



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**MIGRACIÓN DE LA ARQUITECTURA D-RAN A C-RAN EN RADIOBASES DEL
SECTOR INTERCAMBIADOR CARAPUNGO.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de INGENIERA ELECTRÓNICA

AUTOR: ADRIANA NATALIA ABRIL REYES

TUTOR: CARLOS AUGUSTO CUICHÁN MORALES

Quito-Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Adriana Natalia Abril Reyes con documento de identificación N°1718172792 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 14 de enero del año 2022.

Atentamente,



Adriana Natalia Abril Reyes

1718172792

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Adriana Natalia Abril Reyes con documento de identificación N°1718172792, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Migración de la arquitectura D-RAN a C-RAN en radiobases del sector Intercambiador Carapungo.”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERA ELECTRÓNICA en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 14 de enero del año 2022.

Atentamente,



Adriana Natalia Abril Reyes

1718172792

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Augusto Cuichán Morales con documento de identificación N° 1714389721 docente de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **MIGRACIÓN DE LA ARQUITECTURA D-RAN A C-RAN EN RADIOBASES DEL SECTOR INTERCAMBIADOR CARAPUNGO**, realizado por Adriana Natalia Abril Reyes con documento de identificación N°1718172792, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 14 de enero del año 2022.

Atentamente,



Ing. Carlos Augusto Cuichán Morales, MSc
1714389721

ÍNDICE

RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO 1.....	1
ANTECEDENTES.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	3
CAPÍTULO 2	5
MARCO CONCEPTUAL.....	5
2.1. SITIO DE ESTUDIO.....	5
2.2. ESTRUCTURA DE UNA RED MÓVIL	6
2.2.1. Red de Acceso por Radio (RAN).....	7
2.2.2. Unidad de Banda Base (BBU).....	8
2.2.3. Cabezal de Radio Remoto (RRH)	9
2.2.4. Red de Acceso por Radio Distribuida (D-RAN)	10
2.2.5. Red de Acceso por Radio Centralizada (C-RAN)	11
2.2.6. Grupo BBU (BBU Pool)	13
2.2.7. Manejo de recursos (Pooling)	14
2.3. INTERCONEXIÓN RRH Y BBU (FRONTHAUL).....	15
2.3.1. Interfaz de radio pública común (CPRI).....	15
2.3.2. Modulación y multiplexación	16
2.3.3. Fibras oscuras	16
2.4. INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO (KPI)	17
2.5. TECNOLOGÍA DE ACCESO POR RADIO (RAT).....	18
2.6. QoS dentro del escenario C-RAN	22
CAPÍTULO 3.....	24
DISEÑO DE LA ARQUITECTURA RAN CENTRALIZADA	24

3.1. REQUERIMIENTOS DE LA ARQUITECTURA RAN CENTRALIZADA.	24
3.1.1. Requerimientos de Software.....	24
3.1.2. Requerimientos de hardware	27
3.2. ESTRUCTURA DE LA ARQUITECTURA PROPUESTA.....	29
3.2.1. Requerimientos del sitio.....	29
3.3. DISPOSITIVOS Y EQUIPOS A EMPLEARSE	38
3.3.1 Multiplexación por división de longitud de onda (WDM).....	41
CAPÍTULO 4.....	42
SIMULACIÓN DE LA ARQUITECTURA RAN CENTRALIZADA.....	42
4.1. PARÁMETROS A SIMULAR	42
4.1.1 Eficiencia.....	42
4.1.2 Tráfico	43
4.1.3 Tasa de pérdida de paquetes (packet loss ratio).....	43
4.1.4 Jitter.....	43
4.1.5 Throughput.....	44
4.2. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE A EMPLEAR.	44
4.2.1 NS3.....	44
4.3.2 OMNET++	45
4.3.2 OPNET MODELER	45
4.3. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	45
4.3.1 Simulación 3G sobre la plataforma OPNET MODELER	46
4.3.2 Simulación 4G sobre la plataforma NS3 (LENA).....	47
4.3.3 Simulación 4G sobre la plataforma OMNET++ (SIMULTE/SIMU-5G).....	52
4.4. RESULTADOS OBTENIDOS.....	55
4.4.1 TECNOLOGIA 3G.....	55
4.4.2 TECNOLOGIA 4G.....	58
4.4.3 TABLA COMPARATIVOS KPI 3G Y 4G	60
4.4.4 GRAFICOS COMPARATIVOS PARA KPI.....	61
CONCLUSIONES.....	66
RECOMENDACIONES.....	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXOS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Sector Intercambiador de Carapungo.	5
Figura 2.2: Centros de negocios en el sector del Intercambiador de Carapungo.	6
Figura 2.3: Red móvil.....	6
Figura 2.4: Componentes de la Red de Acceso por Radio para GSM.	7
Figura 2.5: Diseño modular de la Unidad de Banda Base (BBU).....	8
Figura 2.6: Conexión y ubicación de una BBU en una radio base.....	9
Figura 2.7: Ubicación del RRH en el mástil de una radio base	10
Figura 2.8: Elementos de la arquitectura D-RAN.	11
Figura 2.9: Arquitectura C-RAN.....	12
Figura 2.10: Arquitectura C-RAN.....	13
Figura 2.11: Grupo de BBU en un Data Center u Oficina Central.	14
Figura 2.12: Conexión de un BBU pool con el RRH en distintas radiobases.....	14
Figura 2.13: Interconexión RRH y BBU.....	15
Figura 2.14: Cable CPRI para conexión entre RRH y BBU	16
Figura 2.15: Cuadro de mando para información de KPI de la red	17
Figura 2.16: RTT presupuesto de latencia. Tiempo entre Rx y Tx completa de la trama de datos.	19
Figura 2.17: Recuperación de la señal de reloj en referencia al flujo de bits I/Q recibidos en el RRH.....	20
Figura 2.18: Comparación del manejo dinámico de recursos de banda.....	22
Figura 2.19: Distribución de RB para 3 usuarios	23
Figura 3.1: Layout del gestor Network Cloud Engine NCE con usuario “admin”	26
Figura 3.2: Opción Main Topology y opciones de configuración	27
Figura 3.3: Topología de anillo para 6 BTS con protección y redundancia.....	27
Figura 3.4: Topología de anillo para 6 BTS con protección y redundancia.....	29
Figura 3.5: Recorrido de BTS cercanas al Intercambiador de Carapungo.....	30
Figura 3.6: RBS1 Y RBS2 en el Intercambiador de Carapungo.....	30
Figura 3.7: Data Center sector Carretas.	31
Figura 3.8: BTS cercanas al Intercambiador de Carapungo.....	31
Figura 3.9: BTS cercanas al Intercambiador de Carapungo.....	32
Figura 3.10: Red Fronthaul basada en multiplexación WDM	41
Figura 3.11: Implementación Fronthaul basado en WDM.....	42
Figura 4. 1: Inspección profunda de paquetes (DPI).....	43
Figura 4. 2: Pérdida de paquetes.	43
Figura 4. 3: Logo de Network Simulator 3	45
Figura 4. 4: Logo de Omnet++.....	45

Figura 4. 5: Logo de OPNET	45
Figura 4. 6: Esquema de conexión de red 3G	46
Figura 4. 7: Asignación de parámetros de simulación.	47
Figura 4. 8: Resultado de simulación satisfactoria.....	47
Figura 4. 9: Asignación de librerías para simulador NS3	48
Figura 4. 10: Declaración de variables globales en NS3.....	49
Figura 4. 11: Creación de dispositivos y enlaces en simulador NS3	49
Figura 4. 12: Posicionamiento y movilidad de nodos en simulación NS3.....	50
Figura 4. 13: Asignación de aplicaciones y parámetros de simulación.	50
Figura 4. 14: Configuración de variables y nodos en sistema gráfico Netanim.....	51
Figura 4. 15: Configuración de mensajes para resultados de simulación.	51
Figura 4. 16: Parámetros obtenidos al final la simulación por terminal de consola. .	52
Figura 4. 17: Simulación interactiva mediante la aplicación Netanim.	52
Figura 4. 18: Archivo de interfaz gráfica NED	53
Figura 4. 19: Declaración de librerías en archivo INI.....	53
Figura 4. 20: Declaración de parámetros de potencia y control.....	54
Figura 4. 21: Entorno de simulación y traza de paquetes.....	54
Figura 4.22: Tabulación de resultados	55
Figura 4. 23: Resultados obtenidos de simulación 3G	56
Figura 4. 24: Resultados obtenidos de simulación 3G	57
Figura 4. 25: Resultados obtenidos de simulación 3G	57
Figura 4. 26: Despliegue de resultados en simulador OMNET++ pestaña “Browse Data”	58
Figura 4. 27: Despliegue de resultados en simulador OMNET++ pestaña “Browse Chart”	59
Figura 4. 28: Despliegue de resultados en simulador NS3	60
Figura 4. 29: Tabulación comparativa de eficiencia en arquitectura D-RAN.....	62
Figura 4. 30: Tabulación comparativa de eficiencia en arquitectura C-RAN.....	62
Figura 4. 31: Tabulación comparativa de tráfico en arquitectura D-RAN.....	63
Figura 4. 32: Tabulación comparativa de tráfico en arquitectura C-RAN.....	64
Figura 4. 33: Tabulación comparativa de paquetes perdidos en D-RAN.....	64
Figura 4. 34: Tabulación comparativa de paquetes perdidos en C-RAN.....	65
Figura 4. 35: Tabulación comparativa de Jitter en arquitectura C-RAN	65
Figura 4. 36: Tabulación comparativa de throughput en arquitectura C-RAN.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Características entre diferentes proveedores y gestores desarrollados.	24
Tabla 3.2: Latitud y Longitud de RBS seleccionadas y BBU POOL	31
Tabla 3.3: Distancia y ubicación de RBS y BBU POOL	32
Tabla 3.4: Resumen parámetros de radio bases LTE actuales D-RAN	33
Tabla 3.5: Resumen de detalles y requerimientos LTE C-RAN	34
Tabla 3.6: Tabla comparativa parámetros actuales y diseñados	36
Tabla 3.7: Listado de equipos a emplearse	38
Tabla 4.1: Descripción del software de simulación a emplearse.	44
Tabla 4.4: Resumen de KPI Eficiencia en 3G y 4G.....	61
Tabla 4.3: Resumen comparativa de KPI.....	66

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. 1: Tabla resumen de parámetros de modulación OFDM y BW	75
Anexo 1. 2: Número máximo de AxC en CPRI versión 7	75
Anexo 1. 3: Tablas data bruta y tabulada de KPI Eficiencia.....	76
Anexo 1. 4: Tablas data bruta y tabulada de KPI Tráfico	76
Anexo 1. 5: Tablas data bruta y tabulada de KPI Pérdida de Paquetes.....	77
Anexo 1. 6: Tablas data bruta y tabulada de KPI Jitter.....	77
Anexo 1. 7: Tablas data bruta y tabulada de KPI THROUGHPUT	78
Anexo 1. 8: Datasheet BBU C-RAN.....	78

RESUMEN

El crecimiento exponencial que traen consigo las nuevas generaciones de telefonía móvil se enfoca en maximizar el tráfico, mejorando dramáticamente la experiencia de usuario respecto a los servicios y aplicaciones utilizadas. Para llevar a cabo estos objetivos la red necesita converger a un mayor ancho de banda, optimizar sus recursos y ofrecer mayores velocidades. Los suscriptores de una red móvil celular además del uso ilimitado a redes sociales, buscan ahora la transmisión y descarga en tiempo real de video en sus dispositivos; esto en su contraparte ejerce una presión insostenible en la RAN (red de acceso por radio) actual existente.

El presente trabajo tiene como objetivo evidenciar la mejora en los indicadores clave de rendimiento o KPI (Key Performance Indicator) de una o varias radiobases, al implementarse un plan de migración de arquitectura. Los datos entregados por los diferentes escenarios de simulación permiten demostrar los beneficios de migrar de una arquitectura tradicional de acceso por radio Distribuida (D-RAN) a una arquitectura moderna centralizada (C-RAN) de alta eficacia. Se opta por el intercambiador de Carapungo como sitio propuesto para la migración. Los requerimientos contemplados de hardware (equipos) y software (gestores) son descritos en detalle, haciendo especial énfasis en la interfaz común de radio pública (CPRI) y la velocidad dimensionada según los requerimientos. Los datos arrojados por la simulación en conjunto presentan una ganancia promedio global de 4,27%, pasando de una eficiencia en D-RAN del 93,45% a 97,72% en la arquitectura C-RAN. Esta ganancia considera que, para lograr una mejor eficiencia, la topología de red basa su procesamiento en las BBU centralizadas localizadas físicamente en un Data Center. El BBU Pool aplica las estrategias y algoritmos robustos necesarios para controlar parámetros tales como potencia de transmisión, asignación de usuarios y velocidades de datos. Las ganancias de eficiencia y capacidad de la agrupación coordinada centralizada superan ampliamente las prestaciones entregadas en una RAN distribuida.

ABSTRACT

The exponential growth brought by new generations of mobile telephony is focused on maximizing traffic, dramatically improving the user experience of services and applications. Therefore, to carry out these objectives, the network needs to converge to a higher bandwidth, optimize its resources and offer higher speeds. Users of a cellular mobile network, in addition to the unlimited use of social media, now seek video transmission and download experience in real time, this proves to be an unsustainable pressure on the current existing RAN (radio access network).

This technical degree project aims to demonstrate the improvement in the key performance indicators or KPI of one or more base stations, when implementing an architecture migration plan. The data provided by the different simulation scenarios allows to demonstrate the benefits of migrating from a traditional distributed radio access architecture (D-RAN) to a state of the art centralized architecture (C-RAN). The Carapungo interchange is chosen as the proposed migration site for study. The contemplated hardware (equipment) and software (virtual agents) requirements are described in detail, with special emphasis on the Common Public Radio Interface (CPRI) and the speed dimensioned according to its requirements. The data produced by the simulation show a global average gain of 4.27%, going from an efficiency in D-RAN of 93.45% to 97.72% in the C-RAN architecture. This gain considers that, to achieve better efficiency, the network topology will base its processing on centralized BBUs physically located in a Data Center. The BBU Pool applies the robust algorithms and strategies necessary to control parameters such as transmission power, user allocation and data rates. The efficiency and performance improvement of the coordinated pool are greater in advantages compared to a distributed RAN.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la mayoría de radiobases de comunicación celular en el Ecuador usan el modelo de arquitectura de Red de Acceso por Radio Distribuida (D-RAN). La configuración dentro de esta arquitectura RAN tradicional consiste en que cada sitio celular requiere su propia Unidad de Banda Base (BBU) dedicada, junto con la funcionalidad asociada y constante de energía, enfriamiento, enrutamiento y mantenimiento (Anna Tzanakaki, 2019). Las torres D-RAN están diseñadas para ser autónomas e independientes: cada una puede enviar, recibir, capturar y procesar comunicaciones por sí misma (Ericsson, 2019). Con el propósito de mejorar en gran manera los Indicadores Clave de Rendimiento (KPI) de una red es necesario un diseño que permita migrar a una arquitectura centralizada para manejar de mejor manera los recursos de las estaciones base como un conjunto y no solo como un sitio independiente.

El presente trabajo propone un plan de diseño basado en la nueva arquitectura de Red de Acceso por Radio Centralizada (C-RAN) en el sector del intercambiador de Carapungo, al norte de la ciudad de Quito. Un cambio a la arquitectura C-RAN puede hacer que las redes de acceso por radio sean más capaces, escalables, rápidas y más eficientes respecto al manejo de voz y datos. El plan de diseño divide la infraestructura de red tradicional en partes separadas que incluso cumplen con los requisitos de 5G, al mismo tiempo que se admiten las infraestructuras 2G, 3G y 4G ya existentes (Rehenuma, 2020).

El presente proyecto técnico abarca los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Se presenta el análisis realizado entorno al problema, la propuesta de solución, la justificación para la realización y los objetivos a cumplir del proyecto técnico de titulación.

Capítulo 2: Se detalla la recopilación de toda la documentación e información técnica necesaria para el desarrollo del proyecto de titulación, junto con la justificación teórica para la posterior selección de los elementos de diseño,

Capítulo 3: Se determina la ubicación y distancia de las radiobases y BBU Pool que en adelante serán el objeto de estudio. Se realizan cálculos de la velocidad de datos para CPRI y se enumeran los requerimientos de software y hardware resumidos en tablas para su mejor interpretación.

Capítulo 4: Se detallan los resultados obtenidos al realizar varias simulaciones en diferentes herramientas computacionales. Los escenarios arrojan data que al ser tabulada, interpretada y graficada avalan la efectividad de la migración de arquitecturas. Posterior a un análisis y comprobación de los resultados obtenidos, se obtiene las respectivas conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

Aunque simple, la arquitectura D-RAN presenta varios problemas para las telecomunicaciones, especialmente en términos de gestión del espacio y la capacidad. Tanto en el Ecuador como a nivel mundial la mayoría de las estaciones base celulares se desplegaron para cumplir con períodos de máxima capacidad para la región o sitio donde han sido instaladas. Sin embargo, los períodos pico de suscriptores van y vienen, por lo que a menudo existen periodos en los que la capacidad de procesamiento se subutiliza (Perrin, 2017). En la actualidad la demanda que las RAN deben satisfacer sobrepasa su capacidad de procesamiento. La combinación requerida de mayor ancho de banda a menores costos para las versiones avanzadas de 4G y 5G, podría no ser viable con la arquitectura actual, debido a que para las nuevas tecnologías las velocidades de datos a los dispositivos llegarán a estar en el orden de decenas de Gbit/s.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existen ciertos requerimientos que las empresas de telecomunicaciones deben cumplir para tener un margen de ganancia acorde al mercado mientras aumentan los beneficios que ofrecen a los usuarios. La arquitectura tradicional DRAN es muy costosa de instalar, expandir y mantener, teniendo un impacto significativo en los gastos de capital y operativos de las empresas de telecomunicaciones (Mojtaba Vaezi, 2017). Pero adicionalmente, las torres independientes ocupan mucho espacio y producen una gran huella digital en el planeta. La implementación de la nueva arquitectura RAN centralizada permite brindar una solución a los problemas actuales de escalabilidad, costo, operación y mantenimiento.

En el sector intercambiador de Carapungo existen diversos lugares donde se ha dado un aumento significativo de usuarios. La apertura de nuevos centros económicos y de comercio, como el centro comercial “Portal Shopping”, oficinas de “Yanbal”, supermercados “Santa Maria”, “Supermaxi”, cines, etc. han creado presión insostenible en la RAN del sector. Dentro de las distintas funcionalidades de una RAN, la que más sobresale es su característica de poder proporcionar la comunicación por radio y el acceso entre el equipo de usuario y la red de núcleo (CORE). Una RAN proporciona acceso por radio y ayuda a coordinar los recursos de la red a través de los

dispositivos inalámbricos que se conectan a ella (Rehenuma, 2020). Al ser un conciliador de varias avenidas principales de la ciudad, el sector intercambiador de Carapungo presenta períodos pico de suscriptores, sobre todo en horarios de 09h00 a 20h00. Al existir más suscriptores móviles concentrados en una misma región, incrementa también una alta demanda de ancho de banda y espectro de radio frecuencia en radiobases cercanas (Perrin, 2017). La arquitectura actual D-RAN ha probado no ser eficiente al satisfacer estas nuevas demandas y capacidad de procesamiento, ya que no permite compartir recursos entre BTS. Muchas veces, dentro de esta arquitectura la gestión del espacio y la capacidad necesarios en las estaciones base son subutilizados y presentan altos costos de mantenimiento. La implementación de la arquitectura C-RAN de parte de operadores de telefonía móvil, permitirá brindar a los usuarios mayor ancho de banda a menores costos (Nicola Carapellese, 2015). Un BBU pool (BBU centralizada) incluso permite satisfacer breves ráfagas de tráfico (burst traffic); al tener un diseño para la capacidad máxima de un conjunto de BTS en lugar de solo considerar la capacidad de un sitio celular individual. La agrupación física asegura que toda la infraestructura del centro de datos y los recursos de enrutamiento se utilicen de la manera más eficiente y con la menor cantidad de capacidad inactiva y desperdicio.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Analizar la migración de la arquitectura D-RAN a C-RAN en radiobases mediante la redistribución de recursos como ancho de banda, espectro de radiofrecuencia y potencia para el sector del intercambiador de Carapungo para el mejoramiento de infraestructura y transmisiones.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Establecer la ubicación y los requerimientos necesarios de un grupo de BBU de distintas radiobases del sector del intercambiador de Carapungo para el diseño de un plan de gestión migratorio de arquitectura.
- Determinar los indicadores clave (eficiencia, tráfico, disponibilidad, throughput y pérdida de paquetes) del BBU pool que comparte físicamente los

mismos elementos de infraestructura y transmisiones para obtener un aumento de ancho de banda en las BTS.

- Analizar el funcionamiento en la conexión entre las RRH y BBU remotas centralizadas mediante el protocolo CPRI empleando fibra oscura para modulaciones estándar WDM.
- Determinar una arquitectura RAN centralizada mediante la simulación de un BBU pool y la especificación del hardware necesario para una eficiente distribución de recursos en distintas BTS del sector intercambiador de Carapungo
- Simular distintos ambientes en diferentes tecnologías móviles tanto de arquitectura RAN centralizada como RAN distribuida para obtener los datos tabulados que permitan una evaluación de los KPI (eficiencia, tráfico, disponibilidad, throughput y pérdida de paquetes) de una BTS.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La creación de un nuevo diseño de arquitectura centralizada ofrece idealmente satisfacer la demanda de mayor ancho de banda disminuyendo los costos CAPEX (gastos de capital, activos existentes y activos fijos) y OPEX (gastos operativos necesarios para funcionar) de las empresas de telecomunicaciones (M.D. Ananth, 2016). Las inversiones en arquitecturas D-RAN pueden ser un gran derroche debido a cómo se construye y configura la red. Otra ventaja de tener una nueva arquitectura centralizada es que, en lugar de diseñar cada sitio celular individual para la capacidad máxima, los operadores pueden diseñar el grupo de BBU para la capacidad máxima de una región. Una arquitectura centralizada logra compartir el mismo espacio físico de Data Center, baterías, generadores de electricidad y fuentes de refrigeración. Las áreas con altas concentraciones de usuarios de la red provocan que una RBS se sobrecargue siendo necesario implementar más de una estación base en la misma área. El simple hecho de agregar más estaciones base aumenta el costo y puede provocar interferencias en la señal si no existe una cuidadosa coordinación (Guoqiang Zhang, 2009). La arquitectura C-RAN propone que las BBU se agrupen de forma centralizada

en un BBU pool para que el procesamiento y demás funciones de la BBU se lo realice en una oficina central. Este BBU pool permitirá organizar los recursos informáticos de una manera dinámica y escalable, es decir, los recursos se pueden utilizar de manera más efectiva con menos consumo de energía y además permitir el acceso a mayores cantidades de recursos cuando sea necesario. China Mobile, por ejemplo, ha demostrado hasta un 30 por ciento de aumento en el rendimiento de las BBU centralizadas. Las ganancias de rendimiento incluyen tasas más bajas de drop calls, así como mayores tasas de datos en los enlaces downlink (Perrin, 2017). Esta mejora del rendimiento se evidenció incluso en la conexión de las RRH a BBU centralizadas de solo dos estaciones base. Por lo tanto, entre más estaciones base se unan al BBU pool los beneficios y el performance mejoraran en porcentajes mayores al 30%, permitiendo que los puertos del enrutador pasen de BBU subutilizados a ser un grupo de BBU muy utilizados según lo requieran las demandas del tráfico.

CAPÍTULO 2

MARCO CONCEPTUAL

2.1. SITIO DE ESTUDIO

El intercambiador de Carapungo, ubicado en la intersección de la vía Panamericana Norte y la avenida Simón Bolívar, fue construido por la EPMMOP con el objetivo de presentar fluidez en el tráfico de entrada y salida del sector norte de la ciudad de Quito. El intercambiador de Carapungo es un paso obligatorio para los usuarios de Llano Chico, Llano Grande, Calderón, Malchinguí, Guayllabamba, Cayambe y de todas las provincias del norte del país. En el sector de Carapungo circulan diariamente cerca de 89.000 vehículos siendo una de las arterias principales de la ciudad (Jácome, 2019). En el sector del intercambiador de Carapungo también se ubican varios centros de comercio, siendo el más grande del norte de Quito y de los valles: el Centro Comercial Portal Shopping, el cual consta de tiene 7 pisos con 192 locales y parqueaderos. El Portal Shopping reciben diariamente entre 40 y 45000 personas y las zonas aledañas albergan alrededor de 700 mil habitantes.

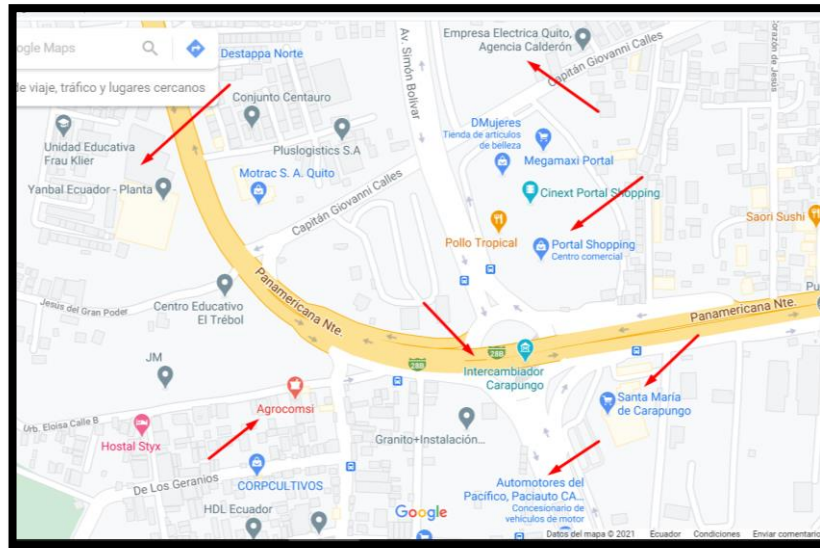
Figura 2.1: Sector Intercambiador de Carapungo.



Fuente: (Pallero, 2019)

En el intercambiador de Carapungo coexisten también otros diferentes centros de comercio como un Supermercado Santa María, agencias y oficinas de “Yanbal”, tiendas agrónomas Agrocomsi, oficinas de Automotores del Pacífico y la Agencia de Empresa Eléctrica Quito que debido a los diferentes servicios que prestan generan una gran afluencia de usuarios en toda la zona diariamente. Las Figuras 2.1 y 2.2 muestran la ubicación de los diferentes centros de negocio en el Intercambiador de Carapungo.

Figura 2.2: Centros de negocios en el sector del Intercambiador de Carapungo.



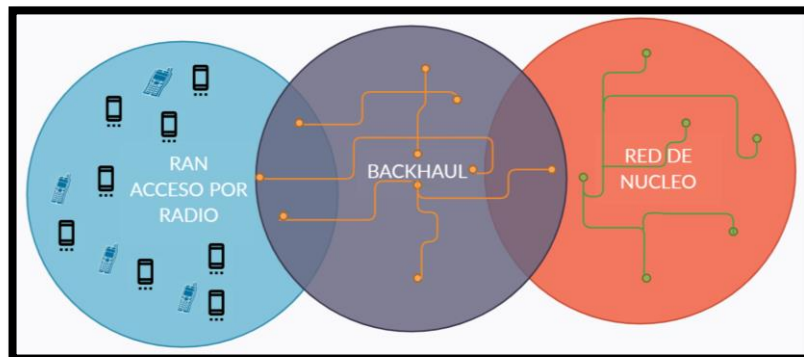
Fuente: (Maps, s.f.)

En centros de comercio importantes tanto los empleados de escritorio como la fuerza laboral móvil pueden mantenerse en comunicación constante gracias a las redes inalámbricas y plataformas móviles, creando oportunidades para aumentar la eficiencia, la productividad y los ingresos de diferentes negocios. (Sheard, 2017)

2.2. ESTRUCTURA DE UNA RED MÓVIL

La arquitectura general de un extremo a otro de una red móvil se compone de tres grandes partes: Red de acceso por radio (RAN), Red de Backhaul y red de núcleo o CORE. La red de Backhaul conecta a la RAN con la red de núcleo. (Hajo Bakker, 2017)

Figura 2.3: Red móvil

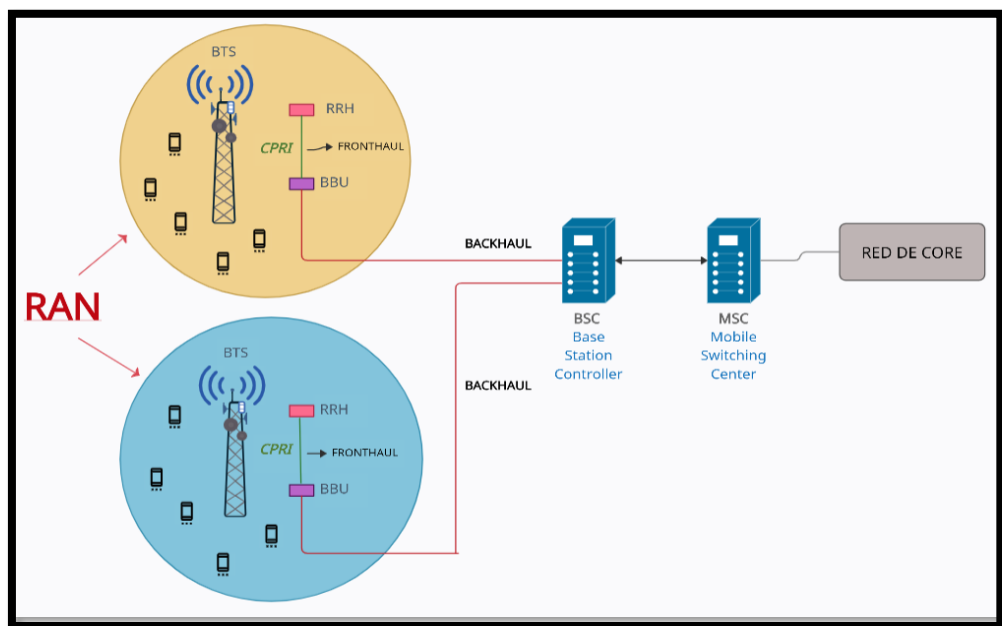


Elaborado por: Adriana Abril

2.2.1. Red de Acceso por Radio (RAN)

La Red de acceso por radio es la parte de un sistema de telecomunicaciones que implementa una tecnología de radio para acceder a la Red núcleo (CORE) y a las redes externas como PSTN (Red Telefónica Pública Conmutada) o Internet. (Hajo Bakker, 2017). La RAN proporciona el acceso al enviar la voz y datos hacia y desde el equipo del usuario (UE) cooperando también de manera vital a coordinar los recursos de la red a través de los UE que se conectan a ella (Rehenuma, 2020). La RAN reside entre el UE y la red de núcleo. Los datos de los suscriptores son recibidos por una unidad de radio y posteriormente transformados a formato digital por una unidad de banda base (BBU) para finalmente llegar al núcleo de la red. Como se muestra en la Figura 2.4, para GSM la RAN está compuesta por estaciones base de radio (BTS) y controladores de estaciones base (BSC). En UMTS el componente principal de la RAN es la RNC (Controladora de la Red de Radio) a la que se van a conectar todos los Nodos B y para LTE se tiene una IPRAN en la que existirá una conmutación de paquetes IP para la prestación de servicios. Adicionalmente dentro de la RAN se encuentran arreglos de antenas y la red de Backhaul. Para el público en general la parte más visible de la RAN es la radio base, y la cantidad de área de cobertura lo definen las capacidades de las antenas, el hardware y el software RAN de cada generación.

Figura 2.4: Componentes de la Red de Acceso por Radio para GSM.



Elaborado por: Adriana Abril

Cada radio base que compone una red celular tiene dos funcionalidades:

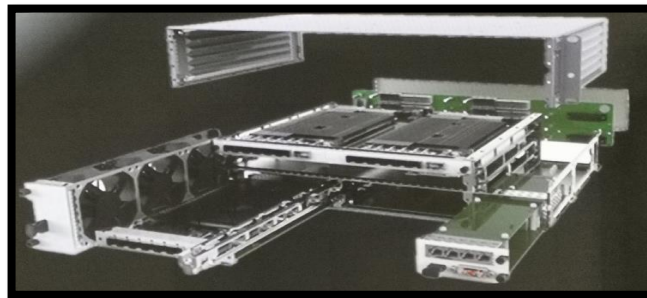
- a) **Funcionalidad de radio:** responsable del procesamiento digital, filtrado de frecuencia y amplificación de potencia (Fa-Long Luo, 2016).
- b) **Funcionalidad de procesamiento de banda base:** la unidad de procesamiento de la BBU se encarga de la codificación, modulación y transformada rápida de Fourier (FFT). (Fa-Long Luo, 2016)

Las operadoras de redes móviles tienen una variedad de opciones para proporcionar más cobertura, capacidad y servicios a sus abonados. (Francesco Musumeci, 2016), decidiendo el tipo de arquitectura que considere más conveniente desplegar según requiera la región, área y usuarios. Tradicionalmente cada BTS estaba diseñada de forma individual con soluciones que resolvían únicamente las necesidades del propio sitio celular. Sin embargo, es más conveniente adoptar una arquitectura que separe algunas funciones en subsistemas diferentes. (Mojtaba Vaezi, 2017). Es por esto que en la actualidad la RBS se divide en dos tipos separados de módulos: Unidad de Banda Base (BBU) y el Cabezal de Radio Remoto (RRH).

2.2.2. Unidad de Banda Base (BBU)

Una BBU es una unidad de procesamiento de los sistemas de telecomunicaciones que, se encarga de procesar señales de banda base, es decir señales que son transmitidas en su frecuencia original. La banda base se refiere al rango de frecuencia original de una señal de transmisión antes de que sea convertida a un rango de frecuencia diferente. Las señales en banda base no sufren ningún proceso de modulación a la salida de la fuente que las origina y se las puede codificar mediante códigos de banda base. (techterms, 2011).

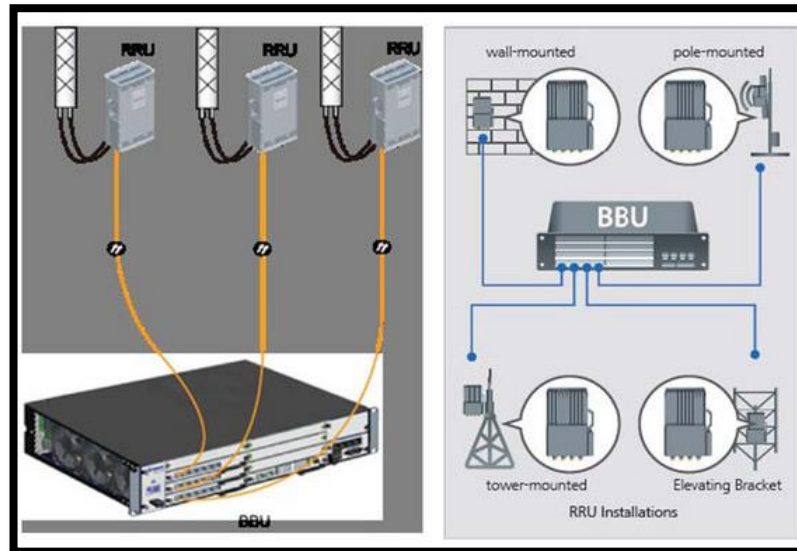
Figura 2.5: Diseño modular de la Unidad de Banda Base (BBU).



Fuente: (Sheard, 2017)

La BBU es responsable de la comunicación a través de la interfaz física y se encarga de procesar las señales de voz para la transmisión y recepción del UE (Tuyen X. Tran, 2017). Como se ilustra en la Figura 2.5 la BBU posee un diseño modular, un tamaño pequeño, tiene un bajo consumo de energía y es de fácil implementación para el personal técnico. Generalmente la BBU se coloca en la sala de equipos bajo o cerca al mástil de la BTS, y se conecta con la RRH a través de fibra óptica, como se observa en la Figura 2.6. Los ingenieros mecánicos y los profesionales de las telecomunicaciones utilizan dispositivos BBU para mejorar la conexión entre los equipos de comunicación. Las BBU se fabrican con un diseño modular que les permite realizar múltiples funciones y encajar fácilmente en equipos físicos estándar (Fitzgibbons, 2019).

Figura 2.6: Conexión y ubicación de una BBU en una radio base



Fuente: (Fitzgibbons, 2019)

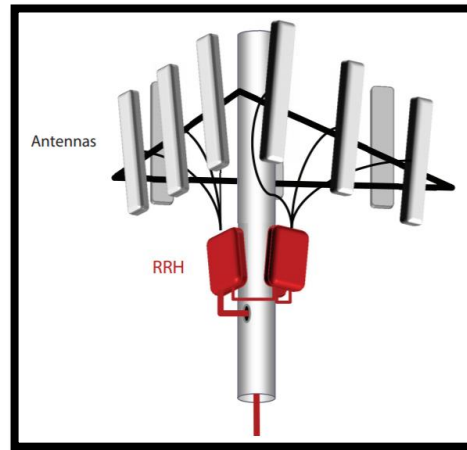
2.2.3. Cabezal de Radio Remoto (RRH)

A veces también referido como unidad de radio remota (RRU). Es un transceptor de radio remoto que encierra al circuito de radio frecuencia de una BTS y en la mayor parte de los casos se encuentra ubicado en la parte superior del mástil de la torre celular. El RRH generalmente se monta cerca de la antena para reducir las pérdidas de la línea de transmisión y se conecta a la BBU mediante fibra óptica

El proceso más importante que el RRH realiza es la conversión de la señal óptica en señal eléctrica y viceversa. Esto significa que una BTS puede enviar y recibir datos

directamente a la parte superior de la torre a través de fibra óptica. El RRH a su vez convierte la señal óptica en señal eléctrica y viceversa usando CPRI (Common Public Radio Interface).

Figura 2.7: Ubicación del RRH en el mástil de una radio base



Fuente: (Inzunza, 2015)

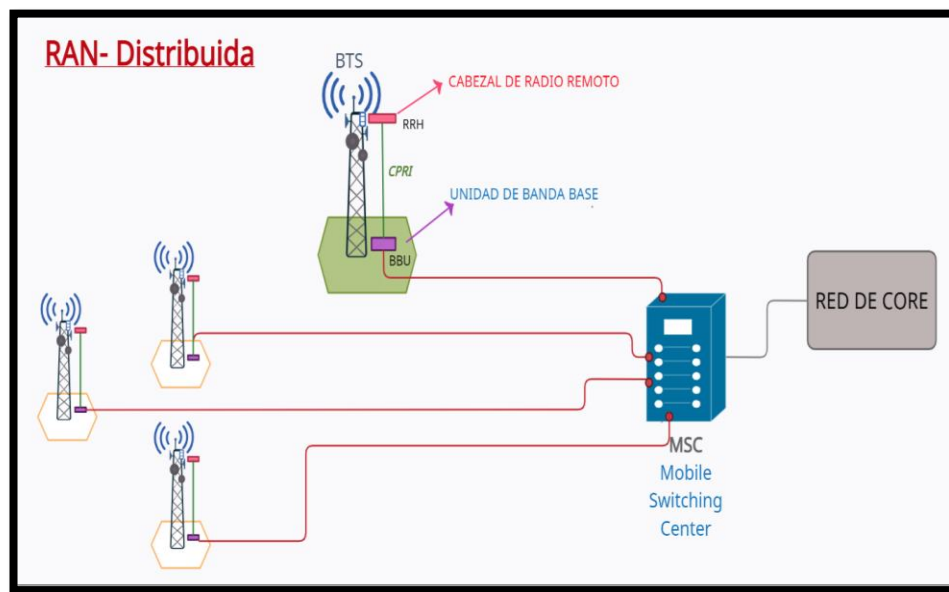
En el proceso de transmisión el RRH convierte y amplifica la señal digital a RF y en el proceso de recepción recibe la banda de señal deseada de la antena y la amplifica (techplayon, 2019). La parte de transmisión generalmente consta de un DAC, un mezclador, un amplificador de potencia y filtros. La parte de recepción consta de un filtro, un amplificador de bajo ruido, un mezclador y un ADC. La BBU es responsable de la comunicación a través de la interfaz física con la red central, mientras que el RRH realiza las funciones de transmisión y recepción de RF. (Kawanishi, 2021)

2.2.4. Red de Acceso por Radio Distribuida (D-RAN)

La arquitectura D-RAN es la configuración principal y tradicional usada por la mayor parte de empresas de telecomunicaciones, en donde tanto la funcionalidad de procesamiento de banda base como la funcionalidad de radio se las realiza dentro de la BTS. Cada torre D-RAN es una estación base independiente que contiene tanto una BBU como uno o varios RRH instalados en sitio. Se dice que son estaciones base *independientes* porque están diseñadas para ser autónomas respecto a funciones como enviar, recibir, capturar y procesar comunicaciones por sí misma. Las BBU y RRH dedicadas en cada estación garantizan que pueda funcionar por sí misma e interactuar con el centro de conmutación central (MSC) cuando sea necesario (Perrin, 2017). La arquitectura D-RAN es *distribuida* porque para proporcionar conectividad de voz,

SMS, multimedia y datos, distribuye la potencia de procesamiento necesaria para mantener la red en funcionamiento en muchas torres de radio independientes. Los sitios celulares D-RAN generalmente se instalan dentro de un edificio de varios pisos para satisfacer necesidades de suministro de energía estable y aire acondicionado. La estación base D-RAN tiene una interfaz de retorno al MSC, terminando en sistemas de red central de conmutación de circuitos y / o conmutación de paquetes. En esta configuración el RRH y la BBU están ubicadas en la estación base y todas en conjunto están conectadas al MSC (lambdagain, 2018).

Figura 2.8: Elementos de la arquitectura D-RAN.



Elaborado por: Adriana Abril

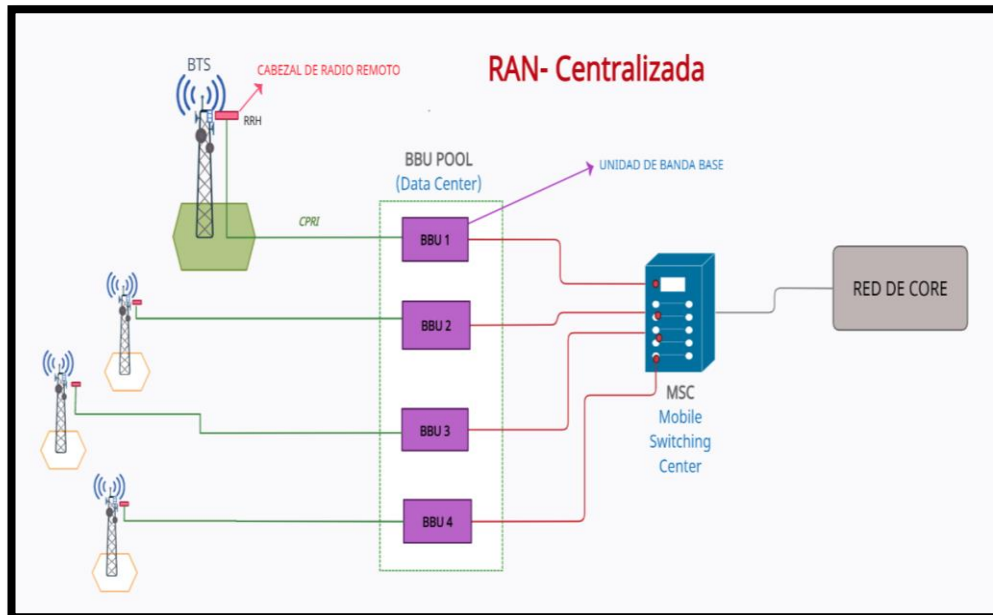
La estación base está situada en la base de una torre y conectada a la antena ubicada en la parte superior de la torre mediante cable coaxial o fibra óptica. Para más información sobre las interfaces que conectan las diferentes estaciones base revisar el Anexo 9. Desafortunadamente, con la avalancha exponencial de datos que ahora se generan, envían y reciben, D-RAN está comenzando a mostrar su antigüedad (Madrazo, 2018).

2.2.5. Red de Acceso por Radio Centralizada (C-RAN)

La red de acceso de radio centralizada o C-RAN, fue introducida por primera vez por el Instituto de Investigación Móvil de China en 2010 en un esfuerzo por ir creando un camino futuro de arquitectura de computación en la nube para soportar una red móvil 5G (Perrin, 2017). La arquitectura C-RAN divide la infraestructura de red tradicional

basada en células, en partes separadas para ahora contar con un procesamiento centralizado realizado en gran parte en un Data Center.

Figura 2.9: Arquitectura C-RAN



Elaborado por: Adriana Abril

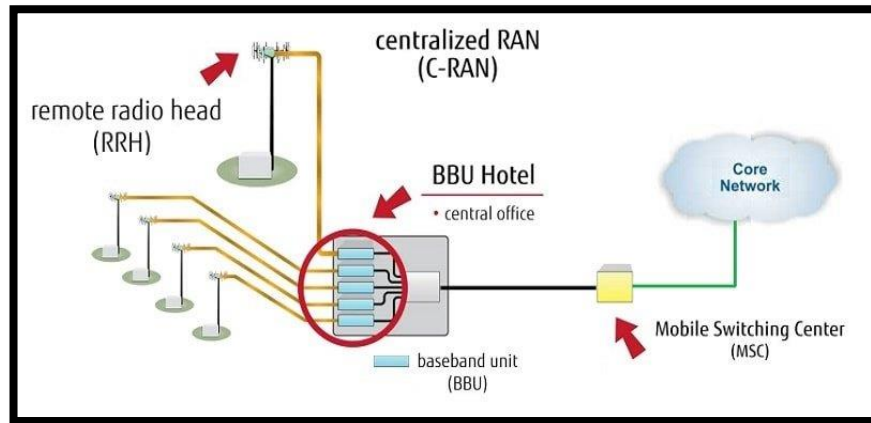
Como se observa en la Figura 2.9, dentro de la arquitectura C-RAN, la estación base se encuentra dividida: las RRH permanecen en el sitio celular, mientras que las BBU se agregan a una oficina física centralizada, a veces llamada BBU Pool o BBU Hotel. Este concepto rompe la conexión 1: 1 entre RRU y BBU, potenciando en gran manera el cálculo de banda base y trayendo funciones clave al Data Center. Además, al agregar juntas todas las BBU, las empresas de telecomunicaciones pueden organizar mejor sus recursos informáticos, lo que reduce los costos de mantenimiento mientras que los recursos físicos se comparten de una forma mucho más flexible y escalable.

- **Ventajas de BBU centralizado en C-RAN (agrupación de BBU)**

La centralización de las BBU conlleva varias ventajas, incluida una mejor distribución de recursos, una mejor implementación de servicios en el borde de la red y la posibilidad de utilizar tecnologías avanzadas que requieren una alta potencia de procesamiento (Figura 2.10). Con la agrupación de BBU, será posible el procesamiento conjunto y el intercambio de radio cooperativo. En la red tradicional, las BBU están ubicada lejos de la oficina central y los costos de su mantenimiento son altos. Pero, a medida que las BBU se acercan a la oficina

central, potencialmente pueden colocarse dentro de Data Centers seguros. (Philippe Chanclou, 2013)

Figura 2.10: Arquitectura C-RAN.



Fuente: (lambdagain, 2018)

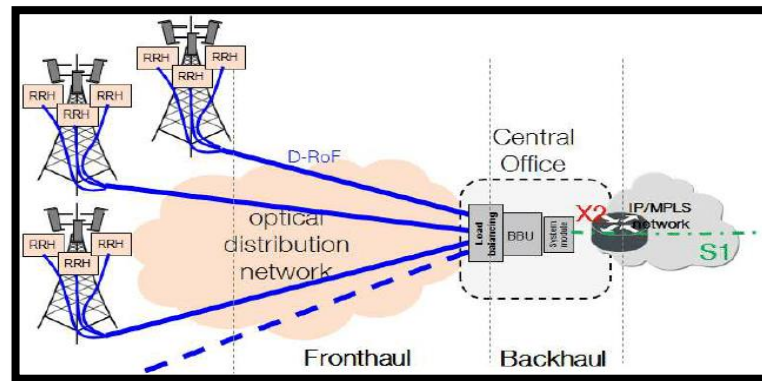
La arquitectura C-RAN tiene las siguientes características que son distintas de otras arquitecturas celulares:

- a) **Implementación centralizada a gran escala:** permite que muchos RRH se conecten a un grupo de BBU centralizado (Huawei, 2019).
- b) **Compartición de recursos:** Cualquier BBU puede hablar con cualquier otra BBU dentro del grupo de BBU (Huawei, 2019).

2.2.6. Grupo BBU (BBU Pool)

Un grupo de BBU implica colocar una o más BBU en una única ubicación física, para que de una manera centralizada se puedan compartir los recursos a las distintas radiobases. Al formar un BBU pool los recursos de banda base se pueden compartir entre varias estaciones base; logrando una reducción significativa en los recursos computacionales generales debido a la ganancia por multiplexación (Mohamed Shehata, 2018). Siempre que el RRH esté conectado a cualquier BBU en un BBU pool, puede usar los recursos del grupo.

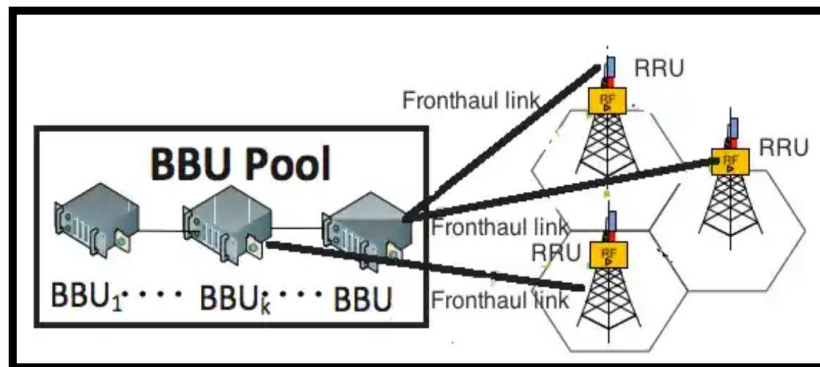
Figura 2.11: Grupo de BBU en un Data Center u Oficina Central.



Fuente: (Philippe Chanclou, 2013)

El BBU pool se encuentra en un sitio centralizado y se compone de múltiples BBU que tienen altas capacidades de almacenamiento y computación. Si la carga de la red sigue creciendo solo se necesitará actualizar el hardware del grupo de BBU para adaptarse a la mayor capacidad de procesamiento (Mugen Peng, 2016). Las BBU individuales pueden apilarse juntas para asignar recursos en función de la demanda dinámica de los usuarios conectados a los RRH (Rehenuma, 2020).

Figura 2.12: Conexión de un BBU pool con el RRH en distintas radiobases.



Fuente: (Salman, 2016)

2.2.7. Manejo de recursos (Pooling)

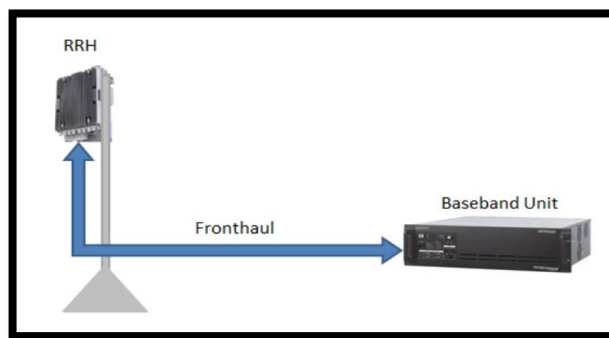
La hostilidad naturaleza de los canales de comunicación inalámbrica y los insuficientes recursos de radio frecuencia exigen que exista un correcto manejo y una adecuada gestión de recursos de radio (RRM). El objetivo es utilizar los recursos limitados del espectro de radiofrecuencia y la infraestructura de la red de radio de la manera más eficientemente como sea posible. La interferencia que experimenta un usuario no es generada por todas las estaciones base, sino solo por las que utilizan los mismos

recursos de radio (es decir, existe interferencia cuando hay reutilización de recursos). Por tanto, es importante determinar qué puntos están interfiriendo con una comunicación dada (Busson, 2018).

2.3. INTERCONEXIÓN RRH Y BBU (FRONTHAUL)

La BBU y el RRH están interconectadas por una interfaz pública común de radio (CPRI), también conocida como enlace frontal (Fronthaul). como se muestra en la Figura 2.4. El RRH funciona como transceptor para los usuarios móviles, y la BBU procesa las llamadas y reenvía el tráfico a la red de CORE a través del Backhaul. El RRH proporciona la interfaz para la fibra y realiza procesamiento digital, conversión digital a analógica, conversión analógica a digital, amplificación de potencia y filtrado. La distancia entre BBU y RRH se puede ampliar a 40 km, aunque esto daría lugar a una limitación del procesamiento y un retraso de propagación (Rehenuma, 2020).

Figura 2.13: Interconexión RRH y BBU.



Fuente: (techplayon, 2019)

2.3.1. Interfaz de radio pública común (CPRI)

CPRI es una especificación o protocolo de transporte dedicado que habilita la comunicación entre la BBU y RRH mediante el Fronthaul de la red. En una RAN, la RRH procesa señales de radio digitales, **transmite** y convierte las señales para la BTS (Antonio de la Oliva, 2016). Cuando la RRH **recibe** información de señal de las antenas, se comunica con la BBU utilizando la Interfaz CPRI. La BBU toma la información de la señal y la procesa para que pueda reenviarse a la red central. Los datos regresan al usuario de forma inversa. El Fronthaul de la arquitectura C-RAN requiere un portador CPRI con alto ancho de banda y latencia ultrabaja (JDSU, 2015). El protocolo CPRI es capaz de separar la señal de frecuencia de banda de base y la

banda de radiofrecuencia. Los fabricantes de estaciones base pueden utilizar CPRI como un protocolo gratuito y común ya que es desarrollado abiertamente por un consorcio de fabricantes de equipos originales que incluye a Nokia, Huawei Technologies, Ericsson, etc.

Figura 2.14: Cable CPRI para conexión entre RRH y BBU



Fuente: (Teltech, 2020)

2.3.2. Modulación y multiplexación

La modulación es el proceso de codificar información de una fuente de mensaje de una manera que sea adecuada para la transmisión. Esto se logra alterando las características de una señal tratando en lo posible que exista la menor tasa de error. Mientras mayor sea la modulación nos permiten codificar más bits por símbolo. La señal modulada es luego transmitida y en el otro extremo, el receptor demodula la señal recibida recuperando la señal de información original (Carritech, 2018). Las radios celulares utilizan una forma de modulación de portadora llamada QAM, (Modulación de Amplitud en Cuadratura), la cual modula la amplitud y la fase de la portadora. Esto se logra creando dos formas de onda llamadas forma de onda de fase (I) y la forma de onda de cuadratura (Q). Las estaciones base digitalizan la señal en banda base y la transmiten a través de un cable de fibra óptica a el RRH montado en la torre. Este flujo de datos de banda base digitalizado se conoce como datos IQ y es encapsulado en un protocolo conocido como CPRI. (Murphy, 2015).

2.3.3. Fibras oscuras

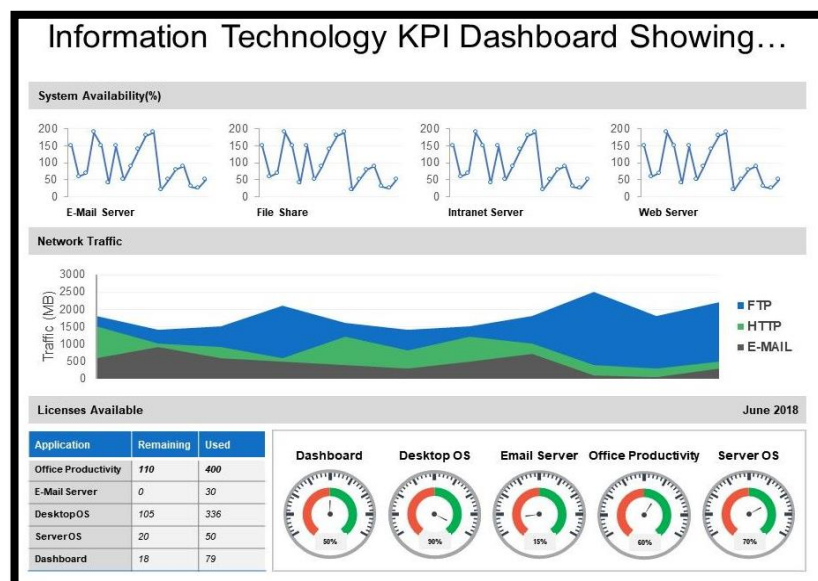
Es la fibra óptica tendida que no transmite pulsos de luz a través de ella, es decir no es usada por operadores de telecomunicaciones y se le considera la mejor opción en cuanto al acople con CPRI debido a que su encapsulación disminuye en gran manera la latencia y el jitter (Madrado, 2018). Como se mencionó previamente (2.3.1) el protocolo CPRI permite una mayor distancia de separación entre los componentes de

la arquitectura, lo que mejora drásticamente la economía de la construcción de una red. Las fibras oscuras son cables de fibra que no transmiten información, pero están ya instalados (en el suelo y el océano), listos para ser utilizados. Las redes de fibra oscura tienen una gran capacidad, brindando escalabilidad, baja latencia, seguridad, fiabilidad y disponibilidad. La multiplexación DWDM, ha sido clave para lograr que la fibra oscura sea producto muy usado en las redes celulares (LANDMARK, 2021)

2.4. INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO (KPI)

Los KPI consisten en señalizadores o métricas para medir el desempeño y monitorear la eficiencia de un proceso de manera tal que sirvan de guía para alcanzar un objetivo y cuantificar el progreso de este alcance (Cruz García Gabriela, 2009). En un escenario ideal cuando los KPI están bien seleccionados, ayudan a los administradores de red a tomar decisiones proactivas para garantizar que se cumplan los niveles de servicio acordados (SLA). Una subida en los KPI es la consecuencia directa de haber tomado algún tipo de acción para garantizar que se cumplan los niveles de servicio acordados (SLA). Cada empresa de telecomunicaciones dispone sobre qué métricas de red se realizará el monitoreo y no hay un estándar definido, sin embargo, los siguientes se pueden enlistar entre los KPI de red más comunes: rendimiento, salud operacional, latencia, disponibilidad, Jitter (technicgroup, 2021).

Figura 2.15: Cuadro de mando para información de KPI de la red



Fuente: (technicgroup, 2021)

2.5. TECNOLOGÍA DE ACCESO POR RADIO (RAT)

La RAN gestiona directamente la transmisión y recepción de radio hacia y desde dispositivos móviles. El estándar que define la arquitectura de red y especifica funciones y protocolos asignados a nodos RAN y dispositivos móviles se denomina Tecnología de acceso por radio (RAT). Las estaciones base se colocan en instalaciones denominadas celdas, la cobertura de una región se divide en hasta tres celdas, también llamadas sectores. Un sitio de celda típico consiste en una torre sobre el cual se instalan antenas direccionales y un gabinete donde el resto del equipo de la BS está instalado. Las interfaces públicas más establecidas en el mercado son CPRI y OBSAI que inicialmente fueron definidas para una conexión de corto alcance de BBU-RRH. CPRI es actualmente la solución más adoptada comercialmente.

ESTANDAR CPRI

Para cumplir con las exigencias del Fronthaul de la arquitectura C -RAN, es necesario una correcta transmisión de la señal CPRI de alta velocidad entre la BBU y el RRH. El enfoque de fibra oscura con multiplexación WDM (por división de longitud de onda) cumple estas exigencias debido a la madurez y desarrollo actual alcanzado por los equipos WDM. CPRI permite utilizar diferentes anchos de bits dependiendo de los requisitos de la interfaz aérea y si la señal está en el enlace ascendente o descendente.

- **Mapeo de bits CPRI IQ**

Un enlace CPRI transporta señales de RF digitalizadas (portadoras de antena) en un formato de banda base complejo. Cada muestra tiene un componente en fase (I) y en cuadratura (Q). El protocolo CPRI se creó específicamente para manejar los datos de la señal en este formato (Antonio de la Oliva, 2016).

- **Multiplexación WDM con fibra oscura**

La multiplexación WDM es recomendada para hacer protecciones redundantes para el Fronthaul de C-RAN (Sheng Liu, 2015).

- **Velocidad de datos de la señal CPRI**

Las tasas de CPRI admitidas son: 2.458Gbps, 3.072Gbps, 4.915Gbps, 6.144Gbps y 9 Gbps, es decir velocidades altas de datos entre la BBU y el RRH. Para la

arquitectura C-RAN se requiere que estas velocidades sean elásticas y varíen con el tráfico de usuarios real (Sheng Liu, 2015).

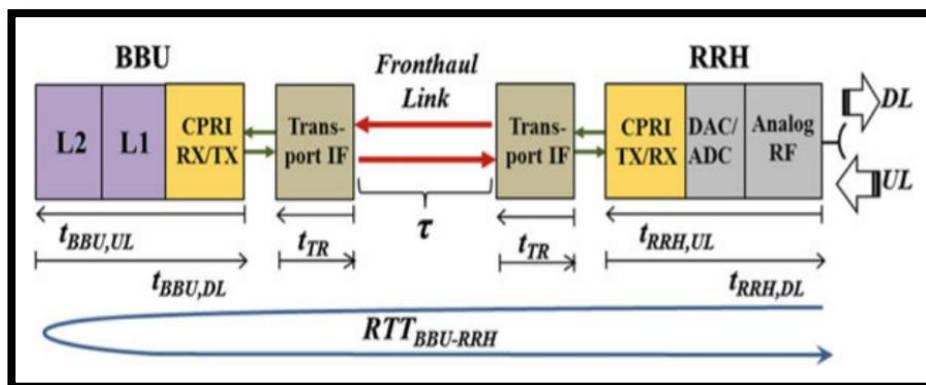
AUMENTO DE ANCHO DE BANDA/ TASA DE BITS

La velocidad de bits de los Fronthaul debe ser alta y constante. (Antonio de la Oliva, 2016). Al agregar más antenas en un sitio celular aumenta también el flujo de datos en el orden de los Gb/s. Para el correcto muestreo de señales de banda base se toma en cuenta las componentes I-Q con aproximadamente 10-20 bits por muestra. Dentro de la arquitectura C-RAN es recomendable que las tasas de bits aumenten de forma elástica según lo requiera la carga de tráfico, pero en general se puede describir que para el enlace ascendente UL (UPLINK) se puede utilizar entre 4 y 20 bits y 8 y 20 bits en el enlace descendente DL (DOWNLINK)

- **Presupuesto de latencia (RTT)**

Los estándares RAT especifican condiciones de tiempo estrictas y límites a la latencia de la BTS que se produce por el procesamiento interno de tramas de radio. La latencia está fijada por el estándar, en CPRI la latencia requerida debe ser ultrabaja de 3ms, tiempo total de ida y vuelta entre la BBU y el RRH. La Figura 2.16 muestra de mejor manera el presupuesto de latencia.

Figura 2.16: RTT presupuesto de latencia. Tiempo entre Rx y Tx completa de la trama de datos.



Fuente: (Francesco Musumeci, 2016)

Los retrasos en el procesamiento de la BBU y el RRH dependen de la implementación de hardware y software. Entonces una vez que se recibe el paquete de datos en la trama de radio número i , la BTS debe devolver la correspondiente indicación ACK / NACK en la trama número $(i + 3)$ (Anna Tzanakaki, 2019). El

presupuesto de latencia para el tiempo de ida y vuelta BBU-RRH debe respetar lo indicado en la Ecuación (2.1).

$$RTT_{BBU-RRH} = 2\tau + t_{RRH,UL} + t_{BBU,UL} + t_{BBU,DL} + t_{RRH,DL} + 4t_{TR} \leq 3ms$$

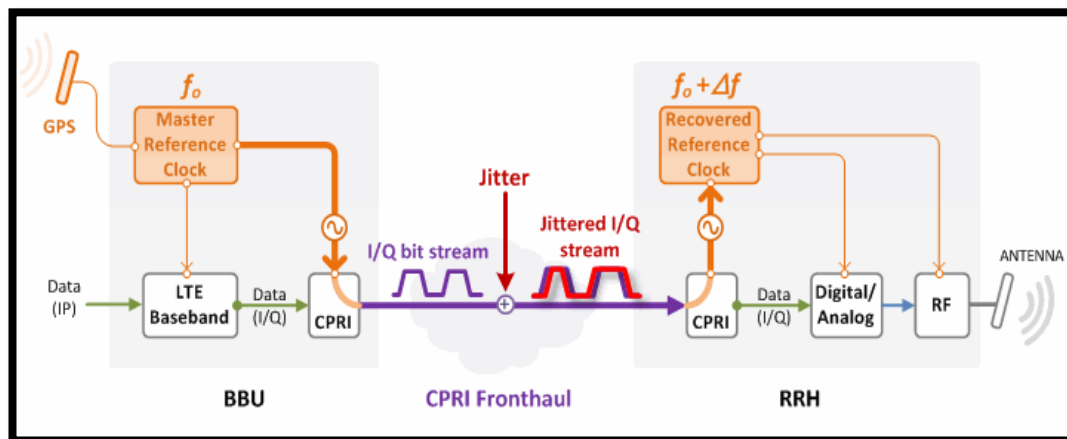
Ec. (2.1)

Donde t_{TR} es el tiempo de procesamiento introducido por el nodo final de transporte, el cual depende de la tecnología de transporte específica que se va a utilizar en el diseño del Fronthaul. En el UL y en el DL los tiempos de procesamiento internos de la BBU y el RRH no son valores universales ya que dependen de la capacidad de los equipos implementados por el proveedor (Antonio de la Oliva, 2016).

SINCRONIZACIÓN PRECISA ENTRE BBU Y RRH

Para cumplir con los requisitos impuestos por las normas RAT sobre la precisión y estabilidad de la interfaz de radio, las BBU y RRH deben sincronizarse con precisión entre sí. La señal de banda base digitalizada es muy sensible a errores de bits recibidos (BER) y a desajustes o variaciones de la señal de reloj. En la arquitectura D-RAN la BBU y el RRH poseen un reloj colocado en cada una de ellas. En la arquitectura C-RAN el Fronthaul transporta los datos de banda base en ambas direcciones, así como también la señal de reloj, generada en la BBU hacia el RRH.

Figura 2.17: Recuperación de la señal de reloj en referencia al flujo de bits I/Q recibidos en el RRH.



Fuente: (Shin, 2014)

Como se puede observar en la Figura 2.17 el jitter se produce cuando hay un retraso de tiempo en el envío de datos, como consecuencia de una congestión en la red o a cambios de ruta. El jitter aumenta efectivamente el ruido de las señales transmitidas,

lo que puede interferir en el cumplimiento de los requisitos estrictos de QoS. CPRI especifica que el BER no debe ser mayor a 10^{-12} y que el jitter introducido por el enlace CPRI debe ser inferior a 0,002 (ppm).

MEJORES TÉCNICAS DE GESTIÓN DE RECURSOS

La gestión de recursos se puede dar de 2 formas: gestión de recursos computacionales (CRM) y gestión de recursos de radio (RRM). (Rehenuma R. , 2020)

- **Pooling dinámico**

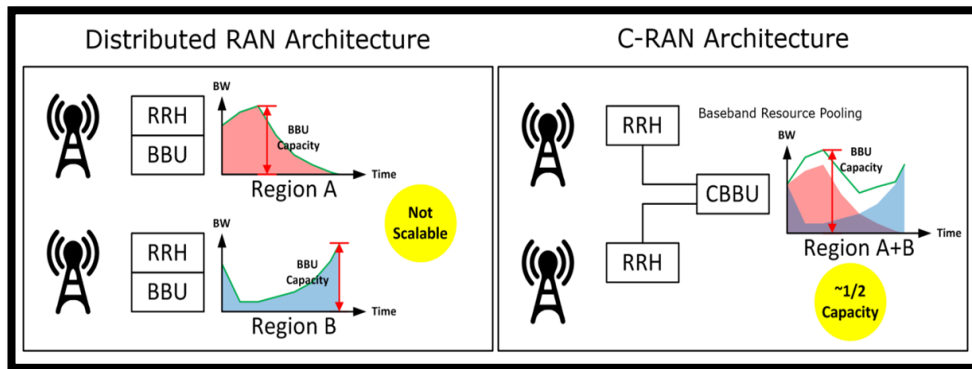
Varios dispositivos fueron diseñados para compartir sus recursos de hardware o software y al implementar funciones en menos dispositivos aumenta el rendimiento de la RAN y el QoS. La agrupación de recursos puede ser de dos tipos: estática o dinámica. La agrupación pooling **estática** se refiere al procesamiento fijo realizado en un solo dispositivo, en lugar de replicarlo en muchos dispositivos separados y generalmente utiliza hardware dedicado. La agrupación es estática, porque estas funciones se asignan de forma fija al hardware, en la etapa de diseño, como se puede observar el esquema de red izquierdo de la Figura 2.18. La agrupación pooling **dinámica** consiste en asignar recursos bajo demanda. Es decir, el uso de recursos se adapta a la carga reservando más recursos para las celdas de alta carga con respecto a las de baja carga. En este escenario el consumo de RAN se adapta a la carga de tráfico de la red incluso pudiéndose hacer diferenciación por tiempo de adaptación. Por ejemplo, mediante la reconfiguración lenta del pooling (orden de minutos u horas) es posible adaptarse a tiempos previsibles periódicos en los que las variaciones de la carga de tráfico ocurren en períodos diarios o semanales. Este hecho puede notarse de mejor manera en el esquema de red derecho de la Figura 2.18, donde la región A y B se encuentra bajo el manejo de un BBU pool. Esto demuestra que para una mejor distribución de recursos y gestión de tráfico en la red se deben usar técnicas más precisas con mejores algoritmos computacionales y de radio. (Francesco Musumeci, 2016)

- **Ahorro de energía**

Se espera una mayor reducción del consumo de energía mediante el pooling dinámico ya que cuando la carga de tráfico de algunas células es baja, se pueden compartir menos recursos y el resto de los recursos se pueden liberar y poner en

"modo de suspensión", reduciendo así el consumo de energía. Como se puede observar en los esquemas de la Figura 2.18 se necesitan pocos elementos para escalar la capacidad RAN en la arquitectura centralizada, dando como resultado el ahorro del gasto CAPEX (Perrin, 2017).

Figura 2.18: Comparación del manejo dinámico de recursos de banda



Fuente: (Perrin, 2017)

2.6 QoS dentro del escenario C-RAN

La arquitectura centralizada propone algoritmos para asignar bloques de recursos teniendo en cuenta el retardo máximo, restricciones del escenario centralizado y la calidad del canal. Para la nueva arquitectura C-RAN se requieren algoritmos robustos que permitan la adecuada distribución de los recursos de radio disponibles para cada usuario. Para la mejor selección de algoritmos se usan datos estadísticos en términos de parámetros de Calidad de Servicio (QoS) como retraso promedio, tasa de pérdida, rendimiento total, rendimiento promedio y tiempo de procesamiento, lo que demuestra la eficiencia del algoritmo propuesto (Liqun Zhao, 2013).

- **Bloque de recursos (RB)**

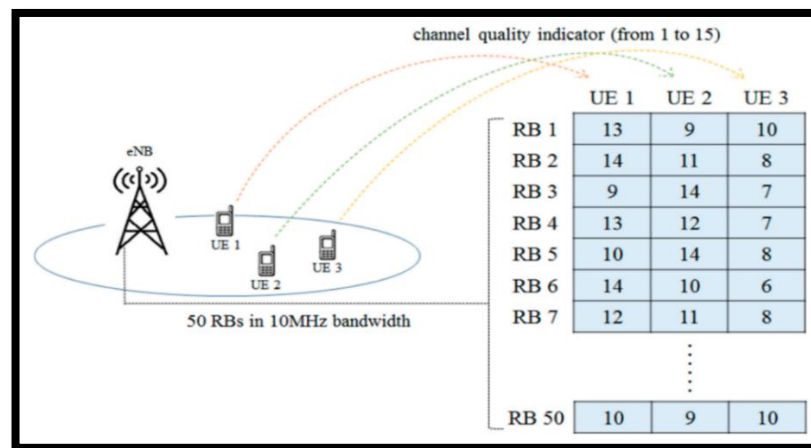
Es la unidad más pequeña de recursos que se puede asignar a un usuario. En la Figura 2.19 se observa la distribución de bloques de recursos para 3 UE. En el dominio de la frecuencia las unidades se pueden expresar en número de subportadoras o RB (keysight, 2021).

- **Rendimiento de radio mejorado**

El rendimiento de radio de una RAN involucra a la tasa de bits promedio y la calidad de servicio (QoS) entregado a los clientes, depende en gran medida de las

técnicas de capacidad de procesamiento de la señal, utilizadas para hacer frente al canal inalámbrico. Mejorar el rendimiento de radio mediante el aumento de la eficiencia del espectro, requiere de esquemas de intercambio de datos del UE y las diferentes BTS. La centralización de BBU pone a disposición una latencia prácticamente nula y una capacidad de procesamiento extremadamente alta entre todas las BBU proporcionando la transmisión y recepción coordinada multipunto (CoMP).

Figura 2.19: Distribución de RB para 3 usuarios



Fuente: (Ren-Hung Hwang, 2019)

- **Redefinición de CPRI**

Para reducir la tasa de datos de CPRI, se implementaría una redefinición de la señal de CPRI. La idea básica de la redefinición de CPRI es mover un conjunto parcial de funciones de la capa física al lado del RRH para reducir la velocidad de datos requerida entre la BBU y el RRH. Se implementa un nuevo bloque de funciones llamado selección de bloque de recursos (selección RB) que solo selecciona los RB programados (es decir, ocupados) para ser transmitidos, mientras que los bloques de recursos no utilizados no se transmiten. De esta manera, el número de bloques de recursos transmitidos varía con el cambio de las cargas útiles del tráfico. Debido a la selección RB, la velocidad de datos entre la BBU y RRH ahora es elástica y varía con el tráfico de usuarios real, lo opuesto al caso tradicional en el que el flujo I-Q es constante incluso cuando no hay tráfico real (keysight, 2021).

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE LA ARQUITECTURA RAN CENTRALIZADA



En el presente capítulo se detalla el diseño de la arquitectura física y lógica que comprende la red de acceso por radio centralizada (C-RAN). Se describen los requerimientos del sitio, así como el Software y el Hardware necesarios para una futura implementación de la Arquitectura RAN Centralizada. Se determinan los componentes más importantes requeridos en la nueva arquitectura y los equipos posibles recomendados para una exitosa migración en el sitio Intercambiador de Carapungo.

3.1. REQUERIMIENTOS DE LA ARQUITECTURA RAN CENTRALIZADA.

3.1.1. Requerimientos de Software

Los requerimientos de software dentro de un BBU Pool de la arquitectura RAN centralizada obedecen en gran manera a los equipos de software usados durante la implementación y los gestores que los diferentes proveedores de dichos equipos hayan desarrollado. Dependiendo de las negociaciones realizadas y lo estipulado en los contratos, los proveedores llevan a cabo actividades de monitoreo de los equipos, tanto de forma remota como en sitio. Para ejecutar esta actividad se han desarrollado gestores y aplicaciones que presentan la salud operacional del equipo, alarmas activas, alarmas históricas, etc. En la Tabla 3.1 se resumen algunos de los gestores de monitoreo ofrecidos por diferentes proveedores de servicios de telecomunicaciones.

Tabla 3.1: Características entre diferentes proveedores y gestores desarrollados.

Proveedor	Reseña	Logo
HUAWEI	NCE: Network Cloud Engine. Es amigable con el usuario, realiza tareas de control y análisis, mostrando el estado real de la red y los enlaces de los diferentes dispositivos que componen la topología. (Huawei, 2021)	
NOKIA	NetAct: producto para la gestión de redes de telecomunicaciones que proporciona funcionalidades de procesamiento de datos 2G y 3G para monitoreo de fallos, alarmas, rendimiento y seguridad (IBM, 2021).	

ORACLE	Tekelec: proveedor de soluciones para la gestión y monitoreo de equipos, interfaces y vlans. Visualiza tráfico y ayuda con el cumplimiento de SLA acordados. Fue comprado por Oracle (Teketec, 2012)	
Qlik	Qlik: permite recopilar, procesar y extraer datos de una red para que posteriormente sea tabulada e indique estadísticas para conocer las recurrencias de eventos presentados en las redes móviles y tomar acción (QLIK, 2021)	
Ericsson	Cradlepoint: desarrolla rutas, gateways y software para redes inalámbricas, utilizando señales inalámbricas 4G y 5G para conectar usuarios móviles (Ericsson, 2020)	

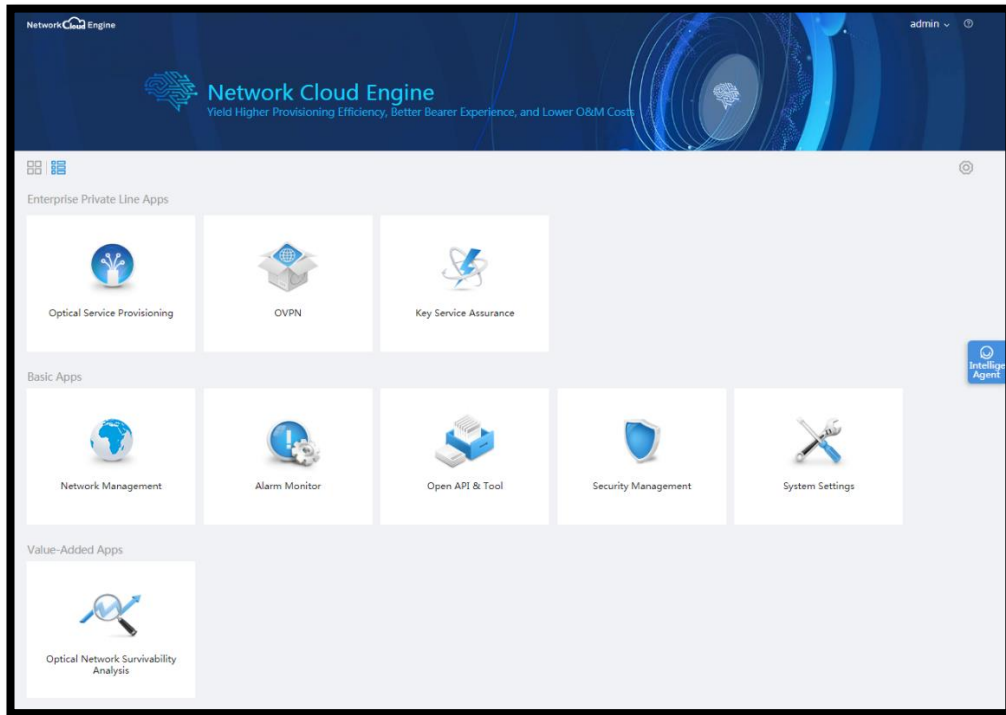
Elaborado por: Adriana Abril

Dentro de los diferentes gestores se puede realizar reinicio de equipos/tarjetas y ejecutar troubleshootings que pueden ayudar a la recuperación de un equipo sin necesidad de enviar personal técnico al sitio físico para la revisión. Como se muestra en la Tabla 3.1, existen varios tipos de gestores y cada uno presenta diferentes funcionalidades para brindar visualización del estado de los equipos o enlaces de la red. Es importante tener en cuenta la importancia de contar con la virtualización en tiempo real del funcionamiento de diferentes procesos ya que esto ayuda a garantizar que los recursos del grupo de BBU se puedan asignar dinámicamente a la estación base (por ejemplo, módulos de función 4G/3G/2G) de acuerdo con la carga de la red.

El adecuado manejo de una red móvil engloba la gestión del rendimiento, gestión de la configuración, gestión de la seguridad, gestión de fallos y gestión de la carga (Tabbane, 2018). Para satisfacer estas necesidades se ha elegido el gestor NCE de Huawei que, (a nivel de datos de usuario, datos de control y datos de gestión) muestra las funcionalidades completas de un sistema de gestión de red. El gestor NCE permite visualizar y gestionar las fallas, el rendimiento, la seguridad y las configuraciones de una central o estación base perteneciente a una operadora. NCE permite adicionalmente la visualización de redes, automatización de servicios y supervisión de

actividades de Operación y Mantenimiento (O&M). La Figura 3.1 permite visualizar las opciones del gestor posterior al inicio de sesión.

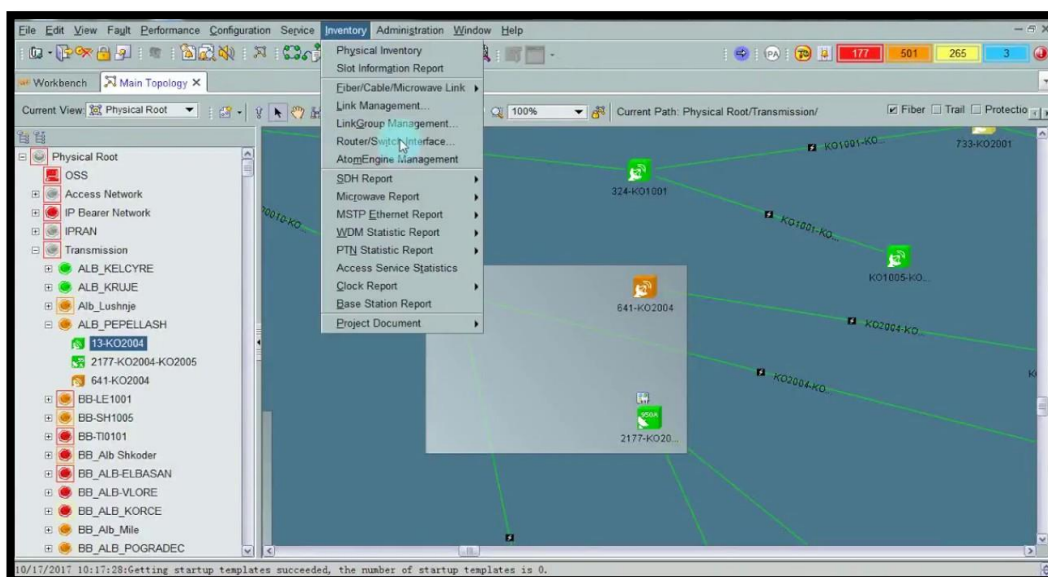
Figura 3.1: Layout del gestor Network Cloud Engine NCE con usuario “admin”



Fuente: (Huawei, 2021)

Dentro de la opción Network Management se podrán observar las nuevas topologías de la arquitectura centralizada y los elementos que la componen como se ilustra en la Figura 3.2. Adicionalmente se podrán evidenciar la conexión física y lógica de equipos visualizando el estado de los enlaces y niveles ópticos reales.

Figura 3.2: Opción Main Topology y opciones de configuración



Fuente: (VOP, 2017)

Se pueden obtener datos estadísticos que permitan reconocer problemas recurrentes en la red y ejecutar los troubleshootings necesarios. Dentro de la opción Alarm Monitor se visualizan las alarmas actuales e históricas de cualquier elemento de la red (Figura 3.3). Se pueden realizar diferentes layouts que presenten a varios elementos o varias radiobases. Se tiene opciones para separar y aislar a un elemento de la red en caso de que presente problemas de funcionamiento o amenazas de seguridad.

Figura 3.3: Topología de anillo para 6 BTS con protección y redundancia.

The screenshot shows the 'Alarm Monitor' section of the iMaster NCE interface. It features a table of 'Current Alarms' with columns for 'Operation', 'Severity', 'Alarm ID', 'Name', 'Alarm Source', 'Location Info', 'Other Information', 'Occure...', 'First Occured (NT)', and 'Last Occured (NT)'. The 'Name' column is highlighted with a red box, and the table contains multiple rows of alarm data, all with a 'Major' severity level.

Operation	Severity	Alarm ID	Name	Alarm Source	Location Info	Other Information	Occure...	First Occured (NT)	Last Occured (NT)
Major	Major	7938	7938				3	2020-10-30 10:00:00	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				3	2020-10-30 10:00:00	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				2	2020-10-30 10:00:00	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				3	2020-10-30 10:00:00	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				3	2020-11-14 10:00:01	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				3	2020-10-30 10:00:00	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				4	2020-11-03 10:00:00	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				3	2020-11-14 10:00:01	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				4	2020-10-30 10:00:00	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				7	2020-10-30 10:00:00	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				5	2020-10-30 10:00:00	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				1	2020-12-07 10:00:01	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				3	2020-10-30 10:00:00	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				4	2020-11-12 10:00:01	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				6	2020-10-30 10:00:00	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				4	2020-10-30 10:00:00	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				3	2020-10-30 10:00:00	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				2	2020-12-02 10:00:01	2020-12-07 10:00:00
Major	Major	7938	7938				4	2020-11-03 10:00:00	2020-12-07 10:00:00

Fuente: (Huawei, 2021)

3.1.2. Requerimientos de hardware

Dentro de cualquier diseño para un sitio celular se contemplan las existentes normativas y estándares actuales, tanto para protocolos a seguir, como para equipos a implementarse en cualquier arquitectura. Los requerimientos pueden variar dependiendo de la elección de los diferentes proveedores de cada empresa de telecomunicaciones. A continuación, se enlistan los requerimientos básicos del Hardware, necesarios para la migración o implementación de la arquitectura RAN Centralizada:

ESTANDAR CPRI

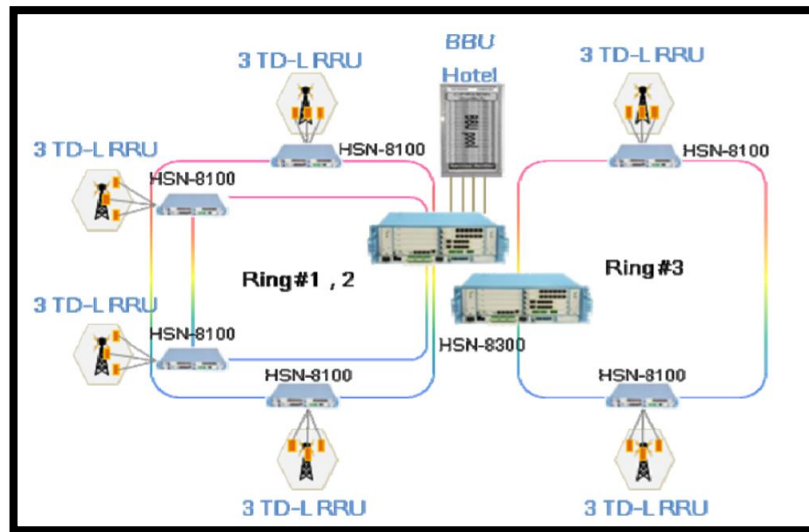
- **Mapeo de bits CPRI IQ**

Dado que la señal CPRI comprende una señal I-Q que es esencial para el procesamiento de banda base, los requisitos de retardo y fluctuación para el transporte frontal de C-RAN son estrictos. El retardo debe ser inferior a 120-200 micro minutos, mientras que el jitter debe ser inferior a 0,002 partes por millón (ppm). (Antonio de la Oliva, 2016).

- **Multiplexación WDM con fibra oscura**

Se recomienda topología de anillo, donde cada anillo debe poder conectar de 4 a 16 nodos de acceso, y cada nodo de acceso necesita poder reenviar 3-6 portadoras (señales que transportan la información) En la mayoría de los casos, las configuraciones prácticas CPRI se realizan de forma punto a punto (Sheng Liu, 2015).

Figura 3.4: Topología de anillo para 6 BTS con protección y redundancia.



Fuente: (Sheng Liu, 2015)

3.2. ESTRUCTURA DE LA ARQUITECTURA PROPUESTA

Las RAN han ido cambiando desde la primera generación 1G hasta la generación 4G que revolucionó a la RAN basándola en paquetes IP y ya no en circuitos, e incluso las RAN ahora ofrecen más funcionalidades que antes integrando llamadas de voz, mensajería de texto y transmisión de video y audio a los UE. Debido a que LTE es la RAN actual con más despliegue y prestaciones para sus usuarios, el presente proyecto enfoca su diseño y cálculos principalmente en integraciones LTE.

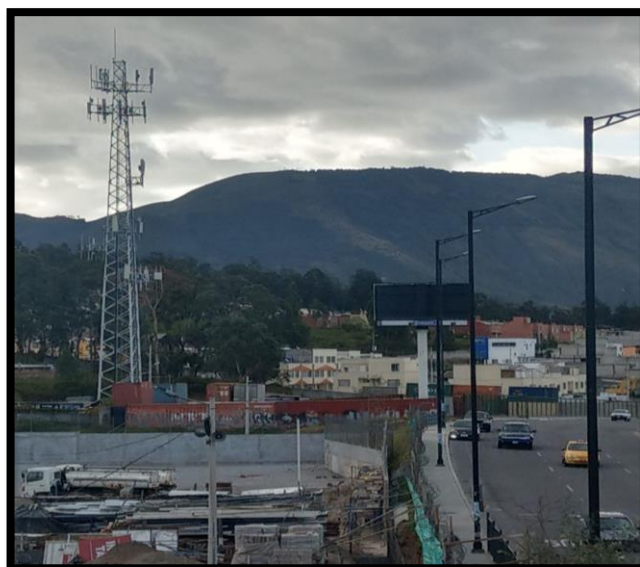
3.2.1. Requerimientos del sitio

Una vez expuestas las generalidades de la arquitectura RAN centralizada, se analizan los requerimientos para su implementación, los cuales se enumeran a continuación:

- a) **Determinación y localización de las estaciones que intervienen en el proceso de migración.**

Después de realizar un recorrido físico en un rango de 360° alrededor del sector del Intercambiador de Carapungo (manteniendo un margen de distancia de 5000 metros a la redonda) se han podido reconocer dos estaciones base cercanas dentro del sector, las cuales pertenecen a la misma operadora de telecomunicaciones para facilidad de agrupación (Figura 3.5 y Figura 3.5).

Figura 3.5: Recorrido de BTS cercanas al Intercambiador de Carapungo



Elaborado por Adriana Abril

Figura 3.6: RBS1 Y RBS2 en el Intercambiador de Carapungo.



Elaborado por Adriana Abril

Como se observa en la Figura 3.6 la primera radiobase se encuentra dentro de las instalaciones de la empresa TRANSELECTRIC diagonal a la entrada del C.C. Portal Shopping; y la segunda radiobase se encuentra en la terraza del C.C. Portal Shopping.

La Figura 3.7 muestra el Data Center elegido que se encuentra ubicado en el sector de Carretas, es un centro de datos con servicios de housing de Categoría TIER III el cual cuenta con 180 racks dentro de dos centros de cómputo.

Figura 3.7: Data Center sector Carretas.



Fuente: (Dialoguemos, 2017)

Figura 3.8: BTS cercanas al Intercambiador de Carapungo.



Fuente: (Maps, s.f.)

b) Etiquetado de las estaciones

Las estaciones base de ahora en adelante se las denomina RBS1 y RBS2 respectivamente. En la Figura 3.9, la Tabla 3.2 y la Tabla 3.3 se indica un resumen de las distancias y sus ubicaciones.

Tabla 3.2: Latitud y Longitud de RBS seleccionadas y BBU POOL

Etiquetado	Latitud [grados decimales]	Longitud [grados decimales]
RBS1	-0.105953	-78.4575
RBS2	-0.10811	-78.4581
BBU POOL (Data Center)	-0.1200113	-78.4739

Elaborado por: Adriana Abril

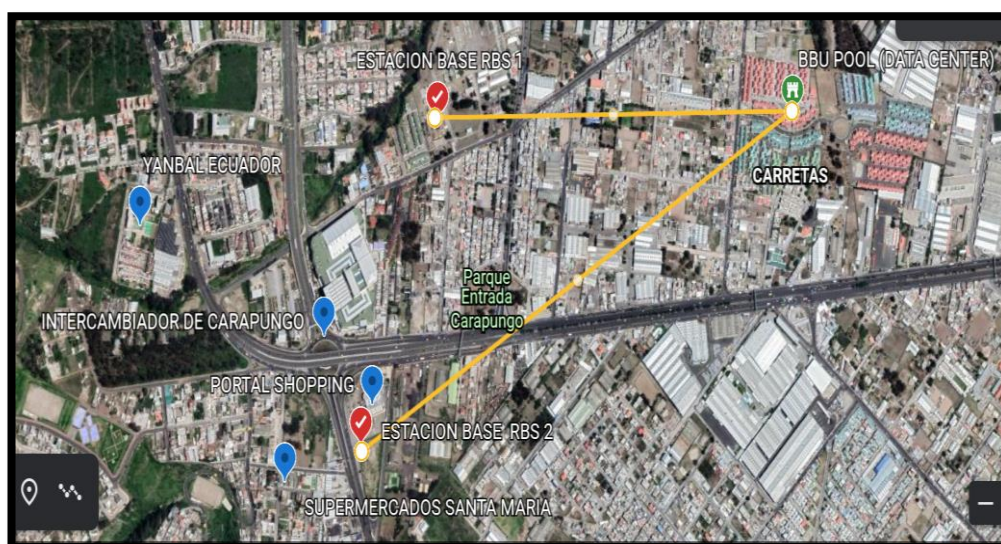
Tabla 3.3: Distancia y ubicación de RBS y BBU POOL

Etiquetado	Distancia[m]	Ubicación	Nombre
BBU POOL –RBS1	1000m	Empresa TRANSELECTRIC	RBS1
BBU POOL – RBS2	1400m	PORTAL SHOPPING	RBS2
BBU POOL (Data Center)	-	Sector CARRETAS	BBU POOL

Elaborado por: Adriana Abril

Las diferentes radiobases del sector fueron ubicadas bajo estudios del departamento de diseño y despliegue de red de las empresas de telecomunicaciones siguiendo parámetros de arreglos de antenas, y dimensionados para el tráfico máximo del sitio en el que van a operar (Pablo González-Brevis, 2011). El dimensionamiento obedece a la demografía poblacional del sitio y estadísticas de diferentes usuarios que circulan a diario por el sector, teniendo presente el pico máximo de tráfico que estos generan.

Figura 3.9: BTS cercanas al Intercambiador de Carapungo.



Fuente: (Maps, s.f.)

El primer paso para la migración de la arquitectura D-RAN a la arquitectura C-RAN será la reubicación de las BBU de la RBS1 y la RBS2 al Data Center en Carretas (BBU pool) situado a 1 Km y 1,4 Km respectivamente. En los casos ilustrados en las Figuras 3.8 y 3.9 las distancias entre el BBU POOL y la RBS son relativamente pequeñas, en comparación con el alcance que una arquitectura centralizada puede ofrecer (10 Km).

En segunda instancia se conecta el RRH de la RBS1 y la RBS2 a su respectiva BBU reubicada en el Data Center de Carretas. Al formar este Fronthaul se debe tener en cuenta los requerimientos de CPRI previamente analizados en la sección anterior.

Actualmente el RRH y la BBU están conectados mediante fibra óptica al igual que los Nodos B evolucionados (eNode B/ eNB) que se encuentran conectados mediante la interfaz X2 en un enlace punto a punto. La realidad de una red móvil a nivel del Ecuador es que es “multivendor”, es decir combina componentes de varios proveedores. Para que la red funcione correctamente la interfaz X2 se vuelve esencial, especialmente para gestionar la interferencia entre las radiobases y para que no existan problemas de compatibilidad con tecnologías 2G, 3G y 5G. (Philippe Chanclou, 2013) El RRH se puede conectar a la BBU mediante una fibra óptica monomodo dedicada, utilizando CPRI a una distancia de 2000 metros usando los conectores/puertos SPF de los equipos intervenidos. Para que CPRI funcione correctamente la fibra debe estar conectada en el puerto correcto de la BBU y el RRH y no de forma cruzada; se debe verificar que los módulos SPF de la longitud de onda se instalen correctamente. En el lado del RRH se debe asegurar las conexiones, la tasa de error de bit acordada junto con la latencia y comprobar el rendimiento del cableado (certificaciones).

CPRI se asemeja a un traductor que habla tanto idiomas analógicos como digitales; esta interfaz multiplexa mucha información (datos de usuario, datos de control, datos de gestión y sincronización) y es por esto que para su diseño es vital respetar las restricciones de latencia, Jitter y sincronización. En caso de una retransmisión, la latencia tiene un impacto directo en la experiencia del usuario. Otro factor importante a tener en cuenta es la disponibilidad de recursos de fibra en el sitio de la implementación. El intercambiador de Carapungo al ser un sitio cercano a un Centro Comercial consta con la posibilidad de implementar su red óptica con fibras oscuras. Una vez que se ha cumplido con todos los requerimientos mínimos y básicos se procede a ofrecer el servicio (Revisar el TSS de la RBS1 en el Anexo 10)

c) Determinación de los umbrales necesarios en los parámetros a considerar

En la Tabla 3.4 se indican los detalles y requerimientos que actualmente cumplen las radio bases que brindan el servicio LTE presentes en el país y la Tabla 3.5 presenta los requerimientos básicos necesarios a tener en cuenta para la adecuada migración de la arquitectura D-RAN a la arquitectura C-RAN en un medio físico LTE.

Tabla 3.4: Resumen parámetros de radio bases LTE actuales D-RAN

PARAMETROS	REQUERIMIENTOS	DESCRIPCION / DETALLE
------------	----------------	-----------------------

Tx BW(Btx)	15 MHz	Ancho de banda del canal de 1,25 hasta 20 MHz.
Frecuencia de muestreo (f_s)	$f_s = 23.04$ MHz	f_s define la temporización y sincronización de las tramas CPRI
Modulación	QSPK, 16QAM, 64QAM	Para generaciones 3.5G y 4G LTE
Espaciado de canal	6 x 3.84 MHz	Nsc = 12 subportadoras (15 KHz/subportadora)
FPGA DE CPRI	M= 15 bits	M = bits usados en la cuantificación de la señal.
CPRI	#6	CPRI opción 6 puede llevar 5 AxC (Antenna-Carrier) a 15 MHz
Codificación	8B/10B	Tx de bits en líneas de alta velocidad
Velocidad de datos CPRI (Mb/s)	4915.2 Mb/s	CPRI Versión 6
Técnica de Acceso al Medio	DL= OFDMA UL= SC-OFDMA	En ambas técnicas los datos están codificados en múltiples subportadoras para minimizar los efectos del desvanecimiento
Muestra de trama LTE	I + Q	16 bits I + 16 bits Q = 32 bits (incluida la sobrecarga de control CPRI)
Usuarios	200 por sector	Se toma la estadística actual máxima de usuarios (media de 600) en horas picos (12:00 pm) dentro de áreas urbanas o sitios densamente poblados.

Elaborado por: Adriana Abril

Tabla 3.5: Resumen de detalles y requerimientos LTE C-RAN

PARAMETROS	REQUERIMIENTOS	DESCRIPCION / DETALLE
Tx BW(Btx)	20 MHz	Ancho de banda del canal de 1,25 hasta 20 MHz.
Frecuencia de muestreo (f_s)	$f_s = 30.72$ MHz	f_s define la temporización y sincronización de las tramas CPRI
Modulación	16QAM, 64QAM	Para generaciones 3.5G y 4G LTE
Espaciado de canal	8 x 3.84 MHz	Nsc = 12 subportadoras (15 KHz/subportadora)
FPGA DE CPRI	M= 15 bits	M = bits usados en la cuantificación de la señal.
CPRI	#7	CPRI opción 7 puede llevar 8 AxC (Antenna-Carrier) a 20 MHz
Codificación	8B/10B	Tx de bits en líneas de alta velocidad
Velocidad de datos CPRI (Mb/s)	9830.4 Mb/s	Cálculos desarrollados en la sección ii)
Primer Símbolo	2208 muestras	Cada ranura lleva 7 símbolos OFDM.
Otros símbolos	2192 muestras	Tsymbol= 66.67 us
Técnica de Acceso al Medio	DL= OFDMA UL= SC-OFDMA	En ambas técnicas los datos están codificados en múltiples subportadoras para minimizar los efectos del desvanecimiento

Muestra de trama LTE	I + Q	16 bits I + 16 bits Q = 32 bits (incluida la sobrecarga de control CPRI)
Usuarios	500-1500	Se toma la estadística actual máxima de usuarios (media de 1000) en horas picos (12:00 pm) dentro de áreas urbanas o sitios densamente poblados.

Elaborado por: Adriana Abril

La Tabla 3.4 proporciona un buen punto de partida para dimensionar redes Fronthaul en escenarios C-RAN teniendo en cuenta que:

- LTE permite la flexibilidad del espectro donde el ancho de banda del canal se puede configurar desde 1,25-20 MHz.
- En LTE, el espaciado de canales es de 15 kHz. Por tanto, el período del símbolo es $1/15 \text{ kHz} = 66,7 \mu\text{s}$. Un canal de 20 MHz podría usar 1024 subportadoras. La modulación se da según las necesidades de velocidad.
- La señal de radio LTE primero es muestreada y posteriormente cuantificada. El término M se refiere al número de bits usados en el proceso de cuantificación. Para una mejor eficiencia de capacidad el FPGA de CPRI considera $M=15$. La frecuencia de muestreo $f_s=30.72 \text{ MHz}$ define el reloj principal de las tramas CPRI, es decir regulariza la temporización y sincronización y el diseño de red CPRI gira en torno a la frecuencia de muestreo (Francesco Musumeci, 2016).
- Una trama CPRI se crea cada 10 ms y lleva la muestra digital de una trama LTE completa. Cada trama LTE tiene una duración de 10 ms, ya que se transmite 10 subtramas de 1ms cada una. Cada subtrama consta de 2 ranuras de 0.5ms y cada ranura lleva 7 símbolos OFDM con $T_{\text{symbol}}= 66.67 \mu\text{s}$.
- 3G y LTE tienen la misma sincronización de reloj para teléfonos de múltiples tecnologías
- El término N_{sc} denota el número de subportadoras ocupando el ancho de banda. El demodulador 89600 VSA LTE actualmente solo admite RB que tienen 12 subportadoras. Si $N_{\text{sc}} = 12$ subportadoras (15 KHz/subportadora) que se agrupan en bloques de recursos (180 kHz), entonces dependiendo de la transmisión de diferentes anchos de banda se puede tener de 6 a 100 RB.

La Tabla 3.6 permite visualizar de mejor manera los parámetros a tomar en cuenta en la migración, en primera instancia todos los requerimientos ITU del CPRI diseñado deben ser cumplidos para las nuevas distancias BBU-RRH (Tabbane, 2018). Todos los

parámetros expuestos en la Tabla 3.5 serán utilizados (en la sección d) para el cálculo del tráfico en el Intercambiado de Carapungo. El nuevo diseño promete mejores niveles de desempeño aumentando la velocidad de datos y el número de suscriptores que pueden conectarse. Al cumplir con los requisitos expuestos en la Tabla 3.5 se satisface las demandas actuales del sitio.

Tabla 3.6: Tabla comparativa parámetros actuales y diseñados

PARÁMETROS	LTE D-RAN	LTE C-RAN
Tx BW(Btx)	15 MHz	20 MHz
Frecuencia de muestreo (f_s)	$f_s = 23.04$ MHz	$f_s = 30.72$ MHz
Modulación	QSPK, 16QAM,64QAM	16QAM,64QAM
Espaciado de canal	6 x 3.84 MHz	8 x 3.84 MHz
FPGA DE CPRI	M= 15 bits	M= 15 bits
CPRI	#6	#7
Codificación	8B/10B	8B/10B
Velocidad de datos CPRI (Mb/s)	6144.0 Mb/s	9830.4 Mb/s
Técnica de Acceso al Medio	DL= OFDMA UL= SC-OFDMA	DL= OFDMA UL= SC-OFDMA
Muestra de trama LTE	I + Q	I + Q
Usuarios	200 por sector	500-1500

Elaborado por: Adriana Abril

d) Cálculo del tráfico estimado

Transmisión del plano de usuario (datos)

Es el plano que transporta el tráfico de usuarios de la red y es conocido como uno de los componentes integrales de una arquitectura de telecomunicaciones. Dentro del plano de datos se obtendrá la tabla de enrutamiento, la tabla de reenvío y la lógica de enrutamiento, es decir las funciones que se encargan de mover los paquetes desde el origen al destino. También se denomina plano de reenvío (Lavallee, 2018). La transmisión de datos del plano del usuario se basa en el concepto de un portador de antena (AxC).

A continuación, se presentan los cálculos breves realizados para obtener la velocidad de datos de la señal CPRI entre BBU y RRU:

- **Muestras por ranura (7 símbolos)** = (# de muestras símbolo 1) + [# de muestras resto de símbolos (6 símbolos restantes)]

$$\text{Muestras por ranura (7 símbolos)} = (2208 \times 1) + (2192 \times 6) = 15360$$

muestras por ranura

- **Frecuencia de Muestreo (f_s)** = # de muestras por ranura x ranuras de la trama LTE x 10 ms

$$\text{Frecuencia de Muestreo } (f_s) = 15360 \times 2 \text{ (ranuras)} \times 10\text{ms} = 307200 \text{ por } 10 \text{ ms o } 30,72 \text{ MHz}$$

- Cada muestra es de 16 bits I + 16 bits Q = **32 bits IQ**
- Se propone 8x8 MIMO con 8Tx / 8Rx

Los eNode B actuales manejan un MIMO de 2x2 ó 4x2 que proporcionar un rendimiento de 100 al 150% al ganar throughput alborde de la celda, mientras que el MIMO 8x8 puede proporcionar una ganancia de rendimiento significativa cercana al 500% ya que su crecimiento es logarítmico. La ganancia de throughput se puede traduce en una ganancia del presupuesto de enlace.

La cantidad de información requerida, asumiendo una codificación de 8B/10B se obtuvo a partir de la Ecuación (3.2).

$$CPRI_{Mb/s} = f_s * muestra_{\# \text{ de bits}} * MIMO * codif$$

Ec. (3.2)

$$CPRI_{Mb/s} = 30.72_{Mb/s} * 32_{bits} * 8 * 10/8$$

$$CPRI_{\frac{Mb}{s}} = 9830.4_{\frac{Mb}{s}}$$

La velocidad de datos de la señal CPRI entre BBU y RRU es **9830.4 Mb/s**


La tasa de CPRI calculada de 9830.4 Mb/s es relativamente alta en comparación con los enlaces de backhaul macro de 1000 Mbps que se implementan comúnmente en la actualidad (Lavallee, 2018). Se debe tomar en cuenta que la demanda de tráfico de

datos del sector Intercambiado de Carapungo es alta ya que como se expuso en la sección 2.1 todos los centros de comercio e infraestructura hacen del sector un punto de gran acogida de usuarios. Por ejemplo, el consumo diario de tráfico 4G en el sector está en un rango de 2000 a 2800 Mb por estación base. Al combinar las capacidades de 2 RBS se puede llegar a manejar alrededor de 6000 Mb/s (CPRI versión 6). El trabajo actual realiza un diseño de CPRI versión 7 para una velocidad de datos de 9830,4 Mb/s.


3.3. DISPOSITIVOS Y EQUIPOS A EMPLEARSE

Previamente se mencionó que para la conexión entre la BBU y el RRH se requiere un portador CPRI con alto ancho de banda y latencia ultrabaja. Para lograr esto es necesario implementar una gran cantidad de fibras. Huawei actualmente lidera el transporte WDM para exteriores con equipos que aumentan la eficiencia de la red ahorrando recursos de fibra y mejorando la confiabilidad de servicios al brindar protección y permitiendo una adecuada administración mediante gestores. Estas características convierten a los equipos de Huawei en la mejor solución óptica C-RAN para la migración de la arquitectura distribuida a la centralizada (Huawei, 2021). El resumen de los equipos a utilizarse se describe en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Listado de equipos a emplearse

EQUIPO	DESCRIPCIÓN	GRÁFICO
<p style="text-align: center;">RRH RRU3971 (Huawei)</p>	<p>Se puede ubicar cerca de las antenas de una BTS. Admite operación de modo triple o dual de GSM, UMTS y LTE a través de modificación de la configuración del software. Posee diseño modular y puertos externos en la cavidad de cableado y en la parte inferior del módulo</p> <p>Características técnicas: BW= 45 MHz, Tecnologías= GSM+LTE, Frecuencias de operación: Banda de frecuencia 1800 (MHz). Banda de frecuencia RX 1710 a 1785 (MHz). Banda de frecuencia TX 1805 a 1880 (MHz).</p> <p>Capacidad: Cada RRU3971 admite 2 portadoras (4x4 MIMO). El ancho de banda LTE es 5, 10, 15 o 20 MHz. Velocidades</p>	

	<p>transceptores= 0.7 a 2.7 GHz. Potencia máxima= 1840 (W) (Huawei, 2017).</p>	
<p>BBU BBU5900 (Huawei)</p>	<p>Procesa señales de BB de UL y DL. Gran capacidad de transmisión y función modular multiservicio. Gestiona todo el sistema O&M de la radiobase y brinda el reloj del sistema. Posee puertos físicos para el intercambio de información entre la radiobase y la red de transporte. Características técnicas: BW= 365 MHz, Tecnologías= GSM, UMTS, LTE FDD, LTE TDD, NB-IoT, 5G. Frecuencias de operación: 300 MHz- 6000 MHz. Capacidad: ofrece una capacidad de backhaul de 50 Gbps y presenta la implementación de una gran cantidad de BBU para admitir la arquitectura C-RAN. Velocidades transceptores= 3.3 to 4.2 GHz. Potencia máxima= ≤ 800 W. (Huawei, 2018).</p>	  
<p>CPRI</p>	<p>Cable de fibra CPRI de 7.0 mm, tamaño estándar para conectores LC dúplex, ampliamente utilizados en exteriores para radiobases de tecnología 2G, 3G, 4G y 5G. Disponibles en mono modo y multi modo. Protección IP67, a prueba de agua, niebla, humedad y polvo. Retorno y transmisión óptica constante. Ligero con carcasa de metal duro que brinda 500 ciclos de vida mecánica y aguante en caso de manipulación prolongada. Características técnicas: máx. número de saltos= mínimo 5 saltos. Jitter= ±0.002 ppm. Frecuencias de operación: 300 Hz. Capacidad: tiempo de sincronización máximo 10 s. Velocidades</p>	 

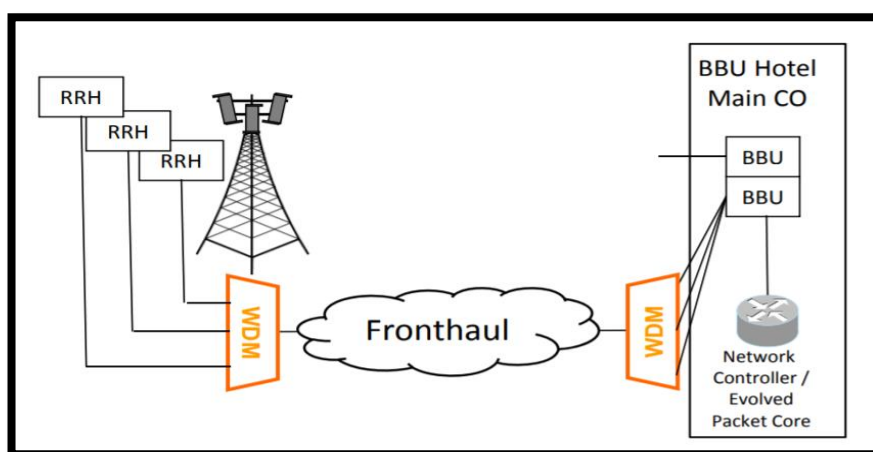
	<p>mínima requerida= 25 kbit/s. (Telecomkhabar, 2019).</p>	
<p>OSN OptiX 1800</p>	<p>Admite la transmisión de vídeo constante y de baja latencia, así como aplicaciones de automatización industrial en tiempo real y aplicaciones multimedia basadas en servidor. Características técnicas: Proporciona soluciones rentables a los Data Centers con servicio CPRI para 16 lambda, potencia óptica de tx de +5 dB. La función QoS cumple con los estándares: RFC 2697, 2698, 2309, 2598 e IEEE802.1p. Número de ranuras de servicio = 2 ranuras por gabinete (DC) y 1 ranuras por gabinete (AC). Capacidad de conexión cruzada OTN: 40G ODUk (k = 0/1/2 / 2e / flex) Paquete: 120G SDH: 40G (orden superior), 5G (orden inferior) Número de longitudes de onda (máximo): DWDM: 80 longitudes de onda y CWDM: 8 longitudes de onda. Tasa por longitud de onda (máxima): 100G / 200G. Fuente de alimentación: 110 V a 220 V CA, -48 V a -60 V CC. (Huawei, 2021).</p>	
<p>OSN 810 OptiX</p>	<p>Ahorra recursos de fibra en un 90%. Admite la transmisión híbrida de servicios CPRI. Admite la instalación montada en poste, pared y conexión conjunta con el RRH. Tiene un tamaño pequeño y un peso ligero y admite la gestión remota Características técnicas: Proporciona un ancho de banda de 100G /200G y permite la transmisión bidireccional de fibra. Ambiente: Con Radiación solar: -40 ° C a + 50 ° C. Sin radiación solar funcionando: -40 ° C a + 55 ° C. Cumple con la clasificación de protección IP65. Rango de longitud de onda de funcionamiento: 1260 a 1360 (nm). Tolerancia de dispersión: ± 400 ps / nm. Potencia máxima= 108 W. (Huawei, 2021).</p>	

Las soluciones mostradas en la Tabla 3.7 utilizan chips de propiedad de Huawei que junto con el uso de algoritmos líderes en la industria logra relojes de alta precisión a nivel de nanos segundos (ns), satisfaciendo completamente los requisitos de CPRI de la migración de arquitectura D-RAN a C-RAN (Huawei, 2021).

3.3.1 Multiplexación por división de longitud de onda (WDM)

Los flujos de Fronthaul se transmiten en canales de longitud de onda (lambdas) que operan con WDM para obtener varias lambdas en unas pocas fibras usando un multiplexor WDM colocado en cada sitio celular.

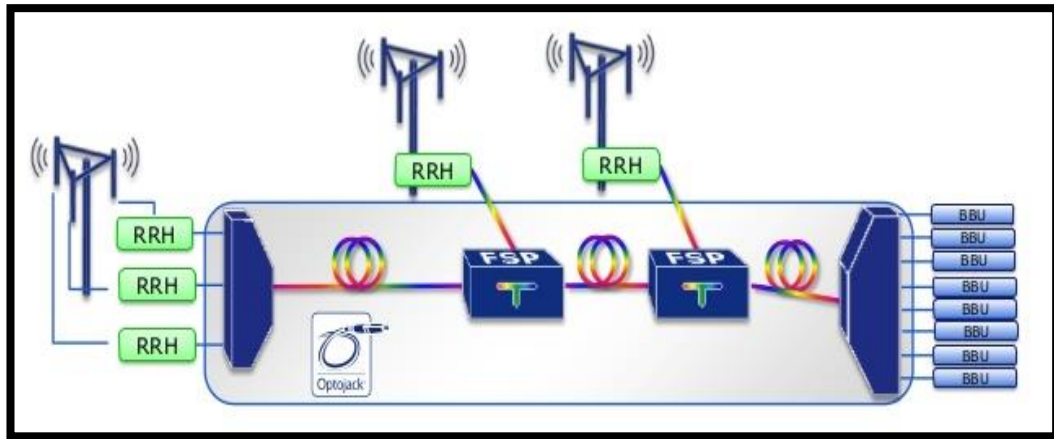
Figura 3.100: Red Fronthaul basada en multiplexación WDM



Fuente: (Gomes, 2015)

Como se observa en la Fig 3.10 y Fig 3.11 en el Hotel BBU, las lambdas entrantes son separadas por demultiplexores y enviadas a puertos CPRI reservados en la BBU. Usando los equipos OSN 810 con tecnología WDM se pueden multiplexar hasta aproximadamente 16 lambdas en una fibra única, es decir se puede agregar todo el sitio celular usando una sola fibra.

Figura 3.111: Implementación Fronthaul basado en WDM



Fuente: (Kohn, 2013)

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN DE LA ARQUITECTURA RAN CENTRALIZADA

4.1. PARÁMETROS A SIMULAR

Es importante notar que, desde la etapa de implementación las operadoras junto con el proveedor que da el soporte deben cumplir con los objetivos acordados de cobertura, calidad y desempeño del servicio (rohde-schwarz, 2021). Estos factores afectan el canal inalámbrico variando el rendimiento real de la red, independientemente de la tecnología con la que se trabaje (O'Reilly, 2013). Es por esto que tanto para las tecnologías 3G y 4G se han seleccionado los siguientes parámetros críticos: eficiencia, tráfico, disponibilidad y throughput.

4.1.1 Eficiencia

Se refiere a la capacidad con la que red intercambia información y se calcula teniendo en cuenta la pérdida de paquetes y los datos retransmitidos. (O'Reilly, 2013). A

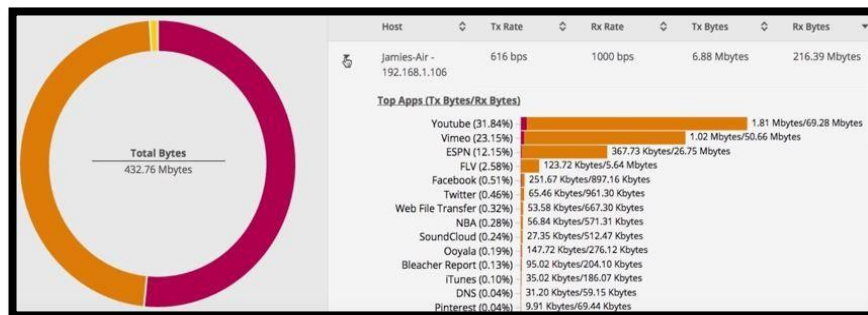
continuación, la ecuación muestra la fórmula para obtener la eficiencia de la red basado en paquetes trasferidos y retransmitidos:

$$Eficiencia = 100\% * (\text{transferido} - \text{retransmitido}) / \text{transferido}. \text{ (Exinda, 2021)}$$

4.1.2 Tráfico

El tráfico de red es la cantidad de datos que se mueven a través de una red informática en un momento dado (velocidad de datos). La inspección profunda de paquetes (DPI) es una función de firewall para examinar y administrar el tráfico de la red móvil (Scarpati, 2021).

Figura 4. 1: Inspección profunda de paquetes (DPI).

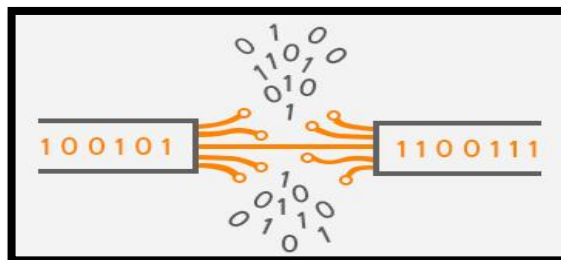


Fuente: (Ubiquiti, 2021)

4.1.3 Tasa de pérdida de paquetes (packet loss ratio)

La tasa de pérdida de paquetes se refiere a la variación entre el número de paquetes perdidos y el número total de paquetes enviados, lo que resulta en una transmisión incompleta. En el presente trabajo se representa en porcentaje. La pérdida de paquetes se da cuando los paquetes fueron enviados con éxito, pero fallaron en llegar su destino en una red y fueron descartados (Guoqiang Zhang, 2009).

Figura 4. 2: Pérdida de paquetes.



Fuente: (Minitool, 2021)

4.1.4 Jitter

El jitter es una variación en la latencia, o el tiempo de retraso entre el momento en que se transmite una señal y el momento en que se recibe. Esta variación se mide en milisegundos (ms) y se describe como la interrupción en la secuencia normal de envío de paquetes de datos (Antonio de la Oliva, 2016).

4.1.5 Throughput

El throughput mide cuántos paquetes llegan con éxito a sus destinos y se mide en bits por segundo (Fa-Long Luo, 2016).

4.2. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE A EMPLEAR.

Con el propósito de verificar la respuesta de los parámetros de red durante las modificaciones sobre las arquitecturas, módulos y protocolos a nivel lógico, se emplean programas especializados en este tipo de comunicación. A continuación, se detalla el uso de tres programas de simulación basados en características específicas tales como:

Tabla 8.1: Descripción del software de simulación a emplearse.

Simulador	Interfaz Gráfica	Software Libre	3G	4G	5G	Lenguaje de Programación	Plataforma
NS3	No	SI	NO	SI	SI*	C++, Python	Linux
Omnet++	SI	SI	SI*	SI	SI	C++	Windows/Linux
OPNET	SI	NO	SI	SI*	NO	C++	Windows/Linux

Elaborado por: Adriana Abril

* Librería descontinuada o en fase de prueba.

4.2.1 NS3

De sus siglas en ingles Network Simulator 3, es un programa de simulación enfocado en redes de eventos discretos. Contiene una vasta librería para aplicaciones fijas, móviles e inalámbricas. Carece de un entorno gráfico para su configuración, ya que maneja sus rutinas mediante un script de texto.

Figura 4. 3: Logo de Network Simulator 3

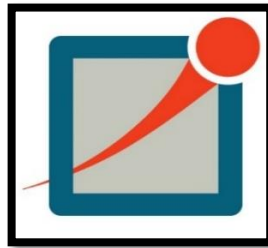


Fuente: (NSNAM, 2021)

4.3.2 OMNET++

Es un programa con interfaz gráfica de simulación enfocado en redes de eventos discretos, complementa sus elementos en módulos y objetos. Dispone de varias librerías que soportan comunicaciones móviles.

Figura 4. 4: Logo de Omnet++



Fuente: (omnetpp, 2021)

4.3.2 OPNET MODELER

Es un programa con interfaz gráfica de simulación enfocado en redes de eventos discretos, complementa sus elementos en módulos y objetos. Dispone de una librería para 3G soportada en la versión académica y una librería para 4G soportada únicamente en la versión comercial.

Figura 4. 5: Logo de OPNET



Fuente: (Modeler, 2021)

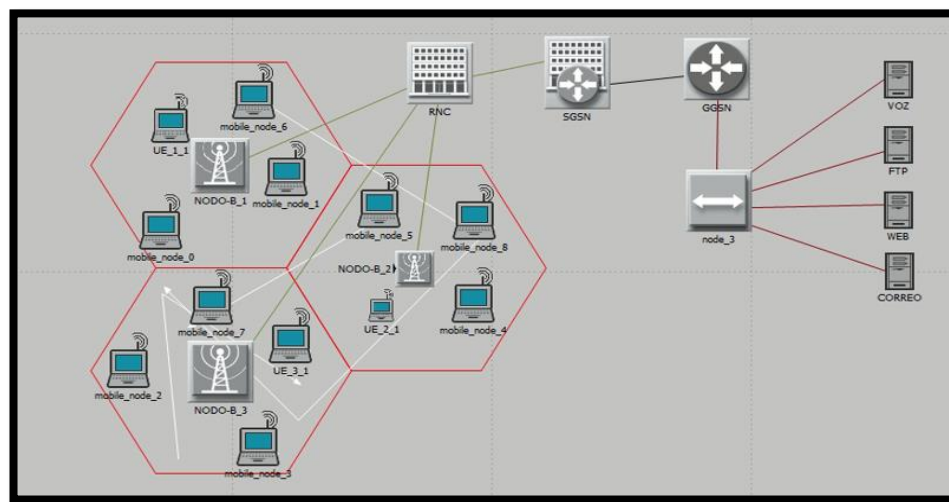
4.3. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

En el presente trabajo se denota la simulación de una red móvil en 3 escenarios distintos, mediante los programas previamente descritos.

4.3.1 Simulación 3G sobre la plataforma OPNET MODELER

El escenario 3G consta de 2 radiobases principales (RBS1 y RBS2), un controlador de la red de radio (RNC), un nodo de servicio GPRS (SGSN) y 4 servidores con aplicativos de Voz, transferencia de archivos (FTP), web y correo electrónico. Como se muestra en la Figura 4.6.

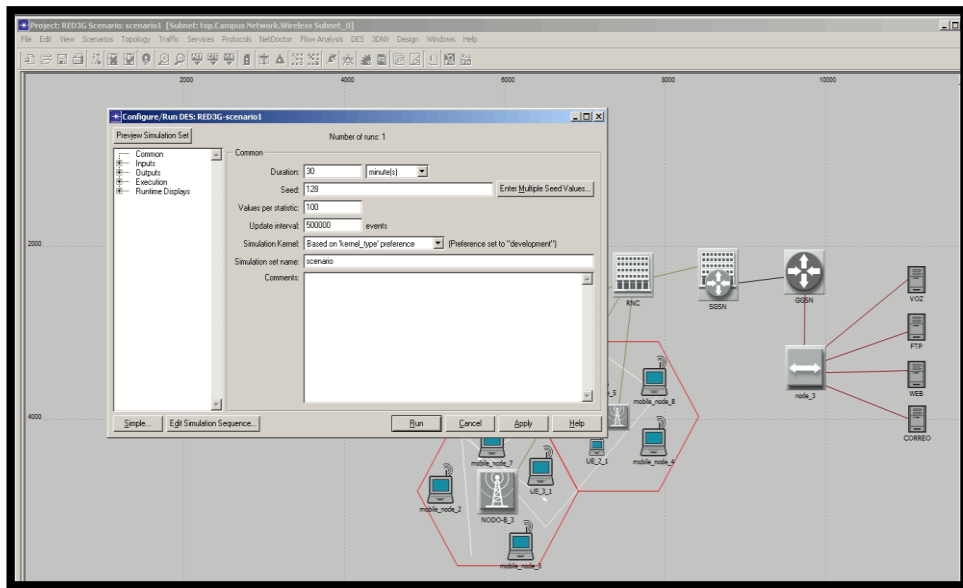
Figura 4. 6: Esquema de conexión de red 3G



Elaborado por: Adriana Abril

La simulación se la realiza con varios parámetros a nivel de aplicación, con una carga mínima, una carga media y una carga alta de transferencia. Se evalúan los datos en función de la cantidad de usuarios conectados en cada celda, así también se ajusta la movilidad de los nodos terminales.

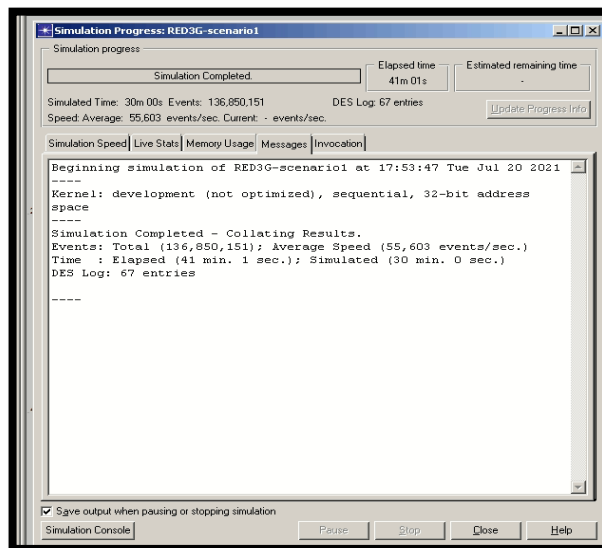
Figura 4. 7: Asignación de parámetros de simulación.



Elaborado por: Adriana Abril

Al finalizar la simulación se aprecian los resultados contenidos en una plantilla donde se comprueba todos los parámetros en cada nodo y elementos de la red. Gráficas comparativas en función del tiempo permiten evaluar la respuesta del sistema.

Figura 4. 8: Resultado de simulación satisfactoria.



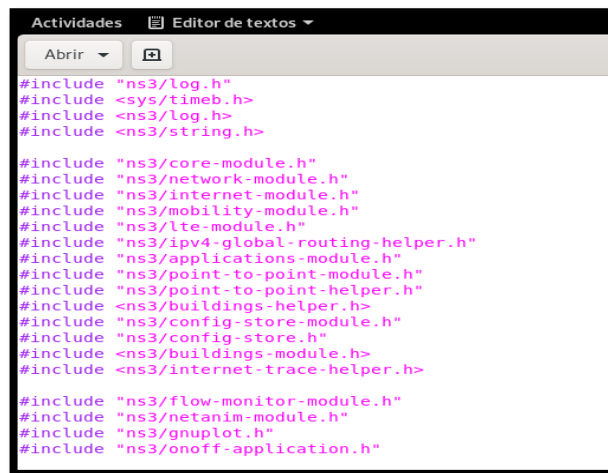
Elaborado por: Adriana Abril

En vista que este entorno es netamente gráfico, la simulación resulta en cierta medida sencilla al seleccionar los elementos y enlaces por arrastre. Previamente conociendo la teoría de cada dispositivo y adecuándola al estándar respectivo (UMTS).

4.3.2 Simulación 4G sobre la plataforma NS3 (LENA)

El escenario de red LTE previsto en este simulador está contenido en un script, en el cual se detallan los dispositivos y arquitectura del sistema. El encabezado del script contiene todas las librerías a utilizar para el correcto funcionamiento de la red, entre las principales se mencionan la de lte, core, applications, internet, buildings, flow-monitor netanim.

Figura 4. 9: Asignación de librerías para simulador NS3



```
Actividades Editor de textos
Abrir
#include "ns3/log.h"
#include <sys/timeb.h>
#include <ns3/log.h>
#include <ns3/string.h>
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/lte-module.h"
#include "ns3/ipv4-global-routing-helper.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/point-to-point-module.h"
#include "ns3/point-to-point-helper.h"
#include <ns3/buildings-helper.h>
#include "ns3/config-store-module.h"
#include "ns3/config-store.h"
#include <ns3/buildings-module.h>
#include <ns3/internet-trace-helper.h>
#include "ns3/flow-monitor-module.h"
#include "ns3/netanim-module.h"
#include "ns3/gnuplot.h"
#include "ns3/onoff-application.h"
```

Elaborado por: Adriana Abril

Se estima que las 2 RBS LTE actualmente procesan juntas un tráfico diario promedio de 5000 a 6000 Mb por hora con un promedio de 1400 usuarios. El uso promedio global mensual por dispositivo ahora supera los 10 GB y se prevé que alcance los 35 GB para fines del 2026 (Telesemana,201). En Ecuador la cifra de cuentas de Internet móvil por cada 100 habitantes pasó del 51,51% en marzo de 2018, a 53,41% para septiembre del 2021, es decir, existió un crecimiento del 1,9%. En nuestro país el número de usuarios LTE en 2015 era de 949.723 y para el año 2019 contaba ya con 8'320.942 suscriptores. Esto quiere decir que en tan solo 4 años el porcentaje de crecimiento se suscriptores LTE fue de un 876% aproximadamente (Arcotel,201). Es importante acotar qué por motivos de limitaciones computacionales y manejo de Data Bruta, se ha tomado solamente una muestra del grupo total de usuarios (30 UE). A continuación se declaran las variables principales para la red, principalmente el número de radiobases (ENB), el número de dispositivos móviles (EU), tiempo de simulación, intervalo de tiempo para envío de paquetes, etc. (Figura 4.10)

Figura 4. 10: Declaración de variables globales en NS3

```
int main (int argc, char *argv[]) {
    uint16_t numberOfNodesENB = 2;
    uint16_t numberOfNodesEU = 30;
    Time simTime = MilliSeconds (10000);
    Time interPacketInterval = MilliSeconds (100);
    bool disableDl = false;
    bool disableUl = false;
    bool useHelper = false;
```

Elaborado por: Adriana Abril

Se crea el host remoto y su respectivo enlace con el dispositivo puerta de enlace para los paquetes, así también se crean los nodos que van a contener a las radiobases y los elementos móviles desplegados en el espacio.

Figura 4. 11: Creación de dispositivos y enlaces en simulador NS3

```
// Create a single RemoteHost
NodeContainer remoteHostContainer;
remoteHostContainer.Create (1);
Ptr<Node> remoteHost = remoteHostContainer.Get (0);
InternetStackHelper internet;
internet.Install (remoteHostContainer);

// Create the Internet
PointToPointHelper p2ph;
p2ph.SetDeviceAttribute ("DataRate", DataRateValue (DataRate ("100Gb/s")));
p2ph.SetDeviceAttribute ("Mtu", UIntegerValue (1500));
p2ph.SetChannelAttribute ("Delay", TimeValue (MilliSeconds (100)));
NetDeviceContainer internetDevices = p2ph.Install (pgw, remoteHost);
Ipv4AddressHelper ipv4h;
ipv4h.SetBase ("1.0.0.0", "255.0.0.0");
Ipv4InterfaceContainer internetIpifaces = ipv4h.Assign (internetDevices);
// interface 0 is localhost, 1 is the p2p device
Ipv4Address remoteHostAddr = internetIpifaces.GetAddress (1);

Ipv4StaticRoutingHelper ipv4RoutingHelper;
Ptr<Ipv4StaticRouting> remoteHostStaticRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (remoteHost->GetObject<Ipv4> ());
remoteHostStaticRouting->AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("7.0.0.0"), Ipv4Mask ("255.0.0.0"), 1);

NodeContainer enbNodes;
enbNodes.Create (numberOfNodesENB);
NodeContainer ueNodes;
ueNodes.Create (numberOfNodesEU);

// MIMO
Config::SetDefault ("ns3::LteEnbRrc::DefaultTransmissionMode", UIntegerValue (2));
```

Elaborado por: Adriana Abril

A diferencia de lo indicado en el diseño (MIMO 8x8), se asigna un parámetro de comunicación MIMO con un arreglo de 2x2 por simplificación de parámetros a simular, teniendo en cuenta la limitación de la librería LTE incorporada al simulador. Se debe recordar que en las versiones 8 y 9 de LTE no se admitían múltiples antenas de transmisión en el UE por el supuesto de que solo se tenía disponible un único amplificador de potencia de RF y esto aumentaría la potencia, agotando la batería disponible de los usuarios. Un MIMO más elevado incrementaría el rendimiento de la señal y la velocidad de datos. Para compensar este cambio se redujo el número de UE de 50 a 30, para mejorar los niveles de eficiencia, tomar en consideración que los valores MIMO reales para LTE son 4x2. Luego de creados los nodos para cada uno de

los dispositivos se procede a distribuirlos en el espacio determinado para la simulación, ya que en ello se fundamenta su ubicación y distancias. En el caso de los dispositivos móviles se los configura como elementos de movilidad aleatoria, ya que se requiere una simulación cercana a lo real.

Figura 4. 12: Posicionamiento y movilidad de nodos en simulación NS3

```
//Movilidad de nodos
MobilityHelper mobility;

mobility.SetPositionAllocator ("ns3::GridPositionAllocator","MinX",DoubleValue (200.0),"MinY",DoubleValue (400.0),"DeltaX",DoubleValue (100.0),
"DeltaY", DoubleValue (100.0),"GridWidth",UIntegerValue (10),"LayoutType",StringValue ("RowFirst"));
mobility.SetMobilityModel ("ns3::RandomWalk2DMobilityModel", "Mode",StringValue ("Time"),"Time",StringValue ("0.5s"),"Speed",StringValue
("ns3::ConstantRandomVariable[constant=50.0]"),"Bounds",RectangleValue (Rectangle (0.0, 10000.0, 0.0, 10000.0)));
mobility.Install (ueNodes);
BuildingsHelper::Install (ueNodes);

mobility.SetPositionAllocator("ns3::GridPositionAllocator","MinX",DoubleValue (100.0),"MinY",DoubleValue (600.0),"DeltaX",DoubleValue (1100.0),
"DeltaY",DoubleValue (0.0),"GridWidth",UIntegerValue (10),"LayoutType",StringValue("RowFirst"));
mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.Install (enbNodes);
BuildingsHelper::Install (enbNodes);

Ptr<Node> sgw = epcHelper->GetSgwMode (); mobility.SetPositionAllocator("ns3::GridPositionAllocator","MinX",DoubleValue (600.0),"MinY",DoubleValue
(300.0),"DeltaX",DoubleValue (1100.0), "DeltaY",DoubleValue (0.0),"GridWidth",UIntegerValue (10),"LayoutType",StringValue("RowFirst"));
mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.Install (sgw);

mobility.SetPositionAllocator("ns3::GridPositionAllocator","MinX",DoubleValue (600.0),"MinY",DoubleValue (100.0),"DeltaX",DoubleValue (1100.0),
"DeltaY",DoubleValue (0.0),"GridWidth",UIntegerValue (10),"LayoutType",StringValue("RowFirst"));
mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.Install (pgw);
```

Elaborado por: Adriana Abril

Se asignan las aplicaciones que va a correr el sistema, la numeración de puertos para uplink y downlink. El tipo de paquetes, en este caso VOIP.

Figura 4. 13: Asignación de aplicaciones y parámetros de simulación.

```
// Install and start applications on UEs and remote host
uint16_t dlPort = 1100;
uint16_t ulPort = 2000;
ApplicationContainer clientApps;
ApplicationContainer serverApps;
for (uint32_t u = 0; u < ueNodes.GetN (); ++u) {
    if (!disableDL) {
        PacketSinkHelper dlPacketSinkHelper ("ns3::UdpSocketFactory", InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (), dlPort));
        serverApps.Add (dlPacketSinkHelper.Install (ueNodes.Get (u)));

        UdpClientHelper dlClient (ueIface.GetAddress (u), dlPort);
        dlClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (interPacketInterval));
        dlClient.SetAttribute ("MaxPackets", UintegerValue (1000000));
        clientApps.Add (dlClient.Install (remoteHost));
    }

    if (!disableUL) {
        ++ulPort;
        PacketSinkHelper ulPacketSinkHelper ("ns3::UdpSocketFactory", InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (), ulPort));
        serverApps.Add (ulPacketSinkHelper.Install (remoteHost));

        UdpClientHelper ulClient (remoteHostAddr, ulPort);
        ulClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (interPacketInterval));
        ulClient.SetAttribute ("MaxPackets", UintegerValue (1000000));
        clientApps.Add (ulClient.Install (ueNodes.Get(u)));
    }
}
Ptr<EpcTft> tft = Create<EpcTft> ();
EpcTft::PacketFilter dlpf;
dlpf.localPortStart = dlPort;
dlpf.localPortEnd = dlPort;
tft->Add (dlpf);

EpsBearer bearer (EpsBearer::GBR_CONV_VOICE);
lteHelper->ActivateDedicatedEpsBearer (ueLteDevs.Get (u), bearer, tft);
}
```

Elaborado por: Adriana Abril

Se configuran los parámetros de simulación gráfica mediante la herramienta Netanim, se agregan imágenes a cada nodo y se realiza un mapeo de trayectoria.

Figura 4. 14: Configuración de variables y nodos en sistema gráfico Netanim.

```
//Entorno gráfico NETANIM
AnimationInterface anim ("lte-back.xml");
uint32_t resId1 = anim.AddResource("/home/██████████/Imágenes/celular.png");
uint32_t resId2 = anim.AddResource("/home/██████████/Imágenes/host.png");
uint32_t resId3 = anim.AddResource("/home/██████████/Imágenes/nodo.png");
uint32_t resId4 = anim.AddResource("/home/██████████/Imágenes/sgw_pgw.png");

for (uint32_t i = 0; i < ueNodes.GetN(); ++i) {
    Ptr<Node> obu = ueNodes.Get(i);
    anim.UpdateNodeDescription (obu, "ue");
    anim.UpdateNodeSize(obu->GetId(), 50, 50);
    anim.UpdateNodeImage(obu->GetId(), resId1);
}

for (uint32_t i = 0; i < enbNodes.GetN(); ++i) {
    Ptr<Node> enb = enbNodes.Get(i);
    anim.UpdateNodeDescription (enb, "eNode");
    anim.UpdateNodeSize(enb->GetId(), 200, 200);
    anim.UpdateNodeImage(enb->GetId(), resId3);
}

anim.UpdateNodeDescription (remoteHost, "Remote Host");
anim.UpdateNodeSize(remoteHost->GetId(), 200, 200);
anim.UpdateNodeImage(remoteHost->GetId(), resId2);
```

Elaborado por: Adriana Abril

Finalmente se configuran las variables y mensajes a mostrarse por terminal de consola después de la simulación. Se pueden observar los valores de cada parámetro determinado en cada nodo y en el sistema general.

Figura 4. 15: Configuración de mensajes para resultados de simulación.

```
for (std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats>::const_iterator i = stats.begin(); i != stats.end(); ++i) {
    Ipv4FlowClassifier::FiveTuple t = classifier->FindFlow (i->first);

    NS_LOG_UNCOND ("Flow " << i->first << " (" << t.sourceAddress << " -> " << t.destinationAddress << ")");
    NS_LOG_UNCOND (" Jitter: " << i->second.jitterSum);
    NS_LOG_UNCOND (" Delay: " << i->second.delaySum);
    NS_LOG_UNCOND (" TxPackets = " << i->second.txPackets);
    NS_LOG_UNCOND (" TxBytes: " << i->second.txBytes);
    NS_LOG_UNCOND (" RxPackets: " << i->second.rxPackets);
    NS_LOG_UNCOND (" RxBytes: " << i->second.rxBytes);
    throughput = ((i->second.rxBytes*8.0) / ((i->second.timeLastRxPacket.GetSeconds() - i->second.timeFirstTxPacket.GetSeconds())))/1024;
    brate = ((i->second.txBytes*8.0) / ((i->second.timeLastTxPacket.GetSeconds() - i->second.timeFirstTxPacket.GetSeconds())))/1024;
    NS_LOG_UNCOND (" Throughputs: " << throughput << " kbps");
    NS_LOG_UNCOND (" Bitrate: " << brate << " kbps");
    NS_LOG_UNCOND (" LostPacket: " << i->second.lostPackets);
```

Elaborado por: Adriana Abril

Los parámetros de red más relevantes para nuestro análisis son: Jitter, Delay, TxPackets, RxPackets, LostPackets y Throughput (Figura 4.16). Los mismos permitirán realizar gráficas estadísticas para determinar la funcionalidad de las arquitecturas.

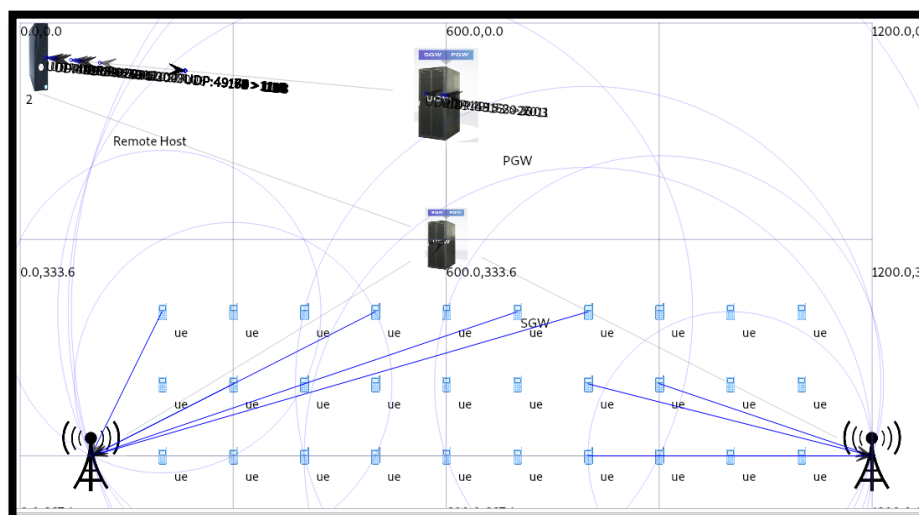
Figura 4. 16: Parámetros obtenidos al final la simulación por terminal de consola.

```
PacketLossratio: 30.303(%)
-----Total Results of the simulation-----
Total paquetes enviados =6172
Total paquetes recibidos =4962
Total paquetes perdidos =1210
Packet Loss ratio =19.6047%
Packet delivery ratio =80.3953%
Throughput promedio =62.5039Kbps
End to End Delay =+6.63492e+11ns
End to End Jitter delay =+3.6042e+10ns
Total Flow id 64
```

Elaborado por: Adriana Abril

Con el fin de asegurar la adecuada distribución y configuración de la red, se crea un archivo .xml que permite graficar de modo interactivo la misma. Se observa el desplazamiento de los dispositivos móviles, la transferencia de datos entre cada enlace. La herramienta determinada para esta actividad es el aplicativo Netanim.

Figura 4. 17: Simulación interactiva mediante la aplicación Netanim.



Elaborado por: Adriana Abril

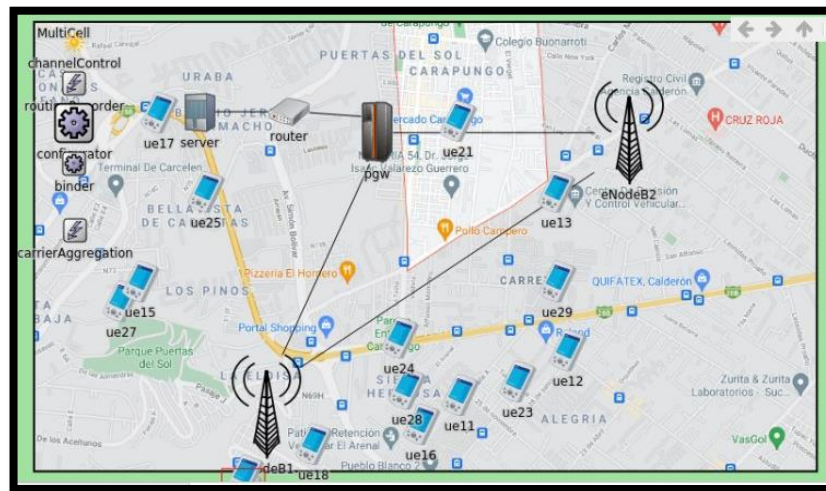
4.3.3 Simulación 4G sobre la plataforma OMNET++ (SIMULTE/SIMU-5G)

El escenario de red LTE y LTE modificado previsto en este simulador a diferencia de los anteriores, está contenido en 3 archivos para cada simulación. Un archivo gráfico de extensión .NED que muestra la distribución del entorno donde va a correr la red, un archivo tipo script que contiene toda la lógica de simulación de extensión .ini y archivo de enlace para nodos de extensión .xml. El entorno de este simulador es netamente

gráfico, adicionalmente cuenta con una librería que permite controlar parámetros de redes 5G.

El archivo de dispositivos y distribución (.NED) permite diseñar la topología de la red, consta de módulos adicionales que realizan el control durante el envío y recepción de tramas. Se realiza un esquema de tipo anillo entre las dos estaciones base evolucionadas y un dispositivo de puerta de enlace (PGW), adicionalmente se tiene un servidor para servicios de red y los dispositivos móviles.

Figura 4. 18: Archivo de interfaz gráfica NED



Elaborado por: Adriana Abril

El archivo de protocolos y comunicación (.INI) contiene a las librerías que soportan la simulación de redes LTE, así como parámetros de calidad y control. Tomando como referencia a la librería a la librería de 5G con su arquitectura centralizada.

Figura 4. 19: Declaración de librerías en archivo INI

```
omnetpp.ini
1 [General]
2 image-path=../../images
3 output-scalar-file-append = false
4 sim-time-limit=20s
5 network = simu5g.simulations.networks.MultiCell
6 **.routingRecorder.enabled = false
7 **.vector-recording = false
8 seed-set = ${repetition}
```

Elaborado por: Adriana Abril

Adicionalmente contiene todas las variables y aplicaciones que van a correr en la simulación, cada nodo dispone de sockets que almacenan la información obtenida. Es posible controlar los parámetros de asignación al uso de canal (RB) tanto para

UL como para DL, así como el ancho de banda y parámetros de potencia que disponen los elementos.

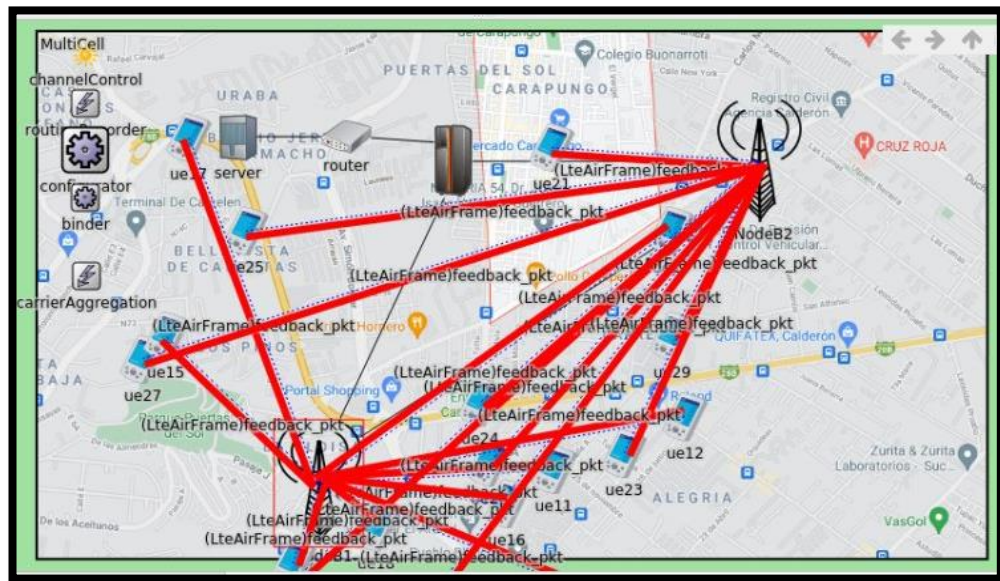
Figura 4. 20: Declaración de parámetros de potencia y control

```
14 **.mobility.constraintAreaMinZ = 0m
15 **.mobility.constraintAreaMaxZ = 0m
16 **.mobility.initFromDisplayString = true
17
18 ##### Number of Resource Blocks #####
19 **.numRbDL = 6
20 **.numRbUL = 6
21 **.numBands = 6 # this value should be kept equal to the number of RBs
22
23 ##### Transmission Power #####
24 **.ueTxPower = 26
25 **.eNodeBTxPower = 40
```

Elaborado por: Adriana Abril

El archivo de inicialización (.XML) contiene el parámetro de direcciones para enlazar los archivos .NED e .INI.

Figura 4. 21: Entorno de simulación y traza de paquetes.



Elaborado por: Adriana Abril

Al ejecutar el archivo de códigos mediante la ventana del programa, se abre el área de simulación y se procede con la ejecución. Durante la misma se visualiza la transmisión de paquetes entre los dispositivos conectados, en el caso de los móviles se desplazan de manera aleatoria por el espacio contenido en la red, como se visualiza en la Figura 4.21. Al finalizar la simulación es posible evaluar su funcionamiento al revisar los archivos de resultados contenidos en la ventana principal, se puede obtener parámetros vectoriales, escalares e histogramas como el ilustrado en la Figura 2.33.

Figura 4.22: Tabulación de resultados



Elaborado por: Adriana Abril

Posteriormente a la toma de datos de cada una de las simulaciones se procede a tabularlas, con el fin de comparar los datos en 3G y 4G para la determinación de cada arquitectura y modificación realizada.

4.4. RESULTADOS OBTENIDOS.

Tanto para la tecnología 3G como 4G se han realizado un mínimo de 5 simulaciones en cada software, obteniéndose resultados que tienen una tendencia constante y son congruentes con el número de usuarios ingresados y cambios realizados en parámetros como: ancho de banda, velocidad, RB y número de paquetes.

4.4.1 TECNOLOGIA 3G

OpNet presenta una opción UMTS completa en la sección “*Object Palette Tree*”, esta opción UMTS carga a la simulación los parámetros estándar de la tecnología 3G los cuales se resumen a continuación en la Tabla 4.2

Tabla 4.2: Resumen condiciones iniciales tecnología 3G.

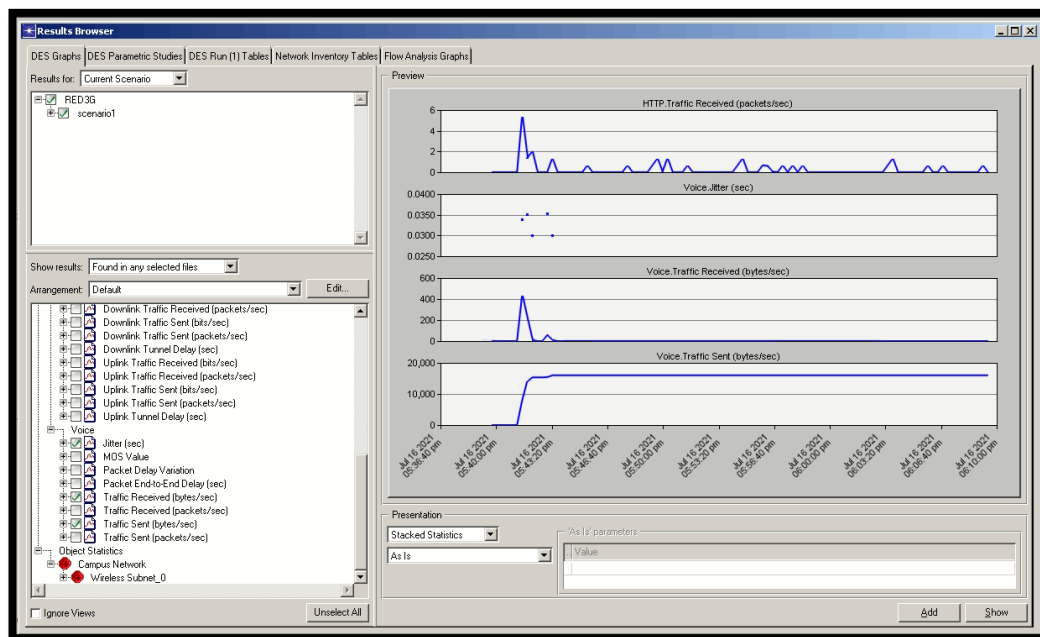
PARÁMETROS	REQUERIMIENTOS	DESCRIPCIÓN / DETALLE
Banda de Frecuencia	1900 MHz	canales de frecuencia UMTS están separados por 5 MHz
Ancho de Banda	5MHz	Ancho de banda de señal efectivo de 3,84 MHz
Velocidad de Chip	3,84 Mcps Para 5 MHz.	Los usuarios de redes desplegadas pueden esperar una velocidad de transferencia de hasta 384 kbit / s
Modulación	QSPK	Para generaciones 3G

Técnica de Acceso al Medio	WCDMA	Para Acceso por división de tiempo (TDD) y acceso por división en frecuencia (FDD)
Usuarios	200 por sector	Se toma la estadística actual máxima de usuarios (media de 600) en horas picos (12:00 pm) dentro de áreas urbanas o sitios densamente poblados.
Throughput	21000,00 [bits/s]	En condiciones óptimas de propagación, por usuario con un solo canal (BW 5 MHz). Sin MIMO

Elaborado por: Adriana Abril basado en Anexos 1 y Anexos 2

la Tabla 4.2 indica las condiciones iniciales que se ajustan al modelo de la tecnología 3G y son el punto de partida para el *escenario 1* en Opnet. Los resultados obtenidos para el *escenario 1* se pueden visualizar fácilmente mediante gráficos en la simulación gráfica de eventos discretos (DES Graphs). En las Figuras 4.23, 4.24 y 4.25 se tienen los resultados de la simulación y se obtienen diferentes gráficas dependiendo de la opción del parámetro que se haya seleccionado dentro de los diferentes archivos ofrecidos para voz y datos (menú de objetos).

Figura 4. 23: Resultados obtenidos de simulación 3G

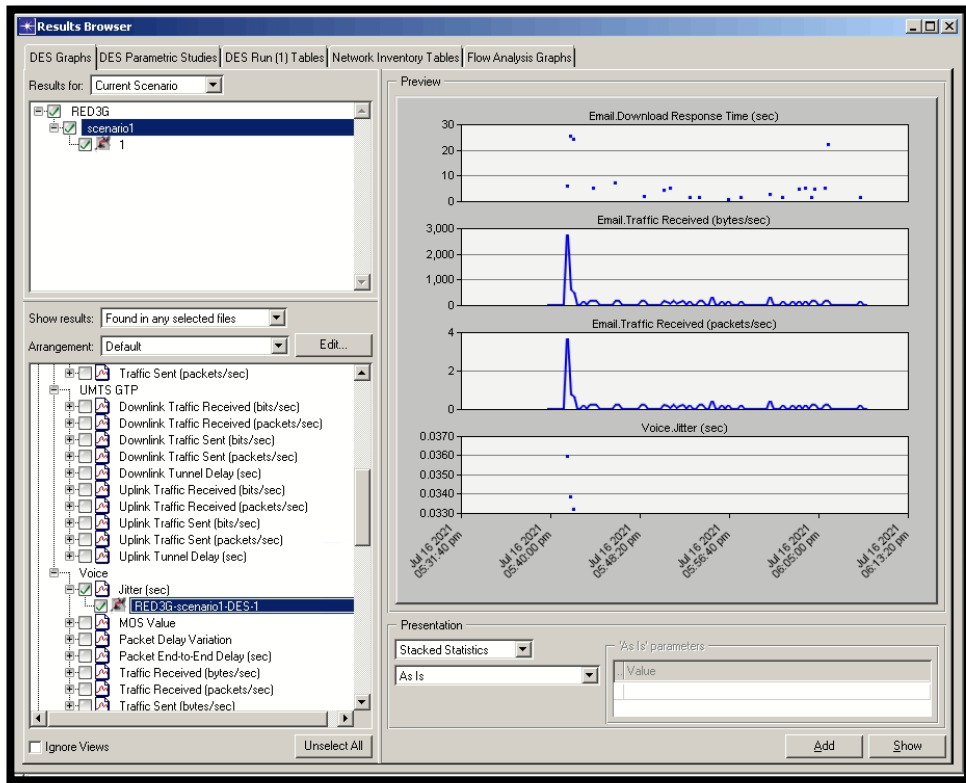


Elaborado por: Adriana Abril

Para los casos de las Figuras 4.23 y 4.25 se ha seleccionado el tráfico HTTP recibido, jitter de voz, tráfico de voz recibido y enviado y para la Figura 4.24 se ha seleccionado el tiempo de respuesta de descarga, tráfico de correo electrónico recibido y jitter de voz. Para cada gráfico obtenido se podrá visualizar las unidades en las que cada

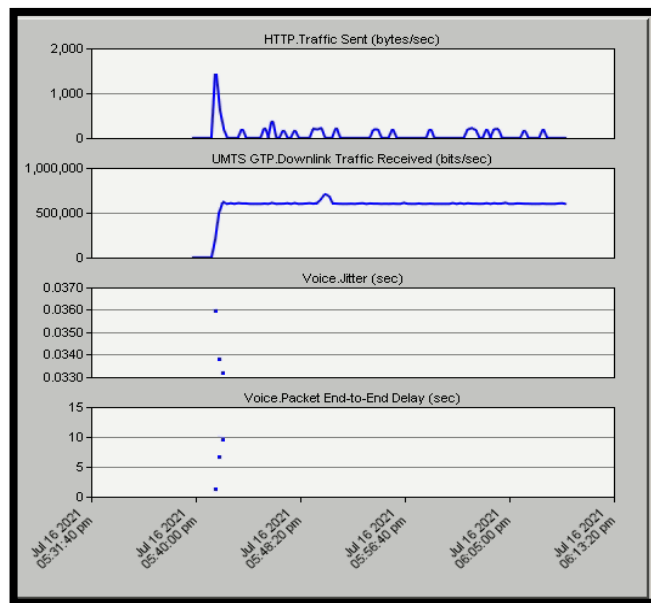
parámetro seleccionado esta medido y la línea azul muestra la tendencia de los resultados obtenidos posterior a la simulación.

Figura 4. 24: Resultados obtenidos de simulación 3G



Elaborado por: Adriana Abril

Figura 4. 25: Resultados obtenidos de simulación 3G



Elaborado por: Adriana Abril

La Tabla 4.3 resume los picos máximos y caídas mínimas alcanzadas en cada medición de los parámetros de las Figuras 4.23, 4.24 y 4.25

Tabla 4.3: Resumen valores máximos y mínimos 3G- *escenario 1*.

PARÁMETROS	mínimo	máximo
Tráfico HTTP Recibido	1 (paquete/s)	6 (paquetes/s)
Jitter	0.03 s.	0.036 s.
Tráfico de voz recibido	100 (bytes/s)	450 (bytes/s)
Tráfico de voz enviado	0 (bytes/s)	18000 (bytes/s)
Tráfico recibido DL	300000 (bits/s)	700000 (bits/s)
Retrasos paquetes de voz (de extremo a extremo)	0.5 s.	9 s.
Tráfico recibido servicio E-mail	300 (bytes/s)	3000 (bytes/s)
Velocidad promedio de eventos de la simulación	55603 eventos/s.	136'850.151 eventos totales

Elaborado por: Adriana Abril basado en Figuras 4.23, 4.24 y 4.25

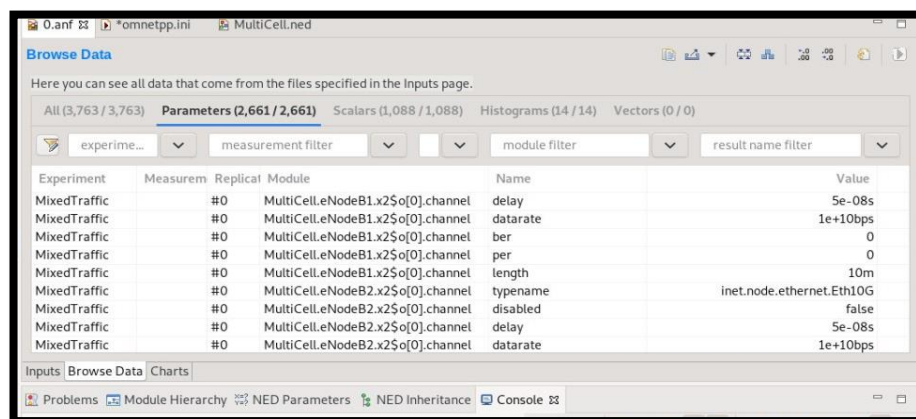
4.4.2 TECNOLOGIA 4G

La sección 4.3.2 presenta para la tecnología 4G el software Omnet++ con el escenario 1 y el software NS3 con el escenario 2, en esta sección se muestran los resultados obtenidos en dichos escenarios.

- **Omnet++**

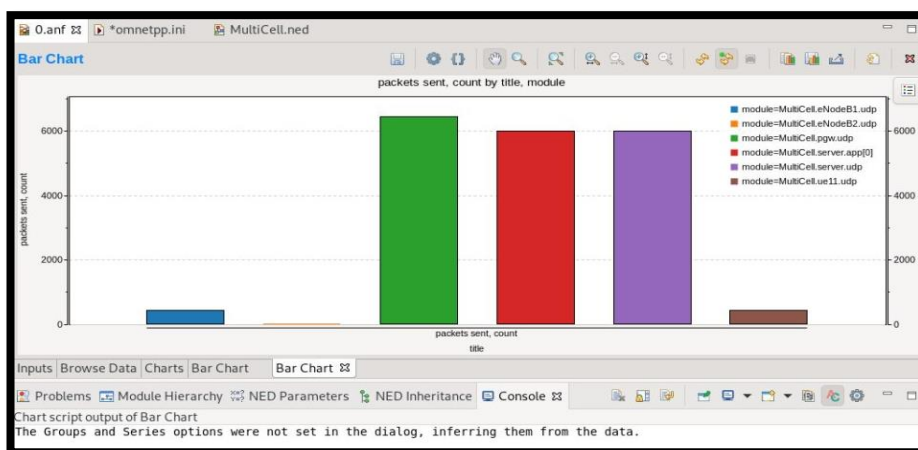
En el *escenario 2* los resultados obtenidos se pueden visualizar mediante valores escalares (Figura 4.26), con la opción adicional de representarlos como gráficos estadísticos (Figura 4.27).

Figura 4. 26: Despliegue de resultados en simulador OMNET++ pestaña “Browse Data”



Elaborado por: Adriana Abril

Figura 4. 27: Despliegue de resultados en simulador OMNET++ pestaña “Browse Chart”



Elaborado por: Adriana Abril

La parte inferior de la Figura 4.26 muestra las pestañas Inputs, Browse Data, y Charts que se las puede ir cambiando para desplegar diferentes formas de visualización. La pestaña “Browse Data” muestra los parámetros con sus nombres y valores obtenidos (ejemplo: delay, ber, length, etc). De forma predeterminada, se muestran todos los resultados con la opción de ser filtrarlos por el filtro de módulo. La Figura 4.27 muestra la pestaña “Bar Char” que mediante histogramas muestra los paquetes enviados de la celda en uso (módulo “MultiCell”). La Figura 4.26 muestra un total de 2661 parámetros o mediciones obtenidas, el canal del eNodeB1 presenta un retraso de 5×10^{-8} segundos, es decir un retraso de 2.56 micro segundos y una velocidad de 100 Mbps para un total de 500 paquetes enviados por el eNodeB1. La Figura 4.27 permite observar el envío total de paquetes durante la simulación en el caso del PGW es de un total de 6500 paquetes, para el UE un total de 600 paquetes y los servidores un total de 6000 paquetes.

▪ NS3

Para el escenario 3 los datos entregados por la simulación son valores escalares que se pueden visualizar de forma ordenada en el terminal del equipo, una vez que la simulación haya finalizado. El terminal presenta tanto los resultados individuales de cada nodo, así como un resumen o estadística de los parámetros más relevantes de la totalidad de los nodos presentes en la simulación. En la Figura 4.28 se muestran los valores resultantes de las variables throughput, bitrate, losspacket, jitter, delay, etc. En la parte inferior de la Figura 4.28 muestra los resultados totales de la simulación en la

que se encuentran el total de paquetes enviados, recibidos y perdidos, el throughput promedio, jitter, etc.

Figura 4. 28: Despliegue de resultados en simulador NS3

```
Throughputs: 81.9873 kbps
Bitrate: 83.0261 kbps
LostPacket: 0
PacketLossratio: 1.0101(%)
Flow 27 (7.0.0.12 -> 1.0.0.2 )
Jitter: +1.45202e+09ns
Delay: +1.28474e+10ns
TxPackets = 99
TxBytes: 104148
RxPackets: 80
RxBytes: 84160
Throughputs: 66.942 kbps
Bitrate: 83.0261 kbps
LostPacket: 0
PacketLossratio: 19.1919(%)
Flow 28 (7.0.0.13 -> 1.0.0.2 )
Jitter: +6.18019e+08ns
Delay: +1.04427e+10ns
TxPackets = 99
TxBytes: 104148
RxPackets: 77
RxBytes: 81004
Throughputs: 64.3858 kbps
Bitrate: 83.0261 kbps
LostPacket: 0
PacketLossratio: 22.2222(%)
-----Total Results of the simulation-----
Total paquetes enviados =2456
Total paquetes recibidos =2269
Total paquetes perdidos =187
Packet Loss ratio =7.61401%
Packet delivery ratio =92.386%
Throughput promedio =68.3369Kbps
End to End Delay =+2.71182e+11ns
End to End Jitter delay =+3.09307e+09ns
Total Flow id 28
```

Elaborado por: Adriana Abril

En NS3 la recolección de datos escalares fue un poco más didáctica y organizada. En la elaboración del script se pudo organizar los datos de forma que se tuviera una respuesta del total de los parámetros, así como valores totales promedios que fueron útiles para la comparación final de KPI. El último bloque de datos de la Figura 4.28 indica que el total de paquetes enviados es 2456, el total de paquetes recibidos es 2269 (187 paquetes perdidos), el throughput promedio de 68.336 kbps, el retraso de extremo a extremos es de 2,71 micro segundos y un jitter promedio de 3 micro segundos.

4.4.3 TABLA COMPARATIVOS KPI 3G Y 4G

Los datos recolectados de las 3 diferentes herramientas computacionales son organizados por parámetros y tabulados según el número de muestras tomadas y según el tiempo o fecha en el que la simulación fue realizada. La Tabla 4.4 detalla el resumen de los datos obtenidos en 3G y 4G en voz y datos para el KPI Eficiencia, para el resto de KPI remítase al ANEXO 3, 4, 5,6 y 7.

Tabla 9.4: Resumen de KPI Eficiencia en 3G y 4G.

	EFICIENCIA VOZ Y DATOS ARQUITECTURA D-RAN PARA 3G Y 4G				EFICIENCIA VOZ Y DATOS ARQUITECTURA C-RAN PARA 3G Y 4G			
	Tiempo	EFIC D3G %	EFIC V3G %	EFIC D4G %	Tiempo	EFIC D3G %	EFIC V3G %	EFIC D4G %
0	17/7/2021	93,12	95,95	91,89	17/7/2021	97,24	98,11	98,34
1	17/7/2021 1:00	93,37	96,61	91,70	17/7/2021 1:00	97,46	97,29	98,06
2	17/7/2021 2:00	93,24	94,24	91,53	17/7/2021 2:00	97,50	98,11	98,54
3	17/7/2021 3:00	93,23	95,34	90,88	17/7/2021 3:00	97,64	98,11	98,58
4	17/7/2021 4:00	93,52	94,37	91,68	17/7/2021 4:00	97,52	98,11	98,35
5	17/7/2021 5:00	93,27	95,07	92,10	17/7/2021 5:00	97,44	98,11	98,50
6	17/7/2021 6:00	93,14	95,60	90,88	17/7/2021 6:00	97,13	97,56	98,15
7	17/7/2021 7:00	92,98	96,21	92,05	17/7/2021 7:00	96,41	97,15	98,17
8	17/7/2021 8:00	92,80	96,29	91,83	17/7/2021 8:00	95,99	96,83	98,45
9	17/7/2021 9:00	92,51	95,39	91,74	17/7/2021 9:00	95,82	96,30	98,32
10	17/7/2021 10:00	92,51	95,55	91,87	17/7/2021 10:00	96,12	96,32	98,40
11	17/7/2021 11:00	92,17	95,69	91,66	17/7/2021 11:00	95,66	95,90	98,29
12	17/7/2021 12:00	92,42	95,96	91,94	17/7/2021 12:00	95,83	96,33	98,28
13	17/7/2021 13:00	91,26	93,87	91,92	17/7/2021 13:00	95,23	97,28	98,41
14	17/7/2021 14:00	91,34	94,22	91,84	17/7/2021 14:00	95,59	96,16	98,32
15	17/7/2021 15:00	91,86	95,33	91,85	17/7/2021 15:00	95,44	96,82	98,00
16	17/7/2021 16:00	91,93	94,82	91,80	17/7/2021 16:00	95,40	95,30	98,35
17	17/7/2021 17:00	90,20	93,73	91,78	17/7/2021 17:00	95,59	96,34	98,30
18	17/7/2021 18:00	91,33	94,68	91,82	17/7/2021 18:00	95,40	96,53	98,13
19	17/7/2021 19:00	89,19	92,34	91,83	17/7/2021 19:00	95,64	96,00	98,72
20	17/7/2021 20:00	89,07	93,50	91,94	17/7/2021 20:00	95,70	95,78	98,74

Elaborado por: Adriana Abril

4.4.4 GRAFICOS COMPARATIVOS PARA KPI

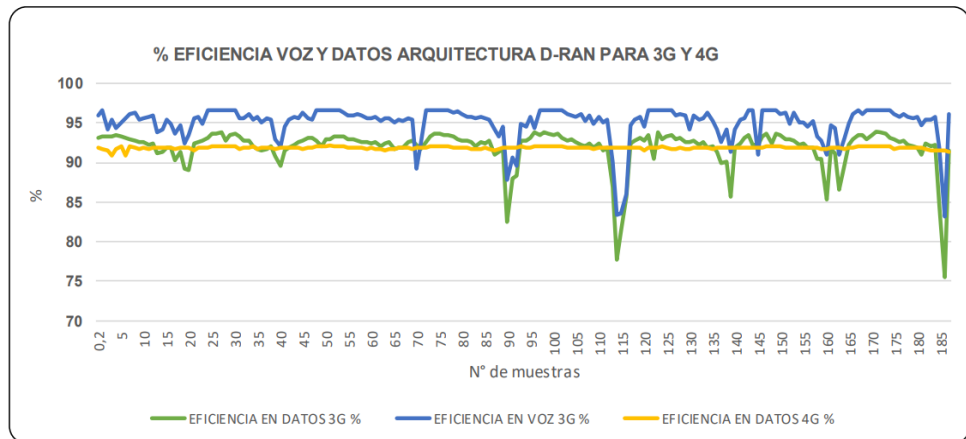
Para cada KPI y la tecnología a la que hace referencia se realiza un análisis/interpretación de los gráficos tanto para la arquitectura D-RAN como para la arquitectura C-RAN

4.4.4.1 Eficiencia

Las Figuras 4.29 y 4.30 muestran el porcentaje de eficiencia de la arquitectura D-RAN para voz (línea de color verde) y datos (línea de color azul) en 3G, y datos (línea de color tomate) en 4G.

- **Arquitectura D-RAN**

Figura 4. 29: Tabulación comparativa de eficiencia en arquitectura D-RAN

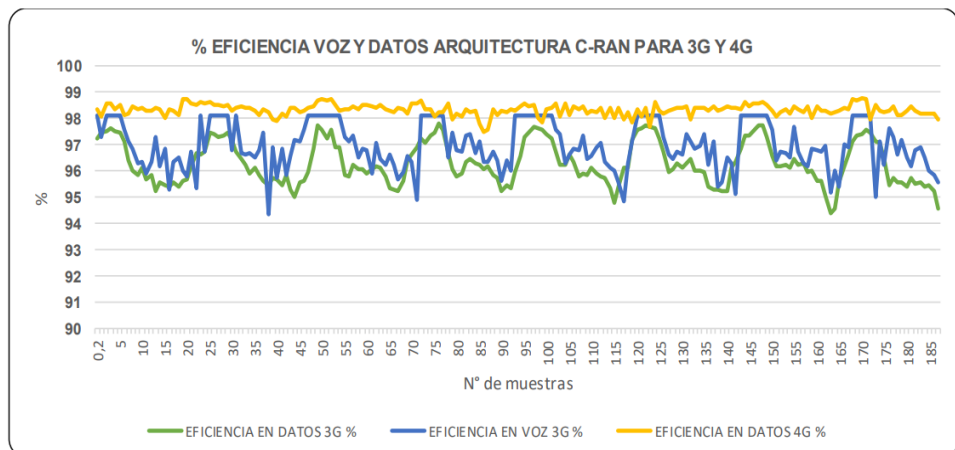


Elaborado por: Adriana Abril

Análisis: Se puede observar que la eficiencia tanto en voz y datos para 3G sigue una tendencia a la par, que varía entre el 76% al 95%, presentándose 3 caídas moderas que no fueron inferiores al 75%. La eficiencia de datos para 4G se mantiene dentro del rango de 90% al 92%, siendo inferior incluso a la eficiencia presentada en 3G, ofreciendo un servicio más estable pero menos eficiente que 3G y 4G.

- **Arquitectura C-RAN**

Figura 4. 30: Tabulación comparativa de eficiencia en arquitectura C-RAN



Elaborado por: Adriana Abril

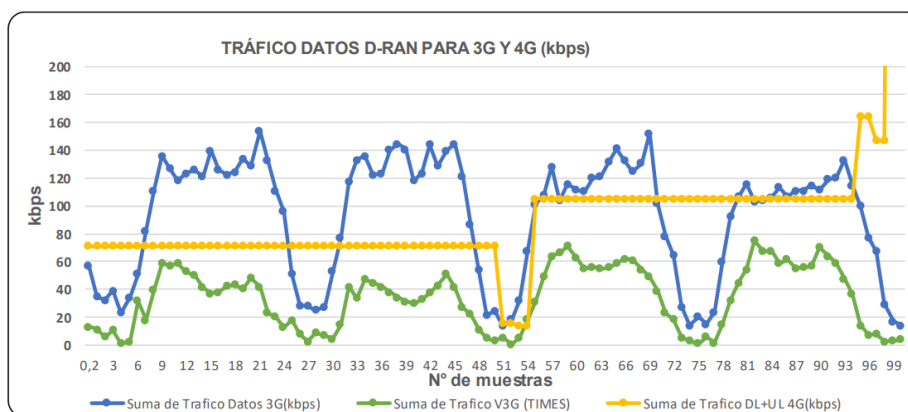
Análisis: Se puede observar que la eficiencia tanto en voz y datos para 3G continúa siguiendo una tendencia a la par, sin embargo, ahora más elevada en el rango de 94% al 98% y sin presentar caídas. La eficiencia de datos para 4G se mantiene en el rango de 97% al 99% igualmente de forma estable, sin presentar picos ni caídas de servicio.

La distancia entre la BBU y el RRH tiene un efecto de degradación en la sincronización ofrecida por la BBU, es decir a más distancia se tiene más latencia en la ruta de la fibra y por lo tanto menos eficiencia. Los equipos propuestos en la Tabla 3.4 están diseñados justamente para manejar la mayor parte de la degradación introducida por los dispositivos de conectividad (óptica y de paquetes) en la red de Fronthaul (Ericsson, 2019). El Fronthaul presentado en el presente trabajo no sobrepasa los 3000 metros de distancia, las altas degradaciones en la arquitectura C-RAN comienzan a presentarse en grandes distancias a partir de los 5000 metros.

4.4.4.2 Tráfico

- **Arquitectura D-RAN**

Figura 4. 31: Tabulación comparativa de tráfico en arquitectura D-RAN

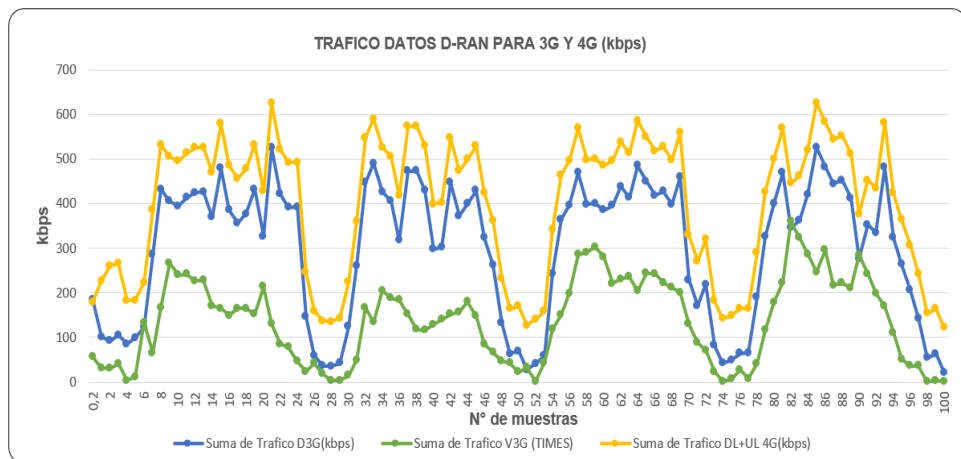


Elaborado por: Adriana Abril

Análisis: Se puede observar que el tráfico de datos 3G presenta una tendencia de 20 a 160 kbps, mientras que el tráfico 4G se mantiene aproximadamente entre 60 y 105 kbps. El tráfico de voz en el gráfico representa la cantidad de llamadas realizadas por los diferentes UE, manteniéndose en un rango de 0 a 70 llamadas de voz en diferentes horas, representadas en cada muestra.

- **Arquitectura C-RAN**

Figura 4. 32: Tabulación comparativa de tráfico en arquitectura C-RAN



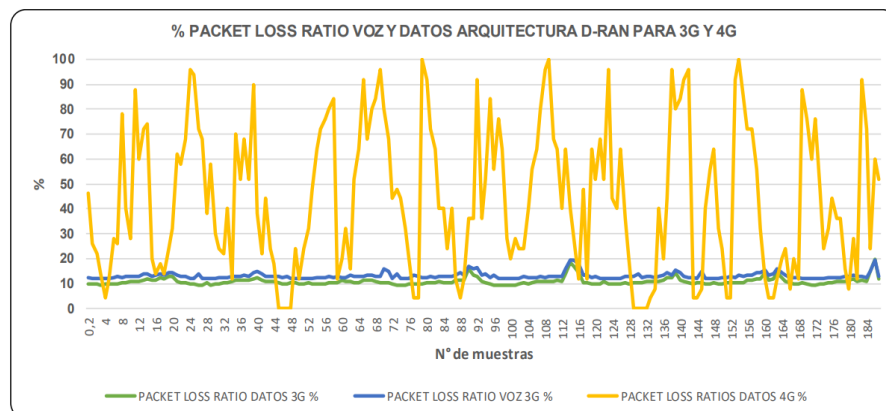
Elaborado por: Adriana Abril

Análisis: Se puede observar que el tráfico de datos 3G presenta una tendencia de 60 a 550 kbps, mientras que el tráfico 4G se mantiene aproximadamente entre 150 y 650 kbps. El tráfico de voz en el grafico representa la cantidad de llamadas realizadas por los diferentes UE, manteniéndose en un rango de 0 a 70 llamadas de voz en diferentes horas, indicadas en el grafico anterior.

4.4.4.3 Packet loss ratio

▪ Arquitectura D-RAN

Figura 4. 33: Tabulación comparativa de paquetes perdidos en arquitectura D-RAN

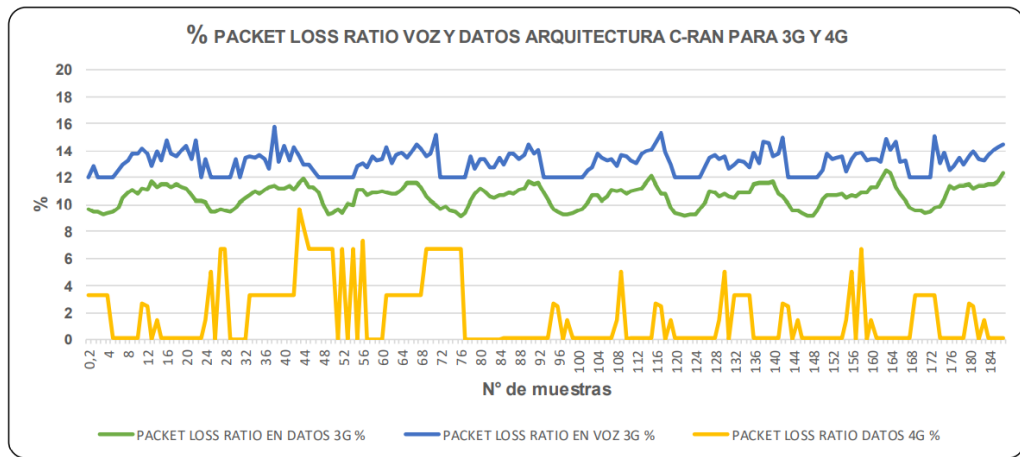


Elaborado por: Adriana Abril

Análisis: Para datos y voz en 3G se puede observar un porcentaje de PLR de 10% a 20%, mientras que en 4G se presenta un alto porcentaje de PLR con una media de 44,12%.

▪ Arquitectura C-RAN

Figura 4. 34: Tabulación comparativa de paquetes perdidos en arquitectura C-RAN



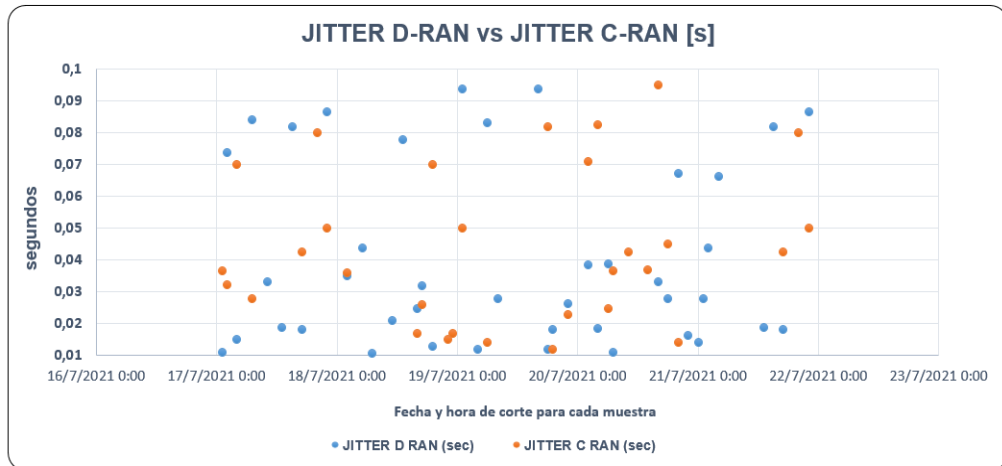
Elaborado por: Adriana Abril

Análisis: Para datos y voz en 3G se puede observar una reducción de los porcentajes de PLR de 8% al 16%, mientras que en 4G se presenta una dramática reducción del porcentaje de PLR manteniéndose entre 0% y 10%.

4.4.4.4 Jitter

- **Arquitectura D-RAN vs Arquitectura C-RAN**

Figura 4. 35: Tabulación comparativa de Jitter en arquitectura C-RAN



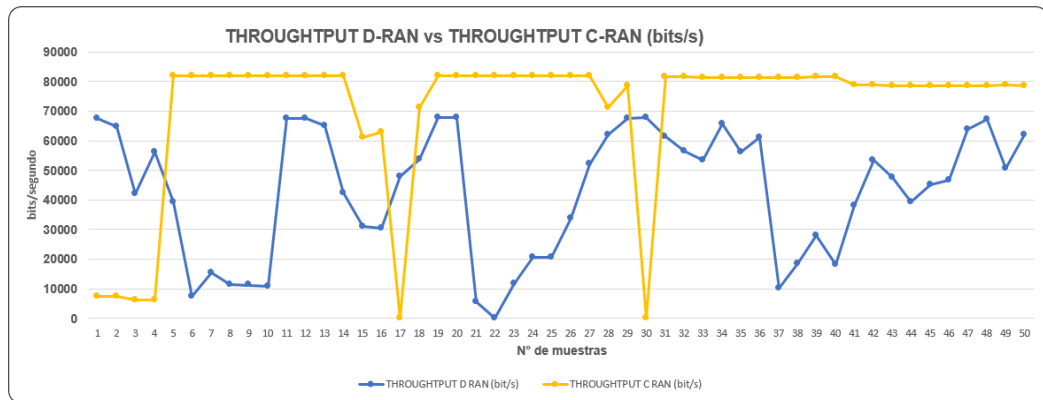
Elaborado por: Adriana Abril

Análisis: El Jitter obtenido para la arquitectura D-RAN tiene una media de 0,065 [s] y para la arquitectura C-RAN se tiene una media de 0,026 [s]. En la arquitectura C-RAN se puede observar una reducción en el tiempo.

4.4.4.5 Throughput

- **Arquitectura D-RAN vs Arquitectura C-RAN**

Figura 4. 36: Tabulación comparativa de throughput en arquitectura C-RAN



Elaborado por: Adriana Abril

Análisis: El throughput obtenido para D-RAN tiene una media de 39169,62 [bits/s] y para la arquitectura C-RAN se tiene un throughput promedio de 162010,42 [bits/s]. En la arquitectura C-RAN se puede observar una elevación del throughput.

Tabla 10.3: Resumen comparativa de KPI

KPI	<u>ARQUITECTURA D-RAN</u>			<u>ARQUITECTURA C-RAN</u>		
	DATOS 3G	VOZ 3G	DATOS 4G	DATOS 3G	VOZ 3G	DATOS 4G
EFICIENCIA (%)	92,44	95,57	92,34	96,82	97,50	98,85
TRÁFICO [kbps]	34,29	94,03	103,799	138,104	302,56	403,87
PACKET LOSS %	10,83	13,10	44,12	10,65	13,19	1,74
JITTER [s]	0,065			0,026		
THROUGHPUT [bit/s]	39169,62			162010,42		

Elaborado por: Adriana Abril

CONCLUSIONES

- Se desarrolló un análisis múltiple sobre los aspectos más relevantes implicados en la migración de la arquitectura D-RAN a la arquitectura C-RAN y se trató de forma amplia sobre la gestión de recursos de radio (RRM). Mediante el BBU Pooling, RRM aplica estrategias y algoritmos robustos para controlar parámetros tales como: potencia de transmisión, asignación de usuarios y velocidades de datos.

Adicional, aplicando la redefinición de CPRI se seleccionan solo los RB ocupados para la transmisión, en consecuencia, se tiene una velocidad de datos elástica que varía de acuerdo al tráfico real. La variación entre los RB seleccionados fluctúa de 6 a 100 RB. Para D-RAN la media de RB transmitidos es de 55 y para C-RAN es de 98 RB, esto implica que en la arquitectura C-RAN existe una mejora del 43% en la eficiencia del manejo de RB transmitidos. Los usos de técnicas de radio cooperativas reducen la interferencia que pueda existir entre las diferentes transmisiones de radio. Esto incluye el uso de RRH más capaces, que mitiguen de mejor manera la interferencia entre las radiobases aprovechando al máximo el limitado espectro de radiofrecuencia.

- Se determinó la ubicación y la distancia de 2 radiobases cercanas al intercambiador de Carapungo (RBS1 y RBS2) en conjunto con el Data Center que alberga al BBU Pool en el sector de Carretas. Se toman en cuenta los requisitos de hardware y software de las RBS analizadas, así como los pasos a seguir que se requerirían para la correcta migración de arquitectura. En las simulaciones se tiene un promedio de 21 UE y una distancia máxima de 1500 [m], respecto a lo tomado en cuenta en la etapa de diseño cuya distancia media fue de 5000 [m] sin el uso estricto de fibras oscuras. Esto equivale un margen de error de 0,0233%.
- Se determinan los KPI tanto de la arquitectura D-RAN, así como de la arquitectura C-RAN. La **eficiencia** en datos en 3G y 4G tuvo un aumento de 4,38% y 6,51% respectivamente, adicional a un aumento de 1,93% respecto a voz en 3G. El **tráfico** en datos en 3G y 4G tuvo un aumento de 103,81 [kbps] y 300,07 [kbps] respectivamente, adicional a un aumento de 63,47 [kbps] respecto a voz en 3G. Este aumento en la tasa de tráfico se debe a la presencia de algoritmos y protocolos de enrutamiento mejorado para que se tome la mejor ruta posible y distribuir el tráfico de la red de manera más uniforme. La **tasa de pérdida de paquetes** en 3G y 4G presenta una disminución del 0,18% y 42,38% respectivamente. La pérdida de paquetes causa tramas congeladas y comportamiento de tartamudeo en videollamadas. El **Jitter** de la arquitectura C-RAN muestra una disminución de 0,039 [s] respecto a la tradicional arquitectura D-RAN. Por último, el **Throughput** de la arquitectura C-RAN presenta una elevación de 1'228404 [bit/s] respecto a la arquitectura D-RAN. Esto permite una mejor experiencia QoS ya que cuando las

personas usan aplicaciones en su UE esperan tiempos de respuesta rápidos. Una medida del throughput revelará el uso real de la red, tomando en cuenta también que el arribo de paquetes es clave para un servicio de alto rendimiento.

- Una vez determinado, medido y comparado el KPI del *tráfico* de las 2 RBS y el BBU pool se observa que gracias a los elementos de infraestructura (BBU) que fueron movidos al Data Center el tráfico de datos en 3G y 4G aumento de 160 a 550 kbps y de 105 kbps a 650 kbps respectivamente. Esto implica que en la arquitectura C-RAN en promedio se adicionan 467,5 [kbps]. Ahora la asignación dinámica del ancho de banda es más flexible y en muchos casos compartido, ejerciendo menos presión en la RAN para transportar los flujos de Ethernet y CPRI
- Se debe tener en cuenta que CPRI es actualmente la solución más adoptada comercialmente, aunque todavía tiene algunas características de implementación específicas del proveedor que impiden una interoperabilidad con múltiples proveedores. Se establecen los requerimientos de FO para el CPRI del sitio y la velocidad de datos CPRI en 9830.4 Mb/s. La velocidad de los Backhaul actuales (1000 Mb/s) solo representan un 10,17% de la capacidad que los nuevos Fronthaul pueden llegar a alcanzar en una arquitectura centralizada. La madurez en el desarrollo de equipos DWDM permite que se pueda ofrecer esta técnica de multiplexación en la FO y en consecuencia velocidades de datos altas en el Fronthaul de las redes celulares.
- Las simulaciones realizadas tienen en cuenta 3 escenarios donde se imita el comportamiento de un BBU Pool. Esto se logra al mover todas las funciones de la BBU desde las distintas RBS al Data Center elegido. Es decir, funciones como, procesamiento de señales de voz para la transmisión y recepción del UE e incluso funciones de gestión y monitoreo pueden realizarse ya no de forma individual en cada RBS, sino más bien de forma centralizada en el Data Center. El BBU Pooling permite que las BBU logren compartir sus recursos y puedan ofrecer un servicio más flexible y eficiente tanto en aspectos de Operación y Mantenimiento (O&M), como también en el aspecto financiero.

- El presente trabajo presenta un total de 2 RBS que en conjunto presentan una ganancia promedio para D-RAN de 93,45% y para C-RAN de 97,72%, describiendo un aumento total de eficiencia global promedio de 4,27%. Esto implica un Pooling de recursos de 2 BBU. Sin embargo, se pueden esperar que la cantidad alcanzable de ganancia conjunta aumente incluso cuando un solo BBU gestione un mayor número de celdas. Hay que tener en cuenta que, para lograr una mejor eficiencia, la topología de red considera la capacidad de la radiobase junto con los ya presentes algoritmos de enrutamiento en el plano de control.

RECOMENDACIONES

- Las mejoras en la arquitectura C-RAN respecto a cada KPI analizado se debe en gran parte a las estrategias del manejo y distribución de RB. Los datos obtenidos en los distintos escenarios de simulación son muy sensibles al número de UE ingresados ya que los RB se verán más limitados mientras más usuarios existan. Las estrategias de asignación de recursos, aunque eficaces deben siempre evaluarse para escenarios más generales y a mayor escala.
- Para facilitar la toma y tratamiento de datos fue imprescindible contar con herramientas potentes que permitan organizar, buscar, tabular y realizar operaciones para largas columnas de números. El código fuente utilizado en las simulaciones puede ser descrito de manera más detallada para que se visualicen más parámetros o KPIs importantes para el monitoreo y mantenimiento de red.
- El desarrollo de las futuras redes celulares se ve muy influenciado por tecnologías híbridas 4G / LTE-5G para proporcionar la cobertura y capacidad que exige el crecimiento de suscriptores y de dispositivos. El hardware e interfaces descritas en el presente trabajo puede ser también aplicado a una red de 5ta generación (5G), siempre y cuando se tenga en cuenta todos los acoples de virtualización, los cuales son mandatorios en 5G.
- Es importante siempre considerar los desafíos que coexisten en el tráfico 5G dentro de las interfaces de radio públicas comunes evolucionadas (eCPRI) y todos los elementos que intervienen en ella. Para futuros trabajos se recomienda considerar cortas distancias ya que con esto se evitaría la empresa de

telecomunicaciones deba necesariamente contar con fibras oscuras, sin embargo, para el despliegue exitoso de 5G este tipo de fibra si se considera como un requisito casi obligatorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anna Tzanakaki, M. V. (2019). *Google Books*. Obtenido de https://books.google.com.ec/books?id=na7QDwAAQBAJ&pg=PA95&lpg=PA95&dq=bbu+papers+rru+concept&source=bl&ots=HKomhMeAT1&sig=ACfU3U1E6nNoGzNeID8d3nA_UEkHDD7ejw&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjxk-DLk4TvAhV3D7kGHS-bDcMQ6AEwDnoECA4QAw#v=onepage&q=bbu%20papers%20rru%20concept
- Antonio de la Oliva, J. A. (2016). Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/24631/overview_IEEE_2016_ps.pdf;jsessionid=A6BD085251357EBA36C743FBC02864B1?sequence=1
- Busson, A. (26 de 06 de 2018). Obtenido de <https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2018/9163783/>
- Carritech. (19 de 01 de 2018). Obtenido de <https://www.carritech.com/news/what-is-modulation-in-telecommunications/>
- Cruz García Gabriela, L. J. (21 de 10 de 2009). Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/5205>
- Dialoguemos. (25 de 07 de 2017). Obtenido de <https://dialoguemos.ec/2017/07/tomislav-topic-el-senor-ricardo-rivera-nos-pidio-comision-y-nosotros-le-hemos-dado-57-millones/telconet/>
- Ericsson. (07 de 11 de 2019). Obtenido de <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/5g-nr-ran-and-transport-choices-that-minimize-tco>
- Ericsson. (05 de 11 de 2020). Obtenido de <https://www.ericsson.com/es/press-releases/2020/11/ericsson-completes-acquisition-of-cradlepoint>
- Erik Dahlman, S. P. (2011). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123854896000205>
- Exinda. (2021). Obtenido de <https://manuals.gfi.com/en/exinda/help/content/exos/how-stuff-works/packet-loss.htm>
- Fa-Long Luo, C. Z. (2016). *ieeexplore*. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/book/7572254>
- Fitzgibbons, L. (04 de 2019). Obtenido de <https://whatis.techtarget.com/definition/baseband-unit-BBU>

- Francesco Musumeci, C. B. (2016). *osapublishing*. Obtenido de <https://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?uri=jlt-34-8-1963>
- Gomes, N. J. (2015). Obtenido de <https://kar.kent.ac.uk/50278/1/Fronthaul%20Evolution%20and%20CPRI%20-OFT-prepub.pdf>
- Guoqiang Zhang, G. Z. (2009). Obtenido de https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-02466-5_48
- Guoqiang Zhang, G. Z. (2009). Obtenido de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-02466-5_48
- Hajo Bakker, M. D. (30 de 06 de 2017). Obtenido de http://www.it.uc3m.es/wnl/5gnorma/pdf/5g_norma_d4-2.pdf
- Huawei. (25 de 02 de 2017). Obtenido de <https://fccid.io/ANATEL/02349-16-03257/Manual/C845E12C-D39B-4EE5-AD04-191C764F26A4>
- Huawei. (24 de 01 de 2018). Obtenido de <https://www.huawei.com/en/news/2018/1/Huawei-Turkcell-BBU5900-5G>
- Huawei. (22 de 07 de 2019). Obtenido de <https://forum.huawei.com/enterprise/en/c-ran-centralized-radio-access-network/thread/550769-875>
- Huawei. (2021). Obtenido de <https://e.huawei.com/en/products/network-management-and-analysis-software>
- Huawei. (2021). Obtenido de <https://e.huawei.com/en/products/enterprise-transmission-access/transmission/wdm/osn-1800>
- IBM. (2021). Obtenido de <https://www.ibm.com/docs/en/netcoolomnibus/8?topic=integrations-nokia-siemens-netact-3gpp-v6-corba>
- Inzunza, E. (10 de 11 de 2015). *slideshare*. Obtenido de <https://www.slideshare.net/EduardoInzunza2/rf-analysis-at-fiberbased-cell-sites-with-cpri>
- Isberto, M. (03 de 09 de 2020). Obtenido de <https://www.colocationamerica.com/blog/dark-fiber-explained>
- Jácome, E. (07 de 11 de 2019). *el comercio*. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/actualidad/carapungo-trajin-portal-shopping-quito.html>
- JDSU. (02 de 2015). Obtenido de <https://www.telesemana.com/wp-content/uploads/2015/02/Reporte-JDSU-CPRI-FINAL.pdf>
- keysight. (2021). Obtenido de https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600B/webhelp/subsystems/lte/Content/lte_overview.htm

- Kohn, U. (28 de 06 de 2013). Obtenido de <https://www.blog.adva.com/en/is-fronthaul-the-future-of-mobile-backhaul-networks>
- lambdagain. (15 de 06 de 2018). *lambdagain*. Obtenido de <https://www.lambdagain.com/learning-center/chapter-2-d-ran/>
- LANDMARK. (2021). Obtenido de <https://www.landmarkdividend.com/what-is-a-dark-fiber-network/>
- Lavallee, B. (2018). Obtenido de <https://www.ciena.com/insights/authors/Brian-Lavallee.html>
- Liang, O. (s.f.). Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <https://oscarliang.com/choose-esc-racing-drones/>
- Liqun Zhao, Y. Q. (24 de 01 de 2013). Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6417520>
- M.D. Ananth, R. S. (12 de 2016). Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8082604>
- Madrazo, J. (01 de 09 de 2018). Obtenido de <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/72005/7/javimloriteTFM0118memoria.pdf>
- Maps, G. (s.f.). Obtenido de <https://www.google.com.ec/maps/place/Carapungo,+Quito/@-0.0933478,-78.458975,15z/data=!3m1!4m5!3m4!1s0x91d58f1506f70035:0x844ab3eda6b427db!8m2!3d-0.0940492!4d-78.4510101?hl=es>
- Minitool. (2021). Obtenido de <https://www.minitool.com/lib/packet-loss.html>
- Modeler, O. (2021). Obtenido de <https://opnetprojects.com/opnet-network-simulator/>
- Mohamed Shehata, O. A. (2018). Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/195747118.pdf>
- Mojtaba Vaezi, Y. Z. (2017). Obtenido de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-54496-0_6
- Mugen Peng, Y. S. (30 de 03 de 2016). Obtenido de <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2548658>
- Murphy, K. (05 de 2015). *Ericsson*. Obtenido de https://www.isemag.com/wp-content/uploads/2016/01/C-RAN_and_Fronthaul_White_Paper.pdf
- Nicola Carapellese, S. S. (01 de 2015). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/285584154_BBU_Hotelling_in_Centralized_Radio_Access_Networks
- NSNAM. (14 de 07 de 2021). Obtenido de <https://www.nsnam.org/>
- omnetpp. (2021). Obtenido de <https://omnetpp.org/>

- O'Reilly. (2013). Obtenido de <https://hpbn.co/mobile-networks/>
- Pablo González-Brevis, J. G. (18 de 05 de 2011). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/221641064_Base_Station_Location_Optimization_for_Minimal_Energy_Consumption_in_Wireless_Networks
- Pallero, D. (07 de 11 de 2019). el comercio. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/actualidad/carapungo-trajin-portal-shopping-quito.html>
- Perrin, S. (09 de 2017). Obtenido de <https://www.fujitsu.com/us/Images/FNC-Fujitsu-Evolving-to-an-Open-C-RAN-Architecture-for-5G-White-Paper.pdf>
- Philippe Chanclou, A. P. (07 de 2013). *researchgate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/260334428_Optical_fiber_solution_for_mobile_fronthaul_to_achieve_Cloud_Radio_Access_Network
- QLIK. (2021). Obtenido de <https://www.qlik.com/us/products/qlikview>
- Rehenuma. (2020, 10 23). Resource Management in Cloud Radio Access. *MDPI SCIENCE JOURNAL*, 32. Retrieved from <https://www.verizon.com/about/our-company/5g/5g-radio-access-networks>
- Rehenuma, R. (10 de 05 de 2020). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/341277343_Resource_Management_in_Cloud_Radio_Access_Network_Conventional_and_New_Approaches/citation/download
- Ren-Hung Hwang, M.-C. P.-C. (26 de 07 de 2019). Obtenido de <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/15/3018/htm>
- rohde-schwarz. (2021). Obtenido de https://www.rohde-schwarz.com/fi/solutions/test-and-measurement/mobile-network-testing/network-optimization/network-optimization_231990.html
- Salman, T. (2016). Obtenido de <https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-16/ftp/cloudran/>
- Scarpati, J. (2021). Obtenido de <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/deep-packet-inspection-DPI>
- Sheard, M. (04 de 01 de 2017). *LinkedIn*. Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/significance-mobile-communications-michael-sheard/>
- Sheng Liu, R. D. (2015). Obtenido de http://old.ursi.org/proceedings/procGA14/papers/ursi_paper2707.pdf
- Shin, S. (04 de 07 de 2014). Obtenido de <https://www.netmanias.com/en/post/blog/6460/c-ran-fronthaul-cpri/why-should-jitter-be-minimized-in-cpri-fronthaul-frequency-accuracy>
- Slotosch, A. (23 de 05 de 2021). *Beekeeper*. Obtenido de <https://www.beekeeper.io/blog/why-mobile-communication-is-important-for-your->

companys-
operations/#:~:text=Mobile%20communication%20has%20the%20capability,wireless%20networks%20and%20mobile%20platforms.

technichgroup. (2021). Obtenido de <https://statseeker.technichgroup.com/determining-kpis-for-network-monitoring/>

techplayon. (13 de 11 de 2019). Obtenido de <https://www.techplayon.com/what-is-ecpri-how-it-contributes-to-5g-and-open-ran/>

techterms. (17 de 12 de 2011). Obtenido de <https://techterms.com/definition/baseband>

Teketec. (2012). Obtenido de <https://www.oracle.com/us/corporate/contracts/tekelec-services-guide-2167401.pdf>

Telecomkhabar. (15 de 06 de 2019). Obtenido de <https://www.telecomkhabar.com/2019/06/cpri-cable-function-and-details-in-telecom/>

Teltech. (27 de 08 de 2020). Obtenido de <https://teltechinsight.blogspot.com/2020/08/introduction-to-cpri-interfaces-for-5g.html>

Tuyen X. Tran, A. Y. (18 de 08 de 2017). *ieeexplore*. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8005353>

Ubiquiti. (2021). Obtenido de <https://community.ui.com/questions/Deep-Packet-Inspection-for-EdgeRouter-External-DASHBOARD/f139a75a-469a-4bde-b397-688c031db546>

Xiaohui, Z. (2008). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/221586515_Resource_Allocation_vs_Business_Process_Improvement_How_They_Impact_on_Each_Other/citation/download

ANEXOS

ANEXO 1

Requerimientos básicos necesarios migración de la arquitectura D-RAN a la arquitectura C-RAN en un medio físico LTE.

Anexo 1. 1: Tabla resumen de parámetros de modulación OFDM y BW requerido

Tx BW (Btx)	1.25 MHz	2.5 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Number of PRB (N_{PRB})	6	12	25	50	75	100
FFT size (N_{FFT})	128	256	512	1024	1536	2048
Sampling frequency	1.92 MHz	3.84 MHz	7.68 MHz	15.36 MHz	23.04 MHz	30.72 MHz
$(f_s = 15\text{KHz} \times N_{FFT})$	($1/2 \times 3.84$ MHz)		(2×3.84 MHz)	(4×3.84 MHz)	(6×3.84 MHz)	(8×3.84 MHz)
Subcarriers/PRB (N_{sc})	12					
OFDM symbols (N_{CP})	7/6 (Short/Long CP)					
Modulation	QPSK, 16-QAM, 64-QAM					
MIMO configurations	$4 \times 2, 2 \times 2, 1 \times 2, 1 \times 1$					
I/Q data rate (Gb/s) per AxC	0.0576	0.1152	0.2304	0.4608	0.6912	0.9216

Fuente: (Antonio de la Oliva, 2016).

ANEXO 2

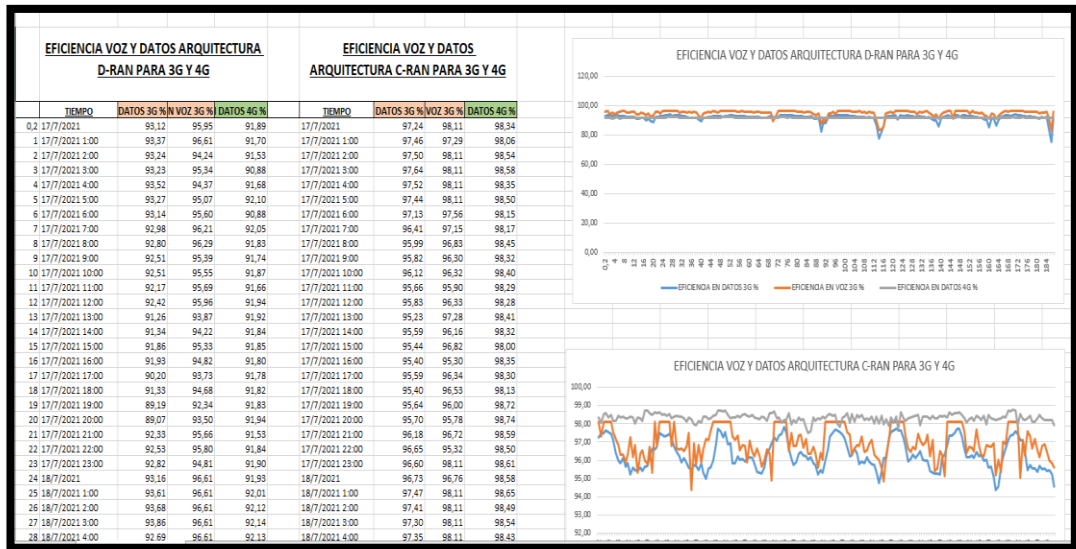
Anexo 1. 2: Número máximo de AxC en CPRI versión 7. FPGA de M=15 bits

Option #	CPRI data rate (Mb/s)	Coding	T	Number of AxCs of channel bandwidth and bit rate required per AxC					
				1.25 MHz (76.8 Mb/s)	2.5 MHz (153.6 Mb/s)	5 MHz (307.2 Mb/s)	10 MHz (614.4 Mb/s)	15 MHz (921.6 Mb/s)	20 MHz (1228.8 Mb/s)
1	614.4	8B/10B	8	8	4	2	1	—	—
2	1228.8	8B/10B	16	16	8	4	2	1	1
3	2457.6	8B/10B	32	32	16	8	4	2	1
4	3072	8B/10B	40	40	20	10	5	3	2
5	4915.2	8B/10B	64	64	32	16	8	5	4
6	6144	8B/10B	80	80	40	20	10	6	5
7	9830.4	8B/10B	128	128	64	32	16	10	8
				(63.36 Mb/s)	(126.72 Mb/s)	(253.44 Mb/s)	(506.88 Mb/s)	(760.32 Mb/s)	(1013.76 Mb/s)
7A	8110.08	64B/66B	128	128	64	32	16	10	8
8	10137.6	64B/66B	160	160	80	40	20	13	10
9	12165.12	64B/66B	192	192	96	48	24	16	12

Anexo 2: (Antonio de la Oliva, 2016).

ANEXO 3

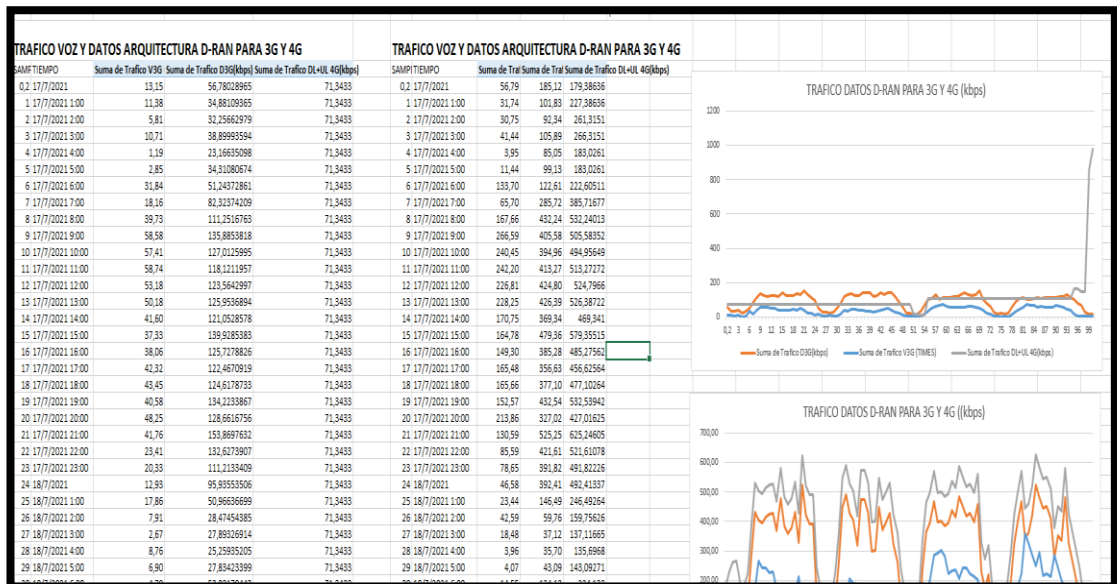
Anexo 1. 3: Tablas data bruta y tabulada de KPI Eficiencia



Anexo 3: Realizado por Adriana Abril

ANEXO 4

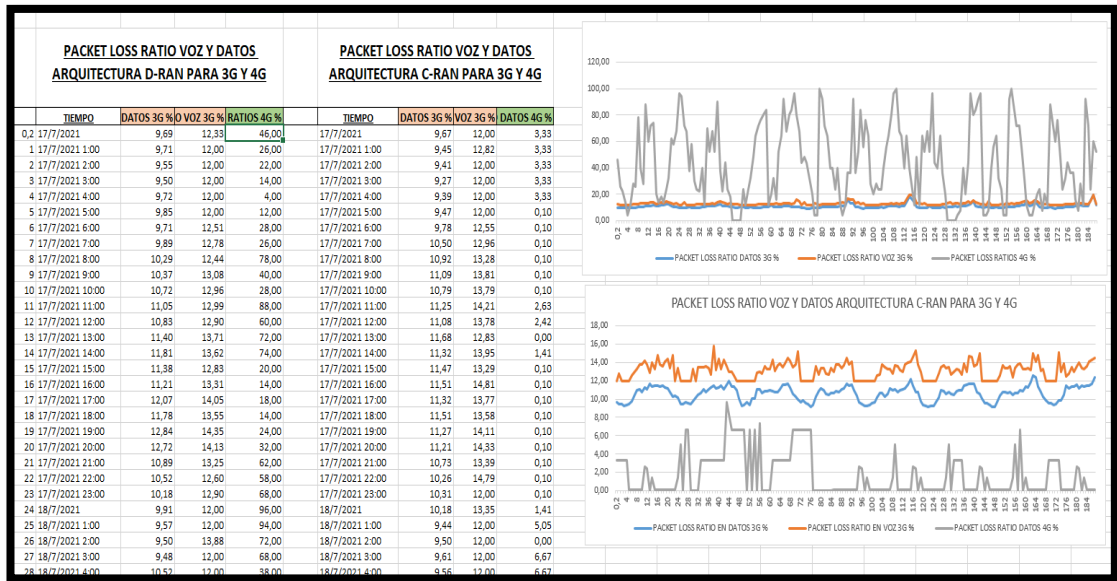
Anexo 1. 4: Tablas data bruta y tabulada de KPI Tráfico



Anexo 4: Realizado por Adriana Abril

ANEXO 5

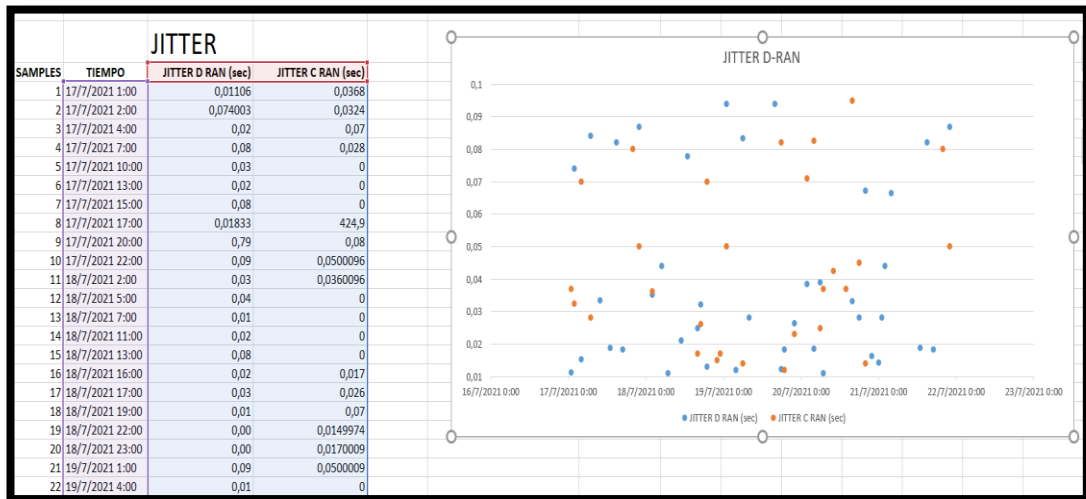
Anexo 1. 5: Tablas data bruta y tabulada de KPI Pérdida de Paquetes



Anexo 5: Realizado por Adriana Abril

ANEXO 6

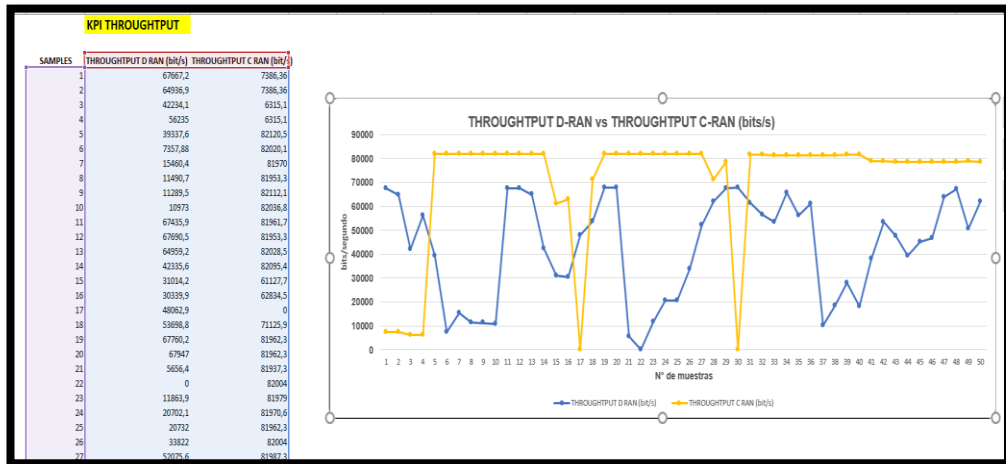
Anexo 1. 6: Tablas data bruta y tabulada de KPI Jitter



Anexo 6: Realizado por Adriana Abril

ANEXO 7

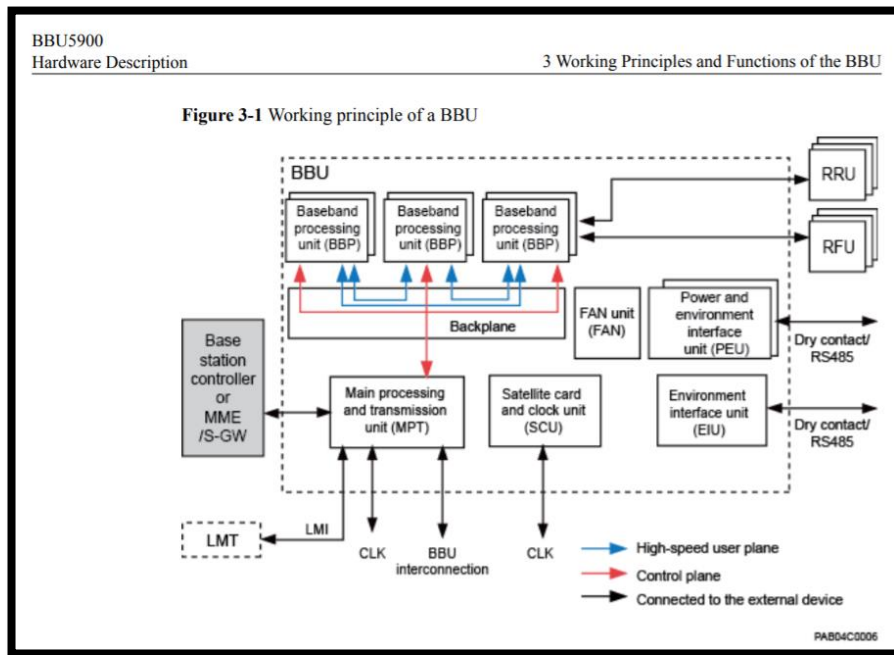
Anexo 1. 7: Tablas data bruta y tabulada de KPI THROUGHPUT



Anexo 7: Realizado por Adriana Abril

ANEXO 8

Anexo 1. 8: Datasheet BBU C-RAN



Anexo 8: (Huawei, 2017).

ANEXO 9

Interfaz X2

Las diferentes estaciones base están conectadas entre sí a través de la interfaz X2 (interfaz de señalización entre eNodeBs). Cada estación base está conectada con la red central móvil a

través de la interfaz S1(interfaz de señalización entre un eNodeB y el Evolved Packet Core (EPC)) (Madrazo, 2018). Cada grupo de BBU puede admitir múltiples RRH y las varias BBU están interconectadas a través de la interfaz X2. La interfaz S1 conecta una BBU a la red central móvil como se observa en Figura 2.11.

ANEXO 10

Technical Site Survey



Technical Site Survey Report.pdf