos para los mercados en competencia.
- Facilitar la provisión de nuevos servicios convergentes.
- Eliminar privilegios regulatorios de proveedores para fomentar una real competencia.
- Establecer un solo ente de regulación, administración y ejecución de políticas de telecomunicaciones.
- Convergencia tecnológica; aplicaciones de datos, voz, video sobre internet, demandan mayor ancho de banda.
- Crecimiento de la capacidad de las redes de los proveedores de servicios.

Los cambios tecnológicos que se producen en el día a día, cada vez más acelerados en el mundo, conllevan a que el sector de las telecomunicaciones no solo en el Ecuador sino a nivel mundial, experimenten cambios para modernizarse, organizarse y mantenerse a la vanguardia, todo esto para beneficio de la sociedad.

Por lo tanto, la Ley Especial de Telecomunicaciones contiene las disposiciones fundamentales correspondientes a la instalación, operación, utilización y desarrollo de toda transmisión, sea esta en emisión o recepción de información de cualquier naturaleza utilizando sistemas de transmisión en el espectro.

4.2 Plan Nacional de Frecuencias

Conscientes de la necesidad de adecuar el marco regulatorio acorde con el vertiginoso avance tecnológico y en aras de contribuir con el desarrollo de una Sociedad de la Información y el Conocimiento, que permita la eliminación de la brecha digital, a través de una gestión y administración eficiente del espectro radioeléctrico, determinado en la constitución como sector estratégico, el Consejo Nacional de Telecomunicaciones, ARCOTEL, a través de la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones, pone a disposición de la ciudadanía la nueva edición del Plan Nacional de Frecuencias en el 2012, documento técnico que se constituye en la herramienta imprescindible que permite ejecutar día tras día de manera eficiente y efectiva la tarea de gestionar y administrar este recurso fundamental, materia prima para el despliegue de redes y servicios de telecomunicaciones, radiodifusión y televisión.

4.3 Atribución

Los servicios que se prestan en bandas de uso libre deben operar como servicios secundarios, conforme lo indica el RR-UIT:

“No deben causar interferencia perjudicial a las estaciones de un servicio primario a las que se les hayan asignado frecuencias con anterioridad o se les pueda asignar en el futuro. No pueden reclamar protección contra interferencias perjudiciales causadas por estaciones de un servicio primario a las que les

hayan asignado frecuencias con anterioridad o se les pueda asignar en el futuro.”

4.4 Derechos y Obligaciones del Usuario

Son los mismos derechos y obligaciones establecidos en la Resolución 417-15-CONATEL-2005 para Sistemas de Modulación Digital de Banda Ancha para sus usuarios.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se investigó y se realizó una descripción de los avances propuestos por el estándar IEEE 802.11ah tales como, ahorro de energía, tipos de modulación, manejo dinámico del ancho de banda y MIMO multiusuario, los mismos que ayudan a comprender la evolución de la tecnología WiFi y su estándar, tecnología con la que las personas se encuentran diariamente en una constante interrelación sea en el hogar, trabajo o cualquier lugar que se encuentren, permitiendo así un acceso total a las TICs.
- Se realizó la simulación del despliegue de una red bajo el estándar 802.11ah tratando que las condiciones implementadas sean lo más ideales posibles con el fin de que los resultados se acerquen en lo posible a la realidad y permitan ser utilizados para trabajos futuros, además se comprobó que dicho estándar es apto para su despliegue y su utilización a corto plazo, es inminente.
- De los estudios realizados se determina que esta tecnología deberá vencer grandes retos, entre ellos, requisitos de hardware, compatibilidad con estándares anteriores y un bajo costo de dispositivos finales, para que su despliegue sea exitoso y permita a la sociedad un acercamiento total con el futuro, llamado Internet de las Cosas, cumpliendo así uno de los objetivos presentes en el plan del buen vivir.

- Se verificó analizando el marco regulatorio que no existen organismos que estén realizando un constante trabajo en actualización de normas, estándares que son fundamentales para el continuo desarrollo tecnológico, lo que genera un retraso en la sociedad con los países denominados del primer mundo.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar con el estudio de este estándar IEEE 802.11 ah, ya que al ser un estándar nuevo en el mercado irá presentando características diferentes que pueden ser de gran ayuda para su comprensión y utilización.
- Para el correcto desarrollo y funcionamiento de la simulación se recomienda actualizar al software computacional Matlab a la versión 2015b ya que las versiones anteriores no integran funciones especificadas como modulación utilizados en este proyecto.
- Para su mejor estudio y comprensión, y cuando el mercado tecnológico lo permita, se recomienda realizar pruebas con equipos físicos que incorporen el estándar 802.11 ah, ya que de esta manera se podrá obtener valores y resultados totalmente reales comprobando así su verdadero funcionamiento y las ventajas que ofrece a la sociedad.

BIBLIOGRAFÍA

- (Julio de 2014). Obtenido de PlanNacionalTelecomunicaciones : www.conatel.gov.py/files/MANUAL%20PLAN%20NACIONAL.pdf
- (5 de Septiembre de 2014). Obtenido de SENATEL-ECUADOR: <http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/>
- *A la velocidad de la Luz.* (30 de Octubre de 2013). Obtenido de www.centralvozip.com : <http://www.centralvozip.com/a-la-velocidad-de-la-luz-internet-a-traves-de-bombillas-led-lifi-2/>
- A.C., F. M. (8 de Julio de 2010). Obtenido de <http://fmre.mx/boletinesx/2010/boletin1029.html>
- ARCOTEL. (Mayo de 2014). Obtenido de <http://www.arcotel.gob.ec/biblioteca/>
- *ARCOTEL-Historial* . (Marzo de 2015). Obtenido de <http://www.arcotel.gob.ec/historial/>
- *Arcotel-Publicaciones.* (Marzo de 2015). Obtenido de <http://www.arcotel.gob.ec/publicaciones/>
- *ARCOTEL-Reglamentos Generales* . (Marzo de 2015). Obtenido de <http://www.arcotel.gob.ec/reglamentos-generales-2/>
- ARIB. (Junio de 2008). Obtenido de <http://www.arib.or.jp/english/>
- Asensio, G. (Mayo de 2006). Obtenido de <http://www.manualespc.com>
- *Casio PicapiCamera iOS app uses visible light communication.* (26 de Junio de 2012). Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?t=11&v=t27x1sztArE>
- CISCO. (s.f.). *CISCO*. Obtenido de <https://www.netacad.com/>

- David E. Cypher, N. T. (25 de Junio de 2014). Obtenido de http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub_id=914731
- *DerechoEcuador*. (29 de Agosto de 2001). Obtenido de Registros Oficiales : <http://www.derechoecuador.com/productos/producto/catalogo/registros-oficiales/2001/agosto/code/17370/registro-oficial-agosto29-de-agosto-del-2001>
- *Desvanecimientos Radioenlaces*. (2016). Obtenido de <https://desvanecimientosradioenlaces.wikispaces.com/>
- *elecasoft.blogspot.com*. (Marzo de 2014). Obtenido de Xavier, Lautaro Rodríguez: <http://elecasoft.blogspot.com/2014/03/conexion-inalambrica-mas-segura-y-mas.html>
- Elham Sarbazi, M. U. (2012). PHY Layer Performance Evaluation of the IEEE. *Department of Electrical and Electronics Engineering Ozyegin University*. Istanbul, Turkia: IEEE.
- Evgeny Khorov, A. L. (Marzo de 2015). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/265296204_A_survey_on_IEEE_80211ah_an_Enabling_Networking_Technology_for_Smart_Cities
- Frank DEICKE, W.-J. F. (2012). Optical Wireless Communication to Eco-System . 1-4.
- Halasz, D. (Julio de 2010). Obtenido de <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/10/11-10-001-13>
- <http://www.tomshardware.com>. (12 de Abril de 2013). Obtenido de LiFi network with LEDs: <http://www.tomshardware.com/news/VLC-LiFi-LED,21894.html>

- IEEE. (Marzo de 2012). Obtenido de <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11-2012.html>
- IEEE-SA Standards 802.15.7;. (2012). Short-range wireless optical communication using visible light. *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.7*. EEUU: IEEE.
- INEC. (2010). Obtenido de <http://www.inec.gob.ec>
- INEC. (2010). Obtenido de <http://ecuadorencifras.gob.ec/banco-de-informacion/>
- *INEC-ECUADOR* . (5 de Septiembre de 2014). Obtenido de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>
- Jurado Pérez, V. V. (2014). *Academia*. Obtenido de http://www.academia.edu/7197061/Estado_del_Arte_de_las_Arquitecturas_de_Internet_de_las_Cosas_IoT_
- K.-D. Langer, J. G. (2012). Proceedings of International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). *Recent Development in Optical Wireless Communications using Infrared and* . EEUU.
- Lapuente, M. J. (3 de Diciembre de 2013). Obtenido de http://www.hipertexto.info/documentos/h_internet.htm
- *Li-1st High-Speed Bidirectional Li-Fi System* . (13 de Agosto de 2013). Obtenido de pureVLC: <https://www.youtube.com/watch?v=seDlRdnhbdo>
- Llangarí Felipe, E. M. (Marzo de 2016). Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15072>
- MEXICAMPO. (2015). *Mexicampo*. Obtenido de <http://mexicampo.com.mx/con-la-participacion-de-mas-de-15-paises-inicia-manana-en-guadalajara-el-foro-global-agroalimentario-2015/>

- Miguel Velasco, R. L. (Noviembre de 2014). Obtenido de <http://www.reibci.org/publicados/2014/noviembre/0600114.pdf>
- Mohd Dani Baba, H. M. (2012). Performance Analysis of the IEEE 802.15.7 . *CSMA/CA algorithm based on Discrete Time* . Shah Alam, Selangor, Malaysia : IEEE - Markov Chain (DTMC) .
- Monicaodo. (s.f.). *Shutterstock*. Obtenido de <https://www.shutterstock.com/g/monicaodo>
- Network, M. (Marzo de 2013). Obtenido de <http://www.madridnetwork.org/red/audiovisual>
- Network, M. (Marzo de 2013). *Madrid Network*. Obtenido de <http://www.madridnetwork.org/Home/Index?aspxerrorpath=/red/audiovisual>
- *Rango Espectro Luz Visible* . (8 de Septiembre de 2014). Obtenido de Informatica-mente: <http://informatica-mente.com.ar/li-fi-el-adios-al-wi-fi/>
- Richard D. Roberts, I. (2012). IEEE 802.15.7 Visible Light Communication: Modulation Schemes and Dimming Support. IEEE.
- Richard D. Roberts, S. R.-K. (Septiembre de 2011). *IEEE 802.15.7 Physical Layer Summary* . IEEE - Intel Corporation, Samsung Electronics and ETRI.
- S. Aust, R. V. (s.f.).
- S. Aust, R. V. (2012). Obtenido de <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6364903&number=6363631>
- Schumacher, V. L. (4 de Mayo de 2004). Obtenido de <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/03/11-03-0940-04-000n-tgn-channel-models.doc>,

- Std., I. (Abril de 2012). Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.119.2038&rep=rep1&type=pdf>
- TECHNOLOGY, V. (s.f.). *Preparing for the 2nd Wave of 802.11ac*. Obtenido de <https://www.versatek.com/blog/preparing-2nd-wave-802-11ac/>
- TECPE. (2016). *Tecpe*. Obtenido de <http://tecpe.com.ec/>
- Telefónica. (2011). *Telefónica Fundación*. Obtenido de http://www.fundaciontelefonica.com/arte_cultura/publicaciones-listado/pagina-item-publicaciones/itempubli/101/
- *University of Edinburgh*. (2014). Obtenido de <http://www.eng.ed.ac.uk/~hxxh/pubs/pdf/tsh1101.pdf>
- Vegt, R. (Marzo de 2011). Obtenido de <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/11/11-11-0457-00-00ah-potentialcompromise-of-802-11ah-use-case-document.pptx>.
- Wang, S.-C. (2016). *123RF*. Obtenido de http://es.123rf.com/photo_39103711_mujer-deportiva-salud-vistiendo-dispositivo-reloj-inteligente-con-el-icone-de-la-salud-aislada-sobre.html
- Weiping Sun, M. C. (14 de Mayo de 2013). Obtenido de http://riverpublishers.com/journal/journal_articles/RP_Journal_2245-800X_115.pdf
- *Wireless data from every light bulb*. (02 de Agosto de 2011). Obtenido de Harald Haas: <https://www.youtube.com/watch?v=NaoSp4NpkGg>

ANEXOS

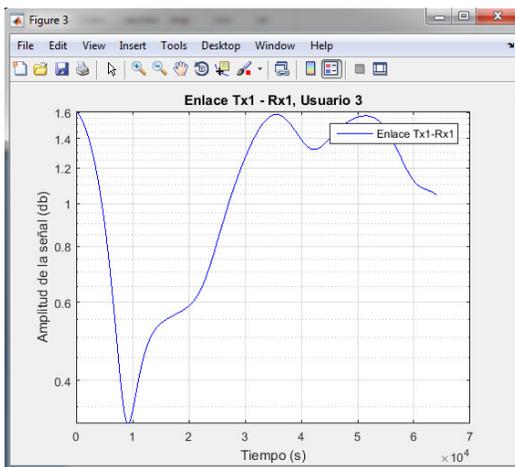
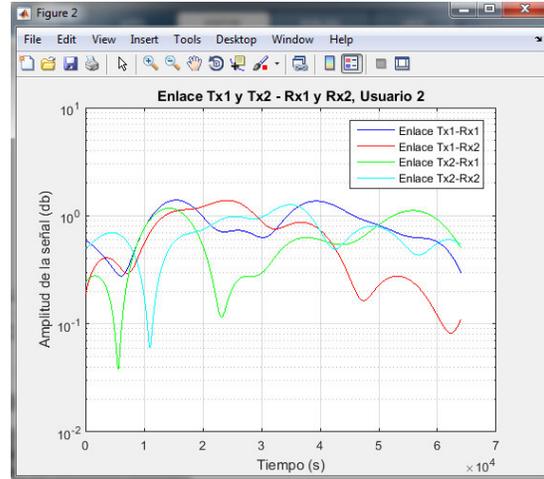
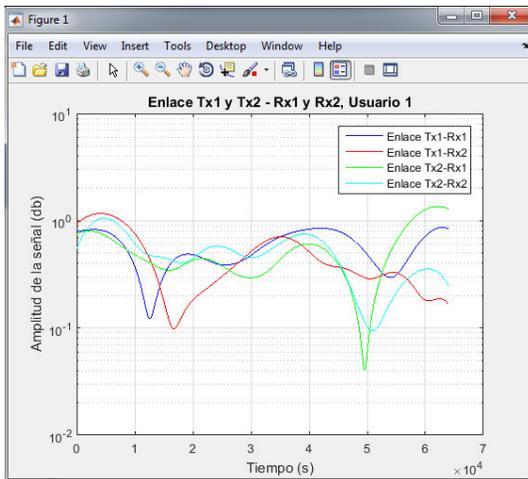
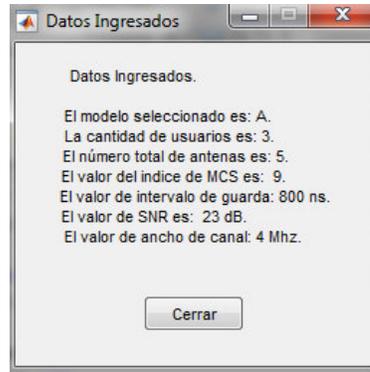
ANEXO 1 ESPECTRO ELECTROMAGNETICO



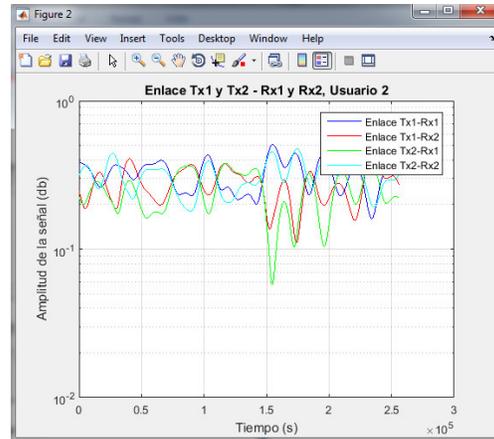
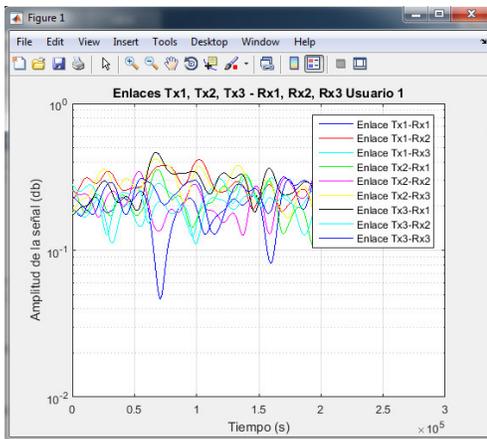
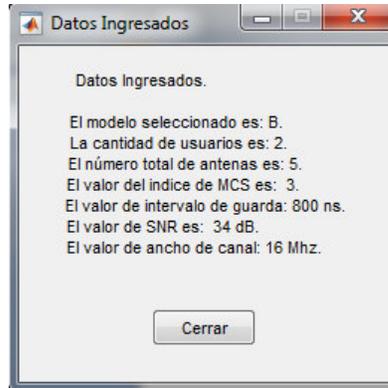
ANEXO 2 ESTANDARES Y ESPECIFICACIONES DE LAS REDES WIFI

Estandar	Velocidad (teórica)	Velocidad (práctica)	Frecuencia	Ancho de banda	Alcance (metros)	Detalles	Año
802.11	2 Mbit/s	1 Mbit/s	2,4 Ghz	22 MHz	330		1997
802.11a	54 Mbit/s	22 Mbit/s	5,4 Ghz	20 MHz	390		1999
802.11b	11 Mbit/s	6 Mbit/s	2,4 Ghz	22 MHz	460		1999
802.11g	54 Mbit/s	22 Mbit/s	2,4 Ghz	20 MHz	460		2003
802.11n	600 Mbit/s	100 Mbit/s	2,4 Ghz y 5,4 Ghz	20/40 MHz	820	Disponible en la mayoría de los dispositivos modernos. Puede configurarse para usar solo 20 MHz de ancho y así prevenir interferencias en una zona congestionada	2009
802.11ac	6.93 Gbps	100 Mbit/s	5,4 Ghz	80 o hasta 160 MHz		Nuevo estándar sin interferencia pero con menos alcance, aunque hay tecnologías que lo amplían. Más rendimiento y otras ventajas.	2013
802.11ad	7.13 Gbit/s	Hasta 6 Gbit/s	60 Ghz	2 MHz	300		2012
802.11ah	En Desarrollo	En Desarrollo	0.9 Ghz	2 o hasta 16 MHz	1000	Wi-Fi HaLow	2016

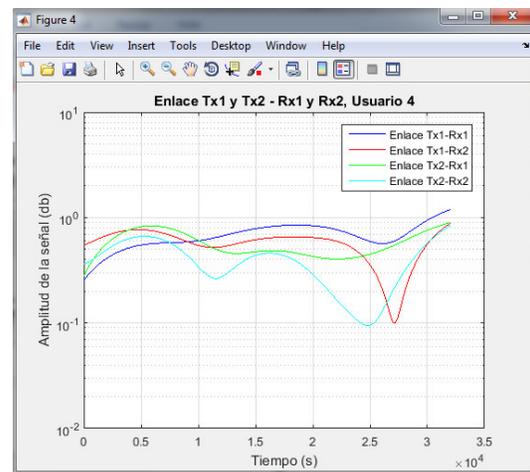
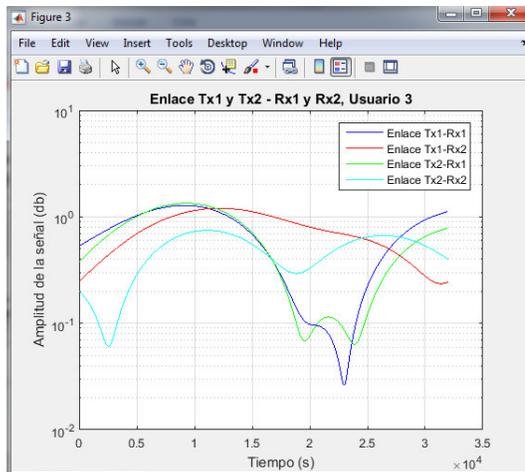
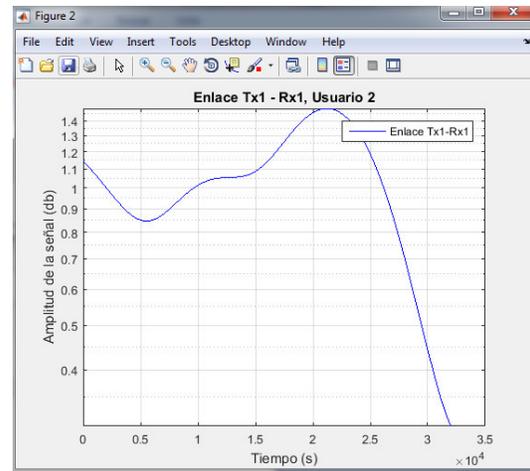
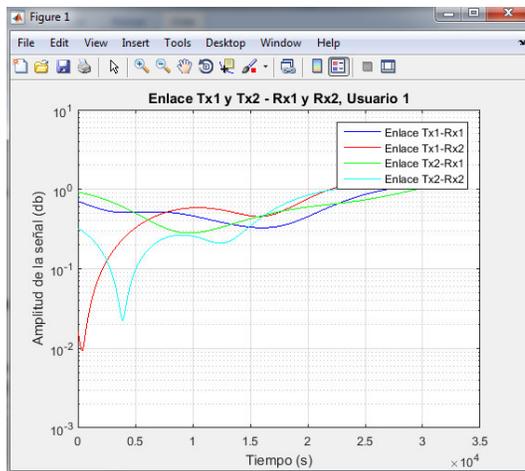
ANEXO 3 PRUEBAS MODELO A CON DIFERENTES VALORES INGRESADOS



ANEXO 4 PRUEBAS MODELO B CON DIFERENTES VALORES INGRESADOS



ANEXO 5 PRUEBAS MODELO C CON DIFERENTES VALORES INGRESADOS



ANEXO 6 CODIGO IMPLEMENTADO

FUNCION ANCHO DE BANDA MODELO A

%Función BW_Modelo_A: Determina el ancho de canal a seleccionar.

```
function [BW] = BW_Modelo_A(LOS)
```

```
% Variables Globales
```

```
global BW
```

```
% Ingreso del valor de ancho de banda
```

```
BW_A = input ('\nIngrese el valor de ancho de canal (2, 4, 8, 16 Mhz): ','s');
```

```
valor=isletter(BW_A);
```

```
% Mensaje de error a datos ingresados
```

```
while valor > 0
```

```
    [Error_Letra] = Errores();
```

```
    BW_A = input ('\nIngrese el valor de ancho de canal (2, 4, 8, 16 Mhz): ','s');
```

```
    valor=isletter(BW_A);
```

```
end
```

```
while valor < 1
```

```
BW=str2double(BW_A);
```

```
switch BW
```

```
    % Caso 1 BW=2 MHz
```

```
    case 2
```

```
        [OFDM_1] = OFDM_2M();           % Llamada func. OFDM_2M
```

```
        % Llamada func. Matriz_Correlacion_Modelo_A
```

```
        [TxCorrelationMatriz_1_1] = Matriz_Correlacion_Modelo_A();
```

```
        [H_Modelo_A_1] = Modelo_A_MimoChannel();           % Llamada func. Modelo_A_MimoChannel
```

```
        [Datos_RX_1] = Generar_Datos();           % Llamada fun. Generar_Datos
```

```
        [Datos_Mod_1] = Modulacion();           % Llamada fun. Modulacion
```

```
        [Y_MIMO_1] = OFDM_MIMO();           % Llamada fun. OFDM_MIMO
```

```
        break
```

```
    % Caso 1 BW=4 MHz
```

```
    case 4
```

```
        [OFDM_1] = OFDM_4M();           % Llamada func. OFDM_4M
```

```

% Llamada func. Matriz_Correlacion_Modelo_A
[TxCorrelationMatriz_1_1] = Matriz_Correlacion_Modelo_A();
[H_Modelo_A_1] = Modelo_A_MimoChannel(); % Llamada func.
Modelo_A_MimoChannel
[Datos_RX_1] = Generar_Datos(); % Llamada fun. Generar_Datos
[Datos_Mod_1] = Modulacion(); % Llamada fun. Modulacion
[Y_MIMO_1] = OFDM_MIMO(); % Llamada fun. OFDM_MIMO
break

% Caso 1 BW=8 MHz
case 8
[OFDM_1] = OFDM_8M(); % Llamada func. OFDM_8M
% Llamada func. Matriz_Correlacion_Modelo_A
[TxCorrelationMatriz_1_1] = Matriz_Correlacion_Modelo_A();
[H_Modelo_A_1] = Modelo_A_MimoChannel(); % Llamada func.
Modelo_A_MimoChannel
[Datos_RX_1] = Generar_Datos(); % Llamada fun. Generar_Datos
[Datos_Mod_1] = Modulacion(); % Llamada fun. Modulacion
[Y_MIMO_1] = OFDM_MIMO(); % Llamada fun. OFDM_MIMO
break

% Caso 1 BW=16 MHz
case 16
[OFDM_1] = OFDM_16M(); % Llamada func. OFDM_16M
% Llamada func. Matriz_Correlacion_Modelo_A
[TxCorrelationMatriz_1_1] = Matriz_Correlacion_Modelo_A();
[H_Modelo_A_1] = Modelo_A_MimoChannel(); % Llamada func.
Modelo_A_MimoChannel
[Datos_RX_1] = Generar_Datos(); % Llamada fun. Generar_Datos
[Datos_Mod_1] = Modulacion(); % Llamada fun. Modulacion
[Y_MIMO_1] = OFDM_MIMO(); % Llamada fun. OFDM_MIMO
break

% Mensaje de error si BW está fuera de rango
otherwise
disp('El valor de ancho de canal es incorrecto')

```

```

        BW_A = input ('\nIngrese el valor de ancho de canal (2, 4, 8, 16 Mhz): ','s');
    end
end

%Función Modulación: Se realiza la modulación a los datos ingresados, este proceso se lo hace
por usuario.

```

FUNCION MODULACIÓN

```

function [Datos_Mod_1] = Modulacion(Usuarios)

% Variables Globales

global Mod

global x

global Datos_RX_1, global Datos_RX_2, global Datos_RX_3, global Datos_RX_4

global Datos_Mod_1, global Datos_Mod_2, global Datos_Mod_3, global Datos_Mod_4

global RX_1, global RX_2, global RX_3, global RX_4

global Ntramas

global NDatos

switch x

    case 1

        % Se modula los datos del usuario 1.

        Datos_Mod_1 = qammod(Datos_RX_1(:),Mod);

        % Reordena los datos segun el número de antenas

        Datos_Mod_1 = reshape(Datos_Mod_1,Ntramas*NDatos,1,RX_1);

    case 2

        %Se modula los datos del usuario 1.

        Datos_Mod_1 = qammod(Datos_RX_1(:),Mod);

        % Reordena los datos segun el número de antenas

        Datos_Mod_1 = reshape(Datos_Mod_1,Ntramas*NDatos,1,RX_1);

        %Se modula los datos del usuario 2.

        Datos_Mod_2 = qammod(Datos_RX_2(:),Mod);

        % Reordena los datos segun el número de antenas

        Datos_Mod_2 = reshape(Datos_Mod_2,Ntramas*NDatos,1,RX_2);

    case 3

```

```

%Se modula los datos del usuario 1.
Datos_Mod_1 = qammod(Datos_RX_1(:),Mod);
% Reordena los datos segun el número de antenas
Datos_Mod_1 = reshape(Datos_Mod_1,Ntramas*NDatos,1,RX_1);
%Se modula los datos del usuario 2.
Datos_Mod_2 = qammod(Datos_RX_2(:),Mod);
% Reordena los datos segun el número de antenas
Datos_Mod_2 = reshape(Datos_Mod_2,Ntramas*NDatos,1,RX_2);
%Se modula los datos del usuario 3.
Datos_Mod_3 = qammod(Datos_RX_3(:),Mod);
% Reordena los datos segun el número de antenas
Datos_Mod_3 = reshape(Datos_Mod_3,Ntramas*NDatos,1,RX_3);
case 4
%Se modula los datos del usuario 1.
Datos_Mod_1 = qammod(Datos_RX_1(:),Mod);
% Reordena los datos segun el número de antenas
Datos_Mod_1 = reshape(Datos_Mod_1,Ntramas*NDatos,1,RX_1);
%Se modula los datos del usuario 2.
Datos_Mod_2 = qammod(Datos_RX_2(:),Mod);
% Reordena los datos segun el número de antenas
Datos_Mod_2 = reshape(Datos_Mod_2,Ntramas*NDatos,1,RX_2);
%Se modula los datos del usuario 3.
Datos_Mod_3 = qammod(Datos_RX_3(:),Mod);
% Reordena los datos segun el número de antenas
Datos_Mod_3 = reshape(Datos_Mod_3,Ntramas*NDatos,1,RX_3);
%Se modula los datos del usuario 4.
Datos_Mod_4 = qammod(Datos_RX_4(:),Mod);
% Reordena los datos segun el número de antenas
Datos_Mod_4 = reshape(Datos_Mod_4,Ntramas*NDatos,1,RX_4);
end
end

```