



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ANÁLISIS DE COEXISTENCIA ENTRE LA TECNOLOGÍA LTE-U Y WIFI
EN LA BANDA DE 5GHz

AUTOR

CHRISTIAN DAVID SÁNCHEZ JARRÍN

AÑO

2019



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

ANÁLISIS DE COEXISTENCIA ENTRE LA TECNOLOGÍA LTE-U Y WIFI EN
LA BANDA DE 5 GHZ.

Trabajo de titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos
para optar por el título de Ingeniero en redes y telecomunicaciones

Profesor guía

PhD. Nathaly Verónica Orozco Garzón

Autor

Christian David Sánchez Jarrín

Año

2019

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, Análisis de coexistencia entre la tecnología lte-u y wifi en la banda de 5 GHz, a través de las reuniones periódicas con el estudiante Christian David Sánchez Jarrín, en el semestre 201920, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

Nathaly Verónica Orozco Garzón

Doctora en ingeniería eléctrica en el área de telecomunicaciones y telemática

CC: 1720938586

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, Análisis de coexistencia entre la tecnología lte-u y wifi en la banda de 5 GHz, del estudiante Christian David Sánchez Jarrín, en el semestre 201920, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

Edwin Guillermo Quel Hermosa

Magister en gerencia de redes y telecomunicaciones

CC: 1718726894

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”

Christian David Sánchez Jarrín

C.I. 1752722247

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres que me brindaron su apoyo incondicional para alcanzar el éxito de este trabajo, a mis amigos que me acompañaron durante el proceso y a Dios que siempre me cubrió con su sabiduría y guió mi camino

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Ricardo y Edit que han sido mi apoyo incondicional y mi ejemplo de superación, a mis hermanos Vanessa y Diego por su apoyo incondicional.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo conocer si las tecnologías LTE-U y WiFi pueden coexistir en la banda no licenciada de los 5GHz en base a una investigación exhaustiva en el estado del arte para encontrar teorías que fomentan la coexistencia de ambas tecnologías.

Se tomará como base 3 teorías que indican la coexistencia de las tecnologías analizando cada una de ellas, una vez explicadas se hará un análisis sobre el rendimiento y el número de transmisiones erradas (BER), dentro de la red.

Al final se expondrá las conclusiones y recomendaciones sobre la coexistencia de LTE-U y WiFi en la banda no licenciada de los 5GHz.

ABSTRACT

The present degree work aims to know if LTE-U and WiFi technologies can coexist in the unlicensed band of 5GHz based on an exhaustive research in the state of the art to find theories that encourage the coexistence of both technologies.

It will be based on 3 theories that indicate coexistence analyzing each of them, once explained an analysis will be made on the performance and the number of erroneous transmissions (BER), within the network.

At the end the conclusions and recommendations on the coexistence of LTE-U and WiFi in the unlicensed band of the 5GHZ will be presented.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Descripción del proyecto	1
1.1.1 Justificación.....	6
1.1.2 Objetivo General	6
1.1.3 Objetivos Específicos.....	6
2. Capítulo I: Marco Teórico	7
2.1 Bandas Licenciadas	7
2.2 Bandas no Licenciadas	8
2.3 Técnicas de acceso.....	8
2.4 OFDM (Modulación por División Ortogonal de Frecuencia)	12
2.5 OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales) .	13
2.6 Evolución de los sistemas de comunicación móviles	14
2.7 Small Cells	16
2.8 PDSCH (Enlace descendente físico del canal compartido).....	17
2.9 PDCCH (Canal de control físico del enlace descendente)	18
2.10 PCFICH (Indicador de formato de control físico del Canal).....	18
2.11 Técnica de Acceso a WiFi.....	18
2.11.1 CSMA/CA (Detección de colisiones de acceso múltiple por parte de la portadora)	18
2.11.2 DFC (Función de coordinación distribuida).....	19
2.12 Encriptación WiFi	19
2.12.1 Privacidad equivalente al cableado	19
2.12.2 Acceso protegido WiFi.....	20
2.12.3 Acceso protegido WiFi versión 2	20
2.13 Throughput.....	20
2.14 Tasa de Error Binario	21
2.15 Señal/Interferencia	21
2.16 LAA (Acceso Asistido por Licencia).....	21

3. Capítulo II: Definición de las tecnologías LTE-U y

WiFi	22
3.1 WiFi	22
3.1.1 Historia y Definición.....	22
3.1.2 Arquitectura WiFi.....	24
3.1.3 Estándares 802.11 WiFi.....	29
3.1.4 Trama protocolo WiFi.....	31
3.1.5 Análisis Espectral WiFi.....	34
3.2 LTE-U (Long Term Evolution Unlicensed)	35
3.2.1 Historia y Definición.....	35
3.2.2 Arquitectura LTE-U.....	36
3.2.2.1 LTE-U/LAA (LTE in Unlicensed/Licensed Assisted Access)	38
3.2.3 Esquemas de acceso al canal.....	39
3.2.3.1 LTE-U basado en el ciclo del servicio	39
3.2.3.2 Escuchar antes de hablar basado en LAA(LBT).....	39
3.2.3.2.1 Equipos basados en bastidores (FBE).....	40
3.2.3.2.2 Equipos basados en la carga (LBE).....	40
3.2.4 Acceso al medio LTE-U.....	41
3.2.4.1 Selección de canal.....	41
3.2.4.2 On-Off Switching.....	42
3.2.4.3 Transmisión Adaptativa con Detección de Portadora (CSAT) ...	42
3.2.5 Modos de Operación LTE-U.....	43
3.2.5.1 Enlace descendente	43
3.2.5.2 Transmisión suplementaria de enlace descendente (SDL)	44
3.2.5.3 Enlace ascendente y descendente	44
3.2.6 Análisis Espectral LTE-U.....	45
3.2.7 Potencia de transmisión LTE-U.....	47

4. Capítulo III: Factibilidad de la coexistencia LTE-U y

WiFi	48
4.1 Coexistencia WiFi con LTE-U utilizando ciclos de trabajo	49

4.1.1 Formulación de la coexistencia de LTE-U y WiFi basada en ciclos de trabajo	51
4.2 Análisis del rendimiento de CSAT en la coexistencia WiFi y LTE-U.....	53
4.2.1 Funcionamiento del sistema para la coexistencia de LTE-U y WiFi. 54	
4.3 LTE-U basado en LAA para la coexistencia con WiFi.....	57
4.3.1 Esquema de coexistencia simple <i>listen-before-talk</i> para LAA.....	58
4.3.2 Análisis de la coexistencia utilizando LAA.....	61
4.4 Análisis de coexistencia	63
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
5.1 Conclusiones.....	70
5.2 Recomendaciones	72
REFERENCIAS	74

1. Introducción

1.1 Descripción del proyecto

Con el paso del tiempo la necesidad del incrementar los datos de transmisión en los dispositivos de comunicación ha ido creciendo exponencialmente, por este motivo se necesita mayores requerimientos en los sistemas de comunicación, así como la de Calidad de Servicio (QoS, del inglés *Quality of services*) y capacidad de la red. Además, es necesario la utilización de dispositivos capaces de soportar nuevas tecnologías para abastecer las necesidades del mundo actual en cuanto a velocidad de conexión y cobertura en cualquier lugar que se encuentre el usuario final; es por este motivo que se pretende utilizar las bandas no licenciadas para aumentar el ancho de banda y mejorar la transmisión entre los dispositivos inteligentes, ya que las bandas no licenciadas son utilizadas por cierto tipos de tecnología como WiFi, bluetooth, etc, y al tener MHz disponibles, pueden ayudar a liberar tráfico de datos de la red. Las empresas de telefonía móvil necesitan modificar la estructura de sus redes para aumentar el tráfico óptimo de información, ya que para el 2020 se ha proyectado un incremento de 1000 veces más el tráfico de datos (Wang, 2017).

Evolución a largo plazo (LTE, del inglés *Long Term Evolution*) ha sido capaz de satisfacer la necesidad del crecimiento de datos mejorando la velocidad, cobertura y administración de servicios. Si bien es cierto que LTE funciona tradicionalmente en el espectro autorizado para la operadora, se podría utilizar las bandas no licenciadas como 5GHz para cubrir todas las necesidades en cuanto a la demanda de ancho de banda y como solución para la descarga del macro tráfico celular. Esta tecnología es conocida como LTE-U (*LTE-Unlicensed*) (Hasan, 2016). La cual nace con el objetivo de utilizar la banda no licenciada de los 5GHz y permitir aumentar la velocidad y cobertura a usuarios LTE, mejorando la experiencia de usuario y ayudando en la transmisión y descarga del tráfico celular de la red.

El Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP, del inglés, *3rd Generation Partnership Project*) es una colaboración de asociaciones de telecomunicaciones, cuya función es desarrollar especificaciones globales para los sistemas móviles de tercera generación 3G. (technopedia, 2019)

Las especificaciones técnicas y los informes elaborados por el 3GPP para los sistemas móviles 3G basados en redes básicas GSM (*Global System for Mobile Communications*) evolucionadas, así como en las tecnologías de acceso radioeléctrico que soportan incluidos el acceso universal a la radio terrestre (UTRA), el servicio general de radiocomunicaciones por paquetes (GPRS) y las velocidades de datos mejoradas para la evolución GSM (EDGE). Las especificaciones 3GPP también cubren las redes de acceso como, W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*), LTE, LTE-Advanced, UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) de Europa y FOMA (*Freedom of Mobile Multimedia Access*) de Japón, que son basadas y formuladas por 3GPP. (technopedia, 2019)

Un dato interesante es que 3GPP propone permitir a LTE operar en bandas no licenciadas para que pueda descargar el tráfico de datos de la banda licenciada, y esto permitiría utilizar la banda no licenciada para la transmisión de datos mejorando la velocidad y cobertura; esta es una opción atractiva debido al bajo costo y disponibilidad de anchos de banda más amplios en las bandas de 3,5 GHz, 5 GHz, 28 GHz y 60 GHz, junto con las bandas de mayor demanda como son las de 2,4 GHz y 900 MHz. (Sriyananda, 2016)

El uso de las bandas no licenciadas está sujeta a los requisitos reglamentarios escritos por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), que es la encargada de la regulación de telecomunicaciones interestatales e internacionales por radio, televisión, redes inalámbricas, teléfonos, satélite y cable. Es esta comisión que aprueba o rechaza los estatutos para las especificaciones de LTE-U (Seppala, 2017)

LTE-U, permite el acceso al espectro no licenciado en la banda de 5 GHz ya que existen en esta banda de frecuencia, varios MHz de ancho de banda que se pueden utilizar para la transmisión y actualmente se encuentran disponibles. (CableFree, 2018)

La tecnología WiFi utiliza un mecanismo de control de acceso que se basa en la contención de un *backoff* aleatorio para el acceso al canal, mientras que LTE utiliza una programación dinámica para los usuarios.

Las bandas de frecuencias son ofertadas y autorizadas por entes gubernamentales en cada país a través de concursos o subastas para diferentes empresas que lo requieran, no obstante, las bandas de frecuencia no licenciadas son especialmente utilizadas para transmisiones en áreas como medicina, milicia, científicas, para el campo industrial, también es utilizada por pequeñas aplicaciones como son hornos microondas, WiFi, Bluetooth entre otras. Además del bajo costo, las bandas de frecuencia no licenciadas permiten un despliegue rápido lo que implica una mayor flexibilidad en los sistemas de comunicación inalámbrica, por otro lado también se necesita trabajar en requerimientos y análisis en dichas bandas no licenciadas, ya que estas aplicaciones podrían afectar el desempeño de los usuarios que ocupan la misma banda de frecuencias produciendo interferencia y degradando la señal transmitida (Hafaiedh, 2017).

Las operadoras de telefonía móvil se encuentran interesadas en utilizar la banda no licenciada de los 5GHz, ya que esta permite aumentar significativamente la capacidad y la cobertura de la red especialmente en áreas públicas abarrotadas, tanto interiores como exteriores, estadios, centros comerciales, etc. Con esto los operadores de telefonía móvil seguirían utilizando LTE en las bandas licenciadas, pero aumentarían la capacidad con LTE-U a través de "*femtocell*" o comúnmente llamadas *Small cells* (Leverege, 2017).

Debido al despliegue de LTE-U en el espectro no licenciado, se debe analizar el impacto en las transmisiones WiFi y analizar su coexistencia.

Para facilitar la coexistencia entre LTE-U y WiFi se describen dos técnicas:

- Escuchar antes de hablar (LBT)

Es un mecanismo introducido para la coexistencia justa con los sistemas de comunicación inalámbrica, manteniendo al mismo tiempo el rendimiento de cada sistema individual. En algunos lugares del mundo como Japón y Europa, se debe cumplir este mecanismo cuando se pretenda utilizar el espectro no licenciado. Un mecanismo LBT convencional en este entorno coexistente funciona con el tiempo de ocupación de canal fijo (COT) incluso bajo la carga de tráfico variable de cada sistema. En la práctica, si el COT es demasiado corto o grande, uno de los dos sistemas se vuelve ineficiente cuando está sobrecargado, porque si es demasiado corto no puede transmitir todos los datos en un lapso de tiempo pequeño y si es demasiado grande, el sistema se puede volver ineficiente ya que desperdicia mucho tiempo para que el otro sistema pueda transmitir. Además, los sistemas WiFi y LTE funcionan con diferentes mecanismos de respaldo, lo que puede violar el requisito de la coexistencia justa. Esto implica que los parámetros operativos del protocolo LBT deben adaptarse dinámicamente a la carga de tráfico variable y al tamaño de la ventana de retroceso del sistema WiFi. (Labib, 2017)

- Selección dinámica de canal (DFS)

DFS es un mecanismo que fue diseñado específicamente para no causar interferencias con sistemas que no son de telecomunicaciones móviles, como por ejemplo los radares. Según la FCC, cualquier dispositivo que intente ocupar la banda no licenciada de los 5GHz debe realizar una detección del canal antes de poder utilizarlo y continuar con una detección periódica, ya que mediante este mecanismo en caso de detectar que una señal donde su potencia supere un límite de caudal determinado, este canal debe ser liberado y no ser utilizado durante un período de treinta minutos. (Labib, 2017)

Qualcomm, empresa líder en avance de la tecnología móvil, sugiere una política de selección de canales para LTE-U, en la que el ciclo de transmisiones de LTE sea *ON/OFF* de forma que pueda adaptarse en función de la actividad WiFi. El concepto se desarrolla aún más con el *Q-learning*, aumentando el rendimiento general mientras se comparte el canal.

Alternativamente, se presenta un mecanismo de asignación de subtramas en blanco para LTE en el que la transmisión LTE está restringida, lo que facilita la transmisión WiFi. (Sriyananda, 2016)

LTE-U se encuentra en auge en la actualidad y se habla mucho durante los últimos meses ya que plantea avances para las redes de telefonía móvil y grandes aciertos para la llegada del 5G, ya que para los avances que se tiene del desarrollo del 5G existe mejoras en la velocidad satisfaciendo la demanda actual y futura de la transmisión de datos y ya incluyendo al Internet de las cosas. La mayor problemática que se tiene es la interferencia que puede causar la tecnología LTE-U con los sistemas WiFi existentes, al operar en la banda no licenciada de los 5GHz; LTE-U podría saturar el tráfico de estas conexiones en los canales por lo que emite WiFi reduciendo la calidad de la señal o el número de canales disponibles para la transmisión (Hafaiedh, 2017). Por este motivo, se estudia la tecnología LTE-U para llegar a concluir si se puede lograr la coexistencia con WiFi.

Hay varias ventajas de desplegar LTE en banda no licenciada, incluyendo:

- Alta eficiencia espectral, ya que existen varios MHz disponibles por los que LTE-U puede transmitir datos.
- Buen rendimiento de LTE en despliegue denso, ya que puede descargar el tráfico de la banda licenciada a la no licenciada, liberando tráfico y permitiendo obtener mayores velocidades de transmisión.
- Soporte perfecto para el traspaso y la continuidad del servicio a medida que la UE abandona el área de servicio de banda no licenciada, ya que

automáticamente si el UE abandona la cobertura de la banda no licenciada esta volvería a la licenciada.

1.1.1 Justificación

El incremento de los dispositivos inteligentes con el pasar del tiempo, ha hecho que las diferentes redes converjan y busquen la manera de cubrir todo el crecimiento de datos que se transmiten por la red, mediante la implementación y creación de nuevas tecnologías que mejoran la calidad de servicio de comunicación. La necesidad surge por conocer si LTE-U es una propuesta a futuro y podría coexistir con WiFi, o en tal caso LTE-U se convierta en la nueva tecnología de área amplia, es lo que incentivo al desarrollo de este proyecto. Ya que podemos recordar como algunas tecnologías llegaban como soluciones a problemas como WiMAX pero las velocidades que proponían HSPA, HSPA+; LTE, terminaron por lograr que en algunos lugares del mundo se apaguen sus redes. Existe un gran debate en la actualidad sobre que protocolos se debe usar para poder transmitir más paquetes por segundo, mecanismos de acceso, mecanismos de multiplexación, mecanismos de competencia leal entre LTE-U y WiFi, etc. Por otro lado, este proyecto aportará al estado del arte para futuras investigaciones y además asentará precedentes para implementaciones en 5G.

1.1.2 Objetivo General

Analizar la coexistencia de las tecnologías LTE-U y WiFi en la banda de 5GHz a través de un estudio minucioso del estado del arte.

1.1.3 Objetivos Específicos

- Describir conceptos teóricos relacionados a las tecnologías LTE-U y WiFi según lo requerido para un buen entendimiento del proyecto de titulación.
- Definir las tecnologías LTE-U y WiFi, así como su arquitectura y funcionamiento. El cual permita obtener un conocimiento previo y claro del funcionamiento de cada una de las tecnologías.

- Analizar si las tecnologías LTE-U y WiFi pueden coexistir juntas en la banda de 5GHz en función de parámetros técnicos de desempeño.
- Establecer conclusiones de los resultados encontrados en cuanto a la coexistencia de las tecnologías LTE-U y WiFi, y como estas se encuentran actualmente en el mercado.

2. Capítulo I: Marco Teórico

2.1 Bandas Licenciadas

Las bandas licenciadas son frecuencias exclusivas en las cuales se minimizan interferencias y se garantiza un rendimiento de transmisión de alta confiabilidad, ya que tienen bandas específicas asignadas para la transmisión y recepción; estas frecuencias siguen términos y definiciones establecidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU).

Para poder utilizar bandas licenciadas se debe tener en cuenta 3 conceptos fundamentales como son:

- **Atribución:** Inscripción en el cuadro de atribución de bandas de frecuencia de una banda de frecuencia específica, esto se debe realizar para que pueda ser utilizada por uno o varios servicios de comunicación. (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, 2017)
- **Adjudicación:** Inscripción de un canal determinado en un plan, adoptado por una conferencia competente, para ser utilizado por una o varias administraciones para un servicio de radiocomunicación terrenal o espacial. (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, 2017)
- **Asignación:** Autorización que da una administración para que una estación radioeléctrica utilice una frecuencia o un canal radioeléctrico determinado. Generalmente para obtener una autorización se debe participar de concursos y el ganador tendrá la autorización a utilizar una frecuencia o varias frecuencias. (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, 2017)

2.2 Bandas no Licenciadas

Las bandas no licenciadas son de uso libre y no se requiere autorización especial por algún ente regulador de las telecomunicaciones. Existe a nivel mundial las bandas no licenciadas las cuales están en las bandas de 2,4GHz y 5GHz. (Yubero, 2016)

La banda no licencia de 5GHz es utilizada para aplicaciones de acceso a internet, transmisión de video IP, interconexión de oficinas y hasta sincronización de semáforos, esta banda no licenciada puede llegar típicamente a 10 o 20 km, pero puede ampliarse dependiendo los equipos y antenas a utilizar. (Yubero, 2016)

La banda no licenciada se destina a dispositivos que no tienen subdivisión de canales, por lo que se debe establecer configuraciones básicas de convivencia, como densidad de potencia radiada, anchura de banda mínima, etc. (Enacom, 2017).

2.3 Técnicas de acceso

2.3.1 FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia):

FDMA se utiliza en múltiples protocolos de comunicaciones, digitales o analógicos, principalmente en radiofrecuencia y entre ellos en telefonía móvil de redes GSM. Implementado en la banda de 800MHz utilizando por canal 30kHz. En FDMA como se muestra en la figura 1, el acceso al medio se realiza dividiendo el espectro disponible en distintos rangos de frecuencia, los cuales son asignados a los diferentes usuarios sin generar interferencia entre sí. (Technopedia, 2019)

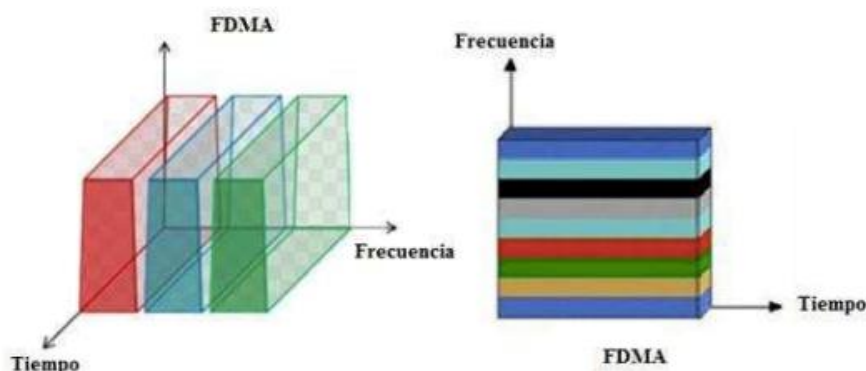


Figura 1. Acceso Múltiple por división de frecuencia.

Tomado de: (Orozco, 2011)

Algunas de las características de FDMA son:

- La división del espectro se realiza en base a la demanda de usuarios que quieren acceder al medio. (Graterol, 2017)
- En cuanto a la transmisión requiere duplexor de antena para realizar transmisiones dúplex. (Graterol, 2017)
- Una vez asignado el canal de frecuencia a un usuario, esta es usada exclusivamente por ese usuario hasta que éste no necesite el recurso (Graterol, 2017)

Una de las desventajas de utilizar FDMA es que si una frecuencia es asignada a un usuario y este no está transmitiendo se desperdicia el canal por lo que esta técnica de acceso no es eficiente al momento de compartir recurso radioeléctrico.

2.3.2 TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo)

TDMA, es la técnica múltiple más utilizada principalmente en los sistemas de transmisión digital, en la que utiliza un canal para realizar comunicaciones entre múltiples usuarios, al asignarle a cada uno de ellos ranuras de tiempo diferentes como se muestra en la figura 2.

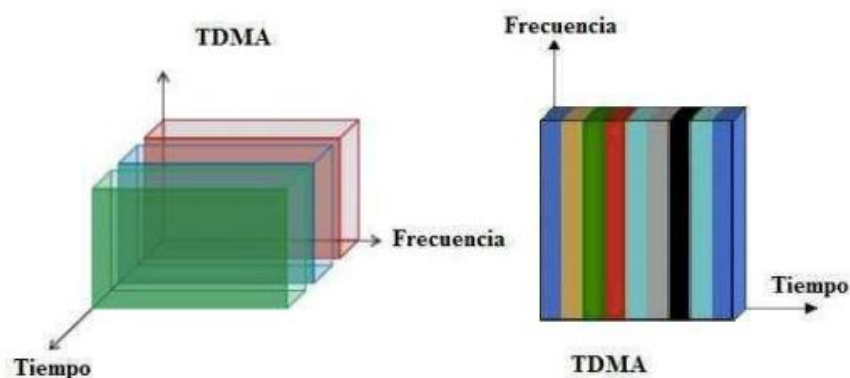


Figura 2. Acceso Múltiple por división de Tiempo.

Tomado de: (Orozco, 2011)

TDMA, tiene a usuarios que comparten un mismo canal en una misma frecuencia portadora, esto quiere decir que un teléfono móvil necesita espacios de tiempo disponibles para enviar o recibir audio, por lo que el tiempo restante puede ser ocupado el canal para llevar una señal de llamada en espera o permitirle que el usuario cambie entre dos llamadas. A los usuarios que comparten un mismo canal se les asigna espacios de tiempo (*timeslot*), que se repiten durante un grupo de espacios (*slots*). (Carrasco, 2017)

Otra de las características de TDMA es que se puede aplicar cuando la capacidad de datos de transmisión es mayor que la tasa de datos requerida por los dispositivos de recepción y emisión. (Carrasco, 2017).

Las ventajas de TDMA es que al dividir a los usuarios a través del tiempo, se asegura que no mantiene interferencias con otros usuarios que utilicen la red. Otra de las ventajas es que permite enviar voz, dato, video, soportando velocidades desde 64 Kbps a 120 Kbps. Además, con su compatibilidad con FDMA permite compatibilidad de servicios con dispositivos dual generando un beneficio económico. (Carrasco, 2017).

TDMA utiliza ranuras de tiempo asignadas por lo que se convierte en una desventaja ya que al momento de cambiar de una celda a otra, deja de tener ranura asignada por lo que si en la celda no se encuentra ranuras disponibles la

llamada telefónica podría verse interrumpida. Por otra parte una señal que viene desde una estación base puede llegar al receptor desde cualquier punto, por lo que puede causar interferencia. (Carrasco, 2017).

2.3.3 CDMA (Acceso Múltiple por División de Códigos)

CDMA, es una técnica de acceso al medio, la cual no utiliza un acceso múltiple mediante una división de frecuencias, más bien como se indica en la figura 3, hace una división en el cual y asigna un código diferente a cada usuario, lo que significa que múltiples usuarios pueden transmitir de manera simultánea sobre un mismo canal y son identificados por un código. (UDLAP, 2018)

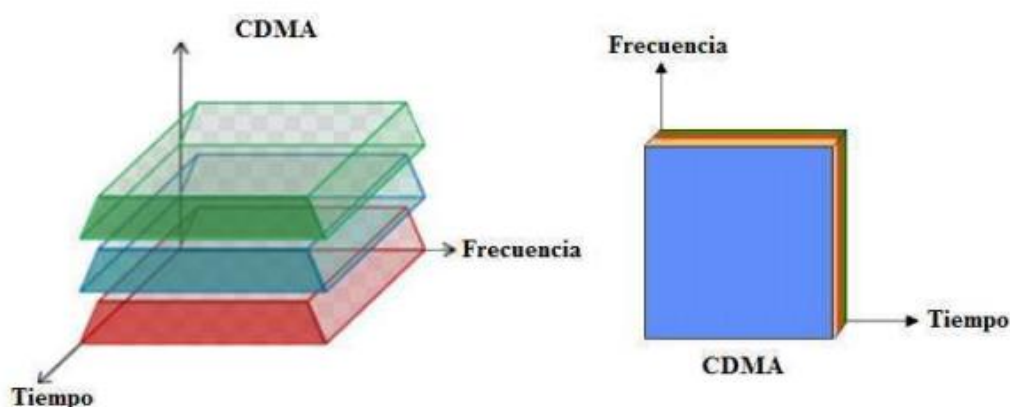


Figura 3. Acceso Múltiple por División de Códigos.

Tomado de: (Orozco, 2011)

Este tipo de comunicación digital trabaja asignando un código aleatorio, el cual es usado para transmitir la señal de un usuario en una señal de banda ancha; si el receptor recibe múltiples señales de banda ancha utilizará el código asignado a cada usuario en particular y con esta información podrá recuperar la señal de transmisión. (UDLAP, 2018)

Algunas de las características de CDMA son:

- Mayor capacidad ya que esta tecnología permite un mayor número de usuarios compartidos que pueden transmitir sobre el mismo canal. (UDLAP, 2018)

- Permite un control de nivel de potencia mediante procesamiento de señales y corrección de errores. (UDLAP, 2018)
- Gracias al uso de códigos aleatorios es posible aumentar la potencia de las señales lo que implica la reducción del ruido e interferencia. (UDLAP, 2018)
- Nivel alto de seguridad y privacidad, ya que se dificulta capturar y descifrar los mensajes que viajan por la señal. (UDLAP, 2018)

Una de las ventajas que tiene CDMA es que nunca se pierde una llamada en caso de cambiar de celda ya que su funcionamiento permite que al momento de cambiar de celda funciona tanto en las dos celdas hasta que la señal en la nueva celda tenga suficiente intensidad para soportarla; lo que implica que se mejora la calidad del servicio de voz. (UDLAP, 2018)

2.4 OFDM (Modulación por División Ortogonal de Frecuencia)

Es una multiplexación que consiste en enviar ondas ortogonales de portadoras de diferente frecuencia en las que cada onda lleva información. Su característica principal es que utiliza un espaciado adecuado u óptimo, esto quiere decir que la separación espectral entre portadoras consecutivas es siempre la misma e igual al inverso del periodo de símbolo. Una de las principales ventajas de OFDM es que soporta interferencias y desvanecimiento por su multiplexación de la señal. (Turnero, 2014)

Como se muestra en la figura 4, OFDM no deja espacios de guarda entre las ondas lo que implica que las ondas ortogonales se sobrepongan unas con otras permitiendo ampliar el ancho de banda. (Behaine, 2016)

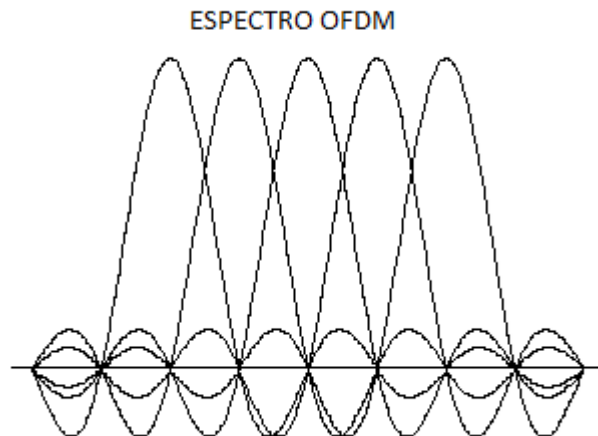


Figura 4. Espectro OFDM.

Tomado de: (Matic, 2015)

El efecto Doppler, ruido de fase y la potencia pico promedio (PAPR, de inglés *peak-to-average power ratio*) son algunos de los limitantes de OFDM.

Para el primer limitante este efecto rompe la ortogonalidad de las subportadoras lo que implica la disminución del desempeño OFDM, el ruido genera que las subportadoras no oscilen perfectamente y causen pérdidas de sincronización del sistema, y por último la potencia pico y la potencia media de la señal que se transmite genera desbalance en las subportadoras lo que implica el degradado de la señal. (Behaine, 2016)

2.5 OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales)

Se basa en OFDM como se muestra en la figura 5, el cual consiste en dividir el canal en un conjunto de subportadoras ortogonales los cuales se reparten para la necesidad de cada usuario del canal.

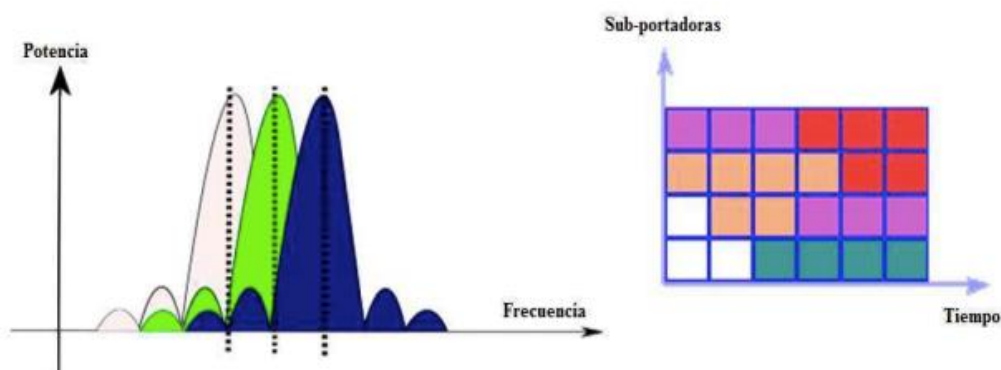


Figura 5. OFDMA

Tomado de: (Orozco, 2011)

El sistema es capaz de realimentarse con las condiciones que sea solicitado el canal, en el cual se adapta continuamente el número de subportadoras que se asignan al usuario, se basa en función de la velocidad y las condiciones del canal.

Dependiendo de la rapidez de la asignación, se consigue cancelar de forma eficientes las interferencias cocanal y los desvanecimientos. (Orozco, 2011)

2.6 Evolución de los sistemas de comunicación móviles

2.6.1 Primera Generación

Establecidos en la década de los 80, los sistemas móviles analógicos y semianalógicos son considerados como la primera generación. El primer sistema de telefonía móvil fue lanzado por Ericsson en 1981 conocido como NMT (*Nordisk MobilTelefoni*). (García, 2016)

El primer sistema analógico fue desarrollado por la compañía Telefonía y Telegrafía de Japón (NTT) en el año de 1979, años después en 1981 se desarrolla NMTS operando en países como Suecia, Finlandia, Dinamarca y Noruega, utilizaba la banda de 450 MHz. (Orozco, 2011)

En 1983 se comienza a utilizar en Estados Unidos el Sistema Americano de telefonía móvil (AMPS), operaba en la banda de los 800MHz manejando 832 canales de 30kHz cada uno. (Orozco, 2011)

Finalmente, en el año de 1985 el Reino Unido desarrolla el sistema TACS (del inglés, *Total Access Communications System*), utilizaba 1000 canales cada uno de 25kHz operando en la banda de 900Mhz. (Orozco, 2011)

2.6.2 Segunda Generación

La segunda generación nace alrededor del año 1990, se caracterizaba por su introducción a la telefonía avanzada, usando circuitos digitales de datos conmutados. En estados Unidos se realizó la primera llamada digital, que años más tarde en Europa se crearía la primera red GSM. (EcuRed, 2015)

GSM fue el primer sistema de telefonía móvil digital, en el cual un cliente GSM podía conectarse a la red y recibir mensajes de correo electrónico, llamadas y mensajes de texto, fax y navegación por internet. (EcuRed, 2015)

Esta generación de telefonía móvil utilizo TDMA para el acceso de hasta 8 usuarios utilizando canales separados por 200MHz. Los sistemas básicos utilizaban frecuencias de 900MHz, mientras que otros de 1800MHz y 1900MHz. (EcuRed, 2015)

La telefonía móvil se volvió más concurrente ya que se ofrecía mejor calidad de voz, velocidad de trasmisión y mensajes de texto (SMS) (EcuRed, 2015)

2.6.3 Tercera Generación

La tercera generación era una clara evolución de la primera y segunda generación, pero mantuvo los principios que fue el continuar con desarrollos a futuro. En la tercera generación se permitió más conexiones a los usuarios gracias a la mejora de potencia en las antenas base, hubo también una notable mejora en la calidad de voz y velocidad el cual alcanzaba hasta 2Mbps. (MASblog, 2016)

Permitió también la aparición de aplicaciones de audio, voz y video, además de

videoconferencia en tiempo real. (MASblog, 2016)

Los estándares de 3G son especificaciones IMT-2000 de la ITU, en donde Europa y Japón seleccionaron el estándar UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) (MASblog, 2016)

2.6.4 Cuarta Generación

La cuarta generación también conocida como LTE (*Long Term Evolution*), hace referencia a la tecnología inalámbrica que permite la transmisión de datos para los dispositivos móviles. Desarrollado por 3GPP es la evolución del estándar 3G, permite una velocidad máxima de 170 Mbps con dos antenas base utilizando la tecnología MIMO, o de 300Mbps con cuatro antenas base proporcionando mayor velocidad de descarga y de subida de datos, a su vez permite el acceso a 200 usuarios activos por celda de 5MHz (Andrea Guevara, 2013)

LTE tiene baja latencia de hasta 100 ms para el Control-Panel y hasta 10 ms para el User-panel, compatibilidad con otras tecnologías 3GPP. Utiliza un ancho de banda que varía entre 1.4, 3.5, 10, 20MHz. Además, LTE tiene un desarrollo y despliegue fácil y barato de la red. (Orozco, 2011)

Mediante LTE se puede realizar videoconferencias a través de la red, manteniendo una alta calidad de servicio. (Orozco, 2011)

2.7 Small Cells

Son estaciones bases inalámbrica con características físicas similares a las de un router WiFi, como se muestra en la figura 6, de baja potencia, que permite el acceso celular en interiores mediante un proveedor con un rango de alcance de aproximadamente 100m metros. Una femtocell es capaz de proporcionar un servicio completo de datos y voz a dispositivos inteligentes. Las características principales incluyen la detección automática del ISP, el registro automático, la autenticación a la red central celular, las auto-actualizaciones, la verificación de la ubicación y el ajuste de la potencia de transmisión.(Houngninou, 2010)

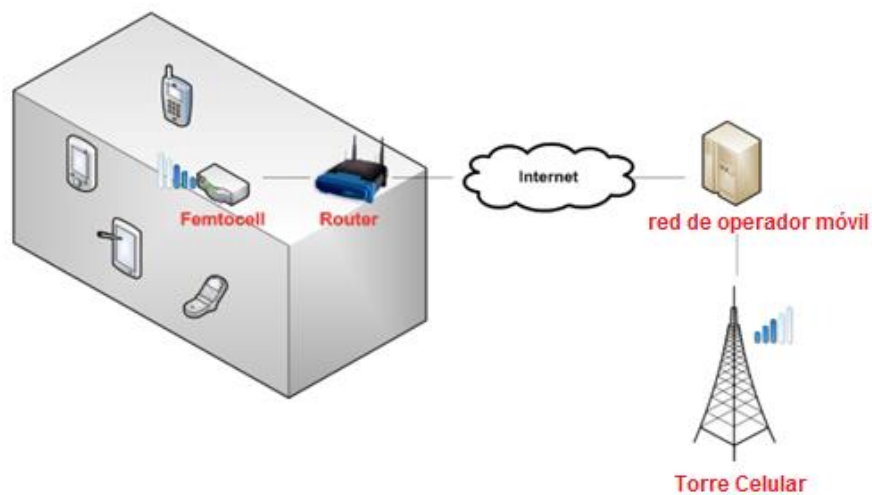


Figura 6. Femtocell.

Tomado de: (Houngninou, 2016)

Algunas de las características principales son:

- Capacidad de acceso de 4 usuarios simultáneamente; si un nuevo dispositivo utiliza el servicio de voz, ésta se irá por la estación base macro que se encuentre dentro del área de cobertura.
- Velocidades de conexión de banda ancha móvil de hasta 72 Mbps.
- Generalmente la potencia de salida es de 20 mW, la cual es 5 veces menor que la de un router WiFi.
- Es aplicable a tecnologías con estándares como UMTS, GSM, CDMA-2000, LTE y WiMAX. (Maugard, 2017)

2.8 PDSCH (Enlace descendente físico del canal compartido)

PDSCH, del inglés *Physical Downlink Shared Channel*, es un canal físico que transporta datos específicos al usuario, también lleva un mensaje de respuesta de acceso aleatorio. (RF Wireless World, 2017)

Para el canal LTE PDSCH se utilizan los tipos de modulación QPSK, 16QAM, 64QAM. LTE eNodeB selecciona el tipo de modulación adecuado en función del

algoritmo de adaptación. Esto depende también de la condición del canal de radio y de la capacidad del buffer. (RF Wireless World, 2017)

2.9 PDCCH (Canal de control físico del enlace descendente)

PDCCH, del inglés *Physical Downlink Control Channel*, transporta información de control del enlace descendente en el que incluyen recursos de asignación para los canales de aviso y de tráfico compartido. Además transporta información sobre los mecanismos de retransmisión. (Tutorial LTE, 2014)

El número de elementos de control asignados a un canal PDCCH es determinado por cada eNodoB, en relación de las condiciones del canal. (Tutorial LTE, 2014)

2.10 PCFICH (Indicador de formato de control físico del Canal)

PCFICH del inglés, *Physical Control Format Indicator Channel*, informa al terminal o UE sobre el número de símbolos utilizados en la transmisión del canal PDCCH, transmite cada subtrama en el primer símbolo. Además utiliza un indicador el cual está formado por 32 bits que se transmite utilizando la modulación QSPK. (Tutorial LTE, 2014)

2.11 Técnica de Acceso a WiFi

2.11.1 CSMA/CA (Detección de colisiones de acceso múltiple por parte de la portadora)

CSMA/CA, del inglés *Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance*, es el protocolo más utilizado en redes inalámbricas, su función es detectar una transmisión y otorgar un tiempo aleatorio antes de transmitir disminuyendo la probabilidad de colisiones. Al periodo de tiempo aleatorio que se añade antes de la transmisión se llama espacio de trama (IFS, del inglés *Frame Spacing*). El emisor realiza evaluación del canal para saber si está disponible, una vez que se encuentra disponible el canal, se espera un periodo IFS antes de transmitir, si el canal sigue disponible realiza la transmisión esperando la llegada del acuse de recibo que indique que no se perdió información enviada. (dsi, 2015)

2.11.2 DFC (Función de coordinación distribuida)

Se define como la función dentro de un conjunto básico de servicios, cuando una estación puede transmitir o recibir paquetes de datos a través del medio inalámbrico. El tráfico que se transmite mediante DCF es de tipo asíncrono, esto quiere decir que se introducen retardos aleatorios para poder validar si el canal está disponible. (bibing, 2017)

DFC utiliza CSMA/CA como protocolo para acceder al medio, requiere de acuses de recibo para identificar si el paquete llegó a destino. Utiliza un campo de duración el cual tiene un tiempo de reserva para poder realizar una nueva transmisión. (bibing, 2017)

2.12 Encriptación WiFi

2.12.1 Privacidad equivalente al cableado

Mayormente conocida como WEP, fue desarrollado para redes inalámbricas y fue aprobado como el estándar de seguridad WiFi. Se trata de un sistema con autenticación en el cual se define una contraseña en donde las tramas que viajan por esta red están cifradas y si alguien trata de escuchar el canal leerá paquetes de caracteres cifrados. (acenswhitepapers, 2012)

Este tipo de encriptación utiliza un algoritmo de cifrado de entre 64 y 128 bits, en los que esta clave se particiona de la siguiente manera; la primera es la clave de usuario fija y estática que se configura para que cualquier dispositivo que quiera ingresar en la red utilice esta clave para su acceso, mientras que la segunda se la conoce como vector de inicialización y su función es encriptar con claves dinámicas las tramas que viajan por la red. (acenswhitepapers, 2012)

En la actualidad este método de encriptación es básica y muy poco recomendada por su baja seguridad, ya que puede ser vulnerada con facilidad o utilizando ataques al servicio como un ataque de fuerza bruta. Además, este tipo de encriptación fue dada de baja en los dispositivos WiFi. (NetSpotApp, 2019)

2.12.2 Acceso protegido WiFi.

Conocida como WAP, fue desarrollado para dar solución a los problemas que tenía WEP, este sistema cuenta con claves dinámicas y control sobre la longitud de las claves. La autenticación de usuarios se basa en un servidor, en donde se almacenan claves y usuarios de autenticación y de esta manera cada usuario que tenga credencial asociada en el servidor puede conectarse a la red. (acenswhitepapers, 2012)

WAP permite diferentes maneras de autenticación que incluye la validación de usuario, utilizar la clave compartida, credenciales almacenados en el servidor o certificados digitales. (acenswhitepapers, 2012)

2.12.3 Acceso protegido WiFi versión 2

Se trata de una mejora de seguridad de WAP en el que se agrega el uso de encriptación estándar avanzada aprobada por los Estados Unidos para la encriptación de información clasificada como de alta confidencialidad. Además, incorpora las características del estándar 802.11i que WAP no lo tenía. (NetSpotApp, 2019)

Fue desarrollado para la encriptación en ambientes empresariales para mejorar la seguridad de su información. (NetSpotApp, 2019)

2.13 Throughput

Se lo conoce como la tasa promedio de transmisión efectiva de un paquete que llega a destino por medio de un canal de comunicación. Este paquete puede ser enviado mediante un enlace físico, lógico o a través de un nodo de la red. (Dorado, 2012).

Por lo general el *throughput* es medido en bits por segundo (bit/s o bps) o en algunos casos es medido en paquetes de datos por segundo o paquetes de datos por franja de tiempo (Dorado, 2012).

2.14 Tasa de Error Binario

BER del inglés *bit error rate*, es una medida del número de errores de bit que se producen en un número determinado de transmisiones bits, además es una medida de la calidad en el transmisor, receptor, canal y entorno, ya que tiene en cuenta factores como ruido, fluctuación, atenuación y desvanecimiento. Las pruebas BER generalmente no se utilizan con interfaces de baja velocidad. Es una prueba esencial para las interfaces de alta velocidad. (FrenzelJ, 2016)

Se puede calcular de la siguiente manera:

$$BER = \frac{\text{Cantidad de bits recibidos con errores}}{\text{Cantidad total de Bits recibidos}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

A diferencia de otros métodos para evaluar el canal o el sistema, el BER realiza una evaluación punta a punta, lo que permite realizar una evaluación real en el sistema, en vez de realizarlo por paralelo. (FrenzelJ, 2016)

2.15 Señal/Interferencia

SIR del inglés, *signal-to-interference*, es una medida que permite cuantificar el nivel de interferencia en la señal de un AP. La señal interferente es la señal transmitida por otros AP que pueden o no pertenecer a su WLAN y que utilizan el mismo o uno de los canales 802.11 adyacentes. (NetSpot, 2019)

La relación SIR es similar a la relación señal/ruido, pero en este caso la interferencia es específica de la interferencia cocanal procedente de otros radiotransmisores. El consenso general es que los dispositivos inalámbricos funcionen de forma fiable con una relación SIR de 0 dBm o menos. (NetSpot, 2019)

2.16 LAA (Acceso Asistido por Licencia)

LAA, es una característica de LTE en el que se aprovecha la banda no licenciada de los 5GHz combinando con las bandas licenciadas, lo que permite aprovechar y ofrecer un aumento de rendimiento a los usuarios de dispositivos móviles. Se introdujo en la versión de 3GPP como parte de LTE *Advanced PRO*. La LAA o

acceso asistido por licencia es un tipo de LTE en la tecnología del espectro sin licencia. Las otras tecnologías que utilizan el espectro sin licencia para LTE son LTE-U y *MulteFire*. (everything RF, 2017)

LAA utiliza la agregación de portadoras en el enlace descendente para combinar LTE en la banda no licenciada y licenciada para proponer aumentos de velocidad de datos. Dado que esta tecnología opera en la banda no licenciada de los 5GHz debe ser capaz de coexistir con la tecnología WiFi. LAA utiliza un concepto llamado LBT (del inglés, *Listen-before-talk*), el cual selecciona dinámicamente los canales en la banda de 5GHz que no están siendo ocupados por WiFi, lo que implica evitar interferencias con la señal WiFi. (everything RF, 2017)

Algunas de las ventajas de LAA son:

- Los consumidores obtienen velocidades de datos más altas, tanto en interiores como en exteriores, utilizando la combinación de bandas licenciada y no licenciada. (everything RF, 2017)
- La LAA libera capacidad en el espectro licenciado, utilizando tanto la banda licenciada como la no licenciada. Esto quiere decir que libera el tráfico que se encuentra en la banda licenciada para ofrecer mayor calidad de servicio. (everything RF, 2017)
- LAA permite a los operadores móviles ofrecer Gigabit LTE, ya que puede utilizar la banda no licenciada para más velocidad de transmisión. (everything RF, 2017)

3. Capítulo II: Definición de las tecnologías LTE-U y WiFi

3.1 WiFi

3.1.1 Historia y Definición

WiFi es una tecnología de red inalámbrica utilizada actualmente para ambientes pequeños empresariales o residenciales. La historia de esta tecnología radica

en el año de 1888 cuando el físico alemán Rudolf Hertz, realizó la primera transmisión con ondas electromagnéticas utilizando un oscilador como emisor y un resonador como receptor. En 1899 Marconi estableció comunicación inalámbrica por el canal de la mancha. En el año de 1971 se creó el primer sistema de conmutación de paquetes mediante una red de radio, constaba de 7 equipos distribuidos en diferentes islas los cuales podían comunicarse con un equipo central, esta red era conocida como "ALOHA". (Garreta, 2017)

Para el año 1979 la Corporación Internacional de Máquinas de Negocio (IBM, del inglés, *International Business Machines Corporation*) líder en investigación, desarrollo y fabricación de las tecnologías de la información, publicó en *Proceeding* de IEEE pruebas y resultados que arrojó su experimento de infrarrojos en Suiza. Esta publicación ha sido valorada como el punto de partida de las redes inalámbricas. Para los años 90 los principales vendedores de soluciones inalámbricas eran Nokia, 3com, Airones, Intersil, Lucent Technologies y Symbol Technologie, los cuales deciden aliarse bajo el nombre de WECA Alianza de Compatibilidad Ethernet Inalámbrica (del inglés, *Wireless Ethernet Compability Alliance*) para poder definir los estándares e integración en el mercado de las redes inalámbricas. Años más tarde el nombre de la alianza es reemplazado por WiFi de la abreviación Fidelidad Inalámbrica del inglés *Wireless Fidelity*. (Rodriguez, 2008)

WiFi nace para reemplazar las capas físicas y MAC en ethernet, en la que se pretende diferenciar el modo de conexión a la red, ethernet mediante cable y WiFi mediante ondas electromagnéticas. Cabe recalcar que WiFi no es una marca, más bien es una asociación, cada router con el logo de WiFi, indica que pueden trabajar con cualquier dispositivo que sea capaz de conectarse a una red inalámbrica. (Rodriguez, 2008)

Los routers WiFi son capaces de emitir las señales que son captadas por receptores de WiFi instalados en cada dispositivo inteligente. El entorno en el que se instala estos routers WiFi juegan un papel muy importante ya que dependiendo de este, se puede encontrar con elementos que reduzcan la señal

y por tanto la velocidad con la que el dispositivo inteligente navegará por la red. (Shaw, 2018)

Los routers pueden variar su frecuencia para crear diferentes canales, así para la banda de las 2,4 GHz se tienen 12 canales y para la banda de 5GHz tiene 30 canales dependiendo de las normas en las que se rigen cada país. En la actualidad los routers son capaces de elegir el canal menos ocupado. (Pascual, 2018)

Las principales ventajas de WiFi es que al ser una red inalámbrica, se ofrece comodidad al usuario, ya que para que un dispositivo se conecte a la red no debe estar conectado a través de un cable como ethernet. Además permite la conexión a la red de múltiples dispositivos inteligentes. Pero también como red inalámbrica presenta algunas desventajas como, dependiendo el sitio, las interferencias y pérdidas de señal que exista en el ambiente puede generar una disminución en la velocidad de navegación con la red, por otro lado, se puede necesitar de repetidoras WiFi para ampliar el alcance en ambientes residenciales o empresariales. La seguridad también viene a ser una desventaja para WiFi ya que al enviar la señal mediante ondas es un poco más fácil interceptar la señal. Las conexiones WiFi se encriptan mediante WEP, pero este método de encriptación ya ha sido violado. Ahora se utiliza WAP y WAP2 cuyas definiciones se encuentran en la sección 1.10 del primer capítulo. (Pascual, 2018)

3.1.2 Arquitectura WiFi

Cualquier dispositivo capaz de conectarse a la red, como por ejemplo una PC, una laptop, un teléfono inteligente son llamados también estaciones inalámbricas (STAs, del inglés *Wireless Stations*). Para que las STA puedan lograr acceder a una red inalámbrica deben utilizar una infraestructura tecnología como por ejemplo tarjetas de red (NIC), puntos de acceso (AP) o enrutadores inalámbricos. (Salazar, 2017)

Como se muestra en la Figura 7 un punto de acceso es un componente común en una topología de red inalámbrica, el cual tiene dos objetivos principales que son, permitir la conexión inalámbrica sobre una red cableada en un espacio determinado, y permite la conexión a la red de múltiples dispositivos. (Bastidas, 2016)



Figura 7. Uso de un AP en una red inalámbrica.

Tomado de: (Bastidas, 2016)

Además, un AP tiene funciones de repetidor de señales que maneja un ancho de banda por dispositivo y disminuye este si más dispositivos se conectan a él. Si se desea ampliar la zona de cobertura, se puede colocar más AP's y configurarlos a la red para que a medida que el usuario se desplaza este no pierda la cobertura y se conecte nuevamente a un AP. (Bastidas, 2016)

Por otro lado un AP tiene la capacidad de soportar comunicaciones punto a punto y punto a multipunto. Como se muestra en la Figura 8, las comunicaciones punto a multipunto facilitan la conexión de varios dispositivos a la red, esta comunicación se utiliza por ejemplo en domicilios u oficinas. (Bastidas, 2016)

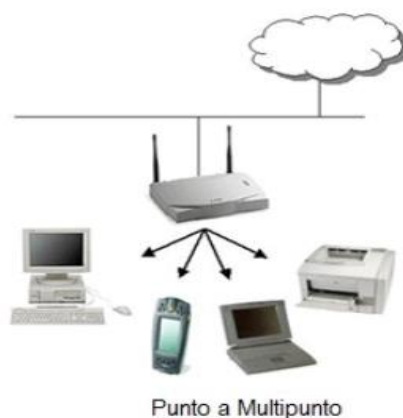


Figura 8. Comunicación Punto a Multipunto

Tomado de: (Bastidas, 2016)

Mientras que, como se muestra en la Figura 9, la comunicación punto a punto se utiliza para soportar comunicaciones con distancias grandes como por ejemplo entre edificios. La distancia varía dependiendo de la configuración y de las antenas transmisoras y receptoras pueden ir en promedio desde los 100m a 30 Km.



Figura 9. Comunicación Punto a Punto.

Tomado de: (Bastidas, 2016)

Cuando dos o más STAs se encuentran conectados a la misma red, se llaman Conjunto de Servicios Básicos (BSS, del inglés *Basic Services Set*). Consiste en

un punto de acceso junto con las estaciones asociadas los cuales se conectan al AP, el AP controla las estaciones dentro del BSS. En la figura 10 se muestra un diseño básico de un BSS el cual consta de un AP y sus STA, los cuales se conectan a través del AP. (tutorial-reports,s.f, n.d.)

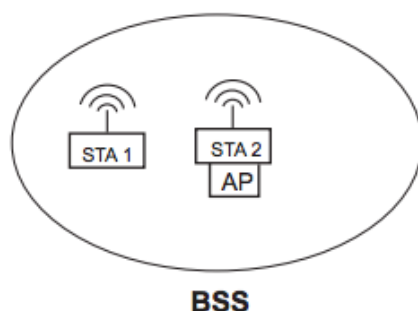


Figura 10. Conjunto de Servicios Básicos (BSS)

Tomado de: (tutorial-reports,s.f, n.d.)

Las Redes Ad-Hoc son redes capaces de entablar comunicación rápida y espontáneamente, además cuando las estaciones dentro del conjunto de servicios básicos son estaciones móviles se denominan como un Conjunto de Servicios Básicos Independientes (IBSS, del inglés *Independent Basic Service Set*), el cual, como se indica en la figura 11, realiza una comunicación “punto a punto”, en la cual todos los dispositivos funcionan sin clientes ni servidores, todos se comportan de la misma manera. (tutorial-reports,s.f, n.d.)

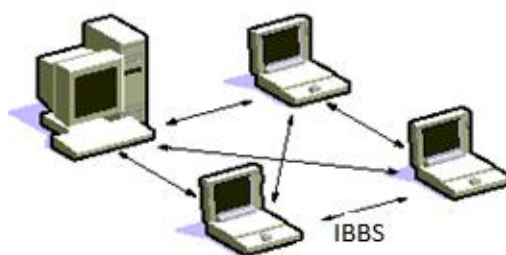


Figura 11. IBSS o Redes Ad-Hoc.

Tomado de: (tutorial-reports,s.f, n.d.)

Una infraestructura WiFi abarca algunos elementos los cuales permiten la comunicación, cuando dos o más BSS son interconectados en la red comienzan a usar un Sistema Distribuido (DS, del inglés, *Distribution System*). Como se muestra en la Figura 12, un DS es una estructura por el cual, mediante puntos de accesos pueden transmitir tramas entre sí o también con redes cableadas. El estándar 802.11 descrito en la sección 2.1.3, no especifica una topología de red para un DS, es por eso que comercialmente hablando se utiliza ethernet como la tecnología de red troncal. (Salazar, 2017)

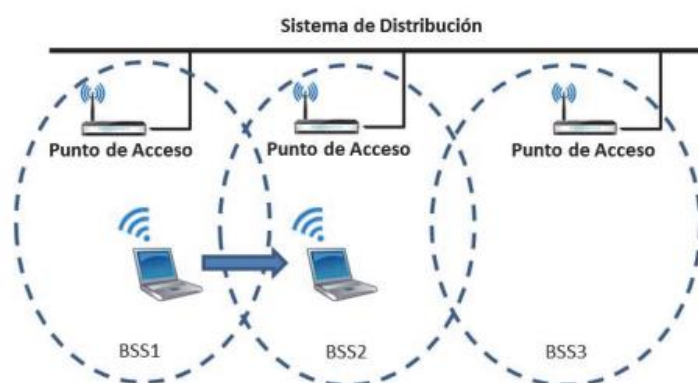


Figura 12. Sistema Distribuido.

Tomado de: (Salazar, 2017)

El DS permite la movilidad de la red asegurando que las tramas sean entregadas al AP asociado con el STA de destino. La movilidad de la red se conoce como la capacidad en la que un cliente inalámbrico puede desplazarse por toda el área de cobertura sin perder conexión. (tutorial-reports,s.f, n.d.)

Como se muestra en la Figura 13, el uso de BSS y DS permite crear redes más complejas y amplias de tal manera que se pueda extender la red WLAN a los diferentes departamentos dentro de una organización y por lo tanto permita el acceso a los dispositivos existentes. Esta topología toma el nombre de Conjunto de Servicio Extendido o ESS (*Extended Service Set*). (Bastidas, 2016)

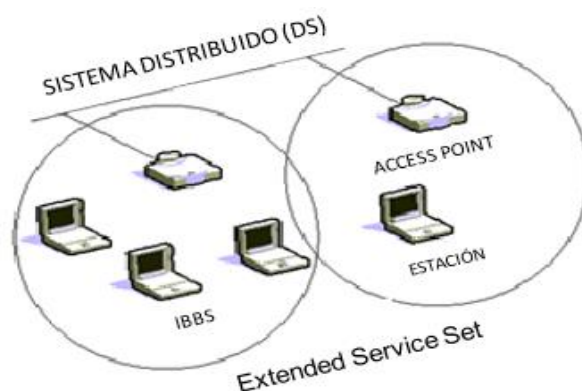


Figura 13. Conjunto de servicios extendidos (ESS).

Tomado de: (tutorial-reports,s.f, n.d.)

3.1.3 Estándares 802.11 WiFi

Tradicionalmente el estándar 802.11 es conocido como “WiFi”, trabaja tanto en el mismo control de enlace lógico que ethernet y en el mismo direccionamiento de 48bits de otros estándares 802.1. Aun conociendo esta información existen algunas diferencias en la capa física y la subcapa MAC. En entornos inalámbricos no existe una conectividad física definida por lo tanto existen diferentes controles adicionales que permiten regular la interferencia de datos y el acceso a la red. (Netacad,s.f, n.d.)

La terminología de WiFi es usada en ciertas redes inalámbricas que usan como especificaciones el estándar 802.11, que se define como la interfaz entre un cliente inalámbrico con una estación base, o con varios clientes inalámbricos. 802.11 es un conjunto de especificaciones de control de acceso al medio MAC y de la capa física (PHY) para implementaciones de redes inalámbricas de área local, que se ajusta al modelo OSI y el comité IEEE 802 define dos capas por separado, la capa de enlace lógico y el control de accesos a los medios. (Farnell Element 14, 2017)

Los estándares 802.11 han ido evolucionando con el pasar de los años, lo que ha permitido aumentar el rendimiento y el enlace inalámbrico para una mejor cobertura y comunicación. Algunos de los estándares 802.11 son los siguientes:

- **802.11a:** Define el formato y estructura del envío de señales generadas por routers y antenas de WiFi. Provee 1-2Mbps de transmisión en 2,4GHz con un alcance máximo de 20km. (Farnell Element 14, 2017)
- **802.11b:** Provee una velocidad máxima de transmisión de 11 Mbps y trabaja en la banda de 2.4GHz. Utiliza el mismo método de acceso definido por CSMA/CA, y debido al espacio que ocupa este protocolo, la velocidad máxima de transmisión es de 5,9 Mbit/s sobre TCP y 7,1 Mbit/s sobre UDP. Tiene un rango de operación óptima de 50m en interiores y 100 metros exteriores. (Shaw, 2018)
- **802.11g:** Es de acceso rápido y de velocidad superior, capaz de soportar un ancho de banda de hasta 54Mbps en condiciones ideales y las velocidades más lentas de 48 Mbps, 36 Mbps, 24 Mbps, 18 Mbps, 12 Mbps y 6Mbps en condiciones menos ideales. Trabaja en la frecuencia de 2,4GHz logrando un rango de operación hasta los 70 metros. Este estándar permite incorporar OFDM y la norma 802.11g establece que se debe usar OFDM para velocidades por encima de los 11 Mbps (Shaw, 2018)
- **802.11n:** Su objetivo principal es aumentar la distancia hasta 250 metros y la velocidad de transmisión hasta 600Mbps en condición ideal utilizando la tecnología Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO, del inglés, *multiple-input and multiple-output*), Funciona en las bandas de frecuencias de 2,4GHz y 5GHz. Tiene un rango de operación de hasta 250 metros. (Salazar, 2017)
- **802.11ac (WiFi 5):** En la actualidad los routers inalámbricos trabajan con tecnología MIMO y funcionan en el espacio de frecuencia de los 5GHz lo cual permite alcanzar velocidades de hasta 3.45Gbps. Los proveedores de servicio incluyen tecnologías que admiten 2,4GHz de frecuencia los cuales los hace compatibles con 802.11b/g/n para mejorar la velocidad de datos. (Shaw, 2018)

Existen algunos estándares que se están evaluando para su aprobación y su implementación, como son:

- **802.11ax (WiFi 6):** Conocido mejor como Wlan de alta eficiencia, funciona en el espectro de 2,4GHz y 5GHz, los dispositivos en los que se realizaron pruebas mostraron una velocidad máxima de 11Gbps. 802.11ax tiene como propósito principal elevar el rendimiento hasta 4 veces más las redes Wlan en ambientes utilizando de una manera más eficiente el espectro. Según los avances se calcula que la aprobación se llevará a cabo a finales del año 2019. (Shaw, 2018)
- **802.11ba:** Conocida como "*Wake-Up Radio*" (WUR), esta nueva tecnología que se está desarrollando está relacionada con el internet de las cosas, y su función es como aumentar la vida útil de los dispositivos y sensores dentro de la red, sustituyendo baterías con frecuencia manteniendo un rendimiento óptimo del dispositivo. Se espera su aprobación en el año 2020. (Shaw, 2018) Puede funcionar con el espectro de 2,4GHz y 5GHz.

3.1.4 Trama protocolo WiFi

La configuración de WiFi son medios compartidos en donde las estaciones transmiten y reciben en el mismo canal de radio, a eso se lo conoce como *half dúplex*. El problema radica en que un sistema no es capaz de oír mientras se está transmitiendo por lo tanto no se puede conocer si existe colisiones. El estándar 802.11 utiliza el protocolo CSMA/CA el cual utiliza un acuse de recibo de todas las transmisiones para conocer si se llegó a todas las estaciones; en caso de que no haya llegado a una estación se asume que se produjo una colisión y se procede a volverlo a intentar en un intervalo de espera aleatorio. (Netacad,s.f, n.d.) A continuación, en la Figura 14 se observan mejor los campos que tiene una trama 802.11 los cuales son descritos a continuación. (Netacad,s.f, n.d.)

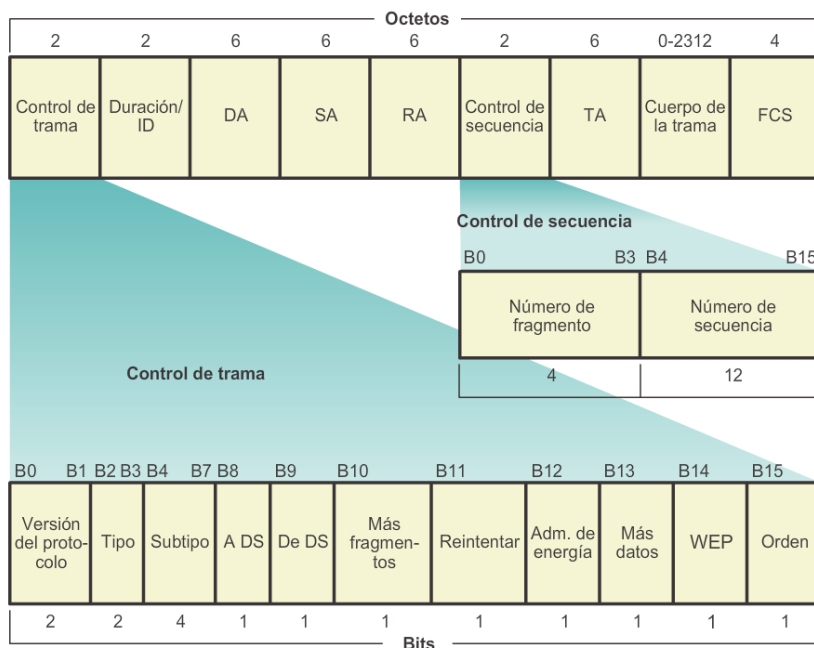


Figura 14. Campos de una trama 802.11.

Tomado de: (Netacad,s.f, n.d.)

- Versión del protocolo:** Indica la versión actual del protocolo 802.11 que se está utilizando. Las estaciones receptoras utilizan este valor para verificar la compatibilidad de la versión del protocolo de la trama enviada. (Salazar, 2017)
- Tipo y subtipo:** Indica las funciones y las subfunciones de la trama, los tipos de trama se dividen en control, datos y administración y estas a su vez tienen subtipos de trama que indican la función del tipo de trama. (Salazar, 2017)
- A DS:** Tiene como objetivo indicar si la trama sale o ingresa del DS, cabe recalcar que solo se utiliza en el tipo de trama de datos donde los STA se encuentran asociados a un AP. (Salazar, 2017)
- Más Fragmentos:** Indica si existen fragmentos de la trama de tipo datos o administración. (Salazar, 2017)
- Reintentar:** Su función es indicar si la trama es una retrasmisión de la trama anterior. (Salazar, 2017)

6. **Administración de energía:** Indica cuando un nodo que envía la trama está en ahorro de energía o en modo activo. (Salazar, 2017)
7. **Más Datos:** Indica que un STA almacena más tramas en buffer a un nodo que se encuentra en ahorro de energía. También es utilizado para indicar que existen tramas de difusión o multidifusión. (Salazar, 2017)
8. **Privacidad-WEP:** Indica si la trama utiliza cifrado y autenticación mediante WEP, se puede configurar para las tramas de datos y administración. (Salazar, 2017)
9. **Orden:** Indica que las tramas recibidas deben ser atendidas en orden de llegada. (Salazar, 2017)
10. **Duración/ID:** Indica el tiempo que se requiere en transmitir la trama o una identidad de asociación. (Netacad,s.f, n.d.)
11. **Dirección Destino:** Dirección MAC del nodo de destino final. (Netacad,s.f, n.d.)
12. **Dirección de Origen:** Dirección MAC del nodo que creó la trama (Netacad,s.f, n.d.)
13. **Dirección del receptor:** Dirección MAC que identifica al dispositivo inalámbrico del destinatario de la trama. (Netacad,s.f, n.d.)
14. **Número de fragmento:** Número de cada fragmento de la trama, (Netacad,s.f, n.d.)
15. **Número de secuencia:** Número de secuencia asignado a la trama, cabe recalcar que a las tramas retransmitidas se asignan con número duplicados. (Netacad,s.f, n.d.)
16. **Dirección del transmisor:** Contiene la dirección MAC que identifica el dispositivo inalámbrico de donde se transmitió la trama. (Netacad,s.f, n.d.)
17. **Cuerpo de la Trama:** Información que contiene la trama. (Netacad,s.f, n.d.)
18. **FCS:** Comprobación de redundancia cíclica de 32 bits de la trama. (Netacad,s.f, n.d.)

3.1.5 Análisis Espectral WiFi

Las redes WiFi utilizan dos bandas de frecuencia estándar para su funcionamiento la de 2,4GHz y la de 5GHz. En la actualidad, los operadores trabajan con routers dual, esto quiere decir que aceptan las dos bandas de frecuencia. En la Tabla 1 se expone cada frecuencia con sus características de operación.

Como se observa en la tabla 1, la banda de 2.4GHz tiene mayor interferencia debido a que existe mayor cantidad de antenas WiFi y usuarios tratando de acceder a ellos, por lo tanto 5GHz tiene menos interferencias ya que al tener mayor cantidad de canales disponibles pueden combinarse para generar mayor velocidad y también utilizarlo para descargar la demanda de tráfico de la red. (Xataka,s.f, n.d.)

Tabla 1.

Diferencias entre las bandas de frecuencias WiFi.

Bandas de Frecuencia	2,4 GHz	5GHz
Canales	14 canales no superpuestos	25 canales no superpuestos
Interferencias	Mayor interferencias debido a que tiene menor cantidad de canales disponibles	Menor interferencias ya que tiene mayor cantidad de canales por lo que se puede utilizar para la transmisión.
Velocidad Máxima	Menor velocidad de conexión máximo 50-60Mbps	Mayor velocidad de conexión cercanas a los 867 Mbps

Bandas de Frecuencia	2,4 GHz	5GHz
Rango de red	Mayor rango de alcance superando obstáculos	Menor rango de alcance es posible que no pueda pasar ciertos obstáculos
Estándar	IEEE 802.11b, 802.11g, 802.11n (B,G y N)	IEEE 802.11a, 802.11n, 802.11ac (A,N,AC)

Tomado de: **(Xataka,s.f, n.d.)**

3.2 LTE-U (Long Term Evolution Unlicensed)

3.2.1 Historia y Definición

LTE-U es desarrollado por *LTE-U Fórum*, el cual fue formado en 2014 por Verizon en colaboración con Alcatel-Lucent, Ericsson, Qualcomm Technologies, Inc. una subsidiaria de Qualcomm Incorporated y Samsung. El foro ha colaborado y generado especificaciones técnicas que incluyen: especificaciones mínimas de desempeño para operar estaciones base LTE-U y dispositivos de consumo en frecuencias no licenciadas en la banda de 5GHz, y especificaciones de coexistencia. Las especificaciones soportan la operación de LTE en las bandas de 5 GHz UNII-1 y UNII-3, definidas en la sección 2.2.8; para portadoras de enlaces descendentes suplementarios (SDL), junto con un despliegue de LTE en bandas licenciadas, basado en la 3GPP ya publicada en la versión 10 y en especificaciones posteriores. (LTE-U FORUM, 2018)

LTE-U es una extensión de las redes móviles existentes LTE, lo cual permite utilizar bandas no licenciadas en complemento con las bandas licenciadas, aumentando la velocidad en la transmisión de datos, aumento de capacidad, mayor cobertura, baja latencia, mejor rendimiento en el enlace, gestión de movilidad y una mejor experiencia de usuario.

LTE-U extiende los beneficios de LTE y LTE *Advanced* al espectro no licenciado, permitiendo a los operadores móviles descargar el tráfico de datos en frecuencias no licenciada de manera más eficiente y efectiva. Con LTE-U, los operadores pueden ofrecer a los consumidores una experiencia de banda ancha móvil más robusta y sin fisuras con mejor cobertura y velocidades de descarga más rápidas. (LTE-U FORUM, 2018)

La demanda actual del uso de banda ancha móvil requiere más espectro, sea licenciado o no licenciado para que la red sea robusta y permita seguir creciendo a futuro. LTE-U es capaz de solventar y proporcionar enlaces descendentes suplementarios no licenciados adjuntando con las bandas licenciadas como solución para la demanda actual. (Tariq, 2018)

3.2.2 Arquitectura LTE-U

Utilizar la tecnología LTE-U puede resultar sencillo para las operadoras de telefonía móvil, ya que en la actualidad LTE tiene una capacidad de agregación de portadoras que permite combinar diversas bandas de espectro en una única conexión de datos entre el usuario y la red. Como se muestra en la Figura 15, la agregación de portadoras permite trabajar tanto en la banda licenciada y no licenciada de los 5GHz. Una banda licenciada siempre trabaja como celda primaria mientras que la banda no licenciada trabaja como celda secundaria. (Huawei, 2014)

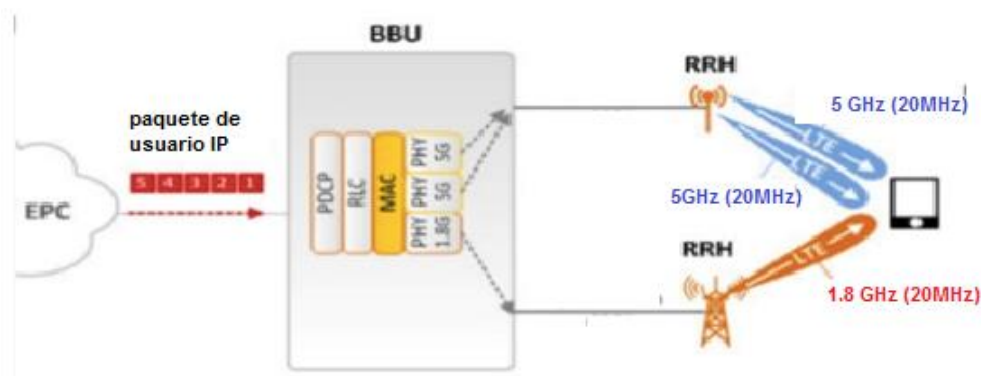


Figura 15. Arquitectura LTE-U

Tomado de: (Huawei, 2014)

Una unidad de banda base (BBU del inglés, *baseband unit*), es responsable de la comunicación a través de la interfaz física, tiene las siguientes características: diseño modular, tamaño pequeño, bajo consumo de energía y puede ser fácilmente desplegada. (Exfo, 2019).

La cabeza de radio remota (RRH, del inglés *Remote Radio Head*) RRH está conectado a la BBU mediante un cable óptico. Una unidad de banda base está conectada a múltiples RRHs dependiendo de la capacidad de la unidad de banda base. (techplayon, 2017)

Cuando los datos pasan de varios puntos a través de la red a su destino final, la BBU actúa como una central que conecta los datos a múltiples ubicaciones (por ejemplo, una oficina de conmutación de teléfonos móviles). Una vez que se conecta una señal inalámbrica, puede traducirse en información que puede ser utilizada por una aplicación o un usuario final. (Exfo, 2019) Además, como se muestra en la Figura 15, una BBU está conectada a un RRH el cual se encuentra en la parte superior de la estación de telefonía móvil y funciona como convertidor de señal óptico en señal eléctrica o viceversa, además en el transmisor RRH, convierte la señal digital a RF y amplifica esa señal al nivel de potencia deseado y la antena conectada a ella, irradia la señal de radiofrecuencia en el medio, En la sección de receptor de RRH, recibe la banda de señal deseada de la antena y la amplifica.

LTE-U maneja la misma arquitectura de LTE por lo que la programación de operación en la banda licenciada y no licenciada se realiza en los nodos centralizados para un cambio de carga suave y la adaptación al canal. (Huawei, 2014)

Intel propone una nueva alternativa para el uso de LTE en el espectro no licenciado para complementar las redes móviles. LAA definido en el capítulo 1; es una mejora de la tecnología LTE definida en la versión 13 del 3GPP, en la que la portadora no licenciada puede utilizarse como portadora de componentes

secundarios en el marco de agregación de portadoras LTE con una portadora de componentes primarios en el espectro licenciado. (Intel, 2016)

3.2.2.1 LTE-U/LAA (LTE in Unlicensed/Licensed Assisted Access)

La arquitectura LTE-U/LAA que se muestra en la Figura 16 indica que el canal LTE puede funcionar como canal primario y los canales no licenciados pueden funcionar como canales secundarios el cual su función específica es ayudar a la transmisión de datos LTE. En las bandas no licenciadas tenemos un limitante de potencia de transmisión por lo que esta arquitectura se dirige para células pequeñas. (Netmanias, 2016) La potencia de transmisión de LTE-U se especifica en la sección 3.2.9.

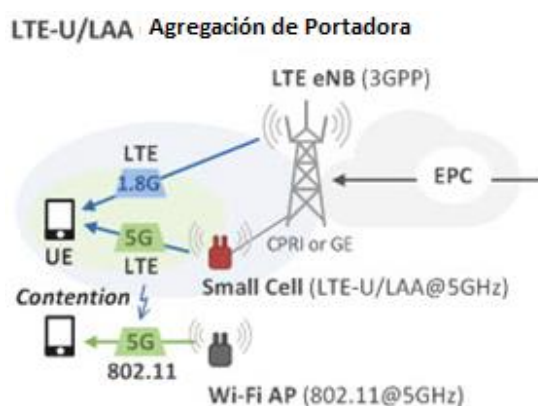


Figura 16. LTE-U/LAA

Tomado de: (Netmanias, 2016)

Mediante esta arquitectura podemos lograr un acceso justo a los canales tanto para LTE-U como WiFi, por lo que sí, tanto LTE-U como WiFi intentan transmitir a través del mismo canal, LTE tendría muchas más oportunidades de acceso al canal que WiFi, lo que no crearía unas condiciones de competencia equitativas. Esto se debe a que los usuarios de LTE son transmitidos sin competencia gracias a la programación por estación base, mientras que los usuarios de WiFi todavía tienen que competir para ganar una oportunidad de acceso al canal. (Netmanias, 2016)

3.2.3 Esquemas de acceso al canal

Los esquemas que se plantean a continuación permiten un acceso equitativo de la operación de LTE-U y WiFi en la banda no licenciada de los 5GHz.

3.2.3.1 LTE-U basado en el ciclo del servicio

LTE-U puede ser adoptada en países sin regulación LBT por ejemplo, Corea, EE.UU, China. El foro LTE-U ha publicado especificaciones LTE-U, incluida la solución de acceso justo basada en el ciclo del servicio, como se muestra en la figura 17, en el cual indica que una célula LTE-U busca primero un canal disponible a través de la detección de espectro, transmite datos utilizando el ciclo de trabajo completo si existe, pero al "canal menos concurrido" utilizando el ciclo de trabajo dinámico si no existe. (Netmanias, 2016)

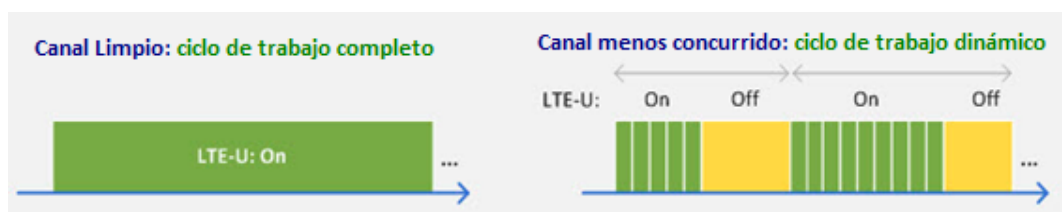


Figura 17. LTE-U basado en el ciclo del servicio

Tomado de: (Netmanias, 2016)

El ciclo de trabajo dinámico funciona en el canal menos concurrido como se muestra en la figura 17, de tal manera que, por ciclos de periodos de tiempo LTE-U enciende o apaga su transmisión para que otros sistemas como WiFi puedan transmitir sobre el mismo canal. La transmisión de LTE-U ON se mantiene activa hasta que deje de transmitir la señal de LTE-U, mientras que la LTE OFF se maneja dependiendo la configuración del ciclo dinámico de trabajo.

3.2.3.2 Escuchar antes de hablar basado en LAA (LBT)

Países como Japón, la Unión Europea utilizan LBT. Sus especificaciones se llevan a cabo en la versión 13 del 3GPP sobre cómo se puede utilizar LBT. La Unión Europea ofrece dos opciones para los sistemas LBT: Equipos basados en bastidores (FBE) y equipos basados en la carga (LBE). (Netmanias, 2016)

3.2.3.2.1 Equipos basados en bastidores (FBE)

Como se muestra en la Figura 18, los transceptores funcionan con un tiempo y periodo fijo, en el cual si el canal está despejado los datos se transmiten inmediatamente al comienzo de la siguiente toma de canal, pero si el canal está ocupado se realiza una evaluación del canal (CCA), durante el siguiente periodo de tramas, hasta que el canal se encuentre vacío para poder enviar la información. (Netmanias, 2016)

En la Figura 18, se puede observar que la primera CCA fue fallida por lo que el canal está siendo ocupado, por lo tanto espera el periodo de trama para volver a hacer una CCA, una vez que la CCA es satisfactoria inmediatamente al comienzo del período de trama esta puede ya puede transmitir una trama LAA. (Netmanias, 2016)



Figura 18. Equipos basados en bastidores.

Tomado de: (Netmanias, 2016)

3.2.3.2.2 Equipos basados en la carga (LBE)

Como se muestra en la Figura 19. LBE realiza CCA siempre que hay datos para transmitir. Si el canal está despejado, los datos se transmiten inmediatamente. Pero, si está ocupada, intenta transmitir después del *backoff* durante la CCA extendida (ECCA). (Netmanias, 2016)

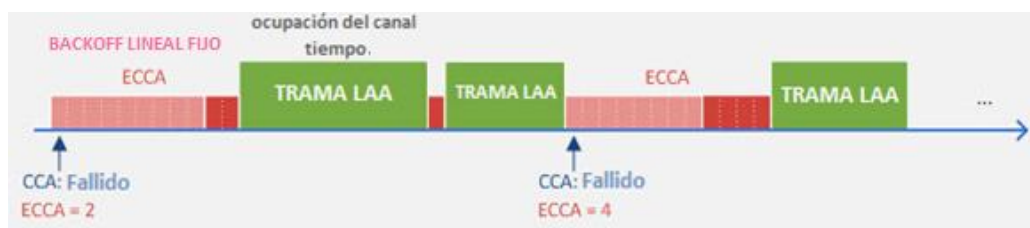


Figura 19. Equipos basados en la carga.

Tomado de: (Netmanias, 2016)

LBE es similar a WiFi, ya que tiene un tamaño fijo de ventana de contención lo que implica menor oportunidad de acceso al canal WiFi cuando el canal se encuentra sobrecargado, WiFi realiza *backoffs* aleatorios en caso de colisión de datos y amplía la ventana de contención, lo que hace que las oportunidades de acceso a los canales disminuyan cuando los canales están sobrecargados. Por otro lado, LBE mantiene rangos fijos de tamaño de ventana, por lo que las oportunidades no se ven afectadas incluso cuando los canales están sobrecargados. (Netmanias, 2016)

3.2.4 Acceso al medio LTE-U

LTE-U se basa en la capacidad de agregación de portadoras de LTE *Advanced* basado en OFDMA descrita en la sección 2.4.5; lo que implica unir varios rangos de frecuencia en un solo canal de transmisión. El objetivo es aumentar el ancho de banda total para que un dispositivo de usuario o UE aproveche la disponibilidad completa del canal, dentro de una banda o de otra. (Radio-Electronics, 2018)

3.2.4.1 Selección de canal

De acuerdo con los disparadores de rendimiento, el EnodoB, que es el componente de la estación base cuya funcionalidad es proveer cobertura, realiza periódicamente la selección de operador de arranque, esto significa que escanea el espectro y mide el nivel de potencia en cada canal para así encontrar el canal que este sin interferencias. En caso de que todos los canales estén

lentos, el EnodoB elige el canal en el que exista nivel de potencia más bajo para que no tenga mayor interferencia. (Labib, 2017)

Esto se utiliza como un intento de evitar la interferencia entre el EnodoB y sus dispositivos WiFi vecinos y otros EnodoB LTE-U, el nivel de interferencia se mide mediante la detección de energía, mediante la potencia recibida en el rango de frecuencias que se quiere realizar la medición, y calculando esta potencia con el umbral definido para detectar o no una señal; lo que no garantiza la detección precisa de otros usuarios ocupados en el canal. (Intel, 2016)

3.2.4.2 On-Off Switching

Cuando la demanda de ancho de banda es baja, EnodoB puede dejar de transmitir en el espectro no licenciado y trabajar únicamente en el espectro licenciado. Existen dos estados en las especificaciones de LTE-U:

- **Off-State:** El SC (Celda Secundaria) detiene cualquier tipo de transmisión LTE-U manteniéndose únicamente en la banda licenciada, esto debido a la demanda de ancho de banda. (Labib, 2017)
- **On-State:** El SC transmite tramas completas LTE de acuerdo a las especificaciones 3GPP o transmitiendo las señales de detección de LTE-U (LDS del inglés, *LTE-U Discovery Signal*). El SC transmite en determinados momentos y tiempos establecidos definidos por el parámetro de periodicidad LDS (pueden ser de 40, 80 o 160 ms). (Labib, 2017)

3.2.4.3 Transmisión Adaptativa con Detección de Portadora (CSAT)

CSAT (del inglés, *carrier-censing Adaptive Transmission*), es un mecanismo de multiplexación que permite compartir el espectro con otros sistemas que utilicen el mismo canal. (Intel, 2016)

El mecanismo CSAT se utiliza en despliegues muy densos en los que los nodos LTE-U pueden compartir el canal con los puntos de acceso WiFi vecinos. En CSAT, el EnodoB detecta el medio durante más tiempo alrededor de 10s a

200ms. Basado en la actividad de ocupación del canal, el algoritmo desactiva la transmisión LTE proporcionalmente. CSAT define un ciclo de tiempo en el que el ENodeB transmite en una fracción del ciclo y se desactiva en la duración restante. (Intel, 2016)

El ciclo de trabajo del CSAT puede cambiar durante el tiempo de uso del canal, para poder obtener disponibilidad en los canales. (Labib, 2017)

Existen diferentes maneras en la que LTE-U puede ser desplegado y que se explican a continuación.

3.2.5 Modos de Operación LTE-U

3.2.5.1 Enlace descendente

Similar a los primeros despliegues de LTE, como se muestra en la figura 20, se refiere al enlace de comunicación desde el punto de acceso a la UE, en el que el enlace de célula primaria siempre se encuentra en las bandas autorizadas, es la forma más básica de LTE-U. El ENodeB realiza la mayoría de las operaciones necesarias para asegurar que se mantenga una operación confiable permitiendo que no cause interferencia a otros usuarios al asegurar que el canal esté libre. (Radio-Electronics, 2018)

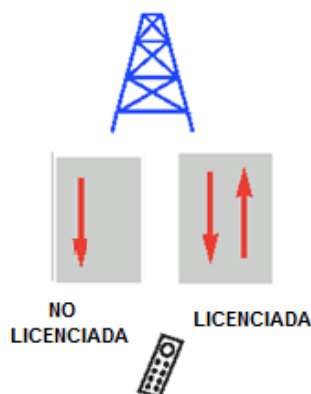


Figura 20. Enlace descendente.

Tomado de: (Radio-Electronics, 2018)

3.2.5.2 Transmisión suplementaria de enlace descendente (SDL)

La transmisión SDL se realiza en base a la demanda de tráfico. Si el EnodoB está ligeramente cargado, se puede desactivar la portadora de componentes secundarios en la banda sin licencia para evitar la transmisión de sobrecargas, lo que reduce aún más la interferencia a los puntos de acceso WiFi vecinos. Esto es posible porque la portadora primaria siempre está operando en la banda licenciada. (Intel, 2016)

Para proporcionar la característica de coexistencia necesaria, la tecnología LTE-U modifica el diseño del eNodoB fuera del proceso de estándares 3GPP. Para proporcionar una coexistencia justa en bandas no licenciadas, LTE-U adopta los siguientes mecanismos patentados. (Intel, 2016)

3.2.5.3 Enlace ascendente y descendente

Como se muestra en la figura 21, es un modo de operación bidireccional desde el punto de acceso a la UE y desde la UE al punto de acceso, en el que el UE tiene un enlace ascendente y descendente en la banda no licenciada. (Radio-Electronics, 2018)

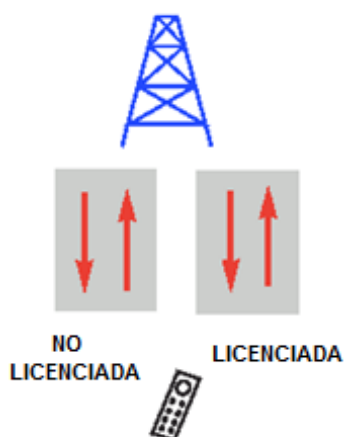


Figura 21. Enlace ascendente y descendente.

Tomado de: (Radio-Electronics, 2018)

Cabe recalcar que las transmisiones de LTE-U solo están presentes en el enlace descendente por lo que el tráfico de enlace ascendente se transmite por el canal licenciado.

3.2.6 Análisis Espectral LTE-U

La banda de frecuencia de mayor interés para LTE-U es la banda de 5GHz ya que tiene cientos de MHz de ancho de banda disponibles y con menos uso para ser explotados de acuerdo a su país y región. Como se puede observar en la Figura 22 las bandas no licenciadas de acuerdo a su situación geográfica. (Intel, 2016)

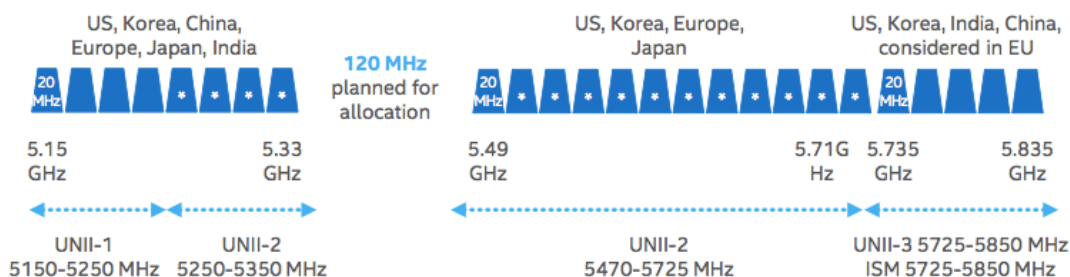


Figura 22. Banda de frecuencia 5GHz para LTE-U.

Tomado de: (Intel, 2016)

La banda no licenciada de 5GHz, se subdivide en tres sub-bandas regidas por las U-NII de la FCC, las cuales se muestran en la Tabla 2. El EARFCN (del inglés, *E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number*) indica el número de canal de radiofrecuencia absoluto, el cual se utiliza en las redes LTE para definir una frecuencia portadora concreta. (Tariq, 2018)

Tabla 2.

Definición de bandas de LTE-U en el espectro de 5 GHz.

U-NII	ESPECTRO(MHz)	EARFCN (F_DL_Low)
-------	---------------	----------------------

U-NII-1	5150–5250	5150
U-NII-2	5250–5720	
U-NII-3	5725–5850	5725

Tomado de: (Tariq, 2018)

Existe un espectro amplio para que un UE (equipo de usuario) o un EnodeB (componente de la estación base de la red LTE que provee la cobertura) busque un espacio, es por eso que las operaciones de LTE-U se han limitado a las frecuencias portadoras de las bandas U-NII 1 y 3.

U-NII-3 regulado por la FCC, es la infraestructura nacional de información no licenciada, el cual abarca un conjunto de especificaciones para LTE-U los cuales indican directrices, técnicas generales y puntos de referencia para los escenarios de ensayo, también explica que U-NII-2 es reservado para investigaciones futuras. (Tariq, 2018)

El uso de este conjunto de frecuencias portadoras para LTE-U reduce satisfactoriamente el espacio de búsqueda de UE y EnodeB y permite reducir la latencia, mejorando el rendimiento de la red. En la figura 23, se muestra como el espectro licenciado es utilizado para generar una conexión robusta para el control y la movilización de los datos de usuario, mientras que la banda no licenciada es utilizado por una célula pequeña para transportar los datos aumentando la velocidad. (Tariq, 2018)



Figura 23. Principio de funcionamiento de LTE-U en términos de espectro.

Tomado de: (Tariq, 2018)

Como podemos apreciar en la figura 23. LTE-U depende de la red central existente para el *backhaul*, y de otras características como seguridad y autenticación. Por lo tanto, no es necesario introducir cambios en la red básica.

Para garantizar la compartición adecuada de las frecuencias no licenciadas se requiere unos pequeños cambios en la estación base para que pueda acomodar las nuevas frecuencias e incorporarlas a la red. (Tariq, 2018)

3.2.7 Potencia de transmisión LTE-U

Para el uso de la banda no licenciada la regularización de la potencia de transmisión, se especifica para gestionar la interferencia entre usuarios no licenciados. El control de potencia de transmisión (TPC) reduce la potencia de un radiotransmisor al mínimo necesario, con el fin de evitar interferencias con otros usuarios y/o prolongar la vida útil de la batería, manteniendo al mismo tiempo la calidad de transmisión del enlace. A continuación se detalla la potencia de transmisión en LTE-U : (Khaleel, 2016)

- Para puntos de acceso inalámbricos (AP) en interiores ya sea por ejemplo, en edificios, negocios, hogares, que a menudo se encuentran en la banda espectral de 5,15 - 5,35 GHz, la potencia máxima de transmisión es de 23 dBm en Europa o de 24 dBm en EE.UU. (Khaleel, 2016)

- Para puntos de acceso al aire libre, por ejemplo, *Picocell*, permite un máximo de 30 dBm, lo que suele ocurrir dentro de la banda espectral de 5,47 - 5,85 GHz. Además de la potencia máxima de transmisión, el espectro de 5,25 - 5,35 GHz y 5,47 - 5,725 GHz tienen controles de potencia de transmisión el cual reduce la potencia de un radiotransmisor al mínimo necesario, con el fin de evitar interferencias con otros usuarios y/o prolongar la vida útil de la batería, manteniendo al mismo tiempo la calidad de transmisión del enlace. (Khaleel, 2016)

4. Capítulo III: Factibilidad de la coexistencia LTE-U y WiFi

En base al estado del arte analizado, se encontraron varias bibliografías que explican modelos y sistemas en los cuales LTE-U y WiFi pueden coexistir juntos. Esta bibliografía será utilizada en el presente capítulo para explicar y analizar la coexistencia de estas dos tecnologías en la misma banda de frecuencia de los 5GHz. Se describen propuestas dadas por diferentes autores para la coexistencia de la tecnología LTE-U y WiFi y en base al estudio de cada *paper* se analizará el mejor modelo que puede lograr la coexistencia en la banda no licenciada de los 5GHz.

El rápido crecimiento de la demanda de servicio de redes inalámbricas ha llevado a los operadores de redes móviles a analizar la posibilidad de utilizar las bandas no licenciadas de los 5GHz como solución para la descarga de tráfico de datos de la banda licenciada. Algunos estudios generados por alianzas como 3GPP, LTE-U *forum*, consideran una alternativa fuerte el expandir el LTE a las bandas no licenciadas, de tal manera que estos estudios se están aplicando en algunos países del mundo. De esta manera se presenta un inconveniente fuerte que es el poder compartir LTE-U con la tecnología WiFi que es la más utilizada en la banda no licenciada de los 5GHz. Estas alianzas tecnológicas exponen sus mecanismos para poder realizar una coexistencia justa de LTE-U con WiFi en las cuales serán analizadas en el presente capítulo.

4.1 Coexistencia WiFi con LTE-U utilizando ciclos de trabajo.

Se iniciará con el análisis de rendimiento de WiFi en presencia de transmisiones LTE-U utilizando el mismo canal. En la que un conjunto de BSS y una celda LTE-U coexistan al permitir que se transmitan señales LTE-U utilizando ciclos de trabajo predeterminados. En primer lugar se explica el funcionamiento de ciclos de trabajo y cómo este permite trabajar con WiFi. (Yimin, 2017)

La coexistencia de redes heterogéneas como son LTE-U y WiFi en la misma banda de frecuencia de los 5GHz, al operarlas sin utilizar acciones coordinadas, estas pueden sufrir interferencias lo que implica la degradación de rendimiento en ambos sistemas. Por lo tanto, se requiere soluciones eficaces capaces de lograr la coexistencia entre LTE-U y WiFi. Como se muestra en la figura 24, un método sencillo para lograr el resultado de la coexistencia, es dividir el canal a través del tiempo en el que ambos sistemas están transmitiendo información. Esto quiere decir que, LTE-U opera sobre el canal compartido periódicamente, y durante cada período, solo una parte se utiliza para la transmisión LTE-U. Un ciclo de trabajo se define como el periodo de tiempo en el que LTE-U se enciende o se apaga para transmitir información de LTE-U o permitir la transmisión WiFi. (Yimin, 2017)

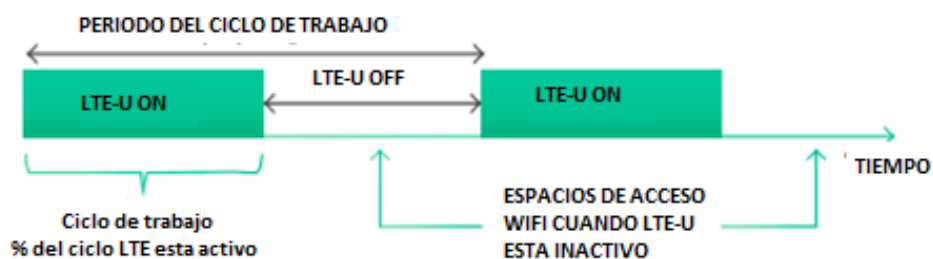


Figura 24. Ciclo de trabajo LTE-U

Tomado de: (Yimin, 2017)

En un sistema LTE, el equipo de usuario (UE), se comunica con una estación base (eNodoB), de forma que a través de un mecanismo centralizado de control

de acceso a canales como es OFDMA, el tiempo de acceso y los subportadores de una trama LTE se predeterminan en eNodeB, donde la programación de MAC indica la medición radioeléctrica y la calidad de servicio para cada UE. Según el esquema que se muestra en la figura 24, LTE-U en términos de tiempo de servicio es relativamente simple y directo, ya que se enciende la transmisión LTE-U para permitir transmitir la señal LTE por la banda no licenciada o se apaga la transmisión en un periodo determinado de tiempo, en el que WiFi puede utilizar para su transmisión; en cambio para el mecanismo de acceso al medio utilizado en WiFi, como se muestra en la figura 25, es controlado por la función de coordinación distribuida definida en la sección 1.9 del capítulo 1; indica que el tiempo de servicio es aleatorio dependiendo del uso del canal, esto quiere decir que este mecanismo realiza una espera adicional y aleatoria lo cual permite reducir la posibilidad de colisiones. El funcionamiento del DFC se encuentra en el primer capítulo (Yimin, 2017)

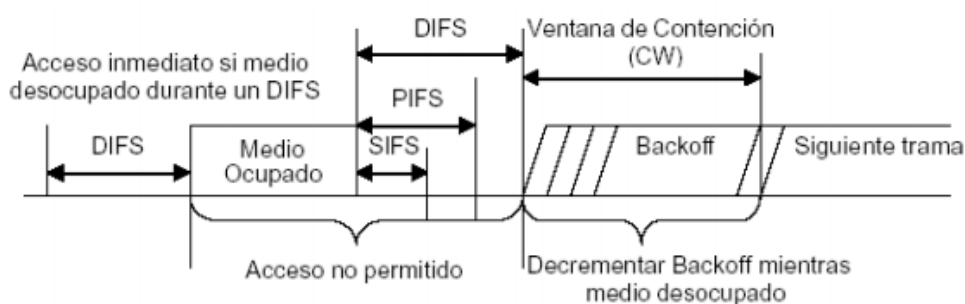


Figura 25. Función de Coordinación Distribuida.

Tomado de: (bibing, 2017)

Como se aprecia en la figura 25, antes de realizar una transmisión de WiFi, este realiza una evaluación del canal que simplemente es una acción para medir el medio si está disponible, mediante SIFS (del inglés, *short IFS*), se asigna un intervalo de tiempo corto en el cual permite dar una máxima prioridad para que las tramas de acuse de recibo puedan entrar al canal antes que otras, las estaciones que operan mediante la función de coordinación puntual (PIFS), son

utilizadas para dar prioridad a tramas DFC, DIFS es utilizado para detectar la disponibilidad del canal; una vez que el canal este libre y pasó por los diferentes intervalos, se asigna un tiempo de ventana de contención aleatorio para así poder transmitir la siguiente trama. (bibing, 2017)

4.1.1 Formulación de la coexistencia de LTE-U y WiFi basada en ciclos de trabajo

Se explicará el modelo del sistema utilizando el modelo de cadena generalizado de Markov para WiFi DFC, formulando también la coexistencia entre LTE-U y WiFi basado en los ciclos de trabajo de LTE-U. El modelo de cadena de Markov es una serie de eventos mediante el cual, la probabilidad de que suceda un hecho depende del evento inmediato anterior. (Valle, 2015)

El modelo generalizado de Markov para WiFi DFC como se muestra en la Figura 26, establece que se forma una cadena de Markov bidimensional en donde el i th de la cadena representa el *backoff* aleatorio del intento de transmisión y W viene a ser el tamaño de la ventana de contención. (Yimin, 2017)

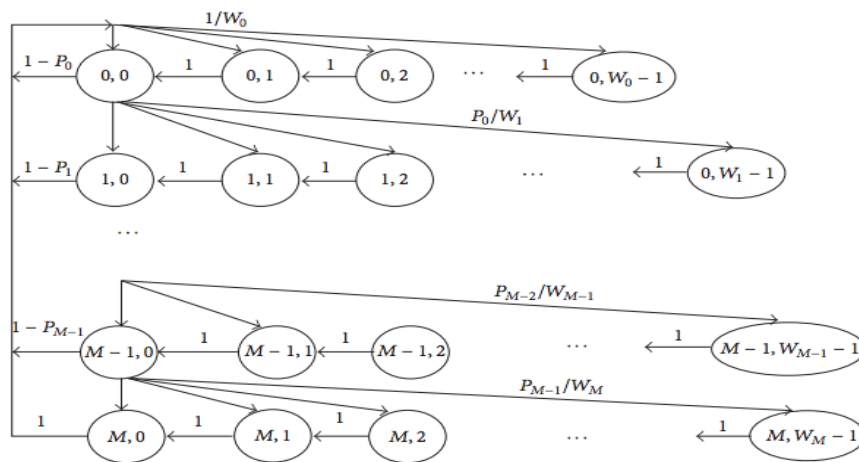


Figura 26. Modelo de cadena de Markov para WiFi DFC

Tomado de: (Yimin, 2017)

Durante cada estado, una estación WiFi detecta el canal con una probabilidad de p_i , en donde puede transmitir o retransmitir un paquete. Si el paquete es transmitido con éxito, la estación WiFi permanece inactiva en el nivel de

contención para poder enviar un nuevo paquete. De lo contrario, el paquete fallido se retransmitirá hasta que alcance un número máximo de intentos antes del intento de ith . (Yimin, 2017)

La probabilidad de fallo se representa como pi , dada la siguiente ecuación:

$$pi = pc = 1 - [1 - (1 - \lambda)\tau]^{n-1} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde λ es la probabilidad que no exista ningún paquete para ser transmitido y τ la probabilidad de que una estación WiFi transmita o retransmita un paquete en un tiempo randómico. El número τ es una función del número de las estaciones WiFi n y pi .

Sin interferencia de LTE-U, la probabilidad pi es simplemente la probabilidad de colisión (pc) de que al menos dos estaciones WiFi transmitan simultáneamente. Es decir que solo exista transmisión WiFi ya que LTE-U está en modo apagado. (Yimin, 2017)

Durante el periodo de LTE-U ON, el intento de WiFi de ith la transmisión falla con probabilidad dada la siguiente ecuación:

$$pi = 1 - (1 - pc)(1 - q) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde q , significa que una transmisión WiFi fallará definitivamente si se produce una transmisión LTE-U al mismo tiempo. (Yimin, 2017)

Se considera una infraestructura basada en una red WiFi, en donde coexista con LTE-U usando la misma banda no licenciada de los 5GHz, en donde la interferencia proviene del subsistema LTE-U a la estación WiFi denominada Sta-A. El periodo del ciclo trabajo del sistema WiFi denominado T , el eNodoB o UE en el subsistema LTE-U trasmite durante la fase *LTE-U ON* como se muestra en la figura 24, y apaga su funcionamiento en la fase de *LTE-U OFF*, incluso durante este periodo de inactividad de la señal LTE-U puede esta generar interferencia significativa ya sea mínima en la transmisión WiFi debido al ruido que puede generar LTE-U.

Mediante estas definiciones de parametrización de los cálculos realizados se puede lograr explicar el término equidad o parcialidad para la coexistencia de LTE-U y WiFi en la banda no licenciada de los 5 GHz, en donde para un determinado sistema WiFi la equidad del rendimiento es la diferencia entre la relación de pérdida de rendimiento y el ciclo de trabajo de LTE-U, también se puede explicar que la equidad de tiempo del servicio es la diferencia entre la relación media de aumento del tiempo de servicio y el ciclo de trabajo de LTE-U. (Yimin, 2017)

Utilizando el método de ciclo de trabajo, se ha podido demostrar resultados prometedores en cuanto a la coexistencia de LTE-U y WiFi ya que permiten la transmisión de datos de ambas tecnologías permitiendo la coexistencia en la misma banda no licenciada de los 5GHz, sin embargo como se ha explicado, los patrones de este método se basan específicamente en los datos de tráfico y tasas del ciclo de trabajo en los modos de transmisión *LTE-U ON* y *OFF*, por lo que en escenarios donde se encuentre mayor cantidad de estaciones base tanto de LTE-U y WiFi puede verse afectado el rendimiento real del sistema.

4.2 Análisis del rendimiento de CSAT en la coexistencia WiFi y LTE-U

La siguiente teoría de coexistencia propone utilizar transmisión adaptativa con detección de portadora (CSAT, del inglés *Carrier-Sensing Adaptive Transmission*) para ajustar los parámetros del ciclo de trabajo hacia una coexistencia eficiente. El principal objetivo de este mecanismo es mejorar el rendimiento entre LTE-U y WiFi.

En la actualidad en países con mayor avance tecnológico se han desplegado *small cells* WiFi y LTE-U, por lo que existe la posibilidad de que no puedan encontrar un canal limpio para la transmisión. CSAT está diseñado para que LTE-U pueda compartir el canal con sus vecinos WiFi en la banda no licenciada de los 5GHz, en el que los transmisores detecten el medio y se aseguren de que el canal este disponible antes de realizar la transmisión. Además, CSAT detecta el medio durante un tiempo de entre 10segundos a 200milisegundos y este tiene la funcionalidad de desactivar proporcionalmente la transmisión LTE. CSAT

define un ciclo de tiempo en el que la *small cell* transmite en una fracción del ciclo y se apaga en el tiempo restante. El ciclo de trabajo de la transmisión frente a la desconexión está dictada por la actividad del medio sensorial de otras tecnologías. CSAT tiene una latencia mas larga y mitiga interferencias evitando canales en los que los AP WiFi están siendo utilizados. (Qualcomm, 2018)

Como se muestra en la figura 27, mediante el control de LTE el cual indica si se va a transmitir una señal de LTE-U; que se encuentra en la celda secundaria, esta se activa y desactiva periódicamente, esto para permitir que otras tecnologías puedan hacer uso del canal. Durante el periodo de desconexión de LTE-U, WiFi puede continuar con las operaciones de transmisiones normales ya que la celda LTE-U medirá la utilización de WiFi y ajustará el ciclo de trabajo ON/OFF periódicamente dependiendo del uso del canal por WiFi. El ciclo CSAT puede ajustarse a unos pocos cientos de ms, lo que permite acomodar eficazmente los procedimientos de activación/desactivación mientras se controla el retardo de transmisión de datos. (Qualcomm, 2018)

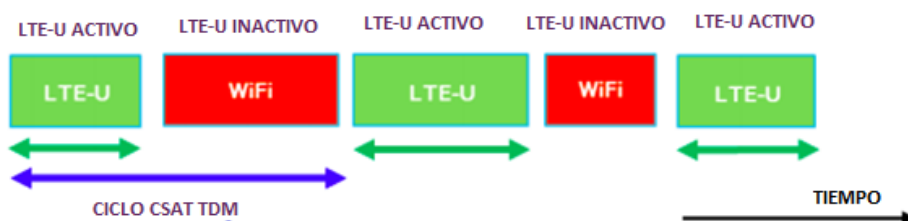


Figura 27. CSAT permite que LTE-U y WiFi compartan el mismo canal

Tomado de: (Qualcomm, 2018)

4.2.1 Funcionamiento del sistema para la coexistencia de LTE-U y WiFi

El eNodoB LTE-U funciona en modo de *buffer* y utiliza un ancho de banda con modulación superior a los 64-QAM. Se denomina asociación activa cuando los clientes WiFi transmiten paquetes de detección mientras que la asociación pasiva cuando se recibe paquetes de señalización durante el escaneado. (Vanlin, 2018)

Las tramas de señalización se transmiten con CSMA/CA, en la que el AP necesita comprobar la disponibilidad del canal antes de transmitir los paquetes. En la asociación WiFi, la respuesta de prueba en el escaneo activo, la solicitud y respuesta de asociación, la autenticación y paquetes de respuesta en los sistemas activos son paquetes *unicast* donde los paquetes transmitidos llevan un seguimiento por paquetes ACK. En la figura 28, se muestra posibles casos de paquetes *unicast* que se transmiten en la asociación y escaneo activo para la coexistencia con LTE-U. (Vanlin, 2018)

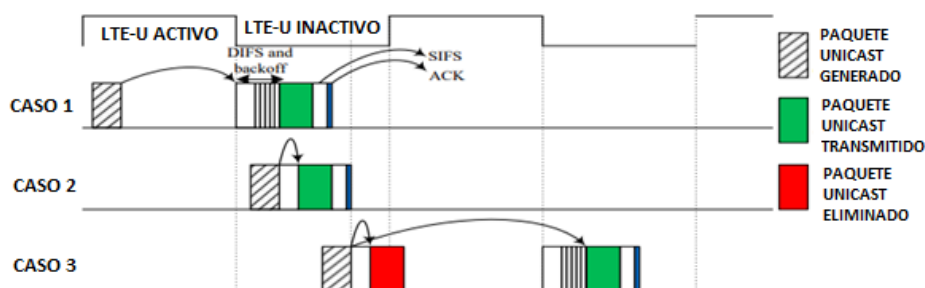


Figura 28. Casos para transmitir paquetes unicast.

En el primer caso, el paquete *unicast* se genera durante el periodo LTE-U ON, por lo que dependiendo del tipo de paquete *unicast*, pudo generarse en el AP o un cliente de WiFi. En este caso WiFi espera hasta el final del periodo de encendido de LTE-U para realizar la detección del canal durante un tiempo de 34 μ s, en el que se selecciona un *backoff* aleatorio para poder transmitir el paquete sobre el canal si este se encuentra en el periodo de LTE-U OFF y el canal está disponible. (Vanlin, 2018)

En el caso 2 de la Figura 28, el paquete *unicast* se genera durante el periodo de LTE-U OFF, en el que el canal está inactivo por lo que el nodo realiza DIFS y transmite. Para este caso la señal de radiofrecuencia no se superpone con el periodo ON por lo que puede transmitir y recibir con éxito los paquetes. (Vanlin, 2018)

Para el último caso, el paquete *unicast* se origina en el periodo LTE-U *OFF* en el que la detección DIFS indica que el canal está inactivo. Por lo que se puede tener dos sucesos, el primero que mientras se realice la transmisión del paquete *unicast* su ACK se superponga en el periodo ON. Para esta situación los nodos vuelven a transmitir en el segundo periodo ON con detección de DIFS o también puede antes de finalizar el periodo ON, se inicie el segundo periodo de LTE-U ON y luego procede a detectar DIFS y la desactivación para la transmisión de paquetes. La presencia de paquetes *unicast* en el canal dificulta la correcta transmisión y recepción de la señal durante la duración de LTE-U *OFF* ya que los paquetes *unicast* pueden colisionar con los paquetes de señalización. (Vanlin, 2018)

De acuerdo con las especificaciones de LTE-U *forum*, eNodeB comienza con un modo de ciclo de trabajo del 50% y observa el medio por cada N duraciones de LTE-U *OFF* que es el equivalente a la recepción de 5 señales de WiFi. Si la detección de energía durante este período es mayor que el umbral, el valor de CSAT detecta la presencia de WiFi y mantiene el mismo ciclo de trabajo del 50%, caso contrario eNodeB LTE-U cambia a un ciclo de trabajo del 95%. (Vanlin, 2018)

El algoritmo CSAT basado en la energía permite detectar los niveles de energía en el medio, pero este, también podría detectar la energía debido a la presencia de paquetes de prueba que pueden ayudar a detectar la presencia de WiFi de una manera más veloz, lo que puede conllevar a reducir el ciclo de trabajo. (Vanlin, 2018)

Se analizó el rendimiento de un algoritmo CSAT basado en energía que detecta WiFi y reduce el ciclo de trabajo LTE-U durante el proceso de asociación WiFi. Cuando LTE-U trabaja con su ciclo de trabajo a un porcentaje del 95% como especifica LTE-U *Forum*, el impacto que sufre las señales de un AP WiFi son considerables ya que las transmisiones y recepciones se ven interrumpidas, mientras que si LTE-U reduce su ciclo de trabajo al 80% de su capacidad, las

interrupciones de señales WiFi se reducen a un nivel aceptable en el que se puede transmitir y recibir señales WiFi. (Vanlin, 2018)

4.3 LTE-U basado en LAA para la coexistencia con WiFi.

Por otra parte existe otro mecanismo para la coexistencia entre LTE-U y WiFi. El protocolo LBT definido en la sección 2.2.3.2 del capítulo 2; es un mecanismo esencial que permite a los sistemas WiFi y LTE-U compartir la banda no licenciada de los 5GHz, manteniendo el rendimiento de cada sistema individual. Sin embargo, un mecanismo LBT convencional en este entorno coexistente, funciona con el tiempo de ocupación del canal fijo (COT, del inglés *fixed channel occupancy time*), como se muestra en la figura 29, si el COT es demasiado corto o grande, uno de los dos sistemas se vuelve ineficiente cuando está sobrecargado ya que si el COT es demasiado corto no puede abarcar todo el tráfico solicitado para su transmisión mientras que si el COT es demasiado largo no da espacio a las transmisiones WiFi hasta que todas las tramas LTE-U hayan sido transmitidas. (Chung, 2018)

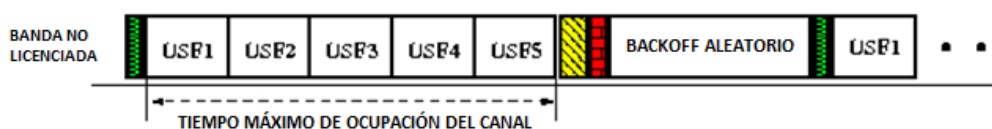


Figura 29. Esquema LBT utilizando COT.

Tomado de: (Chung, 2018)

En la figura 29, se puede observar un esquema LBT, en donde el tiempo máximo de ocupación del canal es igual al tiempo que ocupa una trama de LTE-U en la transmisión, mientras que el *backoff* aleatorio, es un tiempo randómico que se da para realizar una nueva evaluación del canal para poder transmitir sea una trama LTE-U o WiFi. (Chung, 2018)

LAA puede utilizarse como canal de datos en el enlace descendente suplementario (SDL) (es decir, sólo en el enlace descendente) o como canal de

datos DDT (enlace descendente y ascendente). Esta información esta descrita en la sección 3.2.3 del capítulo 2.

4.3.1 Esquema de coexistencia simple *listen-before-talk* para LAA

La diferencia entre LTE-U y WiFi, es que utilizan diferentes técnicas de acceso al medio. Por ejemplo, un sistema WiFi, como se muestra en la figura 30. siempre que se tenga un nodo con transmisión pendiente, su proceso es primero encontrar el canal por cual transmitir, de acuerdo a una evaluación del canal verifica si el canal esta libre, si es el caso inicia un contador de *backoff* aleatorio que se utiliza para dar un espacio de tiempo para asegurarse que el canal este limpio, e inicia la transmisión, mientras que en LTE-U no hay detección de canal simplemente envía la transmisión, por lo que para permitir la coexistencia se introduce un esquema LBT que permita utilizar los dos sistemas tanto LTE-U como WiFi en la banda no licenciada de los 5GHz. (Ratasuk, 2015)

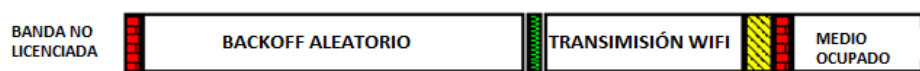


Figura 30. Esquema LBT WiFi.

Tomado de: (Ratasuk, 2015)

El esquema LBT es una versión simplificada de CSMA empleada en WiFi. Como se muestra en la figura 31, en el enlace descendente, el eNodoB detecta el canal antes de la transmisión de datos. Si el canal está ocupado LBT no realiza ninguna acción y espera a que el canal este limpio. Una vez que el canal este limpio realiza la transmisión de las señales LTE-U. Además, también el eNodoB puede transmitir múltiples subtramas consecutivamente sin necesidad de evaluar el canal nuevamente. (Ratasuk, 2015)

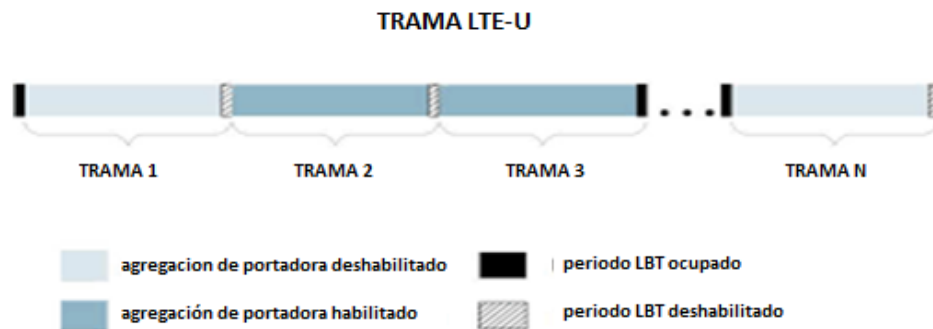


Figura 31. LBT utilizado en LAA

Tomado de: (Ratasuk, 2015)

El modelo de estudio para el análisis del *throughput*, se basa en la cadena de Markov en el cual para un AP WiFi como se muestra en la figura 32, se caracteriza en ser un proceso bidimensional, el cual tiene un estado de reposo *(Idle)*. El estado de reposo *I* indica que no existe ningún paquete disponible para ser transmitido, $w(t)$ representa el tamaño actual de la ventana de contención mientras que $b(t)$ es el contador *backoff*. Se tiene que si $q = 1$, significa tráfico saturado de búfer completo, pf es la probabilidad de fallo del paquete debido a la colisión. W_0 y W_m son el tamaño de la ventana de contención inicial y el tamaño máximo de la ventana de contención respectivamente. La ventana de contención es el tiempo aleatorio que se da antes de realizar una transmisión, si existen colisiones en el camino este tiempo será cada vez mayor. (Ratasuk, 2015)

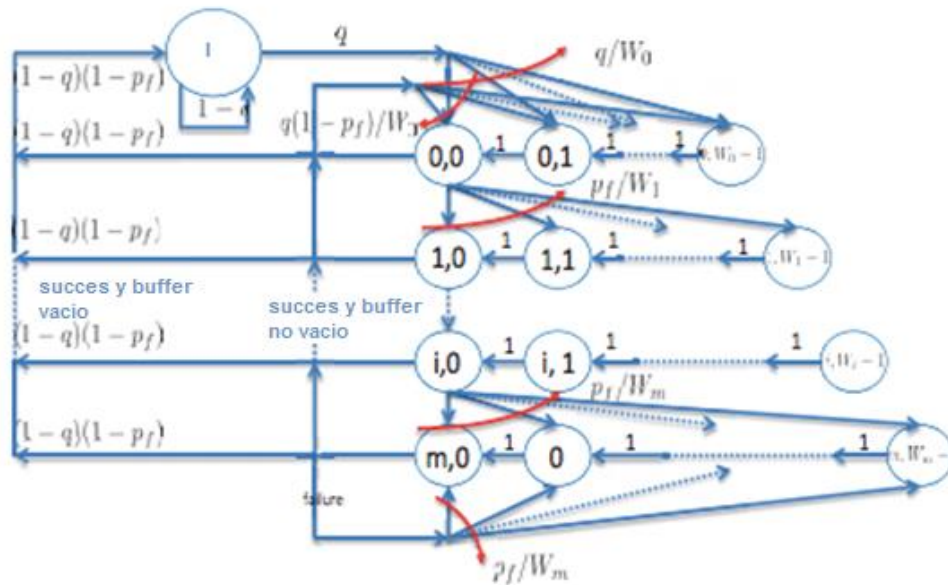


Figura 32. Modelo de cadena de Markov para un AP WiFi.

Tomado de: (Ratasuk, 2015)

Para un EnodoB LAA, la cadena de Markov es diferente, para el sistema LTE-U, la colisión de paquetes no conduce necesariamente a un fallo de transmisión. Típicamente, el sistema LTE recibe la retroalimentación del indicador de calidad del canal de la UE y ajusta la velocidad de datos para poder ser transmitidos. Considerando esto, tomamos en cuenta al sistema LAA con diferentes etapas de velocidad de datos. Para el análisis, se considera dos etapas. En la etapa de alta velocidad de datos, si ocurre una colisión de paquetes, asumimos que el paquete fallará. Sin embargo, tras el fallo del paquete en la fase de alta velocidad de datos, la LAA pasaría automáticamente a la fase de baja velocidad de datos. En la etapa de baja velocidad de datos, LAA utiliza una menor modulación por lo tanto se vuelve más robusto a la colisión de paquetes. Se asume que el paquete siempre pasa a través de la etapa de baja velocidad de datos. El modelo de cadena de Markov para un EnodoB LAA como se muestra en la figura 33, este consiste en un estado de reposo I y de *backoff* (b(t), H o L), donde b(t) es el contador de *backoff* actual y H o L representa la etapa de velocidad de datos

alta o baja respectivamente. El parámetro W indica el tamaño de la ventana de contención constante. (Ratasuk, 2015)

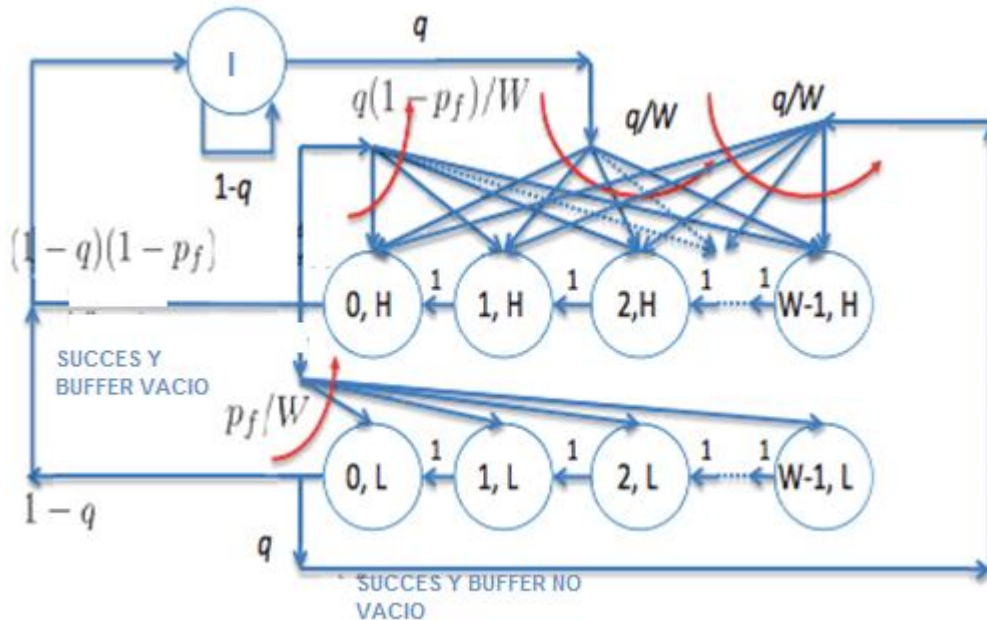


Figura 33. Modelo de cadena de Markov para un EnodoB LAA.

Tomado de: (Ratasuk, 2015)

4.3.2 Análisis de la coexistencia utilizando LAA

Se asume que tanto los EnodoB LAA y los AP de WiFi tienen la misma probabilidad de llegada de paquetes. Con esta afirmación se considera un escenario en donde se trabaja únicamente con EnodoB LAA, en donde existe dos EnodoB LAA, la probabilidad del acceso al canal y la probabilidad de transmisión con el aumento de la intensidad de tráfico. Como se muestra en la figura 34, cada EnodoB tiene la mitad de posibilidad de transmitir paquetes satisfactoriamente en el canal compartido. La razón por la cual sucede este acontecimiento es que el mecanismo LBT con dos EnodoB LAA resulta similar a TDM donde cada EnodoB puede transmitir paquetes sin interferencias a la mitad de tiempo. Con esta aseveración se puede decir que LBT es un

mecanismo efectivo cuando se trata de utilizar un sistema con EnodoB LAA.
(Ratasuk, 2015)

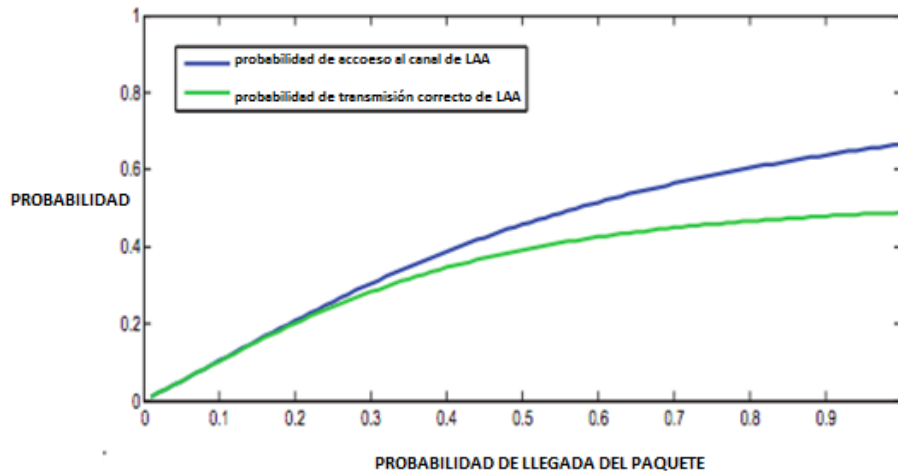


Figura 34. LAA usando solamente EnodoB LAA.

Tomado de: (Ratasuk, 2015)

En el escenario de coexistencia con WiFi, en el que existe un EnodoB y un AP WiFi, se tiene que, como se muestra en la figura 35, cuando la carga de tráfico es baja, los dos sistemas coexisten bien. Sin embargo, cuando la intensidad del tráfico es alta, el sistema WiFi tiene pocas posibilidades de acceder al canal compartido y transmitir un paquete con éxito. Mientras tanto, LAA domina el canal y sólo sufre pequeñas interferencias de WiFi. Con el mecanismo LBT aplicado en LAA, el rendimiento de WiFi mejoraría mucho. Sin embargo, su rendimiento sigue disminuyendo significativamente con una alta intensidad de tráfico, mientras que el rendimiento de LTE sigue siendo robusto. Cuando el número de EnodoB de LAA y de AP WiFi aumenta, la coexistencia se vuelve más difícil. (Ratasuk, 2015)

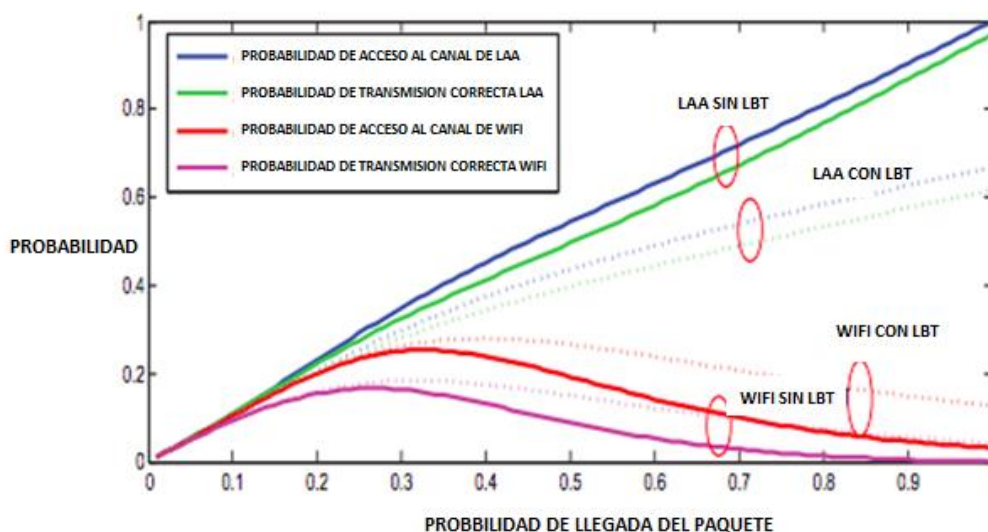


Figura 35. Escenario coexistente entre LTE-U y WiFi.

Tomado de: (Ratasuk, 2015)

De acuerdo con la figura 35, se puede decir que WiFi es la tecnología que más se ve afectada al momento de utilizar LTE-U en la misma banda no licenciada de los 5GHz, ya que como se puede observar el acceso al canal compartido para WiFi y aún más la transmisión de paquetes tiene probabilidades menores, mientras que el acceso al canal para LTE-U es mucho más amplia. Por lo que para poder tener una coexistencia justa se puede aumentar el tamaño de la ventana de contención para crear más oportunidad que los AP WiFi puedan transmitir paquetes con mayor probabilidad de llegadas satisfactorias. Al aumentar la ventana de contención la señal de LTE-U no se vería afectada ya que como podemos ver es la que más probabilidades tiene de acceso y transmisión en el canal compartido.

4.4 Análisis de coexistencia

Los modelos CSAT para LTE-U y LAA son los más utilizados en la actualidad para el despliegue y uso de LTE en la banda no licenciada de los 5GHz, trabajan de distinta manera pero permiten la coexistencia con la tecnología WiFi; estos

modelos son desplegados en diferentes lugares del mundo dependiendo sus leyes para utilizar el espectro no licenciado.

A lo largo del presente estudio sobre la coexistencia entre LTE-U y WiFi, se ha llevado a cabo resultados positivos en entornos pequeños que utilizan *small cells*. Sin embargo, las pruebas realizadas en las diferentes empresas como Aruba, Verizon, Google además de otras, no proporciona garantías de equidad de comparticiones de canales, solamente se basan en condiciones que pueden ser amigables con otra tecnología que ocupe el canal como es WiFi. Algunos resultados arrojados en el estado del arte demuestran que los ciclos de trabajo del mecanismo de CSAT, pueden interrumpir las transmisiones de otras tecnologías. Si bien es cierto que el ciclo de trabajo realiza tiempos periódicos en los cuales apaga su señal para el paso de tramas WiFi, Viasat empresa de comunicaciones militar señala que aún se debe realizar pruebas a escala del mundo real que cuenten con interferencias de RF, construcción de edificios, densidad de elementos de red desplegados, número de usuarios concurrentes dentro del alcance de una sola radio, y otras obstrucciones. Otras de las preocupaciones que existen es que no se toma en cuenta el tráfico de video o de voz a través de WiFi en el momento de la implementación de la LAA, como la formación explícita del haz de transmisión y el corto intervalo de guarda. Asimismo, se analizó que es necesario considerar entornos de mayor densidad, como los estadios o centros comerciales, porque existe mayor interferencia, mayor cobertura y mayor cantidad de requerimientos para utilizar la red. Según los resultados que analizó una prueba de Google se tiene que LTE-U puede interponerse a una señal WiFi por lo que esta podría no ser transmitida. Si bien es cierto en el capítulo anterior se explicó que si el ciclo de trabajo se encuentra al 95% de su funcionamiento las señales WiFi se ven interrumpidas mientras que si el ciclo del trabajo decrece las señales WiFi pueden transmitirse y llegar a destino, esto puede variar dependiendo la carga a la que está sometido el canal. En pruebas en las cuales se sobrecarga el canal con transmisiones LTE-U y WiFi, se pudo concluir que el *throughput* WiFi se degrada en un 80% durante un ciclo de trabajo de LTE-U, y disminuye aún más a medida que aumenta el

ciclo de servicio. Por ende se puede decir que LTE-U genera una coexistencia justa con la tecnología WiFi cuando la densidad de nodos es baja y cuando la densidad de nodos es alta se puede decir que no se genera una coexistencia justa porque existe pérdida de paquetes.

Además de conocer que el ciclo de trabajo reduce el *throughput* del sistema de acuerdo a como esté trabajando en niveles de porcentaje, también se analiza sobre el rendimiento de BER en PDCCH.

PDCCH es el control más importante del enlace descendente, soporta señalización de canales de datos en el enlace descendente y ascendente transmitiendo sobre este canal la información del control del enlace descendente. Esta información contiene datos sobre la programación de recursos para los enlaces, comandos de potencia de transmisión, etc.

En la figura 37, se muestra los resultados medidos de la interferencia cocanal entre sistemas en la PDCCH en función de la CNIR, la CNIR es la relación portadora/interferencia y ruido entre la potencia de la portadora de radiofrecuencia que transmite la señal deseada y la potencia total de las señales interferentes y el ruido térmico, que en este caso la señal interferente viene a ser WiFi. Los valores simulados de la BER de PDCCH se calculan a partir de palabras clave DCI de 184 bits de longitud al principio y al final de la cadena de transmisión. El valor de referencia CNIR simulado de PDCCH es igual a -18,1 dB. El valor de referencia CNIR medido es igual a -17,2 dB. La diferencia entre el valor de referencia CNIR simulado y medido es de 0,9 dB.

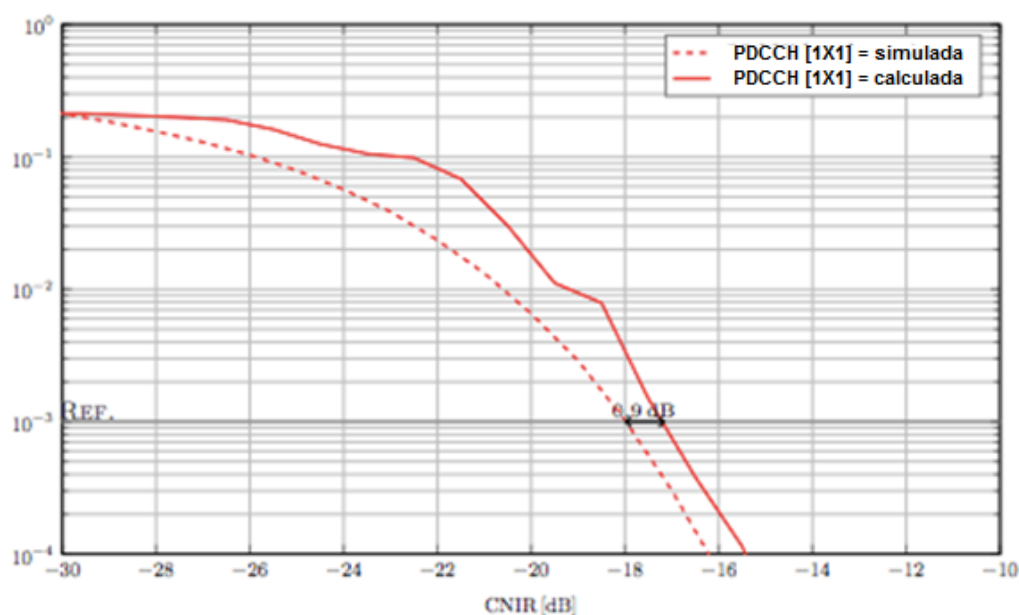


Figura 37. Resultado BER de PDCCH.

Tomado de: (MILOS, 2014)

Para la BER con interferencia de cocanal que puede existir en la coexistencia de LTE-U y WiFi, la detección del canal errónea de PCFICH puede provocar la pérdida de paquetes e incluso que se pierda la conexión, por lo tanto se tiene un BER en PCFICH del uno por ciento para SIR = -14,1dB para un ancho de banda de 1,4 MHz y -12,8dB para un ancho de banda LTE de 20 MHz. La información PDCCH se transmite con un error de bit del uno por ciento en SIR = 0 dB.

Los resultados evaluados revelan el hecho de que el ancho de banda del sistema LTE utilizado tiene un efecto insignificante en la calidad de funcionamiento del canal de control del enlace descendente físico del LTE PDCCH en su coexistencia en el mismo canal con WiFi.

Pues bien ahora también se toca un tema muy importante que es el impacto que puede tener LTE-U en el mercado de los operadores de servicios inalámbricos, ya que el uso del espectro no licenciado puede generar beneficios por la cantidad de MHz disponibles en esta banda de los 5GHz. El espectro no

licenciado permite una mayor disponibilidad de recursos y un mejor servicio para los consumidores, incluyendo estrategias de maximización de beneficios como el aumento de las asignaciones de datos o la disminución de los precios de los límites de datos para atraer a más clientes en comparación con la competencia. LTE-U se estableció con el fin de descargar el tráfico de la banda licenciada, pero si el uso de la banda no licenciada genera mayores beneficios tales como estrategias de mercado que incrementen las ganancias a las operadoras es seguro que se utilizará de una manera en que más convenga a la empresa. Además, el espectro licenciado es caro y por ende aumenta el costo para los consumidores, la creciente demanda de banda ancha es la razón principal por la que las empresas de servicios inalámbricos están tratando de utilizar el espectro no licenciado. Sin acceso a más espectro, esta demanda creciente puede dar lugar a precios más elevados o a un menor rendimiento de las aplicaciones basadas en datos y más aun a una menor calidad de servicio. Dado que estas aplicaciones influyen cada vez más en muchos mercados económicos y mecanismos de intercambio, los consumidores de banda ancha dependen cada vez más de los dispositivos inalámbricos de banda ancha para satisfacer sus necesidades diarias de productividad.

En la actualidad operadores de telefonía móvil han lanzado oficialmente LTE en la banda no licenciada mediante LTE-U y LAA, además se siguen realizando ensayos a nivel mundial para mejorar el uso de LTE-U ya que es el comienzo del 5G. (DigiAnalysys, 2018)

Se ha podido identificar redes comerciales basadas en LAA operadas por AT&T y por T-Mobile en los Estados Unidos, además en Tailandia la operadora AIS mantiene operativa una red LAA y la operadora rusa de telecomunicaciones MTS lanzo su servicio de LAA. En otros lugares, Bell Mobility en Canadá ha anunciado planes para apoyar la tecnología LAA mediante la agregación de espectro en bandas no licenciadas con LTE en bandas licenciadas para proporcionar velocidades de transferencia más altas. Otros siete operadores de telecomunicaciones han revelado niveles similares de preparación para la LAA.

Entre ellos se encuentran China Mobile, Vodafone Turquía, MTN y Vodacom de Sudáfrica, Verizon Wireless en Estados Unidos, Singtel de Singapur y TIM en Italia. (DigiAnalysys, 2018)

En cuanto al despliegue de LTE-U La red de T-Mobile (EE.UU.) se lanzó en junio de 2017 y cubre Brooklyn, NY; Bellevue, WA; Las Vegas, NV; Richardson, TX, Dearborn, MI y Simi Valley, CA. El operador se encuentra en planes para continuar desplegando la red utilizando la agregación de operadores, MIMO 4x4 y 256QAM en la banda no licenciada de 5 GHz. (DigiAnalysys, 2018)

Redzone Wireless en los EE.UU. ha anunciado planes para un servicio capaz de alcanzar velocidades Gigabit que combina tecnologías de banda ancha inalámbrica con licencia LTE (a 2,5 GHz) y sin licencia (a 5 GHz y 60 GHz) en una sola torre y las integra con un sistema de soporte operativo propietario (OSS). Ya ha lanzado una red que combina LTE a 2,5 GHz con espectro sin licencia a 5 GHz para ofrecer velocidades de 450 Mbps. (DigiAnalysys, 2018)

En la actualidad existen 73 productos entre módems, *small cells*; capaces de soportar LTE en bandas de espectro sin licencia. Las adiciones son el módulo LM960 de Telit que soporta LAA, el módem LTE-U USB MiFi U730L US de Novatel Wireless y las celdas pequeñas de interior de Samsung. Las pequeñas células LAA SCRN-220 y SCRN-250 de *SpiderCloud* fueron utilizadas por el operador estadounidense Sprint para soportar su banda espectral de 1,9 GHz para empresas y lugares de reunión. (DigiAnalysys, 2018)

En cuanto a coexistencia de LTE-U y Wifi en arquitectura de la red, como se muestra en la figura 38. No se vería cambios significativos en la arquitectura ya que LTE-U representa un bajo costo para su implementación, debido a que utilizaría la misma red central, *backhaul* que ya se encuentran desplegados para LTE. Para permitir la transmisión de LTE-U en la banda no licenciada de los 5GHz requiere cambios o actualizaciones en los eNodoB. En esta arquitectura se utiliza también SGSN-MME que es aquel que permite entregar los paquetes de datos a los dispositivos dentro de la red.

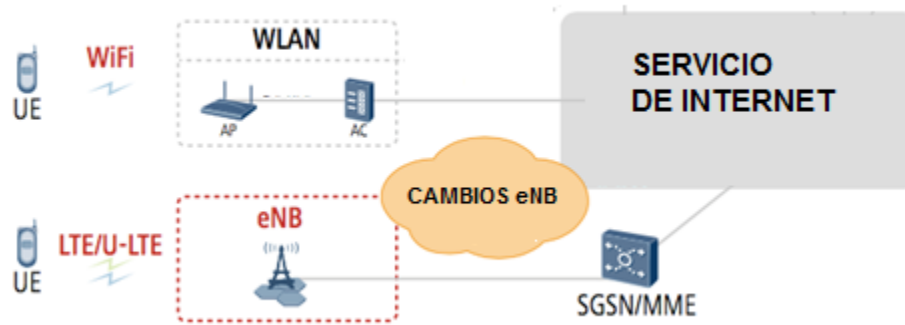


Figura 38. Arquitectura de coexistencia de LTE-U y WiFi.

Tomado de: (Huawei, 2014)

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El uso de la banda no licenciada brinda una excelente plataforma para construir enlaces inalámbricos de bajo precio, rápidos y confiables, no requieren autorización por parte de las entidades gubernamentales, pero si implica ciertos requerimientos básicos de convivencia, tales como límites de potencia o de densidad de potencia radiadas, anchura de banda mínima, etc. Además en el espectro no licenciado se encuentran disponible MHz libres que están siendo poco ocupados y estos pueden ayudar en el tráfico de otras tecnologías como es LTE-U.

LTE-U se basa en la red central de LTE existente y utiliza el marco de seguridad y autenticación colocado en la red LTE, lo que implica que no es necesario realizar cambios en el dominio de la red central más bien es necesario cambiar o actualizar el eNodoB para la transmisión en la banda no licenciada.

El uso de LTE-U junto con el funcionamiento de la banda licenciada supone un importante aumento de la capacidad de la banda no licenciada, al tiempo que garantiza al usuario final la calidad y velocidad del servicio independientemente de la banda en la que se encuentre trabajando; ya que para el usuario es totalmente nulo el saber si su conexión trabaja en la banda licenciada o no licenciada.

La demanda actual de tráfico de datos y la manera para abastecer a los usuarios de la red ha hecho que las operadoras móviles vean de una manera atractiva utilizar la banda no licenciada de los 5GHz, por este motivo LTE-U nace para utilizar el espectro no licenciado aumentando la velocidad de la transmisión y llegando a lugares donde el LTE no es capaz de llegar por sí solo. Para la tecnología WiFi, al tener que compartir su canal con LTE-U implica que exista coexistencia entre ambas tecnologías para poder operar juntos en una misma banda de frecuencia.

La técnica de acceso al medio de WiFi es CSMA/CA el cual su función principal es la prevención de colisiones por verificación de portadora. Antes de realizar la transmisión por el canal CSMA/CA evalúa si el canal está disponible, en caso de no estarlo asigna un tiempo de espera para volver a evaluar. Esto quiere decir que el protocolo de acceso al medio de WiFi es LBT.

LTE-U utiliza el mecanismo CSAT el cual permite compartir el espectro no licenciado de los 5GHz con otros sistemas como WiFi, su funcionamiento se basa en ciclos de trabajo en los que el EnodoB transmite en una fracción del ciclo y en otra desactiva o deja de transmitir las tramas LTE-U. Este ciclo de trabajo varía durante el tiempo para así poder encontrar disponibilidad en los canales. Los tiempos de ciclo típicos son de 80 y 60 ms de duración total (incluyendo ON + OFF).

De acuerdo con el proyecto realizado se puede concluir que tanto LTE-U y WiFi pueden coexistir juntos en la banda no licenciada de los 5GHz, mediante los esquemas de acceso presentados en este proyecto. Además, en la actualidad ya se encuentra operando redes LTE-U con WiFi, como es el caso de Estados Unidos. En algunas ciudades de acuerdo a regularizaciones exigen el uso de LBT como mecanismo de coexistencia justa mientras que en otras ciudades no tienen regulaciones para el espectro no licenciado y trabaja con el mecanismo de acceso CSAT. Por otro lado se pudo identificar que los conjuntos de chips compatibles con LTE-U ya salieron al mercado el año pasado, y muchos operadores como por ejemplo LGU+, Verizon, T-Mobile, NTT DoCoMo, han completado la demostración de LTE-U o LAA el año pasado. Es probable que este año se publiquen los teléfonos con LTE-U, así como el lanzamiento del LTE-U/LAA comercializado

De acuerdo con cada país se utiliza diferente potencia de transmisión para LTE-U por ejemplo en Estados Unidos en las bandas no licenciadas de entre 5150-5250 MHz la potencia de transmisión tanto en interiores como exteriores máximo de 30dBm y 17dBm/MHz para la densidad del espectro de potencia (PSD). Para las bandas no licenciadas entre 5250-5350MHz y 5470-5725MHz, la potencia

de transmisión tanto en interiores como exteriores máxima de 24dBm y 11dBm/MHz en PSD. En las bandas no licenciadas entre 5725-5850MHz, la potencia de transmisión tanto en interiores como exteriores máximo de 30dBm y 30dBm en 500kHz en PSD.

5.2 Recomendaciones

Si bien es cierto que el uso de las bandas no licenciadas no son ofertadas ni autorizadas por el gobierno, se debe validar las normas y reglamentos del uso de espectro no licenciado ya que en cada región o país se especifica ítems para su uso, por ejemplo en ciertas ciudades de Estados Unidos, Rusia, Canadá, Tailandia se especifica que para lograr una coexistencia justa se utiliza el protocolo LBT para transmitir LTE en la banda no licenciada de los 5GHz, es por eso que en estas regiones se encuentra operando redes LAA. En otros países como Turquía, Sudáfrica, y ciudades de Estados Unidos se permite el uso de LTE-U usando CSAT.

Existe reglamentos sobre la banda de los 5GHz en el cual se recomienda que las bandas no licenciadas entre 5725~5850MHz sea la primera opción para el despliegue LTE-U, seguido por las bandas 5470~5725MHz, los cuales pueden proporcionar al menos 125MHz de ancho de banda sin interferencia significativa de la mayor parte del espectro licenciado por LTE

La mayoría de las investigaciones realizadas sobre el uso de LTE-U en el espectro no licenciado de los 5GHz, se basan y hacen sus mediciones tomando como parámetro principal el *throughput*, ya que requieren simular como se comporta el rendimiento de la red cuando se transmite por el mismo canal tanto LTE-U como WiFi; en futuras investigaciones o simulaciones se puede tomar otros parámetros como la latencia, pérdida de paquetes, etc. Por otro lado mediante este proyecto se puede tomar en base para realizar futuras investigaciones para la nueva tecnología que se quiere implementar como es el 5G.

Los análisis realizados en la investigación del estado del arte se centran únicamente en ambientes *indoor*, lo que implica que para investigaciones futuras se deben realizar investigaciones y posibles simulaciones de coexistencia en ambientes *outdoor*, ya que son ambientes en donde las interferencias son mayores.

REFERENCIAS

- Acenswhitepapers. (2012). WEP,WAP,WAP2. Recuperado el 13 de junio de 2019, de <https://www.acens.com/wp-content/images/whitepaper-redes-seguridad-acens-julio-2012.pdf>
- Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones. (2017). Atribución, Adjudicación de radioenlaces. Recuperado el 30 de octubre de 2018, de Arcotel: http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2017/10/ANEXO-1_DOCUMENTO-PNF.pdf
- Akhundov, Z. (2016). BLER. Recuperado el 3 de junio de 2019, de <http://telecompedia.net/block-error-rate-in-lte/>
- Andrea Guevara, V. (2013). Estado actual de las redes LTE en Latinoamérica. Recuperado el 26 de mayo de 2019, de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/349/3/Tesis.pdf>
- Ansari, J. (2016). Demo: *Coexistence features of LTE-U for spectrum sharing with collocated Wi-Fi*. *17th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, MobiHoc 2016, 05–08–July, 351–352*. Recuperado el 26 de mayo de 2019, de <https://doi.org/10.1145/2942358.2942394>
- Bastidas, P. (2016). ARQUITECTURA DE REDES WIFI. Recuperado el 27 de mayo de 2019, de <https://prezi.com/feamgc4o0hp2/arquitectura-de-redes-WiFi/>
- Behaine, C. A. (2016). Modulación por multiportadoras tipo OFDM, las bases de la nueva generación de transmisión de información. Recuperado el 3 de junio de 2019 de, http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242006000200007
- Bhorkar, A., Ibars, C., Papathanassiou, A., & Zong, P. (2015). *Medium access design for LTE in unlicensed band*. *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. Recuperado el 25 de mayo de 2019, de <https://doi:10.1109/wcncw.2015.7122583>

- Bibing. (2017). DFC. Recuperado el 25 de mayo de 2019, de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11138/fichero/memoria%252FCapitulo+5.pdf>
- CableFree. (2018). LTE-U. Recuperado el 2 de abril de 2019, de <http://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/lte-u-lte-unlicensed-spectrum/>
- Carrasco, M. (2017). TDMA. Recuperado el 28 de abril de 2019, de <http://www.labc.usb.ve/paginas/Ec4434/trabajos%20ENE-MAR04/TDMA.pdf>
- Chung, K. (2016). *Adaptive Listen-Before-Talk (LBT) Scheme for LTE and Wi-Fi Systems Coexisting in Unlicensed Band*. Recuperado el 28 de abril de 2019, de <http://sci-hub.tw/10.1109/CCNC.2016.7444845>
- DigiAnalysys. (2018). *Operators commercially launches LTE in unlicensed spectrum*. Recuperado el 5 de mayo de 2019, de <https://www.digianalysys.com/8-operators-commercially-launches-lte-in-unlicensed-spectrum/>
- Dorado, J. L. (2012). Diario de Planificación y Diseño de Redes y Servicios. Recuperado el 1 de mayo de 2019, de <https://diarioredesy servicios.wordpress.com/2012/01/11/conceptos-basicos-sobre-planificacion-de-redes/>
- Dsi. (2015). Protocolos de control de acceso al medio. Recuperado el 26 de mayo de 2019, de <https://www.dsi.uclm.es/descargas/technicalreports/DIAB-06-07-1/mac.pdf>
- EcuRed. (2015). Segunda Generación. Recuperado el 10 de junio de 2019, de https://www.ecured.cu/Telefonía_móvil_2G
- Enacom. (2017). Bandas no licenciadas. Recuperado el 30 de octubre de 2018, de https://www.enacom.gob.ar/bandas-no-licenciadas_p680
- Everything RF. (2017). *License Assisted Access (LAA)*. Recuperado el 13 de junio de 2019, de <https://www.everythingrf.com/community/what-is-lte-license->

assisted-access

- Exfo. (2019). *Baseband Unit*. Recuperado el 10 de abril de 2019, de <https://www.exfo.com/en/resources/glossary/baseband-unit/>
- Farnell Element 14. (2017). *WiFi protocols*. Recuperado el 5 de noviembre de 2018, de <https://uk.farnell.com/wi-fi-architecture-implementation-and-applications>
- FrenzelJ, L. E. (2016). *Bit Error Rate*. Recuperado el 3 de junio de 2019, de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bit-error-rate>
- García, F. (2016). Evolución de telefonía móvil Primera Generación. Recuperado el 10 de junio de 2019, de http://oa.upm.es/44152/1/TFG_FRANCISCO_JAVIER_GARCIA_RUEDA.pdf
- Garreta, J. (2017). Historia y Evolución de las redes WiFi. Recuperado el 4 de abril de 2019, de <http://pleasenetworks.com/blog/post/13/historia-y-evolucion-de-las-redes-WiFi-de-tecnologa-inalmblica-a-aplicacin-ligera-para-retailers>
- Graterol, F. (2017). Acceso múltiple de división FDMA, TDMA, CDMA Y PDMA. Recuperado el 28 de abril de 2019, de <https://es.slideshare.net/francisco1707/acceso-multiple-de-division-fdma-tdmacdma-y-pdma>
- Hasan, C. (2016). *On LTE-WiFi coexistence and inter-operator spectrum sharing in unlicensed bands. Proceedings of the 17th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing - MobiHoc '16*. Recuperado el 27 de abril de 2019, de <https://doi.org/10.1145/2942358.2942382>
- Houngninou, D. K. (2010). *Indoor Cellular Communication Redefined*. Recuperado el 27 de abril de 2019, de <https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-10/ftp/femto/index.html>

- Houngninou, D. K. (2016). *Femtocell*. Recuperado el 10 de junio de 2019, de <https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-10/ftp/femto/index.html>
- Huawei. (2014). *LTE-U: Unlicensed Spectrum utilization of LTE*. Recuperado el 12 de junio de 2019, de www.huawei.com/ilink/en/download/hw_327803
- Intel. (2016). *Alternative LTE Solutions in Unlicensed Spectrum: Overview of LWA, LTE-LAA and Beyond*. Recuperado el 10 de abril de 2019, de <https://gsacom.com/technology/lte-unlicensed/>
- Khaleel, M. (2016). LTE-U. Recuperado el 10 de abril de 2019, de <https://es.slideshare.net/100001290086432/lteu-58334233>
- Labib, V. M. (2017). *Extending LTE into the Unlicensed Spectrum: Technical Analysis of the Proposed Variants*. Recuperado el 14 de octubre de 2018, de <https://arxiv.org/pdf/1709.04458.pdf>
- Leverege (2017), *Unlicensed LTE*. Recuperado el 10 de abril de 2019, de <https://www.leverage.com/research-papers/unlicensed-lte-explained-lte-u-vs-laa-vs-lwa-vs-multefire>.
- LTE-U FORUM. (2018). *LTE-U FORUM*. Recuperado el 7 de abril de 2019, de <http://www.lteuforum.org/lte-u-forum/>
- MASblog. (2016). Evolución de las redes móviles. Recuperado el 10 de junio de 2019, de <https://blog.masmovil.es/la-evolucion-de-la-tecnologia-movil-1g-2g-3g-4g/>
- Matic, D. (2015). *Mathematical description of OFDM*. Recuperado el 13 de junio de 2019, de <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr05/ofdm/ofdmmath.htm>
- Maugard, J. (2017). ¿Qué son las estaciones base Femtocell?. Recuperado el 12 de mayo de 2019, de <https://www.killmybill.es/estaciones-base-femtocell/>
- MILOS, J. (2014). *Models of control channels in the lte system*. Recuperado el 12 de junio de 2019, de

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=92860

- Netacad. (s.f.). Trama de enlace de datos. Recuperado el 07 de noviembre de 2018, de <http://www.itesa.edu.mx/netacad/introduccion/course/module4/4.4.4.8/4.4.4.8.html>
- Netmanias. (2016). *Analysis of LTE – WiFi Aggregation Solutions*. Recuperado el 10 de abril de 2019, de <https://www.netmanias.com/en/post/reports/8532/laa-lte-lte-u-lwa-mptcp-wi-fi/analysis-of-lte-wifi-aggregation-solutions>
- NetSpot. (2019). SIR. Recuperado el 03 de junio de 2019, de <https://www.netspotapp.com/help/signal-to-interference-ratio/>
- NetSpotApp. (2019). WEp, WAp, WAP2. Recuperado el 13 de junio de 2019, de <https://www.netspotapp.com/es/wifi-encryption-and-security.html>
- Orozco, N. (2011). Estudio de factibilidad para la migración del sistema móvil: Recuperado el 28 de Mayo de 2019, de <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/4525/1/T-%20ESPE-032658.pdf>
- Pascual, J. A. (2018). Historia de Wifi. Recuperado el 4 de abril de 2019, de <https://computerhoy.com/noticias/internet/historia-del-WiFi-asi-empezo-todo-anos-ochenta-79475>
- Qualcomm Technologies, Inc. (2018). *Qualcomm Research LTE in Unlicensed Spectrum: Harmonious Coexistence with Wi-Fi*. Recuperado el 20 de abril de 2019, de <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/lte-unlicensed-coexistence-whitepaper.pdf>
- Radio-electronics,s.f. (s.f.). 3GPP. Recuperado el 29 de octubre de 2018, de <https://www.radio-electronics.com/info/cellularcomms/3gpp/what-is-3gpp.php>

- Radio-Electronics*. (2018). *LTE-U Unlicensed, LTE-LAA*. Recuperado el 09 de noviembre de 2018, de <https://www.radio-electronics.com/info/cellular/comms/lte-long-term-evolution/lte-u-unlicensed-laa-license-assisted-access.php>
- Ratasuk, R. (2014). *LTE in unlicensed spectrum using licensed-assisted access. 2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. Recuperado el 9 de junio de 2019, de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7063522>
- Ratasuk, R. (2015). *Downlink Performance Analysis of LTE and WiFi Coexistence in Unlicensed Bands with a Simple Listen-Before-Talk Scheme. 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Recuperado el 28 de abril de 2019, de <https://doi:10.1109/vtcspring.2015.7145789>
- RF Wireless World. (2017). PDSCH. Recuperado el 3 de junio de 2019, de <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/LTE-PDSCH-Physical-Downlink-Shared-Channel.html>
- Rodriguez, E. (2008). Evolución de las redes Inalámbricas. Recuperado el 4 de abril de 2019, de <http://www.maestrosdelweb.com/evolucion-de-las-redes-inalambricas/>
- Salazar, J. (2017). Redes Inalámbricas. Recuperado el 4 de abril de 2019, de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01_R_ES.pdf
- Seppala, T. J. (2017). *FCC approves first LTE-U devices*. Recuperado el 7 de abril de 2019, de <https://www.engadget.com/2017/02/22/fcc-approves-first-lte-u-devices/>
- Shaw, K. (2018). Estándar 802.11. Recuperado el 3 de octubre de 2018, de <https://www.networkworld.com/article/3238664/wi-fi/80211-wi-fi-speeds-and-standards-explained.html>
- Sriyananda, M. (2016). *Multi-Armed bandit for LTE-U and WiFi coexistence in unlicensed bands. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC, (Wcnc)*. Recuperado el 19 de diciembre de 2018, de

<https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7564899>

Technopedia. (2019). FDMA. Recuperado el 28 de abril de 2019, de <https://www.techopedia.com/definition/5669/frequency-division-multiple-access-fdma>

technopedia. (2019). *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*. Recuperado el 7 de abril de 2019, de <https://www.techopedia.com/definition/24215/3rd-generation-partnership-project-3gpp>

techplayon. (2017). RRH (*Remote Radio Head*). Recuperado el 18 de mayo de 2019, de <http://www.techplayon.com/rrh-remote-radio-head-connected-bbu-base-band-unit/>

Tutorial LTE. (2014). PDCCH. Recuperado el 3 de junio de 2019, de http://www.ipv6go.net/lte/downlink_canales_fisicos.php

Tutorial-reports,s.f. (s.f.). *Architecture WiFi*. Recuperado el 13 de noviembre de 2018, de http://www.tutorial-reports.com/wireless/wlanWiFi/WiFi_architecture.php

UDLAP. (2018). CDMA. Recuperado el 28 de abril de 2019, de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/tecuanhuehue_r_j/capitulo2.pdf

Valle, J. (2015). Introducción a las Cadenas o Procesos de Markov. Recuperado el 20 de abril de 2019, de http://www.ingenieria.unam.mx/javica1/ingsistemas2/Simulacion/Cadenas_de_Markov.htm

Wang, X. (2017). *a Survey of Lte Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Bands. GetMobile: Mobile Computing and Communications*, 20(3). Recuperado el 20 de mayo de 2019, de <https://doi.org/10.1145/3036699.3036705>

Xataka. (s.f.). WiFi 2,4GHz y 5GHz: cuáles son las diferencias y cuál elegir. Recuperado el 13 de agosto de 2018, de <https://www.xataka.com/basics/WiFi-2-4g-y-5g-cuales-son-las-diferencias-y-cual-elegir>

Yimin, A. (2017). *Wi-Fi Coexistence with Duty Cycled LTE-U*. Recuperado el 18 de abril de 2019, de <http://sci-hub.tw/10.1155/2017/6486380>

Yubero, O. U. (2016). Uso de Frecuencias no licenciadas. Recuperado el 30 de octubre de 2018, de <https://www.comunicacionesinalambricashoy.com/wireless/uso-de-frecuencias-no-licenciadas/>

