

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

Cálculo de la capacidad del enlace de subida en LTE-Advanced con agregación de portadoras inter banda

Tesis para optar el título de Magister en Ingeniería de las Telecomunicaciones

José Luis Calderón Choy

Asesor: Dr. Diógenes Marcano  
Mayo 2014



José Luis Calderón Choy: *Cálculo de la capacidad del enlace de subida en LTE-Advanced con agregación de portadoras inter banda*, Tesis para optar el título de Magister en Ingeniería de las Telecomunicaciones, © Mayo 2014

A mi madre, Carmen E. Choy Sam.  
Por apoyarme en todo proyecto y en cada momento importante de  
mi vida.





## AGRADECIMIENTOS

---

Mis más sinceros agradecimientos a todos aquellos que ayudaron a que esta Tesis sea una realidad.

Principalmente a mi Madre por su apoyo incondicional en todo sentido.

A mi Asesor de Tesis el Doctor Diógenes Marcano.

A mi guía del curso Tesis, el Doctor Carlos Silva Cárdenas.

A mi estimado amigo, Juan Carlos Espichan Infante, por su gran participación en la programación del aplicativo en PHP.

A Natalí Mena Velásquez, por el préstamo de la netbook de pruebas y validación de la web.

A mi hermano, el Licenciado Luis Miguel Calderón Choy, por la diagramación y mejora en algunas de las figuras e imágenes.

A la Magister Patricia Díaz Ubilluz y a mis amigos de la Maestría por su apoyo, sus ánimos, sugerencias y comentarios.





## ÍNDICE GENERAL

Introducción	1
1 ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA	3
1.1 Análisis de la problemática	3
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 Fundamentos de LTE	5
2.1.1 Arquitectura LTE	5
2.1.2 Bandas de frecuencia para LTE	8
2.1.3 Acceso de radio	9
2.1.4 Modulación Adaptativa	11
2.1.5 Estructura de los canales en el Down Link (DL)	13
2.1.6 Estructura de los canales en el Up Link (UL)	13
2.1.7 Estructura de la trama y matriz de recursos en el UL	15
2.1.8 Cálculo de la capacidad pico	16
2.1.9 Sistemas MIMO	16
2.1.10 Link Budget en LTE	17
2.2 Fundamentos de LTE Advanced	19
2.2.1 Agregación de portadoras (Carrier Aggregation)	20
2.2.2 MIMO en LTE-Advanced	28
2.2.3 Categoría de los User Equipment (UE) en Long Term Evolution Advanced (LTE Advanced)	29
3 DESARROLLO DE LA APLICACIÓN	31
3.1 Herramientas utilizadas	31
3.2 Detalle del Funcionamiento de la Aplicación	31
3.2.1 Selección del tipo de agregación	31
3.2.2 Selección de la configuración de la agregación de portadoras	32
3.2.3 Selección de las combinaciones de la agregación de portadoras	32
3.2.4 Canalizado de los Component Carriers	33
3.2.5 Validación de Ortogonalidad	33
3.2.6 Selección de los parámetros del LinkBudget	35
3.2.7 Cálculo de la capacidad y reporte final	36
3.3 Diagrama de flujo del sistema	37
3.3.1 Selección del tipo de agregación y configuración	37
3.3.2 Selección de las combinaciones de la agregación de portadoras	38
3.3.3 Canalizado de los Component Carriers	39
3.3.4 Validación de Ortogonalidad	40
3.3.5 Cálculo de la capacidad y reporte final	41
4 RESULTADOS DE LA CAPACIDAD CON EL APLICATIVO	43
4.1 Validación de resultados para CA Intrabanda Continua	43

4.1.1	Comparación de resultados CA Intrabanda Con- tínua	44
4.2	Validación de resultados para CA Intrabanda Discontí- nua	45
4.2.1	Comparación de resultados CA Intrabanda Dis- contínua	46
4.3	Validación de resultados para CA Interbanda	47
4.3.1	Comparación de resultados CA Interbanda	48
	Conclusiones y Recomendaciones	49
	BIBLIOGRAFÍA	51





ÍNDICE DE FIGURAS
 

---

Figura 1	Arquitectura LTE [2].	7
Figura 2	Arquitectura E-UTRAN [6]	7
Figura 3	Comparación FDM y OFDM	9
Figura 4	Ejemplo del espectro correspondiente a 6 subportadoras Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) [19]	10
Figura 5	Representación Gráfica OFDMA y SC-FDMA. Fuente: 3GPP LTE	11
Figura 6	Ilustración de las constelaciones para las modulaciones QPSK y 16-QAM [19]	12
Figura 7	Estructura de las Tramas en el UL [5].	15
Figura 8	Matriz de recursos en el PUSCH del UL [5].	16
Figura 9	cobertura de Portadoras pertenecientes a Bandas de diferente frecuencia [13].	20
Figura 10	Definición del $BW_{channel}$ y el $N_{RB}$ de una portadora E-UTRA [14]	22
Figura 11	Definición del ancho de banda del canal agregado y los bordes del ancho de banda del canal de agregados [14].	23
Figura 12	términos y definiciones para el Carrier Aggregation (CA) Intrabanda no continua [14]	24
Figura 13	Selección del tipo de Agregación	31
Figura 14	Selección del tipo de Configuración	32
Figura 15	Selección del tipo de Combinación	32
Figura 16	Canalización de las Component Carriers	33
Figura 17	Validación de la ortogonalidad	34
Figura 18	Selección de los parámetros del LinkBudget	35
Figura 19	Cálculo de la capacidad y reporte final	36
Figura 20	Diagrama de flujo - Selección del tipo de Agregación y configuración	37
Figura 21	Diagrama de flujo - Selección de las combinaciones de la agregación de portadoras	38
Figura 22	Canalizado de los Component Carriers	39
Figura 23	Validación de Ortogonalidad	40
Figura 24	Cálculo de la capacidad y reporte final	41
Figura 25	Cálculo de la capacidad para CA Intrabanda Continua con el aplicativo	43
Figura 26	Cálculo de la capacidad para CA Intrabanda Continua con Hoja de Excel	44
Figura 27	Cálculo de la capacidad para CA Intrabanda Discontinua con aplicativo	45
Figura 28	Cálculo de la capacidad para CA Intrabanda Discontinua con Hoja de Excel	45
Figura 29	Cálculo de la capacidad para CA Interbanda con aplicativo	47

Figura 30 Cálculo de la capacidad para CA Interbanda con Hoja de Excel 47

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1	Requerimientos LTE Rel-8	6
Cuadro 2	Bandas de Operación LTE FDD y TDD [14]	8
Cuadro 3	Cantidad de bits según modulación	12
Cuadro 4	Parámetros del UE, de la Base Station (BS) y márgenes para el LinkBudget [18]	17
Cuadro 5	Relación entre la modulación y la SINR [8]	19
Cuadro 6	Bandas de trabajo para CA Intrabanda Continua [14]	20
Cuadro 7	Banda de trabajo para CA Intrabanda Discontinua [14]	21
Cuadro 8	Banda de trabajo para CA Interbanda [14]	21
Cuadro 9	Relación de los Transmission bandwidth configuration $N_{RB}$ con los E-UTRA $BW_{Channel}$ [14].	22
Cuadro 10	Clases de Ancho de Banda para CA y sus correspondientes bandas de guarda nominales [14]	25
Cuadro 11	Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) CA configuraciones y sets de combinaciones de anchos de banda definidos para CA intrabanda continua [14]	26
Cuadro 12	E-UTRA Bandwidth (BW) para CA Intrabanda no continua [14]	26
Cuadro 13	E-UTRA BW para CA Interbanda [14]	27
Cuadro 14	Categoría de los terminales en LTE Advanced [7].	29
Cuadro 15	Comparación de resultados de capacidad para CA Intrabanda Continua	44
Cuadro 16	Diferencia (%) de los resultados obtenidos para el cálculo de la capacidad en CA Intrabanda Continua	44
Cuadro 17	Comparación de resultados de capacidad para CA Intrabanda Discontinua	46
Cuadro 18	Diferencia (%) de los resultados obtenidos para el cálculo de la capacidad en CA Intrabanda Discontinua	46
Cuadro 19	Comparación de resultados de capacidad para CA Interbanda	48

Cuadro 20	Diferencia (%) de los resultados obtenidos para el cálculo de la capacidad en CA Interbanda	48
-----------	---	----

## ACRÓNIMOS

---

LTE	Long Term Evolution
LTE Advanced	Long Term Evolution Advanced
IMT Advanced	International Mobile Telecommunications Advanced
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
3GPP	3rd Generation Partnership Project
LTE-4G	4th Generation LTE
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
MIMO	Multiple In, Multiple Out
DL	Down Link
UL	Up Link
BW	Bandwidth
RRC	Radio Resource Control
SNR	Signal to Noise Ratio
SINR	Signal to Interference-plus-Noise Ratio
NF	Noise Figure
IM	Implementation Margin
KTb	Thermal Noise Level
EPS	Evolved Packet System
EPC	Evolved Packet Cores
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Networks
MME	Mobile Management Entity
SGW	Serving Gateway
PDN GW	Packet Data Network Gateway

HSS	Home Subscriber Server
UE	User Equipment
BS	Base Station
eNB	evolved Node B
PDCP	Packet Data Control Protocol
FDM	Frequency Division Multiplexing
FDD	Frequency Division Dulexing
TDD	Time Division Duplexing
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frecuency Division Multiple Access
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
ARQ	Automatic Repeat Request
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
CQI	Channel Quality Indicator
$T_s$	tiempo de símbolo
RB	Resource Block
RE	Resource Element
EIRP	Potencia Efectiva Radiada Isotrópica
SRS	Sounding Reference Signal
Tx	Transmisor
Rx	Receptor
APL	Allowable Path Loss
SC-FDMA	Single Carrier FDMA
PRB	Physical Resource Block
RF	Radio Frecuencia
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel

PBCH	Physical Broadcast Channel
PMCH	Physical Multicast Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
CA	Carrier Aggregation
CC	Component Carrier
RN	Relay Node
NCS	Nominal Carrier Separation
CS	Carrier Separation

## SÍMBOLOS

---

$BW_{\text{Channel,block}}$	Sub-block bandwidth [MHz]
$BW_{\text{Channel\_CA}}$	Aggregated Channel Bandwidth
$BW_{\text{Channel}}$	Channel bandwidth
$d$	Distancia (Km)
$f$	Frecuencia (MHz)
$F_C$	Frequency of the carrier centre frequency
$F_{C,\text{block,high}}$	Frecuencia Central del highest transmitted/received carrier en un sub-block
$F_{C,\text{block,low}}$	Frecuencia Central del lowest transmitted/received carrier en un sub-block
$F_{\text{DL-high}}$	Frecuencia más alta del DL operating band
$F_{\text{DL-low}}$	Frecuencia más baja del DL operating band
$F_{\text{edge,block,high}}$	Upper sub-block edge
$F_{\text{edge,block,low}}$	Lower sub-block edge
$F_{\text{edge,high}}$	Higher edge of aggregated channel bandwidth [MHz]
$F_{\text{edge,low}}$	Lower edge of aggregated channel bandwidth [MHz]
$F_{\text{offset,block,high}}$	Separación entre el higher edge de un sub-block y el centro del highest component carrier within the sub-block
$F_{\text{offset,block,low}}$	Separación entre el lower edge de un sub-block y el centro del lowest component carrier within the sub-block

$F_{UL-high}$	Frecuencia más alta del UL operating band
$F_{UL-low}$	Frecuencia más baja del UL operating band
$h_b$	Altura de la estación base (m)
$h_r$	Altura del UE (m)
$N_{RB,high}$	Higher edge of aggregated channel bandwidth [MHz]
$N_{RB,low}$	Lower edge of aggregated channel bandwidth [MHz]
$N_{RB}$	Transmission bandwidth configuration



## ABSTRACT

---

This thesis aims to calculate the total capacity of the terminal equipment in the uplink for LTE-Advanced carrier aggregation intraband and interband according to 3GPP Release 11 and for this it is necessary to select an appropriate propagation model that allows obtaining the SNR and then determines the modulation of each carrier to be added, and finally calculate the capacity.

For the calculation of the capacity, we have designed a web application that follows the parameters of Release 11 for carrier aggregation. It specifies the existing carrier aggregation types, and also the configurations and combination. After making the channeled of each carrier, for carrier aggregation intraband continuous, the channel separation is evaluated.

Then, knowing the terminal class and using the propagation model Cost-231 Hata and reference sensitivity in the link budget for the uplink, the cells of the adaptive modulation are calculated and then the capacity of each modulation cell to each component carrier.

Finally, the total capacity is calculated in the uplink for carrier aggregation.

## RESUMEN

---

Este trabajo tiene como finalidad calcular la capacidad total del equipo terminal, en el canal de subida de LTE-Advanced para agregación de portadora intrabanda e interbanda de acuerdo con el Release 11 del 3GPP; para esto es necesario seleccionar un modelo de propagación adecuado que permita obtener la SNR para luego determinar la modulación de cada portadora a agregarse, y finalmente calcular la capacidad.

Para el cálculo de la capacidad, se ha diseñado una aplicación web que sigue los parámetros del Release 11 para la agregación de portadoras. Se especifica los tipos de agregación de portadoras existente, además de sus configuraciones y combinaciones. Luego de hacer el canalizado de cada una de las portadoras, en el caso de agregación de portadoras intrabanda continua, se evalúa la separación intercanal.

Luego, conociendo la clase del terminal y utilizando el modelo de propagación Cost-231 Hata y la sensibilidad de referencia en el link budget para el enlace se subida, se calculan los anillos de modulación adaptativa y con ello la capacidad de cada anillo de modulación, perteneciente a cada component carrier.

Finalmente se calcula la capacidad total en el enlace de subida para la agregación de portadoras.

## INTRODUCCIÓN

---

Long Term Evolution (**LTE**) es una tecnología desarrollada por el 3rd Generation Partnership Project (**3GPP**) para cumplir con las exigencias del mercado de las telecomunicaciones. En su primera versión **LTE** fue especificado por medio de los Releases 8 y 9 del **3GPP** con un ancho de banda máximo de 20 MHz. Más recientemente, la nueva versión denominada **LTE Advanced** o 4th Generation LTE (**LTE-4G**) está basada en los Releases 10, 11 y posteriores y cumple con los requerimientos de International Mobile Telecommunications Advanced (**IMT Advanced**) definidos por la International Telecommunication Union (**ITU**).

**LTE-4G** permite tasas de transmisión de 1 Gbps en fijo y unos 100 Mbps en móvil. Para alcanzar dichas tasas de transmisión se han incorporado muchas mejoras y novedades en **LTE-4G**, principalmente en uso de agregación de portadoras y sistemas Multiple In, Multiple Out (**MIMO**). De esta forma se pueden alcanzar anchos de banda agregados de hasta 100 MHz uniendo 5 segmentos de 20 MHz cada uno.

La planificación de redes **LTE** considera, entre otros, el cálculo de la capacidad del enlace de bajada o **DL** y del enlace de subida o **UL**.

Este trabajo está dirigido al cálculo de la capacidad del **UL**, por ser el enlace limitante, para **LTE-4G** considerando los diferentes modos de agregación de portadoras que se han publicado, al menos hasta el Release 11, es decir agregación intrabanda continua, agregación intrabanda no continua y agregación interbanda. Al usar agregación de portadoras el comportamiento de la onda electromagnética difiere dependiendo de las bandas que se agreguen. Esto trae como consecuencia que las capacidades de transmisión sean distintas en cada banda agregada ya que la Signal to Noise Ratio (**SNR**) será distinta en cada una de ellas. Para realizar el cálculo de la capacidad del **UL** es necesario hacer el presupuesto del enlace, que nos permita calcular las pérdidas máximas admisibles del trayecto, para una Relación Señal a Ruido o **SNR** dada en el móvil; dependiendo de la **SNR** se selecciona la modulación y por tanto la cantidad de bits por cada símbolo Single Carrier FDMA (**SC-FDMA**); luego a partir de la matriz de recursos tiempo frecuencia del **UL** se calcula la tasa de bits.

A continuación se debe escoger un modelo de propagación acorde con **LTE-4G** que permita obtener la distancia en la cual se tienen las pérdidas máximas conociendo la frecuencia. De esta forma podemos establecer bandas de distancias para cada modulación con su respectiva capacidad asociada. Este procedimiento se aplicará para cada modo de agregación de portadora.

Todos los cálculos y parámetros seleccionados se harán de acuerdo a los estándares publicados por el **3GPP** en los casos que aplique. El trabajo incluye un análisis de los diferentes modos de agregación de portadoras, para luego aplicarlos en base al procedimiento antes des-



crito. Al agregar varias portadoras debe cumplirse con ciertas limitaciones, una de ellas es que las frecuencias centrales de los segmentos a agregarse deben ser un múltiplo entero de 300 KHz de manera que se conserve la ortogonalidad entre todas las subportadoras de ambos segmentos, en el caso de agregación continua. Para ello el estándar indica el procedimiento a seguir para cumplir con dicho requerimiento.



## ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA

---

### 1.1 ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA

Dado al avance en las tecnologías móviles, y a su rápida llegada a distintos países de la región, se ha visto la necesidad de poder calcular la capacidad de los enlaces tanto de bajada como de subida en **LTE** y **LTE Advanced**. En el caso particular de **LTE Advanced**, tenemos como grandes participantes a los sistemas **MIMO** y en especial al **CA**. Para poder calcular la capacidad de **LTE Advanced** utilizando **CA**, es necesario revisar detenidamente los estándares publicados por el **3GPP**, para poder conocer la manera cómo se debe realizar la agregación de portadoras, según la canalización del espectro que ha sido concedido al operador.

Esta Tesis tiene como fin diseñar e implementar una aplicación web para el cálculo de la capacidad en **LTE Advanced** en el enlace de subida usando agregación de portadoras. Aquí el usuario podrá seleccionar el tipo de agregación que requiere realizar, podrá seleccionar las configuraciones y las combinaciones posibles permitidos por el Release 11 del **3GPP**. Así mismo podrá verificar la ortogonalidad entre las bandas participantes en el cálculo y seleccionar otros parámetros necesarios para el cálculo de la capacidad. Luego de esto, el aplicativo realizará el cálculo de la capacidad utilizando los valores para el Link Budget y los modelos de propagación sugeridos.



## MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 FUNDAMENTOS DE LTE

Long Term Evolution (LTE) del Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) se desarrolló para asegurar que la tecnología siga siendo competitiva en el futuro previsible [5]. Los requisitos del sistema de LTE Rel-8, ver Cuadro 1, incluyen la mejora de la capacidad y la cobertura del sistema, la mejora de la experiencia del usuario a través de tasas de datos más altas y latencia reducida, la disminución de los costos de despliegue y costos operativos, y la integración de forma perfecta con los sistemas existentes [5].

Tras considerarse y discutirse múltiples propuestas sobre la capa física, protocolos radio, arquitectura de red, aspectos de Radio Frecuencia (RF), consideraciones de complejidad, etc., algunas de las características principales incorporadas fueron [19]:

- Esquema de acceso de radio Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) en el downlink y SC-FDMA en el uplink [19].
- Soporte de packet scheduling en el dominio del tiempo y de frecuencia [19].
- Simplificaciones en la MAC y en el modelo de estados Radio Resource Control (RRC), así como reducción del número de canales de transporte (no hay canales dedicados) [19].
- Funcionalidades de packet scheduling, Automatic Repeat Request (ARQ) e Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) terminadas en evolved Node B (eNB) [19].
- Simplificación de la arquitectura Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Networks (E-UTRAN) y descentralización de la misma [19].

#### 2.1.1 Arquitectura LTE

La arquitectura del sistema de LTE se basa en Internet Protocol (IP) y por lo tanto está diseñado para soportar de manera eficiente la transmisión basada en paquetes. Una ilustración simplificada de la arquitectura del sistema de LTE [5], denominado formalmente en las especificaciones como Evolved Packet System (EPS)[19], se muestra en la Figura 1.

Los componentes fundamentales del sistema LTE son, por un lado, el E-UTRAN y el Evolved Packet Cores (EPC) de la red troncal [19].

Cuadro 1: Requerimientos LTE Rel-8 [5].

Característica	Requerimiento
Velocidad de datos máxima	DL - 100 Mbps a 20 MHz UL - 50 Mbps a 20 MHz
Eficiencia espectral de la celda	DL - 3-4 veces Rel-6 HSDPA UL - 2-3 veces Rel-6 HSUPA
Eficiencia espectral de usuarios en el borde de la celda	DL - 2-3 veces Rel-6 HSDPA UL - 2-3 veces Rel-6 HSUPA
Eficiencia espectral promedio de usuarios	DL - 3-4 veces Rel-6 HSDPA UL - 2-3 veces Rel-6 HSUPA
Latencia en el Plano de Control	50 ms de dormido a activo
Capacidad en el Plano de Control	400 usuarios
Latencia en el Plano del Usuario	5 ms
Movilidad	Hasta 350 Km/h
Rango máximo de la celda	100 Km
Espectro soportado	Flexible (hasta 20 MHz)

El **E-UTRAN** es responsable de la gestión de acceso de radio y proporciona soporte a los planos de usuarios y al plano de control de los **UE** [5].

#### 2.1.1.1 **E-UTRAN**

El **E-UTRAN** consta del **eNB**, que es la estación base de **LTE** y responsable de proporcionar el plano de usuario **E-UTRA** y el plano de control [4].

##### 1. Evolved NodeB (eNB)

El **eNB** es la única entidad en el **E-UTRAN** que interactúa con el **UE** a través de la interfaz de aire. Los **eNBs** funcionan como una estación base y además alojan a las capas Física, MAC, de Control de Radio Enlace y de Packet Data Control Protocol (**PDCP**). El **eNB** puede soportar el modo Frequency Division Duplexing (**FDD**), el modo Time Division Duplexing (**TDD**), o la operación de modo dual. Los **eNBs** están conectados el uno al otro a través de la interface  $X_2$  como una malla completa (ver **Figura 2**).

#### 2.1.1.2 **El EPC**

El **EPC** contiene las siguientes entidades: Home Subscriber Server (**HSS**), Mobile Management Entity (**MME**), Serving Gateway (**SGW**) y Packet Data Network Gateway (**PDN GW**) [4]. Se puede apreciar en la **Figura 1**, todas estas entidades dentro de la región anaranjada.

##### 1. Home Subscriber Server - **HSS**

Básicamente, el **HSS** es una base de datos que contiene la información relacionada al usuario y al abonado. También propor-

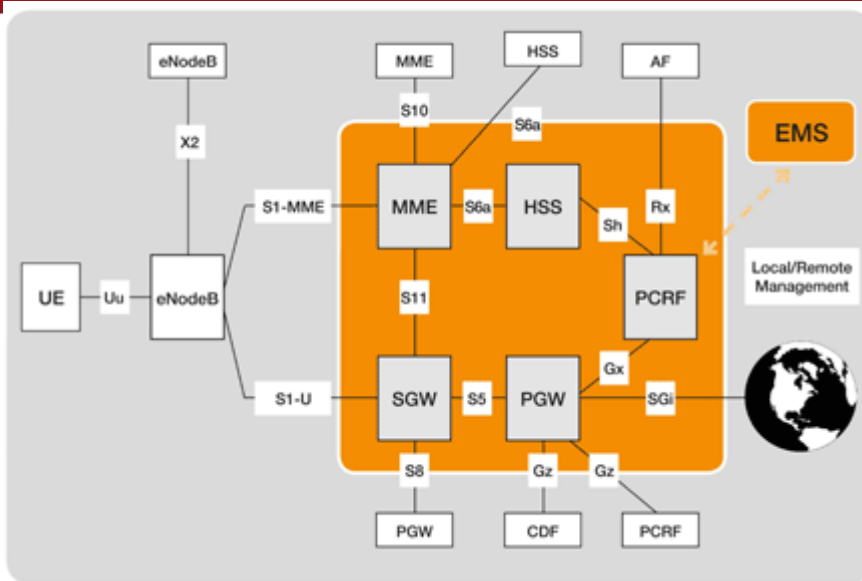


Figura 1: Arquitectura LTE [2].

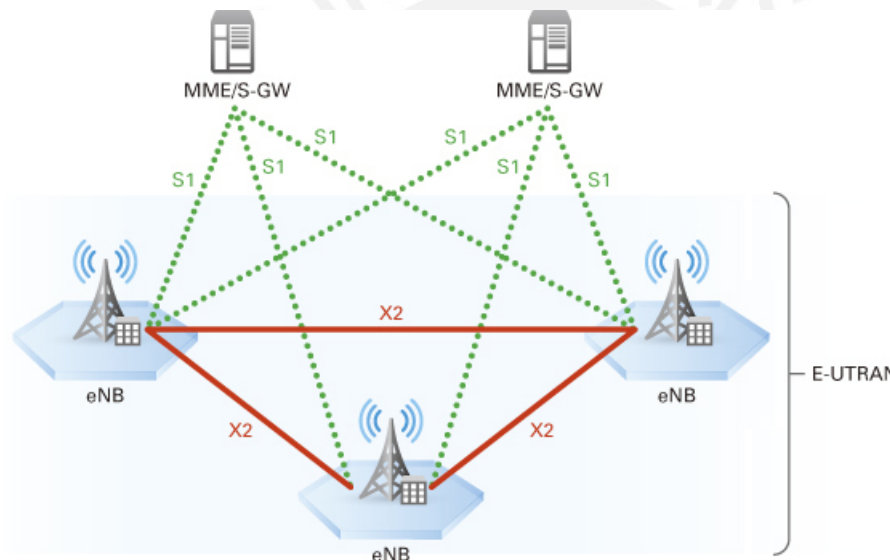


Figura 2: Arquitectura E-UTRAN [6]

ciona funciones de apoyo en la gestión de la movilidad, establecimiento de la sesión y la llamada, autenticación del usuario y autorización del acceso [1].

2. Mobile Management Entity - **MME**  
El **MME** gestiona la movilidad, las identidades del **UE** y los parámetros de seguridad [4].
3. Serving Gateway - **SGW**  
El **SGW** es el nodo que termina la interfaz hacia la **E-UTRAN**. Para cada **UE** asociado con la **EPS**, en un punto de tiempo dado, hay una sola **SGW** [4].
4. Packet Data Network Gateway - **PDN GW**  
El **PDN GW** es el nodo que termina la interfaz **SGi** hacia la **PDN**. Proporciona conectividad a las redes de paquetes de datos exter-

Cuadro 2: Bandas de Operación LTE FDD y TDD [14]

E-UTRA Band	Uplink Operating Bands $F_{UL_{low}} - F_{UL_{high}}$	Downlink Operating Bands $F_{DL_{low}} - F_{DL_{high}}$	Duplex Mode
1	1920 MHz - 1980 MHz	2110 MHz - 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz - 1910 MHz	1930 MHz - 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz - 1785 MHz	1805 MHz - 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz - 1755 MHz	2110 MHz - 2155 MHz	FDD
5	824 MHz - 849 MHz	869 MHz - 894 MHz	FDD
6	830 MHz - 840 MHz	875 MHz - 885 MHz	FDD
7	2500 MHz - 2570 MHz	2620 MHz - 2690 MHz	FDD
8	880 MHz - 915 MHz	925 MHz - 960 MHz	FDD
9	1749,9 MHz - 1784,9 MHz	1844,9 MHz - 1879,9 MHz	FDD
10	1710 MHz - 1770 MHz	2110 MHz - 2170 MHz	FDD
11	1427,9 MHz - 1447,9 MHz	1475,9 MHz - 1495,9 MHz	FDD
12	699 MHz - 716 MHz	729 MHz - 746 MHz	FDD
13	777 MHz - 787 MHz	746 MHz - 756 MHz	FDD
14	788 MHz - 798 MHz	758 MHz - 768 MHz	FDD
17	704 MHz - 716 MHz	734 MHz - 746 MHz	FDD
33	1900 MHz - 1920 MHz	1900 MHz - 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz - 2025 MHz	2010 MHz - 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz - 1910 MHz	1850 MHz - 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz - 1990 MHz	1930 MHz - 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz - 1930 MHz	1910 MHz - 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz - 2620 MHz	2570 MHz - 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz - 1920 MHz	1880 MHz - 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz - 2400 MHz	2300 MHz - 2400 MHz	TDD
41	2496 MHz - 2690 MHz	2496 MHz - 2690 MHz	TDD
42	3400 MHz - 3600 MHz	3400 MHz - 3600 MHz	TDD
43	3600 MHz - 3800 MHz	3600 MHz - 3800 MHz	TDD
44	703 MHz - 803 MHz	703 MHz - 803 MHz	TDD

nas y funciona como el punto principal de la movilidad. El UE puede conectarse a múltiples PDN GWs, los cuales son los encargados de la asignación de direcciones IP de los UEs. El PDN GW es un ancla para la movilidad entre las tecnologías 3GPP y no 3GPP como WiMAX, 3GPP2 (CDMA 1X y EV-DO), y WLAN a través de diversos conjuntos de interfaces [4].

### 2.1.2 Bandas de frecuencia para LTE

Las bandas de operación de LTE son muy flexibles (ver Cuadro 2). Para el caso de TDD todas las bandas están ubicadas a partir de 1850 MHz hasta 2570 MHz. Para FDD existen varias bandas, incluyendo la banda de 700 y 800 MHz, así como la banda de 2 GHz.

### 2.1.3 Acceso de radio

Las tecnologías de nivel físico empleadas en LTE, y que constituyen una de las principales diferencias en relación a los sistemas predecesores de comunicaciones móviles, son las basadas OFDM [19].

La técnica OFDM es similar a Frequency Division Multiplexing (FDM). La diferencia se basa en que mientras FDM debe dejar una banda de guarda entre canales, OFDM por su parte trata de acercar los canales lo más posible hasta superponerlos [16][9]. Esto se logra escogiendo frecuencias que sean ortogonales, lo cual significa que estas son perpendiculares en el sentido matemático; permitiendo así que sus espectros se superpongan sin interferir [16][9]. Esto significa que OFDM permite conseguir mayores niveles de capacidad y eficiencia en el uso de los recursos radio [19] (ver Figura 3).

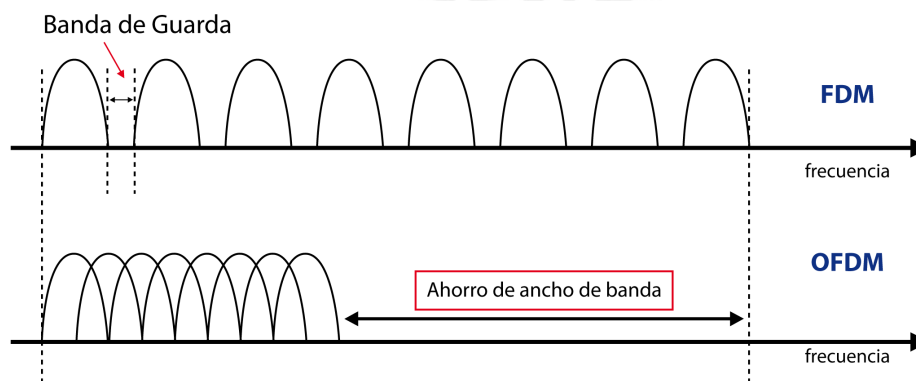


Figura 3: Comparación FDM y OFDM

La técnica de transmisión OFDM constituye además un mecanismo de transmisión multi-portadora consistente en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de subportadoras [19], las cuales son elegidas de tal manera que ninguno de sus espectros interfiera con la frecuencia central de las otras subportadoras [16][9]. Gracias a las propiedades de ortogonalidad de dichas subportadoras, es posible efectuar la transmisión simultánea de todos los símbolos manteniendo la capacidad de separación de los mismos en recepción [19].

La Figura 4 muestra un ejemplo con el módulo de los espectros correspondientes a un conjunto de 6 subportadoras OFDM. Obsérvese en la figura que para cada frecuencia múltiplo de  $1/T_s$  únicamente existe contribución espectral de una de las subportadoras, mientras que el resto presentan nulos [19].

OFDM presenta dos desventajas claras. En primer lugar, el hecho de tener un Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) elevado, lo cual genera limitaciones para los dispositivos electrónicos de los sistemas, en particular a los amplificadores. Y en segundo lugar, el hecho de ser muy sensible a cambios en la frecuencia de las subportadoras. Sin embargo, presenta grandes ventajas como el reducir la Interferencia Intersimbólica, el presentar robustez ante los multitrayectos, contar con una alta eficiencia espectral y el hecho de que su implementación sea sencilla [16][9].



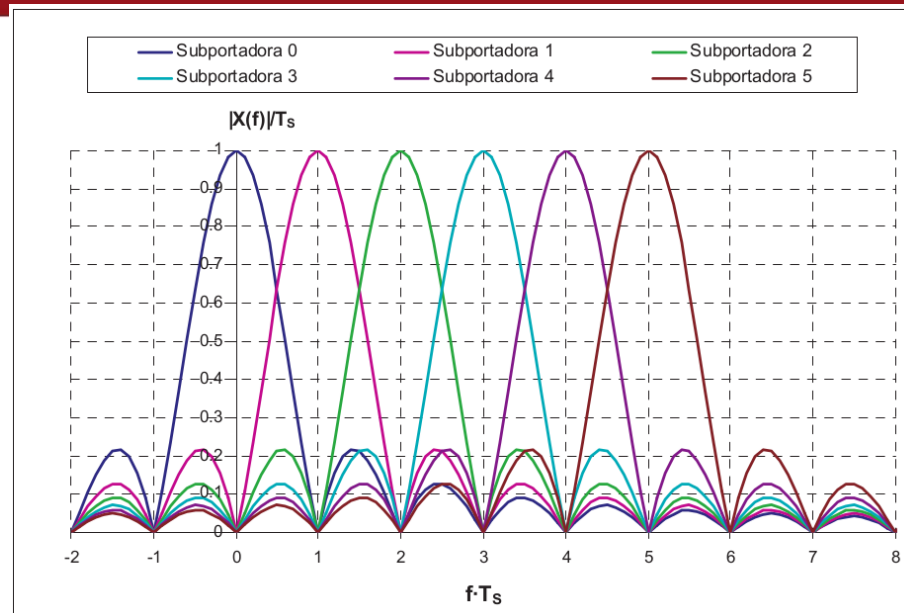


Figura 4: Ejemplo del espectro correspondiente a 6 subportadoras OFDM [19]

LTE utiliza OFDMA en el DL, pero SC-FDMA en el UL. El SC-FDMA es técnicamente similar a OFDMA, pero es más adecuado para dispositivos móviles, ya que demanda menos energía de la batería [4].

#### 2.1.3.1 OFDMA

OFDMA es una técnica de acceso múltiple para aplicaciones móviles y por supuesto está basada en OFDM [9]. OFDMA es esencialmente igual a OFDM, la diferencia está en el método cómo se asignan los recursos a los diferentes usuarios [9].

Como su nombre lo indica, el acceso múltiple se refiere a que en un mismo tiempo de símbolo ( $T_s$ ) se asignan recursos a diversos usuarios [9]. OFDMA brinda una mayor flexibilidad al poder compartir los recursos entre diferentes usuarios de manera dinámica [9]. Dado que los requerimientos de los usuarios, en principio, son diferentes los recursos asignados a cada uno varía en cantidad, en modulación y en tasa de codificación [9]. Es decir, OFDMA no sólo permite compartir recursos sino adaptarse a las condiciones particulares de los usuarios en un tiempo de símbolo [9].

#### 2.1.3.2 SC-FDMA

Como se mencionó en líneas anteriores, SC-FDMA es una variante de OFDMA. Es por ello que tiene las mismas características de esta: presenta robustez ante los multirrayectos, tiene una alta eficiencia espectral, reduce la interferencia intersimbólica y su implementación es sencilla [16][9].

Además, muestra otras ventajas que OFDMA no nos daba. Con SC-FDMA el PAPR será reducido al igual que el consumo de potencia. Sin embargo en SC-FDMA tendremos un receptor muy complejo, pero esto se soluciona utilizando SC-FDMA para el UL, con lo cual tendremos que

el receptor en la unidad móvil debe ser sencillo y económico mientras que la complejidad del receptor se dejan en el eNB, el cual tiene más recursos [16][9].

En resumen en OFDMA se comparte el ancho de banda, cada símbolo de datos (dependiendo de la modulación) se usa para modular una de las subportadoras, las cuales son ortogonales entre sí. De aquí es de donde nace la característica multiportadora de OFDMA. Además los “M” símbolos que se transmiten lo harán en paralelo y repartiéndose en todo el ancho de banda disponible. Esto implica que se superpongan varios símbolos de datos en forma simultánea, es decir varias sinusoides con amplitudes y fases distintas, las cuales en determinado instante pueden estar algunas de ellas en fase y producir un PAPR elevado [16][9].

Por el contrario, en SC-FDMA se emplea una combinación lineal, donde varios símbolos de datos se usan para modular varias subportadoras ortogonales; es decir que cada símbolo de los “M” que se transmitan lo harán ocupando todo el ancho de banda disponible y con una duración igual a una parte del tiempo del símbolo SC-FDMA. Esto quiere decir, que en el ancho de banda que se dispone, solo se envía información de varios símbolos de datos dependiendo de la modulación que se elija [16][9].

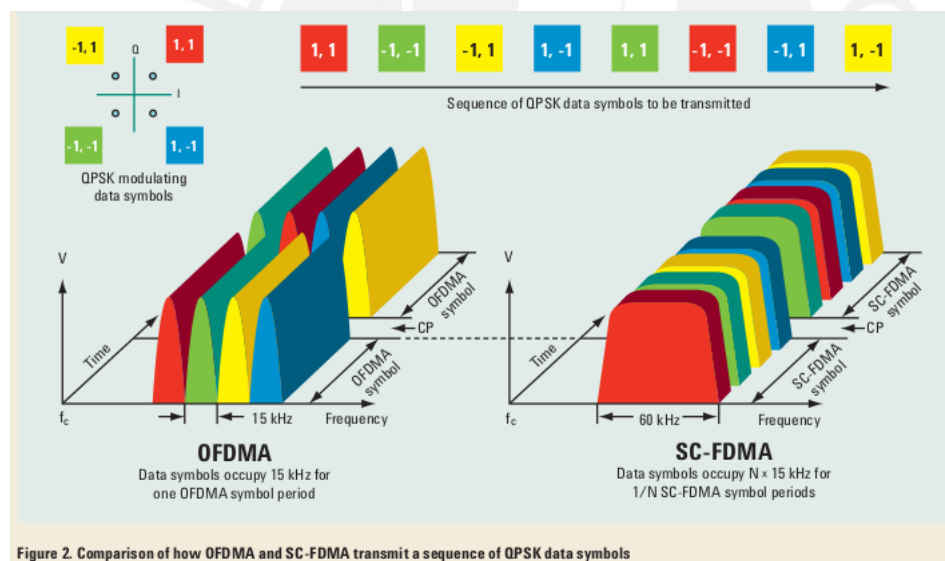


Figura 5: Representación Gráfica OFDMA y SC-FDMA. Fuente: 3GPP LTE

#### 2.1.4 Modulación Adaptativa

Una de las características de OFDMA es que no impone a priori ninguna condición sobre los símbolos que se modulan sobre las diferentes subportadoras y en consecuencia pueden pertenecer a modulaciones que incluyan más o menos bits de información por símbolo según el orden de la modulación empleada, reflejado en el número de símbolos de su constelación [19]. La Figura 6 ilustra a modo de ejemplo las constelaciones para las modulaciones Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) y 16-QAM (donde es Quadrature Amplitude Modula-

tion (QAM) y donde 16 es el número de símbolos de la constelación asociada a esta modulación) [19]. Como puede apreciarse, la constelación define por un lado las amplitudes de la componente en fase (I) y cuadratura (Q) asociadas a cada símbolo o punto, y por otro lado la correspondencia entre símbolos y grupos de bits [19].

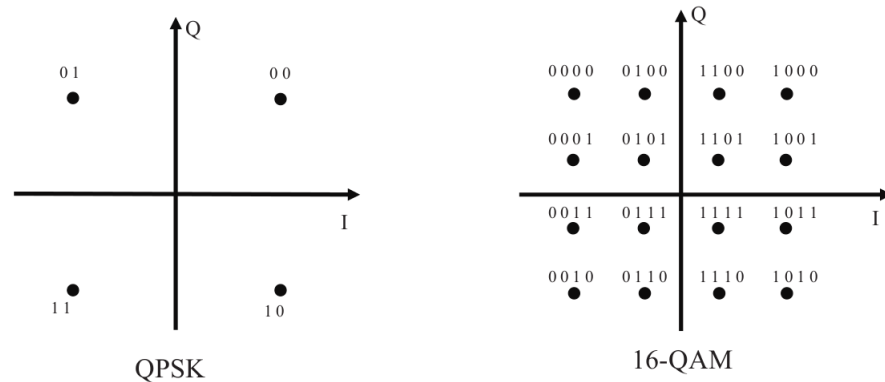


Figura 6: Ilustración de las constelaciones para las modulaciones QPSK y 16-QAM [19]

Puede verse como, en el caso de utilizarse una modulación QPSK, cada uno de los símbolos corresponde a 2 bits de información, mientras que en el caso de emplearse una modulación 16-QAM cada símbolo corresponde a 4 bits. Igualmente, en el caso genérico de una modulación m-QAM con m símbolos, correspondería a  $\text{Log}_2(m)$  bits [19], ver Cuadro 3.

Cuadro 3: Cantidad de bits según modulación

Modulación	Nº Símbolos m	Nº bits $\text{Log}_2(m)$
QPSK	4	2
16QAM	16	4
64QAM	64	6

Desde esta perspectiva, con objeto de incrementar la velocidad de transmisión resultaría conveniente incrementar número de bits por símbolo de la modulación empleada a base de utilizar constelaciones con más símbolos. Sin embargo, ante unas condiciones de SNR en el canal dadas, el empleo de modulaciones de orden elevado ocasiona un peor comportamiento en términos de probabilidad de error de bit, ya que al existir más símbolos en la constelación y encontrarse éstos más próximos, es más fácil que debido al ruido se detecte erróneamente un símbolo en lugar de otro [19]. Por este motivo, para poder emplear satisfactoriamente modulaciones con un número elevado de símbolos, es preciso disponer de buenas condiciones de relación señal a ruido [19]. Por lo general, dada una modulación, ésta podrá emplearse apropiadamente con una tasa de error acotada, en tanto que la relación señal a ruido existente en el canal esté por encima de un cierto umbral mínimo, que será mayor cuanto mayor sea el orden de la modulación [19].

De acuerdo con lo anterior, una estrategia que habitualmente se emplea en el contexto de OFDMA es la denominada adaptación de enlace, que intenta extraer el máximo rendimiento del canal (en términos de velocidad de transmisión) mediante la selección de la modulación que permita enviar el mayor número de bits por símbolo ante unas condiciones de SNR dadas [19]. De esta forma, aquellas subportadoras que presenten una relación señal a ruido mejor tenderán a utilizar modulaciones de mayor orden que las que presenten una relación señal a ruido menor [19].

#### 2.1.5 Estructura de los canales en el DL

Un canal físico de enlace de bajada, corresponde a un conjunto de elementos de los recursos que llevan información procedente de las capas superiores. Se definen los siguientes canales físicos de enlace de bajada [14]:

- Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)
- Physical Broadcast Channel (PBCH)
- Physical Multicast Channel (PMCH)
- Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)
- Physical Downlink Control Channel (PDCCH)
- Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)

#### 2.1.6 Estructura de los canales en el UL

La capa física del UL proporciona tres funciones básicas [5]:

- Transporte de datos desde el UE al eNB.
- Realimentación de la información del canal de estado y de control.
- Acceso aleatorio

El canal físico en el enlace de subida, corresponde a un conjunto de elementos de los recursos que llevan información procedente de las capas superiores. Se definen los siguientes canales físicos de enlace de subida [14]:

- Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)
- Physical Uplink Control Channel (PUCCH)
- Physical Random Access Channel (PRACH)

#### 2.1.6.1 PUSCH

La señal de banda base que representa el canal compartido físico de subida se define en términos de los siguientes pasos [14]:

- Agrupación de los bits.
- Modulación de los bits agrupados para generar símbolos de valor complejo.
- Transformar precodificación para generar símbolos de valor complejo.
- Mapas de símbolos de valores complejos de los elementos de recursos.
- Generación de valor complejo en el dominio del tiempo de la señal SC-FDMA para cada puerto de la antena.

#### 2.1.6.2 PUCCH

El PUCCH, lleva información de control del Uplink. El PUCCH nunca se transmite simultáneamente con el PUSCH desde el mismo UE [14]. En particular puede transmitir las siguientes informaciones de control:

- Peticiones de asignación de recursos (Scheduling Request) [19].
- Reconocimientos (ACK/NACK) para el mecanismo de HARQ de paquetes en el enlace descendente [19].
- Información del Channel Quality Indicator (CQI) necesaria para optimizar los procedimientos de asignación de recursos de radio en el DL [19].

#### 2.1.6.3 PRACH

En el DL, OFDM es la técnica de acceso múltiple para sistemas E-UTRA en FDD y TDD. En OFDM, un símbolo de datos se transmite por una frecuencia subportadora (llamado un elemento de recurso en LTE). Este explota la selectividad de frecuencia del canal de trayectorias múltiples desde los diferentes símbolos de los paquetes de datos que se transmiten en diferentes emplazamientos de frecuencias. Además, debido a que sólo un símbolo de datos se transmite por cada elemento de recurso, se pueden utilizar receptores de baja complejidad. Esto permite el funcionamiento de frecuencia selectiva, además de la programación de frecuencia diversa y la reutilización de una célula del ancho de banda disponible. Además, debido a su naturaleza de dominio de frecuencia, OFDM permite la operación de ancho de banda flexible con baja complejidad [5].

2.1.7 Estructura de la trama y matriz de recursos en el UL

Una ilustración gráfica de la estructura de trama en el UL se muestra en la Figura 7 [5]. La estructura de subtrama del UL es el mismo que para el DL y es de 1 ms de longitud y dividido en dos ranuras de 0.5 ms [5]. Cada ranura está compuesto de siete símbolos SC-FDMA, en el caso de un prefijo cíclico normal, o seis símbolos, en el caso de un prefijo cíclico prolongado [5]. La transmisión de datos se produce en los Resource Block (RB) del interior de la banda, con el fin de reducir las emisiones fuera de banda [5]. Los diferentes usuarios se asignan diferentes bloques de recursos, asegurando la ortogonalidad entre los usuarios en la misma celda [5].

RBs de control se colocan entonces en el borde de la banda portadora, con entre ranuras de salto para proporcionar diversidad de frecuencia [5]. Las señales de referencia necesarias para la demodulación de datos se intercalan a través de los canales de datos y de control [5]. El Sounding Reference Signal (SRS) puede ser programado por la estación base para transmitir en el último símbolo de una subtrama [5].

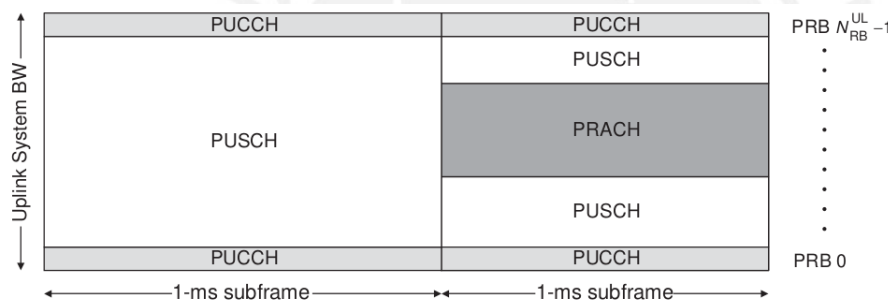


Figura 7: Estructura de las Tramas en el UL [5].

Un Bloque de Recursos consiste de  $N_{symb}^{UL} \times N_{SC}^{RB}$  resource elements, donde  $N_{SC}^{RB}=12$  es el número de resource elements (o subcarriers) por símbolo SC-FDMA y  $N_{symb}^{UL}=7$  para un prefijo cíclico normal o  $N_{symb}^{UL}=6$  para un prefijo cíclico extendido [5]. Los RBs son numerados:  $0, \dots, N_{UL}^{RB}-1$  y mapeados en el rango de frecuencias como se muestra en la Figura 7 [5].

2.1.7.1 Canal de datos

La transmisión de datos ocurre en el PUSCH [5]. Los recursos de los usuarios son asignados dentro de la PUSCH por el eNB a través de una asignación del scheduling [5]. Cada RB virtual se asigna a dos RBs físicos [5]. El tamaño de cada RB físico es de 12 Resource Element (RE)s por 7 símbolos SC-FDMA para un prefijo cíclico normal [5]. Sin embargo, un símbolo por slot se utiliza para la señal de referencia [5]. Por lo tanto, cada RB puede acomodar 144 símbolos de datos [5]. Para un prefijo cíclico extendido, el tamaño de cada RB físico es 12 REs por 6 símbolos SC-FDMA, resultando en 120 símbolos de datos disponibles [5].

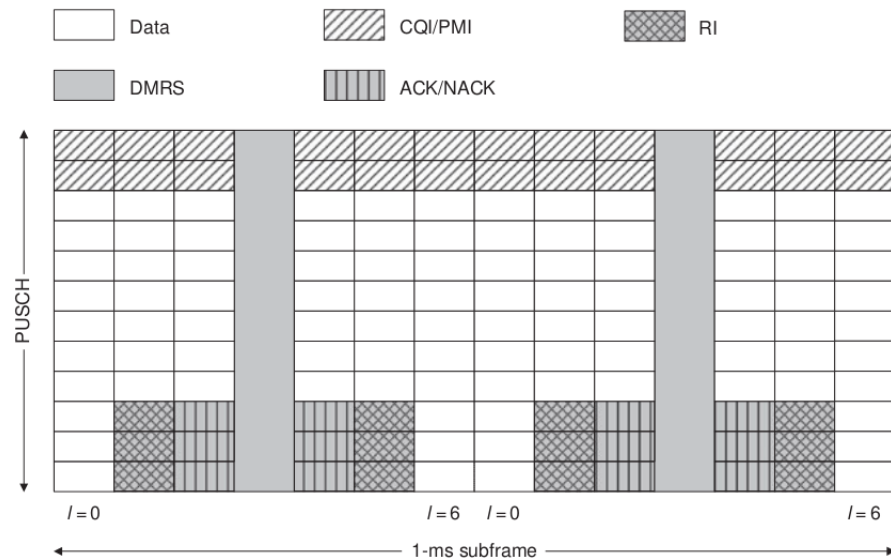


Figura 8: Matriz de recursos en el PUSCH del UL [5].

### 2.1.8 Cálculo de la capacidad pico

La Capacidad es la cantidad de bits transmitidos, divididos entre el tiempo de transmisión [11]. En el caso del UL la cantidad de bits que se transmiten durante 14 símbolos SC-FDMA, dividido entre el tiempo de transmisión.

$$\text{Capacidad} = \left[ \frac{(N_{RE_s})(N_{RB_s})(N_{bit_{simbol}})}{1ms} \right] \quad (2.1.8.1)$$

donde:

- $N_{RE_s}$ : Número de Resources Elements.
- $N_{RB_s}$ : Número de Resources Blocks.
- $N_{bit_{simbol}}$ : Número de bits por símbolo.

Las señales de referencia en el UL toma 1 de 7 símbolos que resulta en un overhead del  $1/7 = 14,3\%$  [17].

### 2.1.9 Sistemas MIMO

LTE utiliza las técnicas MIMO para enviar datos a través de trayectorias de señal separadas que ocupan el mismo ancho de banda de RF, al mismo tiempo, lo que lleva a un aumento significativo en las velocidades de datos alcanzables y en el rendimiento. Los sistemas de antenas MIMO son un ingrediente mágico en la búsqueda de sistemas inalámbricos de banda ancha con mayor capacidad, rendimiento y fiabilidad [4].

Ley de Shannon se aplica a un sólo enlace de radio entre un transmisor y un receptor. Pero las técnicas MIMO crean múltiples enlaces de radio; cada enlace individual está limitada por la ley de Shannon, pero, en conjunto, pueden superarlo [4].

### 2.1.10 Link Budget en LTE

Link Budget es el cálculo fundamental para la planeación de cualquier enlace RF entre un transmisor y un Receptor (Rx). El cálculo de link budget debe realizarse en ambas direcciones, es decir, en enlace ascendente y descendente [20].

El resultado de los cálculos del link budget, es la máxima pérdida por trayectoria admisible (Allowable Path Loss (APL)) desde la estación base hacia el móvil en el enlace descendente y la máxima pérdida de enlace admisible en el enlace ascendente [20]. Se deben de incluir todas las atenuaciones y ganancias de la trayectoria desde el Transmisor (Tx) hasta el Rx, la atenuación debida a la distancia, las pérdidas añadidas por el ambiente, la atenuación del cable y las ganancias de las antenas. Se debe incluir también un margen de seguridad para proporcionar una probabilidad de señal deseada, acorde con los márgenes de desvanecimiento [20].

Algunos de los parámetros utilizados en el Link Budget se pueden verificar en el Cuadro 4

Cuadro 4: Parámetros del UE, de la BS y márgenes para el LinkBudget [18]

Potencia Efectiva Radiada Isotrópica (EIRP) del UE	Unidades	Valor
Potencia de transmisión PTX	dBm	23.0
Ganancia de la Antena	dBi	7.0
UE EIRP	dBm	30.0
Características de la BS	Unidades	Valor
Ganancia de la Antena	dBi	17.0
Ganancia Diversidad de Antenas	dB	3.0
Figura de Ruido de la BS	dB	4.0
Parámetros	Unidades	Valor
Margen de Fading Log Normal	dB	6,5
Fast Fading Margin	dB	4,50
Interference Margin	dB	2,00
Pérdidas debido a Penetración	dB	10,00

#### 2.1.10.1 El Modelo de propagación

Los modelos de propagación se utilizan ampliamente en la planificación de redes, en particular para la realización de estudios de viabilidad y durante el despliegue inicial[3]. También son muy útiles para realizar estudios de interferencia a medida que avanza la implementación [3]. Estos modelos pueden ser modelos empíricos y se basan en observaciones y mediciones[3]. Estos modelos se utilizan principalmente para predecir la pérdida de trayectoria, pero también se han propuesto modelos que predicen el devanecimiento por lluvia y multitrajecto [3]. En esta Tesis utilizaremos el modelo de propagación COST-231 Hata.



### MODELO DE PROPAGACIÓN COST-231 HATA

Un modelo que se utiliza ampliamente para la predicción de la pérdida de trayectoria en los sistemas inalámbricos móviles, es el modelo COST-231 Hata [3]. Fue concebido como una extensión del modelo de Hata-Okumura [3]. El modelo de COST-231 Hata está diseñado para ser utilizado en la banda de frecuencias de 500 MHz a 2000 MHz [3]. Gracias a su simplicidad y la disponibilidad de factores de corrección para los entornos urbanos, suburbanos y rurales se ha visto ampliamente utilizado para la predicción de las pérdidas en la trayectoria en esta banda de frecuencias [3]. La ecuación básica para la pérdida de trayecto en dB es:

$$PL = 46,3 + 33,9\text{Log}_{10}(f) - 13,82\text{Log}_{10}(h_b) - ah_m + (44,9 - 6,55\text{Log}_{10}(h_b))\text{Log}_{10}d + c_m \quad (2.1.10.1)$$

donde  $f$  es la frecuencia en MHz,  $d$  es la distancia entre el UE y la estación base en Km, y  $h_b$  es la altura de la estación base sobre el nivel del terreno en metros [3]. El parámetro  $c_m$  se define como 0 dB para ambientes suburbanos o abiertos y 3 dB para los entornos urbanos [3]. El parámetro  $ah_m$  está definido para los entornos urbanos <sup>1</sup> como:

$$ah_m = 3,20(\text{log}_{10}(11,75h_r))^2 - 4,97 \quad (2.1.10.2)$$

y para entornos suburbanos o rurales [3],

$$ah_m = (1,1\text{log}_{10}f - 0,7)h_r - (1,56\text{log}_{10}f - 0,8) \quad (2.1.10.3)$$

donde,  $h_r$  es la altura de la antena del UE con respecto al nivel del terreno en metros [3].

#### 2.1.10.2 Sensibilidad de referencia

El nivel de sensibilidad de referencia es la mínima intensidad de señal aplicada a los puertos de una antena en el que hay suficiente Signal to Interference-plus-Noise Ratio (SINR) para el esquema de modulación especificado, y así satisfacer un esquema en donde se debe cumplir con el requisito mínimo del 95 % del rendimiento de lo máximo posible [17]. La sensibilidad de referencia está definida como [17]:

<sup>1</sup> para  $f > 400$  MHz

$$S = KTB + NF + SINR + IM - 3(\text{dBm}) \quad (2.1.10.4)$$

donde Thermal Noise Level ( $KTB$ )<sup>2</sup>, Noise Figure ( $NF$ ) del receptor,  $SINR$  y el Implementation Margin ( $IM$ ) deben estar medidos en dBm [17]. -3 dB representa la ganancia por diversidad [17].

El Cuadro 5 muestra los valores de  $SINR$  e  $IM$  para el esquema de modulación y codificación elegido.

Cuadro 5: Relación entre la modulación y la SINR [8]

Modulation	Code Rate	SINR	IM	SINR+IM
QPSK	1/8	-5,1	2,5	-2,6
QPSK	1/5	-2,9	2,5	-0,4
QPSK	1/4	-1,7	2,5	0,8
QPSK	1/3	-1	2,5	1,5
QPSK	1/2	2	2,5	4,5
QPSK	2/3	4,3	2,5	6,8
QPSK	3/4	5,5	2,5	8
QPSK	4/5	6,2	2,5	8,7
16QAM	1/2	7,9	3	10,9
16QAM	2/3	11,3	3	14,3
16QAM	3/4	12,2	3	15,2
16QAM	4/5	12,8	3	15,8
64QAM	2/3	15,3	4	19,3
64QAM	3/4	17,5	4	21,5
64QAM	4/5	18,6	4	22,6

## 2.2 FUNDAMENTOS DE LTE ADVANCED

La fuerza motriz para desarrollar aún más LTE hacia LTE Advanced, es proporcionar mayores tasas de bits de una manera eficiente, y al mismo tiempo cumplir plenamente los requisitos establecidos por la ITU para la IMT Advanced, también conocida como 4G [15].

LTE Advanced para entregar una mayor capacidad de tasa bits, busca lo siguiente [15]:

- Aumento de la velocidad máxima de datos, DL 3 Gbps, UL 1.5 Gbps [15].
- Una mayor eficiencia espectral, de un máximo de 16 bps/Hz en el Release 8 a 30 bps/Hz en Release 10 - aumento del número de abonados activos en simultáneo [15].
- Mejora del rendimiento en los bordes de la celda, por ejemplo para DL MIMO 2x2, al menos, 2,40 bps/Hz/celda [15].

Las principales nuevas funcionalidades introducidas en LTE-Advanced son Carrier Aggregation CA, el aumento de la utilización de técnicas de múltiples antenas y el apoyo a los nodos de retransmisión Relay Node (RN) [15].

<sup>2</sup> para convertir la potencia en Watts a dBm usar:  $P_{(\text{dBm})} = 10\log_{10}(1000P_{(W)})$

### 2.2.1 Agregación de portadoras (Carrier Aggregation)

En CA múltiples portadoras LTE, tanto en el UL como en el DL en bandas de frecuencias contiguas o no contiguas pueden ser agrupadas (figura)[13]. Cada componente del bloque de portadoras será compatible con los UEs de los releases 8,9 que proporcionan señales para la sincronización y transmisión de la información del sistema, a través del canal de broadcast [13].

A partir del Release 11, se soporta la agregación interbanda, lo que significa que cada Component Carrier (CC) pertenece a una banda distinta. Esto es muy beneficioso para los operadores que tienen frecuencias de LTE en distintas bandas [13]. El scheduler en un escenario, como se ilustra en la Figura 9, puede hacer uso de diferentes condiciones para la cobertura y diferentes condiciones para la propagación. F1 con una frecuencia inferior puede proporcionar la cobertura y la movilidad, mientras que F2 con la alta frecuencia puede proporcionar un alto rendimiento en un área de cobertura limitada [13].



Figura 9: cobertura de Portadoras pertenecientes a Bandas de diferente frecuencia [13].

#### 2.2.1.1 Bandas de Trabajo para CA

La E-UTRA CA está diseñado para funcionar en las bandas de trabajo definidas en el Cuadro 6, Cuadro 7 y Cuadro 8 [14].

Cuadro 6: Bandas de trabajo para CA Intrabanda Continua [14]

EUTRA CA Band	EUTRA Band	Banda de trabajo en UL	Banda de trabajo en DL	Duplex Mode
		BS recibe/UE transmite	BS transmite/UE recibe	
		$F_{UL-low} - F_{UL-high}$	$F_{DL-low} - F_{DL-high}$	
CA_1	1	1920 - 1980	2110 - 2170	FDD
CA_7	7	2500 - 2570	2620 - 2690	FDD
CA_38	38	2570 - 2620	2570 - 2620	TDD
CA_40	40	2300 - 2400	2300 - 2400	TDD
CA_41	41	2496 - 2690	2496 - 2690	TDD

Cuadro 7: Banda de trabajo para CA Intrabanda Discontinua [14]

EUTRA CA Band	EUTRA Band	Banda de trabajo en UL	Banda de trabajo en DL	Duplex
		BS recibe/UE transmite	BS transmite/UE recibe	Mode
		$F_{UL-low} - F_{UL-high}$	$F_{DL-low} - F_{DL-high}$	
CA_25-25	25	1850 - 1915	1930 - 1995	FDD

Cuadro 8: Banda de trabajo para CA Interbanda [14]

EUTRA CA Band	EUTRA Band	Banda de trabajo en UL	Banda de trabajo en DL	Duplex
		BS recibe/UE transmite	BS transmite/UE recibe	Mode
		$F_{UL-low} - F_{UL-high}$	$F_{DL-low} - F_{DL-high}$	
CA_1-5	1	1920 - 1980	2110 - 2170	FDD
	5	824 - 849	869 - 894	
CA_1-18	1	1920 - 1980	2110 - 2170	FDD
	18	815 - 830	860 - 875	
CA_1-19	1	1920 - 1980	2110 - 2170	FDD
	19	830 - 845	875 - 890	
CA_1-21	1	1920 - 1980	2110 - 2170	FDD
	21	1447,9 - 1462,9	1495,9 - 1510,9	
CA_2-17	2	1850 - 1910	1930 - 1990	FDD
	17	704 - 716	734 - 746	
CA_2-29	2	1850 - 1910	1930 - 1990	FDD
	29	0 - 0	717 - 728	
CA_3-5	3	1710 - 1785	1805 - 1880	FDD
	5	824 - 849	869 - 894	
CA_3-7	3	1710 - 1785	1805 - 1880	FDD
	7	2500 - 2570	2620 - 2690	
CA_3-8	3	1710 - 1785	1805 - 1880	FDD
	8	880 - 915	925 - 960	
CA_3-20	3	1710 - 1785	1805 - 1880	FDD
	20	832 - 862	791 - 821	
CA_4-5	4	1710 - 1755	2110 - 2155	FDD
	5	824 - 849	869 - 894	
CA_4-7	4	1710 - 1755	2110 - 2155	FDD
	7	2500 - 2570	2620 - 2690	
CA_4-12	4	1710 - 1755	2110 - 2155	FDD
	12	699 - 716	729 - 746	
CA_4-13	4	1710 - 1755	2110 - 2155	FDD
	13	777 - 787	746 - 756	
CA_4-17	4	1710 - 1755	2110 - 2155	FDD
	17	704 - 716	734 - 746	
CA_4-29	4	1710 - 1755	2110 - 2155	FDD
	29	0 - 0	717 - 728	
CA_5-12	5	824 - 849	869 - 894	FDD
	12	699 - 716	729 - 746	
CA_5-17	5	824 - 849	869 - 894	FDD
	17	704 - 716	734 - 746	
CA_7-20	7	2500 - 2570	2620 - 2690	FDD
	20	832 - 862	791 - 821	
CA_8-20	8	880 - 915	925 - 960	FDD
	20	832 - 862	791 - 821	
CA_11-18	11	1427,9 - 1447,9	1475,9 - 1495,9	FDD
	18	815 - 830	860 - 875	

2.2.1.2 Ancho de Banda del canal

El Cuadro 9 muestra la relación entre el ancho de banda del canal ( $BW_{Channel}$ ) y la configuración del ancho de banda de transmisión ( $N_{RB}$ ). Los bordes del canal se definen como las frecuencias más bajas y más altas del portador separados por el ancho de banda de canal, es decir:  $F_C \pm BW_{Channel}/2$  [14].

Cuadro 9: Relación de los Transmission bandwidth configuration  $N_{RB}$  con los E-UTRA  $BW_{Channel}$  [14].

Channel bandwidth $BW_{Channel}$ [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Transmission bandwidth configuration $N_{RB}$	6	15	25	50	75	100

En la Figura 10 se aprecia graficamente la definición del ( $BW_{Channel}$ ) y el ( $N_{RB}$ ).

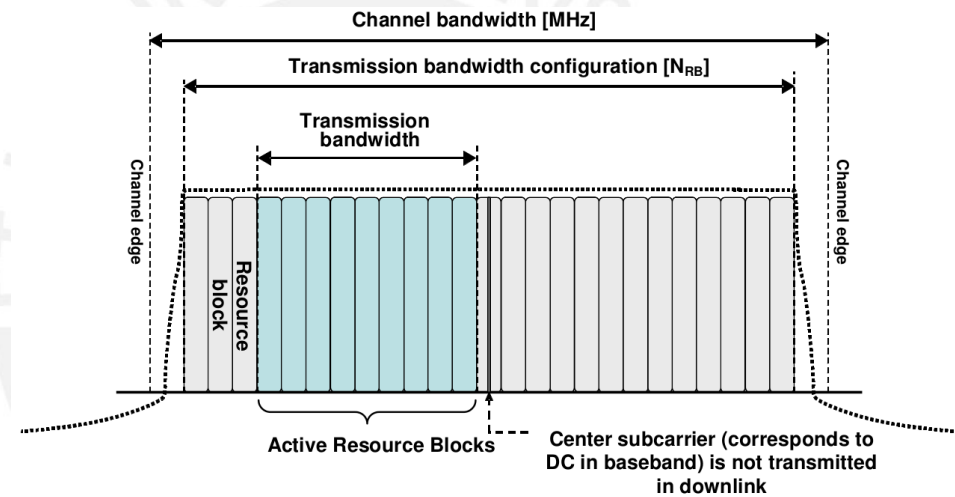


Figura 10: Definición del  $BW_{channel}$  y el  $N_{RB}$  de una portadora E-UTRA [14]

2.2.1.3 Ancho de Banda del canal para la agregación de portadoras

Para CA intrabanda continua, el ancho de banda de canal agregado, la configuración del ancho de banda de transmisión agregada y de las bandas guarda se definen de la siguiente manera, ver Figura 11 [14].

El aggregated channel bandwidth,  $BW_{Channel\_CA}$ , está definido como [14]:

$$BW_{Channel\_CA} = F_{edge,high} - F_{edge,low} [MHz] \quad (2.2.1.1)$$

El lower bandwidth edge  $F_{edge,low}$  y el upper bandwidth edge  $F_{edge,high}$  del  $BW_{Channel\_CA}$  se utilizan como puntos de referencia de frecuencia para los requerimientos del transmisor y receptor, y se definen como [14]:

$$F_{edge,low} = F_{C,low} - F_{offset,low} \quad (2.2.1.2)$$

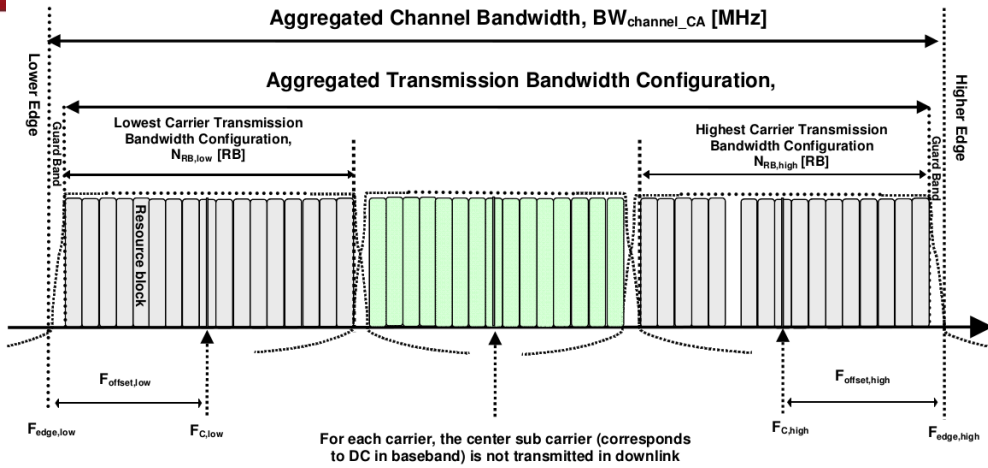


Figura 11: Definición del ancho de banda del canal agregado y los bordes del ancho de banda del canal de agregados [14].

$$F_{edge,high} = F_{C,high} + F_{offset,high} \quad (2.2.1.3)$$

El lower and upper frequency offsets dependen del transmission bandwidth configurations del lowest edge y highest edge del CC y están definidas como [14]:

$$F_{offset,low} = 0,18N_{RB,low}/2 + BW_{GB} [MHz] \quad (2.2.1.4)$$

$$F_{offset,high} = 0,18N_{RB,high}/2 + BW_{GB} [MHz] \quad (2.2.1.5)$$

Donde  $N_{RB,low}$  y  $N_{RB,high}$  son el transmission bandwidth configurations de acuerdo a el Cuadro 9 para el CC más bajo y más alto, respectivamente.  $BW_{GB}$  denota al Nominal Guard Band y es definida en el Cuadro 10, y el factor 0.18 es el ancho de banda del Physical Resource Block (PRB) en MHz [14].

El Aggregated Transmission Bandwidth Configuration ( $N_{RB,agg}$ ) es el número de RBs agregados que se asignan dentro del fully allocated Aggregated Channel bandwidth y es definido por CA Bandwidth Class (Cuadro 10) [14].

Para CA Intrabanda no continúa Sub-block Bandwidth y Sub-block edges están definidos como se muestra en la Figura 12:

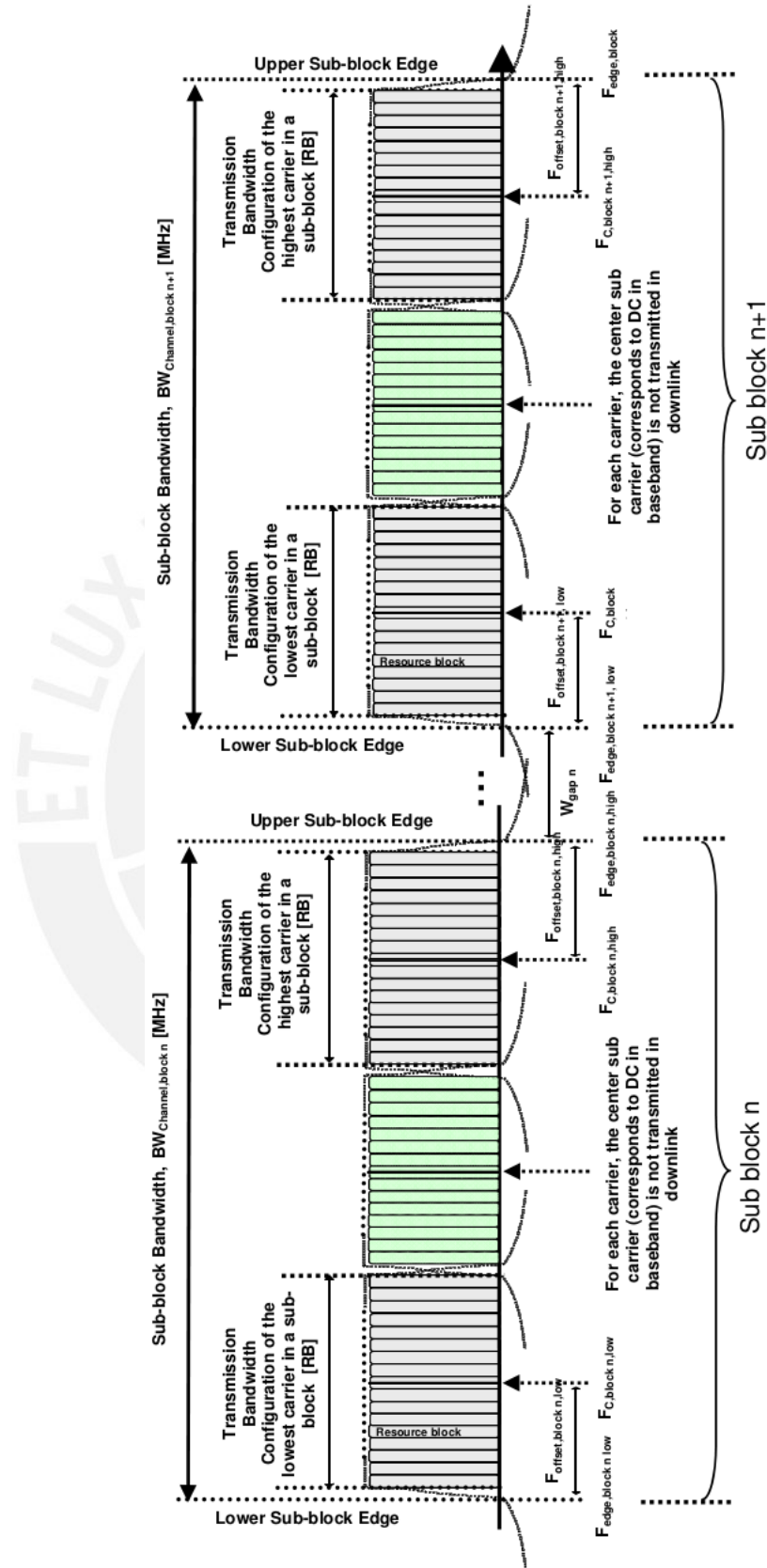


Figura 12: términos y definiciones para el CA Intrabanda no continua [14]

El lower sub-block edge del Sub-block Bandwidth ( $BW_{\text{Channel,block}}$ ) está definido como:

$$F_{\text{edge,block,low}} = F_{\text{C,block,low}} - F_{\text{offset,block,low}} \quad (2.2.1.6)$$

El upper sub-block edge del Sub-block Bandwidth está definido como:

$$F_{\text{edge,block,high}} = F_{\text{C,block,high}} + F_{\text{offset,block,high}} \quad (2.2.1.7)$$

El Sub-block Bandwidth,  $BW_{\text{Channel,block}}$ , está definido como:

$$BW_{\text{Channel,block}} = F_{\text{edge,block,high}} - F_{\text{edge,block,low}} [\text{MHz}] \quad (2.2.1.8)$$

El lower y upper frequency offsets  $F_{\text{offset,block,low}}$  y  $F_{\text{offset,block,high}}$  dependen del transmission bandwidth configurations del lowest edge y highest edge del CC dentro de un sub-block y están definidas como [14]:

$$F_{\text{offset,block,low}} = 0,18N_{\text{RB,low}}/2 + BW_{\text{GB}} [\text{MHz}] \quad (2.2.1.9)$$

$$F_{\text{offset,block,high}} = 0,18N_{\text{RB,high}}/2 + BW_{\text{GB}} [\text{MHz}] \quad (2.2.1.10)$$

Donde  $N_{\text{RB,low}}$  y  $N_{\text{RB,high}}$  son el transmission bandwidth configurations de acuerdo al Cuadro 9 para el CC más bajo y más alto dentro de un sub-block, respectivamente.  $BW_{\text{GB}}$  denota al Nominal Guard Band y es definida en el Cuadro 10, y el factor 0.18 es el ancho de banda del PRB en MHz. El tamaño del sub-block gap entre dos sub-blocks consecutivos  $W_{\text{gap}}$  está definido como:

$$W_{\text{gap}} = F_{\text{edge,blockn+1,low}} - F_{\text{edge,blockn,high}} [\text{MHz}] \quad (2.2.1.11)$$

Cuadro 10: Clases de Ancho de Banda para CA y sus correspondientes bandas de guarda nominales [14]

CA Bandwidth Class	Aggregated Transmission Bandwidth Configuration	Maximum number of CC	Nominal Guard Band $BW_{\text{GB}}$
A	$N_{\text{RB,agg}} \leq 100$	1	$0.05BW_{\text{Channel}(1)}$
B	$N_{\text{RB,agg}} \leq 100$	2	FSS
C	$100 < N_{\text{RB,agg}} \leq 200$	3	$0.05 \max(BW_{\text{Channel}(1)}, BW_{\text{Channel}(2)})$
D	$200 < N_{\text{RB,agg}} \leq [300]$	FSS	FSS
E	$[300] < N_{\text{RB,agg}} \leq [400]$	FSS	FSS
F	$[400] < N_{\text{RB,agg}} \leq [500]$	FSS	FSS



#### 2.2.1.4 Ancho de Banda del canal por banda de trabajo para CA

Los requisitos para la agregación de portadoras en esta especificación, se definen para las configuraciones de agregación de portadoras con un conjunto de combinaciones de anchos de banda. Para agregación de portadoras Interbanda, una configuración de agregación de portadoras es una combinación de bandas de trabajo, cada uno soportando una clase de ancho de banda agregación de portadoras. Para la agregación de portadoras intrabanda continuas, una configuración de agregación de portadoras es una sola banda de trabajo soportando una clase de ancho de banda de agregación de portadoras [14].

Para cada configuración de agregación de portadoras, los requisitos están especificados para todas las combinaciones de los ancho de banda contenidas en un conjunto dados por cada configuración [14].

Los requerimientos para CA Intrabanda continua, están especificados en el Cuadro 11

Cuadro 11: E-UTRA CA configuraciones y sets de combinaciones de anchos de banda definidos para CA intrabanda continua [14]

E-UTRA CA Configuration	50RB+ 100RB (10MHz+ 20MHz)	75RB+ 75RB (15MHz+ 15MHz)	75RB+ 100RB (15MHz+ 20MHz)	100RB+ 100RB (20MHz+ 20MHz)	Maximum aggregated bandwidth [MHz]	Bandwidth Combination Set
CA_1C		Yes		Yes	40	o
CA_7C		Yes		Yes	40	o
CA_38C		Yes		Yes	40	o
CA_40C	Yes	Yes		Yes	40	o
CA_41C	Yes	Yes	Yes	Yes	40	o

Los requerimientos para CA Intrabanda no continua, están especificados en el Cuadro 12

Cuadro 12: E-UTRA BW para CA Intrabanda no continua [14]

E-UTRA CA Configuration	E-UTRA Bands	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
CA_25A-25A	25			Yes	Yes		

Los requerimientos para CA Interbanda, están especificados en el Cuadro 13

Cuadro 13: E-UTRA BW para CA Interbanda [14]

E-UTRA CA Configuration	E-UTRA Bands	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	Maximum aggregated bandwidth [MHz]	Bandwidth Combination Set																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
CA_1A-5A	1				Yes			20	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	5				Yes					CA_1A-18A	1			Yes	Yes	Yes	Yes	35	0	18			Yes	Yes	Yes		CA_1A-19A	1			Yes	Yes	Yes	Yes	35	0	19			Yes	Yes	Yes		CA_1A-21A	1			Yes	Yes	Yes	Yes	35	0	21			Yes	Yes	Yes		CA_2A-17A	2			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_2A-29A	2			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_3A-5A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	5			Yes	Yes			3				Yes			20	1	5			Yes	Yes			CA_3A-7A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	40	0	7				Yes	Yes	Yes	CA_3A-8A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	8			Yes	Yes			3				Yes			20	1	8			Yes	Yes			CA_3A-20A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_4A-5A	4			Yes	Yes			20	0	5			Yes	Yes			CA_4A-7A	4			Yes	Yes			30	0	7			Yes	Yes	Yes	Yes	CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes			4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes
CA_1A-18A	1			Yes	Yes	Yes	Yes	35	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	18			Yes	Yes	Yes				CA_1A-19A	1			Yes	Yes	Yes	Yes	35	0	19			Yes	Yes	Yes		CA_1A-21A	1			Yes	Yes	Yes	Yes	35	0	21			Yes	Yes	Yes		CA_2A-17A	2			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_2A-29A	2			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_3A-5A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	5			Yes	Yes				3				Yes			20	1	5			Yes	Yes			CA_3A-7A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	40	0	7				Yes	Yes	Yes	CA_3A-8A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	8			Yes	Yes				3				Yes			20	1	8			Yes	Yes			CA_3A-20A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_4A-5A	4			Yes	Yes			20	0	5			Yes	Yes			CA_4A-7A	4			Yes	Yes			30	0	7			Yes	Yes	Yes	Yes	CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes				4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes												
CA_1A-19A	1			Yes	Yes	Yes	Yes	35	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	19			Yes	Yes	Yes				CA_1A-21A	1			Yes	Yes	Yes	Yes	35	0	21			Yes	Yes	Yes		CA_2A-17A	2			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_2A-29A	2			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_3A-5A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	5			Yes	Yes				3				Yes			20	1	5			Yes	Yes			CA_3A-7A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	40	0	7				Yes	Yes	Yes	CA_3A-8A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	8			Yes	Yes				3				Yes			20	1	8			Yes	Yes			CA_3A-20A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_4A-5A	4			Yes	Yes			20	0	5			Yes	Yes			CA_4A-7A	4			Yes	Yes			30	0	7			Yes	Yes	Yes	Yes	CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes				4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																													
CA_1A-21A	1			Yes	Yes	Yes	Yes	35	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	21			Yes	Yes	Yes				CA_2A-17A	2			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_2A-29A	2			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_3A-5A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	5			Yes	Yes				3				Yes			20	1	5			Yes	Yes			CA_3A-7A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	40	0	7				Yes	Yes	Yes	CA_3A-8A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	8			Yes	Yes				3				Yes			20	1	8			Yes	Yes			CA_3A-20A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_4A-5A	4			Yes	Yes			20	0	5			Yes	Yes			CA_4A-7A	4			Yes	Yes			30	0	7			Yes	Yes	Yes	Yes	CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes				4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																														
CA_2A-17A	2			Yes	Yes			20	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	17			Yes	Yes					CA_2A-29A	2			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_3A-5A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	5			Yes	Yes				3				Yes			20	1	5			Yes	Yes			CA_3A-7A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	40	0	7				Yes	Yes	Yes	CA_3A-8A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	8			Yes	Yes				3				Yes			20	1	8			Yes	Yes			CA_3A-20A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_4A-5A	4			Yes	Yes			20	0	5			Yes	Yes			CA_4A-7A	4			Yes	Yes			30	0	7			Yes	Yes	Yes	Yes	CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes				4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																															
CA_2A-29A	2			Yes	Yes			20	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	29		Yes	Yes	Yes					CA_3A-5A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	5			Yes	Yes				3				Yes			20	1	5			Yes	Yes			CA_3A-7A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	40	0	7				Yes	Yes	Yes	CA_3A-8A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	8			Yes	Yes				3				Yes			20	1	8			Yes	Yes			CA_3A-20A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_4A-5A	4			Yes	Yes			20	0	5			Yes	Yes			CA_4A-7A	4			Yes	Yes			30	0	7			Yes	Yes	Yes	Yes	CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes				4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																
CA_3A-5A	3				Yes	Yes	Yes	30	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	5			Yes	Yes						3				Yes			20	1	5			Yes	Yes			CA_3A-7A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	40	0	7				Yes	Yes	Yes	CA_3A-8A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	8			Yes	Yes				3				Yes			20	1	8			Yes	Yes			CA_3A-20A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_4A-5A	4			Yes	Yes			20	0	5			Yes	Yes			CA_4A-7A	4			Yes	Yes			30	0	7			Yes	Yes	Yes	Yes	CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes				4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																	
	3				Yes			20	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	5			Yes	Yes					CA_3A-7A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	40	0	7				Yes	Yes	Yes	CA_3A-8A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	8			Yes	Yes				3				Yes			20	1	8			Yes	Yes			CA_3A-20A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_4A-5A	4			Yes	Yes			20	0	5			Yes	Yes			CA_4A-7A	4			Yes	Yes			30	0	7			Yes	Yes	Yes	Yes	CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes				4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																		
CA_3A-7A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	40	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	7				Yes	Yes	Yes			CA_3A-8A	3				Yes	Yes	Yes	30	0	8			Yes	Yes				3				Yes			20	1	8			Yes	Yes			CA_3A-20A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_4A-5A	4			Yes	Yes			20	0	5			Yes	Yes			CA_4A-7A	4			Yes	Yes			30	0	7			Yes	Yes	Yes	Yes	CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes				4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																			
CA_3A-8A	3				Yes	Yes	Yes	30	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	8			Yes	Yes						3				Yes			20	1	8			Yes	Yes			CA_3A-20A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_4A-5A	4			Yes	Yes			20	0	5			Yes	Yes			CA_4A-7A	4			Yes	Yes			30	0	7			Yes	Yes	Yes	Yes	CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes				4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																				
	3				Yes			20	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	8			Yes	Yes					CA_3A-20A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_4A-5A	4			Yes	Yes			20	0	5			Yes	Yes			CA_4A-7A	4			Yes	Yes			30	0	7			Yes	Yes	Yes	Yes	CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes				4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																																					
CA_3A-20A	3			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	20			Yes	Yes					CA_4A-5A	4			Yes	Yes			20	0	5			Yes	Yes			CA_4A-7A	4			Yes	Yes			30	0	7			Yes	Yes	Yes	Yes	CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes				4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																																																						
CA_4A-5A	4			Yes	Yes			20	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	5			Yes	Yes					CA_4A-7A	4			Yes	Yes			30	0	7			Yes	Yes	Yes	Yes	CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes				4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																																																																							
CA_4A-7A	4			Yes	Yes			30	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	7			Yes	Yes	Yes	Yes			CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes				4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																																																																																								
CA_4A-12A	4	Yes	Yes	Yes	Yes			20	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	12			Yes	Yes					CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0	13			Yes	Yes				4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																																																																																																									
CA_4A-13A	4			Yes	Yes	Yes	Yes	30	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	13			Yes	Yes						4			Yes	Yes			20	1	13			Yes	Yes			CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																																																																																																																										
	4			Yes	Yes			20	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	13			Yes	Yes					CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																																																																																																																																											
CA_4A-17A	4			Yes	Yes			20	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	17			Yes	Yes					CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0	29		Yes	Yes	Yes			CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																																																																																																																																																												
CA_4A-29A	4			Yes	Yes			20	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	29		Yes	Yes	Yes					CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0	12			Yes	Yes			CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
CA_5A-12A	5			Yes	Yes			20	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	12			Yes	Yes					CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0	17			Yes	Yes			CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
CA_5A-17A	5			Yes	Yes			20	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	17			Yes	Yes					CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0	20			Yes	Yes			CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
CA_7A-20A	7				Yes	Yes	Yes	30	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	20			Yes	Yes					CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0	20			Yes	Yes			CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
CA_8A-20A	8			Yes	Yes			20	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	20			Yes	Yes					CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
CA_11A-18A	11			Yes	Yes			25	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	18			Yes	Yes	Yes																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				

### 2.2.1.5 Separación entre canales para CA

Para CA intrabanda continua de anchos de banda de clase C, la separación entre canales nominal entre dos E-UTRA CC adyacentes, se define de la siguiente manera [14]:

$$NChS = \left\lceil \frac{BW_{Channel(1)} + BW_{Channel(2)} - 0,1(BW_{Channel(1)} - BW_{Channel(2)})}{6} \right\rceil 0,3[\text{MHz}] \quad (2.2.1.12)$$

donde  $BW_{Channel(1)}$  y  $BW_{Channel(2)}$  son los anchos de banda de canal de las dos E-UTRA CC respectivamente de acuerdo con el Cuadro 9 con valores en MHz. La separación de canales para CA intrabanda continua se puede ajustar a cualquier múltiplo de 300 kHz menos que el espaciado nominal del canal para optimizar el rendimiento en un escenario de implementación particular [14].

### 2.2.1.6 Trama de Canal

Para la agregación de portadoras la trama de canal es de 100 kHz para todas las bandas, lo que significa que la frecuencia central de la portadora debe ser un múltiplo entero de 100 kHz [14].

### 2.2.2 MIMO en LTE-Advanced

Para mejorar el performance de la red se amplió el uso de MIMO, con lo que se logró lo siguiente:

- Aumento del Peak Rate.
- Aumento de la cobertura.
- Incremento del throughput.

En LTE Advanced por el lado del UE podemos tener hasta 4 antenas transmitiendo y 8 recibiendo, mientras que por el lado del eNB tenemos hasta 8 antenas transmitiendo y 4 recibiendo [12].

Es por esto que en el UL la transmisión, vista por un UE, es punto a punto, es decir todos los UEs transmiten hacia el eNB. Dado que el UE puede tener hasta 4 antena transmitiendo, puede configurarse SU-MIMO en el UL. Este modo no es posible en LTE Rel. 8, dado que el UE sólo tiene una antena para transmitir [12].

### 2.2.3 Categoría de los UE en LTE Advanced

Debido a la gran variedad de UEs que existen en el mercado, los equipos móviles son clasificados en Categorías.

En el Cuadro 14 se muestran las características de los terminales móviles en LTE Advanced.

Cuadro 14: Categoría de los terminales en LTE Advanced [7].

	Class6	Class7	Class8
Peak Rate DL (Mbps)	300	300	3000
Peak Rate UL (Mbps)	50	100	1500
RF Bandwidth (MHz)	40	40	100
Modulation DL	64QAM	64QAM	64QAM
Modulation UL	16QAM	16QAM	64QAM
MIMO DL	2x2	2x2	8x8
	4x4	4x4	
MIMO UL	no	2x2	4x4



## DESARROLLO DE LA APLICACIÓN

### 3.1 HERRAMIENTAS UTILIZADAS

El aplicativo ha sido elaborado en PHP. Para esto se descargó el WAMP Server ([http : //www.wampserver.es/](http://www.wampserver.es/)) que es un pack que incluye:

- PHP, un lenguaje de programación interpretado, diseñado originalmente para la creación de páginas web dinámicas [21].
- MySQL, un sistema de gestión de bases de datos relacional, multihilo y multiusuario [21].
- APACHE, un servidor web HTTP de código abierto, para plataformas Unix, Microsoft Windows, Macintosh y otras que implementen el protocolo [21].

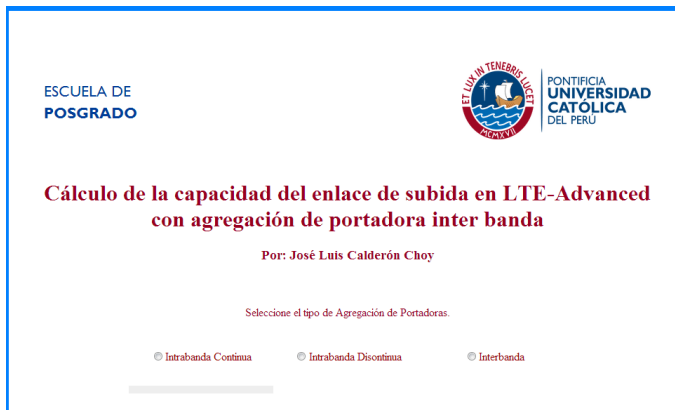
Para la publicación del aplicativo, se ha alquilado un hosting y además se compró un dominio en GoDaddy.com

### 3.2 DETALLE DEL FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN

Para acceder a la página inicial del aplicativo, debe dirigirse al siguiente enlace: [www.choytelecomsolutions/portadora](http://www.choytelecomsolutions/portadora).

#### 3.2.1 Selección del tipo de agregación

El aplicativo inicia con la selección del tipo de agregación que se requiere realizar. Según el estándar, tenemos 3 tipos de agregación de portadoras: Intrabanda continua, Intrabanda no continua o discontinua e Interbanda.



The screenshot shows a web interface for a postgraduate school. At the top left, it says 'ESCUELA DE POSGRADO'. At the top right, there is a logo for 'PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ'. The main heading is 'Cálculo de la capacidad del enlace de subida en LTE-Advanced con agregación de portadora inter banda'. Below this, it says 'Por: José Luis Calderón Choy'. The instruction is 'Seleccione el tipo de Agregación de Portadoras.' There are three radio button options: 'Intrabanda Continua', 'Intrabanda Discontinua', and 'Interbanda'. The 'Interbanda' option is selected.

Figura 13: Selección del tipo de Agregación

### 3.2.2 Selección de la configuración de la agregación de portadoras

Según el estándar del 3GPP, el Cuadro 6, el Cuadro 7 y el Cuadro 8, muestran las configuraciones permitidas para la agregación del tipo Intrabanda continua, Intrabanda discontinua e Interbanda respectivamente.

Seleccione configuración de la agregación de portadoras.

	E-UTRA Carrier Aggregation Intra-band Contiguous	Band
<input type="radio"/>	CA_1	1
<input type="radio"/>	CA_7	7
<input type="radio"/>	CA_38	38
<input type="radio"/>	CA_40	40
<input type="radio"/>	CA_41	41

Figura 14: Selección del tipo de Configuración

### 3.2.3 Selección de las combinaciones de la agregación de portadoras

Según el estándar del 3GPP, el Cuadro 11, el Cuadro 12 y el Cuadro 13, muestran las distintas combinaciones permitidas para la agregación del tipo Intrabanda continua, Intrabanda discontinua e Interbanda respectivamente. Luego de seleccionar la(s) combinación(es), hacer click en el botón "Canalizar CCs" para pasar al siguiente paso.

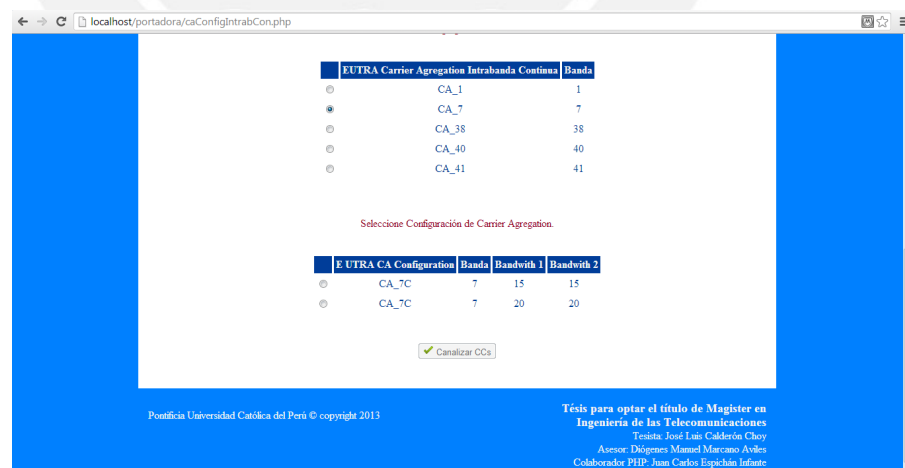


Figura 15: Selección del tipo de Combinación

### 3.2.4 Canalizado de los Component Carriers

La concesión de los espectros y los anchos de bandas son administrados por cada nación. Cada una de ellas tiene la libertad de dividir y de canalizar el espectro radio eléctrico. Por esta razón se le da al usuario la libertad de poder canalizar los Component Carriers, siguiendo los parámetros del 3GPP.



Figura 16: Canalización de las Component Carriers

Para no generar problemas en el cálculo, debemos certificar que los valores ingresados para la canalización son los permitidos. Conociendo que  $F_{i1}$  = Frecuencia inicial de  $CC_1$ ,  $F_{i2}$  = Frecuencia inicial de  $CC_2$ ,  $BW_1$  = Ancho de banda del  $CC_1$ ,  $BW_2$  = Ancho de banda del  $CC_2$ ,  $F_{low}$  = Frecuencia mínima de la Banda y  $F_{high}$  = Frecuencia máxima de la Banda, se implementó las siguientes validaciones:

CA Intrabanda continua	CA Intrabanda no continua	CA Interbanda
$F_{i1} \geq F_{low}$	$F_{i1} \geq F_{low}$	$F_{i1} \geq F_{low1}$
$F_{i2} > F_{low}$	$F_{i2} > F_{low}$	$F_{i2} \geq F_{low2}$
$F_{i1} + BW_1 < F_{high}$	$F_{i1} + BW_1 < F_{high}$	$F_{i1} + BW_1 \leq F_{high1}$
$F_{i2} + BW_2 \leq F_{high}$	$F_{i2} + BW_2 \leq F_{high}$	$F_{i2} + BW_2 \leq F_{high2}$
$F_{i1} + BW_1 = F_{i2}$	$F_{i1} + BW_1 < F_{i2}$	
	$F_{i1} + BW_1 + 1,4 < F_{i2}$	

### 3.2.5 Validación de Ortogonalidad

Para el enlace de subida, se utiliza **SC-FDMA**, que es una variación de **OFDMA**. Por tal motivo, en el caso de la agregación de portadoras intrabanda continúa, debemos validar que las frecuencias centrales de cada **CC** mantengan la ortogonalidad entre sí. Para esto, debemos verificar que la diferencia de las frecuencias centrales  $FC_1$  y  $FC_2$ , sea un múltiplo entero de 300KHz [10].

De no cumplirse la ortogonalidad, debemos realizar un corrimiento de alguna de las component carriers. El estándar no precisa un proce-



dimiento para realizar este corrimiento, por tal razón en el aplicativo se realiza el siguiente procedimiento:

Sea en caso de una agregación del tipo Interbanda continua, con dos CC de 20MHz y denotamos la separación nominal de los canales como Nominal Carrier Separation (NCS) y la separación modificada como Carrier Separation (CS) [10], tenemos que:

$$\frac{NCS}{300KHz} = \frac{20MHz}{300KHz} = 66,666\bar{6}$$

El resultado no es un valor entero, entonces la separación no puede ser NCS, y en su lugar usaremos CS, que es el mínimo entero más próximo que es un múltiplo de 300KHz. Por lo tanto:

$$CS = (300KHz) \text{Floor} \left[ \frac{NCS}{300KHz} \right] = (300KHz)(66) = 19,8MHz$$

Nota:  
Floor[x]=Mayor  
entero que no supera  
a x.



Figura 17: Validación de la ortogonalidad

### 3.2.6 Selección de los parámetros del LinkBudget

En esta ventana, se le da al usuario la libertad de poder configurar ciertos parámetros del Linkbudget como:

- Parámetros del UE
  - La Clase del Móvil
  - La Potencia de Transmisión
- Parámetros del eNodeB
  - La figura de Ruido
  - La altura de la Antena

ytelecomsolutions.com/portadora/pucchInterbanda.php

**Cálculo de la capacidad del enlace de subida en LTE-Advanced con agregación de portadora inter banda**

Por: José Luis Calderón Choy

**Parámetros del Linkbudget en el enlace de subida**

**Parámetros del UE**

Seleccione la clase:

Ingrese Potencia de Transmisión :

**Parámetros eNodeB**

Ingrese Figura de Ruido:

Ingrese Altura de la antena:

Figura 18: Selección de los parámetros del LinkBudget

### 3.2.7 Cálculo de la capacidad y reporte final

Luego de seleccionar los parámetros para el linkbudget y hacer click en el botón CALCULAR, el sistema recoge los valores e inicia el cálculo. Al terminar con el cálculo, el sistema muestra un reporte en donde se detalla a cada uno de los CC que participaron en la agregación de portadoras. Además se muestran los radios (límites) para la respectiva modulación y el aporte en capacidad de cada anillo. Al final del reporte se visualiza capacidad total de la agregación de portadoras realizado.

ions.com/portadora/pucchInterbanda2.php

Ingrese Altura de la antena:

**Tipo de Agregacion:** CARRIER AGREGATION INTERBANDA  
**Configuracion de Agregacion:** CA\_4A-13A  
**Datos CC1:** Banda: 4 FC: 1712.5MHz BW:5.0MHz RB: 25  
**Datos CC2:** Banda: 13 FC: 782MHz BW:10.0MHz RB: 50

Anillo de modulación	CC1		CC2	
	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)
16 QAM	276.37	2.61	480.82	5.21
QPSK	649.53	5.9	1130.04	11.79
<b>Total</b>		8.5		17.01

**Capacidad Total de la Agregación: 25.51 Mbps**

Figura 19: Cálculo de la capacidad y reporte final

3.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA

3.3.1 Selección del tipo de agregación y configuración

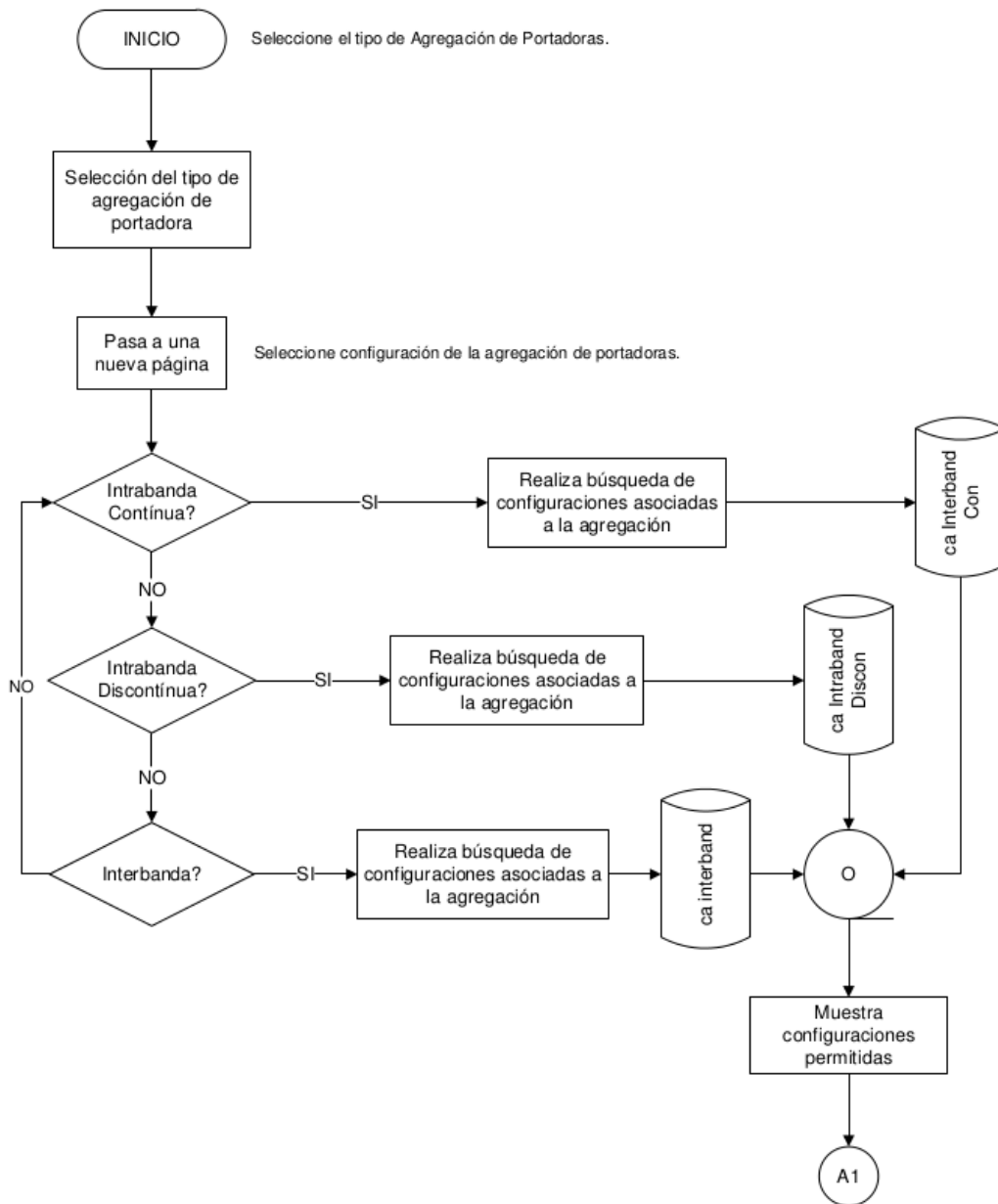


Figura 20: Diagrama de flujo - Selección del tipo de Agregación y configuración

3.3.2 Selección de las combinaciones de la agregación de portadoras

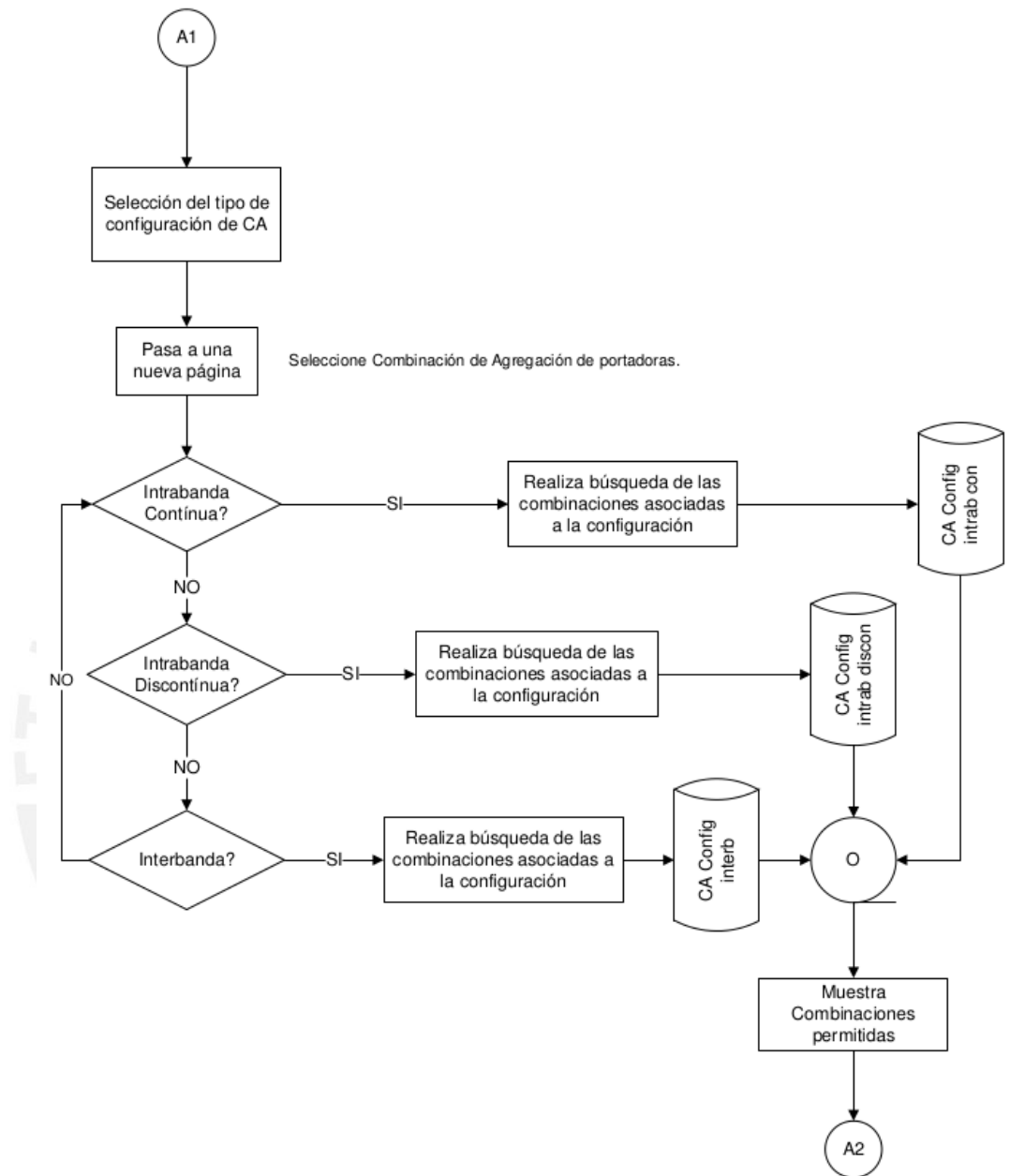


Figura 21: Diagrama de flujo - Selección de las combinaciones de la agregación de portadoras

3.3.3 Canalizado de los Component Carriers

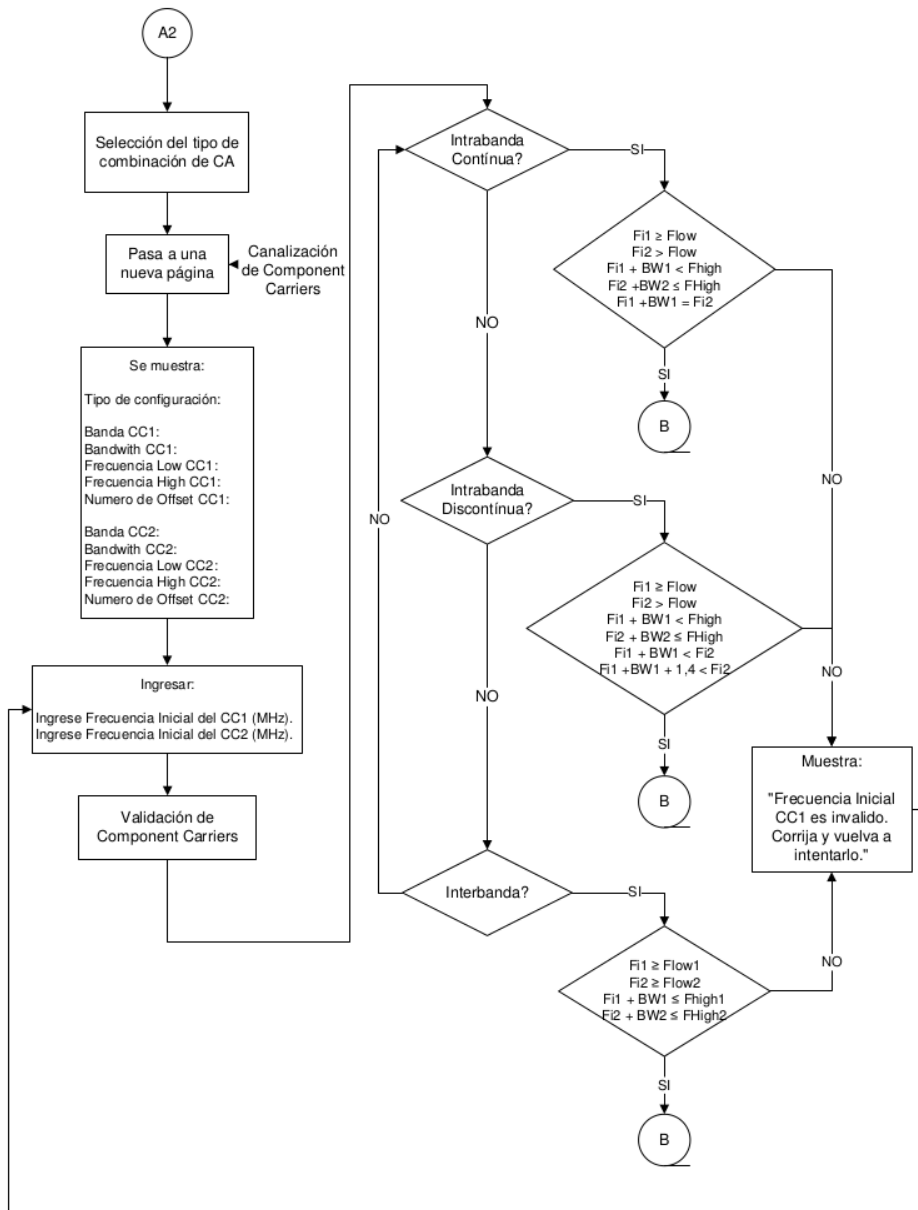


Figura 22: Canalizado de los Component Carriers

3.3.4 Validación de Ortogonalidad

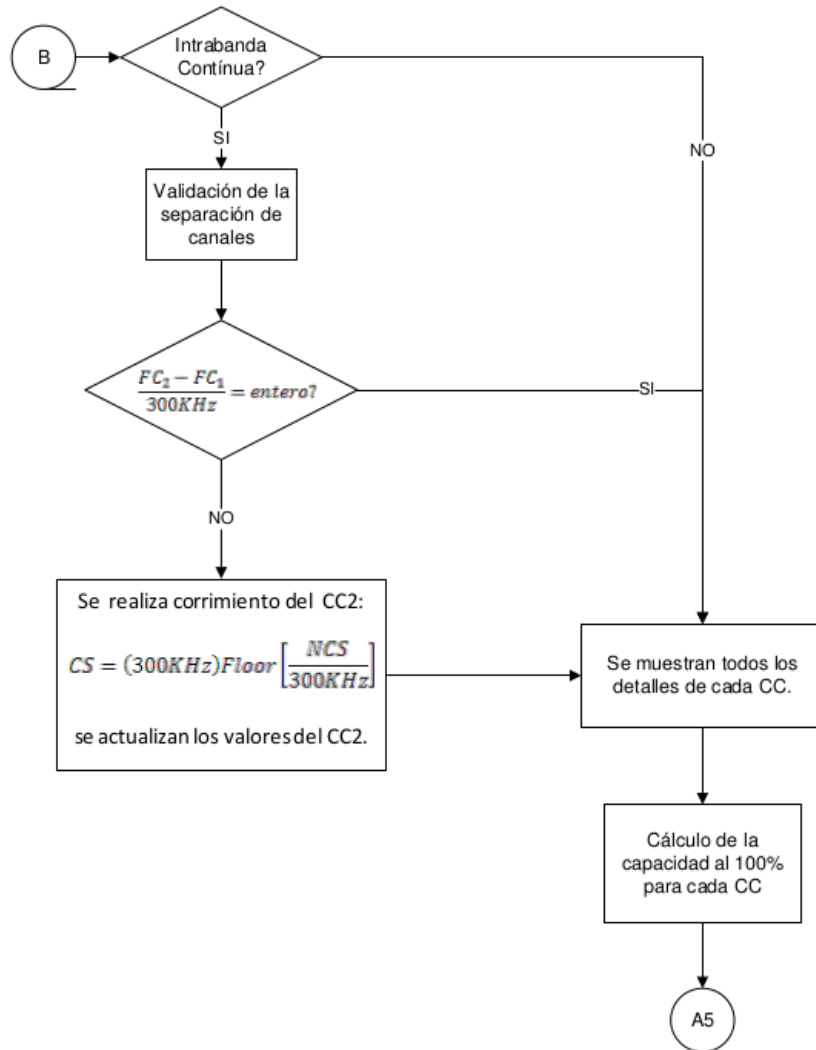


Figura 23: Validación de Ortogonalidad

3.3.5 Cálculo de la capacidad y reporte final

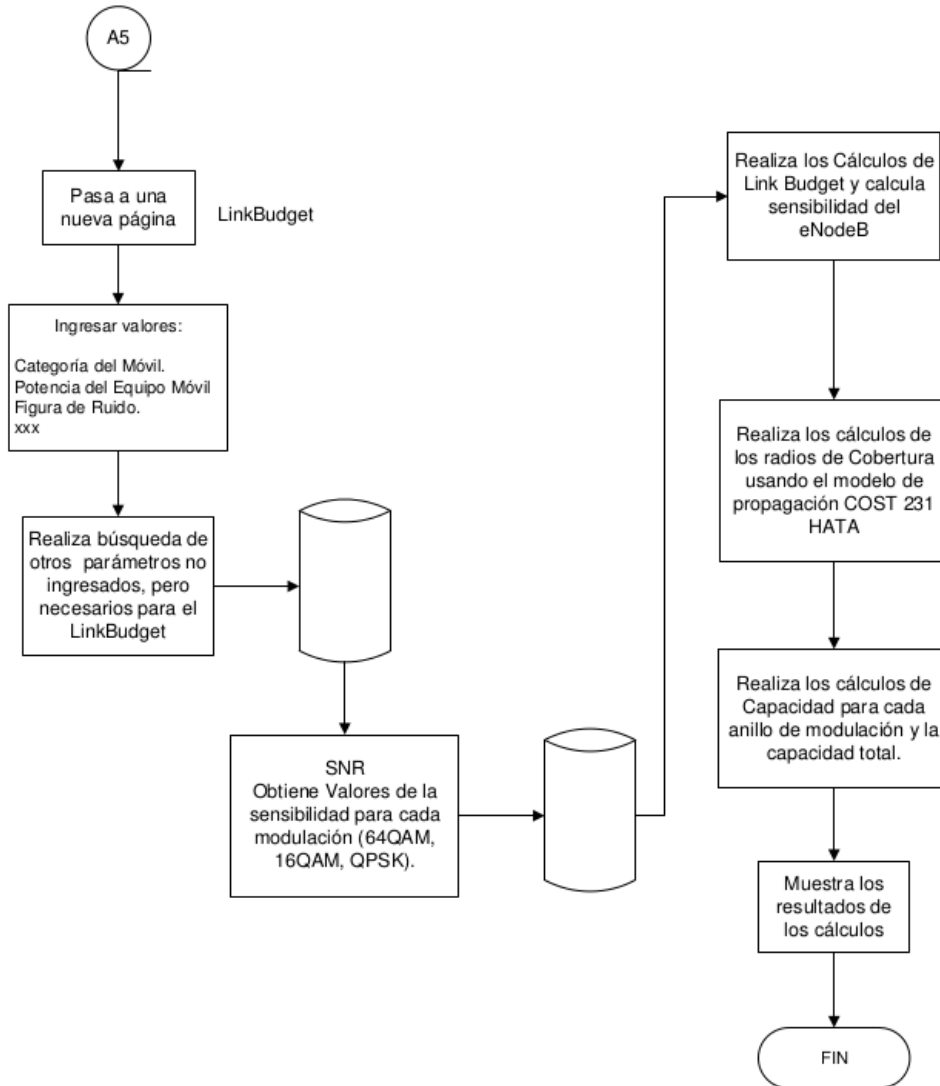


Figura 24: Cálculo de la capacidad y reporte final





## RESULTADOS DE LA CAPACIDAD CON EL APLICATIVO

Se ha concluído con el diseño, la programación y la publicación del aplicativo web en la WWW ([www.choytelecomsolutions/portadora](http://www.choytelecomsolutions/portadora)).

Para verificar el funcionamiento del aplicativo y la validez de los resultados, se ha seleccionado de forma aleatoria una configuración y combinación para cada tipo de CA y con ella, hallar la capacidad en el enlace de subida. Estos resultados son confrontados con resultados obtenidos de forma manual con la misma metodología.

Para este cálculo manual, se utilizó un documento en Excel, basado en una hoja de cálculo creada inicialmente para hallar el Linkbudget para LTE, el cual fue adecuado para que se pueda calcular la capacidad de la agregación de portadoras.

### 4.1 VALIDACIÓN DE RESULTADOS PARA CA INTRABANDA CONTÍNUA

La configuración y combinación elegidas para CA Intrabanda Contínua fue de CA\_7C y 20MHz-20MHz respectivamente. Además, se consideró un terminal móvil de clase 8.

Los resultados para esta selección se muestran a continuación:

ora/pucchContinua2.php

---

**Parámetros del UE**

Seleccione la clase:

Ingrese Potencia de Transmisión :

**Parámetros eNodB**

Ingrese Figura de Ruido:

Ingrese Altura de la antena:

**Tipo de Agregacion:** CARRIER AGREGATION INTRABANDA CONTINUA

**Configuracion de Agregacion:** CA\_7C

Banda: 7

**Datos CC1:** FC: 2510MHz BW:20MHz RB: 100

**Datos CC2:** FC: 2529.8MHz BW:20MHz RB: 100

Anillo de modulación	CC1		CC2	
	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)
64 QAM	117.76	23.65	116.88	23.65
16 QAM	191.54	25.94	190.1	25.94
QPSK	450.17	94.34	446.79	94.34
<b>Total</b>		143.94		143.94

**Capacidad Total de la Agregación: 287.88 Mbps**

Figura 25: Cálculo de la capacidad para CA Intrabanda Contínua con el aplicativo

MODELO COST231 HATA	Portadoras		UNIDADES
	CC1	CC2	
<b>PARÁMETRO</b>	<b>CC1</b>	<b>CC2</b>	
Frecuencia de la Portadora $f_p$	2510	2530	MHz
Altura de la Antena de la Estación Base $h_{BS}$	33	33	m
Altura de la Antena de la Estación Móvil $h_{MS}$	1.7	1.7	m
Constante C=0 Suburbano, C=3 Urbano	3	3	dB
$a(h_{MS})$	0.3638988537	0.3649673616	dB
Máximas Pérdidas Permitidas Cerca de la BS	131.09	131.09	dB
Máximas Pérdidas Permitidas Borde de la Celda	118.09	118.09	
<b>Máximas Pérdidas Permitidas Borde de la Celda</b>	<b>110.69</b>	<b>110.69</b>	
$\log(d)$ QPSK	-0.3461247183	-0.3494370398	dB
$\log(d)$ 16QAM	-0.718044929	-0.7213572505	
$\log(d)$ 64QAM	-0.9297533566	-0.9330656781	
Radio de cobertura QPSK	0.45068726	0.4472629874	Km
Radio de cobertura 16 QAM	0.19140579	0.1899515097	Km
Radio de cobertura 64 QAM	0.1175564989	0.1166633175	Km
<b>Area Total</b>	<b>0.5277031786</b>	<b>0.5197147793</b>	<b>Km2</b>
Area Cubierta por la celda Hexagonal	0.4325223921	0.4259748448	Km2
Area Cubierta por la celda Hexagonal	0.0592776463	0.0583802981	Km2
Area Cubierta por la celda Hexagonal	0.0359031401	0.0353596364	Km2
<b>Clase del Equipo Movil</b>	<b>8</b>		
Capacidad en anillo QPSK	94.421.602,14	94.421.602,14	bps
Capacidad en anillo 16QAM	25.881.158,71	25.881.158,71	bps
Capacidad en anillo 64QAM	23.513.455,51	23.513.455,51	bps
<b>Capacidad Total</b>	<b>287.632.432,72</b>	<b>287.632.432,72</b>	<b>bps</b>

Figura 26: Cálculo de la capacidad para CA Intrabanda Continua con Hoja de Excel

#### 4.1.1 Comparación de resultados CA Intrabanda Continua

la comparación de los resultados se muestra en las siguientes Tablas:

Cuadro 15: Comparación de resultados de capacidad para CA Intrabanda Continua

	Aplicativo				Excel			
	CC1		CC2		CC1		CC2	
	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)
64 QAM	117,76	23,65	116,88	23,65	117,55650	23,51346	116,66332	23,51346
16 QAM	191,54	25,94	190,1	25,94	191,40579	25,88116	189,95151	25,88116
QPSK	450,17	94,34	446,79	94,34	450,68726	94,42160	447,26299	94,42160

La diferencia de resultados entre cada uno de los métodos es:

Cuadro 16: Diferencia (%) de los resultados obtenidos para el cálculo de la capacidad en CA Intrabanda Continua

	CC1		CC2	
	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)
64 QAM	0,17 %	0,58 %	0,19 %	0,58 %
16 QAM	0,07 %	0,23 %	0,08 %	0,23 %
QPSK	-0,11 %	-0,09 %	-0,11 %	-0,09 %

4.2 VALIDACIÓN DE RESULTADOS PARA CA INTRABANDA DISCONTÍNUA

La configuración y combinación elegidas para CA Intrabanda Discontínua fue de CA\_25A-25A y 5MHz-10MHz respectivamente. Además, se consideró un terminal móvil de clase 8.

Los resultados para esta selección se muestran a continuación:

com/portadora/pucchDiscontinua2.php

Seleccione la clase:

Ingrese Potencia de Transmisión :

**Parámetros eNodB**

Ingrese Figura de Ruido:

Ingrese Altura de la antena:

**Tipo de Agregacion:** CARRIER AGREGATION INTRABANDA DISCONTINUA

**Configuracion de Agregacion:** CA\_25A-25A

Banda: 25

**Datos CC1:** FC: 1852.5MHz BW:5MHz RB: 25

**Datos CC2:** FC: 1865MHz BW:10MHz RB: 50

Anillo de modulacion	CC1		CC2	
	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)
64 QAM	234.56	5.91	191.21	11.83
16 QAM	381.5	6.49	311	12.97
QPSK	896.63	23.59	730.93	47.17
<b>Total</b>		<b>35.98</b>		<b>71.97</b>

**Capacidad Total de la Agregación: 107.95 Mbps**

Figura 27: Cálculo de la capacidad para CA Intrabanda Discontínua con aplicativo

MODELO COST231 HATA	Portadoras		UNIDADES
PARÁMETRO	CC1	CC2	
Frecuencia de la Portadora fp	1852,5	1865	MHz
Altura de la Antena de la Estación Base hBS	33	33	m
Altura de la Antena de la Estación Móvil hMS	1,7	1,7	m
Constante C=0 Suburbano, C=3 Urbano	3	3	dB
a(hMS)	0,3230050472	0,3239104392	dB
Máximas Pérdidas Permitidas Cerca de la BS	137,11	134,10	dB
Máximas Pérdidas Permitidas Borde de la Celda	124,11	121,10	
Máximas Pérdidas Permitidas Borde de la Celda	116,71	113,70	
log(d) QPSK	-0,047111119	-0,1360402043	dB
log(d) 16QAM	-0,4190313297	-0,507960415	
log(d) 64QAM	-0,6307397573	-0,7196688427	
Radio de cobertura QPSK	0,8971992068	0,7310714022	Km
Radio de cobertura 16 QAM	0,3810383345	0,3104842575	Km
Radio de cobertura 64 QAM	0,2340239162	0,190691422	Km
Area Total	2,0913027507	1,3885410966	Km2
Area Cubierta por la celda Hexagonal	1,7140985789	1,1380926648	Km2
Area Cubierta por la celda Hexagonal	0,2349190035	0,1559767903	Km2
Area Cubierta por la celda Hexagonal	0,1422851683	0,0944716415	Km2
Clase del Equipo Movil	8		
Capacidad en anillo QPSK	23.605.400,54	47.210.801,07	bps
Capacidad en anillo 16QAM	6.470.289,68	12.940.579,35	bps
Capacidad en anillo 64QAM	5.878.363,88	11.756.727,75	bps
Capacidad Total	35.954.054,10	71.908.108,17	bps

Figura 28: Cálculo de la capacidad para CA Intrabanda Discontínua con Hoja de Excel

#### 4.2.1 Comparación de resultados CA Intrabanda Discontinua

la comparación de los resultados se muestra en las siguientes Tablas:

Cuadro 17: Comparación de resultados de capacidad para CA Intrabanda Discontinua

	Aplicativo				Excel			
	CC1		CC2		CC1		CC2	
	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)
64 QAM	234,56	5,91	191,21	11,83	234,02392	5,87836	190,69142	11,75673
16 QAM	381,5	6,49	311	12,97	381,03833	6,47029	310,48426	12,94058
QPSK	896,63	23,59	730,93	47,17	897,19921	23,60540	731,07140	47,21080

La diferencia de resultados entre cada uno de los métodos es:

Cuadro 18: Diferencia (%) de los resultados obtenidos para el cálculo de la capacidad en CA Intrabanda Discontinua

	CC1		CC2	
	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)
64 QAM	0,23 %	0,54 %	0,27 %	0,62 %
16 QAM	0,12 %	0,30 %	0,17 %	0,23 %
QPSK	-0,06 %	-0,07 %	-0,02 %	-0,09 %

4.3 VALIDACIÓN DE RESULTADOS PARA CA INTERBANDA

La configuración y combinación elegidas para CA Interbanda fue de CA\_1A-19A y 10MHz-15MHz respectivamente. Además, se consideró un terminal móvil de clase 6.

Los resultados para esta selección se muestran a continuación:

v/portadora/pucchInterbanda2.php

**Parámetros del UE**

Seleccione la clase:

Ingrese Potencia de Transmisión :

**Parámetros eNodB**

Ingrese Figura de Ruido:

Ingrese Altura de la antena:

**Tipo de Agregacion:** CARRIER AGREGATION INTERBANDA

**Configuracion de Agregacion:** CA\_1A-19A

**Datos CC1:** Banda: 1 FC: 1945MHz BW:10.0MHz RB: 50

**Datos CC2:** Banda: 19 FC: 837.5MHz BW:15.0MHz RB: 75

Anillo de modulacion	CC1		CC2	
	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)
16 QAM	200.69	5.21	401.01	7.82
QPSK	471.68	11.79	942.48	17.69
<b>Total</b>		17.01		25.51

**Capacidad Total de la Agregación:** 42.52 Mbps

Figura 29: Cálculo de la capacidad para CA Interbanda con aplicativo

MODELO COST231 HATA	Portadoras		UNIDADES
PARÁMETRO	CC1	CC2	
Frecuencia de la Portadora fp	1945	837.5	MHz
Altura de la Antena de la Estación Base hBS	33	33	m
Altura de la Antena de la Estación Móvil hMS	1.7	1.7	m
Constante C=0 Suburbano, C=3 Urbano	3	3	dB
a(hMS)	0.3295650778	0.2161252929	dB
Máximas Pérdidas Permitidas Cerca de la BS	128.08	126.31	dB
Máximas Pérdidas Permitidas Borde de la Celda	115.08	113.31	
Máximas Pérdidas Permitidas Borde de la Celda	107.68	105.91	
log(d) QPSK	-0.3258141329	-0.0245348162	dB
log(d) 16QAM	-0.6977343436	-0.3964550269	
log(d) 64QAM	-0.9094427712	-0.6081634545	
Radio de cobertura QPSK	0.4722651156	0.9450726255	Km
Radio de cobertura 16 QAM	0.2005698531	0.4013700598	Km
Radio de cobertura 64 QAM	0.1231848301	0.2465111374	Km
Area Total	0.5794432138	2.3204355711	Km2
Area Cubierta por la celda Hexagonal	0.4749301788	1.9019031623	Km2
Area Cubierta por la celda Hexagonal	0.0650896779	0.2606578181	Km2
Area Cubierta por la celda Hexagonal	0.0394233571	0.1578745907	Km2

Clase del Equipo Movil	6	
------------------------	---	--

Capacidad en anillo QPSK	11.802.700,27	17.704.050,40	bps
Capacidad en anillo 16QAM	5.194.599,46	7.791.899,20	bps
Capacidad en anillo 64QAM	-	-	bps
<b>Capacidad Total</b>	<b>42.493.249,33</b>		<b>bps</b>

Figura 30: Cálculo de la capacidad para CA Interbanda con Hoja de Excel

4.3.1 Comparación de resultados CA Interbanda

la comparación de los resultados se muestra en las siguientes Tablas:

Cuadro 19: Comparación de resultados de capacidad para CA Interbanda

	Aplicativo				Excel			
	CC1		CC2		CC1		CC2	
	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)
16 QAM	200,69	5,21	401,01	7,82	200,56985	5,19460	401,37006	7,79190
QPSK	471,68	11,79	942,48	17,69	472,26512	11,80270	945,07263	17,70405

La diferencia de resultados entre cada uno de los métodos es:

Cuadro 20: Diferencia (%) de los resultados obtenidos para el cálculo de la capacidad en CA Interbanda

	CC1		CC2	
	Radio (m)	Capacidad (Mbps)	Radio (m)	Capacidad (Mbps)
16 QAM	0,06 %	0,30 %	-0,09 %	0,36 %
QPSK	-0,12 %	-0,11 %	-0,28 %	-0,08 %

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### CONCLUSIONES

1. Luego de comparar los resultados obtenidos con el aplicativo web y los resultados obtenidos mediante el cuadro de excel, pudimos verificar que la diferencia de los resultados para el cálculo de la capacidad entre las dos modalidades es menor al 1%.
2. Gracias a esto, podemos concluir que el aplicativo entrega resultados cuyos valores son muy aceptables para el cálculo de la capacidad en el enlace de subida en LTE Advanced con agregación de portadoras Intrabanda continua, discontinua e interbanda, siguiendo las recomendaciones del 3GPP.
3. El aplicativo desarrollado beneficia a la comunidad de la siguiente manera:
  - Es muy útil para la capacitación, enseñanza o entrenamiento de las personas interesadas en aprender este tema, ya que sigue paso a paso la metodología para realizar el cálculo.
  - Nos libera de memorizar el estandar, ya que todas las posibles configuraciones, combinaciones y limitantes dadas por el Release 11 están presentes en el aplicativo.
  - Ahorra bastante tiempo al usuario en el proceso del cálculo, ya que además incluye el modelo de propagación, el cálculo del SNR y el cálculo del LinkBudget para cada uno de los casos.
  - Al ser un aplicativo web, funciona en Windows (XP, 7 y 8), Linux, MAC y en equipos móviles como Tablet y teléfonos inteligentes.

### RECOMENDACIONES

- Se sugiere al usuario leer el estandar para la agregación de portadoras. Esta base ayudará al usuario a no perderse en el uso del aplicativo.
- El usuario deberá tener conocimientos previos de dimensionamiento de sistemas móviles para poder comprender varios de los términos y parámetros que se incluyen en el aplicativo.
- Este aplicativo, sólo contempla el cálculo de la capacidad en el enlace de subida. Para trabajos posteriores, se podría incluir el enlace de bajada basado en la misma metodología.



- Debido a que el aplicativo es web, es necesario que el usuario cuente una conexión a internet. Para trabajos posteriores se podría pensar en un software standalone para cada uno de los sistemas operativos que existen en el mercado.
- En este aplicativo se incluyen las canalizaciones según el Release 11 del 3GPP y no las distintas formas de canalización por región.



## BIBLIOGRAFÍA

- 
- [1] 3GPP. The Evolved Packet Core, Diciembre 2013. URL <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>.
- [2] 3GPP. Adax Solutions for the LTE-EPC, Diciembre 2013. URL [http://www.adax.com/applications/epc.html?source=PPC&gclid=CK\\_xrsDMrbsCFUtp7AodqXYAag](http://www.adax.com/applications/epc.html?source=PPC&gclid=CK_xrsDMrbsCFUtp7AodqXYAag).
- [3] Abhayawardhana, V.S., Wassell, I.J., Crosby, D., Sellars, M.P., and Brown, M.G. Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems. In *Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st*, volume 1, pages 73–77 Vol. 1, 2005.
- [4] Amit Kumar, Jyotsna Sengupta, Yun-fei Liu. 3GPP LTE: The future of mobile broadband. *Wireless Pers Commun*, 62(2):671–686, Febrero 2012.
- [5] Amitabha Ghosh, Rapeepat Ratasuk. *Essentials of LTE and LTE-A*. Cambridge University Press, Cambridge, CB2 8RU, UK, 1st edition, 2011.
- [6] Artiza Networks. E-UTRAN Architecture, Diciembre 2013. URL [http://www.artizanetworks.com/lte\\_tut\\_eut\\_arc.html](http://www.artizanetworks.com/lte_tut_eut_arc.html).
- [7] Bong Youl (Brian) Cho. LTE-Advanced (Rel-10/11). Nokia Siemens Networks, 2013.
- [8] Diógenes Marcano. Capítulo 6: Dimensionamiento de Redes Móviles. In *Dimensionamiento de Redes Móviles OFDMA*, Caracas, Venezuela, Febrero 2012.
- [9] Diógenes Marcano. Capítulo 3: Acceso Multiple OFDMA. In *Dimensionamiento de Redes Móviles OFDMA*, Caracas, Venezuela, Enero 2012.
- [10] Diógenes Marcano. Capítulo 4: Agregación de Portadoras. In *LTE4G - IMS - SON*, Caracas, Venezuela, Agosto 2013.
- [11] Diógenes Marcano. Capítulo 3: Aspectos generales de LTE. In *LTE4G - IMS - SON*, Caracas, Venezuela, Agosto 2013.
- [12] Diógenes Marcano. Capítulo 5: Sistemas MIMO. In *LTE4G - IMS - SON*, Caracas, Venezuela, Agosto 2013.
- [13] Eiko Seidel. LTE-A Carrier Aggregation Enhancements in Release 11. Technical report, Munich, Germany, Agosto 2012.

- [14] European Telecommunications Standards Institute (ETSI). 3GPP TS 36.211 version 8.8.0 Release 8. Technical report, 650 Route des Lucioles, F-06921 Sophia Antipolis Cedex - FRANCE, Octubre 2009.
- [15] Jeanette Wannstrom. LTE-Advanced. 3GPP, Mayo 2012.
- [16] Jose Alejandro Milla Cazana. Tesis para optar el Título de Ingeniero de las Telecomunicaciones. In *Diseño de una red LTE para el distrito del Callao*, Lima, Peru, Agosto 2012.
- [17] M. Lazhar Belhouchet, M Hakim Ebdelli. Session 5: LTE Technology Performance Evaluation. In *ITU/BDT Arab Regional Workshop on "4G Wireless Systems" LTE Technology*, Tunisia, Enero 2010.
- [18] Motorola, Inc. LTE RF Planning Guide, Version 1.0. Motorola, Inc., 2009.
- [19] Ramón Agusti, Francisco Bernardo, Fernando Casadevall, Ramon Ferrús, Jordi Pérez-Romero, Oriol Sallent. *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*. Fundación Vodafone España, España, 2010.
- [20] Rodrigo de Jesús Abrego Luna, Ernesto Neftalí Sánchez Zárate. Análisis de tráfico y cobertura de la red celular WCDMA en la unidad profesional Adolfo Lopez Mateos utilizando el concepto de antenas inteligentes. Technical report, Mexico D.F., Mexico, Agosto 2012. <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/11430>.
- [21] Romain Bourdon, GNU General Public License. Wampserver, APACHE MySql y PHP en Windows, Octubre 2013. URL <http://www.wampserver.es/>.
- [22] Yang Yang, Honglin Hu, Jing Xu, Guoqiang Mao. Relay Technologies for WiMAX and LTE-Advanced Mobile Systems. *IEEE Communications Magazine*, pages 100–105, Octubre 2009.
- [23] Yi Wu, Dongmei Zhang, Hai Jiang, and Ye Wu. A novel spectrum arrangement scheme for femto cell deployment in LTE macro cells. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium on*, pages 6–11. IEEE, 2009.



## COLOFÓN

This document was typeset using the typographical look-and-feel `classicthesis` developed by André Miede. The style was inspired by Robert Bringhurst's seminal book on typography "*The Elements of Typographic Style*". `classicthesis` is available for both  $\text{\LaTeX}$  and  $\text{\LyX}$ :

<http://code.google.com/p/classicthesis/>

Happy users of `classicthesis` usually send a real postcard to the author, a collection of postcards received so far is featured here:

<http://postcards.miede.de/>