

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION CON MENCIÓN EN  
REDES DE COMUNICACIÓN**

**PERFIL DEL TRABAJO PREVIO LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

**MÁSTER EN REDES DE COMUNICACIÓN**

**TEMA:**

**“ANÁLISIS Y ESTUDIO DE UN FRONTHAULING ÓPTICO PARA REDES 5G  
BASADO EN MICRO-CELDA COMPARANDO SU RENDIMIENTO Y  
COSTO CON LA RED TRADICIONAL 4G BASADO EN CPRI”**

**ROMMEL FERNANDO CALUCHO CABRERA**

**DIRECTOR:**

**DR. GERMÁN ARÉVALO B, PhD.**

**Quito – 2021**

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1 .....	14
1. 1 INTRODUCCION .....	14
1.1.1 JUSTIFICACIÓN .....	15
1.1.2 ANTECEDENTES .....	16
1.1.3 OBJETIVO GENERAL .....	17
1.1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
1.1.5 RESUMEN DE CONTENIDO DE CAPÍTULOS .....	17
CAPÍTULO 2 .....	19
2. 1 METODOLOGÍA .....	19
2.1.1 TIPO DE ESTUDIO .....	19
2. 2 MARCO TEÓRICO .....	19
2.2.1 INTRODUCCION A LAS REDES MOVILES .....	19
2.2.2 TIPOS DE CELDAS MOVILES .....	22
2.2.3 REDES MOVILES 5G .....	23
2.2.4 FRONTHAUL 5G .....	26
CAPÍTULO 3 .....	29
3. 1 FROUNTHAULIN OPTICO PARA REDES 4G Y 5G BASADO EN MICROCELDAS .....	29
3.1.1 RED 4G .....	29

3. 1. 1. 1 RED DE RADIO ACCESO CENTRALIZADA (C-RAN) .....	30
3. 1. 1. 2 ANCHO DE BANDA Y LATENCIA EN UNA RED FRONTHAULING.....	33
3. 1. 1. 3 TIPOS DE TECNOLOGIAS DE TRANSPORTE DE FRONTHAUL	35
3.1.2 RED 5G .....	38
3. 1. 2. 1 ARQUITECTURA DE RoF PARA C-RAN.....	39
CAPÍTULO 4 .....	42
4. 1 ANÁLISIS TÉCNICO DEL ESTUDIO .....	42
4.1.1 INTRODUCCION.....	42
4. 2 ESCENARIOS Y COSTOS.....	42
4.2.1 ESCENARIO GENERAL .....	42
4. 2. 1. 1 DESPLIEGUE DE MACROCELAS PARA REDES 4G .....	43
4. 2. 1. 2 DESPLIEGUE DE REDES 5G PARA MICROCELL Y SMALLCELL .....	46
4. 3 RESULTADOS .....	47
CAPÍTULO 5 .....	52
5. 1 CONCLUSIONES .....	52
5. 2 RECOMENDACIONES.....	55
5. 3 REFERENCIAS.....	56

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 2. 1	Pronóstico de Trafico de datos móviles. (Fuente: Cisco Visual Networking Index; Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022 February 2019).	20
Figura 2. 2	Evolución de las Redes de Acceso Inalámbrico. (Fuente; JIUN-YU SUNG, CHI-WAI CHOW, CHIEN-HUNG YEH, AND GEE-KUNG; Evolution of the wireless access networks.2016).	21
Figura 2. 3	Tecnología Frounhauling CPRI (Fuente: Lazaro, J.; Toward to design of 5G Optical Communications, June 2017).	24
Figura 2. 4	Características Principales para 5G. (Fuente: Carugi, M.; Key feature and requirements of 5G / IMT-2020 networks, February 2018).	25
Figura 2. 5	Estructura de red de transmisión 5G. (Fuente: Turkiewiez, J; 5G transmission network structure / Optical Transmission Technologies for 5G Networks, January 2019).	26
Figura 2. 6	Arquitectura básica de una Red 5G. (Fuente: Arévalo, G. Convergence of the new generation optical and wireless networks for the development of 5G, June 2018)	28
Figura 3. 1	Evolucion 4G LTE. (Fuente: <a href="http://www.qualcomm.com/news/onq/2017/08/02/understanding_3gpp_starting_basics">www.qualcomm.com/news/onq/2017/08/02/understanding_3gpp_starting_basics</a> , August 2017)	30
Figura 3. 2	Evolución arquitectura de una estación base. (Fuente: IEEE COMMUNICATION SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 17, NO. 1, FIRST QUARTER 2015 Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview).	32

Figura 3. 3	Red Movil LTE con C-RAN (Fuente: IEEE COMMUNICATION SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 17, NO. 1, FIRST QUARTER 2015 Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview).....	33
Figura 3. 4	Evolución de Arquitecturas (Fuente: Key Microwave-Photonics Technologies for Next-Generation Cloud-Based Radio Access Networks, Liu, 2014).	35
Figura 3. 5	Multiplexación de Longitudes de Onda. (Fuente: Análisis y estudio de soluciones para Fronthaul radio, J Madrazo L, 2018).....	37
Figura 3. 6	Suscriptores a nivel global de la Red 5G. (Fuente: <a href="https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2019/ITU-ASP-CoE-Training-on-5G%20transition.pdf">https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2019/ITU-ASP-CoE-Training-on-5G%20transition.pdf</a> , September 2019)(Training, 2019).....	39
Figura 3. 7	Diagrama de bloques de backhauling de tráfico móvil basado en enlaces de fibra óptica y agregación de operadores de soporte (Fuente: An Insight into the Total Cost of Ownership of 5G Fronthauling, Aleksejs, Levantesi, Gaudino,, ICTON 2018).	40
Figura 4. 1	Mapas detallados de la zona urbana de Riobamba con un despliegue óptimo de BS PARA REDES 4G Y 5G en: (a) Macrocells 4G, (b) Smallcells 5G, (c) Microcells 5G .....	49
Figura 4. 2	Costo del despliegue de un Frounthauling óptico en la ciudad de Riobamba, para cinco escenarios diferentes de celdas y tecnología móvil. ....	50

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4. 1	Población, superficie y densidad poblacional de la Ciudad de Riobamba. (Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. <a href="http://www.ecuadorencifras.gob.ec">www.ecuadorencifras.gob.ec</a> , 2020)	
	.....	43
Tabla 4. 2	Tabla de Análisis de área Urbana Riobamba (Fuente: Propia) .....	44
Tabla 4. 3	Tabla de Cálculo de Estaciones Base 4G .....	44
Tabla 4. 4	Tabla de Costo de Implementación de Radio Bases 4G en función de la Tasa de Bits y Tamaño de Celda .....	45
Tabla 4. 5	Tabla de Costo de Hardware e Instalación de Radio Bases 4G.....	46
Tabla 4. 6	Tabla de Análisis de área Urbana Riobamba (Fuente: Propia) .....	46
Tabla 4. 7	Tabla de Costo de Implementación de Radio Bases 5G en función de la Tasa de Bits y Tamaño de Celda .....	47

## ACRÓNIMOS

3GPP	Third Generation Partnership Project
3GPP2	Third Generation Partnership Project2
AMPS	Advanced Mobile Phone Services
ANE	Agencia Nacional del Espectro
A-RoF	Analog Radio Over Fiber
ARP	Allocation and Retention Priority
AWG	Arrayed Waveguide Grating
BBU	Base Band Unit
BER	Bit Error Rate
BSC	Base Station Controller
BTS	Base Transceiver Station
CA	Carrier Aggregation
CAPEX	Capital Expenditure
CC	Component Carrier
CDMA	Code Division Multiple Access
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administration
C/I	Carrier to Interference
CO	Central Office
CoMP	Coordinated Multipoint Transmission
CPRI	Common Public Radio Interface
CQI	Channel Quality Indicator

C-RAN	Centralized RAN
CRC	Comisión de Regulación de Telecomunicaciones
COMBO	Convergence of Fixed and Mobile Broadband Access
CWDM	Course Wavelength Division Multiplexing
DAC/ADC	Digital to Analog Converter/Analog to Digital Converter
DAS	Distributed Antenna System
D-AMPS	Digital - Advanced Mobile Phone Services
DL	Downlink
DPS	Dynamic Point Selection
DRoF	Digital Radio Over Fiber
DSCH	Downlink Shared Channel
DSP	Digital Signal Processor
DU	Digital Unit
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EGPRS	Enhanced General Packet Radio System
eICIC	Enhanced Inter-Cell Interference Coordination
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
E-RAB	E-UTRAN Radio Access Bearer
ERE	Espectro Radioeléctrico
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	Evolved - UMTS Terrestrial Radio Access Network
EVM	Error Vector Magnitude

FDD	Frequency Division Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FD-MIMO	Full Dimension MIMO
FMC	Fixed-Mobile Convergence
FPGA	Field Programmable Gate Array
FTTH	Fiber to the Home
GBR	Guaranteed Bit Rate
GERAN	Gsm Edge Radio Access Network
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPON	Gigabit – Capable Passive Optical Network
GPP	General Purpose Processor
GPRS	General Packet Radio System
GSM	Global System for Mobile Communications
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMT	International Mobile Telecommunications
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IQ	In-phase/Quadrature

ISDN	Integrated Service Digital Network
JT	Joint Transmission
ITU	International Telecommunication Union
LA	Link Adaptation
LTE	Long Term Evolution
LWA	LTE-WLAN Aggregation
M2M	Machine to Machine
MBR	Maximum Bit Rate
MCS	Modulation Coding Scheme
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MIT	Massachusetts Institute Technology
MME	Mobility Management Entity
MMS	Multimedia Messaging Services
MS	Mobile Station
MSA	Mutual Standard Agreement
MU-MIMO	Multi user MIMO
NAS	Non-Access Stratum
NGFI	Next Generation Fronthaul Interface
NMT	Nordic Mobile Telephone
NR	New Radio
NSA	Non-Standalone
OBSAI	Open Base Station Architecture Initiative
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OLT	Optical Line Terminal

ONU	Optical Network Unit
OPEX	Operational Expenditures
ORI	Open Radio Equipment Interface
OSS	Operation Support Subsystem
OTN	Optical Transport Network
PCC	Primary Component Carrier
PCELL	Primary Serving Cell
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
P-GW	Packet Data Network Gateway
PIC	Photonic Integrated Circuit
PON	Passive Optical Network
PSK	Phase Shift Keying
PRB	Physical Resource Block
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QCI	QoS Class Identifier
QoS	Quality of Services
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RAN	Radio Access Network
RANaaS	Radio Access Network as a Service
RB	Radio Bearer
RF	Radio Frequency

RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RRH	Remote Radio Head
RRU	Remote Radio Unit
SA	Standalone
SCC	Secondary Component Carrier
SCELL	Secondary Serving Cell
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SDR	Software Defined Radio
SFP	Small Form-Factor Pluggable
S-GW	Serving Gateway
SIM	Subscriber Identity Module
SINR	Signal to Noise and Interference Ratio
SMG	Statistical Multiplexing Gain
SMS	Short Message Service
SON	Self Optimizing Network
SU-MIMO	Single User MIMO
TACS	Total Access Communication System
TB	Transport Block
TCO	Total Cost of Ownership
TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TTI	Transmission Time Interval
UDN	Ultra Dense Network
UE	User Equipment

UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VoLTE	Voice over LTE
WAN	Wide Area Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

# CAPÍTULO 1

## 1. 1 INTRODUCCION

En la actualidad, las redes de acceso en los enlaces que interconectan los equipos RRH (REMOTE RADIO HEAD) Y BBU (BAND BASE UNIT) conforman el Fronthaul de la red, el cual constituye el punto de acceso con mayor jerarquía en la migración de distintas arquitecturas, considerando la evolución en las tecnologías de comunicaciones móviles tales como 4G (“Fourth Generation” o Cuarta Generación) y 5G (“Fifth Generation” o Quinta Generación), debido al incremento de anchos de banda, velocidades de navegación y reducción de la tasa de error, BER (BIT ERROR RATE), con el fin de garantizar la calidad de servicios que ofrece la nueva tecnología 5G.

Es importante el análisis para el diseño de este tipo de enlaces con el propósito de soportar el tráfico masivo de información que requiere el usuario, hoy en día en el Ecuador se encuentran planificando la migración tecnologías 2G/3G a 4G en las operadoras celulares, como OTECEL, CONECEL.S.A Y CNT.EP, sin tomar en cuenta los beneficios que puede ofrecer una infraestructura con los requisitos mínimos del fronthaul a la hora de diseñar, planificar y desplegar las nuevas arquitecturas de redes móviles en la tecnología 5G.

El fronthaul óptico es un tema emergente en el cual se considera el uso de nuevas tendencias de las redes 5G, por su flexibilidad e con el fin de moldear la red a través para adaptarla a las necesidades del usuario. El presente trabajo intenta hacer una comparación del fronthauling de las redes 4G y 5G, comparando sus diferentes topologías, arquitecturas y demás requerimientos, comparando principalmente la red 4G basada en CPRI (“Common Public Radio Interface” o Interfase de Radio Publica Común) con la red 5G basado en agregación de canales asistida por procesamiento digital de señales (DSP Assisted Channel Aggregation) para microceldas.

También se realizará un análisis minucioso de los aspectos tecno-económicos y las ventajas desventajas de cada una de ellas con el fin de determinar el costo beneficio de cada tecnología.

### **1.1.1 JUSTIFICACIÓN**

Dada la relevancia de realizar estudios tecno-económicos sobre la factibilidad de implementar la quinta generación de redes celulares 5G, se propone hacer un análisis y estudio del desempeño y de los costos de implementación de un fronthauling óptico para las redes 5G basadas en microceldas, comparando su rendimiento y costo con las redes tradicionales 4G basada en el protocolo CPRI, considerando la misma infraestructura para su up grade.

Para este análisis se considerará la estructura tradicional del fronthauling óptico de la red 4G, misma que emplea el protocolo CRAN (CLOUD RADIO ACCESS NETWORK) en la red de acceso inalámbrica y una estación base BS (BASE STATION) donde, a través de una unidad de banda base BBU (BASE BAND UNIT), se realizara una transformación análoga a digital de las señales de radio para transmitir y recibir la información desde la BS (BASE STATION) hasta las oficina central del proveedor de servicio, CO (CENTRAL OFFICE).

Por otro lado, las redes 5G proveen una mayor tasa de transferencia, a través del uso de diferentes canales transmitidos simultáneamente, usando tecnología MIMO (MULTI-INPUT/MULTI-OUTPUT), y emplean además en su infraestructura CRAN una BS (BASE STATION) de baja complejidad, que consta fundamentalmente solo de una cabecera de radio remota, RRH (REMOTE RADIO HEAD), inyectando la información directamente sobre la fibra como señal de radio a través del mismo canal óptico, técnica que se denomina “radio sobre fibra”, RoF (RADIO OVER FIBER).

### **1.1.2 ANTECEDENTES**

En un inicio, la tecnología 3G fue el pilar para una implementación de una arquitectura de estación base distribuida, en la cual la unidad de función de radio, RRH, se desvincula de la BBU, aun cuando están presentes en la misma BS (en la misma torre), conectándose entre sí mediante diversos medios físicos como, por ejemplo: fibra óptica ó más comúnmente, por cable coaxial de radio frecuencia, RF (RADIO FREQUENCY). La conexión desde la BS hasta la CO se realiza generalmente a través de un enlace de fibra óptica llamado fronthauling óptico (Telesemana, 2014).

Las señales de banda base se transmiten desde la BS hasta las CO a través de la fibra óptica, mediante el estándar CPRI (COMMON PUBLIC RADIO INTERFACE). El despliegue de las redes de acceso basados en un fronthauling óptico permite a los usuarios de redes celulares 4G tener una mayor flexibilidad y libertad al momento de enviar y recibir gran cantidad de información.

Este tipo de arquitectura, al cual se le conoce por el nombre de C-RAN, en la actualidad las operadoras de telefonía celular se encuentran en una migración del C-RAN, conocidas como LOCAL RAN, esto indica que tanto BBU como las RRH se encuentran desplegadas en un mismo emplazamiento, pero conectadas entre sí mediante un medio físico (fibra óptica) (A. Oliva, 2016).

En la fase inicial se procederá a realizar el análisis de las dos tecnologías, tanto la red actual 4G como la red 5G, en el despliegue del fronthauling interconectando las RRU (REMOTE RADIO UNIT) y la BBU (BASE BAND UNIT) respectivamente. De igual manera se procederá con el análisis de costo de la implementación del fronthauling para microceldas en redes 5G vs 4G.

### **1.1.3 OBJETIVO GENERAL**

Analizar y diseñar fronthauling óptico para redes 5G, basado en microceldas y en agregación de canales asistida por procesamiento digital de señales, comparando su rendimiento y costo con la red tradicional 4G basada en el protocolo CPRI.

### **1.1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Describir la importancia del fronthauling óptico en las redes de telefonía móvil actuales y de nueva generación.

Detallar las características de un fronthauling óptico para las redes 4G/5G basado en microceldas.

Analizar y simular un fronthauling óptico para redes 4G y 5G con el fin de comparar su desempeño.

Comparar el costo de implementación de fronthauling óptico para redes celulares 4G y 5G.

### **1.1.5 RESUMEN DE CONTENIDO DE CAPÍTULOS**

En el capítulo 1 se procederá a realizar una breve introducción, justificación y antecedentes de la importancia del fronthauling óptico en las redes de telefonía móvil, al igual que la determinación del Objetivo General con sus respectivos objetivos Específicos.

En el capítulo 2 se procederá a describir de una manera detallada la importancia del fronthauling óptico en las redes de telefonía móvil actuales y de nueva generación.

En el capítulo 3 se procederá a detallar las características de un fronthauling óptico para las redes de telefonía móvil 4G/5G basado en microceldas.

En el capítulo 4 se analizará y se desarrollará una simulación mediante software de un frounhtauling óptico para redes 4G y 5G con el fin de comparar su desempeño.

En el capítulo 5 se realizará una comparación del costo de implementación de un frounhtauling óptico para redes celulares 4G y 5G.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. 1 METODOLOGÍA**

#### **2.1.1 TIPO DE ESTUDIO**

La metodología que se desarrollará en una primera fase es la recolección de artículos relacionados, clasificación y creación de un repositorio con el fin de organizar y extraer los datos más importantes y relevantes de un frounhauling óptico para redes 5G, basado en microceldas comparando con la red tradicional 4G basada en el protocolo CPRI.

Una vez completado con la primera fase, se procederá con la elaboración del trabajo de titulación, en donde se inicia con la historia y la evolución hasta la presente de los cambios del frounhauling óptico en las redes de telefonía móvil actuales y de nueva generación. De igual manera se procede con detallar cada una de las características de un frounhauling óptico para las redes 4G y 5G. Una vez que se haya analizado las características, procederé con la fase de simulación de estas redes ópticas con el propósito de comparar los desempeños que tienen cada una de estas.

Como fase final se procederá con la comparación del costo de implementación de cada uno de los Frounhauling ópticos para las redes celulares de tecnología 4G y 5G utilizando el protocolo CPRI.

### **2. 2 MARCO TEÓRICO**

#### **2.2.1 INTRODUCCION A LAS REDES MOVILES.**

Las tecnologías móviles, han experimentado una evolución en las últimas décadas. Esto implicaba la necesidad de un progreso continuo en su red de transporte correspondiente. La evolución de las tecnologías móviles es relativamente reciente desde el lanzamiento comercial de la primera red móvil en 1979 en Japón. Desde entonces, su

evolución no ha cesado con el surgimiento de una nueva generación de radio móvil casi cada década.

Los años 80 conocían la aparición de las comunicaciones móviles con la primera generación (1G), que ofrecía comunicación de voz analógica. Sin embargo, esta generación no tuvo un éxito considerable.

En los años 90 la segunda generación (2G) ofreció comunicación de voz digital y mensajes de texto. Posteriormente, la tendencia era proporcionar datos a los clientes móviles, por lo que 3G surgió en la década de 2000 ofreciendo banda ancha móvil. Luego, la necesidad de datos y servicios multimedia siguió evolucionando, lo que impulsó el lanzamiento de 4G en la década de 2010.

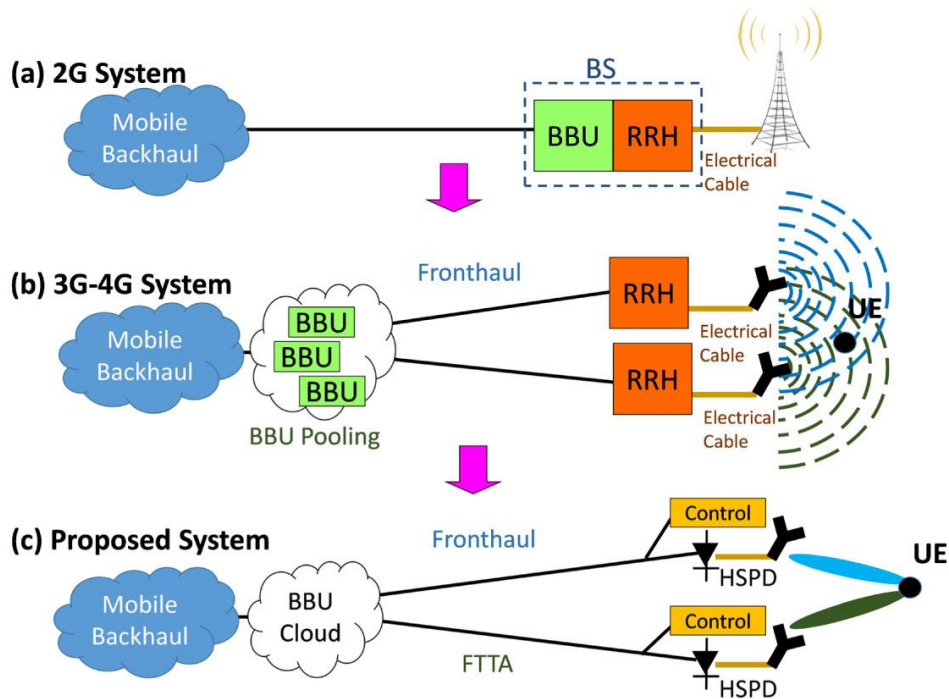
Actualmente, hay un trabajo de investigación y desarrollo en curso sobre la próxima generación móvil (5G) que se lanzará en 2020. Se prevé que ofrezca más servicios y transmita mucho más tráfico.

La Figura 2.1 se espera que el tráfico general de datos móviles crezca a 77 exabytes por mes para 2022, un aumento de siete veces con respecto a 2017. El tráfico de datos móviles crecerá a una tasa compuesta anual del 46 por ciento entre 2017 y 2022 (E. Summary, 2015).



**Figura 2.1** Pronóstico de Tráfico de datos móviles. (Fuente: Cisco Visual Networking Index; Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022 February 2019).

Con la evolución de las tecnologías en redes móviles como 3G, da un inicio a una arquitectura de red distribuida, donde el RRH, se enlaza entre sí, mediante un medio físico (FO o cable coaxial) con la BBU.



**Figura 2. 2** Evolución de las Redes de Acceso Inalámbrico. (Fuente: JIUN-YU SUNG, CHI-WAI CHOW, CHIEN-HUNG YEH, AND GEE-KUNG; Evolution of the wireless access networks.2016).

La Figura 2.2 muestra la evolución de las redes de acceso inalámbrico, y la figura 2.2 (a) ilustra el sistema 2G tradicional en el que la BS se encuentra cerca de la antena para reducir la pérdida de propagación de la señal de RF en el cable eléctrico entre la BS y las antenas.

En los sistemas 3G y 4G, el BS se separa en BBU y RRH. Por lo tanto, la costosa BBU se puede agrupar para compartir recursos. Como la mayoría de las funciones de procesamiento se encuentran en la BBU, la RRH puede simplificarse mucho. En una red de fronthaul basada en CPRI, solo el RRH necesita manejar las conversiones de DAC y RF, como se ilustra en la Figura 2.2 (b). Aunque la RRH en los sistemas 3G y 4G es

mucho más simple que una BS, la transformación de señales entre los cuadros de CPRI digitalizados y las señales de RF da como resultado una latencia excesiva.

La Figura 2.2 (c) ilustra la arquitectura propuesta para el sistema 5G con latencia reducida. En este esquema, la señal OFDM (ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING) de alta velocidad de datos no necesita ser procesada, sino que se lanza directamente a un HSPD (HIGH SPEED PHOTODIODE) y luego es emitida por una antena (Ung, How, Eh, Ung, & Hang, 2016).

### 2.2.2 TIPOS DE CELDAS MOVILES

Desde la primera generación, las redes móviles se implementaron en forma de celdas que permiten una comunicación fluida en toda la estructura de la red. Si una celda permite que se realice un cierto número de llamadas simultáneas, el número total de llamadas que puede admitir dicha red se puede controlar dimensionando las celdas en áreas de cobertura más grandes o pequeñas. En consecuencia, se clasifican en 3 tipos de celdas:

**Macroceldas:** representan celdas grandes, con un radio que varía desde unos cientos de metros hasta varios kilómetros. Están controlados por macro estaciones base cuya potencia de transmisión suele ser de 40 W (46 dBm). Sus antenas se colocan en puntos altos, tales como techos de edificios o pilones. Por lo general, se utilizan antenas direccionales para este tipo de células para permitir el despliegue de varios sectores en el mismo sitio de antena.

**Microceldas:** son celdas de unas pocas decenas a cien metros de radio, destinadas a completar la cobertura de macro celdas en áreas densas o mal cubiertas. Las estaciones base asociadas se denominan micro estaciones base y su potencia es del orden de 10 W (40 dBm). Sus antenas generalmente se colocan debajo del nivel de

los techos, generalmente en frente de edificios. Generalmente son antenas omnidireccionales que permiten el despliegue de sitios de antenas de un sector.

**Celdas pequeñas:** definidas por Small Cell como término general para los nodos de acceso de radio controlados por el operador y de baja potencia, incluidos aquellos que operan en un espectro con licencia, y Wi-Fi y dispositivos móviles sin licencia. Las celdas pequeñas suelen tener un rango de 10 metros a varios cientos de metros. Los tipos de células pequeñas incluyen femtoceldas, picocélulas y microcélulas. Sobre picoceldas, célula pequeña, las recomendaciones ITU-R M.1224 (de Radiocomunicaciones del UIT, 2012) y M.1035 (*Rec. UIT-R M.1035*, 2000) las definen como "celdas muy pequeñas con un radio de celda típico de menos de 50 m. Estas celdas están predominantemente situadas en interiores y están destinadas a dar una capacidad de tráfico muy alta.

Estas tres configuraciones de radio nos permiten también comprender que hay tres parámetros importantes a considerar al aprovisionar el ancho de banda / espectro para los sitios celulares y también al diseñar la red de transporte correspondiente.

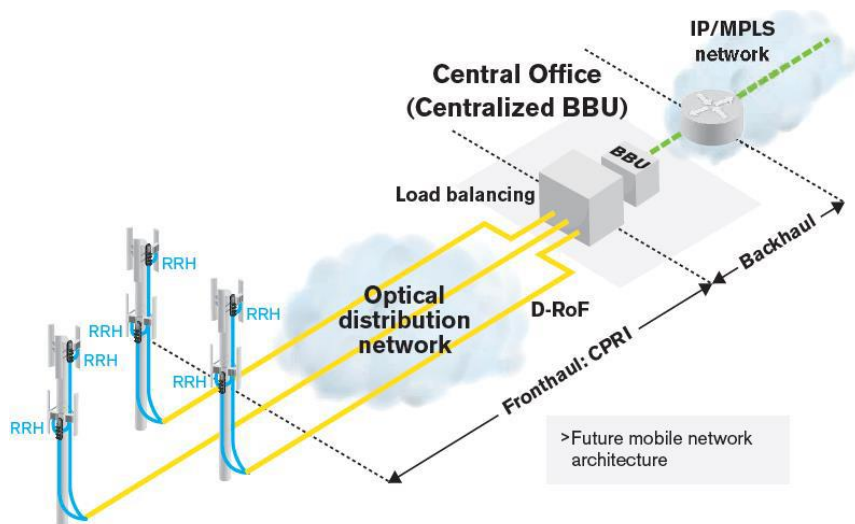
El número de Tecnologías de acceso por radio (RAT): corresponde al tipo de estándares de comunicación de radio (especialmente móviles) y sus generaciones, como 2G, 3G, 4G y 5G (Tayq, 2018).

### **2.2.3 REDES MOVILES 5G**

La conectividad móvil de banda ancha está evolucionando rápidamente hacia la era de la quinta generación (5G), definiendo un nuevo conjunto de requisitos más allá de las capacidades de las redes heredadas de cuarta generación (4G) basadas en la evolución a largo plazo (LTE)

Con la quinta generación de tecnología móvil, se manifiesta alcanzar velocidades de transmisión de 1 a 5 Gb/s para comunicaciones móviles. Para esto es necesario manejar técnicas de multiplexación de datos como, por ejemplo: MIMO (Múltiple Input múltiple Output). Esta técnica se basa en la utilización de múltiples antenas en transmisión y recepción para lograr la transmisión simultánea de diferentes flujos de información.

La señal de datos que envía o recibe la antena llega a ella a través del medio físico FO (FIBRA OPTICA), Este proceso se basa en la tecnología Frounthauling usando el protocolo CPRI (COMMON PUBLIC RADIO INTERFACE), el cual se basa en esta conversión de red. Este tipo de tecnología está siendo usado en las redes 4G así como también se utilizará en las redes 5G (*Toward to design of 5G Optical Communications A Degree Thesis Submitted to the Faculty of the Escola Tècnica d ' Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona Universitat Politècnica de Catalunya by Alex Viorreta Gómez In partial fulfilment of the requiremen, 2017*).



**Figura 2.3** Tecnología Frounthauling CPRI (Fuente: Lazaro, J.; Toward to design of 5G Optical Communications, June 2017).

La Figura 2.3 muestra el despliegue de la red de distribución óptica desde la BBU hasta las RRH.

Uno de los desafíos clave en el despliegue de la red 5G es la realización del sistema de transmisión dedicado y las redes capaces de hacer frente a la demanda de tráfico, manteniendo el costo bajo.

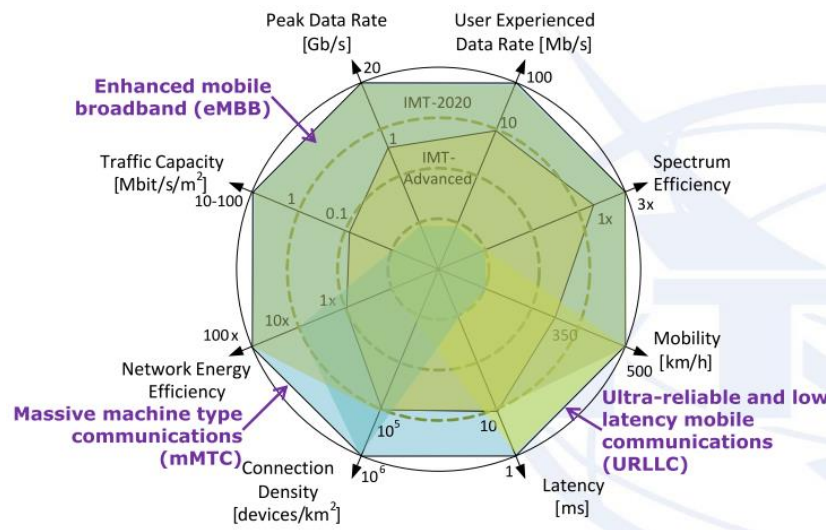
Existen tres puntos principales para 5G (Carugi, 2018), definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) las cuales son:

**Banda ancha móvil mejorada (eMBB):** proporcionará altas velocidades de datos de hasta  $20 \frac{Gbit}{s}$ .

**Comunicaciones de baja latencia ultra confiables (URLLC):** se basará en conexiones ultra confiables y de baja latencia de hasta 1 ms.

**Comunicaciones de tipo máquina masiva (mMTC):** admitirá la conexión de una gran cantidad de dispositivos aproximadamente  $10^6 \frac{Dispositivos}{Km^2}$ .

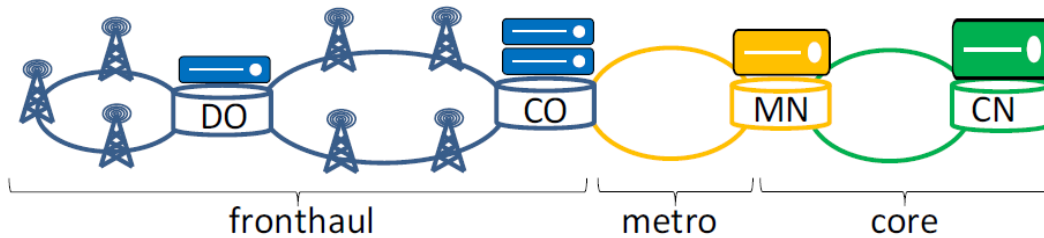
En la Figura 2.4 se puede observar el diagrama de radar con las principales características de las redes 5G.



**Figura 2. 4** Características Principales para 5G. (Fuente: Carugi, M.; Key feature and requirements of 5G / IMT-2020 networks, February 2018).

La Figura 2.5 muestra la estructura de la red de transmisión 5G. Las Radios Bases están conectados con las Oficinas Distribuidas (DO) y las Oficinas Centrales (CO) a

través de la red de fronthaul. El DO y el CO colocan la señal y la función de procesamiento de datos. Además, el tráfico de datos se agrega en las redes de metro y la red central transmite a largas distancias.



**Figura 2.5** Estructura de red de transmisión 5G. (Fuente: Turkiewicz, J; 5G transmission network structure / Optical Transmission Technologies for 5G Networks, January 2019).

Los nodos de Metro Red (MN) y la Red de Núcleo Central (CN) pueden colocar los nodos de procesamiento de funciones centralizadas. En contradicción, con las redes de comunicación de datos clásicas, donde el tráfico transportado crece hacia las redes de capa superior, la red 5G puede tener un tráfico muy grande en la red fronthaul, mientras que menos tráfico en el metro e incluso en algunos casos la red core.

Ese fenómeno radica en las divisiones de la función de red de radio ya introducidas en las redes 4G ya existentes (Turkiewicz, 2019).

## 2.2.4 FRONTHAUL 5G

En las redes de acceso de radio centralizadas (CRAN), los RRH y las BBU están separadas. Las BBU están colocadas y centralizadas, lo que permite la utilización y gestión de recursos de radio complejos. Las BBU se pueden virtualizar y operar como un software que se ejecuta en la infraestructura de TI estándar: servidores, memorias, almacenamientos, etc.

El C-RAN ofrece ventajas tecnológicas y económicas. En CRAN, los RRH pueden simplificarse y toda manipulación de datos como el manejo de protocolos y el

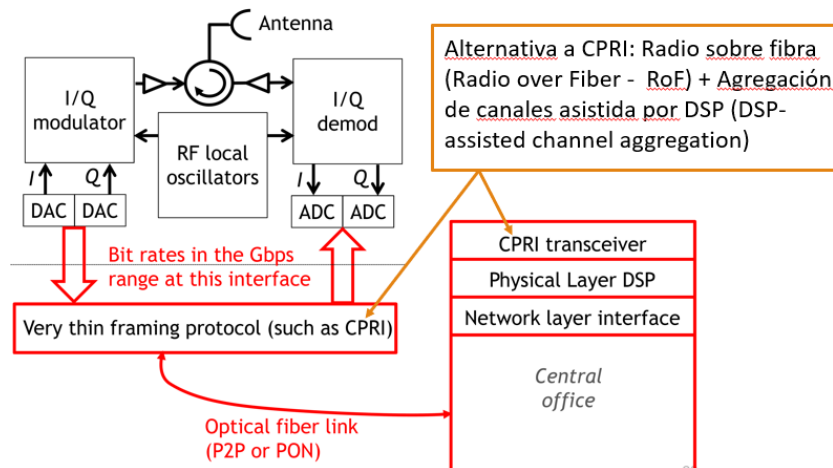
procesamiento de señales, la modulación de datos puede tener lugar en la ubicación central de BBU. Una red que transporta los datos entre RRH y BBU ubicadas centralmente se denomina red de fronthaul.

El ancho de banda muy alto requerido por la Interfaz de radio pública común (CPRI), cuando se usa para aplicaciones de 5G fronthauling y C-RAN ha llevado a la propuesta de soluciones de fronthauling móvil de próxima generación. Una arquitectura de transporte frontal de próxima generación muy efectiva, que proporciona ahorros de ancho de banda muy altos en comparación con CPRI, es el uso de la radio asistida por procesamiento de señal digital (DSP) sobre la agregación de canales de fibra (Arévalo, Tipan, & Gaudino, 2018).

El estándar para la transmisión entre BBU y RRH ha sido desarrollado por los socios industriales y cubre la transmisión punto a punto para la Interfaz de radio pública común (CPRI) y la transmisión a través de las redes de paquetes, como IP o Ethernet para eCPRI.

La distancia de transmisión no se especifica explícitamente, pero teniendo en cuenta que la tecnología está en el rango de unas pocas docenas de kilómetros. Los bits admitidos clasificados para CPRI son de hasta  $25 \frac{Gbit}{s}$  y en línea con las interfaces de conmutadores de paquetes para eCPRI, como  $100 \frac{Gbit}{s}$  (Turkiewicz, 2019).

En la Figura 2.6 se puede observar la arquitectura CRAN de las redes celulares 5G, y como se ha indicado anteriormente están conformadas solamente por una BBS de poca complejidad (*Webminar Optical Fronthauling for 5G*, n.d.).



**Figura 2. 6** Arquitectura básica de una Red 5G. (Fuente: Arévalo, G. Convergence of the new generation optical and wireless networks for the development of 5G, June 2018)

Por tal razón el ancho de banda requerido por CPRI, cuando se usa para el fronthauling 5G es muy alto y las aplicaciones C-RAN han llevado a la propuesta de soluciones de fronthauling móvil de próxima generación. Una arquitectura de transporte frontal de próxima generación muy efectiva, que proporciona ahorros de ancho de banda muy altos en comparación con CPRI, es el uso de radio asistida por procesamiento de señal digital (DSP) sobre canal de fibra.

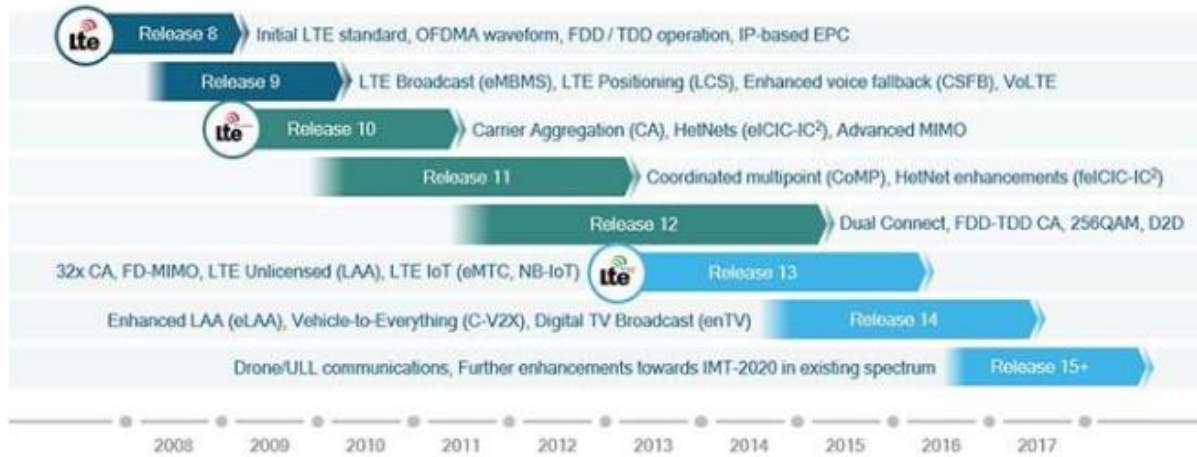
## **CAPÍTULO 3**

### **3. 1 FROUNTHAULIN OPTICO PARA REDES 4G Y 5G BASADO EN MICROCELDAS.**

En la actualidad el despliegue masivo de fibra óptica realizado por las operadoras públicas y privadas, han abierto las posibilidades de descentralizar los servicios, entre los que se destacan, los servicios de telefonía móvil. Con el auge y el despliegue de las redes 5G, en el que se requiere el máximo ancho de banda por usuario móvil y propone mejorar la experiencia del usuario con la menor latencia.

#### **3.1.1 RED 4G**

En la última década, el sector de las telecomunicaciones ha venido realizado una constante evolución de las tecnologías móviles digitales. Por ponerle en contexto, desde la década del 2010, con el crecimiento exponencial de datos, se vio necesario el desarrollo de la cuarta generación de comunicaciones móviles 4G LTE. Este sistema de comunicaciones se basa en el protocolo IP. 4G LTE fue introducido en el estándar 3GPP Release 8, donde sus principales características son la alta eficiencia espectral, las altas tasas de velocidad pico, la reducción de los tiempos de latencia, así como la flexibilidad de frecuencias y ancho de banda. En la Figura 3.1 se observa el historial de 4G LTE en varias versiones del estándar 3GPP. Se deberá tomar en cuenta que 4G LTE se introdujo por primera vez con 3GPP Release 8 y en la actualidad sigue evolucionando con Release 14 y Release 15 a medida que se introduzcan las tecnologías de comunicaciones móviles 5G (Onq, 2020).



**Figura 3. 1** Evolucion 4G LTE. (Fuente: [www.qualcomm.com/news/onq/2017/08/02/understanding\\_3gpp\\_starting\\_basics](http://www.qualcomm.com/news/onq/2017/08/02/understanding_3gpp_starting_basics), August 2017)

### 3. 1. 1. 1 RED DE RADIO ACCESO CENTRALIZADA (C-RAN)

La red de radio acceso en LTE está conformada por un grupo de estaciones base llamados nodo B mejorado (eNB), los cuales se encargan de recibir las señales del UE (USER EQUIPMENT) y enviarlas al Core y de recibir las señales del Core y enviarlas al UE, gestionando la información y administrando los canales de radio frecuencia disponibles en el espectro.

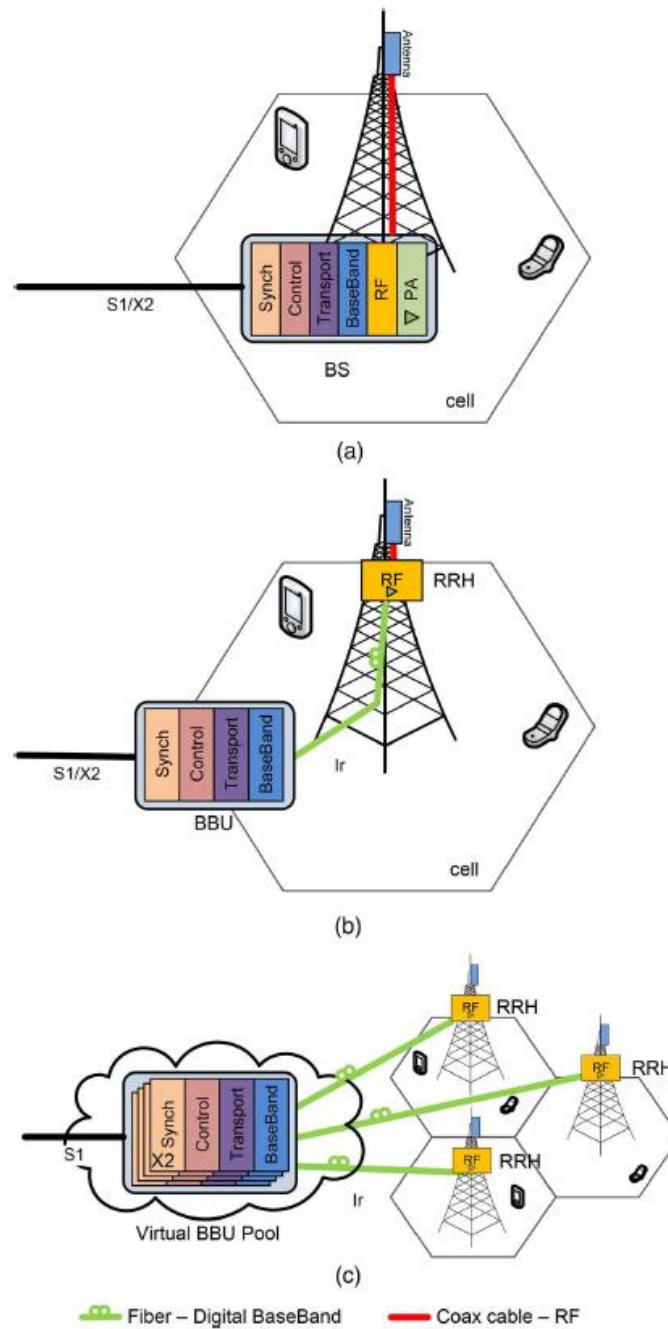
El eNB de LTE, está compuesto por un grupo de antenas, RRH (RADIO REMOTE HEAD) o también llamadas RRU (RADIO REMOTE UNIT) y una BBU (BASE BAND UNIT). Las RRH son las encargadas de la recepción, transmisión, amplificación y filtro de las señales de RF, además de convertir las señales de análogo-digital y viceversa digital-análogo. La BBU es la unidad que procesa las señales de banda base, se compone de un DSP (DIGITAL SIGNAL PROCESSOR), el cual procesa las señales de voz para la transmisión y recepción a un UE.

La interconexión entre las RRH y la BBU para redes LTE, se puede realizar por FO, microondas o cobre. En el escenario de interconexión por FO, la distancia máxima teórica

es de 40km, dependiendo de la capacidad de los equipos transceptores SFP, que sirven de interfaz de conexión entre la fibra óptica y los módulos.

El protocolo en su mayoría implementado de la interfaz Ir entre las RRH y la BBU, usado para la transmisión de datos en fase/cuadratura I/Q es CPRI, el cual es un protocolo bidireccional de velocidad de bits constante independiente de la actividad del usuario el cual requiere una sincronización precisa y un control de latencia preciso (Checko et al., 2015).

La arquitectura C-RAN consiste en centralizar las unidades de banda base (BBU) de varias estaciones base, en una oficina central (CO), formando un Pool de BBU, estableciendo una nueva red Fronthaul que conecta el Pool de BBU con las RRH, mediante un enlace normalmente de fibra, por medio de un transceptor SFP. En la Figura 3.2 se puede observar las diferentes arquitecturas de una estación base, se toma como base para el estudio la Figura 3.2 (c).

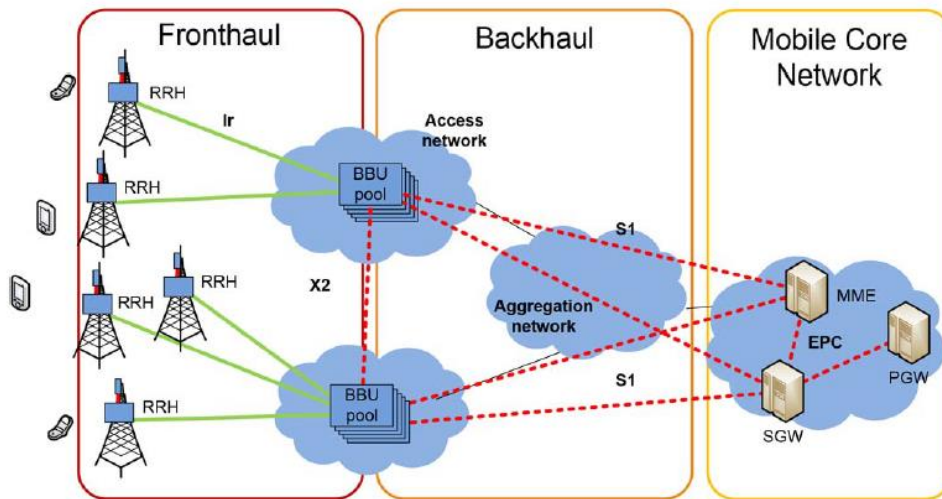


**Figura 3. 2** Evolución arquitectura de una estación base. (Fuente: IEEE COMMUNICATION SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 17, NO. 1, FIRST QUARTER 2015 Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview).

La arquitectura (C-RAN), es una propuesta que busca reducir los altos costos de despliegue en CAPEX y OPEX, lo cual conlleva aumentar la capacidad de la red móvil adicionando más BS's, formando una red híbrida de macro y micro celdas que puedan manejar el tráfico creciente. C-RAN se especifica como una solución la cual mejorará el

consumo de energía, permitirá un despliegue rápido y dinámico, hará uso eficiente de los recursos de procesamiento, reducirá costos de operación, mantenimiento, y será un primer paso para la virtualización de la RAN.

En figura 3.3 se observa la centralización del Pool de BBU de una Red LTE con C-RAN



**Figura 3.3** Red Movil LTE con C-RAN (Fuente: IEEE COMMUNICATION SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 17, NO. 1, FIRST QUARTER 2015 Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview).

La C-RAN enfrenta un gran desafío para satisfacer a los potenciales clientes, además se le considera la base tecnológica fundamental para las redes 5G. Considerando el tipo de arquitectura el Fronthauling es importante en las redes celulares de nueva generación.

### 3.1.1.2 ANCHO DE BANDA Y LATENCIA EN UNA RED FRONTHAULING

Continuando con el estudio, CPRI es un estándar de la industria destinado a definir una especificación disponible públicamente para la interfaz interna de estaciones base

inalámbricas entre BBU y RRH. Las partes que cooperaron para definir la especificación son Ericsson, Huawei, NEC, Alcatel Lucent y Nokia Siemens Networks.

CPRI define una especificación para la interfaz entre la BBU y la RRH para permitir la evolución tecnológica independiente de cada elemento y la flexibilidad de las arquitecturas del sitio celular para dar servicio a macroceldas, microceldas, sistemas de antenas distribuidas y redes de acceso de radio en la nube. Define una interfaz serializada para diferentes topologías como cadena, árbol y anillo.

Además, CPRI proporciona pautas adicionales para estas diferentes topologías, como el número mínimo de saltos RRH (5) y la longitud mínima del enlace CPRI (10 km).

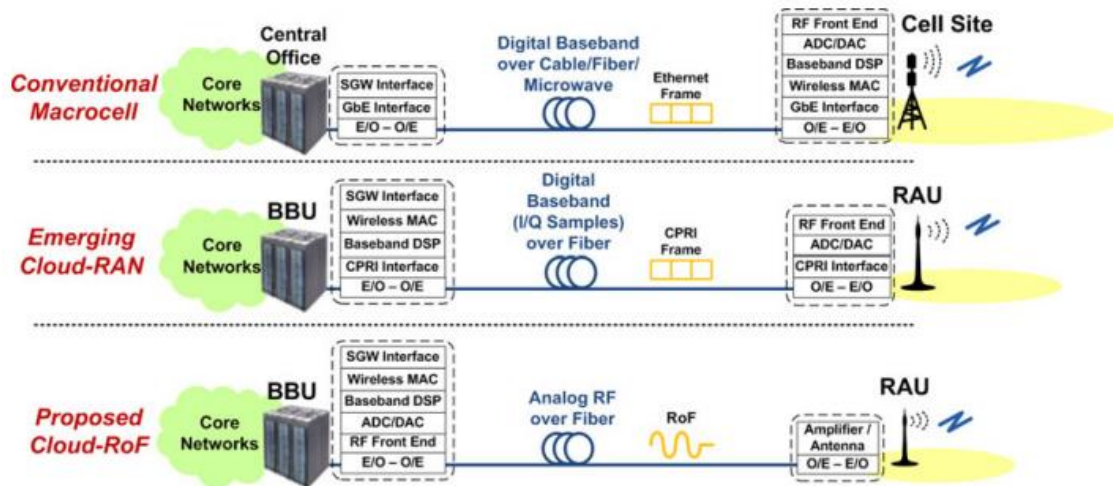
Otra forma de transporte de señales sobre fibra de forma análoga es A-RoF (RADIO ANALOGA SOBRE FIBRA), ya que puede soportar la demanda que tendrá la red fronthauling, por el uso de bandas milimétricas, como la banda de 60GHz. El haz de luz se modula con una señal de RF y se transmite a través del enlace óptico, sin necesidad de agregar tiempo extra de procesamiento al digitalizar la señal como en el caso del CPRI.

Este método se divide en dos subcategorías que son:

Radio Frecuencia sobre fibra (RFoF).

Frecuencia intermedia sobre fibra (IFoF)

En la Figura 3.4 se indica la comparación de una Arquitectura de CO y las celdas celulares para Macrocells, nube-RAN convencional y los sistemas propuestos de nube-RoF (Liu, Wang, Cheng, Zhu, & Chang, 2014).



**Figura 3. 4** Evolución de Arquitecturas (Fuente: Key Microwave-Photonics Technologies for Next-Generation Cloud-Based Radio Access Networks, Liu, 2014)

### 3. 1. 1. 3 TIPOS DE TECNOLOGIAS DE TRANSPORTE DE FRONTHAUL

Las exigencias de capacidad requerida para la red fronthaul en una Centralización completa, será posible con el uso de Fibra óptica, debido a que presta una alta capacidad que otras tecnologías de transporte, como se puede observar en (Tabla 3.1). Son tres las posibles tecnologías de transporte a utilizar en la red fronthaul:

Radio Enlaces (Microondas)

Ethernet (CPRI)

Redes Ópticas

<b>Fronthaul Technology</b>	<b>One - Way Latency</b>	<b>Per - Hop Latency</b>	<b>Throughput</b>
NG-PON2	< 2,5 us	< 5 us/Km	Over 40 Gb/s
NG-PON	2,5 us	5 us/Km	10 Gb/s - 40 Gb/s
GE-PON	10 - 30 ms	1 ms	10 Mb/s - 10 Gb/s
EPON	5 - 10 ms	1 ms	10 Mb/s - 1 Gb/s
Digital Subscriber Line Access	5 - 35 ms	5 - 35 ms	10 Mb/s - 100 Mb/s
Cable	25 - 35 ms	25 - 35 ms	10 Mb/s - 100 Mb/s
Wireless Communication (200 MHz - 6GHz)	5 - 10 ms	5 ms	50 Mb/s - 1 Gb/s
Microwave	menor 1 ms	200 us	100 Mb/s - 1 Gb/s
Millimeter Wave Radio	menor 1 ms	200	500 Mb/s - 2 Gb/s

**Tabla 3. 1** Desempeño de Tecnologías de Transporte (Fuente: M. Peng, Y. Sun, X. Li, Z. Mao and C. Wang, "Recent Advances in Cloud Radio Access Networks: System Architectures, Key Techniques, and Open Issues," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 3, pp. 2282-2308, thirdquarter 2016, doi: 10.1109/COMST.2016.2548658.)

Estas tecnologías de transporte deben ser capaces de satisfacer la estricta latencia, la fluctuación de fase y los requerimientos en anchos de banda de una forma costo eficiente (Peng, Sun, Li, Mao, & Wang, 2016).

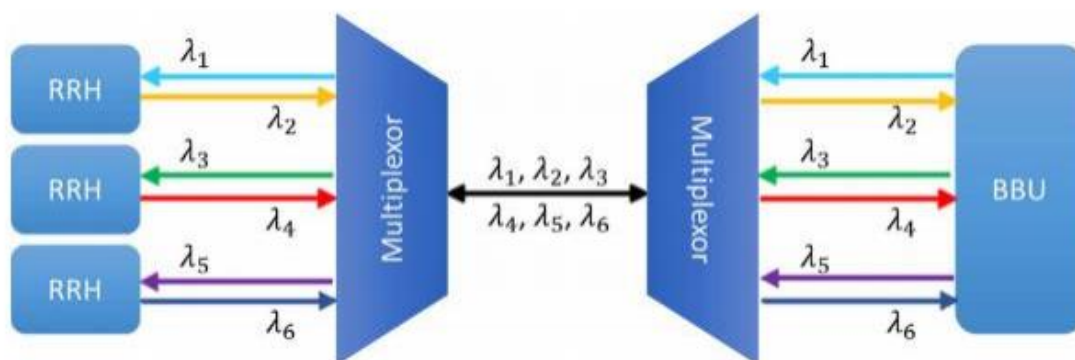
El estudio se enfocará la red fronthaul ópticas. La red óptica es la tecnología de transporte adecuada para la red fronthaul, debido a su alta capacidad de transportar los flujos de tráfico. Las arquitecturas que se puede considerar son las siguientes:

### **3. 1. 1. 3. 1 ENLACE PUNTO A PUNTO.**

El enlace punto a punto es la solución eficaz para un Pool de BBU menor de 10 Macro estaciones, debido a los requerimientos de capacidad, siendo en este escenario, una solución de bajo costo, ya que no son necesarios equipos adicionales. Es utilizada ampliamente en las actuales redes tipo arquitectura de estación base con RRH. Para una arquitectura C-RAN, con un despliegue denso.

### 3. 1. 1. 3. 2 MULTIPLEXACIÓN DE LONGITUD DE ONDA.

Las tecnologías de multiplexación de longitud de Onda se basan en la utilización de fibras oscuras, con equipos activos en los extremos del enlace, los cuales se encargan de multiplexar varias fibras en una sola. Una de las ventajas principales es la reducción de número de fibras entre los módulos de radio y los módulos del sistema. En la figura 3.5 se puede observar el concepto de WDM (Madrazo, 2018).



**Figura 3. 5** Multiplexación de Longitudes de Onda. (Fuente: Análisis y estudio de soluciones para Fronthaul radio, J Madrazo L, 2018)

### 3. 1. 1. 3. 3 REDES DE TRANSPORTE ÓPTICO

El estudio de las redes de transporte ópticos como por ejemplo las tecnologías PON es un tema de investigación muy popular en los últimos años, dado el aumento exponencial de las demandas de velocidad de bits de los usuarios residenciales y corporativos y la consiguiente necesidad de redes de acceso óptico de próxima generación con capacidades para soportar tales demandas. El despliegue mundial actual de redes de acceso óptico se basa en GPON o EPON y llega a millones de instalaciones por año. El despliegue masivo de fibra hasta el hogar (FTTH) que se prevé que tendrá lugar en los próximos años en varias partes del mundo probablemente se hará no solo con la tecnología GPON o EPON actualmente instalada, sino también con la otra estándares ya aprobados y más avanzados como ITU-T XGPON y NG-PON2.

### 3.1.2 RED 5G

La evolución de las redes de comunicación está impulsada en gran medida por el inminente desarrollo y despliegue de las redes de comunicación por radio de quinta generación (5G), previstas para principios de la década de 2020. Uno de los posibles escenarios para su realización es una red radio óptica, que implementa una arquitectura de red de acceso por radio centralizada en la nube (C-RAN) compuesta por una red de acceso por radio 5G y una red fronthaul de fibra óptica. El 5G RAN permitirá la comunicación de alto ancho de banda y baja latencia con dispositivos móviles e inalámbricos, a través de las RRH densamente colocadas que operan dentro de ventanas de mayor espectro, que admiten tecnologías avanzadas de comunicación por radio (como MIMO masivo) . La red óptica de fronthauling asegurará la transmisión de alta capacidad y baja latencia requerida por los servicios 5G, conectando una gran cantidad de RRH con un grupo de (BBU) ubicadas en una CO, para realizar funciones de procesamiento de señales de radio. (Ponzini, Kondepu, Giannone, Castoldi, & Valcarenghi, 2018)

Las redes de comunicaciones inalámbricas de quinta generación 5G, busca que los usuarios obtengan múltiples servicios a través del internet de mayor velocidad que en LTE, además con una baja latencia. (Network, n.d.)

Las características más importantes de la red 5G son las siguientes:

Soporte para el uso de tecnologías de acceso múltiple.

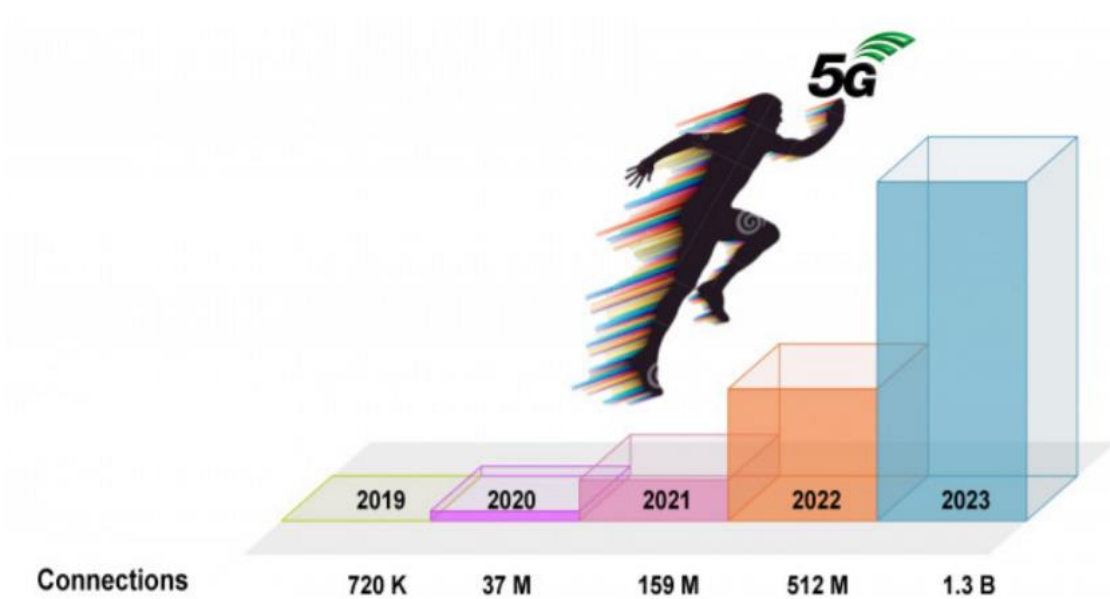
Red escalable

Alta disponibilidad, baja latencia, alta confiabilidad, alta tasa de datos, alta capacidad de tráfico del área.

Movilidad sin interrupciones en ambientes densamente poblados y heterogéneos.

Soporta servicios y aplicaciones en tiempo real.

Se estima que para el año 2023, la red 5G tendrá aproximadamente 1.3 billones de conexiones a nivel mundial (O. Summary, 2017).



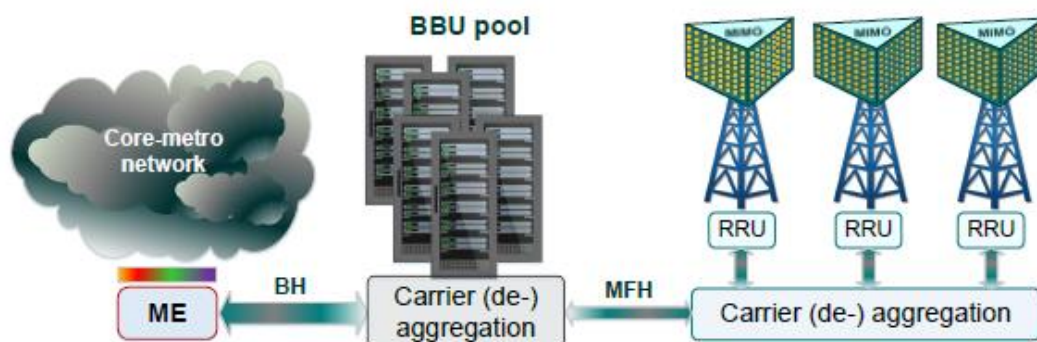
**Figura 3. 6** Suscriptores a nivel global de la Red 5G. (Fuente: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2019/ITU-ASP-CoE-Training-on-5G%20transition.pdf>, September 2019)(Training, 2019).

### 3. 1. 2. 1 ARQUITECTURA DE RoF PARA C-RAN

La arquitectura de la red de acceso por radio en la nube (C-RAN) ha sido comúnmente aceptada como uno de los conceptos clave en las redes móviles actuales y futuras. Una de sus principales ventajas es la rentabilidad, como resultado de tener sitios de BS menos complejos y de compartir equipos agregados en ubicaciones centralizadas. Más específicamente, el concepto C-RAN se basa en la separación del equipo BS en dos partes:

Unidades de radio remotas (RRU), ubicadas en las torres BS, es decir, equipos de emplazamiento celular responsables principalmente de la transmisión y recepción de señales inalámbricas.

Unidad de banda base (BBU): responsable del procesamiento de la banda base de la señal, ubicada de manera remota y centralizada en los llamados grupos de BBU como se muestra en la Figura 3.7.



**Figura 3. 7** Diagrama de bloques de backhauling de tráfico móvil basado en enlaces de fibra óptica y agregación de operadores de soporte (Fuente: An Insight into the Total Cost of Ownership of 5G Fronthauling, Aleksejs, Levantesi, Gaudino, ICTON 2018).

Sin embargo, el principal inconveniente de dicha arquitectura es la gran cantidad de tráfico que debe transportarse entre las RRU y las BBU, es decir, el denominado tráfico de fronthaul. En presencia de MIMO masivo y técnicas coordinadas de formación de haces intercelulares, si la interfaz entre una RRU y una BBU utiliza la interfaz CPRI o la iniciativa de arquitectura abierta BS (OBSAI), la velocidad de datos de fronthauling será mucho más allá de 1 Tb/s (Udalcovs et al., 2018).

En la Tabla 3.2 se realiza una comparación de las redes de tecnología celular 4G y 5G considerando las variables más importantes.

VARIABLES	TECNOLOGIA CELULAR	
	REDES 4G	REDES 5G
Latencia	45 ms	1 ms
Velocidad de Carga	50 Mb/s	600 Mb/s
Velocidad de Descarga	10 Mb/s / 14 Mb/s	10 Gb/s / 300 Mb/s
Velocidad de Transmisión	100 Mb/s	1Gb/s
Frecuencia de Operación	800 - 1500 MHz 1800 -2600 MHz	24,25 - 86 GHz
Número de Usuarios	> 200 Usuarios / Celda	< 110 Usuarios / Celda

**Tabla 3. 2** Cuadro comparativo de las dos tecnologías celulares en términos de Velocidad y Latencia  
(Joyce, Cárdenas, Joyce, & Cárdenas, 2018)

## **CAPÍTULO 4**

### **4. 1 ANÁLISIS TÉCNICO DEL ESTUDIO**

#### **4.1.1 INTRODUCCION.**

En este análisis y estudio de un fronthauling óptico para redes 5G basado en Microcells comparando su rendimiento y costo con la red tradicional 4G basado en CPRI, se realizó tomando en considerando los siguientes artículos técnicos: Optimal Dimensioning of the 5G Optical Fronthaulings for Providing Ultra-High Bit Rates in Small-Cell, Micro-Cell and Femto-Cell Deployments, (Arévalo & Gaudino, 2019), Techno-Economics for Optimal Deployment of Optical Fronthauling for 5G in Large Urban Areas, (Arévalo et al., 2018), Optimization of multiple PON deployment costs and comparison between GPON, XGPON, NGPON2 and UDWDM PON (Arévalo, Hincapié, & Gaudino, 2017), los cuales nos proporcionaron la información para realizar un análisis tecno económico preciso del despliegue óptimo de redes 5G en áreas urbanas en base a dos variables significativas: el tamaño de las celdas, la tasa de bits por usuario, considerando tasas de bits que van desde un acceso de ancho de banda alto hasta ultra alto. Los resultados muestran que la solución de microceldas es la mejor opción para proporcionar acceso a una tasa de bits ultra alta a los usuarios.

### **4. 2 ESCENARIOS Y COSTOS**

#### **4.2.1 ESCENARIO GENERAL**

Para el presente análisis, se tomó como referencia la ciudad de Riobamba capital de la Provincia de Chimborazo, en donde se procedió a realizar un despliegue de un conjunto de fronthauling ópticos en el área urbana de la ciudad de Riobamba, considerando los siguientes escenarios:

Despliegue de Macrocelas para redes 4G.

Despliegue de Smallcells para redes 5G.

Despliegue de Microcells para 5G.

En cada uno de estos escenarios, se procederá a realizar el análisis con diferentes tasas de bits por usuario que van desde 200, 400, 600, 800 y 1000 Mb/s.

Cabe indicar que, para el análisis del estudio se consideró la ubicación actual de la CO perteneciente a la CORPORACION NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES EMPRESA PUBLICA CNT EP, Agencia Riobamba. De igual manera se muestra una ubicación óptima de las RRH en cada una de las tecnologías móviles 4G y 5G. Los costes de instalación de los enlaces ópticos se obtuvieron del artículo técnico (Arévalo et al., 2017), mientras que los costes de hardware e instalación de un RRH y BBU, se derivan de la interacción directa de los operadores, proveedores y artículos técnicos (Arévalo & Gaudino, 2019) y (Arévalo et al., 2018).

#### 4. 2. 1. 1 DESPLIEGUE DE MACROCELDAS PARA REDES 4G

Previo a realizar el despliegue de las redes 4G se tomaron los siguientes datos que se indican en la tabla 4.1

Nombre de provincia	Nombre de cantón	Nombre de parroquia	Población	Superficie de la parroquia (km <sup>2</sup> )	Densidad Poblacional
CHIMBORAZO	RIOBAMBA	RIOBAMBA	156.723	59,05	2.654,07

**Tabla 4. 1** Población, superficie y densidad poblacional de la Ciudad de Riobamba. (Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. [www.ecuadorencifras.gob.ec](http://www.ecuadorencifras.gob.ec), 2020)

Con los datos obtenidos se procede a realizar el cálculo del número de Radio Bases requeridas para atender a los usuarios móviles.

<b>CARACTERISTICAS ESTACIÓN BASE 4G</b>	
Población sector urbano de la ciudad de Riobamba - INEC	156.723,00
Posibles usuarios de LTE 20 %	31.344,60
Usuarios que utilizan servicio de internet	188.068,00
Extensión área urbana [Km2] - (INEC)	59,50
Radio de cobertura estación base 4G [Km]	2,00
Área de cobertura estación base 4G [Km2]	10,39
Número de usuarios que soporta la estación base	2.000,00

**Tabla 4. 2** Tabla de Análisis de área Urbana Riobamba (Fuente: Propia)

<b>CÁLCULO DE NUMERO DE ESTACIONES BASE 4G</b>	
Cantidad de estaciones base de acuerdo con el área de cobertura.	6
Cantidad de estaciones base de acuerdo con la cantidad de usuarios por estación base	93

**Tabla 4. 3** Tabla de Cálculo de Estaciones Base 4G

Para el despliegue de la red, el aumento progresivo de la demanda se puede cubrir añadiendo progresivamente estaciones base. De manera simplificada, la ecuación 4.1 permite tener valores del área de cobertura de una celda.

$$\left[ Bx \frac{E}{S} = (UxT) \right]$$

Donde:

**U** = Densidad por usuarios [usuarios/Km2].

**T** = Tráfico promedio por usuario [bps/usuario].

**B** = Ancho de banda [Hz].

**E** = Eficiencia espectral [bps/Hz].

**S** = Estación base cubre una superficie [Km<sup>2</sup>].

En el análisis, barrimos cinco escenarios de Tasa de bits por usuarios para la red 4G, además se puede ver el costo total de implementación para cada escenario de tasa de bits y tamaños de celda 4G considerados en este estudio, como se detalla en la Tabla 4.4

<b>BIT RATE (Mb/s)</b>	<b>NUMERO DE ESTACIONES BASE 4G</b>	<b>COSTO FINAL (USD)</b>
200	53	\$ 4.894.730,20
400	105	\$ 9.697.107,00
600	159	\$ 14.684.190,60
800	212	\$ 19.578.920,80
1000	277	\$ 25.581.891,80

**Tabla 4. 4** Tabla de Costo de Implementación de Radio Bases 4G en función de la Tasa de Bits y Tamaño de Celda

Los datos del costo de suministro e instalación de cada equipo fueron consultados a los proveedores y operadores de servicios móviles, así como también se tomó la referencia de los artículos técnicos que se encuentran referenciados. En la tabla 4.5 se indica los costos de los equipos e instalación para las Redes 4G

<b>COSTO DE INSTALACION DE EQUIPOS</b>	
INSTALACION DEL eNODO	\$ 1.060,00
INSTALACION DE RADIO TRANSMISION	\$ 940,00
INSTALACION DE TIERRA	\$ 578,00
<b>COSTO DE INFRAESTRUCTURA</b>	
TORRE	\$ 14.135,00
UPS	\$ 2.120,00
POSO TIERRA	\$ 850,00
BANCO DE BATERIAS	\$ 1.050,00
ILUMINACION	\$ 460,00

<b>COSTO SISTEMA RADIANTE</b>	
CONECTORES	\$ 12,00
ANTENAS MIMO	\$ 15.600,00
FEEDERS	\$ 42,00
MATCH HEARD AMPLIFIER	\$ 1.735,00
PATCH CORDS	\$ 9,00
<b>COSTO ELEMENTOS DE RED DE ACCESO</b>	
CENTRAL OFFICE	\$ 48.160,00
<b>COSTO CABLE DE FO</b>	
SUMINISTRO E INSTALACION POR Km	\$ 68,20

**Tabla 4. 5** Tabla de Costo de Hardware e Instalación de Radio Bases 4G

#### **4. 2. 1. 2 DESPLIEGUE DE REDES 5G PARA MICROCELL Y SMALLCELL**

Para el despliegue de los dos tipos de celdas tanto para Smallcells y Microcells 5G se tomaron en cuenta los siguientes datos de la tabla 4.6

<b>CARACTERISTICAS ESTACIÓN BASE 5G (SMALLCELLS)</b>	
Población sector urbano de la ciudad de Riobamba - INEC	156.723,00
Posibles usuarios de 5G 20 %	31.344,60
Usuarios que utilizan servicio de internet	188.068,00
Extensión área urbana [Km2] - (INEC)	59,50
Radio de cobertura estación base 5G (Smallcells) [m]	200,00
Área de cobertura estación base 5G (Smallcells) [Km2]	0.13 Km2
Radio de cobertura estación base 5G (Microcells) [Km]	100,00
Área de cobertura estación base 5G (Microcells) [Km2]	0.03 Km2
Número de usuarios que soporta la estación base	200/100

**Tabla 4. 6** Tabla de Análisis de área Urbana Riobamba (Fuente: Propia)

Al igual que en la tecnología 4G se analiza los siguientes cinco escenarios de Tasa de bits por usuarios para la red 5G tanto en Smallcells como Microcells, donde se obtiene los siguientes resultados de costo total de implementación para cada escenario, como se detalla en la Tabla 4.7

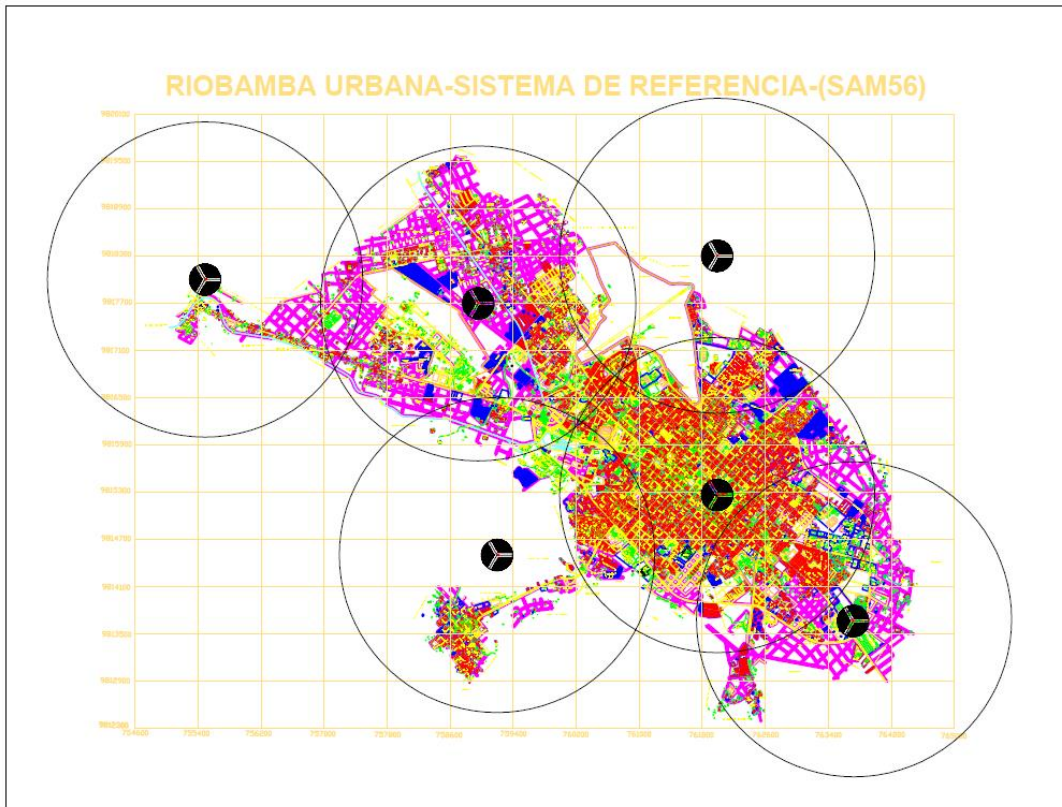
BIT RATE (Mb/s)	NUMERO DE BS SMALLCELLS 5G	COSTO FINAL SMALLCELLS 5G (USD)	NUMERO DE BS MICROCELLS 5G	COSTO FINAL MICROCELLS 5G (USD)
200	270	\$ 6.848.128,41	540	\$ 8.459.688,41
400	324	\$ 8.217.754,09	605	\$ 9.477.984,24
600	378	\$ 9.587.379,77	650	\$ 10.182.958,27
800	432	\$ 10.957.005,45	695	\$ 10.887.932,30
1000	490	\$ 12.428.084,89	710	\$ 11.122.923,65

**Tabla 4. 7** Tabla de Costo de Implementación de Radio Bases 5G en función de la Tasa de Bits y Tamaño de Celda

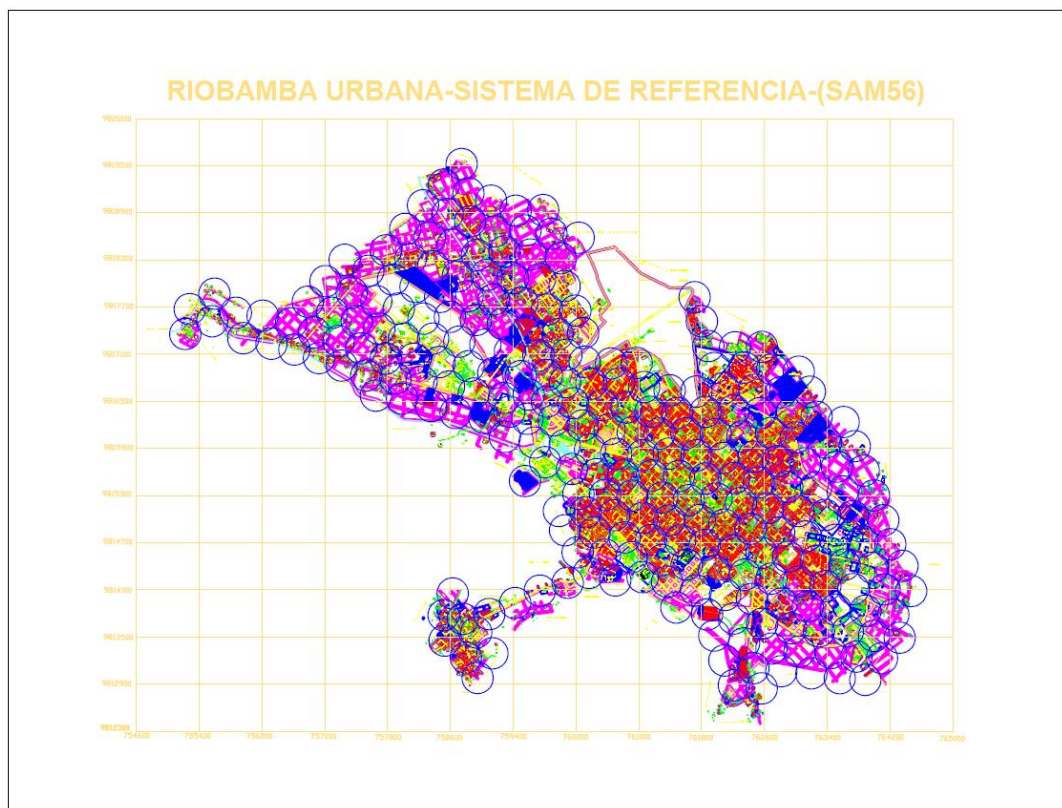
### 4. 3 RESULTADOS

En los resultados obtenidos, se ha descubierto que los costos de implementación de Redes 5G de microceldas son menores en comparación a Smallcells en Redes 5G y Macrocelas en Redes 4G. En la Figura 4.1 se muestra (a) el despliegue de las Macrocelas para redes 4G en la ciudad de Riobamba, cada Macrocela 4G cubre una subzona de 10,39 Km<sup>2</sup>, para (b) Un despliegue 5G para Smallcells cubre una subzona de 0.13 Km<sup>2</sup>, (b) Un despliegue 5G para Microcells, cubre una subzona de 0.03 Km<sup>2</sup>.

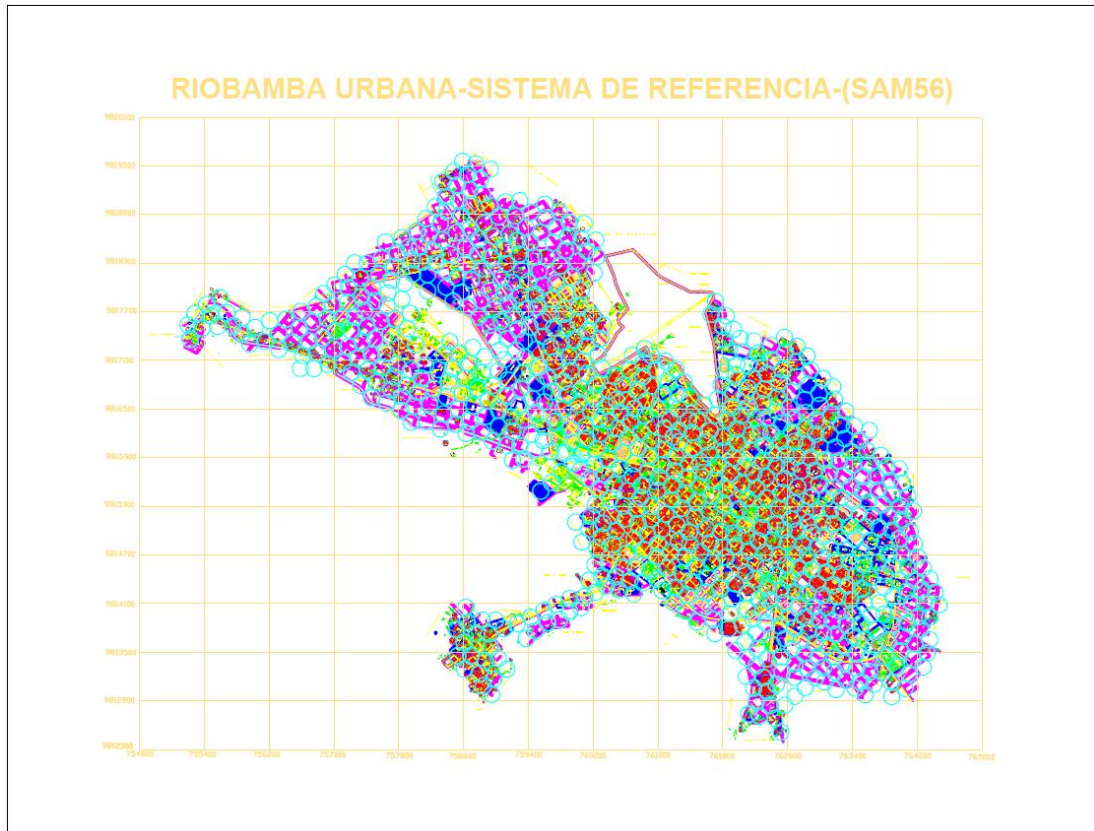
En la Figura 4.2 se puede ver el costo total de implementación por cada escenario de tasa de bits para los tres tipos de celdas, Macrocells en una Red 4G y Smallcells, Microcells en una red 5G. Se debe tomar en cuenta que el costo de implementación de una solución de Microcells 5G tiene un costo menor para los escenarios de tasa de bits más altos y un costo mayor para los escenarios de tasa de bits más bajos.



(a)

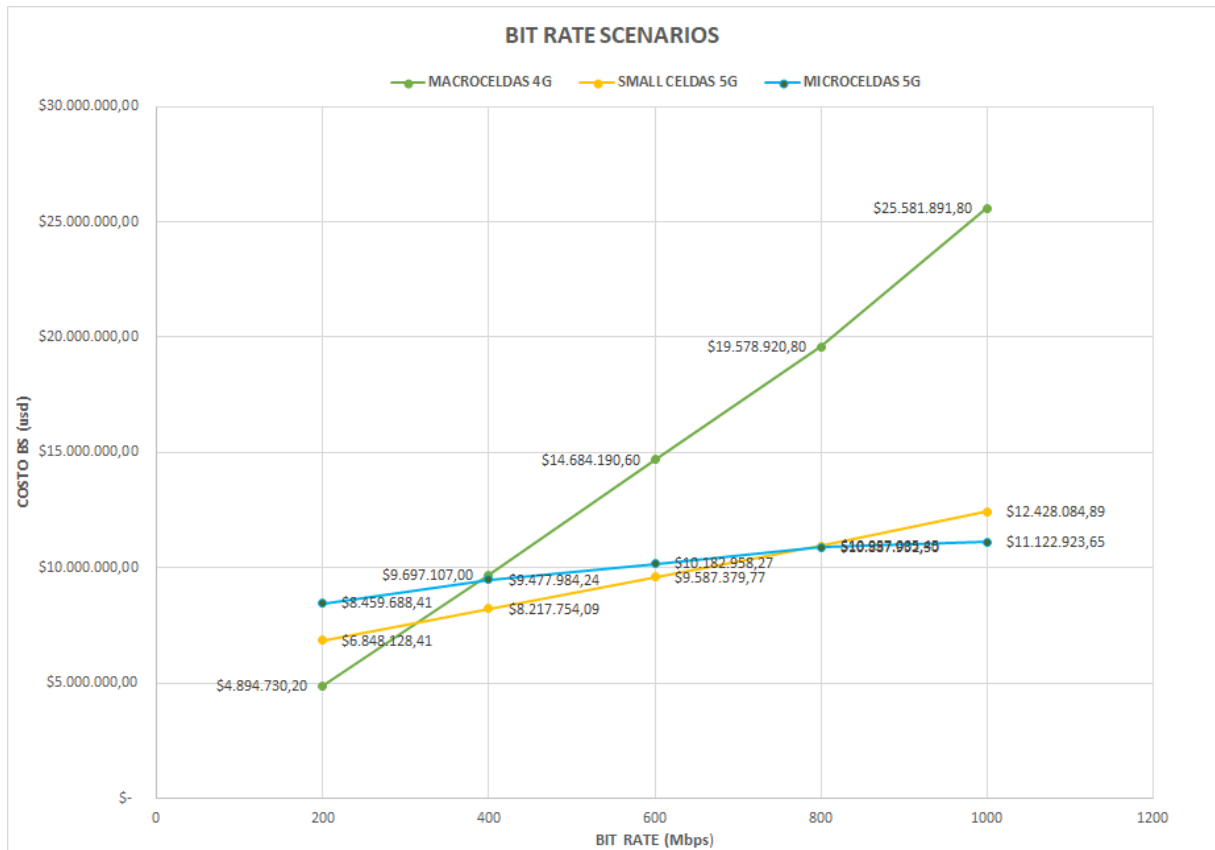


(b)



(c)

**Figura 4. 1** Mapas detallados de la zona urbana de Riobamba con un despliegue óptimo de BS PARA REDES 4G Y 5G en: (a) Macrocells 4G, (b) Smallcells 5G, (c) Microcells 5G



**Figura 4. 2** Costo del despliegue de un Fronthauling óptico en la ciudad de Riobamba, para cinco escenarios diferentes de celdas y tecnología móvil.

Además, se puede indicar que en la actualidad la tecnología 4G es una de las alternativas más viables e implementadas por las operadoras móviles para la comunicación de voz y datos de los usuarios, tanto por su costo de implementación así como también por el ancho de banda proporcionado, esto se lo puede evidenciar en la Figura 4.2, en donde el costo de implementación de una Red 4G usando Macrocells y asumiendo una tasa de bits de 200 Mb/s x Usuarios, es menor al costo de implementación de las Redes 5G considerando un escenario de Smallcells o Microcells. Pero a partir que los usuarios móviles requieran mayor velocidad y ancho de banda, las operadoras deberán garantizar la tasa de bits, en donde las Redes 4G se tornan muy costosas, como se puede evidenciar.

En el escenario de 400 Mb/s, las Redes 5G usando Smallcells sería una alternativa de implementación por su bajo costo de implementación aproximadamente un 15% menor que el costo de implementación de Macroceldas en Redes 4G y un 13% menor al costo de implementación de Microcells para redes 5G.

Conforme va incrementando el requerimiento la tasa de bits, en el escenario de 800 Mb/s, el costo de implementación de Smallcells a igualado al costo de implementación de Microcells para redes 5G, en cambio el costo de implementación para redes 4G, tiene un incremento del 43% sobre la base de implementación de Redes 5G.

En cambio, para tasas de bits iguales o superiores a 1Gb/s, la solución óptima por costo de implementación es el uso de Microcells para redes 5G teniendo un 11% más bajo que el costo de implementación de Smallcells en 5G y un 56% más bajo que el costo de implementación de Macroceldas 4G.

## **CAPÍTULO 5**

### **5.1 CONCLUSIONES**

Como conclusión de este estudio, después del desarrollo del marco teórico, análisis y desarrollo he sacado los siguientes puntos relevantes:

En la actualidad el despliegue masivo de fibra óptica por parte de las operadoras de servicios de telefonía móvil han permitido instalar fronthauling ópticos para las redes actuales 4G, las cuales son muy importantes debido al alto grado de viabilidad para manejar anchos de banda, alta capacidad de tráfico, así como también aprovechar mayormente los recursos que nos permite el medio físico, cabe indicar que se pueden manejar fronthauling mixtos para la implementación de redes 5G manteniendo el requerimiento de ancho de banda y latencia. Esto no quiere decir que la tecnología 4G vaya a desaparecer, por el contrario, la tecnología 5G se apoyara en esta para así poder satisfacer todas las expectativas que se tienen en conectividad móvil para 5G.

Una de las características de los fronthauling ópticos de las redes 4G y 5G es la utilización de las diferentes tecnologías de acceso múltiple como soluciones de red de transporte. Las conexiones que utilizan la tecnología 4G, ofrecen la máxima velocidad posible, en cuanto a datos, mientras que la tecnología 5G destaca de una forma exponencial frente a su predecesora, pues la mejora no solo se ve a nivel de conectividad, si no también demostrando su eficiencia y su bajo costo de implementación cuando debamos cubrir un sector con microceldas.

En las redes móviles de cuarta generación, los fronthauling ópticos conectan las cabeceras de radio remotas (RRH) con unidades de banda base (BBU), mientras que el backhaul conecta las BBU al 4G Evolved Packet Core (EPC), mientras que, en las redes de quinta generación, los fronthauling ópticos conectan las cabeceras de radio remotas (RRH) o nuevas radios (NR) al pool de unidades de banda base (BBU), que serán

disgregadas y virtualizadas en unidades centralizadas (CU), en donde se procesara todo el tráfico generado requiriendo un mayor rendimiento y un mayor ancho de banda.

En este análisis se ha presentado un estudio tecno económico comparativo del despliegue de frounhtauling ópticos para redes 4G y 5G en la ciudad de Riobamba, considerando tres escenarios de despliegue, Para la red 4G se consideró el escenario de Macrocells y para la Red 5G se consideró dos escenarios tanto Smallcells como Microcells, demostrando que los costos de implementación de las Redes 5G en Microcells son menores en comparación al despliegue de redes 4G, para los escenarios donde se debe garantizar velocidades de transmisión por usuarios superiores a 400 Mb/s.

Se pudo evidenciar que las Redes 5G a mayor tasa de bit los costos de implementación son menores en comparación a la Red 4G.

Los costos de infraestructura de 5G se ven reducidos debido a que las estaciones base solo cuentan con cabeceras de radio remotas (RRH).

En la actualidad los usuarios móviles navegan por la red, usan plataformas para video llamadas, redes sociales entre otra, las cuales son acciones que forman parte de la rutina diaria, por tal razón las operadoras móviles han visto la necesidad de implementar frounhtauling ópticos en sus redes de telefonía con el objetivo de satisfacer los requerimiento y demandas de sus usuarios.

La Redes 5G no solo están enfocado en conectar usuarios móviles, al contrario, debido a los anchos de banda que maneja, permite conectar, artefactos y dispositivos inteligentes, lo que permitirá el despliegue del internet de las cosas (IoT) para el desarrollo de ciudades inteligentes.

Reducir la latencia de comunicaciones, hará que los procesos industriales sean factibles para una integración global.

El uso de redes ópticas pasivas (PON) para el despliegue de Fronthauling, constituye un punto de interés para cualquier implementación de tecnología, puede describirse en base a la demanda de tasa de bits de los usuarios. Así se sugieren que el precio del hardware NGPON2, constituye la mejor solución cuando las demandas de los usuarios sean de cientos de Mb/s hasta Gb/s.

La virtualización en la RAN es muy importante, ya que permite realizar trabajos como actualizaciones a la red móvil de forma más eficiente y rápida.

Los protocolos usados para transportar las portadoras de radio son de tipo radio digital sobre fibra (D-RoF) y radio análogo sobre fibra (A-RoF). A pesar de que el tipo D-RoF, se ha implementado en su mayoría y la industria lo ha estandarizado como un protocolo de uso común (CPRI).

## 5. 2 RECOMENDACIONES

Como recomendaciones al estudio realizado se indica lo siguiente:

Los operadores móviles tienen un reto extraordinario ya que deberán realizar a futuro una migración de tecnología 5G, debido a las necesidades de velocidad cada vez más grandes que requieren los usuarios móviles.

Los operadores móviles deberán considerar realizar inversiones en las redes de transporte y acceso.

Con el despliegue de fibra óptica para la red fronthauling en la tecnología 4G, las operadoras móviles deben analizar y plantear la red 5G, haciendo uso de la infraestructura instalada, buscando una reducción de gastos y aprovechar el despliegue realizado.

Debido a los grandes beneficios que permiten las Redes Ópticas, se deberá priorizar el despliegue de Fibra Óptica en las ciudades más importantes a nivel nacional.

Con el propósito de optimización de recursos, los operadores móviles a corto plazo deberán buscar una compartición de infraestructura, reducir el coste de instalación de redes, optimización de activos y evitar la duplicidad de infraestructura.

Para la red de transporte, se recomienda utilizar la tecnología PON desplegada para los servicios de FTTH, debido a que presenta ahorros significativos con la reutilización de los recursos físicos como ductos, postes y armarios, usando el concepto de redes convergentes y no físicamente separadas.

En la actualidad la tecnología A-RoF está siendo estudiada ampliamente debido a que puede ser una solución a los altos requerimientos de ancho de banda de la red fronthaul en redes 5G, al contemplar un acceso de radio centralizada.

### 5. 3 REFERENCIAS

- Arévalo, G. V., & Gaudino, R. (2019). Optimal dimensioning of the 5G optical fronthaulings for providing ultra-high bit rates in small-cell, micro-cell and femto-cell deployments. *International Conference on Transparent Optical Networks, 2019-July*, 8–11. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2019.8840412>
- Arévalo, G. V., Hincapié, R. C., & Gaudino, R. (2017). Optimization of multiple PON deployment costs and comparison between GPON, XGPON, NGPON2 and UDWDM PON. *Optical Switching and Networking*, 25(January), 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2017.03.003>
- Arévalo, G. V., Tipan, M., & Gaudino, R. (2018). Techno-Economics for Optimal Deployment of Optical Fronthauling for 5G in Large Urban Areas. *International Conference on Transparent Optical Networks, 2018-July*, 3–6. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2018.8473801>
- Carugi, M. (2018). *Key features and requirements of 5G/IMT-2020 networks*. 14–15. Retrieved from <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/ArabStates/Documents/events/2018/RDF/Workshop-Presentations/Session1/5G-IMT2020-presentation-Marco-Carugi-final-reduced.pdf>
- Checko, A., Christiansen, H. L., Yan, Y., Scolari, L., Kardaras, G., Berger, M. S., & Dittmann, L. (2015). Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 17(1), 405–426. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2355255>
- de Radiocomunicaciones del UIT, O. (2012). *RECOMENDACIÓN UIT-R M.1224-1 - Vocabulario de términos de las telecomunicaciones móviles internacionales (IMT)*. 1, 139. Retrieved from <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>
- Joyce, D., Cárdenas, V., Joyce, D., & Cárdenas, V. (2018). *Universidad De Guayaquil Facultad De Ciencias Matematicas Y Fisicas Carrera De Ingeniería En Networking Y Telecomunicaciones Ingeniero En Networking Y Telecomunicaciones Autor* : Retrieved from <http://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/CATEDRA/article/download/764/757/>.
- Liu, C., Wang, J., Cheng, L., Zhu, M., & Chang, G. K. (2014). Key microwave-photonics technologies for next-generation cloud-based radio access networks. *Journal of Lightwave Technology*, 32(20), 3452–3460. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2338854>
- Madrazo, J. (2018). *Análisis y estudio de soluciones para fronthaul radio*. 102.
- Network, E. M. (n.d.). *Target Networks in 5G Era Embracing Mobile Network 2020s 2 Target Networks in 5G Era = 4.5G Evolution + 5G NR*.
- Onq, B. De. (2020). *Entendiendo 3GPP - comenzando con lo básico*. 1–12.
- Peng, M., Sun, Y., Li, X., Mao, Z., & Wang, C. (2016). Recent Advances in Cloud Radio Access Networks: System Architectures, Key Techniques, and Open Issues. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 18(3), 2282–2308. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2548658>
- Ponzini, F., Kondepu, K., Giannone, F., Castoldi, P., & Valcarenghi, L. (2018). Optical

- Access Network Solutions for 5G Fronthaul. *International Conference on Transparent Optical Networks*, 2018-July, 9–13. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2018.8473985>
- Rec. UIT-R M.1035. (2000). 2000.
- Summary, E. (2015). *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014-2019 (White Paper)*.
- Summary, O. (2017). *Mobile Reshapes the World Global MBB Forum 2017*.
- Tayq, Z. (2018). *Fronthaul integration and monitoring in 5G networks Zakaria Tayq To cite this version : HAL Id : tel-01708493 Thèse de doctorat Université de Limoges Docteur de l ' Université de Limoges Intégration et supervision des liens Fronthaul dans les réseaux 5G*.
- Toward to design of 5G Optical Communications A Degree Thesis Submitted to the Faculty of the Escola Tècnica d ' Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona Universitat Politècnica de Catalunya by Alex Viorreta Gómez In partial fulfilment of the requiremen.* (2017). (June).
- Training, C. (2019). *5G Transition CoE Training on Traffic engineering and advanced wireless network planning*. (October).
- Turkiewicz, J. P. (2019). Optical transmission technologies for 5g networks. *International Conference on Transparent Optical Networks, 2019-July*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2019.8840559>
- Udalcovs, A., Levantesi, M., Gaudino, R., Urban, P., Mello, D. A. A., Ozolins, O., & Monti, P. (2018). An Insight into the Total Cost of Ownership of 5G Fronthauling. *International Conference on Transparent Optical Networks, 2018-July(2)*, 3–7. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2018.8474008>
- Ung, J. I. U. N. U. S., How, C. H. I. A. I. C., Eh, C. H. U. N. G. Y., Ung, G. E. E., & Hang, C. (2016). *Two-level modulation scheme to reduce latency for optical mobile fronthaul networks*. 24(22), 25767–25773.
- Webminar Optical Fronthauling for 5G*. (n.d.).