



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS

VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica**

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Microondas en el backhaul de redes móviles heterogéneas.**

**Autor: Luis Rolando Chaviano Cedeño**

**Tutor: MSc. Frank Zurbano Quintana**

**Consultante: Carlos Rodríguez López**

**Santa Clara**

**2017**

**"Año del 59 aniversario del triunfo de la Revolución"**



**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

### **Microondas en el backhaul de redes móviles heterogéneas.**

**Autor: Luis Rolando Chaviano Cedeño**

Email: [lccedeno@uclv.cu](mailto:lccedeno@uclv.cu)

**Tutor: MSc. Frank Zurbano Quintana**

E-mail: [frank.zurbano@cubacel.cu](mailto:frank.zurbano@cubacel.cu)

**Consultante: Carlos Rodríguez López**

Email: [crodrigz@uclv.edu.cu](mailto:crodrigz@uclv.edu.cu)

**Santa Clara**

**2017**

**“Año del 59 aniversario del triunfo de la Revolución”**



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Autor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

## **PENSAMIENTO**

*“La mente que se abre a una nueva idea, jamás volverá a su tamaño original”.*

*Albert Einstein*

## **DEDICATORIA**

*A mis padres Lidia y Rolando por su amor y comprensión en todo momento.*

*A mis hermanos Leidy y Juan Carlos por siempre creer en mí.*

*A mis amigos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A toda mi familia.*

*A todos mis profesores que han contribuido a mi formación profesional.*

*A mi tutor Frank que me ha guiado durante el proceso de la tesis.*

*A la profesora Irina por haber dedicado su tiempo a la revisión de la tesis.*

*A todos los que, de cualquier modo, me han ayudado a seguir adelante pese a los  
obstáculos.*

## TAREA TÉCNICA

1. Estudio de las principales características de las redes heterogéneas y sobre los medios de acceso utilizados en su *backhaul*.
2. Caracterización de las tecnologías LTE y LTE-A como estándar para las comunicaciones por radio en las redes heterogéneas.
3. Análisis comparativo de los diferentes entornos y bandas de frecuencia para el despliegue de un *backhaul* por microondas en redes heterogéneas y las consideraciones pertinentes en cada caso.
4. Investigación de las innovaciones tecnológicas, dirigidas a potenciar el uso de microondas y reducir los costos en una red móvil.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

## RESUMEN

Las redes móviles están teniendo un enorme desarrollo debido al crecimiento en el número de usuarios y al incremento en la capacidad que estos demandan. Las redes heterogéneas alivian este problema pero con el despliegue de pequeñas celdas sobre las paredes de edificios, luminarias públicas o lugares similares con grandes aglomeraciones de usuarios, existe una gran variedad de opciones para el acceso del *backhaul*. Surge ahora el desafío de implementar un *backhaul* que conecte tanto pequeñas celdas como las macro existentes al núcleo de la red sin incurrir en un costo excesivo ni afectar la calidad de experiencia del usuario. Un *backhaul* celular por microondas tiene varias ventajas: no requiere un trabajo tan costoso de ingeniería civil para la infraestructura, ni se necesita arrendar la capacidad de transmisión de operadores alternativos, además de su breve tiempo de despliegue y largo alcance. Sin embargo, el uso de microondas para el *backhaul* móvil no viene sin un precio. El operador debe obtener el espectro necesario y la capacidad de un enlace de microondas es susceptible a las condiciones climáticas. En este trabajo se presentan las microondas que, gracias a las innovaciones realizadas y a las posibilidades que brinda LTE, constituyen una solución viable a las principales necesidades del *backhaul* de las redes heterogéneas.

## TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
TAREA TÉCNICA .....	iv
RESUMEN .....	v
INTRODUCCIÓN .....	1
Organización del informe .....	3
CAPÍTULO 1. REDES HETEROGÉNEAS Y SU BACKHAUL.....	4
1.1 Surgimiento de las Redes Heterogéneas .....	4
1.1.1 Características de las Pequeñas Celdas.....	5
1.2 Características de las Redes Heterogéneas .....	6
1.3 Generalidades del <i>Backhaul</i> en Redes Heterogéneas.....	9
1.3.1 Ubicación de la celda.....	9
1.3.2 Energía.....	10
1.3.3 Gestión de Operación y Mantenimiento .....	10
1.3.4 Requerimientos de Servicio .....	11
1.4 Componentes del tráfico de un <i>backhaul</i> LTE.....	11
1.4.1 Tráfico X2.....	11
1.4.2 Plano de Control, OAM y Señales de Sincronización .....	12
1.4.3 Encabezado del Protocolo de Transporte.....	12
1.4.4 <i>IPsec</i> .....	12
1.5 Requerimientos para un <i>Backhaul</i> LTE .....	13

1.5.1	Capacidad.....	13
1.5.2	Latencia.....	14
1.5.3	Disponibilidad.....	16
1.5.4	Sincronización .....	16
1.5.5	Seguridad .....	17
1.6	Motivación para un <i>Backhaul</i> Inalámbrico .....	18
CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍAS LTE Y LTE-A EN EL BACKHAUL.....		20
2.1	Características y Arquitectura de LTE.....	20
2.1	Métodos de sincronización de LTE.....	22
2.1.1	Protocolo 1588v2.....	23
2.1.2	Protocolo SyncE .....	23
2.2	Modulaciones usadas en LTE/LTE-A.....	23
2.2.1	Multiplexado por División de Frecuencias Ortogonales .....	24
2.2.2	Acceso Múltiple por División de Frecuencias con Portadora Única .....	25
2.3	Mejoras introducidas por LTE-A .....	25
2.3.1	Agregación de Portadora .....	26
2.3.2	MIMO .....	27
2.3.3	Coordinación Multipunto.....	28
2.3.4	Nodos de Repetición .....	29
2.4	Redes Auto-Organizadas.....	31
CAPÍTULO 3. Microondas en el <i>Backhaul</i> .....		33
3.1	Evolución del <i>Backhaul</i> Inalámbrico .....	33
3.2	Consideraciones para las Soluciones Inalámbricas del <i>Backhaul</i> .....	34
3.2.1	Propagación <i>LoS</i> y <i>NLoS</i> .....	34

3.2.2	Topología.....	36
3.2.3	Opciones de Licencia de Espectro .....	38
3.3	Bandas del Espectro para el <i>Backhaul</i> .....	40
3.3.1	Banda Sub-6 GHz con licencia.....	41
3.3.2	Banda Sub-6 GHz sin licencia.....	42
3.3.3	Banda 6-42 GHz .....	44
3.3.4	Bandas de 60 GHz y 70- 80 GHz .....	45
3.3.5	Comparación entre las Bandas del Espectro.....	47
3.3.6	Escenarios para las Bandas del Espectro .....	48
3.4	Avances tecnológicos de las microondas actuales .....	49
3.4.1	Compresión inteligente del encabezado .....	49
3.4.2	Técnicas para mejorar la eficiencia espectral. ....	51
3.4.3	Microondas <i>Full Duplex</i> dentro de la Banda.....	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		57
Conclusiones.....		57
Recomendaciones .....		58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		59

## INTRODUCCIÓN

La esencia de redes heterogéneas es la necesidad de los usuarios de servicios móviles de banda ancha de alta calidad en todas partes. Los operadores necesitan apoyar las progresivas demandas de calidad y al mismo tiempo minimizar los costos de implementación y funcionamiento de la red, lo que implica que las soluciones del *backhaul* no deben afectar el desempeño de la redes heterogéneas, además deben ser eficientes en cuanto a costos y de fácil instalación. El desempeño de una red debe ser uniforme en toda su extensión, impidiendo que el usuario experimente una caída en el desempeño cuando se encuentre conectado a una pequeña celda, resultando en una percepción negativa de la calidad de experiencia respecto a toda la red y a la marca del operador (Ericsson, 2014b).

La fibra es considerada una tecnología óptima para el acceso ofreciendo las mejores características para capacidad y calidad de servicio. Sin embargo, la fibra no está disponible en todos los lugares y el costo de desplegarla exclusivamente para el *backhaul* de una pequeña celda puede ser excesivo.

Las soluciones para el *backhaul* a través de microondas han llegado al mercado para ayudar a acelerar el despliegue de enlaces de *backhaul* a los sitios de pequeñas celdas. Los enlaces de microondas tradicionales requieren línea de vista. Sin embargo, hay también nuevas opciones que pueden operar sin línea de vista mientras se acepte una compensación en la distancia, ancho de banda y calidad de servicio (Alcatel, 2012).

La historia de las comunicaciones móviles ha trascendido por muchos estándares de radio para voz y datos. LTE cambia el paisaje porque es hacia donde convergen todas las radios existentes. Es la evolución no solamente de los operadores GSM/HSPA sino también de CDMA y WiMAX. Por consiguiente, LTE puede lograr el mayor ecosistema posible además de coexistir sin problemas con las redes de radio actuales (3GPP, 2012a).

En el presente, las redes móviles de banda ancha están experimentando un rápido desarrollo donde la tecnología LTE ha sido aplicada comercialmente a gran escala. Por consiguiente, la capacidad en la transmisión por microondas debe ser mejorada en aras de satisfacer el rápido crecimiento del tráfico móvil. Esta problemática trae consigo la siguiente interrogante **¿Cuáles son los aspectos que permiten al acceso por microondas resolver las demandas de capacidad en el *backhaul* de las redes heterogéneas?**

Este trabajo tiene como **objetivo general**: Investigar el uso de las microondas y sus innovaciones tecnológicas en el *backhaul* de las redes móviles heterogéneas como solución a las demandas de capacidad de LTE.

Los **objetivos específicos** están encaminados a:

1. Investigar el estado actual del *backhaul* en las redes móviles heterogéneas.
2. Caracterizar LTE como el estándar de radio en la aplicación de las microondas en la red de *backhaul*.
3. Analizar de forma comparativa las bandas de frecuencia para un *backhaul* por microondas considerando el uso óptimo en cada caso.
4. Investigar los avances tecnológicos en las microondas actuales para incrementar la capacidad y la eficiencia en redes LTE.

Las **interrogantes científicas** son:

1. ¿Cuáles es el estado real de las tecnologías utilizadas en el *backhaul* de las tecnologías móviles actuales?
2. ¿Qué posibilidades brinda LTE y cómo afectan a los requerimientos del *backhaul* de las redes heterogéneas?
3. ¿Cuáles son opciones en la implementación de un *backhaul* por microondas como bandas del espectro, topología o licencias?
4. ¿Cuáles son los adelantos tecnológicos en las microondas actuales para lograr una mayor capacidad y eficiencia en los enlaces?

## **Organización del informe**

Este trabajo está estructurado de la siguiente forma. Introducción, tres capítulos, conclusiones y recomendaciones, referencias bibliográficas y glosarios.

En el **capítulo 1** se realiza una caracterización de las redes móviles heterogéneas, haciendo énfasis en su *backhaul*, así como los principales requerimientos de este y algunas tecnologías de acceso empleadas.

En el **capítulo 2** se analizan la arquitectura y características de las tecnologías LTE y LTE-A, quienes son tecnologías claves que han sido desarrolladas para las redes heterogéneas debido a las mejoras implementadas situándola como superior a previas tecnologías de radio.

En el **capítulo 3** se estudian las consideraciones para un *backhaul* por microondas, se hace un análisis comparativo de las bandas del espectro usadas para este fin y se exponen algunos adelantos tecnológicos de las microondas actuales.

Las conclusiones están acordes a los objetivos planteados y las recomendaciones están en correspondencia con trabajos futuros. La bibliografía es actualizada y pertinente. Consta con varias referencias bibliográficas.

## CAPÍTULO 1. REDES HETEROGÉNEAS Y SU BACKHAUL

En este capítulo se dan a conocer las causas que dieron lugar al surgimiento de las redes heterogéneas, así como sus principales características. Se abordan, además, los puntos a considerar en el despliegue de un *backhaul* para cumplir con los requerimientos actuales. Finalmente, se argumenta la elección de las microondas como medio de acceso empleado en dicho segmento de red.

### 1.1 Surgimiento de las Redes Heterogéneas

En la actualidad el tráfico móvil total generado por teléfonos móviles excede al originado desde computadoras personales y tabletas por primera vez. . En los pocos años que llevan los teléfonos inteligentes en el mercado, los envíos han aumentado drásticamente. Los usuarios que los poseen están consumiendo más datos que nunca antes. La mayor producción de teléfonos inteligentes, los servicios que consumen gran ancho de banda y la creciente popularidad de las aplicaciones son algunos de los factores que se espera incrementen de forma considerable el tráfico móvil en los próximos años, alcanzando un total de 12 exabytes mensuales a finales de 2019 (Ericsson, 2014a)

La mayoría de los operadores serán capaces de satisfacer estas crecientes demandas de tráfico por algunos años a través de la implementación de tecnologías HSPA y LTE más avanzadas; ganando acceso a espectro adicional, empleando técnicas con mayor eficiencia espectral y densificando la capa macro de la red. Sin embargo, el mejoramiento continuo y la densificación pueden no ser siempre la vía más eficiente, atendiendo al costo, para impulsar la capacidad en los puntos de acceso y elevar el desempeño en interiores y en los bordes de celda. En tales situaciones, la capacidad adicional se puede lograr mediante la combinación

de las celdas macro habituales con pequeñas celdas de baja potencia que cubran áreas menos extensas. Esto se conoce como redes móviles heterogéneas (Ericsson, 2014b).

### 1.1.1 Características de las Pequeñas Celdas

Las pequeñas celdas son eficientemente integradas, coordinadas y sincronizadas, posibilitando la entrega de servicios de banda ancha de alta capacidad y alta calidad a un gran número de usuarios. Normalmente están destinadas a ser usadas en interiores de parques, casas, centros comerciales, aeropuertos, oficinas gubernamentales, estadios y otros como un complemento más a las estaciones macro celulares para permitir mayor capacidad de usuarios, mayor cobertura, altas velocidades de datos y por ende mejor calidad de servicio. Hay diferentes tamaños y versiones de pequeñas celdas, varían en dependencia del número de usuarios que pueden manejar, en su potencia y en su rango, y en casi todos los casos incluyen tecnologías esenciales de radio acceso como 3G, LTE y actualmente hasta con Wi-Fi integrada; poseen además fuente de alimentación interna y un *backhaul* de conexión a la red celular (Coldrey et al., 2014).

Las características más relevantes de las pequeñas celdas son:

- Proveen la cobertura de un área más pequeña que la de una estación macro celular.
- Siguen siendo implementadas y administradas por los operadores móviles.
- Aseguran un acceso abierto a todos los usuarios del mismo operador.
- Bajo costo de equipo e instalación en comparación con las macro celdas.
- Están orientadas para soportar servicios de datos, aunque también pueden soportar servicios de voz (Qutqut, 2014).

En la tabla 1.1 se muestran las características de los diferentes tipos de pequeñas celdas

Tabla 1.1 Tipos y Características de las pequeñas celdas.

<b>Tipos de pequeñas celdas</b>	<b>Potencia de salida</b>	<b>Radio de la celda</b>	<b>Cantidad de usuarios</b>	<b>Localización</b>
Femtoceldas	1mW-250mW	10m-100m	1-30	Interiores
Picoceldas	250mW-1W	100m-200m	30-100	Interiores
Micro/Metroceldas	1W-10W	200m-2km	100-2000	Interiores/Exteriores

## 1.2 Características de las Redes Heterogéneas

Una red heterogénea representa una importante evolución del modelo actual de redes móviles, pues el gran número de dispositivos y la proximidad entre ellos crean nuevos desafíos para gestionar movilidad, gestionar interferencia y desplegar el *backhaul*. Por otro lado, debido al despliegue de pequeñas celdas como complemento de las celdas macro se requieren por parte de estas estaciones base, mayor inteligencia y mayores capacidades de auto-organización que deben ser además optimizadas por la red.

Estas redes como un todo ofrecen potentes ventajas en la práctica, las cuales se traducen en significativos ahorros económicos, destacándose (3GPP, 2016):

- Reutilización del espectro mediante el uso de pequeñas celdas.
- Mejor cobertura y capacidad en las áreas urbanas y en interiores
- Rápido seguimiento de los nuevos servicios mientras crecen los ingresos de los servicios existentes.
- Grandes ahorros en gastos de capital y gastos de operación (*OPEX, Operational Expenditures*) debido a la reducción de equipamientos, energía, mantenimiento y costos en el *backhaul*.

Los elementos más importantes en el costo total de propiedad (*TCO, Total Cost of Ownership*) para los operadores de redes móviles, son las inversiones de capital (*CAPEX Capital Expenditures*) para la construcción de la red y *OPEX* para el funcionamiento de la red.

Para una red celular homogénea (solamente basada en macro celdas), el *CAPEX* por lo general incluye el costo de la red de radio acceso (la estación base y los controladores de la red de radio acceso), el núcleo de red móvil, la infraestructura del *backhaul* y los sitios de adquisición, construcción, ingeniería e integración. Por supuesto, existen algunas variaciones de un despliegue a otro, por ejemplo el costo de la red de radio acceso puede reducirse cuando un operador puede actualizar su equipamiento de estación base existente para soportar una nueva tecnología de interfaz aérea, o puede el operador evitarse el costo de adquisición de un sitio si puede superponer una nueva red en sus torres celulares existentes (Hu and Qian, 2013).

El *OPEX* está principalmente asociado con el funcionamiento y administración de la red, incluyendo gastos de alquiler del sitio, la transmisión del *backhaul*, potencia energética para la alimentación del sistema y la operación y mantenimiento de la red.

Las redes heterogéneas juegan un rol fundamental en la reducción de la brecha que existe entre costos y capacidad, propiciando importantes ahorros económicos durante todo del ciclo de vida desde su implementación (Qutqut, 2014). Entre ellos:

- Reduce los costes de equipamiento, donde las macro celdas cuestan \$30 000.00 como promedio en dependencia de su configuración, el costo de las pequeñas celdas oscila como promedio entre \$5 000.00 a \$10 000.00.
- Menores costos de los sitios de adquisición, aunque son más los que tendrán que ser analizados y negociados.
- Reduce los gastos de operación y de energía, se estima que las capacidades de las estaciones base macro celulares inherentes a las redes auto-organizadas (*SON, Self Organizing Networks*) pueden reducir el costo de la mano de obra hasta un 30%.
- Integración de la red celular con Wi-Fi. Se estima que la implementación de celdas metropolitanas con tecnología 3G y LTE pueden reducir el costo a la mitad en comparación con macro celdas con tecnologías equivalentes, mientras que la integración con Wi-Fi reduce otro 75%.

La expansión de capacidad de redes heterogéneas a partir de la arquitectura tradicional de las redes móviles tiene como nodo principal la estación base macro celular. A partir de esta estación se puede hacer un incremento de su capacidad mediante la utilización de un espectro de frecuencias superior, mayor número de antenas y una mejora del procesamiento dentro de los nodos constituyentes, así como entre ellos. De este modo se incrementa la capacidad sin tener que añadir nuevos sitios. Pero esto no es suficiente para ciertos escenarios como son (Quintana, 2016):

- Puntos de acceso en exteriores de grandes demandas tales como plazas y calles comerciales, con una densa red macro celular ya definida y que son áreas donde la interferencia es alta.
- Puntos de acceso aislados de alto tráfico localizados en interiores (centros de negocios y hoteles) donde es difícil llegar mediante una estación macro en exterior.

- Puntos de acceso de alto tráfico en interiores, como centros comerciales, aeropuertos y estaciones del metro, donde las demandas de movilidad y la interferencia son altas.
- Puntos de acceso localizados en interiores o espacios con poca cobertura tales como oficinas pequeñas y restaurantes que exigen despliegues y gastos de estructura de las redes celulares convencionales.

Para satisfacer las demandas de tráfico, lograr altas capacidades de usuarios y mayor cobertura en estos puntos de alto tráfico, se siguen factores claves que determinan el estado final de la red heterogénea, esto incluye: mejorar la red macro celular existente, densificar dicha capa macro y agregar pequeñas celdas para complementar las macro celdas, principalmente en interiores donde la cobertura es pobre (Landstrom et al., 2011).

Mejorar las macroceldas existente trae beneficios adicionales, ya que no hay que hacer gastos significativos al no tener que buscar otros sitios para colocar nuevas radio bases. Esta propuesta consiste básicamente en mejorar la tecnología de radio acceso existente introduciendo nuevas tecnologías como LTE, siendo posible con ella mejores velocidades de transferencia y mayor capacidad en el sistema debido a mejoras en la eficiencia por la introducción de técnicas de modulaciones de orden superior, orden de sectorización superior, utilización de portadoras múltiples y utilización de soluciones con múltiples antenas y de radio con vista a reestructurar el espectro. También se pueden introducir mejoras adicionales si se consideran el uso de antenas avanzadas, incremento del orden de diversidad en el receptor y/o en el transmisor y técnicas avanzadas en la capacidad de procesamiento dentro de los nodos y entre ellos.

Densificar la capa macro en una primera opción consistirá en dividir las celdas lo que implica una transición de un sitio con tres sectores a uno con seis y en una segunda opción agregar sitios macro celulares en puntos estratégicos.

Agregar pequeñas celdas como complemento de la estación macro. Las pequeñas celdas brindan una alta capacidad por usuario en su área de cobertura con la potencialidad de incrementar el rendimiento en la red macro descargando tráfico generado por la demanda de los usuarios.

La manera más eficiente para lograr mayor capacidad es combinando los tres enfoques anteriores: mejorar la capa macro, densificar la capa macro y agregar nodos de baja potencia. De forma tal que con esta combinación, en dependencia de la red existente pueda soportar altos volúmenes de tráfico y muy altas razones de datos, así como las técnicas y viabilidad económica de cada enfoque, sacando el máximo provecho de las estaciones macro y las pequeñas celdas como parte de una red heterogénea.

### **1.3 Generalidades del *Backhaul* en Redes Heterogéneas**

La implementación de redes móviles de banda ancha y su correspondencia con el *backhaul* apropiado es un aspecto donde se ha alcanzado un desarrollo satisfactorio. Esto se ha logrado al implementar pequeñas celdas que aumenten las capacidades en los puntos de acceso y mejoren el desempeño en los bordes de celdas y en edificios. El desarrollo en curso de las redes de radio para maximizar el uso de espectro disponible sitúa mayor demanda en el retardo y la sincronización, particularmente entre las macro celdas y las pequeñas celdas.

En general, el *backhaul* no debe limitar la red de acceso de radio y debería tener desempeño suficiente para satisfacer la calidad demandada por el usuario en cualquier sitio.

Los cambios en la red de acceso de radio y la llegada de las pequeñas celdas influyen en gran medida en la elección de una solución de *backhaul* para un escenario dado. Esto es válido para las redes móviles de hoy en día, y tendrá igual importancia para las redes heterogéneas en el futuro.

La introducción de pequeñas celdas presenta un grupo de variables a tener en cuenta en la red de *backhaul*. De la propia ubicación de la celda se deriva una personalización para acomodar los niveles de disponibilidad y calidad de servicio satisfactorios, el tipo de acceso, el entorno y los requerimientos de energía. El funcionamiento de la red se vuelve mucho más complejo con el incremento de sitios a desplegar y administrar y una mayor diversidad de topologías de red (Ericsson, 2014b).

#### **1.3.1 Ubicación de la celda**

En un escenario ideal, las pequeñas celdas se colocarían donde brindarían el mayor beneficio en términos de capacidad y cobertura y donde se alcanzará una coordinación ideal con la red

macro. En la realidad, la ubicación de estas celdas va a depender en gran medida de los acuerdos que puedan ser negociados con los gobiernos locales o los propietarios de edificios.

### 1.3.2 Energía

En el ambiente de celdas macro, la energía es suministrada a la torre celular, donde las provisiones necesarias para todos los equipos de radio y de transmisión se sitúan en una habitación con ambiente controlado en la base de la torre. Con el cambio a pequeñas celdas, proveer energía suficiente a los equipos de radio y de acceso al *backhaul* es un reto significativo, especialmente si dicha celda está colocada en un poste o lámpara. Se presentan diversas interrogantes (Alcatel, 2012):

- ¿Los equipos necesitan de corriente alterna o continua?
- ¿Se precisa de una protección contra rayos?
- ¿Hay algún requerimiento para la energía vestigial en caso de pérdida momentánea de potencia?
- ¿Cómo la energía es llevada al sitio y distribuida a los equipos de radio y de *backhaul* y los transceptores de microondas?
- ¿Qué pasaría si se requieren de todas estas funciones y deben ser localizadas en dicho poste?

La energía es un elemento clave en la planificación para el *backhaul* de pequeñas celdas.

### 1.3.3 Gestión de Operación y Mantenimiento

Los operadores deben monitorear el desempeño a lo largo de la red independientemente del mecanismo usado para acceder al sitio celular y de si la red es arrendada o no. Con la entrada de pequeñas celdas a la red de acceso de radio, se incrementa el tráfico debido a la inclusión de nuevos equipos y los requerimientos de monitoreo y garantías asociados a estos. Por ende, la configuración de herramientas y procedimientos para una gestión consistente puede ser un proceso engorroso propenso a errores. Además la solución de los problemas en la red en lugar de la prevención de los mismos ya no es una opción sostenible porque introduce altos riesgos contra el cumplimiento de acuerdos de nivel de servicio y también puede resultar en visitas innecesarias y costosas al sitio.

### 1.3.4 Requerimientos de Servicio

Para determinar la mejor opción para el *backhaul* se necesita primero conocer los servicios que serán ofertados desde la celda y los requerimientos de ancho de banda, retardo, pérdida de paquetes y confiabilidad como para dichos servicios. Por ejemplo, una celda destinada a aliviar el tráfico de datos de una celda macro tendrá diferentes requerimientos en el backhaul a los de una celda independiente que será usada para un servicio de voz LTE sin fallas y aplicaciones de video móvil sensibles al retardo. En el epígrafe 1.5 se ofrecen los requerimientos para un *backhaul* LTE.

### 1.4 Componentes del tráfico de un *backhaul* LTE

En LTE el tráfico de *backhaul* comprende un número de componentes en adición al tráfico del plano de usuario. En la figura 1.1 se muestran los tipos de tráfico que son transportados y son comentados a continuación (Alliance, 2014).

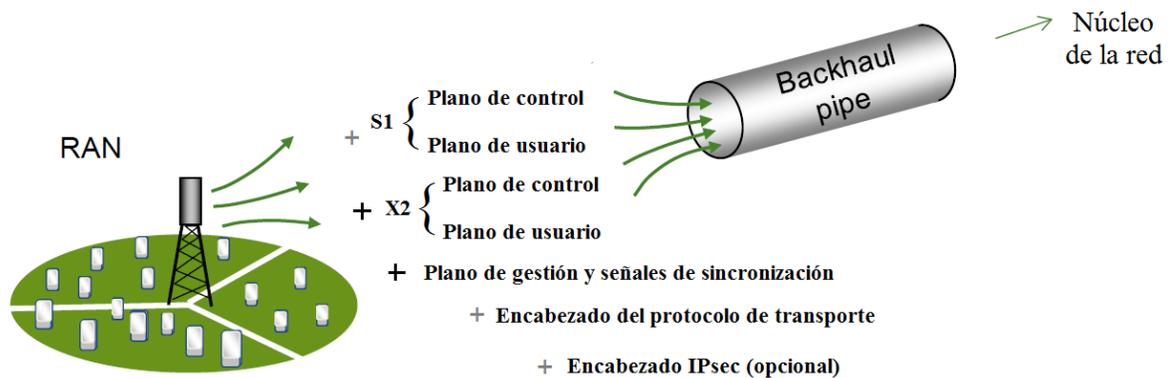


Figura 1.1. Componentes del tráfico de *backhaul* para LTE

#### 1.4.1 Tráfico X2

La nueva interfaz X2 entre los eNB es sobre todo tráfico de usuario transmitido durante el *handover* de un terminal entre los eNBs. El volumen de tráfico X2 es con frecuencia expresado en relación al volumen de tráfico S1, aunque el tráfico real de X2 depende de la cantidad de *handover*, de ahí que las celdas en autopistas, por ejemplo, verían una mayor proporción de tráfico X2 que aquellas colocadas en una oficina. Se sugiere que un encabezado X2 de 10 % es apropiado para sitios que brindan alta calidad de servicio a usuarios móviles.

### 1.4.2 Plano de Control, OAM y Señales de Sincronización

Las señales del plano de control en S1 (del eNB al núcleo de la red) y en X2 (entre eNBs) se consideran despreciables en comparación al tráfico asociado del plano de usuario y pueden ser ignoradas. Lo mismo pasa con el tráfico de gestión de operación y mantenimiento (*OAM Operations, Administration and Maintenance*) y con las señales de sincronización (Metsälä and Salmelin, 2015).

### 1.4.3 Encabezado del Protocolo de Transporte

El tráfico de *backhaul* es llevado al núcleo de la red de forma que se mantiene la misma dirección IP a través de los eNBs y puertas de entrada. LTE usa el protocolo de túnel GPRS (*GTP GPRS tunnelling protocol*), el cual es también usado en núcleos de redes GSM y UMTS, o Túneles Móviles IP. El tamaño relativo del encabezado de túnel depende de la distribución de tamaño del paquete del usuario. Paquetes más pequeños (como *VoIP*) tienen encabezados de mayor tamaño. El grupo de *backhaul* de NGMN (*Next Generation Mobile Networks*) ha asumido un encabezado del 10% para representar el caso general.

### 1.4.4 IPsec

Los datos del plano de usuario en la interfaz S1 entre el eNB y la puerta de entrada de servicios no son seguros y podrían estar expuestos si la red de transporte no está físicamente protegida. En los casos donde el operador es dueño y confía en su red de transporte, no se necesita una seguridad adicional. Sin embargo, si el tráfico de usuario es llevado a través de una red ajena y no confiable debería estar protegido. En tales situaciones, la 3GPP especifica el uso de encapsulación de seguridad de la carga útil en modo túnel (*ESP Encapsulated Security Payload*). Desafortunadamente esto añade un encabezado de cerca de 60 bytes que puede ser comparable en tamaño a la propia carga útil de paquetes pequeños como *VoIP*. Para paquetes mayores a 1500 bytes asociados con la transferencia de archivos, el encabezado es 4 % de la carga útil. El encabezado neto de la arquitectura de seguridad IP (*IPsec Internet Protocol Security*) depende de la mezcla de tipos de tráfico que sean transportados y la distribución resultante de tamaño de paquetes (Alliance, 2014).

## 1.5 Requerimientos para un *Backhaul* LTE

Debido a la diferencia entre los servicios que deben ser transportados por la red de *backhaul* algunos requerimientos tienen que ser especificados. Estos pueden depender de la carga de tráfico esperado y de las aplicaciones de usuario de extremo, o incluso, de las especificaciones de fabricantes de los equipos. A continuación se describen los principales requerimientos en el despliegue de un *backhaul* LTE (Metsälä and Salmelin, 2015).

### 1.5.1 Capacidad

En comparación con 2G y 3G, las eNB de LTE son capaces de proveer un crecimiento masivo del ancho de banda posible. Las figuras 1.2 y 1.3 dan una visión general de las posibilidades técnicas para razones máximas en el enlace descendente y ascendente respectivamente, mientras que la figura 1.4 ilustra las razones promedio para ambas direcciones del enlace.

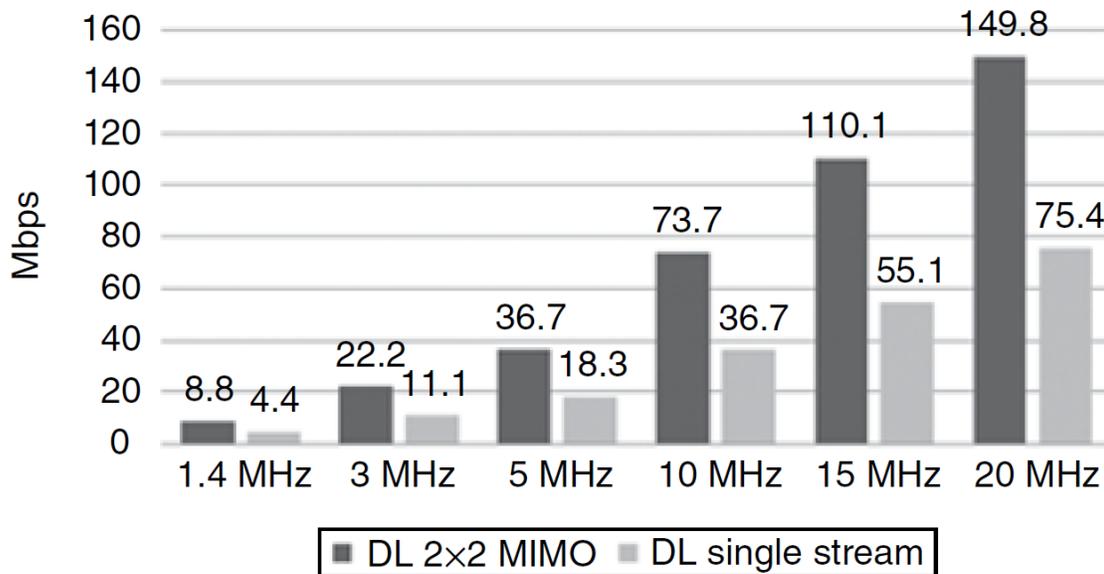


Figura 1.2. Capacidades pico de una eNB en el enlace descendente empleando 64 QAM para diferentes bandas de frecuencia (Metsälä and Salmelin, 2015).

Las razones pico pueden ser logradas únicamente bajo condiciones ideales de la interfaz de aire. Se necesita capacidad adicional para el tráfico de control, gestión y sincronización, este es pequeño frente al tráfico generado por usuarios.

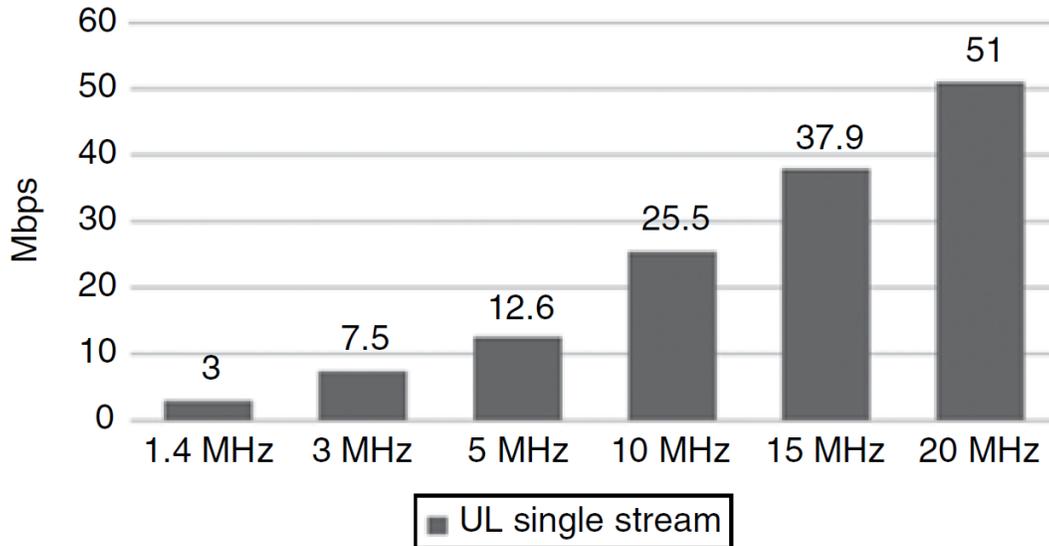


Figura 1.3. Capacidades pico de una eNB en el enlace ascendente empleando 16 QAM para diferentes bandas de frecuencia (Metsälä and Salmelin, 2015).

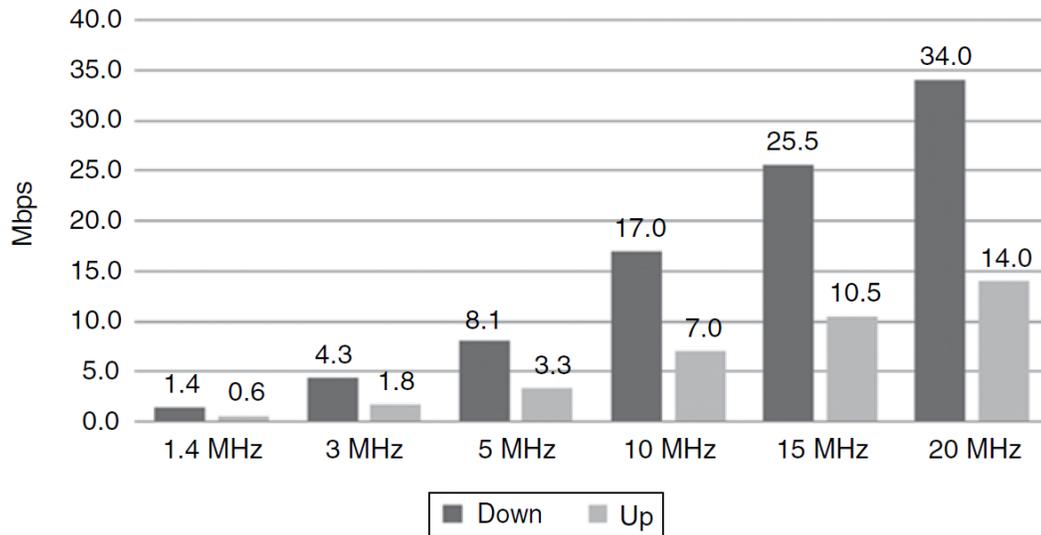


Figura 1.4. Capacidades promedio de una eNB para diferentes bandas de frecuencia (Metsälä and Salmelin, 2015).

### 1.5.2 Latencia

En adición al incremento de capacidad, la reducción de la latencia es uno de los principales objetivos en el despliegue de LTE. La contribución del *backhaul* al desempeño de extremo a extremo es bien significativa. No existen requerimientos estrictos para la latencia. Los

requerimientos de retardo para el *backhaul* dependen del retardo total de extremo a extremo de la aplicación (de usuario a usuario o de usuario a servidor de aplicaciones) así como el retardo calculado para el *backhaul*.

La tabla 1.2 brinda una visión general de los requerimientos de extremo a extremo y las recomendaciones típicas para una red de *backhaul* (incluyendo el núcleo IP). Los requerimientos de extremo a extremo de los planos de usuario y de control se derivan de (3GPP, 2012b). Los requerimientos del plano de gestión están basados en requerimientos típicos sistemas de gestión de la red.

Tabla 1.2. Requerimientos de retardo para los planos de LTE (Metsälä and Salmelin, 2015).

<b>Plano</b>	<b>Retardo de paquetes en un sentido</b>		<b>Variación del retardo de paquetes en un sentido</b>	
	Extremo a extremo	Recomendado para el <i>Backhaul</i>	Extremo a extremo	Recomendado para el <i>Backhaul</i>
<b>Plano de Usuario</b> (tiempo real)	50 ms	20 ms	10 ms	10 ms
<b>Plano de Usuario</b> (tiempo no real)	300 ms	20 ms	ninguno	ninguno
<b>Plano de Control</b>	100 ms	20 ms	ninguno	ninguno
<b>Plano de Gestión</b>		100 ms	ninguno	ninguno

Los valores mostrados en la tabla son límites superiores. En LTE el mejor tiempo de ida y vuelta (*RTT Round Trip Time*) que puede ser alcanzado entre el terminal del usuario y el Gateway del operador es de 10-20 ms. Esta demora no considera ningún retardo de *backhaul* o transporte. Asumiendo un retardo adicional en un solo sentido para el *backhaul* de 20 ms el RTT será incrementado hasta 50-60 ms siendo este valor suficiente para la mayoría de las aplicaciones. Para lograr 20 ms de RTT el retardo del *backhaul* en un sentido debe ser inferior a 5 ms.

El plano de control es el tráfico de control de cualquier aplicación extremo a extremo (como *VoLTE*) desde una perspectiva del eNB este tráfico es parte del tráfico de usuario de S1. El requerimiento para el plano de control de S1 es típicamente de la misma magnitud que para el plano de usuario (20 ms).

### **Retardo de X2**

Durante la recepción de una orden de *handover*, el acceso del terminal típicamente se tarda entre 20 y 30 ms, de acuerdo mediciones y pruebas realizadas. El retardo en un solo sentido de X2 entre una eNB y otra debe ser menor a 30 ms para que la red de transporte no introduzca demoras adicionales al procedimiento de *handover* entre estos (además de la demora de la interfaz de aire X2). Un retardo de X2 mayor a 30 ms puede causar la caída de la llamada o degradación de calidad de extremo a extremo desde una perspectiva del usuario.

Los requerimientos de retardo de X2 plantean interrogantes principalmente respecto a la ubicación de los enrutadores de acceso y, en el caso de *IPsec*, la ubicación de la puerta de entrada de seguridad (Bladsjö et al., 2013).

### **1.5.3 Disponibilidad**

Los requerimientos de disponibilidad de la red de *backhaul* están derivados de los requerimientos de servicio de los usuarios. Un requerimiento típico podría ser un valor de disponibilidad de 99.95%. En la mayoría de los casos la disponibilidad es dominada por el último salto en el acceso (Alliance, 2014).

### **1.5.4 Sincronización**

La tabla 1.3 ofrece una visión general de los requerimientos de sincronización para algunas funciones de LTE necesitan sincronización de fase, se ilustra el impacto de cada una de ellas.

Tabla 1.3. Requerimientos de sincronización de fase para funciones de LTE (Metsälä and Salmelin, 2015).

<b>3GPP Release</b>	<b>Funciones</b>	<b>Requerimientos de tiempo/fase</b>	<b>Comentarios</b>
<b>8</b>	Interfuncionamiento LTE-CDMA	10 $\mu$ s	
	Rechazo combinado a la interferencia	10 $\mu$ s	Depende de los requerimientos de ganancia
<b>9</b>	Servicio de difusión de multimedia	1 $\mu$ s en G.8271.1 5 $\mu$ s en simulaciones	
	Diferencia de tiempo observada de los arribos.	1 $\mu$ s	Depende de los requerimientos de precisión de ubicación
<b>10</b>	Coordinación mejorada de la interferencia entre celdas.	2.5 $\mu$ s – 10 $\mu$ s	Depende del radio de la celda

### 1.5.5 Seguridad

Debido a que los controladores (*RNC Radio Network Controller*) han sido eliminados de la arquitectura de red, es crucial el cifrado del tráfico entre las eNBs y el núcleo de la red (*EPC Evolved Packet Core*). De otra forma, este tráfico de usuario sería visible en la interfaz S1. Para lograr esto, se necesita de una puerta de entrada de seguridad (*SEG Security Gateway*) y una autoridad de certificación (*CA Certification Authority*). Depende de la implementación si estos son elementos dedicados de la red o están incluidos en otros elementos.

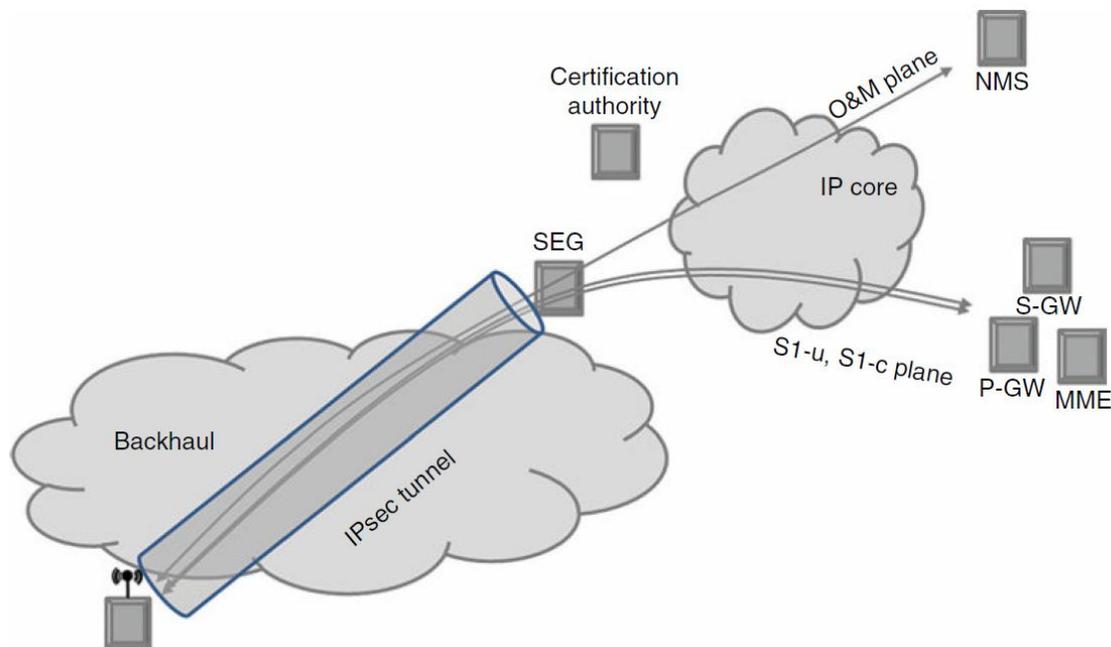


Figura 1.5. Arquitectura de seguridad (Metsälä and Salmelin, 2015).

La figura 1.5 ilustra un *SEG* y un *CA* y muestra el túnel *IPsec* para el plano *S1* (entre el eNB y el núcleo de la red) y el plano de gestión de operación y mantenimiento (*O&M Operation and Maintenance*). El plano de gestión también puede ser protegido por mecanismos de seguridad de la capa de transporte (*TLS transport layer security*). En el caso que la sincronización se provea con el protocolo de precisión de tiempo (*PTP Precision Time Protocol*), se pueden usar algunos mecanismos de seguridad incorporados del protocolo 1588v2. No se recomienda transportar los paquetes *PTP* en un túnel *IPsec*, porque este tiene cierto impacto en la variación del retardo (Metsälä and Salmelin, 2015).

## 1.6 Motivación para un *Backhaul* Inalámbrico

Las soluciones alámbricas para el *backhaul* han jugado un papel clave a lo largo de los años a causa de su alta confiabilidad, disponibilidad y razones de costos. En las redes heterogéneas, debido a la inclusión de las pequeñas celdas, se tiene que acceder a un nuevo tipo de sitios como lámparas, señales de tráfico o similares. También se necesita reducir mucho más los costos en comparación con las celdas macro (Forum, 2013). Estos desafíos en la implementación de soluciones alámbricas dan lugar a las alternativas del *backhaul* por microondas.

Los enlaces por microondas son una opción de bajo costo para el *backhaul* móvil, inclusive en la banda E de frecuencias. Pueden ser desplegados en cuestión de días y soportan hasta varias millas de alcance. Estos enlaces, debido a su ancho de banda y las posibilidades de funcionamiento en casos con o sin línea de vista, son adecuados para las topologías de malla o de anillo que se requieren en exteriores en el backhaul de LTE. El inconveniente es que las microondas requieren la obtención de una licencia, a menos que el enlace sea en banda E, donde los permisos y licencias son relativamente fáciles de obtener. Las altas frecuencias de dicha banda son vulnerables a los efectos atmosféricos y el desvanecimiento por lluvia, lo que puede atenuar la señal y limitar su alcance. La banda E está ganando popularidad como solución práctica por su gran ancho de banda y corta distancia de enlace, tal y como requieren las pequeñas celdas (Association, 2014).

Estas tecnologías están teniendo un rápido desarrollo con nuevas técnicas que buscan incrementar el ancho de banda del enlace, conseguir una mayor eficiencia espectral (mayor cantidad de bits por Hz) y un mayor *throughput* efectivo (más datos por bit). Algunas de estas técnicas se abordarán en el tercer capítulo y entre ellas se destacan:

- Modulación y Codificación Adaptativas (*Adaptive Coding and Modulation ACM*) ayuda a gestionar la modulación, codificación, y otros parámetros de señal y protocolo de las condiciones en el enlace de radio por microondas.
- MIMO: permite el uso de múltiples antenas en el transmisor y en el receptor para mejorar el desempeño de la comunicación.
- Modulaciones de mayor orden: 512 QAM o 1024 QAM
- Cancelación de interferencia de polarización cruzada (*XPIC Cross Polarization Interference Cancellation*) potencialmente puede duplicar la capacidad de un enlace de microondas sacando provecho de las polarizaciones ortogonales.

## CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍAS LTE Y LTE-A EN EL BACKHAUL.

En este capítulo, se abordan las características y arquitectura de LTE, así como las mejoras introducidas en LTE-A. Con LTE en el *backhaul*, varias áreas funcionales como la sincronización, calidad de servicio, y seguridad, por nombrar algunas, requieren un mayor análisis cuando se diseña una red de gran desempeño y bien protegida. A la vez, se brindan más posibilidades en cuanto a *handover*, control de la interferencia entre celdas macro y pequeñas celdas y otros aspectos de vital importancia para una red móvil heterogénea. Esto no significa que GSM y UMTS no sean aplicables, pero LTE ofrece mayores beneficios, especialmente para el funcionamiento de los enlaces de microondas, convirtiéndose en la tecnología ideal para este documento.

### 2.1 Características y Arquitectura de LTE

Los subscriptores móviles están demandando acceso confiable, sin fallas y a alta velocidad a los servicios de datos móviles, así como a un universo creciente de aplicaciones. Los operadores de redes móviles están tomando diferentes caminos en la evolución de sus redes para poder satisfacer esta demanda, pero en algún punto todos estos caminos coinciden en la inclusión de una red de acceso de radio con tecnología LTE complementada con pequeñas celdas. Para hacer posible esta evolución hacia una red heterogénea de LTE con pequeñas celdas se requiere un *backhaul* flexible que soporte una creciente demanda de capacidad en la red de acceso de radio y nuevas topologías de red, a la vez que minimice el costo total de inversión (Alcatel-Lucent, 2013).

Las especificaciones para el sistema LTE inicial, definido en el *Release 8* de la 3GPP, tienen la intención de optimizar el sistema para el incremento del tráfico de datos en comparación con 2G y 3G. La nueva tecnología de interfaz de aire con portadora única y ancho de banda

de hasta 20 MHz permite razones de datos de 50 Mbps en el enlace ascendente y 150 Mbps en el enlace descendente.

Respecto a los sistemas 3G y HSPA (*high speed packet access*), la arquitectura de radio fue simplificada ya que no se necesita un controlador de red de radio por separado. En su lugar la mayoría de sus funciones fueron integradas en la estación base, la cual es el único tipo de elemento de red dentro de la red de radio. La estación base eNB intercambia datos directamente con el núcleo de red y con otros nodos eNB, siendo ambas funciones diferentes de los sistemas 2G y 3G.

La escalabilidad también es integrada en la interfaz de aire, dado que ahora el ancho de banda de portadora puede variar de 1.4 MHz a 20 MHz.

Se abandona el núcleo de red de conmutación de circuitos y en su lugar el núcleo de red se basa completamente en IP y también se ha retirado la SS7 (sistema de señalización 7). Como el radio LTE no soporta los servicios de conmutación de circuitos, los servicios de voz tienen que ser implementados con *VoLTE*. Cabe señalar, que *VoLTE* introduce requisitos bien estrictos en cuanto a la latencia de paquetes IP a lo largo del *backhaul* que une la eNB y la puerta de entrada de seguridad (*SEG Security Gateway*) (Alcatel-Lucent, 2013).

Para el *backhaul*, todas las interfaces son basadas en el protocolo IP y no existen otras alternativas. La interfaz X2 entre los eNBs significa flujos de tráfico horizontal entre los mismos. Debido a restricciones de topología en la práctica, con frecuencia se sitúa en un punto central más alto en la red. Sin embargo, el tipo de tráfico de X2 entre estaciones base vecinas es nuevo comparado con 2G o 3G.

Los elementos de la red del *backhaul* son aquellos ubicados entre el eNB y el núcleo de red. Su propósito es simplemente proveer los servicios relevantes de extremo a extremo de una manera segura y eficiente en cuanto a costos (Metsälä and Salmelin, 2015).

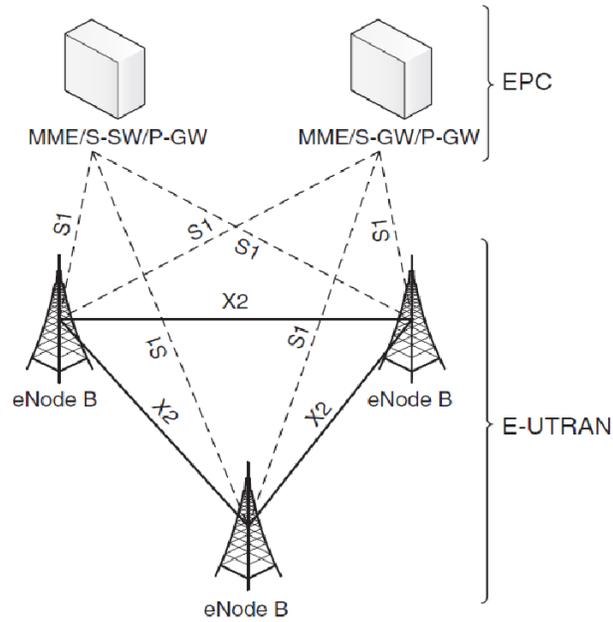


Figura. 2.1: Arquitectura de una RAN LTE.

### 2.1 Métodos de sincronización de LTE

Las redes móviles requieren una sincronización de red muy precisa. Sin ella la estación base y los dispositivos móviles pueden perder contacto y el *handover* entre celdas puede fallar, resultando en caídas de llamadas y la degradación de la calidad de experiencia del usuario. Para lograr esto se requiere que todos los elementos de red estén sincronizados con relojes de referencia primarios de alta precisión.

Las redes 2G y 3G se basan en tecnologías TDM (por ejemplo, SONET/SDH y PDH), las cuales tienen capacidad nativa para soportar una referencia de tiempo en la capa física para su señal de sincronización. Por otra parte, las redes basadas en paquetes en su totalidad, usan tecnología de transmisión basada en Ethernet y este estándar es muy flojo en sus requerimientos de sincronización. El *backhaul* móvil basado en paquetes requiere que se cumplan los estándares especificados en la Recomendación G.8262 (ITU-T, 2010). Dos métodos de sincronización son sugeridos en esta recomendación: IEEE 1588v2 y Ethernet Sincrónico (*Sync Ethernet*), cada una de ellas tiene sus propias ventajas y desventajas (Magee, 2010).

### 2.1.1 Protocolo 1588v2

Es un protocolo de precisión de tiempo (*PTP Precision Time Protocol*) basado en paquetes específicos transmitidos por un reloj maestro en un nodo hacia todos los nodos esclavos. El protocolo define un método de transportar el reloj maestro con la precisión de frecuencia requerida por las redes móviles. Son usados algoritmos locales adaptativos para recuperar la frecuencia del reloj maestro y amarrar el reloj del sistema local a ella. Este protocolo transfiere la información de frecuencia y de hora del día a través de la red. Dado que usa paquetes de tiempo, puede fácilmente transportar los parámetros del reloj maestro a los elementos sincrónicos de la red interconectados con las subredes de elementos asincrónicos que ahora participan en el protocolo. La desventaja es que al basarse en paquetes de tiempo, una red basada en 1588v2 requiere la aplicación estricta de QoS para garantizar la recepción oportuna de dichos paquetes de tiempo (Mochizuki and Hadzic, 2010).

### 2.1.2 Protocolo SyncE

El protocolo Ethernet Sincrónico está basado en la incorporación de un reloj preciso en la capa física de transmisión. El protocolo *SyncE* puede ser usado únicamente en el caso que el mismo se encuentre habilitado en todos los elementos de la red que participen en el *backhaul* móvil. Esto puede complicar la tarea de lograr interoperabilidad entre diferentes fabricantes, lo cual en este caso necesita que todos soporten *SyncE*. Es relativamente fácil de usar *SyncE* en una red de acceso basada en paquetes, la cual está limitada en el número de saltos.

La decisión de que método usar para la sincronización de la red depende del proveedor de servicios basándose en sus propios criterios. Los fabricantes de sistemas de *backhaul* móvil deben soportar ambos métodos (ITU-T, 2010).

## 2.2 Modulaciones usadas en LTE/LTE-A

LTE y LTE-A combinan esquemas de modulación, usando Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (*OFDMA Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) para el enlace descendente y Acceso Múltiple por División de Frecuencias con Portadora Única (*SC-FDMA Single Carrier Frequency Divison Multiple Access*) para el enlace ascendente.

### 2.2.1 Multiplexado por División de Frecuencias Ortogonales

OFDM divide el ancho de banda en sub partes estrechas ortogonales denominadas subportadoras. Un sub-canal es la agregación de un número de estas subportadoras. Las mismas incluyen portadoras de datos, pilotos y DC. La portadora de datos se utiliza para portar datos. Las portadoras de piloto se utilizan para el censado de canales y las de DC marcan el centro del canal. Cada sub-portadora es modulada mediante un esquema convencional tales como QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) o PSK (*Phase Shifting Key*) con una razón de símbolos baja. A cada usuario se le asigna un número entero de sub-canales los cuales están compuestos por un número de sub-portadoras. Los datos del usuario se envían en paralelo en cada sub-portadora a una razón baja. Las combinaciones de las sub-portadoras en paralelo en el destino proporcionan las razones de datos altas. Ya que la sub-portadora porta datos a baja velocidad y por tanto un tiempo de símbolo más alto, esta es más resistente a los efectos del multitrayecto haciéndola apropiada para tecnologías inalámbricas de acceso en amplias áreas sin visibilidad directa (figura 2.2) (Zaki, 2013).

La versión multiusuario de OFDM se le denomina Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (*OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) (Dahlman et al., 2010).

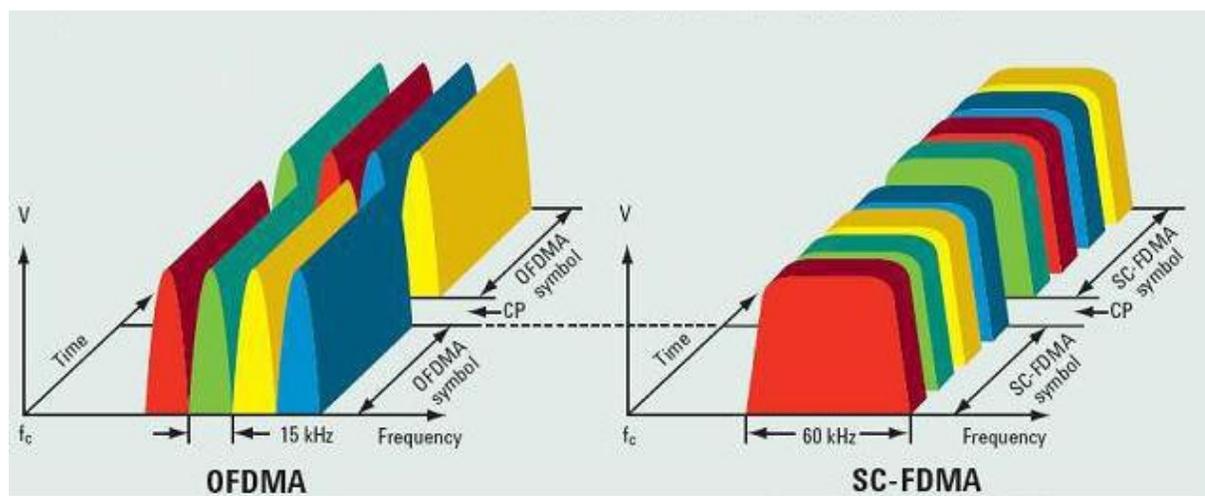


Figura 2.2. Estructura de modulación para el DL (OFDMA) y el UL (SC-FDMA) (3GPP, 2016).

### 2.2.2 Acceso Múltiple por División de Frecuencias con Portadora Única

La característica principal de SC-FDMA es que transmite cada símbolo de datos usando el ancho de banda completo que le es asignado, a diferencia de OFDMA donde cada símbolo de datos es transmitido usando varias subportadoras, como muestra la figura 2.2 SC-FDMA se seleccionó para el UL debido a que esta tiene ventajas similares a OFDMA tales como ortogonalidad entre usuarios, planificación (*scheduling*) en el dominio de la frecuencia y robustez con respecto a la operación en trayectos múltiples. Además SC-FDMA tiene un bajo requerimiento de *back-off*, que se traduce en la reducción de potencia de transmisión media para asegurar que la máxima potencia se quede dentro de la región lineal del amplificador de potencia, en comparación con OFDMA. Como resultado la potencia promedio de transmisión puede ser mucho mayor usando SC-FDMA de lo que puede esperarse con OFDMA. Esto aumenta la cobertura en el UL y proporciona altas razones de datos a los usuarios principalmente en el borde de la celda (Toskala, 2009).

### 2.3 Mejoras introducidas por LTE-A

Los objetivos de 3GPP para LTE avanzado (LTE-A) han sido el desarrollo adicional de LTE para cumplir los requisitos establecidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (*ITU International Telecommunication Union*) para las telecomunicaciones móviles internacionales avanzadas (*IMT-A International Mobile Telecommunications advanced*):

- Incremento del número de usuarios activos.
- Incremento de la razón de datos pico.
- Mayor eficiencia espectral.
- Mejor desempeño al borde de celdas.

Otros metas desde el punto de vista del operador móvil pueden incluir aspectos tales como:

- Adopción creciente de banda ancha móvil y mayor disponibilidad en términos de dispositivos.
- Mejoramiento de la cobertura (extendiéndose en más ubicaciones) e incremento en la intensidad del uso.
- Comunicaciones máquina a máquina.

LTE-A es posible mediante nuevas tecnologías y características y mejoras a las ya existentes como son agregación de portadora, MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), Coordinación Multipunto (*CoMP Coodinated Multipoint*) y Nodos de Repetición (Khandekar et al., 2010).

### 2.3.1 Agregación de Portadora

La agregación de portadora (*CA Carrier Agregation*) permite la combinación de hasta cinco portadoras compatibles, donde cada una tiene un ancho de banda desde 1.4 MHz hasta 20 MHz y se provee un máximo de 100 MHz de ancho de banda agregado, logrando además una eficiencia espectral casi tan alta y razones pico como las conseguidas con la asignación de una sola portadora. El principio de la agregación de portadora se muestra en la figura 2.3. Puede ser implementada ya sea intra-band (las portadoras componentes pertenecen a la misma banda de frecuencia de operación) o inter-band (las portadoras componentes pertenecen a diferentes bandas de operación)

Las posibilidades de CA de mejorar el *throughput* para un usuario en particular dependen del número de usuarios en la celda. Si el número de usuarios es bajo, el uso de múltiples portadoras provee una ganancia significativa del *throughput* dado que los recursos de radio pueden ser asignados a los usuarios con las condiciones de radio más favorables (tomando en cuenta las características de propagación de diferentes bandas de frecuencia). Por otra parte, el empleo de CA para un alto número de usuarios provee solamente ganancia circunstancial. En la figura 2.4 se presenta el impacto de la agregación de portadora como una función de la carga en la celda en ambas direcciones del enlace, ascendente y descendente (Metsälä and Salmelin, 2015).

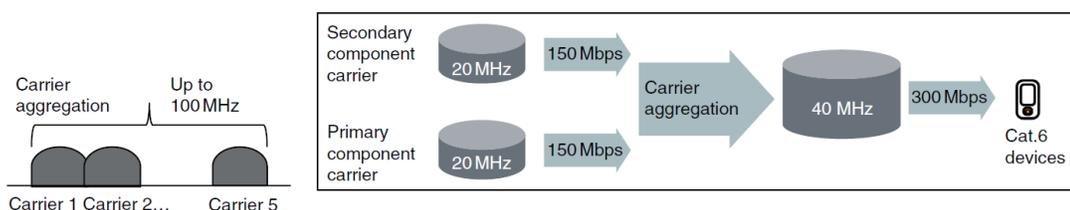


Figura 2.3. Principio de agregación de portadoras (Alcatel-Lucent, 2013)

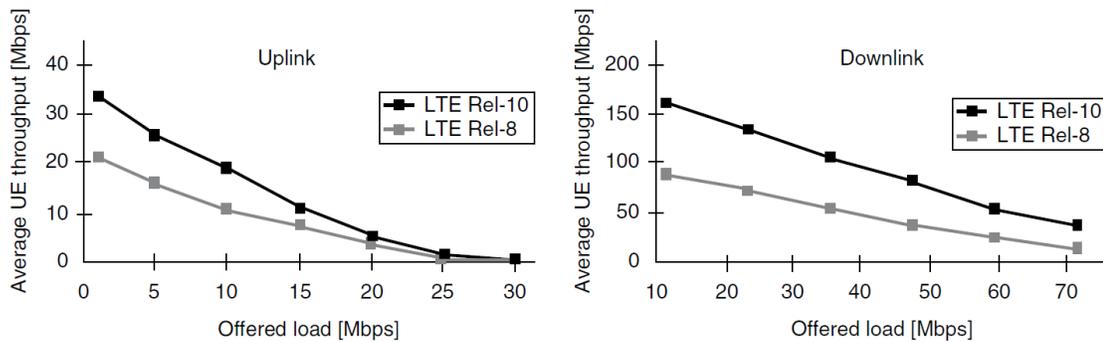


Figura 2.4. La agregación de portadoras mejora el *throughput* promedio de la celda en los enlaces ascendente y descendente (Networks, 2014).

### 2.3.2 MIMO

Una de las técnicas cruciales para el desarrollo de la cuarta generación de sistemas móviles han sido los arreglos de antenas, entre ellas está el uso de múltiples entradas y múltiples salidas (*MIMO, Multiple Input Multiple Output*). MIMO se utiliza para incrementar la razón de bit con la transmisión y recepción de múltiples y diferentes flujos de datos a través de múltiples antenas. MIMO proporciona diferentes flujos de datos con la misma frecuencia y en el mismo tiempo, estos flujos son separados con diferentes señales de referencia (Zhang and Zhou, 2013).

Esta tecnología de múltiples antenas incrementa exponencialmente la capacidad del canal en comparación con un sistema de una sola antena debido a la diversidad espacial que ofrece, siendo además una de las tecnologías más fuertes para soportar altas velocidades y altas capacidades en las nuevas generaciones de sistemas móviles (Hampton, 2013).

Las razones pico de transmisión de datos dependen del número de antenas en el transmisor y el receptor, el ancho de banda usado y la configuración de la parámetros de radio. Con MIMO se puede lograr una ganancia en el *throughput* promedio de la celda para el enlace descendente de hasta un 25%. En la figura 2.5 se presentan razones pico de datos que son logradas con diferentes configuraciones de antenas mediante MIMO.

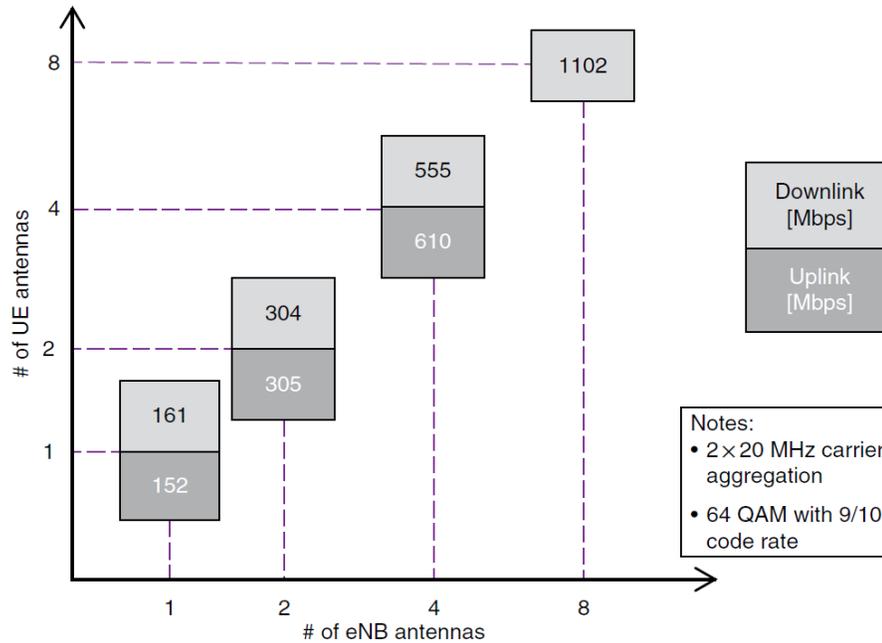


Figura 2.5. Razones pico de datos usando MIMO con diferentes configuraciones de antenas (Metsälä and Salmelin, 2015).

### Impacto de Agregación de Portadora y de MIMO en el *Backhaul*

Naturalmente, las mejoras en el *throughput* promedio de la celda para el DL y las razones pico más altas afectan la capacidad de *backhaul* requerida, pero no tendrá efecto en los requerimientos de sincronización o de demora. Sin embargo, se prefiere un tiempo de ida y vuelta (*RTT Round Trip Time*) más bajo para ser capaces de utilizar por completo las razones más altas de datos para usuarios en particular.

#### 2.3.3 Coordinación Multipunto

La existencia del desvanecimiento por multirayecto causado por los diferentes entornos de transmisión afecta el rendimiento de todas las comunicaciones inalámbricas. Para resolver este problema de forma eficaz los terminales móviles deberían tener arreglos de antenas, sin embargo esto en muchos casos sería impracticable, debido al tamaño físico de las antenas, el costo de fabricación y la complejidad del hardware de los dispositivos móviles. Para ello se ha propuesto usar técnicas de diversidad de espacio basadas en la comunicación colaborativa (Lee et al., 2012).

La coordinación multipunto permite la transmisión y recepción desde múltiples puntos de distribución de una manera coordinada. La razón principal de introducir *CoMP* es para mejorar el rendimiento de la red especialmente en el borde de la celda.

Basado en cómo la coordinación entre celdas comparte y transmite los datos a los usuarios, la tecnología *CoMP* se divide en dos categorías:

- 1- **Procesamiento Unido**, que a su vez se divide en **Transmisión Unida** (múltiples eNB envían datos simultáneamente a un único terminal utilizando la misma frecuencia) y **Selección Dinámica de celda** (un eNB está dinámicamente seleccionado para enviar datos a un terminal)
- 2- **Planificación Coordinada/Modificación del patrón** donde los datos están disponibles en más de un punto de distribución y se transmiten solamente desde un único punto de distribución en el momento, en este tipo de técnica, los puntos de distribución están conectados entre sí con el fin de intercambiar información (Zhang and Zhou, 2013).

### **Impacto de *CoMP* en el *Backhaul***

Para casi todo tipo de *CoMP*, se necesita sincronización en el dominio del tiempo para las celdas involucradas, pero en el caso de *CoMP* en el propio eNB eso es un requerimiento interno del mismo y no afecta ni es visible para el *backhaul*. No hay requerimientos específicos para la latencia del *backhaul*.

#### **2.3.4 Nodos de Repetición**

Los Nodos de Repetición (*RN Relaying Nodes*) proveen cobertura y capacidad mejoradas en el borde de las celdas y elevan la eficiencia espectral de todo el sistema. Los RN usan la interfaz de aire LTE-A y los recursos de radio son compartidos entre los RN y los terminales conectados directamente a la eNB macro. En la figura 2.6 se describe el principio de RN.

La ganancia más alta por RN es lograda en escenarios de cobertura limitada (por ejemplo en macro celdas) que sirven múltiples RN. En la figura 2.7 se presentan ejemplos de ganancia de desempeño para algunas configuraciones de RN como función del número de RN y la distancia entre los sitios.

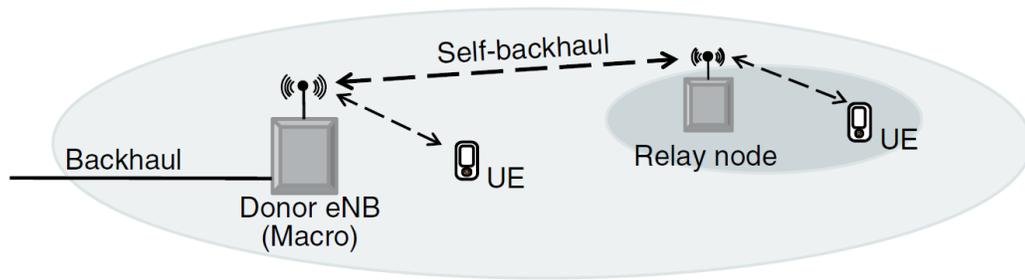


Figura 2.6. Principio de Nodos de Repetición (Metsälä and Salmelin, 2015).

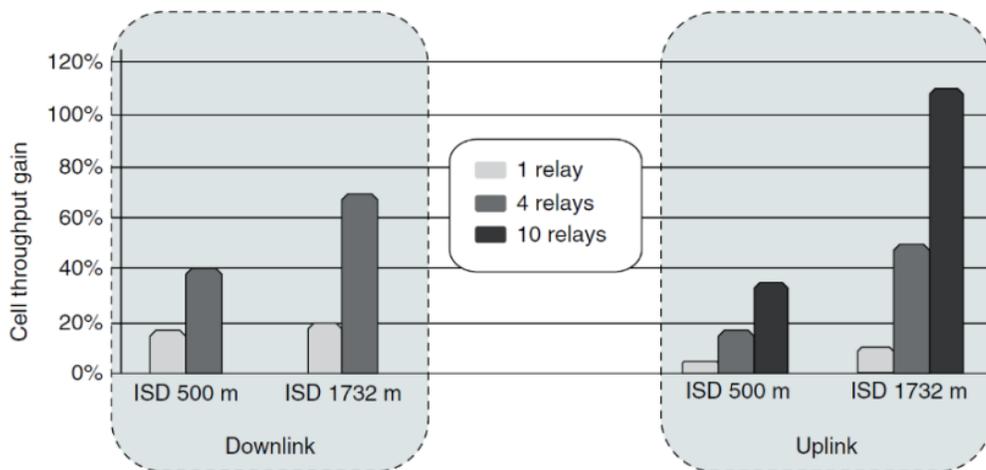


Figura 2.7. Ejemplos de ganancia en el *throughput* de la celda en algunos escenarios de RN (Networks, 2014).

### Impacto de los Nodos de Repetición en el *Backhaul*

Un desempeño general superior del sistema (ganancia del *throughput* promedio de la celda) hace que se requiera un mayor ancho de banda para el *backhaul* en la misma proporción. No hay efecto alguno en la sincronización de la eNB, sin embargo, el RN necesita ser capaz de sincronizar el terminal. La repetición incrementa el RTT total para los terminales bajo el RN, pero no de forma significativa.

## 2.4 Redes Auto-Organizadas

Las redes auto-organizadas (*SON Self-Organizing Networks*) se introducen como un concepto para la automatización de la planificación, administración, configuración, optimización y reparación en redes móviles. El empleo de dichas técnicas se debe a (Americas, 2009):

- Los sistemas fijos no pueden adaptarse a la naturaleza caótica del sistema móvil, debido a la movilidad de los usuarios y a las condiciones variables del canal inalámbrico. Esto conduce a estar por encima o por debajo en la utilización de los recursos inalámbricos bajo diferentes condiciones.
- Con el crecimiento y escalabilidad de las redes móviles, los métodos de optimización periódicos con el trabajo humano se vuelve ineficiente y propenso a errores, por lo que métodos autónomos pueden ayudar a disminuir la mano de obra humana y los gastos en operación.
- Con la introducción del concepto de redes heterogéneas, con los métodos de gestión tradicionales, sería imposible de gestionar los nodos de la red por su cantidad y diversidad de características. Especialmente, configurar y optimizar pequeñas celdas que no pueden ser gestionadas por el operador de red por su carácter privativo (solamente las operan los clientes).

En general una SON puede automáticamente extender, cambiar, configurar y optimizar su topología, cobertura, capacidad, tamaño de la celda y canal asignado, basado en cambios de localización, patrones de tráfico, interferencia y situación del entorno. SON ha sido diseñado para automáticamente configurar y optimizar la red LTE por auto-configuración, auto-optimización y auto-reparación (Peng et al., 2013).

Las funcionalidades de las redes auto-organizadas pueden encontrarse juntas o divididas y localizarse en diferentes nodos. Estas redes organizadas automáticamente pueden estar divididas en tres arquitecturas principales: SON Distribuido, SON Centralizado y SON Híbrido (Alliance, 2012). Las soluciones de SON pueden dividirse en tres categorías distintas: auto-configuración, auto-optimización y auto-reparación (Zhang and Zhou, 2013).

La optimización de la cobertura y capacidad se realiza a través de la toma de medidas de la red mediante el uso de herramientas de planificación y modelos teóricos de propagación.

El uso de esos modelos y herramienta permiten que los nodos de la red puedan cambiar su cobertura con el cambio de la potencia de transmisión o la configuración de las antenas, mientras los nodos incrementan su cobertura deben también tener en cuenta su capacidad y la interferencia con otras celdas vecinas.

Para reducir la interferencia y además minimizar la intervención manual humana en las tareas de optimización y administración de la red, SON se basa en la Coordinación de Interferencia entre Celdas (*ICIC Inter-Cell Interference Coordination*). La *ICIC* requiere que las celdas vecinas intercambien información sobre la parte del ancho de banda que ellas están usando. Estas celdas vecinas pueden coordinar que parte del ancho de banda están usando en cada celda y la potencia de transmisión entre varios bloques de frecuencia. La interferencia entre celdas puede ser reducida o evitada en ambos enlaces, ascendente y descendente por un uso coordinado de los recursos disponibles en las celdas relacionadas que conduzcan a mejorar la relación señal a ruido y el rendimiento correspondiente. Esta coordinación se realiza por la restricción y preferencia para el uso de recursos en las diferentes celdas, esto puede ser logrado por medio de los mecanismos *ICIC* (Huq et al., 2013). Por otra parte la capacidad podría ser mejorada si se desconectan aquellos eNB por ejemplo, que no son necesarios para el tráfico en cierto punto del tiempo cuando el usuario no está en casa. En este caso se espera que aumente la capacidad y calidad en el servicio mediante la readecuación de interferencia.

## CAPÍTULO 3. Microondas en el *Backhaul*

En el despliegue de un *backhaul* mediante microondas los operadores, como puede esperarse, tienen que obtener el espectro necesario y elegir las bandas de frecuencia y topología de red que mejor sirvan a sus necesidades. En este capítulo se explican consideraciones de este tipo y las principales características de las bandas de frecuencia utilizadas para este propósito. Finalmente se describen algunos avances en la transmisión por microondas y los beneficios derivados de estos.

### 3.1 Evolución del *Backhaul* Inalámbrico

Durante décadas las microondas han sido usadas en todos los niveles de las redes de transporte, para pequeñas y grandes distancias. En la era digital las principales estructuras de datos eran PDH y SDH, hoy es Ethernet. Las capacidades típicas solían ser entre 2 y 16 Mbps en la sección de acceso y 140 Mbps, STM-1 o incluso STM-4 en líneas troncales nacionales. Las instalaciones del *backbone* de la red eran enormes en tamaño: largos postes, grandes antenas parabólicas de disco y pesados equipos de radio de banda base en locales especiales climatizados.

En el nivel superior de las redes los radios están igualando a la fibra óptica debido al enorme incremento en sus razones de transmisión. Los sistemas inalámbricos de transporte tienen sus beneficios y son ampliamente usados en la parte de acceso de las redes de *backhaul*.

Debido a las crecientes razones de datos en LTE/LTE-A la distancia de los terminales a la estación base se reducirá. Se necesita mayor capacidad por kilómetro cuadrado, especialmente en áreas urbanas. Las altas capacidades de transporte son transmitidas hasta los edificios a través de la fibra óptica, pero no es factible hacerlo hasta cada pequeña celda. La capacidad de la tecnología de microondas está incrementando hasta 1 Gbps mientras las

ondas milimétricas ofrecen mayores anchos de bandas y la oportunidad de alcanzar hasta 10Gbps de capacidad en redes de radio (Salmelin and Metsälä, 2012).

### **3.2 Consideraciones para las Soluciones Inalámbricas del *Backhaul***

Diferentes soluciones inalámbricas han sido propuestas para el *backhaul* de pequeñas celdas. Las mismas pueden ser agrupadas en categorías generales con características muy similares, las cuales son, en cierta medida, dictadas por varias elecciones de diseños claves diferentes, como son:

1. Propagación con línea de vista (LOS) y sin línea de vista (NLOS).
2. Opciones de Licencias de Espectro. (de enlace, de área, ligera o excepción de licencia), y asignación dinámica.
3. Consideraciones de Topología (Punto a Punto, Punto a Multipunto, red de anillo y malla)

#### **3.2.1 Propagación *LoS* y *NLoS***

Históricamente la mayoría de los enlaces inalámbricos en el *backhaul* han sido con línea de vista *LoS* debido a las altas frecuencias empleadas así como a los patrones estrechos utilizados. En los últimos 10 años, los enlaces *NLoS* se han vuelto una solución viable, siendo especialmente ventajosos en el despliegue de pequeñas celdas por parte de los operadores en los próximos años.

- ***LoS***

Las soluciones por línea de vista tienden a operar en los rangos más elevados de microondas y ondas milimétricas. Además, poseen mayor ganancia de antena y patrones más estrechos respecto a los enlaces *NLoS*.

Una solución inalámbrica con línea de vista para el *backhaul* de pequeñas celdas requiere, como su nombre lo implica, una visibilidad directa y sin obstrucciones entre los transceptores en cada extremo del enlace. Un patrón altamente direccional transmite datos entre dos transceptores en una línea recta con poco o ningún desvanecimiento o interferencia por multitrayecto. Esto es un eficiente uso del espectro, ya que los múltiples transceptores de microondas pueden estar separados a pocos metros unos de otros y reusar la banda de

frecuencia para transmitir flujos de datos por separado. Esto es útil en áreas con una alta concentración de celdas.

El despliegue de enlaces *LoS* es más efectivo en algunas situaciones que en otras. Por ejemplo, un parque donde muchos árboles pudieran bloquear la línea de vista es una ubicación poco práctica para implementar un *backhaul LoS*. La inclinación y la oscilación de la estructura que soporta el transceptor también afectan al enlace y esto se agrava con frecuencias sobre los 18 GHz donde los patrones de las antenas son más estrechos. Esto preocupa a los operadores que desean apoyarse en estructuras como lámparas, señales de tráfico u otras que no fueron originalmente diseñadas para un *backhaul* por microondas.

Otro problema recae en el costo del *backhaul*, que puede ser considerable, especialmente para zonas metropolitanas de alto tráfico. Cada transceptor requiere un enlace Punto a MultiPunto y si se emplean conexiones en secuencia (*daisy chains*), el costo de *backhaul* se eleva rápidamente en comparación con *NLoS*. Por otra parte, las tecnologías *NLoS* pueden ser configuradas en un corto período de tiempo con menores costos de trabajo.

- *NLoS*

Los fabricantes con experiencia en tecnología OFDM están ofreciendo productos basados en la misma con optimizaciones del propietario para el *backhaul NLoS*. Puede usarse el área de cobertura para el despliegue de pequeñas celdas repitiendo la información de regreso a la estación base que provee cobertura. Se deben situar dentro del rango de la unidad de *backhaul* de radio. Los sistemas *NLoS* usando OFDM presentan un nivel de tolerancia al desvanecimiento por multitrayecto y otros deterioros del canal inalámbrico que no son posible con sistemas *LoS*.

La principal ventaja de la tecnología *NLoS* es que una sola estación base puede proveer cobertura para varias pequeñas celdas dentro del área de cobertura. Los sistemas *NLoS* también evitan la necesidad de un camino sin obstrucciones entre los transceptores, haciendo esto extremadamente provechoso para futuros planes y mejoras. Las soluciones *NLoS* son más fáciles de planear y más convenientes de desplegar que aquellas con *LoS*.

Las soluciones de *backhaul NLoS* también limitan el espectro. En ciertas áreas, el planeamiento de las frecuencias tiene que ser coordinado para evitar producir demasiada

interferencia. Adicionalmente, si las soluciones usan frecuencias sin licencia, estas necesitarían ser coordinadas para evitar interferencia con otros sitios que utilizan la misma banda del espectro. Conociendo el ritmo actual de crecimiento en el uso de datos, cada bit de espectro utilizable que pueda conectar un usuario móvil a internet debe y será usado con este propósito. La conectividad de usuarios usa muchas de las mejores frecuencias *NLoS* y usar estas frecuencias para el *backhaul* podría plantear un problema (Ericsson, 2013).

### 3.2.2 Topología

Cuando se trata de desplegar enlaces inalámbricos en el *backhaul*, los operadores tradicionalmente se deciden por soluciones Punto a Punto aunque en los últimos años es más frecuente el uso de la opción Punto (Tipmongkolsilp et al., 2011).

- **Punto a MultiPunto**

En un arreglo Punto a Multipunto (*PmP Point to Multipoint*) un concentrador central enlaza varias pequeñas celdas. Este usa típicamente antenas de múltiple sector para que los enlaces puedan ser mantenidos con un número de pequeñas celdas que rodean el sitio de forma que el ancho de banda del transceptor es compartido con las celdas. En un despliegue Punto a Multipunto, un único punto de acceso en un lado del enlace se configura para cubrir un sector que se extiende hasta 90 grados en una dirección y por consiguiente, abarcar un área que puede contener múltiples eNB. En esta topología, para cada N enlaces de microondas, se necesitan N+1 radios (ver figura 3.1), representando un ahorro en las inversiones en el despliegue de la red respecto a topologías Punto a Punto y también un ahorro en los gastos de operación, dado que añadir un eNB solamente requiere un radio para establecer el enlace con la consecuente reducción en tiempo de configuración.

La tecnología Punto a Multipunto es desplegada mayormente en áreas urbanas de alta densidad. Los enlaces de microondas Punto a Multipunto requieren antenas de menor tamaño que los sistemas Punto a Punto y reducen los pagos por el espectro porque la misma frecuencia puede ser usada para varios enlaces, por lo que son rápidos de desplegar y eficientes en cuanto a costos. Los operadores están considerando cada vez más las redes Punto a Multipunto para el *backhaul* en sus sitios con mucho tráfico celular en entornos urbanos debido a sus ventajas para pequeñas celdas (Lee et al., 2012).

- **Punto a Punto**

En contraste, las topologías Punto a Punto (*PtP Point to Point*) son típicamente *LoS* con antenas altamente direccionales en cada extremo del enlace y donde cada pequeña celda puede acceder al ancho de banda total del enlace. Requieren hardware de transceptor a cada lado del enlace. Cuando se compara a la conexión de N pequeñas celdas en la capa de acceso del *backhaul*, un arreglo Punto a Punto resultaría en el doble de transceptores para un sitio, es decir 2N transceptores por enlace (ver figura 3.1). Las conexiones Punto a Punto serían costosas para esta configuración, incrementando el costo de un enlace de *backhaul*, pero ofreciendo mayor ancho de banda a la pequeña celda. Dado que cada enlace precisa su propia antena en cada extremo, el sitio puede ser concurrido con muchas antenas.

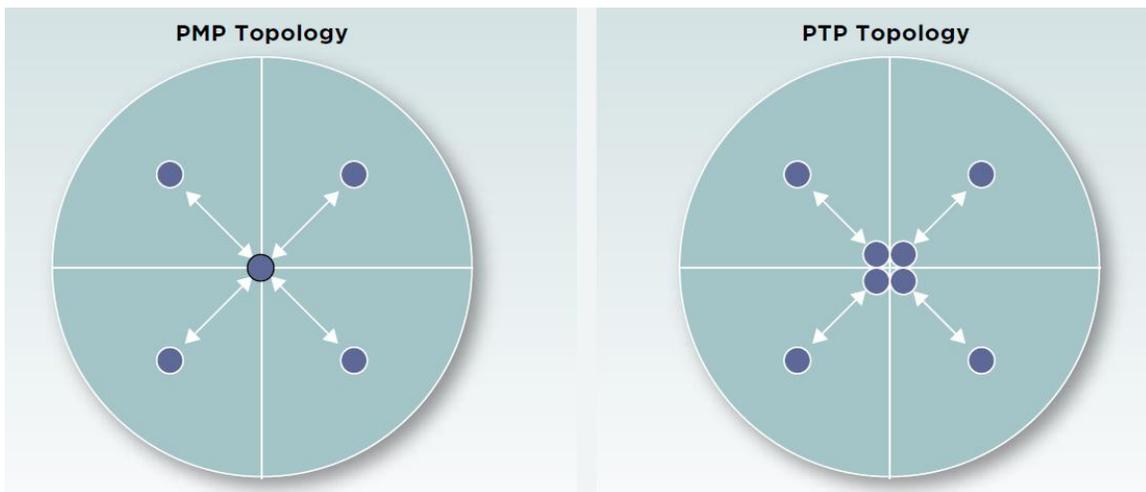


Figura 3.1. Topología Punto a Multipunto y topología Punto a Punto

Combinando estos arreglos (*PtP* y *PmP*) se pueden crear arreglos más complejos. En cadenas o en arreglos de árbol, los enlaces *PtP* son interconectados con tráfico combinado con cada pequeña celda consecutiva. Esto es usado en diseños *PtP* para extender una rama e incrementar la distancia desde una estación base.

La capacidad de este tipo de *backhaul* debe ser adecuadamente dimensionada teniendo en cuenta la cantidad de celdas, las que deben ser soportadas, quizás como en el caso de arreglos de red de anillo, brindando enlaces redundantes para asegurar la resistencia a las interrupciones de enlace (Tipmongkolsilp et al., 2011).

- **Red de Anillo**

Una topología de anillo, como el nombre sugiere, se construye a partir de una cadena de enlaces Punto a Punto que forma un círculo. Una de las desventajas de un anillo es que precisa de muchos saltos de radio para alcanzar una pequeña celda distante, lo que degrada la latencia. Incrementar la capacidad del anillo para un incremento de la demanda puede ser caro ya que cada nodo debe recibir una actualización similar. Una forma de incrementar la capacidad de un anillo es mediante la interconexión de cada nodo transformándose en una red de malla.

- **Red de Malla**

En una red de malla, la cercanía de las celdas vecinas permite interconectarlas y crear una red fuertemente entrelazada y resistente al haber muchos enlaces redundantes que brindan varios caminos entre los nodos.

Las redes de malla **dentro de banda** usan las frecuencias licenciadas de la red de acceso de radio de 2G, 3G o 4G/LTE. Muchos operadores no consideran que un *backhaul* dentro de banda sea favorable porque ocupa el espectro con licencias muy caras, resultando en una pérdida de capacidad en áreas metropolitanas y urbanas de alta densidad, una situación que las pequeñas celdas tratan de evitar (Tipmongkolsilp et al., 2011).

### 3.2.3 Opciones de Licencia de Espectro

El uso de un espectro inalámbrico está sujeto a un marco de regulaciones tanto nacionales como internacionales. Ciertos aspectos están armonizados al nivel regional, pero son los reguladores nacionales (o entidades gubernamentales) las que definen las reglas mediante las cuales el espectro debe atenderse dentro de sus respectivas jurisdicciones. Quizás la más significativa de estas reglas son aquellas que abarcan cuando una licencia es necesaria para transmitir a una banda de frecuencias dada y cuando esta licencia autoriza al operador a desplegar una red de transmisores en un área o si está restringido a un simple enlace (Forum, 2013). Existen cinco modelos de licencia (Association, 2014):

- Licencia de Enlace
- Licencia por Bloque de Espectro
- Licencia Ligera

- Licencia Compartida
- Exento de Licencia

**Licencia de Enlace:**

Este método ha sido la vía tradicional para las licencias del espectro del *backhaul* móvil. Es efectivo para conexiones Punto a Punto del *backhaul*. Los despliegues con antenas dirigidas y patrones de radiación estrechos favorecen el reuso de frecuencias. La duración de las licencias brindada por el regulador es típicamente un año, esto se traduce en un espectro barato. Sin embargo, el operador puede verse forzado a adquirir *hardware* de enlace microondas con configuraciones para diferentes bandas de frecuencias, lo que puede impactar el costo de los equipos. Este modelo de licencias usa el espectro de forma eficiente.

**Licencia por Bloque de Espectro:**

Este enfoque puede ser usado por los operadores para enlaces Punto a Punto, aunque también se vienen usando cada vez más para enlaces Punto a Multipunto. La asignación de bloques de espectro da al operador más seguridad de operación. Los reguladores tendrían que asegurarse de la necesidad sustancial por parte del operador para el bloque de espectro. Principalmente, el operador necesitaría demostrar que planea conectar un número de sitios de celdas macro y de pequeñas celdas con servicios Punto a Multipunto. El costo de la licencia puede ser mucho mayor que el caso de licencia de enlace y la rapidez en obtenerla puede ser una molestia en el despliegue (Coldrey et al., 2014).

**Licencia Ligera:**

En este enfoque, se paga una tarifa menor por una licencia no exclusiva. Luego se paga una tarifa adicional por cada enlace de *backhaul* desplegado. El operador debe identificar todos los transmisores de *backhaul* y efectuar un análisis de interferencias para evaluar la probabilidad de afectar cualquier usuario en la vecindad. Si se llegara a interferir con algún operador con esta misma licencia, tendrían que resolver esto entre ambos operadores. Este modelo tiene un despliegue relativamente rápido y se espera sea usado más frecuente por parte de los reguladores. Los operadores están entusiasmados con este modelo de licencias, especialmente si hay un bajo riesgo de interferencia.

**Licencia compartida:**

En muchos aspectos, el régimen de licencia compartida es una variante del régimen de licencia ligera. Se han reducido los requerimientos administrativos, pero existe un requerimiento explícito de compartir un bloque del espectro con uno o más participantes. En este método las frecuencias de microondas para el *backhaul* no son exclusivas para ningún operador y deben ser compartidas otorgando mayores privilegios a los primeros en desplegar en una ubicación específica. A los operadores les preocupa la implementación de un *backhaul* bajo este régimen debido a sus requerimientos de alta calidad de servicio.

**Exentos de Licencia:**

Históricamente, los operadores siempre han tenido sus reservas sobre el espectro sin licencias, debido a las bandas para Wi-Fi. La necesidad de razones estables de datos, baja latencia y capacidad versátil dejan la opción de usar las bandas exentas de licencia de 2.4 GHz y 5 GHz como último recurso. Existe una amenaza considerable de pérdida de conexión porque el ruido puede enmascarar las transmisiones del operador. Sin embargo, como no se requiere de licencias se logra reducir el peso administrativo. Su rápido despliegue y la asignación del espectro en las bandas de 50 GHz y 60 GHz están ayudando a rescatar este modelo. Se depende en gran medida de la topología, la proximidad, siendo de gran ayuda un diálogo abierto entre los operadores para identificar las fuentes de interferencia y así mitigarla. En este modelo usualmente le son otorgados mayores privilegios a los operadores que primero despliegan sus enlaces de *backhaul* (Association, 2014).

**3.3 Bandas del Espectro para el *Backhaul***

Además de la variedad de soluciones técnicas para el *backhaul*, los operadores también tienen un número de bandas del espectro para establecer enlaces inalámbricos. El *backhaul* inalámbrico en la actualidad es desplegado en las bandas sub-6 GHz (con y sin licencia), 6-42 GHz, 60 GHz (banda V) y 70/80 GHz (banda E).

A continuación, se analizarán las características de las bandas del espectro usadas para el *backhaul* inalámbrico.

### 3.3.1 Banda Sub-6 GHz con licencia

Cuando es considerado el *backhaul* de las pequeñas celdas, con frecuencia los operadores escogen el espectro licenciado por dos razones importantes. Primeramente mantener la calidad de servicio desde el núcleo hasta el usuario. La segunda razón es evitar interferencias externas y permitir así el crecimiento de una red de *backhaul* de alta capacidad.

#### **Espectro:**

Las bandas de frecuencia licenciadas por debajo de 6 GHz varían por zona geográfica. Algunas de ellas están totalmente ocupadas por servicios de acceso móvil. Sin embargo, muchas están subutilizadas. Estas incluyen frecuencias sobre 3 GHz las cuales, debido a mayores pérdidas de propagación, no son las óptimas para la conectividad móvil a los terminales. Estas frecuencias son ideales para aplicaciones de *backhaul NLoS* hasta las pequeñas celdas. El uso de antenas altamente direccionales, sincronización en toda la red y algoritmos sofisticados permite una alta eficiencia espectral y un factor de reuso de frecuencias de  $n=1$ . Esto usualmente duplica o triplica la capacidad en comparación con antenas omnidireccionales.

#### **Capacidad:**

El espectro sub-6 GHz ofrece la oportunidad de manejar los niveles de interferencia para equilibrar altos esquemas de modulación y codificación tales como 256 QAM (hasta 1024 QAM). En adición, sus características de propagación *NLoS* permiten el uso de técnicas de multiplexación espacial como MIMO. Las soluciones que usan 256 QAM y 2x2 MIMO alcanzan 14/b/s/Hz. Las que combinan 1024 QAM con 4x4 MIMO, llegan hasta 35/b/s/Hz. Estos valores igualan las capacidades de TCP/IP de 170 Mbps y 425 Mbps respectivamente cuando se trabaja en un canal TDD de 20 MHz (Forum, 2013).

#### **Latencia:**

Los sistemas de *backhaul* diseñados para el espectro licenciado sub-6 GHz son en su mayoría Punto a Multipunto, donde la planificación del tráfico es coordinada. En tales sistemas, la latencia es dominada por las estructuras de interfaz de aire y los algoritmos de planificación. Una latencia entre 5 ms y 12 ms en un solo sentido es un valor típico en las soluciones de hoy en día. Debe ser notado que la latencia y calidad de servicio están muy vinculadas. No

todo el tráfico requiere la mínima latencia y la capacidad general de la red incrementa si los servicios de tiempo real son gestionados de forma diferente al tráfico para el que la latencia no es un punto crítico. La planificación consciente de la latencia es una función clave para despliegues de sistemas que den soporte al *backhaul*. Una integración precisa del *backhaul* con la calidad de servicio del acceso es crítica para asegurar el éxito de los servicios de tiempo real (Su and Chang, 2013).

### **Cobertura:**

El espectro sub-6 GHz brinda los medios para lograr una cobertura confiable tanto *NLoS* como *LoS* entre los nodos de la red. Los sistemas de *backhaul* para pequeñas celdas que usan este espectro probablemente serán desplegados para cubrir un área específica en lugar de nodo por nodo.

Dos modelos básicos para el despliegue son posibles dependiendo de si los puntos de agregación o puntos de presencia de la red están al nivel de la calle o encima de este en el lugar de las celdas macro existentes. Si están al nivel de la calle, se usa un *backhaul NLoS* entre postes adyacentes donde estén ubicadas las pequeñas celdas. Esto ayuda a hacer frente al desorden local como pueden ser árboles. Si estos puntos se encuentran elevados, el *backhaul* a desplegar sería de cobertura Punto a Multipunto. Estos modelos resultan en distancias de enlaces del *backhaul* muy diferentes, o espaciamiento entre los puntos de presencia (Forum, 2013).

### **3.3.2 Banda Sub-6 GHz sin licencia**

Uno de los principales atractivos de los despliegues en espectros que no precisan licencia es que no se enfrentan costos por adelantado ni plazos de entrega como en el espectro licenciado. Los costos de preparar, mantener y archivar solicitudes de licencia no son necesarios. Esto puede ser útil cuando hay poco tiempo pero los mismos atributos pueden representar una desventaja si demasiados usuarios en la misma vecindad intentan sacar provecho de ellos.

Otros beneficios incluyen la flexibilidad brindada en la selección de la tecnología. Los requerimientos son generalmente bastante flexibles en relación al uso del espectro, en términos de parámetros tales como modo modulación/codificación, ancho de banda y cifrado.

La potencia radiada y otros aspectos son más restringidos, aunque con frecuencia deben ser controlados no debido a regulaciones sino porque el mismo espectro de *backhaul* puede ser usado como el medio de acceso (Wi-Fi por ejemplo). Si el *backhaul* interfiere no intencionadamente con el acceso, o viceversa, la solución compartirá ancho de banda con las redes vecinas.

La cantidad de espectro continuo disponible en el espacio sin licencia también es un punto atractivo. Pueden desplegarse enlaces con 40 MHz de ancho de canal e incluso mayores. En cambio, con bandas licenciadas en frecuencias portadoras similares no se dispone de suficiente ancho de canal o su costo es excesivo. Esto ocurre especialmente en enlaces Punto a Punto con patrones de antena relativamente estrechos, donde la probabilidad de interferencia es reducida. Sin embargo, el espectro licenciado, una vez asegurado, tiende a permanecer despejado (Abinader et al., 2014).

**Capacidad:**

Las capacidades efectivas para las soluciones que funcionan por debajo de 6 GHz van desde decenas de Mbps hasta cientos de Mbps. Estas soluciones comúnmente tienen un *throughput* asimétrico, con un radio determinado por el operador o de forma dinámica de acuerdo a las demandas de tráfico. De ahí que especificar un *throughput* conjunto refleja la capacidad del enlace, sin importar el llenado de datos del sistema.

**Latencia:**

Los sistemas FDD (*Frequency Division Duplex*) brindan una latencia mucho más baja con menor *jitter* ya que su modo de operación *full-duplex* es libre de retardo, el cual es más común en tecnologías *half-duplex*. Existen muchos subsistemas que basados en TDD. Sistemas TDD de un solo salto pueden experimentar de 2 a 20 ms de latencia con un grado variable de *jitter*, dependiendo de la implementación (Forum, 2013).

**Cobertura:**

La mayoría de las tecnologías desplegadas con espectro sin licencia se basan en protocolos de contención. Esto posibilita un mayor grado de interoperabilidad y coexistencia entre radios que compiten por el mismo canal. Por supuesto, si hay dos operadores diferentes

interfiriendo uno al otro, ambos deberían identificar esta condición durante la puesta en marcha y cambiar de sintonía para mejorar su desempeño (Ghebretensaé et al., 2012).

Los operadores deben asegurarse de que el *backhaul* no interfiera con el acceso cuando las bandas se superponen. Existen varios mecanismos para aliviar esta situación como el control del ancho del patrón por medios lógicos o mecánicos. Sin embargo, la manera más fácil de evitar interferencia es no superponer las bandas de acceso y de *backhaul*.

### 3.3.3 Banda 6-42 GHz

Este rango de frecuencias ha sido empleado para proveer enlaces de comunicación de alta capacidad por muchas décadas. Es ampliamente usado en el *backhaul* de las celdas macro.

#### **Capacidad:**

Los equipos de microondas de hoy en día pueden transmitir sobre múltiples canales adyacentes de hasta 56 MHz y en algunas regiones ha sido posible alcanzar los 112 MHz. Estos equipos emplean modulaciones de 256, 512 y 1024 QAM, esta última consiguiendo una eficiencia espectral de 9 bps/Hz cuando es combinada con la codificación apropiada (Hansryd and Edstam, 2011).

Es posible duplicar la eficiencia espectral con MIMO usando antenas separadas espacialmente en un enlace *LoS*. Combinando esto con XPIC se alcanza una eficiencia espectral de 36 bps/Hz. Ericsson logró una capacidad de enlace de 1 Gbps sobre un canal de 28 MHz como se muestra en la figura 3.2.

#### **Latencia:**

La propagación de microondas a través del aire es cerca del 50 % más rápida que la propagación de la luz a través de la fibra óptica. Sin embargo, esta diferencia ronda los 3  $\mu$ s por milla, no siendo significativa para los enlaces cortos usados para el *backhaul* de las pequeñas celdas. El retardo de paquetes está determinado por el intervalo de tiempo de transmisión (*TTI transmission time interval*) de la interfaz de aire. Para un tamaño de bloque de transporte dado (lo que determina los beneficios de la codificación de canal), mayor ancho de banda para los canales y mayor eficiencia espectral hacen posible un *TTI* mucho más bajo en las microondas que los usados por tecnologías de la RAN como son LTE o *WiMAX*. El

*RTT* que se busca en la red de acceso de radio de LTE es de 10 ms, mientras que las microondas muestran menos de 1ms por salto.

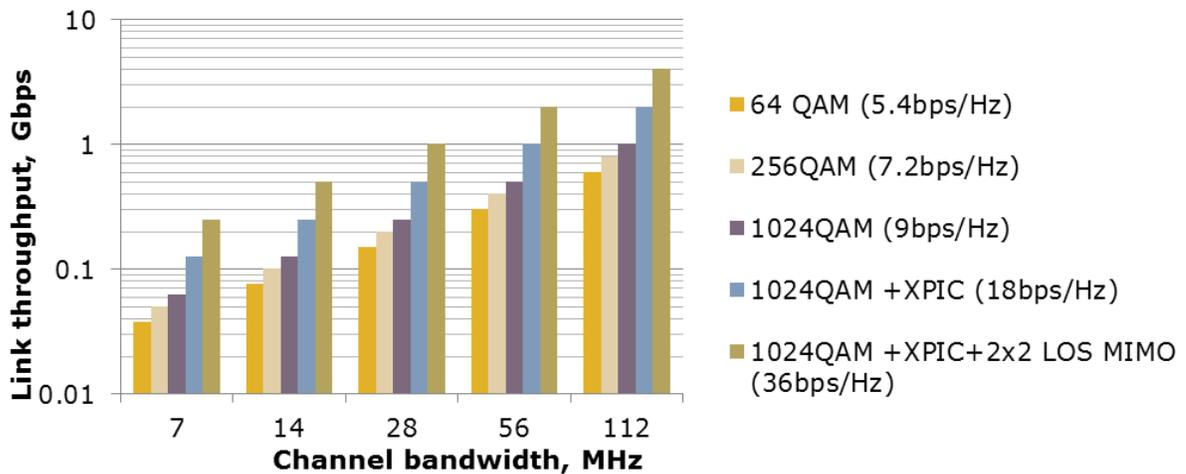


Figura 3.2. Capacidad de un enlace de microondas para combinaciones de tamaño del canal y eficiencia espectral (Hansryd and Edstam, 2011).

### Cobertura:

La cobertura está disponible para los sitios de pequeñas celdas con una línea de vista hacia un concentrador del *backhaul*. Por ende, la ubicación y el número de concentradores dictan el nivel de cobertura. La propagación con línea de vista funciona bien en lugares urbanos flanqueados por edificios donde pueden ser cubiertos muchos sitios en una calle desde un concentrador situado en un extremo. Las distancias de enlace varían con la frecuencia portadora. Debería ser notado que la ganancia más baja de la antena de patrón ancho usada por enlaces del tipo Punto a Multipunto reduce ligeramente el alcance (Hoadley and Maveddat, 2012).

### 3.3.4 Bandas de 60 GHz y 70- 80 GHz

Las frecuencias de ondas milimétricas en los rangos de 60 GHz y de 70 a 80 GHz están ganando prominencia en el *backhaul* de redes móviles. Existen varias razones para ello.

### Capacidad

Primeramente, los requerimientos de capacidad y alcance para el *backhaul* inalámbrico están cambiando, con una creciente densificación de la red de acceso de radio. Las capacidades están aumentando mientras que las distancias de transmisión están disminuyendo. Esto

sucede especialmente en áreas urbanas donde las celdas macro pueden estar separadas a menos de 500 m y donde se espera que las pequeñas celdas sean colocadas a 50 m unas de otras (Hur et al., 2013).

A la misma vez, las capacidades por celda también están en crecimiento. Un índice de referencia de diseño muy común para el diseño de una actual es lograr razones pico de hasta 1 Gbps en el *backhaul* para una celda macro y hasta 100 Mbps si este conecta a una pequeña celda, como preparación para LTE. (Forum, 2013). Las características de propagación en estas frecuencias, posteriormente conocidas como la banda E, se ajusta perfectamente a esta evolución del *backhaul* hacia enlaces de alta capacidad y corto alcance.

Las ondas milimétricas disponen de una gran reserva de canales de banda ancha para alcanzar la capacidad requerida usando configuraciones simples de un solo canal. Esta simplicidad en el diseño le proporciona a esta tecnología una ventaja potencial en el costo por bit para el *backhaul* de gran capacidad.

#### **Cobertura:**

La transmisión a través de ondas milimétricas se ve afectada por la atenuación atmosférica a un grado más elevado que en frecuencias menores. La transmisión a 60 GHz es atenuada en mayor medida, dándose para esta un alcance práctico de 1 km. De 70 GHz a 80 GHz se logra una distancia de enlace de algunos kilómetros dependiendo de la incidencia de la lluvia en la región y en el factor de disponibilidad deseado.

La transmisión en esta banda, acarrea un bajo riesgo de interferencia ya que se usan antenas de patrón estrecho y altamente directivas en el extremo de cada enlace, sin reflexión o penetración a través de obstáculos tales como edificios y vegetación.

Además, atendiendo a las regulaciones locales, existen hasta 9 GHz de espectro disponible en la banda de 60GHz, desde 4 hasta 9GHz contiguos de ancho de banda exento de licencia y dos bloques de espectro 71-76 GHz y 81-86 en la banda de 70-80 GHz dentro de la categoría licencia ligera.

Estos bloques de espectro disponibles pueden acomodar despliegues de redes bien densas aunque los equipos a esas frecuencias usan canales anchos de transmisión (de 50 hasta 1000 MHz, dependiendo del fabricante). En comparación, los canales por debajo de 6 GHz

(típicamente de 10 a 40 MHz) y de 6-42 GHz (oscilan entre 3.5MHz y 56MHz) están muy congestionados, muy regulados o ambos. Por esto es que las tecnologías de ondas milimétricas tienen una clara ventaja en términos de costo del espectro y la disponibilidad del mismo.

El principal inconveniente en la banda de 60 GHz es que se requiere una línea visual clara y sin obstrucciones entre la pequeña celda y su puerta de entrada al *backhaul*. Las tecnologías de ondas milimétricas se ajustan bien a los requerimientos de un *backhaul* inalámbrico que soporta LTE, con alta capacidad y alta densidad celular.

### 3.3.5 Comparación entre las Bandas del Espectro.

Hasta aquí se han visto las bandas de frecuencia utilizadas por los operadores hoy en día, se ofrece la tabla 3.1 donde se resumen las principales características de cada una de ellas para una mejor comparación.

Tabla 3.1. Comparación entre las bandas del espectro para el *backhaul*

<b>Características/Bandas de Frecuencia</b>	<b>Sub-6GHz sin licencia</b>	<b>Sub-6GHz con licencia</b>	<b>Banda de 6-42 GHz</b>	<b>Banda V (60 GHz)</b>	<b>Banda E (70/80 GHz)</b>
<b>Capacidad</b>	150- 450 Mbps	170 Mbps (20 MHz TDD)	1 Gbps +	7 Gbps +	10 Gbps +
<b>Latencia</b>	<10ms	5 ms/salto	<1 ms/salto	< 200 $\mu$ s 40-50 $\mu$ s/salto	65-350 $\mu$ s/salto
<b>Cobertura</b>	< 250m	< 50 Km	5-30 Km	< 1 Km	< 3 Km
<b>Topología</b>	NLoS	NLoS	LoS	LoS	LoS
<b>Instalación</b>	PmP	PmP	PmP, PtP	PtP	PtP

### 3.3.6 Escenarios para las Bandas del Espectro

#### Banda Sub 6 GHz

Los casos de uso de este espectro para el *backhaul* son por lo general *NLoS*. Tienen menor capacidad que las soluciones de *backhaul* de microondas *LoS* pero su cobertura es bastante mayor. Las tecnologías *NLoS* se ajustan bien al *backhaul* de pequeñas celdas, donde los puntos pueden estar encima de un tren en movimiento, por citar un ejemplo. En este caso, conviene aplicar técnicas de movilidad para brindar una conexión continua al *backhaul*.

#### Banda 6-42 GHz

Esta tecnología brinda alta capacidad de *backhaul* a través de enlaces con línea de vista. Los enlaces Punto a Multipunto son más adecuadas para los casos donde no se busque mejorar la capacidad donde los sitios de pequeñas celdas pueden ser afectados por la disponibilidad de una línea de vista. Los enlaces Punto a Punto con mayor alcance pueden ser apropiados para enlaces en exteriores en la media milla del *backhaul* donde se requiere una mayor capacidad para agregar muchos sitios de pequeñas celdas (Forum, 2013).

#### Bandas 60 y 70-80 GHz

El pequeño tamaño de los equipos es uno de los requerimientos claves para el entorno de pequeñas celdas. Las dimensiones de la antena tienden a ser un factor determinante en el tamaño físico del equipo. En comparación con 70-80 GHz, la banda de 60 GHz tiene menos restricciones de ingeniería debido a las antenas más pequeñas y los menores costos de producción. Esto último convierte a 60 GHz en una banda adecuada para enlaces entre una calle y una azotea u otra calle. Por otro lado, la banda 70-80 GHz se ajusta más a la conectividad entre azoteas. Esto también se debe al alcance inherente al enlace, 60 GHz tiene menor rango y es apropiada para conectarse a pequeñas celdas mientras la banda E puede llegar más lejos y es conveniente para la agregación de pequeñas celdas existentes en las azoteas o nuevas celdas macro (Forum, 2013).

La banda de 60 GHz es una buena elección para conectar dichas celdas a la puerta de entrada de su *backhaul*, los que pueden estar situados en celdas macro o quizás en un punto de agregación.

La figura 3.3 ilustra los escenarios donde se usan dichas bandas de frecuencia, obedeciendo a los valores de desempeño y cobertura que se logran.

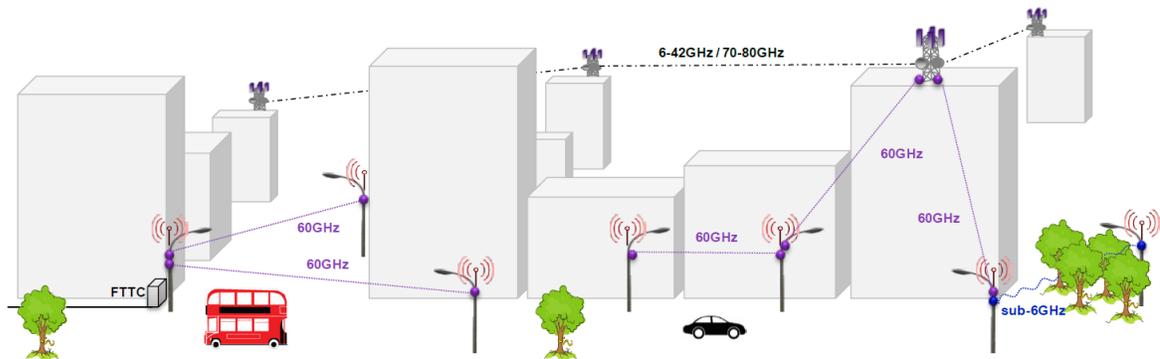


Figura 3.3. Escenarios para el uso de las diferentes bandas del espectro.

### 3.4 Avances tecnológicos de las microondas actuales

#### 3.4.1 Compresión inteligente del encabezado

Hasta hace poco, carecían de importancia las comparaciones del rendimiento logrado por diferentes fabricantes de sistemas microondas. Estas variaciones se debían generalmente a la eficiencia de la modulación usada y la reducción del encabezado de radio transmitido. Cualquier diferencia en el *throughput* de dos fabricantes probablemente se debía a que presentaban su *throughput* de paquetes de Ethernet de forma diferente, uno reflejaba su razón de *throughput* de Capa 1 y el otro su razón de *throughput* de Capa 2 (Alcatel-Lucent, 2014).

La compresión inteligente de encabezado incrementa el *throughput* de paquetes Ethernet para alcanzar capacidades más allá de 1 Gb/s. Esta tecnología hace que finalmente tenga sentido comparar el *throughput* de diferentes fabricantes.

La industria de microondas ha adoptado códigos con encabezados en el rango de 5 a 15%. Mientras códigos de corrección de errores, como LDPC sean más eficientes que otros, el impacto en el *throughput* general siempre debe ser considerado. Con la corrección de error, unos 200 Mb/s se traducen en, dependiendo del código empleado, unos 180 Mb/s en términos de capacidad neta (los bits que son enviados por el usuario antes de que sean afectados por el código).

Con la tecnología de multiplexación por división en el tiempo (TDM), el *throughput* de sistemas diferentes de radio depende de cuántos E1s, DS1s y STM1s son transportados. Con Ethernet, se debe hablar de *throughput* Ethernet, el que depende del tamaño del paquete y de si el *throughput* es calculado en Capa 1 o en Capa 2.

En un sistema Ethernet el desempeño máximo es igual a la razón de datos (por ejemplo 100 Mbps). Sin embargo, este desempeño no puede ser alcanzado debido al tamaño de la trama. Tramas más pequeñas tienen un menor desempeño que tramas más largas. Esto es porque se añaden los bytes del preámbulo y del espacio entre tramas (*IFG Interframe Gap*). Estos bytes no cuentan como *throughput* de datos. La tabla 3.2 contiene el máximo desempeño que puede ser logrado en un sistema de 100 Mbps para varios tamaños de trama.

Tabla 3.2: Razones para varios tamaños de la trama Ethernet.

Tamaño de la trama	Razones de datos
64 bytes	76.19 Mbps
128 bytes	84.49 Mbps
256 bytes	92.75 Mbps
1024 bytes	98.08 Mbps
1518 bytes	98.69 Mbps
1522 bytes	98.70 Mbps

En sistemas de radio de Capa 2, los bytes de preámbulo y de IFG son removidos del flujo de datos y no se transmiten sobre el enlace de radio. En la interfaz de red de recepción, el equipo de radio reinserta estos bytes en el flujo de datos. En la Capa 1, los bytes de preámbulo y IFG se incluyen cuando se expresa el *throughput*, por tanto parece que la capacidad Ethernet es mayor de lo que es en realidad.

A la vez que los proveedores de servicio migran a LTE, se vuelve crucial la elección de sistemas de *backhaul* que pueda acomodar más bits por segundo en el aire. LTE usa direcciones IPv6 que ocupa unos 32 bytes adicionales de capacidad debido al encabezado.

Este encabezado debe ser encapsulado en la carga útil de Ethernet, reduciendo la eficiencia cuando se transportan paquetes multi-protocolo de corta longitud.

La compresión inteligente de encabezado reduce el encabezado de protocolo. El tamaño del encabezado que se comprime es constante mientras que la carga útil del paquete es variable, a mayor compresión mayor capacidad de carga útil.

La compresión del encabezado es más beneficiosa cuando la red está transportando pequeños paquetes y cuando son usados los protocolos IPv4 o IPv6. Es por ello, que es particularmente útil en el *backhaul* móvil donde son comunes los pequeños paquetes.

Para aprovechar estas ganancias, los proveedores de servicio deberían buscar sistemas de microondas que combinen corrección de errores LDPC con compresión inteligente de encabezado. Los códigos de corrección de errores LDPC permiten a los proveedores alcanzar el *throughput* máximo cerca del límite de Shannon en un canal dado (Alcatel-Lucent, 2014).

### **3.4.2 Técnicas para mejorar la eficiencia espectral.**

Optimizar el uso del espectro y lograr la transmisión con el menor costo posible por bit son prioridades para los operadores de servicio. De acuerdo a las regulaciones en las telecomunicaciones, un enlace de microondas Punto a Punto implementado por un operador está confinado a un tamaño de canal asignado o ancho de banda de canal por el que paga una tarifa de acuerdo a la licencia acordada. Para incrementar la capacidad un operador puede solicitar permiso para el uso de espectro RF adicional, pero esto incurre en más costos. Además, en muchos casos, este espectro a ser añadido no se encuentra disponible. Últimamente, en aras de lograr ganancias de capacidad dentro del tamaño del canal asignado, pero sin incurrir en más costos por licencias del espectro, se requieren algunas técnicas avanzadas de comunicación.

Para elevar la eficiencia espectral e incrementar el *throughput* del sistema sin usar más espectro de radio son usadas tres técnicas comunes:

- **Modulación Adaptativa**

Cambia dinámicamente la constelación de la modulación para lograr un máximo *throughput* bajo diversas condiciones del clima y diferentes márgenes de enlace. Hay dos beneficios de la modulación adaptativa: el primero es mantener la calidad de servicio asegurando el

funcionamiento del enlace de radio en condiciones desfavorables del clima; el segundo, lograr el mayor *throughput* en un canal de ancho de banda limitado. Según el teorema clásico de Shannon, la capacidad de un canal de comunicación está definida por la relación señal a ruido (SNR) y la potencia de transmisión.

La modulación adaptativa usa el plan del teorema de Shannon para optimizar la utilización del espectro. En clima despejado cuando la SNR del enlace es alta, la eficiencia espectral y el *throughput* son incrementados mediante el empleo de constelaciones densas tales como 256 QAM, 1024 QAM o incluso 4096 QAM. Si el clima es desfavorable y la SNR se degrada, la modulación puede ser disminuida a 16 QAM o incluso QPSK para asegurar el funcionamiento del enlace para datos de alta prioridad pero a un *throughput* reducido.

El cambio a constelaciones más densas de QAM produce un punto de disminución en las ganancias en términos de aumento del *throughput* contra aumento del costo, potencia de transmisión utilizada y mayor rango dinámico. Con cada incremento en la densidad de QAM, (por ejemplo 64 QAM, 128 QAM, 256 QAM) se necesita un aumento de 3 dB o 4 dB de la SNR o la potencia del transmisor. Por otra parte, con el mismo incremento en la densidad de QAM el *throughput* solamente mejora un 10 %. Como resultado, se precisan otros medios para mejorar de manera sustancial la eficiencia espectral y lograr una mayor capacidad.

- **Doble Polarización**

La doble polarización (*CCDP Co-Channel Dual Polarization*) utiliza la cancelación de interferencia de polarización cruzada (XPIC) para duplicar la capacidad del enlace sobre el mismo canal. CCDP-XPIC permite la transmisión simultánea de flujos separados de datos sobre la misma frecuencia. Los datos son transmitidos sobre polarizaciones ortogonales de las antenas (vertical y horizontal) y la interferencia de polarización cruzada es cancelada usando procesamiento digital de señales.

- **Multiplexación Espacial**

Mejora de forma significativa la eficiencia espectral. Usa antenas de múltiples entradas múltiples salidas (MIMO) para enviar múltiples flujos de datos sobre el mismo canal de RF. Un enlace con MIMO 2x2 puede duplicar su capacidad. La multiplexación espacial con MIMO, usada en muchas aplicaciones inalámbricas incluyendo el acceso LTE, se apoya en

la interferencia del multitrayecto y saca provecho de los caminos de propagación causados por las reflexiones. Hay una pequeña complicación. La naturaleza de un enlace de microondas *LoS* no presenta multitrayecto, de ahí que esas condiciones sean simuladas por una separación intencional en las antenas, creando un pseudo multitrayecto.

Combinando la modulación adaptativa con CCDP y técnicas MIMO resultará en ganancias considerables de la capacidad, pero siempre hay que hacer algunas compensaciones. Un radio con MIMO 2x2 necesita 2 transmisores y 2 receptores con cada uno dedicado a una sola antena. Un radio con CCDP también precisa estos 2 transceptores, uno dedicado a cada polarización de antena. Sin embargo, empleando un arreglo MIMO 2x2 con CCDP requiere 4 transceptores. Este incremento a razón de 4 en la densidad del canal RF entrega un beneficio mayor: un incremento de 4 veces en el *throughput* del enlace sin usar espectro adicional. Cuando se salda el ciclo de utilidad de los equipos, el costo extra de hardware de radio adicional es compensado por considerables ahorros en tarifas anuales para la licencia del espectro (Anzaldo, 2015).

### **3.4.3 Microondas *Full Duplex* dentro de la Banda**

La transmisión de microondas en modo *full duplex* sobre una misma frecuencia (*M-IFD Microwave In-band Full-Duplex*) puede ser aplicada a las bandas de frecuencia de 6-42 GHz, banda V de 60 GHz y banda E de 80 GHz. Si el transmisor y el receptor en el mismo extremo transmiten y reciben señales de forma simultánea en la misma frecuencia en la comunicación por microondas, el transmisor causa severa interferencia co-canal. Esta es mucho mayor que la fuerza de señal recibida en el receptor, el cual, como resultado, no puede recibir la señal de forma apropiada.

En modo *duplex* por división de tiempo (*TDD Time Division Duplex*), las señales son transmitidas y recibidas en la misma frecuencia; sin embargo, el transmisor y el receptor trabajarán de forma alterna para evitar interferencia co-canal. En modo FDD, las señales son transmitidas y recibidas a la par, pero a diferentes frecuencias.

M-IFD cancela la interferencia co-canal y permite al transmisor y receptor trabajar de forma simultánea a la misma frecuencia. En comparación con la tecnología *full duplex*, M-IFD duplica la razón de interfaz de aire en el mismo ancho de banda, o ahorra el 50% del espectro logrando la misma razón que TDD y FDD. Para duplicar la capacidad de las microondas,

M-IFD puede aplicar adelantos tecnológicos existentes tales como modulación de mayor orden, MIMO, compresión de la trama del encabezado, cancelación de interferencia de polarización cruzada (XPIC) y agregación de enlace (Team, 2015).

### **Tecnologías clave de M-IFD**

Los equipos de microondas se caracterizan por alta potencia de transmisión, modulación superior y transmisión a larga distancia. Estos rasgos plantean grandes desafíos para M-IFD; por ejemplo, las señales con alta potencia de transmisión pueden causar gran auto interferencia en el receptor.

En el caso de la transmisión a larga distancia, la interferencia puede ser causada por obstáculos en el camino y la reflexión en el sitio. Por otra parte, el incremento de bandas de frecuencia y anchos de banda puede provocar el deterioro de indicadores del desempeño tales como el ruido de fase, lo que se añade a las dificultades al implementar M-IFD.

M-IFD adopta las siguientes tecnologías para superar estos desafíos y mejorar el desempeño del sistema:

**Mejora del aislamiento:** En el mismo equipo donde el transmisor y el receptor trabajan a la misma frecuencia, la auto interferencia co-canal ocurre entre estos así como entre las antenas. En el diseño del circuito de entrada de RF se puede perfeccionar el aislamiento entre el transmisor y el receptor separando uno del otro, añadiendo conexiones de tierra alrededor de los cables de señal e incrementando la distancia entre los canales para transmitir y para recibir. En el diseño de la antena, el aislamiento puede lograrse mediante la adición de estructuras de supresión de interferencia del campo cercano, o usando materiales absorbentes.

**Cancelación de auto interferencia cercana:** Debido a que el aislamiento logrado en el diseño del circuito y la antena es limitado, se requiere de cancelación de interferencia cercana (Near-SIC Near end Self-Interference Cancellation) para reducir aún más dicha interferencia a través de las siguientes funciones:

- Cancelación de interferencia de RF: Algunas señales transmitidas son acopladas desde el transmisor hasta el extremo receptor. Basadas en la amplitud, fase y retardo de las señales acopladas, se generan las señales de cancelación. Su

amplitud y retardo son iguales a los de las señales interferentes, pero su fase difiere en 180 grados.

- **Cancelación de interferencia en banda base:** Cancela la auto interferencia cercana residual en señales digitales en banda base. El algoritmo en banda base digital estima la señal de interferencia y reconstruye las señales de cancelación de interferencia para cancelar la interferencia residual.

**Cancelación de auto interferencia lejana:** La auto interferencia lejana puede ser generada en cualquier lugar del camino de transmisión de la señal. Por ende, generalmente contiene múltiples señales con diferentes retardos. Las señales de auto interferencia lejana pueden ser procesadas únicamente en banda base digital. Se pueden usar múltiples algoritmos de cancelación de interferencia paralela, optimizando la velocidad de procesamiento y ahorrando recursos lógicos. Estos algoritmos soportan un amplio rango de retardos.

**La supresión del ruido de fase:** El ruido de fase en las microondas se incrementa con la frecuencia y afecta el desempeño de los algoritmos de cancelación de interferencia en banda base y los algoritmos de demodulación. El ruido de fase en las señales recibidas puede ser limitado usando el algoritmo de supresión de ruido de fase. El ruido del sistema puede reducirse mediante la optimización el diseño del circuito de hardware. En adición, el ruido de fase de las señales interferentes puede ser reducido efectivamente configurando el mismo oscilador local para transmisor y receptor.

**La mejora de la precisión en la sincronización:** Cuando el equipo de microondas demodula la señal recibida, restaura los símbolos del reloj de sincronización de la señal para asegurar el muestreo de las señales. Sin embargo, en M-IFD, la potencia de las señales interferentes y la de señales deseadas son similares, dificultando esto el proceso. Durante el comienzo del procesamiento de las señales digitales se emplea la ecualización adaptativa para cancelar la interferencia antes de la sincronización, lo que resulta en una mejora de la precisión y reducción del ruido.

M-IFD incrementa la capacidad de transmisión del enlace de microondas, simplifica la gestión, mejora la utilización de frecuencias, permite la configuración flexible de la red y perfecciona otros aspectos.

En conclusión, M-IFD incrementa la capacidad de los enlaces de microondas, optimiza los recursos del espectro e incrementa la capacidad de la red, reduce significativamente los gastos de operación, convirtiéndose en una de las principales tendencias en el despliegue de redes de microondas.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

En el presente proyecto se logró realizar un estudio sobre el uso de microondas en el *backhaul* de las redes móviles heterogéneas en diferentes escenarios brindándole una especial atención a las tecnologías de acceso por radio LTE y LTE-A en diversas bandas del espectro. Se logró un documento integrador para la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, con la orientación del personal de ETECSA.

Teniendo en cuenta todo el desarrollo de la tesis se puede arribar a las siguientes conclusiones:

- 1- Las redes heterogéneas resuelven las demandas de capacidad en la actualidad, pero introducen un nuevo desafío que constituye lograr un *backhaul* para acceder a las pequeñas celdas que sea eficiente en cuanto a costo y soporte el tráfico esperado. Este acceso puede perfectamente lograrse mediante las microondas.
- 2- Las características de las tecnologías de acceso LTE y LTE-A, las sitúan como ideales para redes heterogéneas, siendo las que mayor desarrollo han alcanzado para este tipo de redes y las que mejor compatibilidad poseen con los nuevos servicios.
- 3- Existen varias bandas del espectro disponibles para el despliegue de un *backhaul* mediante microondas en redes heterogéneas. La elección de una u otra banda está condicionada por el entorno, el presupuesto disponible para su implementación, así como la capacidad y el alcance requeridos.
- 4- Los adelantos tecnológicos en las microondas actuales incrementan la capacidad de los enlaces y optimizan los recursos del espectro significando esto un menor costo para los operadores de redes móviles.

**Recomendaciones**

A pesar de haber cumplido los objetivos trazados se pueden hacer unas recomendaciones para trabajos futuros:

- 1 Realizar algunas simulaciones para recrear mediante *software* la transmisión en la banda E de frecuencias en lugares no expuestos a precipitaciones.
- 2 Profundizar en la viabilidad del despliegue de enlaces por microondas en diferentes entornos de nuestro país, atendiendo a un cúmulo de factores determinantes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3GPP 2012a. LTE-Advanced 3GPP Solution for IMT-Advanced.

3GPP 2012b. TS 23.203.

3GPP. 2016. Available: <http://www.3gpp.org/>.

ABINADER, F. M., ALMEIDA, E. P., CHAVES, F. S., CAVALCANTE, A. M., VIEIRA, R. D., PAIVA, R. C., SOBRINHO, A. M., CHOUDHURY, S., TUOMAALA, E. & DOPPLER, K. 2014. Enabling the coexistence of LTE and Wi-Fi in unlicensed bands. *IEEE Communications Magazine*, 52, 54-61.

ALCATEL-LUCENT 2013. Microwave Backhaul for Long Term Evolution. 1-4.

ALCATEL-LUCENT 2014. Modern microwave: Enhancing capacity to keep up with demand.

ALCATEL 2012. A New Era of Mobile Backhaul. 4-7.

ALLIANCE, N. 2012. Small cell backhaul requirements. *white paper, June*.

ALLIANCE, N. 2014. Backhaul Provisioning for LTE-Advanced & Small Cells. Dec.

AMERICAS, G. 2009. The benefits of SON in LTE: self-optimizing and self-organizing networks. *White paper*.

ANZALDO, D. 2015. Backhaul Alternatives for HetNet Small Cells,.

ASSOCIATION, G. 2014. Wireless Backhaul Spectrum Policy Recommendations & Analysis.

BLADSJÖ, D., HOGAN, M. & RUFFINI, S. 2013. Synchronization aspects in LTE small cells. *IEEE Communications Magazine*, 51, 70-77.

COLDREY, M., ENGSTRÖM, U., HELMERSSON, K. W., HASHEMI, M., MANHOLM, L. & WALLENTIN, P. 2014. Wireless backhaul in future heterogeneous networks. *Ericsson Review*, 91.

DAHLMAN, E., PARKVALL, S., SKOLD, J. & BEMING, P. 2010. *3G evolution: HSPA and LTE for mobile broadband*, Academic press.

ERICSSON 2013. Non-line-of-sight microwave backhaul for small cells.

ERICSSON 2014a. Ericsson Mobility Report.

- ERICSSON 2014b. It all comes back to backhaul.
- FORUM, S. C. 2013. Backhaul technologies for small cells: Use cases, requirements and solutions.
- GHEBRETENSAÉ, Z., LARAQUI, K., DAHLFORT, S., PONZINI, F., GIORGI, L., STRACCA, S., CHEN, J., LI, Y., HANSRYD, J. & PRATT, A. R. Transmission solutions and architectures for heterogeneous networks built as C-RANs. Communications and Networking in China (CHINACOM), 2012 7th International ICST Conference on, 2012. IEEE, 748-752.
- HAMPTON, J. R. 2013. *Introduction to MIMO communications*, Cambridge university press.
- HANSRYD, J. & EDSTAM, J. 2011. Microwave capacity evolution. *Ericsson review*, 1, 22-27.
- HOADLEY, J. & MAVEDDAT, P. 2012. Enabling small cell deployment with HetNet. *IEEE Wireless Communications*, 19, 4-5.
- HU, R. Q. & QIAN, Y. 2013. *Heterogeneous cellular networks*, John Wiley & Sons.
- HUQ, K. M. S., MUMTAZ, S., ALAM, M., RODRIGUEZ, J. & AGUIAR, R. L. Frequency allocation for hetnet comp: Energy efficiency analysis. Wireless Communication Systems (ISWCS 2013), Proceedings of the Tenth International Symposium on, 2013. VDE, 1-5.
- HUR, S., KIM, T., LOVE, D. J., KROGMEIER, J. V., THOMAS, T. A. & GHOSH, A. 2013. Millimeter Wave Beamforming for Wireless Backhaul and Access in Small Cell Networks. *IEEE Trans. Communications*, 61, 4391-4403.
- ITU-T 2010. G.8262/Y.1362.
- KHANDEKAR, A., BHUSHAN, N., TINGFANG, J. & VANGHI, V. LTE-advanced: Heterogeneous networks. Wireless Conference (EW), 2010 European, 2010. IEEE, 978-982.
- LANDSTROM, S., FURUSKÄR, A., JOHANSSON, K., FALCONETTI, L. & KRONESTEDT, F. 2011. Heterogeneous networks—increasing cellular capacity. *Jour. Ericson Review*, 89, 4-9.
- LEE, D., SEO, H., CLERCKX, B., HARDOUIN, E., MAZZARESE, D., NAGATA, S. & SAYANA, K. 2012. Coordinated multipoint transmission and reception in LTE-advanced: deployment scenarios and operational challenges. *IEEE Communications Magazine*, 50.
- MAGEE, A. 2010. Synchronization in next-generation mobile backhaul networks. *IEEE Communications Magazine*, 48.
- METSÄLÄ, E. & SALMELIN, J. 2015. *LTE Backhaul: Planning and Optimization*, John Wiley & Sons.
- MOCHIZUKI, B. & HADZIC, I. 2010. Improving IEEE 1588v2 clock performance through controlled packet departures. *IEEE Communications Letters*, 14.
- NETWORKS, N. 2014. LTE-Advanced White Paper.

- PENG, M., LIANG, D., WEI, Y., LI, J. & CHEN, H.-H. 2013. Self-configuration and self-optimization in LTE-advanced heterogeneous networks. *IEEE Communications Magazine*, 51, 36-45.
- QUINTANA, F. Z. 2016. Redes heterogéneas y virtualización para incrementar la capacidad de las redes móviles. *Revista Telemática*, 15, 47-61.
- QUTQUT, M. H. 2014. *Mobile small cells in cellular heterogeneous networks*. Queen's University.
- SALMELIN, J. & METSÄLÄ, E. 2012. *Mobile Backhaul*, John Wiley & Sons.
- SU, X. & CHANG, K. A comparative study on wireless backhaul solutions for beyond 4G network. Information Networking (ICOIN), 2013 International Conference on, 2013. IEEE, 505-510.
- TIPMONGKOLSILP, O., ZAGHLOUL, S. & JUKAN, A. 2011. The evolution of cellular backhaul technologies: Current issues and future trends. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 13, 97-113.
- TOSKALA, H. H. A. A. 2009. LTE for UMTS –OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access.
- ZAKI, Y. 2013. Long term evolution (LTE). *Future Mobile Communications*, 13-33.
- ZHANG, X. & ZHOU, X. 2013. *LTE-advanced air interface technology*, CRC Press.