



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO DE RED 4G/LTE PARA FINES TARIFARIOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICO

ANDRÉS ANTONIO SALAZAR SANHUEZA

PROFESOR GUÍA:

NAZRE EL HUREIMI FACUSE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CLAUDIO ESTEVEZ MONTERO

PATRICIO VALENZUELA CANO

SANTIAGO, 2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL ELECTRICO

POR: ANDRÉS SALAZAR SANHUEZA

FECHA: 15 DE MARZO DEL 2016

PROF. GUÍA: SR. NAZRE EL HUREIMI

DISEÑO DE RED 4G/LTE CON FINES TARIFARIOS

Durante el último proceso de tarificación de cargos de interconexión de las empresas de telefonía móvil que comenzó a principio de 2013 y culminó en 2014, se consideró un diseño de una red eficiente con tecnología 3G incluida HSPA. En la actualidad, las tecnologías de redes móviles avanzan continuamente, hacia 4G y estándares superiores. De hecho durante el año 2014 se licitó en Chile la banda 700 MHz para desarrollo de redes 4G.

El objetivo de esta memoria es aportar con un diseño de red 4G bajo las mismas premisas de la empresa eficiente que se ocupa en la regulación de los cargos de interconexión de la telefonía móvil en Chile. Para ello, se ha utilizado como punto de partida el modelo de red 3G+HSPA desarrollado por la Subsecretaria de Telecomunicaciones de Chile en la reciente fijación tarifaria, de la que se incluyó información relativa a la proyección de demanda y sus resultados. Por diseño de red se entiende por la estimación de la cantidad de elementos de la arquitectura de la red que pueda satisfacer la demanda y la cobertura exigida.

El trabajo se ha realizado sobre la base de la siguiente metodología:

- a) Se revisaron aspectos relacionados con arquitectura, planificación y diseño de redes móviles aplicados al último proceso de fijación de tarifas de interconexión en Chile.
- b) Se analizó el estado del arte en relación a aspectos de arquitectura, planificación y diseño de redes 4G/LTE.
- c) Se identificaron los elementos críticos de diseño de redes 4G/LTE para efectos de implementar un dimensionamiento de una red 4G/LTE.
- d) Se confeccionó un diseño de red 4G/LTE para atender una demanda equivalente a la utilizada en el último proceso de fijación de tarifas.

El resultado de este trabajo concluyó en la determinación de las posibles eficiencias tanto técnicas como económicas que se producen al comparar el nuevo diseño de red 4G/LTE con un diseño de red 3G+HSPA, sobre la base de sensibilizar diferentes parámetros claves, tales como la banda de frecuencia de operación, la proyección de demanda, la capacidad máxima de equipos, precios unitarios, entre otros.

Las opiniones vertidas por el Memorista antes o después de la aprobación de su informe del trabajo de título, su trabajo de título, en él o en ocasión de su defensa, o en cualquier publicación a él referido, son de exclusiva responsabilidad del autor y no comprometen a la Universidad de Chile, ni a la comisión evaluadora

Agradecimientos

Gracias primero que todo a mi familia por el amor y el apoyo por este proceso. También al profesor Nazre, por la ayuda y la guía. Gracias a mis amigos Carlos, Diego, Paulo, Vale, y tantos otros que se me van a olvidar, por las palabras de aliento. También gracias a mi negrita Bielka, por estar al lado mío apoyando en todo. Quiero agradecer a los Machines, al Divino Circuito por hacer que la vida universitaria fuera más agradable. Al Preu JCT por enseñarme tanto siendo profesor.

Quiero agradecer a todos los que me ayudaron a poder sacar la carrera, compartieron una cerveza o trasnocharon conmigo para poder sacar un trabajo.

Gracias por todo.

A mi gente querida

Índice de Contenidos

1. Introducción.....	13
1.1. Fundamento y Objetivos Generales	13
1.2. Objetivos Específicos	13
1.3. Alcances	14
1.3.1. Sobre Nombre 4G/LTE	14
1.3.2. Alcance del Trabajo.....	15
2. Revisión Bibliográfica	16
2.1. Marco regulatorio chileno en telefonía móvil.....	16
2.1.1. Definición de empresa eficiente	16
2.1.2. Selección de la tecnología	17
2.1.3. Costos de inversión y de largo plazo	17
2.1.4. Proceso de tarificación en Chile	18
2.2. Principios de redes móviles	19
2.2.1. Reutilización de frecuencias	19
2.2.2. Plano de control, movilidad y usuario	20
2.3. Arquitectura de redes móviles	21
2.3.1. Arquitectura general de una red 2G.....	21
2.3.1.1. Subsistemas.....	22
2.3.1.2. Interfaces.....	23
2.3.2. Arquitectura de red LTE.....	24
2.3.2.1. Subsistemas.....	24
2.3.2.2. Interfaces.....	27
2.3.2.3. Otros elementos.....	32
2.3.3. Arquitectura de Servicios de Multimedia IP (<i>IP Multimedia Services, IMS</i>).....	34
2.3.3.1. Tipos de VoLTE.....	34
2.3.3.2. Arquitectura	35
2.4. Planificación de redes móviles LTE	37
2.4.1. Descripción general	37
2.4.2. Estimación eNB	38
2.4.2.1. Presupuesto de Enlace.....	39
2.4.2.2. Modelo de propagación Okumura-Hata, estimación de área y N° de eNB por cobertura.....	43

2.4.2.3.	Rendimiento por celda, N° de eNB por capacidad y eNB por sector.....	45
2.4.3.	Estimación de elementos del núcleo e IMS	46
3.	<i>Implementación</i>	48
3.1.	Demanda de diseño para acceso	48
3.1.1.	Tráfico de voz a erlangs y EPBS en Hora Cargada (HC)	49
3.1.2.	Conversión de mensajes y datos de internet en datos en HC	51
3.2.	Determinación de eNB	52
3.2.1.	Presupuesto de enlace	52
3.2.2.	Modelo de propagación Okumura Hata y radios teóricos.....	54
3.2.3.	Radios ajustados y eNB por cobertura.....	55
3.2.4.	Estimación de rendimiento por eNB.....	56
3.2.5.	Determinación de cantidad de canales de voz por eNB	56
3.2.6.	eNB por capacidad y eNB totales	58
3.3.	Demanda de diseño para núcleo e IMS	59
3.3.1.	Ancho de banda por Interfaz S1 y X2.....	59
3.3.2.	Modelo de comportamiento de datos de usuario	60
3.3.3.	Cálculo de otras variables de restricción por celda.....	61
3.3.4.	Capacidades máximas de equipo	62
3.4.	Determinación de elementos de EPC, IMS y <i>Backbone</i>	62
3.5.	Determinación de largo de enlaces	64
3.5.1.	Interfaz X2	64
3.5.2.	Interfaces S1 U y C.....	65
3.5.3.	Interfaz S5 y Conexión P-GW con <i>Backbone</i> y IMS.....	65
3.5.4.	Otras conexiones.....	67
3.6.	Costo de la red	67
4.	<i>Resultados, Pruebas y Discusión</i>	68
4.1.	Resultados	68
4.1.1.	Elementos y costos de la red diseñada y red 3G	68
4.2.	Pruebas	69
4.2.1.	Adaptación red LTE a 3G.....	69
4.2.2.	Cantidad de eNB y costo de red para diferentes frecuencias de despliegues.....	69
4.2.3.	Costos para diferentes anchos de banda de despliegues.	70
4.2.4.	Costo de MIMO por eNB	72
4.2.5.	Costos por voz y datos	73

4.2.6.	Cantidad de elementos por cambio de voz	74
4.2.7.	Cantidad de elementos por cambio de datos.....	75
4.2.8.	Cambio de restricción activa por disminución de capacidad máxima	76
4.2.9.	Sensibilidad de precios unitarios	76
4.3.	Discusión.....	77
4.3.1.	Sobre validez de precios unitarios	77
4.3.2.	Sobre la frecuencia de despliegue de la red	78
4.3.3.	Sobre las capacidades máximas de los equipos	78
5.	Conclusiones	79
	Trabajo Futuro	80
	Referencias.....	81
	Anexos	83

Índice de Figuras

Figura 1: Procedimiento de fijación tarifaria [5]	18
Figura 2: Cluster con factor de reuso igual a tres	20
Figura 3: Arquitectura de Red 2G	21
Figura 4: Arquitectura de EPC	25
Figura 5: Diagrama de bloque del procesamiento de datos en UL.....	30
Figura 6: Distribución de los datos en las subportadoras UL.....	30
Figura 7: MIMO 2x2	34
Figura 8: Arquitectura IMS	36
Figura 9: Diagrama de flujo de diseño de red <i>Bottom-up</i>	38
Figura 10: Diagrama de bloque para determinación de eNB	39
Figura 11: Agrupación de 22 eNB para enlaces x2.....	65
Figura 12: Conexión entre S-GW y P-GW.....	66
Figura 13: Cantidad de eNB por cambio de frecuencia de despliegue.....	70
Figura 14: Costo de elementos por despliegue con MIMO.....	71
Figura 15: Costos de elementos por despliegue sin MIMO	71
Figura 16: Gráfico de costos de red en función de la voz y los datos	74

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Parametros OFDMA para LTE	28
Tabla 2-2: Tipos de prefijos cíclicos	28
Tabla 2-3: Escenarios de cobertura y sus pérdidas de penetración de edificios.....	40
Tabla 2-4: Desviación estándar del Margen por Sombra	42
Tabla 2-5: Constantes de modelo Okumura-Hata	43
Tabla 2-6: Constante para cálculo de área de grupo de antenas	45
Tabla 2-7: Restricciones aplicadas por elementos de Núcleo y IMS	47
Tabla 3-1: MOU de Demanda	48
Tabla 3-2: Consumo de datos por mes por usuario	48
Tabla 3-3: Consumo de mensajes por mes por usuario	49
Tabla 3-4: Cantidad de subscriptores y área a abarcar para la Región Metropolitana en el año 0	49
Tabla 3-5: Parámetros de conversión de llamadas a erlangs	50
Tabla 3-6: Factores de conversión de mensajes a datos	51
Tabla 3-7: Parámetros comunes para presupuesto de enlace	52
Tabla 3-8: Parámetros dependientes del tipo de área para el presupuesto de enlace	53
Tabla 3-9: Pérdida en el medio por tipo de área.....	54
Tabla 3-10: Entrada modelo Okumura Hata	54
Tabla 3-11: Resultados Okumura Hata para 700 MHz	54
Tabla 3-12: Resultados Okumura Hata para 2600 MHz	54
Tabla 3-13: Factores de castigo para la banda 700 MHz	55
Tabla 3-14: Factores de castigo para la banda 2600 MHz	55
Tabla 3-15: Radios y áreas ajustadas para la banda 700 MHz	55
Tabla 3-16: Radios y áreas ajustadas para la banda 2600 MHz	55
Tabla 3-17: Variables de diseño para rendimiento por eNB	56
Tabla 3-18: Rendimiento de eNB por banda de frecuencia.....	56
Tabla 3-19: Ancho de banda de PRB por frecuencia desplegada.....	57
Tabla 3-20: Porcentaje de eNB agregados por capacidad para el último año	58
Tabla 3-21: Parámetros para estimación de ancho de banda para la Interfaz S1	59
Tabla 3-22: Modelo de comportamiento de usuario.....	60
Tabla 3-23: Duración de intentos de llamadas y intentos por llamadas	62
Tabla 3-24: Criterios de respaldo para elementos	63

Tabla 4-1: Cantidad de elementos por año para la red diseñada	68
Tabla 4-2: eNB desplegadas en el último año	72
Tabla 4-3: Valores para el cálculo de MIMO por eNB	73
Tabla 4-4: Cantidad de elementos por concentración de voz	74
Tabla 4-5: Cantidad de elementos por cambios en datos al mes	75
Tabla 4-6: Carga límite y próxima restricción activa para elementos de la red	76
Tabla 4-7: Cambio en costo total por cambio en costo unitario	77
Tabla A-1: Capacidades máximas para elementos de núcleo	83
Tabla A-2: Capacidades máximas para otros elementos	83
Tabla A-3: Precios unitarios de elementos	83

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Cantidad de subportadoras en un canal, en función del número de bloques	28
Ecuación 2: Ecuación de presupuesto de enlace	39
Ecuación 3: Cálculo de Margen por Sombra.....	42
Ecuación 4: Modelo Okumura-Hata.....	43
Ecuación 5: Corrección por altura de móvil para denso urbano en Okumura-Hata.....	43
Ecuación 6: Corrección por altura de móvil para los otros escenarios en Okumura-Hata.....	44
Ecuación 7: Función de corrección en área suburbano para Okumura-Hata	44
Ecuación 8: Función de corrección en área rural para Okumura-Hata.....	44
Ecuación 9: Cálculo de área de grupo de antena	44
Ecuación 10: Determinación de eNB por cobertura.....	45
Ecuación 11: Rendimiento por eNB.....	45
Ecuación 12: eNB por capacidad.....	46
Ecuación 13: Determinación de erlangs de voz en hora cargada	50
Ecuación 14: Conversión de SMS a datos en HC	51
Ecuación 15: Conversión de MMS a datos en HC	52
Ecuación 16: Conversión de datos de Internet a datos en HC.....	52
Ecuación 17: Cálculo de tamaño para cada PRB	57
Ecuación 18: Cálculo para ancho de banda para la Interfaz S1U.....	60
Ecuación 19: Cálculo para ancho de banda para la Interfaz S1C.....	60
Ecuación 20: Cálculo para ancho de banda para la Interfaz X2.....	60
Ecuación 21: Cálculo de erlangs de datos	61
Ecuación 22: Cálculo de radio promedio	64
Ecuación 23: Ecuaciones para distancia total en un árbol.....	66

1. Introducción

En el capítulo actual, se presentan la fundamentación de esta memoria, mostrando cuales serán los objetivos a cumplir en el proceso de desarrollo de ésta.

1.1. Fundamento y Objetivos Generales

En la actualidad uno de los temas de mayor relevancia en el sector de la telefonía móvil, tanto en Chile como en el mundo es la regulación y, en particular, los procesos de tarificación que repercuten en los resultados para estas empresas de telecomunicaciones y para los consumidores.

Además, dado a la competencia en el mercado de las telecomunicaciones y el valor agregado que otorga el entregar un servicio de mejor calidad, la actualización de tecnología es constante entre las empresas de telefonía móvil. Es por ello que los modelos con fines reguladores se deben actualizar constantemente.

Durante los años 2013-2014 para Chile, se desarrollaron los procesos de tarificación de cargos de interconexión de las empresas de telefonía móvil, mediante un diseño de red con tecnología 3G con HSPA. En la actualidad, la tecnología móvil está avanzando hacia una red 4G, tomando en consideración una primera etapa, llamada *Long Term Evolution* (LTE).

El objetivo general de esta memoria será desarrollar un modelo de red 4G/LTE en un entorno de diseño de empresa eficiente acorde a la normativa chilena para su aplicación en temas de regulación.

1.2. Objetivos Específicos

Con el fin de llevar a cabo esta memoria, es preciso ejecutar las siguientes actividades:

- 1) Revisar bibliográfica de las redes móviles y de la regulación tarifaria en Chile y en el mundo, que permitan entender la arquitectura de la Red y las restricciones que deberá tener el modelo a diseñar
- 2) Analizar el estado del arte la planificación de redes LTE. Éste análisis tiene como fin el comprender el modelamiento de los diferentes elementos que conforman la red.
- 3) Identificar elementos críticos de diseño de red LTE. A través del análisis del estado del arte y la arquitectura de la red, es posible la identificación de los elementos críticos. Estos elementos serán los fundamentales para la definición de los parámetros de la red.
- 4) Identificar costos de los elementos críticos en función de los parámetros del modelo. Ésta identificación es debido a que los costos son necesarios para un posterior uso tarifarios.
- 5) Establecer una regla o patrón para el dimensionamiento de los elementos críticos. Este paso consiste en suponer condiciones tal que un patrón de diseño adaptado a estas condiciones logre establecer el dimensionamiento de los elementos críticos.
- 6) Diseñar red móvil 4G/LTE para fines tarifarios.

1.3. Alcances

1.3.1. Sobre Nombre 4G/LTE

Si bien por definición de la UIT en sus reportes LTE no corresponde a una red 4G [1], en un Seminario del 2010 estos permitieron el uso de la sigla 4G para referirse a LTE [2]. En esta memoria, 4G se utiliza como sinónimo para referirse a LTE por motivos de estética. Esto es solo un alcance de nombre, ya que LTE no es 4G, además de que 4G se refiere a un conjunto de tecnologías que cumplen ciertas normas, mientras que LTE es una tecnología que además que no

cumple con las normas definidas como 4G. Además se utiliza indistintamente para el enlace descendente la palabra *Downlink* (DL) y para el enlace ascendente la palabra *Uplink* (UL)

1.3.2. Alcance del Trabajo

Este trabajo solo se limita al análisis del diseño de los elementos de red y su costeo. Los otros módulos de la empresa eficiente, como los costos en RRHH, cálculos tarifarios e indexación no son parte de esta memoria.

2. Revisión Bibliográfica

En este capítulo se describen los conceptos generales básicos que dan estructura al proyecto. Se partirá por explicar cuál es el marco Regulatorio Chileno en Telefonía Móvil, explicando los conceptos utilizados que engloban a esta memoria y donde se enmarca ésta en el proceso de tarificación. Se continuará con un repaso de las arquitecturas de redes 4G/LTE. Para ello, se mostrará a modo de introducción una leve inspección a la arquitectura de red 2G para detallar al finalizar la arquitectura LTE.

2.1. Marco regulatorio chileno en telefonía móvil

A continuación se detallarán los conceptos más importantes de la legislación de Chile sobre la regulación económica del mercado de la telefonía móvil

2.1.1. Definición de empresa eficiente

Las bases técnico-económicas establecidas para el último proceso de fijación tarifario de servicios regulados para las concesionarias., establecen la siguiente definición: “La empresa eficiente corresponde a una empresa modelo, que utilizando medios propios o de terceros, ofrece sólo los servicios sujetos a fijación tarifaria, considerando para ello únicamente los costos indispensables de proveer cada servicio de acuerdo a las tecnologías disponibles, la más eficiente gestión técnica y económica factible, la calidad establecida para el servicio según la normativa vigente.”. “El diseño de la empresa eficiente se basará en criterios de eficiencia técnica económica en cuanto a: Tecnologías disponibles, gestión, administración, comercialización, recursos humanos, localización, ingeniería de redes y uso de instrumentos tributarios, entre otros, que combinados, permitan alcanzar el costo eficiente de producción dada la naturaleza del servicio.”. “El diseño de la red de la empresa eficiente debe ser consistente con la eficiencia

técnica económica en el uso de los recursos, tanto de inversión como de explotación, y con el uso eficiente de la tecnología disponible comercialmente, que cumpla con las características requeridas por la empresa eficiente y permita prestar los servicios demandados al costo eficiente y con la calidad establecida en la normativa vigente.”[3]

2.1.2. Selección de la tecnología

Las Bases definen este tema exponiendo: “La concesionaria deberá justificar y fundamentar para todos los efectos que correspondan, el uso de la tecnología utilizada en el modelo de empresa eficiente. La tecnología utilizada corresponderá a aquella disponible comercialmente en el país, que asegure la calidad y eficiencia del servicio.”[3]

2.1.3. Costos de inversión y de largo plazo

La Ley General de Telecomunicaciones establece: “... se considerará en cada caso una empresa eficiente que ofrezca sólo los servicios sujetos a fijación tarifaria, y se determinarán los costos de inversión y explotación incluyendo los de capital, de cada servicio en dicha empresa eficiente. Los costos a considerar se limitarán a aquellos indispensables para que la correspondiente empresa eficiente pueda proveer los servicios de telecomunicaciones sujetos a regulación tarifaria, de acuerdo a la tecnología disponible y manteniendo la calidad establecida para dichos servicios.” Después la ley continúa: “Se entenderá por costo total de largo plazo de una empresa a un monto equivalente a la recaudación que le permita cubrir los costos de explotación y capital asociados a la reposición de los activos de dicha empresa. Para efectos de este Título, estos costos se limitarán a aquellos indispensables para que la empresa pueda proveer los servicios de telecomunicaciones sujetos a regulación tarifaria, en forma eficiente, de acuerdo a la tecnología disponible comercialmente y manteniendo la calidad establecida del servicio. El cálculo considerará el diseño de una empresa eficiente que parte desde cero, realiza las inversiones necesarias para proveer los servicios involucrados, e incurre en los gastos de explotación propios del giro de la empresa, y en consideración a la vida útil de los activos, la tasa de tributación y la tasa de costo de capital, obtiene una recaudación compatible con un valor actualizado neto del proyecto igual a cero.”[4]

2.1.4. Proceso de tarificación en Chile

Con las Bases Técnicas Económicas definidas, la Concesionaria (Empresa de Telecomunicaciones a establecer sus tarifas) elabora un Estudio Tarifario, donde presenta una Propuesta de Tarifas. Estas tarifas son respaldadas por un modelo de empresa eficiente.

Entregada la propuesta tarifaria de la Concesionaria, la Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL), se encarga o encarga a una consultora la revisión del Estudio Tarifario, para la confección de Informe de Objeciones e Contraproposiciones (IOC). Después de la entrega del IOC, la Concesionaria tiene 30 días para incorporar modificaciones o apelar a las objeciones, generando un Informe de Controversias.

Estas Controversias se llevan a una Comisión Pericial, la cual está formada por 3 peritos, un perito propuesto por la SUBTEL, un perito propuesto por la Concesionaria y un perito de mutuo acuerdo. Esta Comisión Pericial discierne sobre las controversias, con lo que la SUBTEL puede emitir ya el Informe de Sustentación (IS) el cual justifica y fundamenta los valores de las tarifas finales[5]



FIGURA 1: PROCEDIMIENTO DE FIJACIÓN TARIFARIA [5]

2.2. Principios de redes móviles

En esta sección se mostrará los principios básicos detrás de las redes móviles.

La particularidad de una red móvil es el uso de múltiples transmisores/receptores de baja potencia. Como el rango del transmisor es pequeño, un área puede ser dividida en celdas, cada una implementada con su propia por su propia antena. Cada celda es ubicada en una banda de frecuencia y es cubierta por una Estación Base, que consiste en un transmisor, un receptor y una unidad de control. Celdas adyacentes son asignadas con diferentes frecuencias para evitar interferencia o la diafonía (una energía indeseada que aparece en una señal como resultado del acoplamiento de otras señales). Sin embargo, celdas con una distancia suficiente una de otras pueden usar la misma banda de frecuencia.

Lo primero en diseñar es la forma de las celdas a cubrir un área. Si bien teselar mediante celdas cuadradas es una solución simple, se desea que las celdas vecinas se encuentren a una misma distancia, ya que esto simplifica el trabajo de determinar a qué celda se debe hacer el cambio de llamada de un usuario. Un hexágono provee una teselación en que los centros de las celdas vecinas se encuentran a una misma distancia.

En la práctica, un patrón hexagonal exacto no es usado, si no que se usan variaciones debido a limitaciones topográficas, condiciones de propagación de señales locales y limitación de lugares de asentamiento de antenas.[6]

2.2.1. Reutilización de frecuencias

En una red móvil, no es práctico usar la misma banda de frecuencia para celdas adyacentes, por problemas de interferencia (en CDMA es análogo con los códigos). Por lo contrario, en la práctica se usa la misma banda de frecuencia en múltiples celda con cierta distancia unas de otras. Esto permite que la misma banda de frecuencia pueda ser utilizada en múltiples conversaciones en diferentes celdas.[6]

Una agrupación de celdas que utilizan todas las bandas de frecuencia que se disponen sin que haya repetición es llamada *Cluster*. Un *Cluster* puede tener diferentes tipos de formas, siendo el objetivo de ésta el minimizar la interferencia entre celdas con el mismo rango de frecuencias. La cantidad de celdas con diferentes bandas de frecuencia en un *Cluster* es llamada factor de reúso.

Dado un espectro total concesionado, con N subportadoras, este se debe dividir por el factor de reúso F, para obtener la cantidad de subportadoras que se utilizan en cada celda. Como ejemplo, véase la figura 2

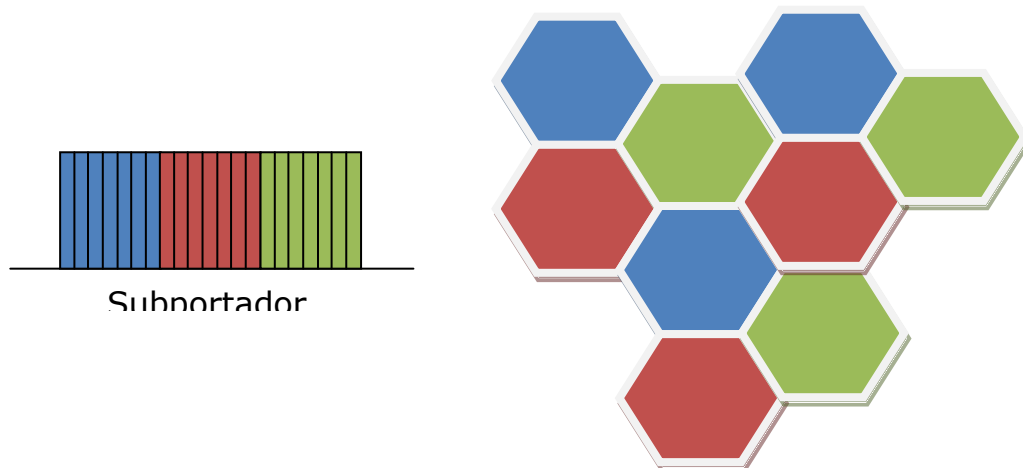


FIGURA 2: CLUSTER CON FACTOR DE REÚSO IGUAL A TRES

2.2.2. Plano de control, movilidad y usuario

Se refiere a plano de control a los elementos, entidades y protocolos que están encargados del control de recursos de la red, la autenticación de los clientes, como por ejemplo las frecuencias en las torres o las bases de datos para el funcionamiento de la red.

Con una definición similar se tiene el plano de movilidad, la que controla que la comunicación dentro del área abarcada por la red no se pierda a través del movimiento del cliente.

El plano de usuario es el encargado de que los datos transmitidos por la red se transmitan sin errores. [7]

2.3. Arquitectura de redes móviles

Esta sección trata de un repaso por la arquitectura de Red 4G/LTE, por ello a modo de introducción, se verá la arquitectura de GSM (2 G) y cuáles son los cambios para llegar a 4G. Al final se mostrará la arquitectura que hace posible la Voz sobre LTE (*Voice over LTE*, VoLTE).

2.3.1. Arquitectura general de una red 2G

En la siguiente figura se muestra los elementos que forman la arquitectura de una red 2G:

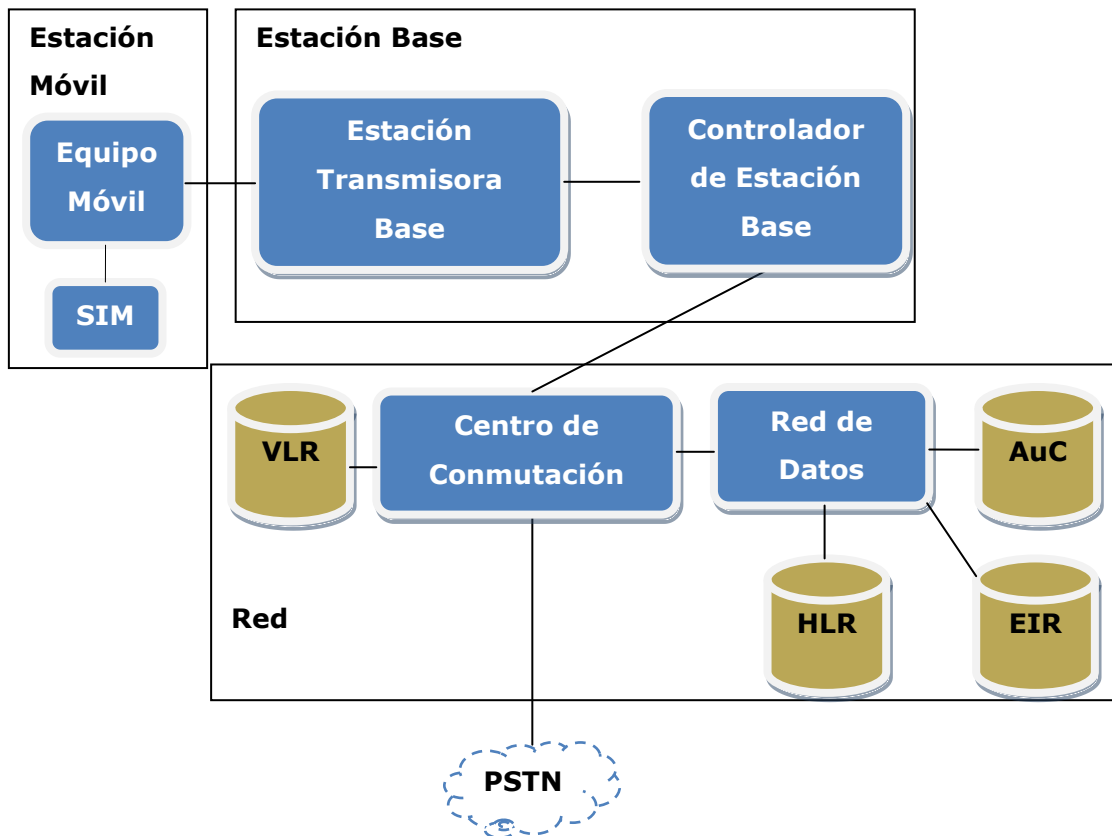


FIGURA 3: ARQUITECTURA DE RED 2G

Tal como muestra la figura 2, los diferentes subsistemas interactúan entre sí, mediante interfaces definidas. A continuación se describirán los subsistemas de la arquitectura, para continuar con la interfaces

2.3.1.1. Subsistemas

Los Subsistemas dentro de la arquitectura son los siguientes:

- Estación Móvil (*Mobile Station, MS*): Es el conjunto que se conforma por el equipo móvil (*Mobile Equipment, ME*), que se refiere al aparato físico como un celular, Smartphone o tableta, que debe incluir todo el hardware para poder comunicarse a través de radio y módulo de identidad del suscriptor (*Subscriber Identity Module, SIM*), que es un módulo insertable a los equipos móviles, que guarda el número de identificación del suscriptor, la red permitida a utilizar, llaves de encriptación y otra información específica sobre el suscriptor. Una tarjeta de identidad debe ser genérica, y debe servir para cualquier tipo de equipo móvil.[6]
- Subsistema Estación Base (*Base Station Subsystem, BSS*): un BSS consiste en un controlador de Estación Base (*Base Station Controller, BSC*) y una o más Estación Transmisora Base (*Base Transceiver Station, BTS*). Cada BTS define una celda; ésta incluye una Antena de Radio, un radio transmisor y una conexión al BSC. Un BSC puede ser yuxtapuesta con una BTS o puede que controle múltiples BTS y por consiguiente múltiples celdas. El BSC reserva frecuencias, maneja el handoff de una BTS desde una celda a otra dentro del BSS y maneja la paginación.[6]
- Subsistema de Red (*Network Subsystem, NS*): El NS provee la conexión entre la red móvil y la red fija. El NS controla el handover entre celdas de diferentes BSS, autentifica usuarios y valida sus cuentas, e incluye funciones para permitir roaming internacional de los usuarios móviles. El elemento central del NS es el Centro de Conmutación Móvil (*Mobile Switching Center, MSC*) [6]. Esta es respaldada por 4 bases de datos que controla:
 - Registro de Hogar (*Home Location Register, HLR*): El HLR guarda información, tanto permanente como temporal, sobre los suscriptores que “pertenecen” a él, es decir, suscriptores cuyos servicios sean entregados por la compañía dueña de la

red. Cabe destacar que el HLR es único para cada compañía. Dentro de éste registro se encuentra la identidad del suscriptor, los servicios que tiene habilitado, la ubicación [8].

- Registro de Visitantes (*Visitor Location Register, VLR*): Es una copia del HLR, pero en cuyos registros se encuentran suscriptores que se encuentran actualmente físicamente en el área abarcada por el MSC. Esto para disminuir las consultas al HLR [8].
- Centro de Autenticación (*Authentication Center, AuC*): Es usado para actividades de autenticación; como por ejemplo, mantiene las llaves de autenticación y encriptación para todos los suscriptores de ambas bases de datos anteriores. El AuC controla el acceso a los datos de usuario, además de ser utilizado para la autenticación cuando un suscriptor se une a una red [8].
- Registro de Identidad de Equipamiento (*Equipment Identity Register, EIR*): El EIR mantiene información sobre el tipo de equipos que existe en la Estación Móvil. También tiene un rol en la seguridad, como bloquear las llamadas desde un equipo robado y prohibiendo el uso de la red a estaciones que no han sido aprobadas [8].

2.3.1.2. Interfaces

Tal como se dijo anteriormente, los subsistemas de la red interactúan a través de interfaces. Estas se describen a continuación:

- Interfaz Um: Es una interfaz de radio que existe entre el terminal y la estación base. Por esta misma interfaz están implementados los canales de señalización y de tráfico. En 2G, para el acceso se utiliza TDMA y FDMA combinado [6].
- Interfaz Abis: Esta interfaz se encuentra entre la estación base y el control de estación base. La comunicación entre estos subsistemas se hacen a través de tramas E1[8].
- Interfaz A: Se encuentra entre el Centro de Conmutación y el control de estación base. Esta comunicación se realiza con protocolos de señalización de canal común N°7 [8].

2.3.2. Arquitectura de red LTE

En esta sección se describirá la arquitectura de red LTE. Como la memoria trata de una red 4G, además de los subsistemas e interfaces, se tocarán con mayor profundidad temas que resultan relevantes para el diseño.

A diferencia de 2G y 3G, LTE fue diseñado por la 3GPP sin entidades de conmutación de circuitos, es decir, LTE no mantiene comunicación a través de asignación de recursos dedicados, ya que todos los servicios se logran proporcionar a través de entidades basados en conmutación de paquetes [7].

2.3.2.1. Subsistemas

Como se verá a continuación, LTE y 2G todavía mantienen una idea de subsistemas que mantienen las mismas funciones. Estos son los siguientes.

2.3.2.1.1. Equipo de Usuario (*User Equipment, UE*)

Al igual que en 2G, se compone de dos dispositivos básicos, el equipo móvil capaz de manejar la comunicación por tecnología 4G y una tarjeta de identificación. La tarjeta en LTE se llama Universal SIM [7].

2.3.2.1.2. Evolved UTRAN

Evolved UTRAN (EUTRAN), viene a reemplazar al subsistema BSS. Este está formado por los *Evolved Node B* (eNB) como elemento fundamental, que viene a ser una Estación Base de 4G, que tiene la tecnología suficiente como para no necesitar un paralelo de BSC.

Cada eNB almacena la información necesaria para mantener los servicios activos, como información del estado del equipo información de seguridad, etc. Además, al no tener un BSC, el eNB alberga funciones de control de movilidad, es decir, maneja la decisión de realizar handover;

control de interferencias entre eNB y control de asignación dinámica de los recurso de radio tanto en enlace ascendente como descendente. Además, un eNB puede estar conectado simultáneamente a múltiples Entidades de Manejo de Movilidad (*Mobility Management Entity*, MME), que es el subsistema siguiente en la jerarquía de transmisión. El conjunto de MME que tiene acceso un eNB se denomina su *pool area*. Así, es posible balancear la carga de señalización entre diferentes MME, seleccionando que MME controla el acceso de cada usuario, lo que entrega mayor robustez del sistema frente a fallos [7].

2.3.2.1.3. Red troncal de paquetes evolucionada (*Evolved Packet Core EPC*)

La EPC es el equivalente al NS de la red 2G. Es el encargado de entregar conectividad IP mediante su arquitectura. Cabe destacar que este módulo puede ser accedido por diferentes redes de acceso, que no sean necesariamente EUTRAN, como por ejemplo WiMAX.

En la figura 4 se muestra la arquitectura dentro del EPC y las entidades que lo forman.

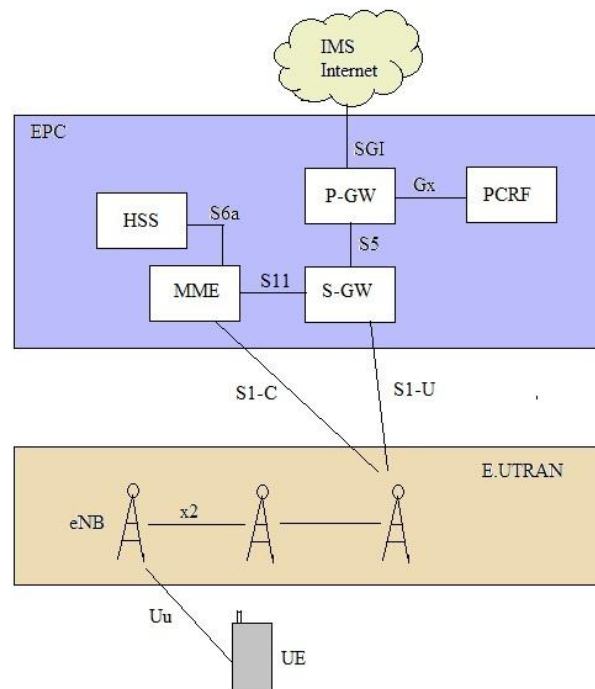


FIGURA 4: ARQUITECTURA DE EPC

2.3.2.1.3.1. MME

Esta entidad es el paralelo de MSC, pero solo abarca gestiones de Control, y no de ruteo de datos. Entre las funciones que cumple la MME se puede destacar autenticación y autorización del acceso de los usuarios, la gestión de los servicios portadores desde la interfaz de radio hasta el final de la EPC [7].

2.3.2.1.3.2. Compuerta de Servicio (Serving Gateway, S-GW)

Esta entidad es puerta de los datos entre EUTRAN y la EPC. Sus funciones más importantes es ser el encaminamiento en ambos sentidos del tráfico de usuario y el almacenamiento temporal de paquete IP de los usuarios en caso de *handover* [7].

2.3.2.1.3.3. Compuerta de las Redes de Paquetes (Packet Data Network Gateway, P-GW)

Este módulo es el límite entre la red LTE y las redes de paquete, es por ello que a través de éste un usuario conectado a la red móvil resulta “visible” en la red externa. Entre sus funciones se encuentra la aplicación del control de tarificación de los servicios, funciones de inspección y verificación de validez de paquetes, aplicación de las reglas de uso de la red, la asignación de la dirección IP, ser el punto de conexión para la gestión de movilidad hacia otras redes que no 3GPP [7].

2.3.2.1.3.4. Servidor del Subscritor de Hogar (Home Subscriber Server HSS)

El HSS es la base de datos principal del sistema 3GPP, y contiene tanto información permanente como información temporal que cambia a raíz de la operación del sistema. Esta entidad hace el trabajo de todas las bases de datos definidas para la arquitectura 2G, además de incluir modificaciones necesarias para soportar el acceso y la operación de LTE [7].

2.3.2.2. Interfaces

En esta sección describiremos las Interfaces que existen dentro del sistema de red LTE.

2.3.2.2.1. Interfaz radio Uu

La interfaz de radio Uu es la interfaz que comunica el Equipo de Usuario con el eNB y tiene tres tipos de mecanismos de transferencia de la información, la difusión de la señal de control en la zona de cobertura, la transferencia de paquetes IP y una señal de control dedicada entre el eNB y el equipo [7]. A continuación se detallan los procesos del enlace descendente y el enlace ascendente.

2.3.2.2.1.1. Enlace Descendente (Downlink, DL)

Para el DL la modulación que utilizan para esta interfaz no está definida a priori, si no que el sistema lo decide después de los resultados de medición del canal. Las opciones de modulación que pueden utilizarse son QPSK, 16QAM y 64 QAM, correspondientes a 2, 4 y 6 bits por símbolo, respectivamente. El Acceso utilizado es el Acceso Múltiple a través de División por Frecuencias Ortogonales (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*, OFDMA), en que su principal característica es la utilización de múltiples subportadoras que son ortogonales. A más de, para disminuir los efectos de la interferencia multi-camino, OFDMA emplea la transmisión de un prefijo cíclico, que consiste que repetir una parte del final del símbolo al principio [7].

Cada subportadora en LTE tiene un ancho de banda de 15 kHz y estas se agrupan en bloques de 12 subportadoras, que resultan de un ancho de banda resultante de 180 kHz. Estas agrupaciones de 12 subportadoras son llamadas Bloque de Recurso Físico (*Physical Resource Block*, PRB) y constituyen la unidad mínima de asignación de recursos a un usuario, más cada PRB tiene un largo en el tiempo de 0.5 ms, en el cual se pueden transmitir entre 6 y 7 símbolos OFDMA, dependiendo del largo del prefijo cíclico. Además, se considera que la subportadora

central del canal no se utiliza, dado que puede ser altamente interferida por el oscilador local [7]. Es por ello que el número total de subportadoras es de:

$$N_s = 12N_b + 1$$

ECUACIÓN 1: CANTIDAD DE SUBPORTADORAS EN UN CANAL, EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE BLOQUES

Siendo N_b el número de bloque desplegados. Estos pueden tomar los valores {6, 15, 25, 50,75, 100} correspondiente a tamaños de canales {1.4, 3, 5,10, 15, 20} MHz, que significa que se utiliza un 90% aproximadamente del ancho del canal, excepto en el caso del canal de 1.4 MHz [7]. En la siguiente tabla se resume esta información.

TABLA 2-1: PARAMETROS OFDMA PARA LTE

BW MHz	1,4	3	5	10	15	20
Nrb	6	15	25	50	75	100
Tamaño Portadora KHz	15					
Ancho de Banda PRB KHz	180					
Tipo de Modulación	QPSK		16 QAM		64 QAM	
Bits por Modulación	2		4		6	

Para los prefijos cíclicos, se tienen 3 tipos utilizados en la comunicación DL. Se especifican estos tipos en la siguiente tabla [9]:

TABLA 2-2: TIPOS DE PREFIJOS CÍCLICOS

Configuración DL	Tamaño portadora KHz	Cantidad de portadoras por PRB	Cantidad de símbolos por PRB
Prefijo cíclico normal	15	12	7
Prefijo cíclico extendido	15	12	6
	7.5	24	3
Configuración ascendente	Tamaño portadora KHz	Cantidad de Portadoras por PRB	Cantidad de símbolos por PRB

Prefijo normal	cíclico	15	12	7
Prefijo extendido	cíclico	15	12	6

El prefijo de 7 símbolos es el utilizado por default, mientras el prefijo de 6 es utilizado en contextos rurales para mejorar el envío de información en las fronteras de la celda. El prefijo de 3 símbolos es usado en un caso particular de diseño de red sin reutilización de frecuencias, con un ancho de banda de subportadora menor al normal (7.5 kHz) [7].

Hay que considerar que no todos los recursos de la interface Uu son dedicados al envío de datos al usuario sino que también existen recursos destinados al control de datos y señalización. Estos recursos usualmente toman un 15% del total de recursos [7].

2.3.2.2.1.2. Enlace Ascendente (Uplink, UL)

Para el enlace ascendente, se considera por el alto Índice de Potencia Instantánea sobre Potencia Media (*Peak to Average Power Ratio*, PAPR) que tiene OFDMA, que el acceso a utilizar es el Acceso Múltiple por División de Frecuencias de Un Portador (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*, SC-FDMA). Éste tipo de acceso tiene una estructura similar a OFDMA pero con la diferencia que a los datos antes de enviarlos, se transforman mediante Fourier Discreto para después sub-mapearlos en un Fourier Discreto Inverso de mayor muestreo [7]. Éste sub mapeo puede ser distribuido o localizado. En la figura 5 se muestra el diagrama de bloques del envío de datos.

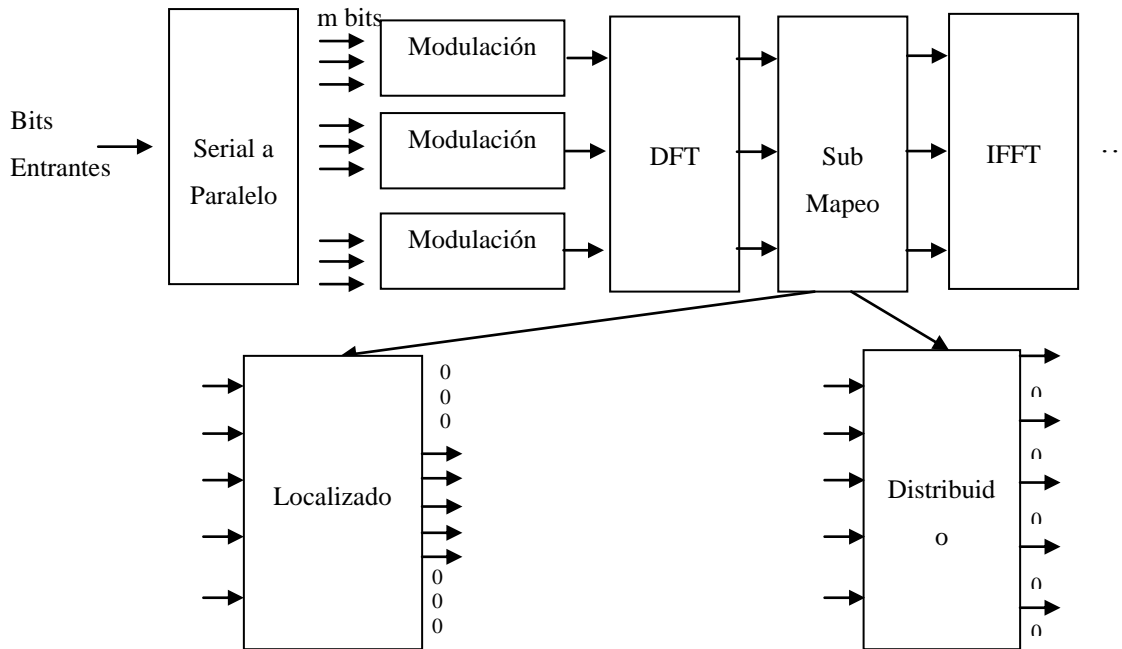


FIGURA 5: DIAGRAMA DE BLOQUE DEL PROCESAMIENTO DE DATOS EN UL

Los diferencia en la que se submapean los datos después de la Transformada Discreta de Fourier, es como se distribuyen la información de los terminales en las subportadoras. En la figura 6 se muestra como están distribuidas.

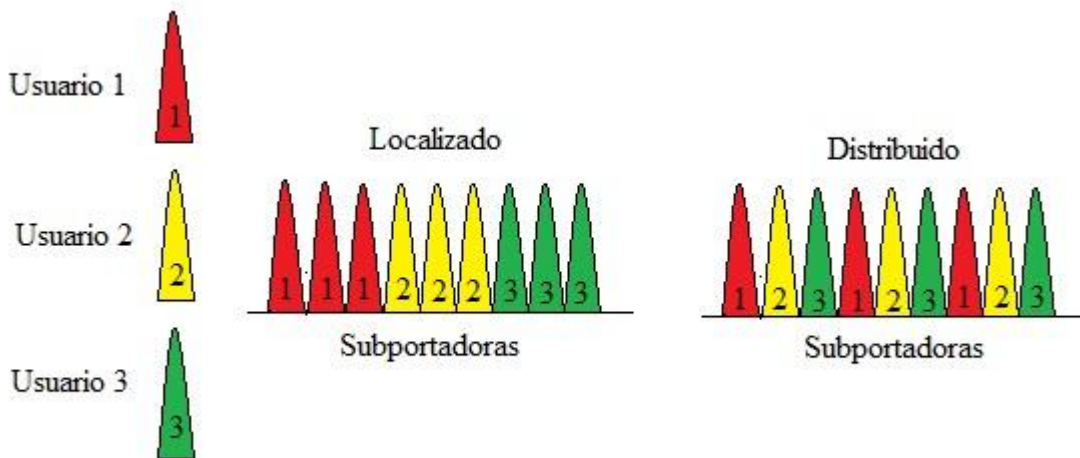


FIGURA 6: DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS EN LAS SUBPORTADORAS UL

Al igual que OFDMA, UL no considera una modulación fija y puede ser de 2,4 o 6 bits por símbolo.

2.3.2.2.2. Interfaz X2

La interfaz X2 es la encargada de la comunicación entre eNB dentro de un mismo E-UTRAN, con finalidad de hacer posible *handover* entre celdas y generar comunicación en pos de una mejor gestión de recursos. Como canal físico puede utilizar Comunicación Punto a Multi Punto (*Point to MultiPoint*, PMP) en microondas [7].

2.3.2.2.3. Interfaz S1-U

Esta Interfaz proporciona el servicio de transporte entre el eNB y el EPC. Es basada en el Protocolo de Datagrama de Usuario (*User Datagram Protocol*, UDP) y no soporta mecanismos de control de error ni de control de flujo [7].

2.3.2.2.4. Interfaz S1-C

S1-C se utiliza para la comunicación entre el eNB con el MME. Incluso en la literatura se puede encontrar con el nombre de S1-MME. Es utilizado para el establecimiento, modificación y liberación de recursos en la interfaz de radio como en la interfaz S1-U, además de ser utilizado para el procedimiento de *handover* entre E-UTRAN y E-UTRAN y la gestión de localización de equipos de usuario [7].

2.3.2.2.5. Interfaz S5

La Interfaz S5 es la que soporta la transferencia de paquete entre S-GW y P-GW. Tiene una interfaz hermana, llamada S8, la cual proporciona el mismo servicio pero en los casos de roaming en el que S-GW pertenezca a la red visitante/visitada y el P-GW sea propio. Esta interfaz

puede ser implementada con un protocolo GTP, que admite un establecimiento de QoS, o con un protocolo PMIPv6, que solo se encarga de entregar un respaldo respecto a la movilidad

2.3.2.2.6. Interfaz S11

La Interfaz S11 es una interfaz de control, que está relacionado con la creación de servicios portadores dentro de la EPC, es decir, con el control de recursos de la interfaz S5. Conecta al MME con el S-GW [7].

2.3.2.2.7. Interfaz S6a

Esta interfaz conecta al HSS con el MME y es la que soporta la transferencia de datos entre ésta [7].

2.3.2.2.8. Interfaz SGi

A través de la interfaz SGi se realiza la conexión con las redes externas. Actúa como una conexión IP común. Soporta conexión con redes IPv4 como IPv6. Este tipo de conexión da a entender que el P-GW actúa como un router hacia la red externa [7].

2.3.2.2.9. Interfaz Gx

Esta interfaz es la que conecta el P-GW con el PCRF, que es el encargado de la tarificación de servicios y el establecimiento de QoS desde el P-GW[7].

2.3.2.3. Otros elementos

En esta sección, se describirá las tecnologías y conceptos que resultan importantes para el desarrollo del modelo, que tienen relación con LTE.

2.3.2.3.1. Servicio Portador de Paquetes Evolucionado (*Evolved Packet Service Bearer, EPSB*)

EPSB es el servicio Portador encargado de llevar la información desde el equipo de usuario hasta el P-GW. A través de esta interfaz se logra la gestión de QoS. Se forma por 3 servicios portadores, el de radio, el de S1 y el de S5. Por la naturaleza de la Interfaz de radio, no siempre los servicios portadores de radio y S1 están funcionando, ya que no en todas las PRB se tiene información siempre de un mismo usuario, pueden existir saltos. Eso no quiere decir que una conexión EPSB no esté activa [7].

Existen 2 tipos de EPSB, de tasa garantizada y de tasa no garantizada. El de tasa garantizada son todos aquellos EPSB que prestan servicios donde es requerido que no se caiga el servicio, como por ejemplo las llamadas. Mientras que los de tasa no garantizada son para los cuales el servicio no se interrumpe por una baja de calidad, como por ejemplo la navegación web. Un servicio se logra entregar a través de 2 EPSB, uno de DL y otro de UL [7].

Un usuario activo es aquel que está registrado con una IP dentro de un P-GW. Necesariamente éste debe tener al menos dos EPSB no dedicadas [7].

2.3.2.3.2. MIMO

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) es un mecanismo que incrementa la eficiencia espectral por medio de la utilización del dominio espacial, aprovechando fenómenos físicos como la propagación multitrajecto para incrementar la velocidad de transmisión o reducir la tasa de error. Es requerido que se tengan múltiples antenas en el transmisor y receptor, además de que las antenas receptoras no estén en Línea de Visión (*Line of Sight, LOS*) [10].

La tecnología MIMO 2x2 (dos antenas transmisoras y dos receptoras), a través de métodos matemáticos crear dos canales espaciales diferenciados e independientes a través de cuatro canales de propagación[10]. En la figura 7 se muestra un diagrama de la situación descrita.

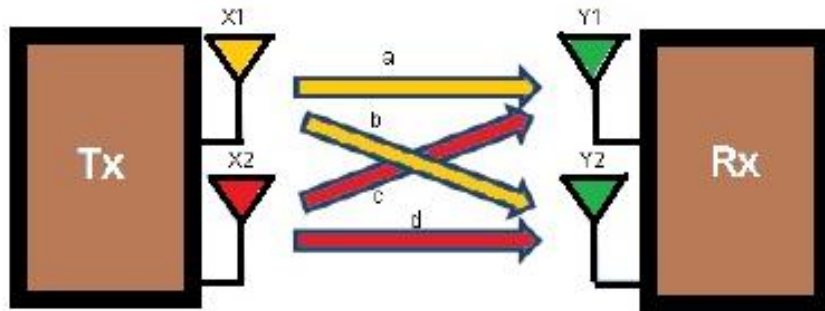


FIGURA 7: MIMO 2x2

En esta figura 7 se puede ver que la señal en una antena receptora se puede describir como una suma ponderada de las dos antenas emisoras. Al ser dos antenas receptoras, se logra tener un sistema de ecuaciones la cual permite describir las antenas emisoras.

Para esta memoria, solo se considerará el efecto de duplicación de Ancho de Banda.

2.3.3. Arquitectura de Servicios de Multimedia IP (*IP Multimedia Services, IMS*)

Ésta arquitectura está diseñada para poder entregar soporte de voz sobre IP (*Voice over IP, VoIP*), y en particular en esta memoria, se utiliza para entregar voz sobre LTE (*Voice over LTE, VoLTE*). Primero se partirá con los tipos de VoLTE, para destacar la funcionalidad de IMS, para posteriormente presentar la arquitectura y sus componentes.

2.3.3.1. Tipos de VoLTE

2.3.3.1.1. VoLTE Sobre El Tope (*VoLTE over the top, VoLTE OTT*)

Este tipo de servicio se encuentra implementado a nivel de aplicación, utilizando los protocolos IP para entregar servicios de mensajería de voz. Este tipo de VoLTE no logra comunicarse con los teléfonos fijos, debido a que jamás logra salir del protocolo IP. Un ejemplo de este tipo de VoLTE es *WhatsApp*.

2.3.3.1.2. VoLTE con caída a red de circuitos (*VoLTE Circuit Switched Fallback, VoLTE CSFB*)

Este tipo de VoLTE utiliza una red de respaldo que tenga una conexión de voz definido en su arquitectura, como por ejemplo UMTS o GSM. VoLTE CSFB logra una conexión con los sistemas de conmutación de circuitos, pero el servicio se ve degradado cuando la red de paquetes pierde velocidad. Incluso, dependiendo del tipo de CSFB siendo utilizado, es posible que las llamadas logren ser interrumpidas. Finalmente, el mecanismo de caída sobre la red de circuitos toma cierto tiempo, lo que logra dilatar el establecimiento de la llamada. Usando este esquema, el establecimiento de las llamadas puede durar hasta medio segundo [11].

2.3.3.1.3. VoLTE

VoLTE (a secas) es servicio que logra mejorar la Calidad de Servicio (*Quality of Service, QoS*) del legado de los servicios de voz basados en conmutación de circuitos y VoLTE OTT basados en mejor esfuerzo (*best effort*). VoLTE se basa en la arquitectura IMS, que a través de protocolos SIP, logra dar servicios de voz y SMS. Logra definir las capacidades básicas de IMS y los servicios complementarios para telefonía [11].

2.3.3.2. Arquitectura

En la figura 7, se presenta los elementos de la Arquitectura IMS.

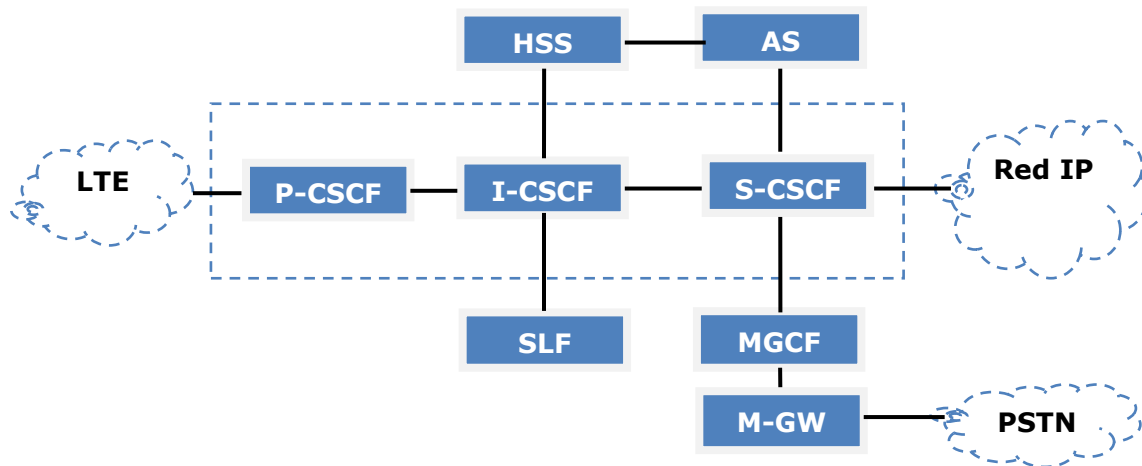


FIGURA 8: ARQUITECTURA IMS

A continuación se va a describir la función de cada elemento:

2.3.3.2.1. Función de Control de Sesión de Llamada (*Call Session Control Function*, CSCF)

El CSCF es responsable de establecer, monitorear, dar soporte y liberar sesiones multimedia [11]. Está dividido en 3 subpartes:

- **Proxy CSCF (P-CSCF):** Éste elemento es visto como el punto de contacto de cualquier usuario. Puede tener una conexión con PCRF para la tarificación [11].
- **Serving CSCF (S-CSCF):** Es un paralelo al HLR. A través de comunicaciones con I-CSCF, sabe que aplicaciones hay disponibles para el usuario y envía sus mensajes SIP al Servidor de Aplicación que corresponde [11].
- **Interrogating CSCF (I-CSCF):** Es la entidad que entabla las comunicaciones con el HSS y asigna el tipo de servicio [11]

2.3.3.2.2. Función de Ubicación de Usuario (*Subscriber Location Function*, SLF)

El SLF mantiene una base de HSSs y es el responsable de asignar uno a usuario.

2.3.3.2.3. Compuerta de Medios (*Media Gateway, M-GW*)

Un M-GW es un elemento definido para 3G, que hace de compuerta para las redes de conmutación de circuitos [12].

2.3.3.2.4. Controlador de M-GW (*Media Gateway Control Function, MGC*)

El MGC controla al M-GW, ayudando en sus funciones de cambios de codificación y de cambio de medios. Dependiendo de cómo esté implementado, el MGC puede servir también como una salida a una red de conmutación de circuitos. En ese caso debe realizar todas las funciones ya descritas [12]

2.3.3.2.5. Servidor de Aplicación (*Application Server, AS*)

Un AS es el anfitrión y ejecutor de servicios y se conecta con el S-CSCF usando SIP. Es el que genera el control de las sesiones de uso de servicios [13].

2.4. Planificación de redes móviles LTE

En esta sección se mostrará las etapas en la planificación y diseño de redes móviles. Primero se presentará una descripción general de todos los pasos a seguir, para pasar a detallar cada paso.

2.4.1. Descripción general

La metodología utilizada para el diseño de las redes móviles comienza usualmente con los elementos más disgregados y de menos jerarquía para terminar con los elementos de menor número y más centralizados. Este tipo de diseño es llamado “desde Abajo hasta Arriba” (*Bottom-up*). Dicho esto, se infiere que primero habrá que dimensionar los eNB, para continuar con los S-GW, MME y HSS en el segundo nivel de diseño, siguiendo con los P-GW y PCRF para concluir el diseño del EPC, para terminar con el diseño de la Arquitectura IMS y el Troncal IP, que es un enrutador que sirve para la interconexión entre los P-GW. En la Figura 9 se muestra un diagrama explicitando lo referido.



FIGURA 9: DIAGRAMA DE FLUJO DE DISEÑO DE RED *BOTTOM-UP*

Para lograr esto, se deben tener como entradas las necesidades de cobertura, capacidad y requerimientos de servicios.

Por la diferencia de métodos, esta sección se va a dividir en la estimación de eNB y la estimación de elementos del Núcleo y IMS.

2.4.2. Estimación eNB

Para los eNB, existen dos restricciones, una de cobertura y otra de capacidad. La restricción de cobertura consiste en que las áreas abarcadas por las antenas deben teselar por completo el área a donde se da el servicio, mientras que la de la capacidad trata de poder dar la cantidad de ancho de banda requerido por los subscriptores. Como resultado de esta planificación, se debe encontrar el número de eNB necesarios para satisfacer las dos restricciones, y los rendimientos requeridos para el siguiente nivel, por cada eNB. En la figura 10 se resume los pasos de la estimación de eNB.

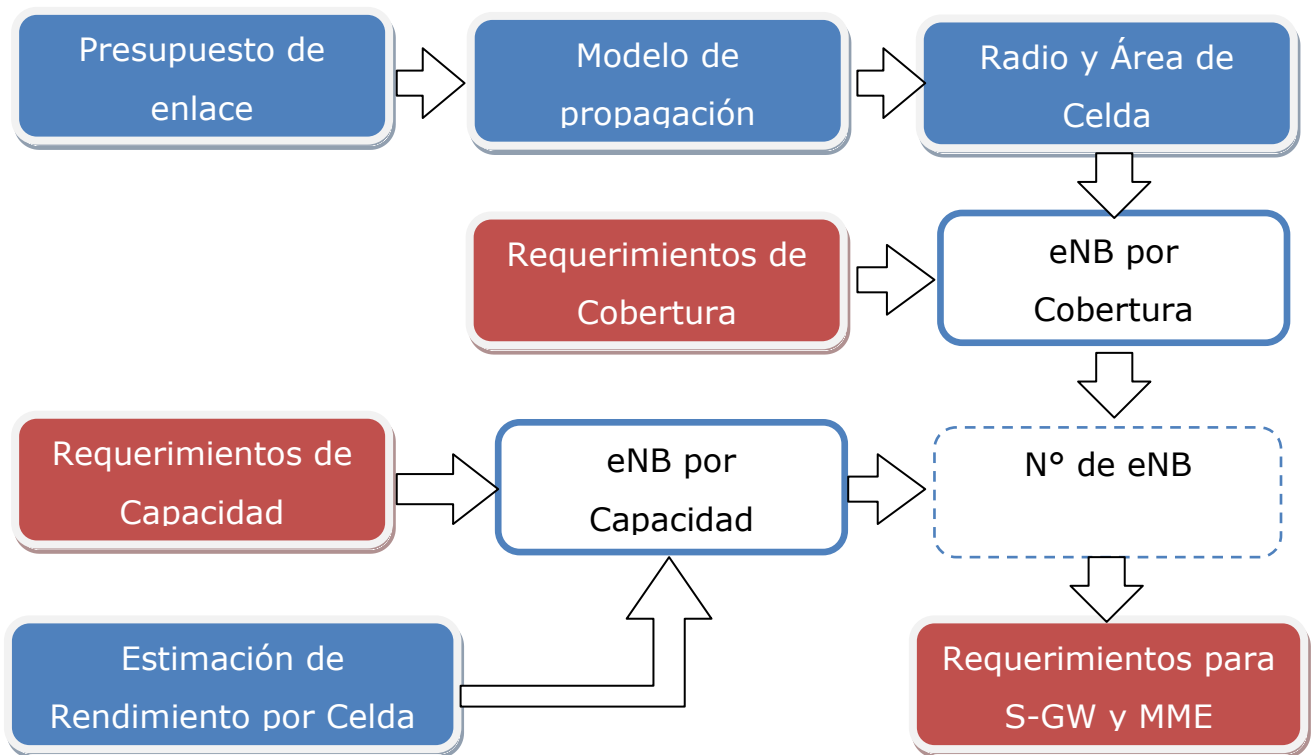


FIGURA 10: DIAGRAMA DE BLOQUE PARA DETERMINACIÓN DE ENB

A continuación, se detalla cada uno de los pasos-

2.4.2.1. Presupuesto de Enlace

Para la restricción de cobertura, primero se debe partir con el presupuesto de enlace cuyo fin es el estimar la pérdida del medio máximo aceptable para poder establecer comunicación entre el UE con el eNB. Para ello se considera las ganancias y las perdidas relacionadas con el radioenlace. La fórmula general para el presupuesto de enlace es:

$$L = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{tx} - L_{rx} - P_{rx} - L_{in} - M + X_{lte}$$

ECUACIÓN 2: ECUACIÓN DE PRESUPUESTO DE ENLACE

Dónde:

L : Perdida máxima del medio.

- P_{tx} : Potencia de transmisión, en dBm
- G_{tx} : Ganancia de la antena de transmisión en dBi
- G_{rx} : Ganancia de la antena de recepción en dBi
- L_{tx} : Pérdidas de cable en el transmisor en dB
- L_{rx} : Pérdidas de cable en el receptor en dB
- P_{rx} : Potencia de sensibilidad del receptor en dBm
- L_{in} : Pérdidas de penetración de edificios en dB
- M : Márgenes por fiabilidad del sistema en dB
- X_{lte} : Ganancias por efectos de LTE en dB

Si bien esta ecuación se debe cumplir para DL y UL, es en UL donde se tiene la mayor restricción, debido a que la potencia de transmisión del UE es muy menor con respecto a la potencia de transmisión del eNB.

Delante se especifica algunas de estas constantes

2.4.2.1.1. Pérdidas de penetración de edificios

Las pérdidas por penetración de edificios son debido a la obstrucción que significa las paredes de un edificio. Esta pérdida depende del tipo de edificio, por lo tanto depende del tipo de área que se va cubrir, si es un lugar denso urbano, urbano, etc. En la siguiente tabla se explican los escenarios de cobertura y su rango en la pérdida de penetración de edificios [14]:

TABLA 2-3: ESCENARIOS DE COBERTURA Y SUS PÉRDIDAS DE PENETRACIÓN DE EDIFICIOS

Escenario	Descripción	L_{in}
Denso	Edificios densamente distribuidos, con un promedio	18-25 dB
Urbano	de altura de edificio que supera los 30 m, donde la diferencia de distancia de edificios es entre 10 y	

	20 m. Estas áreas están densamente pobladas	
Urbano	La altura promedio de edificios es de 20 m. En estos escenarios se pueden encontrar una pequeña cantidad de áreas verdes o espacios abiertos.	15-18 dB
Suburbano	La altura promedio de los edificios es de 10 m, los edificios están disgregados y la distancia promedio entre ellos son entre 30 y 50 m. En estas áreas se pueden encontrar muchas áreas verdes y espacios abiertos	10-12 dB
Rural	Es un escenario donde los edificios escasean y su altura promedio no es superior a los 5 m.	6-8 dB

2.4.2.1.2. Márgenes por fiabilidad del sistema

Los márgenes de Fiabilidad del Sistema son debido a efectos inherentes a la transmisión que afectan a la calidad y que deben ser contabilizados para poder dar cierta fiabilidad al sistema. Se tienen en consideración dos tipos, por interferencia y por sombra.

2.4.2.1.2.1. Margen de interferencia

El margen de interferencia es debido a la interferencia en la transmisión entre dos UE. Como en LTE las portadoras son ortogonales, no existe interferencia con usuarios de una misma celda, pero si existe interferencia entre usuarios entre diferentes celdas. Se considera en promedio 2 dB de margen para el UL [12].

2.4.2.1.2.2. Margen por Sombra (Slow Fading)

El margen por sombra es debido a la obstrucción de un edificio o un elemento natural, como por ejemplo un árbol. Para calcular este margen se utiliza la siguiente ecuación

$$M_s = Q^{-1}(1 - P_{edge}) * \sigma_s$$

ECUACIÓN 3: CÁLCULO DE MARGEN POR SOMBRA

Dónde:

M_s : Margen por sombra

P_{edge} : Probabilidad de cobertura en límite de la celda

σ_s : Desviación estándar del Margen por Sombra.

Los valores de la Desviación estándar del Margen por sombra son [14]:

TABLA 2-4: DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL MARGEN POR SOMBRA

Escenario	Desviación estándar dB
Denso Urbano	10
Urbano	8
Suburbano	6
Rural	6

2.4.2.1.3. Ganancias por efectos de LTE

Este tipo de ganancia ocurre que existen métodos utilizados por LTE que aumentan la emisión de la señal. Se consideran dos efectos, la Agrupación de Intervalos de Transmisión (*TTI bundling*) y el Rechazo de Interferencias Combinadas (*Interference Rejection Combining*).

El primero consiste en un método utilizado para VoLTE en los límites de la celda o cuando se tiene una mala calidad de señal, que trata de repetir una misma información de forma continua y no disgregada [15]. Con este método se puede ganar hasta 4 dB [14]. Mientras que el segundo método consiste en el reconstruir la señal transmitida, mediante la emulación del ruido y restándolo a la señal recibida. Mediante este método se puede ganar hasta 7 dB [14]

2.4.2.2. Modelo de propagación Okumura-Hata, estimación de área y N° de eNB por cobertura

Con el valor de la pérdida del medio, se logra establecer cuál es el radio del grupo de antenas, mediante un modelo de propagación. Existen muchos modelos, teóricos y empíricos, que se pueden utilizar. En esta memoria se utilizó el modelo Okumura-Hata, por ser uno de los más representativos. La formulación del modelo es la siguiente[16] [17]:

$$L = A + B \cdot \log_{10}(f_c) - 13.82 \cdot \log_{10}(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \cdot \log_{10}(h_b)) \cdot \log_{10}(d) + C$$

ECUACIÓN 4: MODELO OKUMURA-HATA

Dónde:

A, B : Constantes dependientes de la frecuencia utilizada.

TABLA 2-5: CONSTANTES DE MODELO OKUMURA-HATA

Constante	150 – 1500 MHz	1500-2000 MHz
A	69.55	46.3
B	26.16	33.9

f_c : Frecuencia del espectro utilizado

h_b : Altura de la antena

h_m : Altura del móvil

d : Distancia entre la antena y el móvil, en este caso, el radio de la celda

$a(h_m)$: Función de corrección de altura de móvil por tipo de ciudad.

Para área denso urbano:

$$a(h_m) = 3.2 \cdot \log_{10}(11.75 \cdot h_m)^2 - 4.97$$

ECUACIÓN 5: CORRECCIÓN POR ALTURA DE MÓVIL PARA DENSO URBANO EN OKUMURA-HATA

Para los otros escenarios:

$$a(h_m) = (1.1 \cdot \log_{10}(f_c) - 0.7) \cdot h_m - (1.56 \cdot \log_{10}(f_c) - 0.8)$$

ECUACIÓN 6: CORRECCIÓN POR ALTURA DE MÓVIL PARA LOS OTROS ESCENARIOS EN OKUMURA-HATA

C: Función de corrección en zonas poco densas

Para área suburbana:

$$C = -2 \left(\log_{10} \left(\frac{f_c}{28} \right) \right)^2 - 5.4$$

ECUACIÓN 7: FUNCIÓN DE CORRECCIÓN EN ÁREA SUBURBANO PARA OKUMURA-HATA

Para área rural

$$C = -4.78 \cdot (\log_{10}(f_c))^2 + 18.33 \cdot \log_{10}(f_c) - 40.98$$

ECUACIÓN 8: FUNCIÓN DE CORRECCIÓN EN ÁREA RURAL PARA OKUMURA-HATA

Para las demás áreas no existe *C*.

Ya con el radio, se puede establecer cuál es el área abarcada por el grupo de antenas, definiendo cuantas celdas se definen por grupo de antena. La fórmula general para el cálculo es:

$$\text{Área} = A \cdot R^2$$

ECUACIÓN 9: CÁLCULO DE ÁREA DE GRUPO DE ANTENA

Dónde:

A: Constante dependiente del número de celdas definida por grupo de antena

N° de Celdas	A
1	2.6
2	1.3
3	1.95

TABLA 2-6: CONSTANTE PARA CÁLCULO DE ÁREA DE GRUPO DE ANTENAS

R: Radio de alcance de antena.

Más el área requerida a cubrir, se puede determinar el número de eNB por requerimientos de cobertura, siendo determinada por:

$$N^{\circ} \text{ eNB por Cobertura} = \frac{\text{Área a cubrir}}{\text{Área de grupo de antenas}} \cdot \text{Celdas por grupo de antenas}$$

ECUACIÓN 10: DETERMINACIÓN DE ENB POR COBERTURA

2.4.2.3. Rendimiento por celda, N° de eNB por capacidad y eNB por sector

Para el rendimiento por celda, se trata de suponer cual es el Ancho de banda promedio de cada celda. Para poder determinar eso, primero hay que conocer que a los datos de usuario, se pasa por una serie de protocolos. Se tiene que para 1460 bytes de datos de usuario, consta una sobrecarga de 4 bytes promedio por todos los protocolos existentes hasta la capa física [18]. Para la capa física, 3GPP entrega tablas para poder determinar, a través de un índice de esquema de modulación y codificación (*Modulation and Coding Scheme*, MCS) y el número de PRB, la cantidad de bits que existen de transporte en 1 ms [19]. Con estos dos datos, se puede obtener el rendimiento máximo para una celda, para datos de usuario, siendo la fórmula:

$$\text{Rendimiento} = \text{Rendimiento}_{\text{capafísica}} * \frac{\text{datos}_{\text{sinsobrecarga}}}{\text{datos}_{\text{consobrecarga}}}$$

ECUACIÓN 11: RENDIMIENTO POR ENB

Hay que considerar que es muy difícil que una celda obtenga la velocidad máxima en todo su tiempo de uso. La velocidad promedio de una celda es entre 30 Mbps hasta 50 Mbps [9][20]. Para obtener un número aproximado entre el rango real de velocidad por eNB, se modifica el indicador MCS. El Indicador MCS es un cálculo interno que ejecuta la red LTE para modificar la codificación y la señalización en pos de obtener un transporte más robusto, acorde a las condiciones del canal en ese momento.

Ya con el valor promedio de la velocidad por celda, el número de eNB por capacidad se obtiene como:

$$eNB \text{ por capacidad} = \frac{\text{Requerimiento por sector}}{\text{Rendimiento por eNB}}$$

ECUACIÓN 12: ENB POR CAPACIDAD

Obtenido la cantidad de eNB por ambas restricciones, número de eNB en un sector es el máximo entre eNB por capacidad y eNB por cobertura. Hay que destacar que este cálculo considera una lógica de transmisión del mejor esfuerzo, que no es acorde a la demanda de voz.

2.4.3. Estimación de elementos del núcleo e IMS

Para los elementos del Núcleo y IMS existen más variables de restricción que pueden ser aplicados. Las variables posibles son el Ancho de Banda (*Throughput*), EPBS, Transacciones, Intentos en hora cargada, Compuertas y Subscriptores [21]. El Ancho de Banda es la cantidad de datos por segundos que puede trabajar un elemento. Los EPBS son los ya descritos Servicios Portadores de Paquetes Evolucionados, los cuales son los que definen una transacción de datos y que algunos elementos tienen un límite para poder tratarlos. Las transacciones es la cantidad de señalización (acciones de control, como por ejemplo el activar o desactivar servicios portadores de radio) por segundo que puede manejar un elemento. Los intentos en hora cargada es la cantidad de accesos a servicios (exitosos y no exitosos) que existen en la hora cargada. Las compuertas se refieren a la cantidad de puertos físicos que tienen los elementos, para la conexión entre estos. Los subscriptores se refieren a la cantidad de datos de subscriptores que puede

mantener un equipo. Estas variables no son aplicadas para todos los equipos, si no que dependiendo de la funcionalidad, dependen las restricciones aplicadas. En la tabla 2-7 se muestra que restricciones se aplican en cada elemento.

TABLA 2-7: RESTRICCIONES APLICADAS POR ELEMENTOS DE NÚCLEO Y IMS

Elementos	Velocidad	EPBS	Transacciones	Intentos	Compuertas	Subscriptores
S-GW	SI	SI	SI	SI	SI	NO
MME	NO	NO	SI	SI	SI	SI
HSS	NO	NO	SI	NO	SI	SI
P-GW	SI	SI	NO	SI	SI	NO
PCRF	NO	NO	NO	NO	SI	NO
Router	SI	NO	NO	NO	SI	NO
CSCF	NO	NO	NO	SI	SI	NO
AS	NO	NO	NO	NO	SI	NO
MGW	SI	NO	NO	NO	SI	NO
MGC	SI	NO	NO	NO	SI	NO

Además, estas restricciones son del tipo en las que se tiene un límite superior el cual no se puede sobrepasar, no como las restricciones de cobertura de las eNB, en la que se debe cumplir con cierta cuota. Es decir, que la suma de los requerimientos por conexión, multiplicados por la conexión, no deben sobrepasar la capacidad máxima del equipo.

3. Implementación

En esta sección describiremos el proceso de implementación de la red LTE. La gran mayoría de los parámetros y la demanda entregada corresponden a las al modelo utilizado en el proceso tarifario correspondiente al quinquenio 2014-2019. La red LTE diseñada es FDD y tiene un ancho de banda de despliegue de 20 MHz en las bandas de frecuencia 700 MHz para los tipos de área rural y suburbano y 2600 MHz para los tipos de área urbano y suburbano

3.1. Demanda de diseño para acceso

Para la demanda de diseño, se debe tener en cuenta la cantidad de subscriptores de la empresa a diseñar y el tráfico de ésta. En el modelo tarifario de la SUBTEL se consideró los siguientes parámetros de consumo promedio por usuario.

TABLA 3-1: MOU DE DEMANDA

Mou	Unidad	2013	2014	2015	2016	2017	2018
MOU Entrada	min/sub-mes	30	34	36	39	42	44
MOU Salida	min/sub-mes	36	39	42	45	47	50
MOU On-net	min/sub-mes	67	55	50	49	49	49
Total	min/sub-mes	133	128	128	133	138	144

TABLA 3-2: CONSUMO DE DATOS POR MES POR USUARIO

Tipo de Datos	Unidad	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Subscriber DL	MB/sub-mes	622	747	896	1075	1290	1549

Subscriber UL	MB/sub-mes	187	224	269	323	387	465
----------------------	------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

TABLA 3-3: CONSUMO DE MENSAJES POR MES POR USUARIO

Mou Mensajes	Unidad	2013	2014	2015	2016	2017	2018
SMS entrantes + on-net	SMS/sub-mes	7	7	7	6	6	6
SMS salientes + on-net	SMS/sub-mes	7	7	7	6	6	6
MMS entrantes + on-net	MMS/sub-mes	0	0	0	0	0	0
MMS Salientes + on-net	MMS/sub-mes	0	0	0	0	0	0

Además se cuenta con la cantidad de subscriptores de la empresa eficiente por años que se dividen entre servicios a entregar que son voz y voz más internet, cuya proporción de subscriptores entre regiones varía, más año por año. En cada región, existe una distribución por tipo de área donde se entrega la proporción del tráfico en estos y el área que se debe abarcar con los eNB cada año. Con esta información es posible obtener para todos los años, la cantidad de subscriptores para cada servicio en cada tipo de área para cada región. Se entrega como ejemplo de esto, la proporción para el año 0 (2013) para la Región Metropolitana

TABLA 3-4: CANTIDAD DE SUBSCRIPTORES Y ÁREA A ABARCAR PARA LA REGIÓN METROPOLITANA EN EL AÑO 0

Tipo de Demanda	Unidad	Densidad Urbana	Urbano	Suburbano	Rural
Voz	sub	848.996	1.638.211	95.801	31.779
Voz y Datos	sub	345.637	666.936	39.002	12.938
Área	km ²	3,6	151,1	630,6	5.365,3

3.1.1. Tráfico de voz a erlangs y EPBS en Hora Cargada (HC)

Con estos dos datos, es posible determinar cuánto es la cantidad de volumen de llamadas que existe en cada tipo de área por región. Para la determinación de la cantidad de EPBS simultáneos necesarios para satisfacer la cantidad de llamadas en hora punta, es necesario establecer factores de conversión para pasar la demanda de las llamadas a erlangs, para después a través de un

algoritmo que evalúa ErlangsB, determinar la cantidad de canales necesarios. Este tipo de transformación a EPBS es solo necesario para la voz, debido a que es el único servicio entregado por la red que depende de un servicio portador dedicado, los demás servicios se pueden manejar a través de unidades de tráfico de datos.

TABLA 3-5: PARÁMETROS DE CONVERSIÓN DE LLAMADAS A ERLANGS

Parámetro	Unidad
Días cargados por mes (D)	días/mes
Concentración de voz en HC (C)	%
Factor entre facturado y cursado (F)	%
Factor de movilidad geográfica (M)	%

Los días cargados es la cantidad de días en que se usa efectivamente el equipo celular. La concentración de voz en hora punta indica el porcentaje de minutos en el día se encuentran en la hora cargada. El factor entre facturado y cursado es el que indica cuantas llamadas facturadas, es decir, cobradas se encuentran entre las llamadas verdaderamente cursadas, donde no solo se encuentra las llamadas cobradas, sino que también las llamadas no efectivas como por ejemplo llamadas ocupadas o pinchazos. El factor de movilidad geográfica es para reflejar el movimiento de subscriptores que existe en la hora cargada. Se podría considerar al factor de movilidad geográfica como un margen debido a que en la hora cargada es posible que haya una mayor concentración en un sector en vez de otro.

Con estos factores, es posible realizar el cambio de unidad de minutos a erlangs a través de la siguiente formula.

$$Erlangs_{voz} = \frac{Min_{Mes} \cdot C \cdot (1 + M)}{D \cdot F \cdot 60} = Min_{Mes} \cdot 1.02 \cdot 10^{-4}$$

ECUACIÓN 13: DETERMINACIÓN DE ERLANGS DE VOZ EN HORA CARGADA

Donde los 60 se refieren a la cantidad de minutos que tiene una hora cargada.

Obtenidos los erlangs de voz, es posible determinar la cantidad de canales requeridos, es decir EPBS, a través de la fórmula de ErlangB.

3.1.2. Conversión de mensajes y datos de internet en datos en HC

Para la transformación de los mensajes a cantidad de datos, además de las constantes ya establecidas en la tabla 3-5 se tienen los siguientes factores.

TABLA 3-6: FACTORES DE CONVERSIÓN DE MENSAJES A DATOS

Parámetro	Unidad	Valor
Concentración de datos en HC ($C_{mensajes}$)	%	* ¹
Tamaño de SMS (T_{SMS})	Kbits/SMS	1.1
Tamaño de MMS (T_{MMS})	Kbits/MMS	168

La concentración de Mensajes en HC tiene un similar significado a la concentración de voz en hora cargada, pero específico con los mensajes. Los tamaños de SMS y MMS es el tamaño, en Kbits que usa un SMS o MMS en la red.

Con los parámetros, se transforman los mensajes en ancho de banda en la red con los siguientes cálculos.

$$Ancho_{SMS} = \frac{SMS_{mes} \cdot T_{SMS} \cdot C_{datos} \cdot (1 + M)}{D \cdot F \cdot 3600 \cdot 1024} = SMS_{mes} \cdot 1.56 \cdot 10^{-9}$$

ECUACIÓN 14: CONVERSIÓN DE SMS A DATOS EN HC

$$Ancho_{MMS} = \frac{MMS_{mes} \cdot T_{MMS} \cdot C_{datos} \cdot (1 + M)}{D \cdot F \cdot 3600 \cdot 1024} = MMS_{mes} \cdot 2.39 \cdot 10^{-7}$$

¹ No se puede mostrar este dato.

ECUACIÓN 15: CONVERSIÓN DE MMS A DATOS EN HC

$$Ancho_{internet} = \frac{Datos_{mes} \cdot C_{datos} \cdot (1 + M) \cdot 8}{D \cdot F \cdot 3600} = Datos_{mes} \cdot 9.92 \cdot 10^{-6}$$

ECUACIÓN 16: CONVERSIÓN DE DATOS DE INTERNET A DATOS EN HC

El 3600 es debido a la conversión de horas a segundos., 1024 es la conversión de Kbits a Mbits y 8 es por la conversión de byte a bit.

3.2. Determinación de eNB

Para el dimensionamiento de las eNB, se comenzará primero con el proceso de dimensionamiento de eNB de cobertura, que consiste en el presupuesto de enlace, el modelo de propagación y el número de eNB de cobertura, para pasar a continuación con el dimensionamiento de eNB de tráfico, en el que es necesario el destacar la estimación del rendimiento por eNB, el cálculo de canales de voz por eNB y como se complementó el requerimiento de datos con el requerimiento de EPSB y así calcular el número de eNB de cobertura, para terminar el cálculo eNB totales.

3.2.1. Presupuesto de enlace

Para el presupuesto de enlace, solo se consideró el UL, debido a que por potencia de transmisor, que es del UE en vez del eNB en el caso del DL, es menor por lo que entrega una mayor restricción.

Como parámetros comunes para todos los tipos de área se tienen los siguientes valores

TABLA 3-7: PARÁMETROS COMUNES PARA PRESUPUESTO DE ENLACE

Parámetro	Unidad	Valor
-----------	--------	-------

Potencia Transmisor	dBm	23 [14]
Noise Figure	dB	2.5 [14]
Ruido térmico	dB/KHz	-144
Ancho de banda	KHz	18000
Piso de ruido térmico	dB	-98.94
SINR	dB	-10[12]
Sensibilidad receptor	dBm	-108.94
Margen interferencia	dB	2 [12]
Perdida cable	dB	0.5 [14]
Ganancia antena	dB	18 [14]
TTI Bundling	dB	4[14]
IRC	dB	3 [14]
Probabilidad de cobertura	%	82.84 [14]

El valor de ruido térmico es una constante conocida calculada a 300 °K (26.85 °C), mientras el ancho de banda es suponiendo un despliegue de 20 MHz, es decir 100 PRB. El piso de ruido térmico es solamente la suma entre el SINR y el ruido térmico multiplicado por el ancho de banda.

Los parámetros diferenciados entre tipo de área para el presupuesto de enlace son los siguientes.

TABLA 3-8: PARÁMETROS DEPENDIENTES DEL TIPO DE ÁREA PARA EL PRESUPUESTO DE ENLACE

Parámetro	Unidad	Denso Urbano	Urbano	Suburbano	Rural
Margen de Sombra	dB	9.48	7.58	5.69	5.69
Pérdida penetración	dB	21.5	16.5	11	7

Con estos parámetros se logra determinar cuánto es la pérdida en el medio para cada tipo de área.

TABLA 3-9: PERDIDA EN EL MEDIO POR TIPO DE ÁREA

Parámetro	Unidad	Denso Urbano	Urbano	Suburbano	Rural
Pérdida en el medio	dB	123,46	130,36	137,75	141,75

3.2.2. Modelo de propagación Okumura Hata y radios teóricos

Para el modelo de propagación Okumura Hata, se operó con las siguientes entradas

TABLA 3-10: ENTRADA MODELO OKUMURA HATA

Entrada	Unidad	Valor 1	Valor 2
Frecuencia	MHz	700	2600
Altura Antena	m	30	30
Altura Móvil	m	1.7	1.7

Con estas entradas se obtienen los siguientes resultados

TABLA 3-11: RESULTADOS OKUMURA HATA PARA 700 MHZ

Resultado	Unidad	Denso Urbano	Urbano	Suburbano	Rural
Radio	Km	1,02	1,60	4,78	20,37
Área Omni	Km ²	2,72	6,69	59,51	1079,27
Área 2 Sectores	Km ²	1,36	3,34	29,75	539,63
Área 3 Sectores	Km ²	2,04	5,02	44,63	809,45

TABLA 3-12: RESULTADOS OKUMURA HATA PARA 2600 MHZ

Resultado	Unidad	Denso Urbano	Urbano	Suburbano	Rural
Radio	Km	0,31	0,49	1,47	6,26
Área Omni	Km ²	0,26	0,63	5,62	101,90
Área 2 Sectores	Km ²	0,13	0,32	2,81	50,95

Área 3 Sectores	Km ²	0,19	0,47	4,21	76,42
-----------------	-----------------	------	------	------	-------

3.2.3. Radios ajustados y eNB por cobertura

Debido a que los radios teóricos y los radios de las antenas reales son diferentes, se deben ajustar los valores obtenidos en la sección anterior para poder tener una modelación más realista. Gracias a un modelo privado de la COFETEL (institución mexicana), se pudieron obtener los siguientes factores de castigo.

TABLA 3-13: FACTORES DE CASTIGO PARA LA BANDA 700 MHz

Parámetro	Unidad	Denso Urbano	Urbano	Suburbano	Rural
Factor de Castigo	%	0.73	0.56	0.5	0.28

TABLA 3-14: FACTORES DE CASTIGO PARA LA BANDA 2600 MHz

Parámetro	Unidad	Denso Urbano	Urbano	Suburbano	Rural
Factor de Castigo	%	0,91	0,70	0,64	0,53

Con estos factores, se pueden obtener los radios y áreas ajustadas, siendo los siguientes.

TABLA 3-15: RADIOS Y ÁREAS AJUSTADAS PARA LA BANDA 700 MHz

Resultado	Unidad	Denso Urbano	Urbano	Suburbano	Rural
Radio	Km	0,74	0,89	2,37	5,76
Área Omni	Km ²	1,44	2,07	14,64	86,15
Área 2 Sectores	Km ²	0,72	1,04	7,32	43,08
Área 3 Sectores	Km ²	1,08	1,56	10,98	64,61

TABLA 3-16: RADIOS Y ÁREAS AJUSTADAS PARA LA BANDA 2600 MHz

Resultado	Unidad	Denso Urbano	Urbano	Suburbano	Rural
Radio	Km	0,29	0,34	0,94	3,33
Área Omni	Km ²	0,21	0,31	2,31	28,88
Área 2 Sectores	Km ²	0,11	0,15	1,16	14,44
Área 3 Sectores	Km ²	0,16	0,23	1,74	21,66

Para efectos de diseño, se consideró una celda por antena, es decir omnidireccional, debido a que LTE gracias a OFDMA, no sufre mayor problemas de interferencia simbólica y por la recomendación dada en [20], se elige para las áreas más densas la banda 2600 MHz y para las otras la banda 700 MHz.

Los eNB por cobertura se calculan tal como se explicita en 2.4.2.2.

3.2.4. Estimación de rendimiento por eNB

Para la estimación de eNB, se tienen las siguientes variables de diseño.

TABLA 3-17: VARIABLES DE DISEÑO PARA RENDIMIENTO POR eNB

Parámetros	Unidad	Valor
PRB por Antena	PRB	100
MIMO		2x2
Factor Datos de Usuario por Datos de Transporte (UtoT)	%	96.88
MCS Banda 2600 MHz	MCS	12
MCS Banda 700 MHz	MCS	11

Con estos parámetros, el rendimiento por eNB para cada banda son los siguientes.

TABLA 3-18: RENDIMIENTO DE eNB POR BANDA DE FRECUENCIA

Banda	Unidad	DL	UL
2600 MHz	Mbps	37.6	18.8
700 MHz	Mbps	33.2	16.6

3.2.5. Determinación de cantidad de canales de voz por eNB

Como el servicio de voz es entregado a través de EPSB dedicados, sus requerimiento no pueden ser entregado con una lógica del mejor esfuerzo (*best effort*), sino que debe ser

transmitido a través de un canal asegurado dentro del espectro de la interfaz de radio. Es por ello que se debe dimensionar la cantidad de canales de radio que es posible entregar por eNB. Para ello se debe definir un códec, para poder estimar un ancho de banda utilizado por llamada, para después calcular cuántos PRB usa el servicio. Con los PRB por llamada, y el tiempo de muestreo del códec, es posible determinar cuántos canales de voz se pueden enviar por eNB.

Para el servicio de voz se eligió el códec multi-tasa de ancho de banda adaptable (*Adaptive Multi-Rate Wideband*, AMR-WB) de 12.65 Kbps, ya que es el utilizado ya por empresas extranjeras [22]. Este códec tiene una frecuencia de muestreo de paquetes de 20 ms [23], y según estimaciones, el tamaño de cada paquete sería de 300 bits [24].

Para comenzar con la estimación de PRB utilizados por cada llamada, hay que calcular el tamaño para cada PRB. Esto se hace a través de la siguiente fórmula

$$T_{PRB} = \frac{\text{Rendimiento de eNB}}{\text{Cantidad de PRB en 1 [s]}}$$

ECUACIÓN 17: CÁLCULO DE TAMAÑO PARA CADA PRB

Siendo, para el tipo de red diseñada, la cantidad de PRB en un segundo igual a doscientos mil. Esto entrega los siguientes anchos de bandas para las frecuencias desplegadas.

TABLA 3-19: ANCHO DE BANDA DE PRB POR FRECUENCIA DESPLEGADA

Banda	Unidad	Valor
2600 MHz	bits	98.45
700 MHz	bits	87.14

Ya con el tamaño de cada PRB establecido, corresponde calcular cuántos PRB son necesarios para una llamada de voz. Esto es simplemente dividir el tamaño de un paquete de voz por el tamaño de cada PRB. Esto da un valor de 4 PRB por paquete de voz.

Continuando con los cálculos, cabe estudiar cuantos canales simultáneos se pueden dar por eNB. Considerando que entre cada paquete de llamadas existen 20 ms, y que ese tiempo hay 40000 PRB para el UL y el doble para el DL por MIMO, se tiene que la cantidad de llamadas simultáneas son 2000 en el DL y 1000 en el UL.

3.2.6. eNB por capacidad y eNB totales

La determinación de eNB por capacidad, considerando los canales de voz, primero hay que considerar hay que estimar los eNB solo por datos, tal como se calculan en la sección 2.4.2.3. Posterior a esto, hay que determinar cuántos canales de voz sobrantes existen en los eNB por datos, para descontarlos de la demanda. Con esto realizado, se realiza el cálculo de eNB de por solo voz, con la demanda descontada. Este proceso se realiza para DL y UL paralelamente, para que posteriormente, se considere el máximo de eNB entre estos dos enlaces.

Con esto, se logra determinar la cantidad de eNB por tipo de área en cada región, considerando el máximo entre eNB de cobertura y los eNB por capacidad. En la siguiente tabla, se muestra cual es el porcentaje de eNB agregados por capacidad, para cada tipo de área en cada región en el último año proyectado.

TABLA 3-20: PORCENTAJE DE eNB AGREGADOS POR CAPACIDAD PARA EL ÚLTIMO AÑO

ID	Región	Denso Urbano	Urbano	Suburbano	Rural
1	Región de Arica y Parinacota	100%	0%	0%	0%
2	Región de Tarapacá	0%	0%	0%	0%
3	Región de Antofagasta	73%	0%	0%	0%
4	Región de Atacama	100%	0%	57%	0%
5	Región de Coquimbo	0%	0%	29%	0%
6	Región de Valparaíso	0%	0%	0%	0%
7	Región del L Gral. Bernardo O'Higgins	38%	0%	0%	0%
8	Región del Maule	0%	0%	0%	0%
9	Región del Biobío	14%	0%	0%	0%
10	Región de La Araucanía	0%	0%	0%	0%
11	Región de Los Ríos	57%	0%	0%	0%
12	Región de Los Lagos	88%	0%	0%	0%
13	Región de Aysén del Gral Ibáñez del Campo	0%	0%	0%	0%

14	Región de Magallanes y la Antártica Chilena	100%	0%	0%	0%
15	Región Metropolitana de Santiago	79%	0%	0%	0%

Los 100% son debido a que en esos sectores no se entregó una restricción de área a abarcar, por lo que la restricción activa es solo por capacidad. Se puede ver que en la mayoría de los casos es la restricción de cobertura la restricción activa.

3.3. Demanda de diseño para núcleo e IMS

Tal como se explicó anteriormente, las restricciones para el Núcleo e IMS son diferentes que las restricciones de los eNB, tanto en sus variables como en su forma. Es por ello que se debe calcular nuevamente una demanda de diseño, en que cada variable de restricción quede individualizada por elemento del nivel anterior. Como ejemplo de esto, es el caso del dimensionamiento de los S-GW, que necesitan conocer cuánto es la cantidad de EPBS por eNB en un sector para poder determinar la cantidad necesaria de éstos.

En esta sección se dividirá por la determinación de requerimientos de los S-GW y los MME por eNB para cada variable. Para los siguientes niveles, se mostrarán los cálculos generalizados para obtener estos requerimientos

3.3.1. Ancho de banda por Interfaz S1 y X2

El ancho de banda para la Interfaz S1 debe converger los flujos de datos de DL y UL, más debe asumir un margen por *peak* de tráfico y considerar el tráfico de voz. Este tráfico debe ser a nivel de transporte y no de datos de usuario, por lo que además debe considerar los datos de control. Los parámetros necesarios para éste cálculo son los siguientes.

TABLA 3-21: PARÁMETROS PARA ESTIMACIÓN DE ANCHO DE BANDA PARA LA INTERFAZ S1

Parámetros	Unidad	Valor
------------	--------	-------

Factor peak (P)	%	120% [20]
Factor control (Cc)	%	2%
Factor X2 (F_{x2})	%	3%

Con esto, las ecuaciones para determinar el Ancho de banda para la Interfaz S1-U , S1-C y X2 son:

$$Ancho_{S1U} = Ancho_{celda} \cdot \frac{P}{UtoT}$$

ECUACIÓN 18: CÁLCULO PARA ANCHO DE BANDA PARA LA INTERFAZ S1U

$$Ancho_{S1C} = Ancho_{S1U} \cdot C_c$$

ECUACIÓN 19: CÁLCULO PARA ANCHO DE BANDA PARA LA INTERFAZ S1C

$$Ancho_{x2} = (Ancho_{S1U} + Ancho_{S1C}) \cdot F_{x2}$$

ECUACIÓN 20: CÁLCULO PARA ANCHO DE BANDA PARA LA INTERFAZ X2

Cabe destacar que $Ancho_{celda}$ es el ancho de banda por celda de todos los servicios (Voz, Internet, Mensajería). Para determinar el Ancho de Banda para la voz, es simplemente multiplicar los erlangs determinados anteriormente con el Ancho de banda del códec de voz.

3.3.2. Modelo de comportamiento de datos de usuario

Para poder determinar las otras variables de restricción, como los EPBS y los intentos en hora cargada, se debe conocer el comportamiento de datos del usuario, que explica cuántos intentos y por cuánto tiempo el usuario usa un servicio de datos y por lo tanto los erlangs utilizados en los datos. Ya como no existe esta información en el modelo del último estudio tarifario., se usó un modelo genérico desde [20]. El modelo es el siguiente.

TABLA 3-22: MODELO DE COMPORTAMIENTO DE USUARIO

Servicios	Duración [s/HC]	Intentos [int/HC/sub]
Señalización IMS	7	5
Navegación Web	1800	0.4
Transacción de Archivo	60	0.2
Transacción P2P	1200	0.4
Email	50	0.2

Los erlang promedio por usuario se calculan con las siguientes ecuaciones

$$ErlangUsuario_{datos} = \sum_i TiempoServicio_i \cdot IntentoServicio_i$$

ECUACIÓN 21: CÁLCULO DE ERLANGS DE DATOS

Los canales necesarios para los datos se calculan a través de ErlangB con una tasa de bloque al 2%, que es la tasa de bloqueo de la red de acceso. Se calcula además los intentos en Hora Cargada, siendo éste la suma de los Intentos de cada servicio en la hora cargada. Éste valor es por usuario.

3.3.3. Cálculo de otras variables de restricción por celda

Para las otras variables de restricción, dígame EPBS, intentos y transacciones por celda, se calculan a través de variables ya nombradas. La cantidad de EPBS se calcula como la suma de EPBS de voz y de datos. Hay que recordar que los EPBS son los canales de transmisión dentro de la interfaz de radio, por lo que se deben considerar el DL y el UL.

Para los intentos por celda para los datos es la multiplicación de los intentos por usuarios por la cantidad de usuarios, mientras que para la voz, se calculan los intentos de llamadas a través de los siguientes parámetros

TABLA 3-23: DURACIÓN DE INTENTOS DE LLAMADAS Y INTENTOS POR LLAMADAS

Parámetros	Unidad	Valor
Duración llamada Entrante	min	1.13
Duración llamada Saliente	min	1.74
Duración llamada On-net	min	1.30
Intentos de Llamada por Llamada	int	1.56

Con la cantidad de intentos por voz y datos, la cantidad de intentos totales es la suma de ambos números.

Para las transacciones, se considera un factor de 6.2 tr/s/sub [21], por lo que se multiplica la cantidad de usuarios por celda por el factor ya nombrado para obtener la cantidad de transacciones por celda en cada tipo de área.

3.3.4. Capacidades máximas de equipo

Las capacidades máximas para todas las restricciones por equipo se anexan, con los costos. El costo eNB se obtiene desde [25], mientras que las capacidades y los costos de los elementos de núcleo se obtienen desde [21], más las capacidades y costos de los elementos de la arquitectura IMS se obtiene desde [26], mientras que los MGW y MGC son obtenidos a través de modelo tarifario utilizado en el último proceso tarifario. El *Router de Backbone IP* es un dato estimado. Cabe destacar que a las capacidades máximas de los equipos se les aplicó, por términos de diseño un factor de carga del 80%.

3.4. Determinación de elementos de EPC, IMS y *Backbone*

La determinación de S-GW y MME se realiza por región y no por país, es decir, no existirá S-GW que esté conectado a dos eNB de distintas regiones, al igual que los MME. Dicho

esto, se realizan las restricciones pertinentes para determinar el número de S-GW y MME. Para la restricción de compuertas, en los S-GW se reservan 2 para la conexión con el MME y con el P-GW y para el MME se reservan 4, uno para el P-GW, uno para el HSS y los otros 2 para otro MME, para que exista robustez en el sistema de señalización.

A continuación se realiza la determinación de los HSS, los cuales también se hacen regionales. En estos se reservan 2 compuertas, uno para el MME y otro para la posible conexión de un sistema IMS. Los P-GW se determinaron a nivel país, es decir, concentran tráfico de diferentes regiones. Al ser determinados la cantidad de P-GW, después se deben calcular los requerimientos para el IMS, el cual considera el flujo de voz y Mensajería y el *Backbone* IP, que considera los flujos de datos.

Ya calculados todos los elementos, se considera Criterios de Respaldo para cada uno de estos elementos. Los Criterios de respaldo son los siguientes.

TABLA 3-24: CRITERIOS DE RESPALDO PARA ELEMENTOS

Elemento	Criterio de Respaldo
S-GW	N+1
MME	N+1
HSS	1+1
P-GW	N+1
PCRF	1+1
P/I/S CSCF	N+1
RCS/MMTEL/TAS/SCC/AS-SR/VCC	1+1
MGW	N+1
MGC	N+1
<i>Router Backbone</i>	N+1

Para los eNB no se consideró un criterio de respaldo.

3.5. Determinación de largo de enlaces

Para la determinación de largos de enlace, se debe separar en conexiones regionales o conexiones a nivel país. Las conexiones regionales van a ser dependiente de los radios de las antenas y la cantidad de elementos, mientras que las conexiones a nivel país solo dependerán de la cantidad de elementos, debido a las suposiciones tomada. A continuación se mostrará cómo se obtuvieron los largos de cada enlace, describiéndolos por Interfaz.

3.5.1. Interfaz X2

Para calcular las distancias de X2, primero se calcula un radio promedio por región, con la siguiente fórmula

$$Radio_{promedio} = \frac{\sum_i RadioTipo_i \cdot CeldasTipo_i}{\sum_i CeldasTipo_i}$$

ECUACIÓN 22: CÁLCULO DE RADIO PROMEDIO

De ahí, se arman grupos de 22 eNB, debido a que esa es la capacidad máxima que tiene un MME, quitando las compuertas de reserva. La parte entera de estos grupos se considera como las agrupaciones donde todos los eNB tienen una conexión a través de un camino de interfaz X2. Estas agrupaciones se consideran de la siguiente forma, considerando los vértices de los triángulos son eNB y las aristas de los triángulos como las conexiones X2.

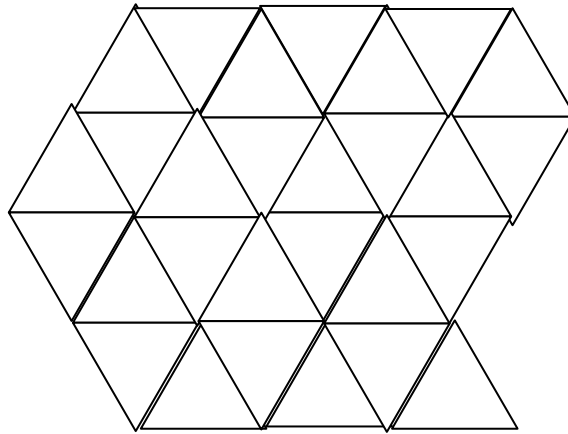


FIGURA 11: AGRUPACIÓN DE 22 eNB PARA ENLACES X2

Estas agrupaciones tienen entre ellas 49 interfaces X2. Para los eNB sobrantes, se crea una tabla que entrega la cantidad de Interfaces X2 a través de la cantidad de eNB, basado en que se espera construir una agrupación de 22 eNB igual a la figura anterior. A través de esta tabla se puede calcular la cantidad de Enlaces X2 para cada región y por lo tanto, su distancia total.

3.5.2. Interfaces S1 U y C

Para las interfaces S1, se utiliza un método similar al de la Interfaz X2. Se utiliza la misma agrupación, pero se busca en una tabla que entrega la cantidad de Radios totales para conectar cierta cantidad de eNB a un S-GW o MME. Estas distancias se pasan a través de los mismos vértices, por lo que se entrega valores enteros que se deben multiplicar por el radio promedio. Cabe destacar que el índice de búsqueda entre estos dos elementos es diferente, debido a que el MME tiene consigo un mayor número de compuertas reservadas. Además se considera que no existe distancia en la conexión entre S-GW y MME, debido a que, por el método de diseño, siempre van a existir mayor cantidad de MME que S-GW, por lo que se asume siempre que un S-GW va estar muy cerca de un MME.

3.5.3. Interfaz S5 y Conexión P-GW con *Backbone* y IMS

Para la conexión entre S-GW y P-GW, se consideró la configuración de un árbol (Topología Estrella), en el que cada S-GW se encuentra a una distancia equidistante del otro por todo Chile. Los P-GW se encuentran justo al centro de los S-GW que interconecta. En la figura 12 se muestra un ejemplo de cómo se conectan estos elementos

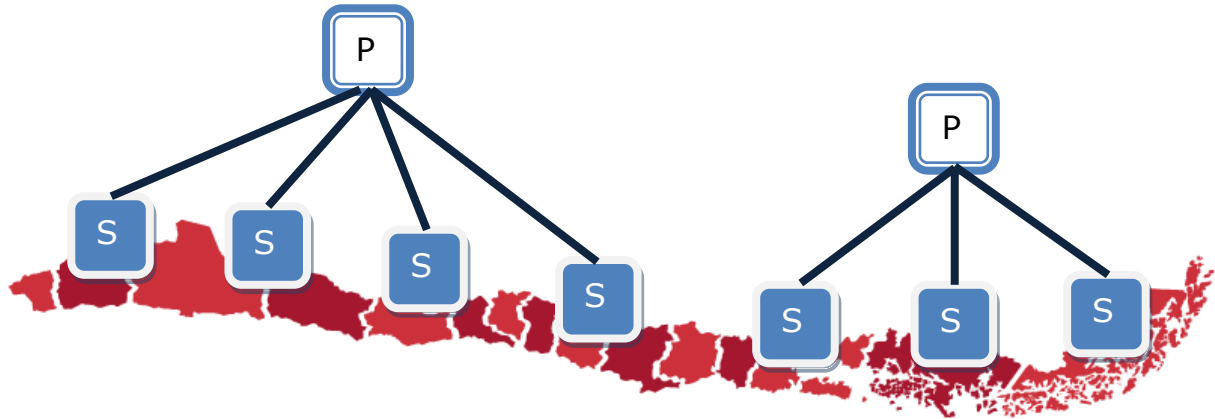


FIGURA 12: CONEXIÓN ENTRE S-GW Y P-GW

La distancia de las conexiones en un árbol como se describe, depende de la distancia entre S-GW, la cantidad de S-GW y si esta cantidad es par o impar, debido a que si es impar, existe un P-GW que queda justo en el mismo sector que un S-GW. Las ecuaciones para determinar la distancia final son las siguientes.

$$DistanciaArbol = \begin{cases} Si N par: D \cdot \frac{(N)^2}{4} \\ Si N impar: D \cdot \left[\frac{(N-1)^2}{4} + \frac{(N-1)}{2} \right] \end{cases}$$

ECUACIÓN 23: ECUACIONES PARA DISTANCIA TOTAL EN UN ÁRBOL

Dónde:

N: Cantidad de hojas en el árbol

D: Distancia entre hojas

Esta ecuación es utilizada puede ser utilizada además para el cálculo de las conexiones entre P-GW y la arquitectura IMS y entre los P-GW con el *backbone* IP.

3.5.4. Otras conexiones

Las otras conexiones entre elementos se consideran despreciables por el hecho de que se encuentran en un mismo lugar.

3.6. Costo de la red

Ya estimados la cantidad de elementos y las conexiones entre estos, la determinación de los costos es simplemente multiplicar las cantidades calculadas por los costos unitarios entregados en el anexo El tipo de conexión entre elementos se determina a través del máximo ancho de banda obtenido para ese año entre todas las conexiones del mismo tipo.

Cabe destacar que en este trabajo solo se calcularán parte de los costos de inversión de la red, y que no se abarcan los gastos operacionales ni los administrativos. Sin embargo, por consultas realizadas al Profesor Guía es asumible que el OPEX de la red es un porcentaje acotado de la inversión y que los gastos administrativos entre diferentes tipo de red es constante.

4. Resultados, Pruebas y Discusión

En este capítulo se mostrará los resultados del diseño de red LTE, mostrando sus componentes y sus costos, siendo comparados con la red 3G mostrada en las recomendaciones de la SUBTEL. De ahí se pasara a mostrar los resultados de las pruebas realizadas al modelo, que son esencialmente modificación de parámetros y pruebas de Sensibilidad, para finalmente realizar una discusión de estos resultados.

Debido a que la red de las recomendaciones de la SUBTEL tiene consigo enlaces arrendados y propios, los resultados mostrados se concentraran en la cantidad de elementos y costo de estos y no en las distancias y costos de enlace.

4.1. Resultados

4.1.1. Elementos y costos de la red diseñada y red 3G

La cantidad de elementos estimados para la red diseñada en la implementación son los siguientes.

TABLA 4-1: CANTIDAD DE ELEMENTOS POR AÑO PARA LA RED DISEÑADA

Elementos	Unidad	2013	2014	2015	2016	2017	2018
eNB	uds	2923	3091	3300	3490	3731	3943
S-GW	uds	154	163	172	181	191	201
MME	uds	169	176	186	197	210	220
HSS	uds	32	32	34	38	38	38
P-GW	uds	10	11	11	12	12	13
PCRF	uds	4	4	4	4	4	4
P/I/S CSCF	uds	3	3	3	3	3	3
RCS/MMTEL/TAS/SCC/AS-SR/VCC	uds	4	4	4	4	4	4
MGW	uds	2	2	2	2	2	2
MGC	uds	2	2	2	2	2	2
Router	uds	2	2	2	2	2	2

Como se puede observar que los elementos van aumentando a través de los años, esto debido por el aumento de demanda de datos. Además se puede observar que los eNB superan con creces la cantidad de elementos superiores. Cabe destacar que los únicos elementos en que su restricción activa no fue la de las compuertas fueron los PCRF y los CSCF, donde sus restricciones activas fueron los EPBS y los intentos en hora cargada, respectivamente. Esta red muestra ser hasta un 36% más barata que la red 3G a comparar.

4.2. Pruebas

Estas pruebas consisten en variar las entradas o parámetros del sistema para ver cómo se comporta las salidas de éste. La metodología de estas pruebas es descrita como introducción en cada una de éstas, para continuar con su resultado y posteriores observaciones. Todas estas pruebas parten desde el diseño original descrito en la implementación.

4.2.1. Adaptación red LTE a 3G

Para comprobar que la red LTE es más barata debido a la optimización de los recursos de radio y la frecuencia que utiliza para su despliegue, se diseñó la misma red LTE, pero utilizando los radios y áreas utilizada en el modelo del último proceso tarifario y se utilizó un ancho de banda por celda de 3.4 Mbps. Al realizar estos cambios, los nuevos costos para la red LTE fueron hasta un 81% más caro.

4.2.2. Cantidad de eNB y costo de red para diferentes frecuencias de despliegues.

Para esta prueba, se modificó las frecuencias de despliegue en cada tipo de área y se observan el número de eNB y el costo de la red. Las redes diseñadas en esta prueba son 2, uno con todos los terrenos con la frecuencia 700 MHz y la otra con todos los terrenos con la frecuencia de 2600 MHz. La cantidad de eNB que se obtuvieron son los siguientes

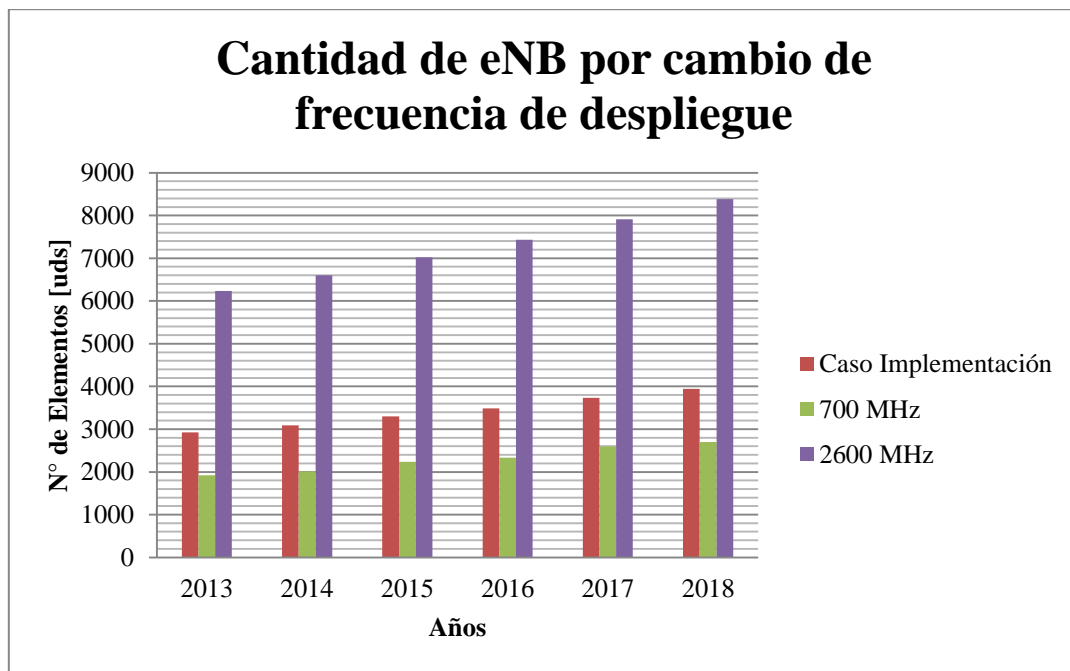


FIGURA 13: CANTIDAD DE eNB POR CAMBIO DE FRECUENCIA DE DESPLIEGUE

Como se puede apreciar, el aumento de eNB por el cambio de frecuencia de despliegue es drástico, siendo los máximos 2704 un de eNB en la frecuencia 700 MHz mientras que para la frecuencia 2600 MHz 8380 un de eNB. Esto se refleja también en el costo total de la red, siendo la red de 2600 MHz 175% más cara que la de 700 MHz

4.2.3. Costos para diferentes anchos de banda de despliegues.

Para la siguiente prueba, se cambió la frecuencia de despliegue en todos los tipos de zona para todas las regiones, y se observó los costos para los elementos en todos los años. A continuación se muestra el costo de elementos de la red LTE para diferentes despliegues con MIMO.

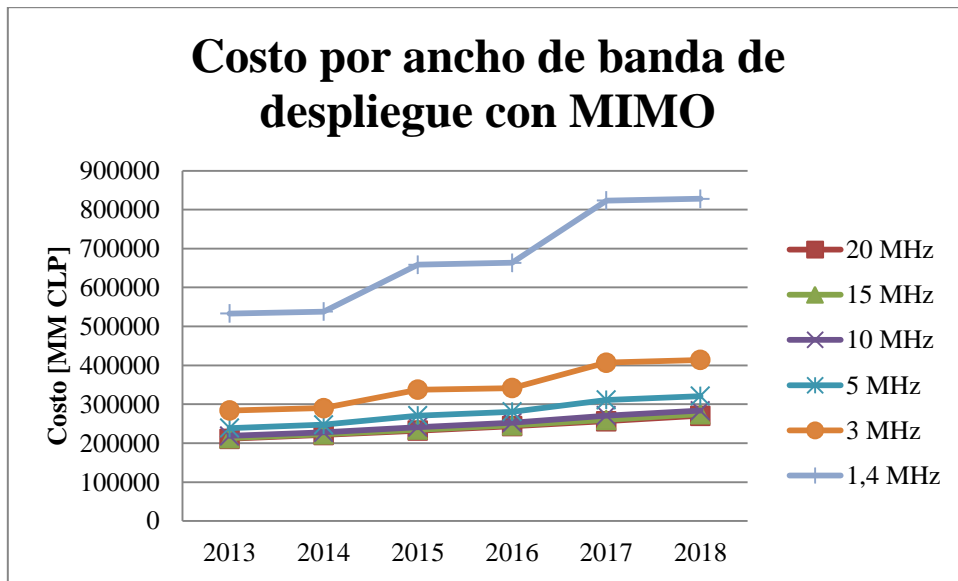


FIGURA 14: COSTO DE ELEMENTOS POR DESPLIEGUE CON MIMO

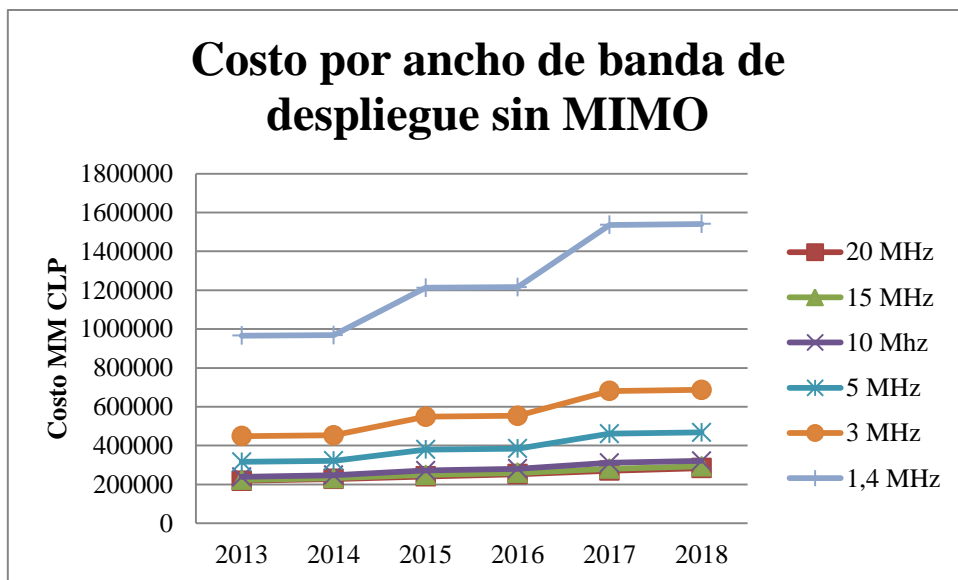


FIGURA 15: COSTOS DE ELEMENTOS POR DESPLIEGUE SIN MIMO

Se puede observar que las diferencias entre el despliegue de 20 MHz, 15 MHz y 10 MHz no muestran cambios tan drásticos en los costos como los otros tipos de despliegue, esto con MIMO y sin éste, lo que es coherente con que las primeras tres bandas de despliegue (20 MHz, 15 MHz y 10 MHz) se consideran para una red completamente operativa mientras que las otras bandas se consideran cuando todavía se está en un proceso de escalabilidad, o se desea una red *indoor* [27].

4.2.4. Costo de MIMO por eNB

En esta prueba, la intención es calcular cuánto es el costo que significa no colocar MIMO por antena. Para ello, primero se observa cuáles son los tipos de área por región en el último año en donde hubo un aumento de antenas por quitar la tecnología MIMO. Paralelamente, se calcula cuanto fue el aumento en los costos para el mismo año en toda la red al quitar MIMO, para terminar con la división de esos costos por las antenas desplegadas en los sectores con MIMO que cambiaron al quitar la tecnología.

A continuación se muestra los eNB desplegados por región en cada tipo de área en el último año y se destaca cuáles fueron los sectores que aumentaron la cantidad de eNB al quitar MIMO.

TABLA 4-2: eNB DESPLEGADAS EN EL ÚLTIMO AÑO

ID	Región	Denso Urbano	Urbano	Suburbano	Rural
1	Región de Arica y Parinacota	4	10	2	13
2	Región de Tarapacá	40	19	2	44
3	Región de Antofagasta	8	37	2	153
4	Región de Atacama	2	20	5	64
5	Región de Coquimbo	31	55	5	62
6	Región de Valparaíso	48	270	18	60
7	Región del Gral. Bernardo O'Higgins	17	86	8	54
8	Región del Maule	34	66	10	78
9	Región del Biobío	32	203	14	122
10	Región de La Araucanía	13	85	7	96
11	Región de Los Ríos	5	15	3	47
12	Región de Los Lagos	11	81	8	80
13	Región de Aysén del Gral. Ibáñez del Campo	10	12	2	13
14	Región de Magallanes y de la Antártica	2	13	2	31
15	Región Metropolitana de Santiago	76	661	28	48

Próximo se muestran los costos para el último año para ambos despliegues, la cantidad de antenas ya antes nombradas y el costo por antena.

TABLA 4-3: VALORES PARA EL CÁLCULO DE MIMO POR eNB

Nombre de valor	Unidad	Valor
Costo con MIMO	MM CLP	270.636
Costo sin MIMO	MM CLP	283.580
Diferencia de costo	MM CLP	12.944
Cantidad de eNB desplegados	uds	249
Costo de MIMO por eNB	MM CLP/eNB	52

Esto indica que el costo por eNB que debe significar desplegar MIMO debe ser menor que 52 MM CLP para que signifique un ahorro. Cabe destacar que no hay ningún costo que aumente en el despliegue de MIMO en el modelo diseñado, ya que no se tienen costos modulares.

4.2.5. Costos por voz y datos

En esta prueba, se hizo variar el MOU y la cantidad de datos consumidos en DL y UL por Subscriber en el mes y se observó el costo total de los elementos para el último año. Los rangos de variación fueron desde un 50% hasta un 800% en intervalos de 50%, para ambas variables, lo que da un MOU en un rango entre 71 min/mes hasta 1291,3 min/mes y un consumo de datos en DL desde 774 MB/mes hasta 13996 MB/mes. Los resultados son los siguientes

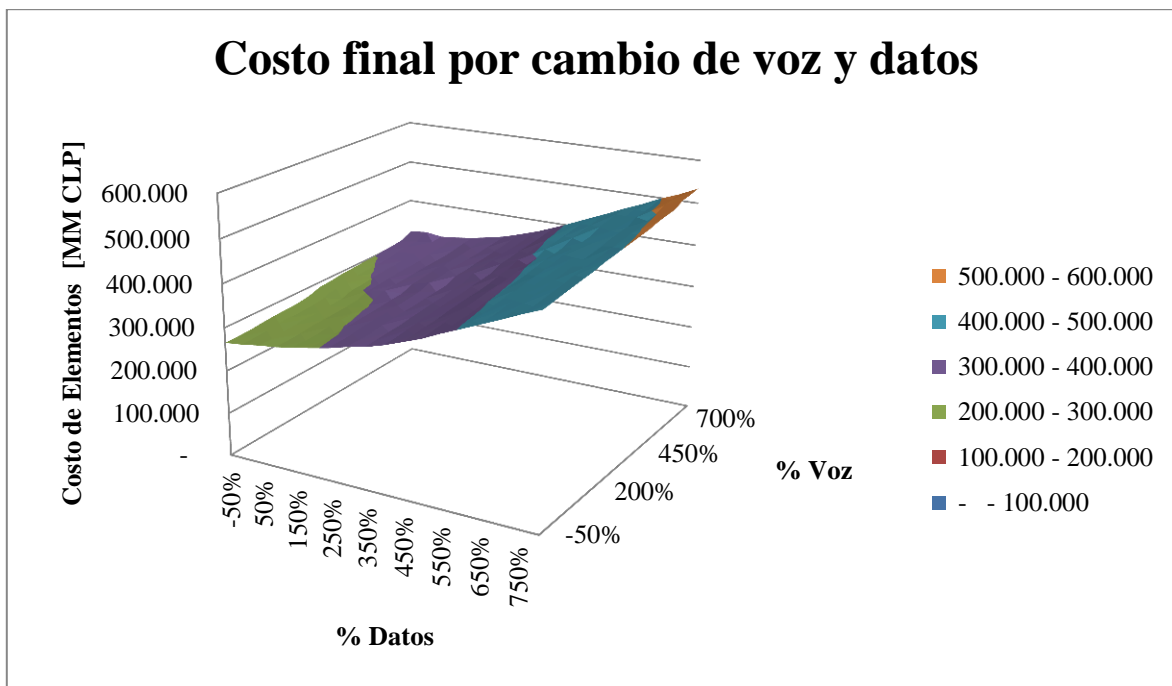


FIGURA 16: GRÁFICO DE COSTOS DE RED EN FUNCIÓN DE LA VOZ Y LOS DATOS

Se muestra en el gráfico que si bien existen pequeños sobresaltos en la parte central de la superficie, lo que equivaldría a pequeñas discontinuidades en los costos que corresponden a cambios en las restricciones activas, pero en el comportamiento general, se podría aproximar a una función lineal. Esto es en parte a la no modularidad presentada por los equipos costeados. También se puede observar que el cambio en el costo por el porcentaje de datos es mayor que para el porcentaje de voz. Eso es debido a que un cambio de porcentaje en los minutos de voz equivale a menos carga por su códec.

4.2.6. Cantidad de elementos por cambio de voz

En esta prueba, se modificó la voz en los mismos rangos que la prueba anterior, pero ahora se observó la cantidad de elementos. En la siguiente tabla se muestra solo algunas concentraciones, por motivos de estética.

TABLA 4-4: CANTIDAD DE ELEMENTOS POR CONCENTRACIÓN DE VOZ

Elementos	50%	0%	50%	100%	200%	300%	400%	500%	600%	700%	800%
-----------	-----	----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------

eNB	3040	3047	3054	3061	3080	3112	3148	3186	3231	3279	3328
S-GW	161	161	163	163	163	166	167	168	169	172	174
MME	174	174	175	177	177	179	181	181	183	185	187
HSS	34	34	36	36	36	36	36	36	36	38	38
P-GW	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
PCRF	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6
P/I/S/E CSCF	2	3	4	5	7	8	10	12	14	15	17
TAS	2	4	6	8	12	14	18	22	26	28	32
MGW	2	2	2	3	3	4	4	5	5	6	7
MGC	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4
Router	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Es importante destacar que mientras aumenta los minutos por suscriptor, aumentan los elementos de IMS sin aumentar los *Router*, lo que demuestra la coherencia de la división de servicios entre IMS y el *Backbone* IP. Además se muestra que los P-GW no aumentan de número, que se debe a la alta capacidad de ancho de banda que tienen

4.2.7. Cantidad de elementos por cambio de datos

Al igual que la prueba anterior, en esta se observará el aumento o disminución de elementos por el cambio de Datos al mes por suscriptor. También se muestran solo algunas concentraciones, por motivos estéticos.

TABLA 4-5: CANTIDAD DE ELEMENTOS POR CAMBIOS EN DATOS AL MES

Elementos	50%	0%	50%	100%	200%	300%	400%	500%	600%	700%	800%
eNB	2995	3047	3117	3194	3394	3639	3917	4334	4808	5282	5766
S-GW	158	161	166	168	177	188	200	219	241	263	286
MME	172	174	179	181	191	205	220	240	264	285	310
HSS	32	34	36	36	38	38	38	40	40	42	42
P-GW	10	11	11	11	12	12	13	14	16	17	18
PCRF	4	4	4	4	4	6	6	6	8	8	10
CSCF	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
TAS	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
MGW	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
MGC	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Router	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4

El aumento de *Router* sin que aumente los elementos IMS indican la misma coherencia descrita en el punto anterior. Cabe destacar que ahora si aumenta la cantidad de P-GW, pero este aumento es debido a la restricción de interfaces, ya que el aumento de S-GW es excesivo para la cantidad de compuertas que posee el P-GW.

4.2.8. Cambio de restricción activa por disminución de capacidad máxima

En estas pruebas se modificó todas las capacidades máximas de los elementos en la misma proporción, excepto para la restricción de interfaz, para observar en qué punto la restricción de Interfaz deja de ser la restricción activa. La tabla con los elementos probados, el porcentaje de carga máxima límite aproximado y la siguiente restricción activa se muestran a continuación.

TABLA 4-6: CARGA LÍMITE Y PRÓXIMA RESTRICCIÓN ACTIVA PARA ELEMENTOS DE LA RED

Elemento	Carga Límite Aproximado	Restricción Activa
S-GW	9%	Transacciones
MME	0.6%	Transacciones
P-GW	34%	EPBS
MGW	57%	Ancho de Banda
MGC	23%	Ancho de Banda
Router	29%	Ancho de Banda

Nótese lo bajo que son las cargas límite de los S-GW y MME en comparación con los demás equipos. Esto es solo por lo alto de su capacidad máxima. Además que es en este porcentaje de carga límite es cuando se obtiene un aumento en la cantidad de los elementos.

4.2.9. Sensibilidad de precios unitarios

En esta prueba se observa el cambio en el costo total al cambiar el costo unitario de diferentes equipos, donde se tomó como ejemplo al último año evaluado. La tabla de resultados es la siguiente

TABLA 4-7: CAMBIO EN COSTO TOTAL POR CAMBIO EN COSTO UNITARIO

Equipo	Cambio Unitario	Costo	Cambio Costo Total
eNB	10%		5.51%
S-GW	10%		1.69%
MME	10%		1.52%
HSS	10%		0.29%
P-GW	10%		0.12%
PCRF	10%		0.09%
CSCF	10%		0.02%
TAS	10%		0.00%
MGW	10%		0.15%
MGC	10%		0.60%
Router	10%		0.01%

Acá vemos que el equipo más sensible es el eNB, debido a que es el elemento con mayor número de aparatos. El menor es el *Application Server*, donde se detectó cambio sin llegar a ser significativo.

4.3. Discusión

4.3.1. Sobre validez de precios unitarios

Si bien los valores de los precios unitarios de los elementos están justificados con documentos, estos datos no están respaldados por ninguna concesionaria ni ente regulador. Cabe destacar que estos precios están separados en documentos con diferentes fechas y de diferentes países, por lo además no son coherentes entre ellos, debido que el mismo dinamismo del mercado de las telecomunicaciones modifica los precios entre años [28] y entre países con diferente nivel de desarrollo [29].

Es por ello que se debe recalcar que los resultados de costos de red acá no tienen ninguna validez en la actualidad, y que se deben considerar estos como un indicador de la eficiencia de la red más que un precio real.

4.3.2. Sobre la frecuencia de despliegue de la red

La frecuencia de despliegue de la red es por lejos la variable de diseño más importante para el costo de la red LTE diseñada, debido principalmente a que la mayoría de los eNB son elegidos mediante la restricción de cobertura y no por la de capacidad. Esto queda demostrado en el último año, siendo el de mayor demanda de voz y datos por usuario, tan solo un 3.6% de los eNB son elegidos a través de la restricción de capacidad. Es por ello que el radio de las antenas juega un rol fundamental en el número de eNB, por lo tanto, la frecuencia de despliegue. Esta afirmación es respaldada a su vez por la prueba de cantidad de eNB y costo de la red ante un cambio de frecuencia de despliegue y los pocos sectores que cambian por efecto de quitar MIMO.

4.3.3. Sobre las capacidades máximas de los equipos

Las capacidades máximas de los equipos costeados muestran un sobredimensionamiento con respecto a la demanda dada. Esto queda tácito en la prueba de sensibilidad de las capacidades máximas, donde existen equipos donde necesitan hasta un 0.6% de la capacidad máxima para que la restricción de cantidad de interfaces no se aplique. En teoría, esto significaría que se puede bajar aún más los costos de la red, utilizando equipos de menor capacidad, por lo tanto de menor precio.

5. Conclusiones

En esta sección se presentará las conclusiones del trabajo realizado.

La metodología utilizada para el diseño de la red en general, que es de abajo hacia arriba, muestra fluidez en el cálculo de los elementos debido a la jerarquización de los cálculos.

El poco tiempo que ha sido desarrollada la tecnología LTE en Chile, existe muy poca información con validez comprobada respecto a la realidad nacional. En concreto, no se encontró información pública respecto al comportamiento de datos de usuario dentro de una red LTE en Chile, ni los costos utilizados en los equipos dispuestos para su funcionamiento. Esto inevitablemente genera la necesidad de utilizar parámetros generalizados o extranjeros, cuya representatividad al contexto nacional no está evidenciada. Es por ello que estos resultados de este trabajo no deben considerarse como un reflejo de situación actual, si no como un ejercicio académico.

La red diseñada muestra un menor costo de inversión con respecto a una red 3G debido a que la demanda utilizada no es un factor de restricción para las capacidades manejadas por los eNB y que el despliegue en la banda 700 MHz crea radio de cobertura muy superior a la utilizada en el modelo. Es esta última variable de diseño se considera la más importante para el costo total de la red diseñada.

El diseño de la red y el modelo creado están acordes a la regulación del proceso tarifario chileno y puede reemplazar a un modelo ya utilizado, obteniendo una estructura de costos de operación, gastos administrativos, indexación y cotizaciones coherentes y con la realidad y respaldados por concesionarias, por lo que el objetivo principal en que el diseño sea aplicable a fines tarifarios se cumplió.

Trabajo Futuro

Como trabajo futuro, se debe repetir el proceso de diseño, pero con datos con un mayor respaldo en los precios de los equipos, que provengan de contratos efectivos de compra en los que además puedan modularse. Además de perfeccionar la determinación de radios en base a información real de las empresas para recoger todos los efectos que sean necesarios y de esta manera afinar el cálculo teórico.

El crecimiento de la demanda de datos es explosivo y seguirá siendo. Para mayores demandas se sugiere técnicas y tecnologías como descarga por WiFi (*wifi offload*), que es un método de descargar la demanda de una red inalámbrica mediante una red wifi por red fija de propiedad de la concesionaria en los puntos de alta demanda [30].

Se conjetura que para el próximo proceso de tarificación de redes móviles, existan implementadas redes LTE *Advance*, por lo que también se recomienda el actualizar el diseño de red con respecto a esta tecnología.

Referencias

- [1] ITU-R, “REPORT ITU-R M . 2134 Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface (s),” 2008.
- [2] ITU-R, “ITU World Radiocommunication Seminar highlights future communication technologies Press Release.” [Online]. Available: http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2010/48.aspx#.VLAoJdKG-rx. [Accessed: 09-Jan-2015].
- [3] Subsecretaria de Telecomunicaciones, “Bases Técnico Económicas Definitivas para el Proceso Tarifario de la Concesionaria Telefónica Chile S.A. correspondiente al Periodo 2014-2019,” 2013.
- [4] Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, “Ley General de Telecomunicaciones,” 2015.
- [5] “Procedimiento de Fijación Tarifaria.” [Online]. Available: <http://www.subtel.gob.cl/procesos-tarifarios5/112-estudios-y-proyectos/estudios-2005/569-procedimiento-de-fijacion-tarifaria>. [Accessed: 11-Jan-2015].
- [6] W. Stallings, *Wireless communications and networks*. 2004, p. 559.
- [7] F. Bernardo, F. Casadevall, and O. Sallent, *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*. .
- [8] M. Palacios, “Redes Inalámbricas de 2G, 2.5 G y 3G,” Universidad de las Américas Puebla, 2008.
- [9] J. M. Hernando, “Cátedra Telefónica en la UPM ‘Aplicaciones y Servicios Móviles.’” .
- [10] A. Systems, “White Paper Tecnología MIMO.” pp. 1–8.
- [11] Spirent, “White Paper IMS Architecture The LTE User Equipment Perspective.” .
- [12] H. Holma and A. Toskala, *WCDMA for UMTS: HSDPA evolution and LTE*. 2007.
- [13] G. Bertrand, “The IP Multimedia Subsystem in Next Generation Networks,” *Network, Multimed. Secur. Dep. (RSM)- ...*, vol. 7, no. March, 2007.
- [14] Huawei, “Long Term Evolution (LTE) Radio Access Network Planning Guide.”
- [15] “3GPP Long Term Evolution (LTE): TTI Bundling.” [Online]. Available: <http://4g-lte-world.blogspot.com/2012/05/tti-bundling-in-lte.html>. [Accessed: 06-Jan-2015].
- [16] A. Molish, “7 . 6 . 1 Appendix 7 . A : The Okumura – Hata Model,” in *Wireless Communications*, 2011.

- [17] P. Valenzuela Cano, “Capitulo 1: Arquitectura QoE y Planificación - EL6027 Sistemas de Acceso Móvil Inalámbrico.” pp. 1–71.
- [18] A. Larmo, M. Lindström, M. Meyer, G. Pelletier, J. Torsner, and H. Wiemann, “The LTE link-layer design,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. April, pp. 52–59, 2009.
- [19] 3GPP, “TS 136 213 - V11.7.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 11.7.0 Release 11),” 2014.
- [20] Huawei, “LTE Radio Network Planning Introduction.” .
- [21] D. Dababneh, “LTE Traffic Generation and Evolved Packet Core (EPC) Network Planning,” 2013.
- [22] “We Can Hear It, Finally: Verizon to Launch HD Calls | News & Opinion | PCMag.com.” [Online]. Available: <http://www.pcmag.com/article2/0,2817,2464149,00.asp>. [Accessed: 16-Jan-2015].
- [23] 3GPP, “3Gpp Ts 26.091,” vol. 0, 2001.
- [24] “How Big is a Voice Call? - Don - Expert Opinion - LTE University.” [Online]. Available: http://lteuniversity.com/get_trained/expert_opinion1/b/donhanley/archive/2013/09/11/how-big-is-a-voice-call.aspx. [Accessed: 16-Jan-2015].
- [25] I. Streule, M. Starling, and L. Tchoukriel-thebaud, “Draft LRIC model of mobile termination in Sweden,” no. February. 2010.
- [26] R. P. Segarra Tello, “Estudio y Diseño de un Backbone IP Multimedia Subsystem (IMS) para proporcionar servicios de datos multimedia en la zona norte de Quito,” Escuela Politécnica Nacional, 2009.
- [27] P. Valenzuela Cano, “Evolución de 3G: HSPA y LTE - EL6027 Sistemas de Acceso Móvil Inalámbrico.” .
- [28] “Unidad 2: Infraestructura de las TIC y tecnologías emergentes - Ingenieria Comerical Univercidad Católica de Valparaiso.” .
- [29] “¿Qué es la paridad de poder adquisitivo (PPA) o paridad de poder de compra? | Economy Weblog.” [Online]. Available: <http://economy.blogs.ie.edu/archives/2011/10/%C2%BFque-es-la-paridad-de-poder-adquisitivo-ppa-o-paridad-de-poder-de-compra.php>. [Accessed: 03-Mar-2015].
- [30] A. Networks, “Wi-Fi Offload - Mobile Data Offloading from 3G/4G to Wi-Fi | Aptilo.” [Online]. Available: <http://www.aptilo.com/mobile-data-offloading/wifi-offload-3g-4g>. [Accessed: 10-Mar-2015].

Anexos

A.1 Capacidades máximas y precios unitarios de los equipos

TABLA A-1: CAPACIDADES MÁXIMAS PARA ELEMENTOS DE NÚCLEO

Elemento	Unidad	MME	S-GW	P-GW	HSS	PCRF
Subscriptores	MM sub	15			15	
Subs. Inscritos	MM sub	14	14	14		15
Intentos	MM int	405	405	405		
EPBS	MM EPBS	15	3	3		6
Transacciones	MM tr	140	9	6		13
BW	Gbps		55	55		25
BW	Kerl					
Interfaces	uds	24	24	20	20	20

TABLA A-2: CAPACIDADES MÁXIMAS PARA OTROS ELEMENTOS

Elemento	Unidad	CSCF	TAS	Router	MGW	MGC
Subscriptores	MM sub		15			
Subs. Inscritos	MM sub					
Intentos	MM int	5				
EPBS	MM EPBS					
Transacciones	MM tr					
BW	Gbps	55		100		
BW	Kerl				36	90
Interfaces	uds	20	20	20	20	20

TABLA A-3: PRECIOS UNITARIOS DE ELEMENTOS

Elemento	eNB	MME	S-GW	P-GW	HSS	PCRF	CSCF	TAS	Router	MGW	MGC	
Precio	M USD	78	380	455	458	368	0	256	35	204	3353	12976