



La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

***Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.***

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **ANÁLISIS DEL ALGORITMO DE HANDOVER REACTIVO Y PROACTIVO EN SISTEMAS FEMTOCELDA PARA LA TECNOLOGÍA 4G (LONG TERM EVOLUTION-ADVANCED)**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**ROBERT JONATHAN ACOSTA PLAZAS**  
(robonaco1@yahoo.com)

**DIRECTORA: DRA. MARTHA CECILIA PAREDES PAREDES**  
(cecilia.paredes@epn.edu.ec)

**Quito, febrero 2018**

## DECLARACIÓN

Yo, Robert Jonathan Acosta Plazas, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Robert Jonathan Acosta Plazas

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Robert Jonathan Acosta Plazas bajo mi supervisión.

---

Dra. Martha Cecilia Paredes Paredes  
DIRECTORA DEL PROYECTO

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradezco a quienes debo todo en mi vida, mis padres; Franklin y Gladys que siempre me han apoyado en las buenas y en las malas a pesar de los problemas que nunca faltan, agradezco la confianza depositada en mi persona y sobre todo la paciencia que me han tenido toda la vida.

A mis hermanos Gary y Rayza les agradezco todo lo que me han enseñado a pesar de ser menores siempre hay algo que me hacen dar cuenta y me hacen crecer como persona además del apoyo incondicional que siempre me han dado.

Gracias Dra. Cecilia Paredes por haberme aceptado como tesista.

A Cristina, te has vuelto muy importante en mi vida y en este trabajo de titulación también influiste mucho.

Finalmente agradezco a mi familia que siempre me han aconsejado y amigos que me han ayudado de alguna u otra manera en estos dos mundiales.

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto de titulación a:

Mis padres, Robert y Gladys, que a pesar de las dificultades siempre han sabido hacer bien las cosas para cuidar e instruir de la mejor manera a mis hermanos y a mí.

Mis hermanos, Gary y Rayza, sin ustedes nada sería lo mismo.

Mi abuelita Marianita que siempre confió en mí, ¡te cumplí abuelita!, mi tío Iván, sé que algún rato volveremos a vernos.

Todas las personas familia y amigos que estuvieron en mi vida a lo largo de este tiempo.

## CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
RESUMEN.....	XII
PRESENTACIÓN.....	XIV

### CAPÍTULO 1: SISTEMA CELULAR

1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ASPECTOS GENERALES.....	3
1.2.1 SISTEMA CELULAR.....	3
1.2.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA CELULAR.....	4
1.2.3 ÁREA DE COBERTURA DE UNA CELDA.....	5
1.2.3.1 Macrocela.....	5
1.2.3.2 Microcela.....	6
1.2.3.3 Picocela.....	6
1.2.3.4 Femtocela.....	6
1.2.4 REDES HOMOGÉNEAS Y REDES HETEROGÉNEAS.....	7
1.2.4.1 Red homogénea.....	7
1.2.4.2 Red heterogénea.....	8
1.2.4.2.1 Picoceldas.....	8
1.2.4.2.2 Femtoceldas.....	9
1.3 LONG TERM EVOLUTION ADVANCED (LTE-A).....	10
1.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LTE-A.....	12
1.3.2.1 Núcleo de la red ( <i>Core Network</i> ).....	15
1.3.2.1.1 Mobile Management Entity (MME).....	16

1.3.2.1.2	Serving Gateway (S-GW).....	16
1.3.2.1.3	Packet Data Network Gateway (P-GW).....	16
1.3.2.1.4	Home Subscriber Service (HSS).....	16
1.3.2.1.5	Policy and Charging Rules Function (PCRF).....	17
1.3.2.2	Red de Acceso ( <i>Access Network</i> ).....	17
1.3.2.3	Interfaces.....	17
1.3.2.3.1	Interfaz Uu.....	18
1.3.2.3.2	Interfaz S1.....	18
1.3.2.3.3	Interfaz X2.....	18
1.3.2.3.4	Interfaces S5 y S8.....	19
1.3.2.3.5	Interfaz S6a.....	19
1.3.2.3.6	Interfaz S11.....	19
1.3.2.3.7	Interfaz SGi.....	19
1.3.3	CAPA FÍSICA DE LTE-A.....	20
1.3.3.1	Agregación de portadoras.....	20
1.3.3.1.1	Primary Component Carrier (PCC).....	21
1.3.3.1.2	Secondary Component Carrier (SCC).....	21
1.3.3.2	Multiple Input Multiple Output (MIMO).....	23
1.3.3.2.1	Mejoras en enlace de bajada.....	24
1.3.3.2.2	Mejoras en enlace de subida.....	25
1.3.3.3	<i>Relaying</i> .....	25
1.3.4	SOPORTE DE FEMTOCELDAS EN LTE-A.....	27
1.4	TRASPASO ( <i>HANDOVER</i> ).....	28
1.4.1	TIPOS DE <i>HANDOVER</i> .....	29
1.4.1.1	Según la tecnología.....	29
1.4.1.2	<i>Softer-Handover</i> .....	29
1.4.1.3	<i>Soft-handover</i> .....	30
1.4.1.4	<i>Hard-handover</i> .....	31
1.4.1.4.1	Intra-frecuencia.....	31
1.4.1.4.2	Inter-frecuencia.....	31

## **CAPÍTULO 2: ESCENARIO DE ANÁLISIS DEL ALGORITMO DE *HANDOVER* PARA 4G (LTE-A)**

2.1 ESTRATEGIAS DE TRASPASO.....	33
2.1.1 TRASPASO REACTIVO.....	33
2.1.2 TRASPASO PROACTIVO.....	34
2.2 ESCENARIO DE TRASPASO.....	34
2.2.1 PROCEDIMIENTO DE TRASPASO.....	35
2.2.1.1 Identificación de la celda.....	35
2.2.1.2 Control de acceso.....	37
2.2.1.3 Búsqueda de la celda.....	38
2.2.1.4 Selección o re-selección de celda.....	40
2.2.1.5 Decisión de traspaso.....	42
2.2.1.6 Ejecución del traspaso.....	42
2.2.2 SECUENCIA DE MENSAJES DE SEÑALIZACIÓN.....	43
2.2.2.1 Traspaso entre macroceldas.....	44
2.2.2.2 Traspaso entre macro y femtoceldas.....	46
2.2.2.2.1 Traspaso hand-in.....	47
2.2.2.2.2 Traspaso inter – FAP.....	47
2.2.2.2.3 Traspaso hand-out.....	48

## **CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN DEL ESCENARIO**

3.1 ESCENARIO DE SIMULACIÓN.....	50
3.2 IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB.....	53
3.2.1 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA.....	54
3.2.1.1 Función “celdas”.....	54
3.2.1.2 Función “trayectoria”.....	55
3.2.1.3 Función “distancia_celdas”.....	56
3.2.1.4 Función “ <i>inout</i> ”.....	56
3.2.1.4.1 Funciones “handin_macro” y “handin_femto”.....	57

3.2.1.4.2 Funciones “macro” y “femto” .....	58
3.2.1.4.3 Funciones “handout_macro” y “handout_femto” ...	59
3.2.1.5 Función “sumatoria” .....	60
3.2.1.6 Script “main” .....	61
3.3 RESULTADOS .....	62
3.3.1 RESULTADOS SIN RESTRICCIONES .....	63
3.3.2 RESULTADOS CON RESTRICCIONES .....	65

## **CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

4.1 CONCLUSIONES .....	68
4.2 RECOMENDACIONES .....	68

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

ANEXO 1: Código de simulación implementado .....	73
--	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1: SISTEMA CELULAR

Figura 1. 1 Líneas activas de telefonía móvil en Ecuador (Enero 2017) [2].....	2
Figura 1. 2. Evolución las líneas activas móviles por tecnología (Enero 2017) [3]...3	3
Figura 1. 3 Geometría de la celda.....	5
Figura 1. 4 Tamaños de celda en función de su radio de cobertura [8].....	6
Figura 1. 5 Red homogénea conformada con macroceldas [10].....	7
Figura 1. 6 Arquitectura de la tecnología LTE [13].....	15
Figura 1. 7 Arquitectura LTE: conexión E-UTRAN con EPC [14].....	17
Figura 1. 8 Agregación de portadoras [15].....	20
Figura 1. 9 Escenarios de agregación de portadoras [16].....	22
Figura 1. 10 Sistemas SISO, SIMO, MISO, MIMO (2x2).....	24
Figura 1. 11 <i>Codewords</i> y <i>layers</i> para 8 puertos de antena [12].....	24
Figura 1. 12 Terminología para Relaying [9].....	27
Figura 1. 13 Soporte de femtoceldas en la arquitectura E-UTRAN [17].....	27
Figura 1. 14 <i>Handover</i> o traspaso.....	28
Figura 1. 15 Traspaso horizontal y vertical.....	29
Figura 1. 16 <i>Softer-handover</i> [23].....	30
Figura 1. 17 <i>Soft handover</i> [23].....	30
Figura 1. 18 Traspaso de llamadas Intra-frecuencia [18].....	31
Figura 1. 19 Traspaso de llamadas Inter-frecuencia [18].....	32

### CAPÍTULO 2: ESCENARIO DE ANÁLISIS DEL ALGORITMO DE *HANDOVER* PARA 4G (LTE-A)

Figura 2. 1 Problema de confusión en presencia de femtoceldas [17].....	36
Figura 2. 2 Señalización de búsqueda de la celda y medición [17].....	39
Figura 2. 3 Traspaso entre macroceldas [25].....	44

Figura 2. 4 Diagrama de secuencia de mensajes del proceso de traspaso entre macroceldas [25].....	46
Figura 2. 5 Escenario de <i>handover</i> en redes femtocelda [25].....	47
Figura 2. 6 Flujo de mensajes de señalización del traspaso de una macrocelda hacia una femtocelda o entre femtoceldas [25].....	48
Figura 2. 7 Flujo de mensajes de señalización del traspaso desde una femtocelda hacia una macrocelda [25].....	49

### **CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN DEL ESCENARIO**

Figura 3. 1 Sección de macrocelda.....	50
Figura 3. 2 Trayectoria de un usuario.....	52
Figura 3. 3 Estructura del programa.....	53
Figura 3. 4 Función “celdas”.....	54
Figura 3. 5 Aleatoriedad del movimiento.....	55
Figura 3. 6 Función “trayectoria”.....	55
Figura 3. 7 Función “distancia_celdas”.....	56
Figura 3. 8 Funciones “ <i>handin_macro</i> ” y “ <i>handin_femto</i> ”.....	58
Figura 3. 9 Funciones “ <i>handout_macro</i> ” y “ <i>handout_femto</i> ”.....	59
Figura 3. 10 Función “ <i>inout</i> ”.....	60
Figura 3. 11 Función “sumatoria”.....	61
Figura 3. 12 <i>Script “main”</i> .....	62
Figura 3. 13 Número de traspasos vs Número de usuarios (sin restricciones).....	64
Figura 3. 14 Número de traspasos vs número de femtoceldas (sin restricciones)..	65
Figura 3. 15 Número de traspasos vs número de usuarios (con restricciones).....	66
Figura 3. 16 Número de traspasos vs número de femtoceldas (con restricciones)..	67

## ÍNDICE DE TABLAS

### **CAPÍTULO 1: SISTEMA CELULAR**

Tabla 1. 1 Evolución de los Sistemas Celulares.....	11
Tabla 1. 2 Requerimientos para tecnología 4G.....	13
Tabla 1. 3 Parámetros de <i>LTE-Advanced</i> .....	14

### **CAPÍTULO 2: ESCENARIO DE ANÁLISIS DEL ALGORITMO DE *HANDOVER* PARA 4G (LTE-A)**

Tabla 2. 1 Escenarios para la ejecución del traspaso en redes LTE-A con macro y femtoceldas [17].....	43
---	----

### **CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN DEL ESCENARIO**

Tabla 3. 1 Restricción de las femtoceldas.....	63
--	----

## RESUMEN

El número de usuarios que requieren el servicio de datos móviles en la actualidad está aumentando constantemente, por lo que el uso de la tecnología celular de cuarta generación (4G) *Long Term Evolution - Advanced* (LTE-A) necesita de cierta ayuda para satisfacer esta demanda. Como es conocido, éste servicio se satisface con la ayuda de las comunicaciones Wireless Fidelity (WiFi), mediante la conexión de un módem a la red de acceso que brinda el servicio de Internet al usuario final. El crecimiento constante de usuarios conectados representa un problema debido a que la velocidad de uso de datos disminuye de la misma manera que lo hace la calidad de servicio de alguna aplicación ya sea en tiempo real o no.

Un sistema celular tradicional utiliza estaciones base de gran área de cobertura conocidas como macroceldas, de tal manera que puedan brindar servicio a ciudades, barrios, etc; sin embargo si la capacidad de la macrocelda aumenta mucho los usuarios podrían experimentar retardos al usar Internet, disminución de la calidad de servicio en video-llamadas, etc. Además, podría existir zonas de sombra en las cuales los niveles de la señal son demasiado débiles, lo que generaría reclamos a las operadoras que brindan el servicio, debido a la falta de cobertura.

Para solucionar este problema existen estaciones base de pequeña área de cobertura y de baja potencia que se conocen como femtoceldas, las cuales son muy útiles para ambientes interiores tales como empresas pequeñas u hogares. Una femtocelda es físicamente similar a un router o un modem WiFi que de igual manera se conecta a la red de acceso que brinda el servicio de Internet al usuario final, pero se diferencia en que es una estación base a la que pueden asociarse pocos usuarios. Además es beneficioso ya que permiten cubrir zonas de sombra.

Al disponer de sistemas heterogéneos (macroceldas y femtoceldas), existirá un mayor número de trasposos (*handover*) entre macrocelda y femtocelda, femtocelda y macrocelda, incluso entre varias femtoceldas, esto debido a la movilidad del

usuario. Dichos trasposos pueden disminuir la calidad de servicio y la velocidad de datos.

El presente trabajo de titulación dará un panorama más claro sobre el proceso de handover en ambientes heterogéneos (macrocelas y femtocelas) para la tecnología 4G (LTE-A). Además se evalúa el algoritmo tradicional de handover (reactivo y proactivo) mediante simulaciones en MATLAB.

De las simulaciones realizadas, de acuerdo al escenario definido, se concluye que el algoritmo de handover reactivo es mejor que proactivo en lo que al uso de aplicaciones en tiempo real respecta, mientras que para las aplicaciones normales se puede usar el handover proactivo sin afectar la calidad de servicio.

## PRESENTACIÓN

El presente proyecto de titulación contiene un análisis de las estrategias de traspaso reactivo y proactivo en sistemas femtocelda para la tecnología 4G (*Long Term Evolution Advanced*) por lo que el proyecto se ha dividido en 4 capítulos.

En el primer capítulo se describe el sistema celular, los parámetros importantes (arquitectura, entidades de control, interfaces) de la tecnología de cuarta generación LTE-A, se definen los diferentes tipos de celdas y se establecen diferencias entre ellas. Además se describe brevemente el traspaso entre celdas.

En el segundo capítulo se analiza el procedimiento para ejecutar un traspaso entre macroceldas y femtoceldas y se describen los mensajes de señalización generados para ejecutar el traspaso.

El tercer capítulo describe el procedimiento y el código generado en MATLAB para contabilizar los traspasos generados en el escenario heterogéneo, tomando en cuenta la trayectoria del usuario dentro de las celdas y del acceso que tenga hacia las femtoceldas. Además se presentan los resultados obtenidos y se compara el número de traspasos que necesitan los usuarios tanto para el algoritmo reactivo como proactivo en función del número de usuarios conectados a una femtocelda.

El cuarto capítulo trata de las conclusiones y recomendaciones del presente proyecto de titulación.

# CAPÍTULO 1

## SISTEMA CELULAR

### 1.1 INTRODUCCIÓN

La tecnología celular crece exponencialmente debido a las exigencias de los usuarios ya que cada uno de ellos ha pasado de utilizar la telefonía tradicional o fija hacia la telefonía celular. Así mismo, las llamadas telefónicas y los mensajes de texto han quedado a un lado debido a que hoy por hoy los usuarios prefieren cada vez más el servicio de datos ofrecido por los operadores de telefonía celular o el Internet a través de redes WiFi (*Wireless Fidelity*).

El servicio WiFi obtiene acceso a Internet mediante un módem ubicado en los hogares o instituciones donde se necesite el servicio. El módem se conecta a la red de acceso por lo general a través de la tecnología ADSL<sup>1</sup> (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) [1], el cual es brindado por el operador contratado. Actualmente, cada usuario se conecta a Internet no solo en un dispositivo, es decir, un usuario puede navegar en Internet en su computador y a su vez conectarse a redes sociales en su teléfono celular, por lo que se puede afirmar que actualmente hay más dispositivos que usuarios con lo que las redes actuales no podrían brindar un servicio óptimo a cada dispositivo ya que pueden experimentar intermitencia, disminución en la velocidad de navegación, pérdida total de la señal, etc. En resumen, tener muchos dispositivos conectados puede saturar la red y los operadores deberían buscar alternativas para mejorar el servicio, tales como instalar estaciones base de gran capacidad denominadas macroceldas<sup>2</sup> con el fin de satisfacer los problemas de los usuarios. Sin embargo, esta alternativa resulta costosa para los operadores además de presentar problemas de interferencia [1].

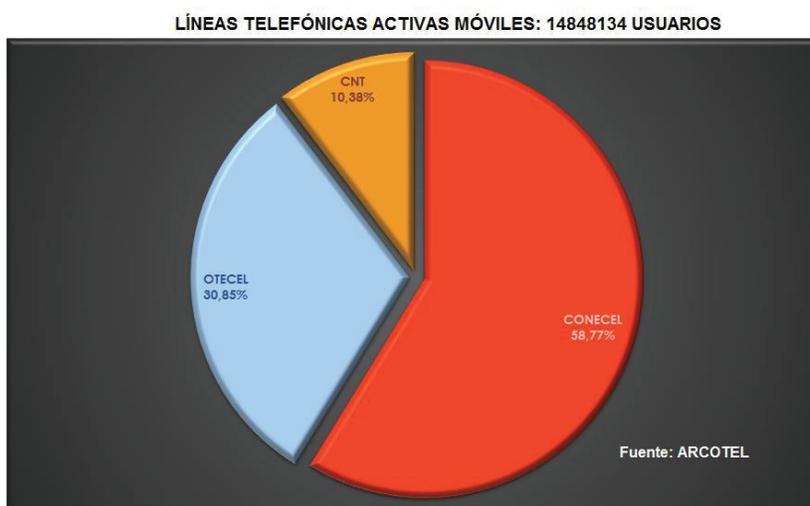
---

<sup>1</sup> ADSL: tecnología que permite al usuario conectarse a Internet mediante su línea telefónica.

<sup>2</sup> Macrocela: estación base de gran tamaño que cubren áreas de decenas de kilómetros.

Una solución viable consiste en la implementación de sistemas femtocelda<sup>3</sup>, la cual coloca una estación base con un área de cobertura más pequeña que la de una macrocelda, que tenga poca potencia de transmisión y que se conecte a la misma red de acceso [1]. Consecuentemente, cada usuario podría utilizar los servicios que brinda la femtocelda y así obtener mayor velocidad de conexión. De hecho, se puede colocar la femtocelda en cualquier lugar de un hogar o empresa, cubriendo así las zonas de sombra donde la gran área de cobertura de la macrocelda no pueda brindar servicio.

Las ventajas de utilizar femtoceldas son: (1) mejoramiento del tráfico de las macroceldas, (2) evitar que los operadores instalen estaciones base de gran tamaño y (3) el usuario obtenga mejoras en la conectividad. Cabe recalcar, que ésta es una buena solución debido a que el uso del servicio de datos ha aumentado en los últimos años. Para enero de 2017, Ecuador tenía 14'848.134 usuarios de telefonía celular, de los cuales el 58,77% utilizaron el servicio de la operadora CONECEL (Claro), el 30,85% de OTECEL (Movistar) y el 10,38% de CNT (Corporación Nacional de Telecomunicaciones), tal como se observan las estadísticas presentadas en la Figura 1. 1.



**Figura 1. 1** Líneas activas de telefonía móvil en Ecuador (Enero 2017) [2]

<sup>3</sup> Femtocelda: estación base pequeña de baja potencia para el uso en ambientes interiores.

En la Figura 1. 2 se presenta la evolución del número de líneas activas de telefonía celular en Ecuador desde el año 2008 hasta diciembre de 2016 [3], donde se observa que los usuarios de la tecnología GSM (*Global System for Mobile Communication*) ha disminuido con respecto a las tecnologías que brindan acceso a Internet como UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) y LTE (*Long Term Evolution*). Con estos datos, puede concluirse que el número de usuarios que demandan acceso a Internet es cada vez mayor, por lo que requieren de mayor velocidad en sus conexiones para acceder a servicios multimedia y sobretodo esperar que el servicio sea ininterrumpido. Como resultado, el uso de femtoceldas es una buena solución a fin de cubrir las necesidades de los usuarios.



Figura 1. 2. Evolución las líneas activas móviles por tecnología (Enero 2017) [3]

## 1.2 ASPECTOS GENERALES

### 1.2.1 SISTEMA CELULAR

Un sistema celular proporciona un servicio de telefonía e Internet, a un determinado número de usuarios, para lo cual se ubican estaciones base en lugares específicos donde se requiera brindar dicho servicio. Además, cubre un área con algún tipo de tecnología, es decir *“un sistema celular es la aplicación de un conjunto de canales*

*en un entorno concreto (dando servicio a un cierto número de móviles fijo), de modo que estos canales puedan ser reutilizados en los entornos adyacentes” [4].*

Los requerimientos de un sistema celular ha cambiado en algunos aspectos a través de los años, pero en la actualidad los principales requerimientos son los siguientes [5]:

- a. Capacidad para atender a un gran número de usuarios: A medida que la tecnología avanza, los usuarios exigirán acceso a Internet en más de un dispositivo.
- b. Uso eficiente del espectro: El espectro es un recurso muy limitado, por lo que las diferentes técnicas de acceso al medio son útiles.
- c. Capacidad de cobertura a nivel nacional e internacional: El usuario demanda conectividad ininterrumpida en cualquier lugar.
- d. Servicio de telefonía normal y servicios especiales: Los usuarios demandan servicios de Internet mediante un plan de datos, dejando casi de lado la telefonía y la mensajería tradicional.
- e. Calidad de servicio: Es un objetivo muy importante, ya que mientras mejor es la calidad de servicio, los operadores adquieren más usuarios.

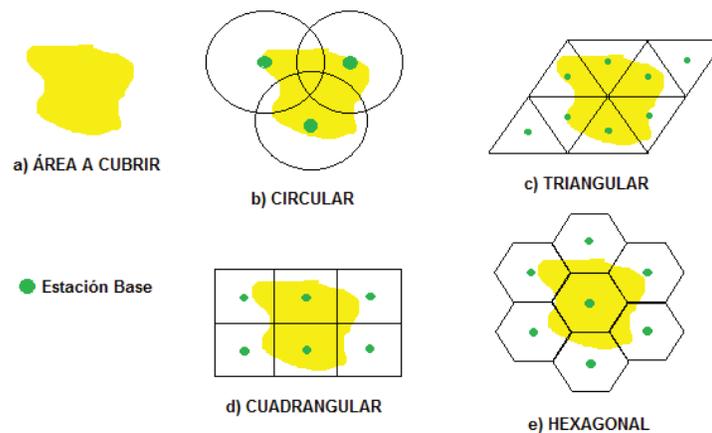
### **1.2.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA CELULAR**

Los elementos básicos de un sistema celular son la estación base y el equipo de usuario (UE). De manera general se explica estos elementos, que también son elementos de la arquitectura de la tecnología de sistemas celulares de cuarta generación, cabe recalcar que más adelante se detalla de mejor manera dichos elementos.

- Estación base: es un punto de transmisión y recepción que cubre un área en específico donde se requiere dar algún servicio [6].
- Equipo de usuario: es el terminal de usuario, por ejemplo un teléfono celular [6].

### 1.2.3 ÁREA DE COBERTURA DE UNA CELDA

El concepto de celda es teórico, el cual consiste en dividir el área donde se dará servicio en áreas más pequeñas; es decir, colocar varias estaciones base también conocidas como BS o BTS (*Base Station o Base Transceiver Station*) con un radio de cobertura determinado a fin de cubrir dicha área [4]. En la práctica, no existen celdas de una forma específica, ya que la naturaleza presenta una forma imperfecta [7], de hecho se puede tener varios tipos de celda dependiendo de su geometría (Figura 1. 3). Sin embargo, idealmente se considera que las celdas son de forma hexagonal ya que permite cubrir el área de servicio sin dejar espacios vacíos y a su vez ayudan a que las estaciones base adyacentes estén equidistantes [4].



**Figura 1. 3** Geometría de la celda [4]

Además de clasificar a las celdas por su geometría, se las puede clasificar por su radio de cobertura o área de trabajo donde se brinda el servicio. A continuación se describen brevemente cada una de ellas:

#### 1.2.3.1 Macrocelda

Una macrocelda es una celda de gran capacidad generalmente con un radio de cobertura que va desde 1,5 hasta 20 Km. Este tipo de celda es muy útil en ambientes donde los usuarios se mueven a gran velocidad o áreas grandes poco pobladas [4], [7].

### 1.2.3.2 Microcelda

Una microcelda es una celda relativamente pequeña, cuyo radio de curvatura varía entre 300 y 700 m, utilizadas tanto en ambientes exteriores como en interiores, por ejemplo centros comerciales, aeropuertos, etc. [4], [8].

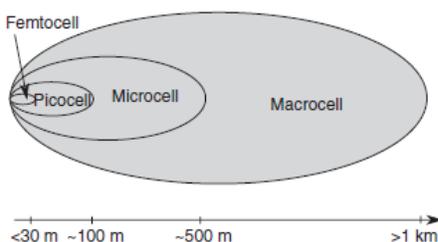
### 1.2.3.3 Picocelda

Una picocelda es una celda destinada a usarse en ambientes interiores de alta densidad como oficinas o áreas residenciales cuyo radio de cobertura va desde 30 hasta 300 m [4], [7], [8].

### 1.2.3.4 Femtocelda

Una femtocelda es una celda con radio de cobertura menor a 30 m, con el objetivo de mejorar la cobertura en zonas de sombra<sup>4</sup>, donde el usuario tiene baja calidad de señal. Por lo general, las femtoceldas son utilizadas en ambientes interiores con un número limitado de usuarios [7], [8], [9].

En la Figura 1. 4 se puede observar la relación de tamaño entre las celdas mencionadas [8].



**Figura 1. 4** Tamaños de celda en función de su radio de cobertura [8]

<sup>4</sup> Zona de sombra: zona donde la señal llega demasiado débil debido a que atraviesa muchos obstáculos o porque está muy lejos [26].

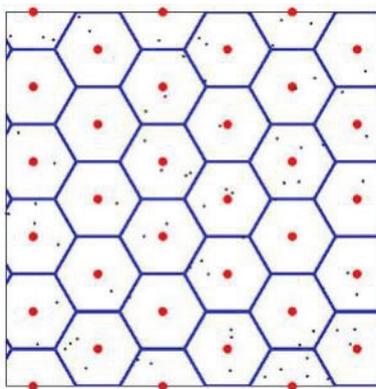
## 1.2.4 REDES HOMOGÉNEAS Y REDES HETEROGÉNEAS

La descripción de los tipos de celda muestra que se tiene una jerarquía entre ellas, es decir que se trabaja en orden desde macrocelda hasta las femtoceldas, pero también se puede trabajar en conjunto, por ejemplo macroceldas con femtoceldas. Dependiendo de esto surgen los conceptos de redes homogéneas y redes heterogéneas, las cuales se detallan a continuación:

### 1.2.4.1 Red homogénea

Una red homogénea es aquella arquitectura que utiliza un único tipo de celda y sus estaciones base transmiten a una potencia común independientemente de las tecnologías celulares [10], es decir, una red homogénea utiliza solo macroceldas, microceldas, picoceldas o femtoceldas.

En la Figura 1. 5 se observa una red homogénea con celdas hexagonales, donde los puntos rojos representan las estaciones base y las líneas azules el área de cobertura de una macrocelda.



**Figura 1. 5** Red homogénea conformada con macroceldas [10].

### 1.2.4.2 Red heterogénea

Una red heterogénea es aquella red que utiliza celdas de diferente área de cobertura, como por ejemplo: macroceldas con picoceldas o con femtoceldas [10].

En ambientes interiores, para aumentar o mejorar la zona de cobertura de la macrocelda es indispensable elegir entre una picocelda o una femtocelda. Para un buen diseño, la elección debe contemplar un análisis más detallado de las diferencias entre ellas.

#### 1.2.4.2.1 Picoceldas

Una picocelda es una estación base similar a un AP (*Access Point*<sup>5</sup>), con antenas que radian a potencia baja, además posee una capacidad menor a la que tiene la macrocelda y microcelda. Por lo general, tiene un antena omnidireccional y se conecta a la red core<sup>6</sup> con un cable Ethernet o con fibra óptica [8].

Las ventajas y desventajas del uso de picoceldas se describen a continuación:

*Ventajas:*

- Costo de la picocelda e instalación de la misma son más bajos que los costos de una celda de mayor cobertura (macrocelda).
- Uso exclusivo para ambientes interiores con el fin de aumentar la capacidad en lugares con alta densidad de usuarios, por ejemplo centros comerciales, aeropuertos, etc.

---

<sup>5</sup> Access Point: dispositivo que integra una antena para enlazar al usuario con el Internet en la tecnología *WiFi* mediante la interfaz aire [8].

<sup>6</sup> Red core: realiza el transporte de información, tanto para tráfico como de señalización y contiene la inteligencia del sistema [27].

*Desventaja:*

- Es necesario colocar muchas picoceldas para cubrir el área de cobertura deseada debido a las reflexiones y difracciones de las paredes y obstáculos dentro de la edificación.

#### 1.2.4.2.2 *Femtoceldas*

Una femtocelda es una picocelda limitada a trabajar en un alcance máximo de 30 m, la cual es instalada directamente por el usuario dentro de su hogar, además tiene todas las funcionalidades de una picocelda y de una BSC (*Base Station Controller*<sup>7</sup>).

Con las femtoceldas, todas las comunicaciones se transmiten hacia la red del operador mediante Internet. Adicionalmente, las femtoceldas pueden configurarse para trabajar con acceso hacia un grupo abierto de usuarios, un grupo cerrado de usuarios o de manera híbrida.

- Acceso hacia un grupo abierto: se refiere a que cualquier usuario de la macrocelda puede hacer un traspaso o *handover*<sup>8</sup> hacia la femtocelda.
- Acceso hacia un grupo cerrado: solamente un grupo determinado de usuarios puede realizar el traspaso de la macrocelda hacia la femtocelda.
- Acceso híbrido: la femtocelda permite realizar el traspaso a cualquier usuario pero se brindará prioridad a los usuarios que forman parte del grupo cerrado.

Las principales ventajas y desventajas del uso de femtoceldas se enumeran en las siguientes líneas:

---

<sup>7</sup> *Base Station Controller*: administra los recursos de radio de un grupo de BTS principalmente para mantener las llamadas [14].

<sup>8</sup> *Handover*: proceso de traspaso de una celda a otra celda adyacente.

*Ventajas:*

- Las femtoceldas son instaladas por el usuario dentro de su hogar asegurando así una buena cobertura en interiores.
- Desde el punto de vista del operador son una solución barata, ya que el usuario es quien paga por la femtocelda, además que ayuda a aumentar la capacidad del sistema.
- Cuando el usuario llega a su hogar deja de usar el servicio de la macrocelda para conectarse al servicio de la femtocelda mediante un proceso de *handover*.

*Desventajas:*

- Tienen un número limitado de usuarios generalmente entre 4 y 6.
- El número de trasposos o *handover* puede ser muy grande e innecesarios.

### **1.3 LONG TERM EVOLUTION ADVANCED (LTE-A)**

Las tecnologías celulares se han desarrollado de acuerdo a las necesidades del usuario, en la actualidad los operadores buscan proveer un servicio con mayor velocidad, cubrir lugares que no presenten zonas de sombra, es decir, brindar cobertura en todo lugar y con buena calidad en servicio de llamadas, etc.

A lo largo del tiempo, las diferentes tecnologías celulares se han clasificado en generaciones, entonces, la primera generación (1G) era totalmente analógica; mientras que en la actualidad se cuenta con la cuarta generación (4G). Cada generación cuenta con diferentes tipos de tecnologías.

A manera de conocimiento general, en la Tabla 1. 1 se muestra la evolución de las distintas tecnologías celulares con sus respectivas velocidades de transmisión ( $V_{tx}$ )

tanto en los enlaces de subida (*UL, UpLink*) como de bajada (*DL, DownLink*) y los servicios que ofrecen.

**Tabla 1. 1** Evolución de los Sistemas Celulares

<b>Generación</b>	<b>Nombre/Abreviación</b>	<b>Vtx UL y DL</b>	<b>Servicios</b>
1ª generación (1980 a 1995)	<p><b>NMT</b> (<i>Nordic Mobile Telephone</i>) en Finlandia, Suecia, Noruega, Dinamarca.</p> <p><b>AMPS</b> (<i>Advanced Mobile Telephone System</i>) en Estados Unidos de América.</p> <p><b>TACS</b> (<i>Total Access Communication System</i>) en Reino Unido, Irlanda.</p> <p>RADIOCOM 2000 en Francia.</p>	<p><b>AMPS</b></p> <p>DL 1.9 Kbps</p> <p>UL 1.9 Kbps</p>	<p>Sistemas analógicos solamente para proveer servicio de voz[11].</p> <p>Equipos de usuario de gran tamaño.</p>
2ª generación (desde 1992)	<p><b>GSM</b> (<i>Global System for Mobile Communication</i>)</p> <p><b>DAMPS</b> (<i>Digital AMPS</i>), resp. IS136; USA</p> <p><b>PCS 1900</b> (<i>Personal Communication System</i>) en Estados Unidos de América.</p> <p><b>PDC</b> (<i>Personal Digital Communication</i>)</p> <p><b>GPRS</b> (<i>General Packet Radio Service</i>); conocida como generación 2,5</p> <p><b>EDGE</b> (<i>Enhanced Data rates for Global Evolution</i>); conocida como generación 2,75</p>	<p><b>GSM</b></p> <p>DL 9.6 kbps</p> <p>UL 9.6 kbps</p> <p><b>GPRS</b></p> <p>DL 57.6 kbps</p> <p>UL 28.8 kbps</p>	<p>Sistemas digitales que proveen servicio de voz, datos, mensajes de texto y <i>roaming</i><sup>9</sup>, mensajes multimedia[11].</p> <p>Equipos de usuario más pequeños.</p>
	<b>CDMA 2000</b> (1xEV-DO, 1xEV-DV)	<p><b>CDMA 2000</b></p> <p>DL 144 kbps</p>	Convergencia de voz y datos con

<sup>9</sup> *Roaming*: término utilizado cuando se usa un red móvil distinta a la principal, generalmente en redes extranjeras.

3ª generación (desde 2004)	<b>UMTS</b> ( <i>Universal Mobile Telecommunication System</i> ) <b>HSPA</b> ( <i>High Speed Packet Access</i> ) <b>HSPA+</b> ; conocida como generación 3,5	UL 144 kbps  <b>UMTS</b> DL 384 kbps UL 384 kbps  <b>HSPA+</b> DL 28 Mbps UL 11.5 Mbps	acceso inalámbrico a Internet [11].  Acceso y transmisión de alta velocidad.
4ª generación	<b>LTE</b> ( <i>Long Term Evolution</i> ); conocida como generación 3,9 <b>LTE-A</b> ( <i>Long Term Evolution - Advanced</i> )	<b>LTE</b> DL 300 Mbps UL 75 Mbps  <b>LTE-A</b> DL 1 Gbps UL 500 Mbps	Tecnología totalmente IP <sup>10</sup> ( <i>Internet Protocol</i> ), enfocado a servicios de video de alta calidad con tasas de transmisión altas[11].

### 1.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LTE-A

En la arquitectura LTE (*Long Term Evolution*), considerada como tecnología de generación 3.9 (Tabla 1. 1), las femtoceldas ya se consideran parte de su arquitectura y se las denomina HeNB<sup>11</sup> (*Home evolved Node B*), las cuales soportan servicio multimedia *multicast*<sup>12</sup> y *broadcast*<sup>13</sup> (MBMS, *Multimedia Broadcast Multicast Services*). Sin embargo, no cumplió los requerimientos para considerarlo como tecnología de cuarta generación, dichos requerimientos se exponen en la Tabla 1. 2 [12].

<sup>10</sup> IP: protocolo de Internet para transmisión de datos por medio de una red.

<sup>11</sup> HeNB: *Home evolved Node B*, nombre técnico con el que se refiere a una femtocelda.

<sup>12</sup> *Multicast*: método de envío simultáneo de paquetes que serán recibidos por un determinado grupo de receptores.

<sup>13</sup> *Broadcast*: método de envío simultáneo de paquetes desde un nodo emisor hacia varios nodos receptores.

**Tabla 1. 2** Requerimientos para tecnología 4G

<b>Parámetro</b>	<b>Downlink</b>	<b>Uplink</b>
Ancho de banda	40MHz	
Eficiencia espectral pico (bps/Hz)	15	6.75
Eficiencia espectral promedio (bps/Hz/celda)	3 ( <i>hotspot</i> en el interior) 2.6 (Micro urbano) 2.2 (Macro urbano) 1.1 (Macro rural)	2.25 ( <i>hotspot</i> en el interior) 1.8 (Micro urbano) 1.4 (Macro urbano) 0.7 (Macro rural)
Eficiencia espectral por el usuario en el borde de la celda (bps/Hz)	0.1 ( <i>hotspot</i> en el interior) 0.075 (Micro urbano) 0.06 (Macro urbano) 0.04 (Macro rural)	0.07 ( <i>hotspot</i> en el interior) 0.05 (Micro urbano) 0.03 (Macro urbano) 0.015 (Macro rural)
Calidad de VoIP <sup>14</sup> (usuario/celda/MHz)	50 ( <i>hotspot</i> en el interior) / 40 (Micro urbano y Macro urbano) / 30 (Macro rural)	
Latencia en el plano de usuario (ms)	10	
Latencia en el plano de control (ms)	100	

Por esta razón, se ha considerado ciertas técnicas (que se detallarán más adelante) a fin de cumplir con los requerimientos de 4G como agregación de portadoras, mejoras en el enlace ascendente y descendente MIMO<sup>15</sup> (*Multiple Input Multiple Output*), *Relay Nodes* (RN) y técnicas de coordinación de interferencia; las cuales facilitan la implementación de femtoceldas. En la Tabla 1. 3 se presentan las características de LTE-A, donde se puede apreciar que la técnica de acceso usada es para el UL es *Clustered SC-FDMA* (*Clustered Single Carrier- Frequency Division*

<sup>14</sup> VoIP: *Voice over Internet Protocol*, servicio de transmisión de voz mediante el protocolo internet.

<sup>15</sup> MIMO: *Multiple Input Multiple Output*, técnica de diversidad que utiliza varias antenas de transmisión y recepción.

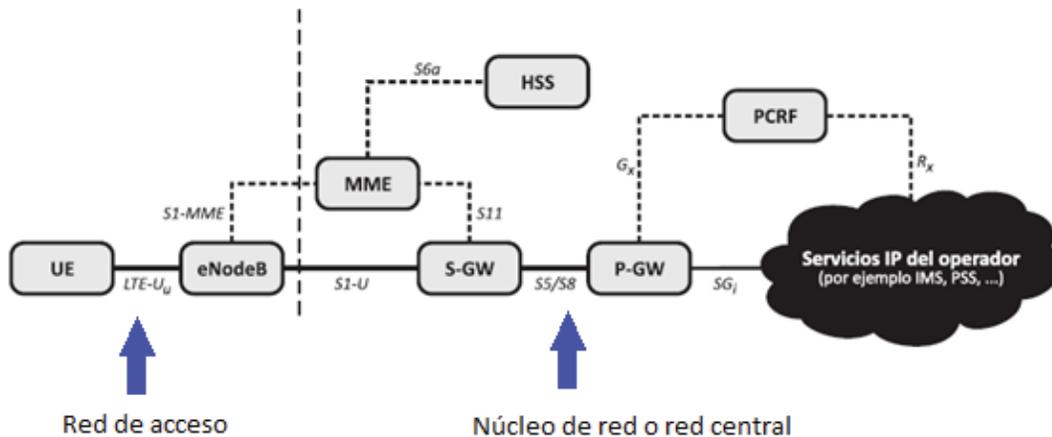
*Multiplexing*) que es similar a SC-FDMA (*Single Carrier- Frequency Division Multiplexing*) pero con la diferencia que puede agregar subportadoras no contiguas. También, se denomina DFT-S-OFDM (*Discrete Fourier Transform- Spread-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), en DL se tiene OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) [12]. En lo que a modulación respecta se tiene QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 16QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) y 64QAM tanto en UL como en DL y el esquema de modulación que se seleccione depende de las condiciones del canal de radio al momento de la transmisión [12].

**Tabla 1. 3** Parámetros de *LTE-Advanced*

<b>Parámetro</b>	<b>Downlink</b>	<b>Uplink</b>
Ancho de banda	Hasta 100 MHz	
Velocidad de transmisión pico (Mbps)	1000	500
Eficiencia espectral pico (bps/Hz)	30	15
Eficiencia espectral promedio (bps/Hz/celda)	2.6 ( <i>hotspot</i> en el interior)	2 ( <i>hotspot</i> en el interior)
Eficiencia espectral por usuario en el borde de la celda (bps/Hz)	0.09 ( <i>hotspot</i> en el interior)	0.07 ( <i>hotspot</i> en el interior)
Capacidad de VoIP (usuario/celda/MHz)	Superior a la versión 8 de LTE	
Latencia en el plano de usuario (ms)	10	
Latencia en el plano de control (ms)	50 (De <i>Idle</i> a Activo) 10 (De Inactivo a Activo)	
Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM
Técnica de acceso	OFDMA	<i>Clustered</i> SC-FDMA

### 1.3.2 ARQUITECTURA DE LTE-A

La arquitectura de LTE-A es similar a la de LTE, por lo tanto se revisa la arquitectura de LTE a continuación:



**Figura 1. 6** Arquitectura de la tecnología LTE [13]

En la Figura 1. 6 se observa la arquitectura de la tecnología LTE formada de 2 partes principales: (1) la red de acceso y (2) el núcleo; en la que del lado izquierdo de la línea punteada está la red de acceso y el equipo de usuario (UE, *User Equipment*) mientras que del lado derecho se observa el núcleo (*core*, Red Central o Núcleo de la Red). A continuación más detalles.

#### 1.3.2.1 Núcleo de la red (*Core Network*)

Todos los elementos mostrados en el lado derecho de la línea punteada de la Figura 1. 6 conforman el núcleo de la red, conocido como EPC (*Evolved Packet Core*), el cual se encarga del control del equipo de usuario además del establecimiento de las portadoras. A continuación se detalla cada uno de sus elemento [13], [14].

#### 1.3.2.1.1 *Mobile Management Entity (MME)*

Este elemento de la red es el encargado de controlar y gestionar la señalización entre el equipo de usuario y la red de núcleo a través de los protocolos NAS<sup>16</sup> (*Non Stratum Access*), además se encarga de la autenticación, autorización, control de seguridad en el acceso (*AS, Access Security*), de procedimientos relacionados con *tracking*<sup>17</sup> y *paging*<sup>18</sup> para gestionar la ubicación del usuario y realiza la selección de las entidades S-GW (*Serving Gateway*) y P-GW (*Packet Data Network Gateway*).

#### 1.3.2.1.2 *Serving Gateway (S-GW)*

Es el encargado de encaminar y enviar los paquetes desde y hacia los usuarios con el fin de monitorizar la carga entre operadores, además que el equipo de usuario se asocia a un único S-GW.

#### 1.3.2.1.3 *Packet Data Network Gateway (P-GW)*

Se encarga de realizar la gestión de flujo de paquetes para brindar calidad de servicio (*QoS, Quality of Service*), es decir, realiza filtrado de paquetes de usuarios.

#### 1.3.2.1.4 *Home Subscriber Service (HSS)*

Es una base de datos que contiene los datos del usuario, es decir, conoce la MME a la cual se conecta el usuario, además contiene información de la subscripción del usuario generando credenciales de autenticación y autorización de acceso.

---

<sup>16</sup> NAS: *Non Stratum Access*, protocolos que se extienden entre el equipo de usuario y la entidad de red MME.

<sup>17</sup> *Tracking*: definen áreas de seguimiento que permiten obtener información de la localización de todos los usuarios que se encuentran registrados.

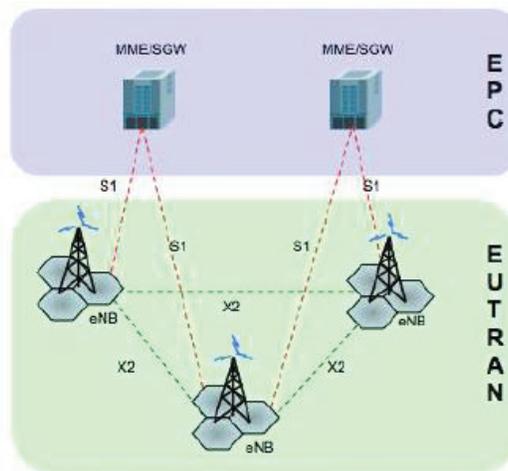
<sup>18</sup> *Paging*: operación de emparejamiento con el equipo de usuario mediante señalización de control.

### 1.3.2.1.5 *Policy and Charging Rules Function (PCRF)*

Define las reglas para el cobro y control de políticas para la facturación por flujo, define que hacer en caso de que existan problemas de incompatibilidad entre la calidad de servicio que consta en el perfil de usuario y el servicio ofrecido.

### 1.3.2.2 **Red de Acceso (*Access Network*)**

La red de acceso se conoce como E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*), la cual está compuesta básicamente por las estaciones base llamadas eNB (*e-NodeB*) o en el caso de femtoceldas está compuesto por las estaciones base llamadas HeNB (*Home e-NodeB*) y su función consiste en brindar acceso para que el terminal se pueda conectar al EPC. De tal manera, dichos elementos de la E-UTRAN se señalan en la Figura 1. 7 y su conexión mediante en EPC.



**Figura 1. 7** Arquitectura LTE: conexión E-UTRAN con EPC [14].

### 1.3.2.3 **Interfaces**

Para la conexión de los diferentes elementos de la arquitectura de LTE-A existen interfaces, a continuación se describen cada una de dichas interfaces [12]:

#### 1.3.2.3.1 *Interfaz Uu*

Se encarga de enviar señalización de control en la zona de cobertura de la celda; también realiza AS en la red de acceso y NAS en la red de núcleo, esto hace que los equipos de usuario puedan detectar la presencia del eNB y conocer los parámetros de operación.

Permite la transferencia de paquetes IP de los usuarios a través del canal de radio mediante portadores de radio (RB, *Radio Bearer*<sup>19</sup>) y también permite mediante el protocolo *Radio Resource Control* (RRC<sup>20</sup>) enviar señalización de control dedicada entre el eNB y el equipo de usuario.

#### 1.3.2.3.2 *Interfaz S1*

Es la interfaz entre el eNB y el EPC, está conformada por dos interfaces:

- *Interfaz S1-U*: Denominada interfaz *S1 User Plane*, como su nombre lo indica se la utiliza para el plano de usuario para transmitir datos entre el eNB y el S-GW sin garantizar la entrega de información, ni control de errores ni de flujo.
- *Interfaz S1-MME*: Es para el plano de control, soporta un conjunto de funciones y procedimientos de control entre el eNB y el MME. Usada en la red de acceso.

#### 1.3.2.3.3 *Interfaz X2*

Interconecta un eNB con otro, también se divide en plano de usuario en el cual se puede transferir datos de usuarios entre dos eNB sin garantías, ni corrección de errores y en el plano de control se realiza control de transferencia de paquetes IP. Usada en la red de acceso.

---

<sup>19</sup> RB: *Radio Bearer*, portadoras de radio.

<sup>20</sup> RRC: *Radio Resource Control*, controlar los recursos de la interfaz radio.

#### 1.3.2.3.4 *Interfaces S5 y S8*

Permiten la transferencia de información entre el S-GW y el P-GW. La diferencia es que la interfaz S5 es utilizada cuando ambas (S-GW y P-GW) pertenecen a la misma red mientras que la interfaz S8 es utilizada para el mismo objetivo pero cuando se da servicio de *roaming* donde el S-GW está en la red visitada y el P-GW está en la red matriz.

#### 1.3.2.3.5 *Interfaz S6a*

Esta interfaz permite la transferencia de información entre la HSS y la entidad del plano de control MME, también soporta escenarios de *roaming* y es posible la autenticación de los usuarios en el MME correspondiente.

#### 1.3.2.3.6 *Interfaz S11*

Permite la creación, eliminación, modificación de los servicios en el plano de usuario. Además permite procesos de señalización entre el equipo de usuario y la EPC, por ejemplo: registrar un equipo de usuario en la red, establecimiento de una nueva conexión hacia una red externa, etc.

#### 1.3.2.3.7 *Interfaz SGi*

La función principal es permitir la interconexión del P-GW con redes externas IP que puede ser pública o privada. Soporta conexión a redes IPv4<sup>21</sup> y también IPv6<sup>22</sup>.

---

<sup>21</sup> IPv4: protocolo Internet versión 4 usado actualmente en la mayoría de redes.

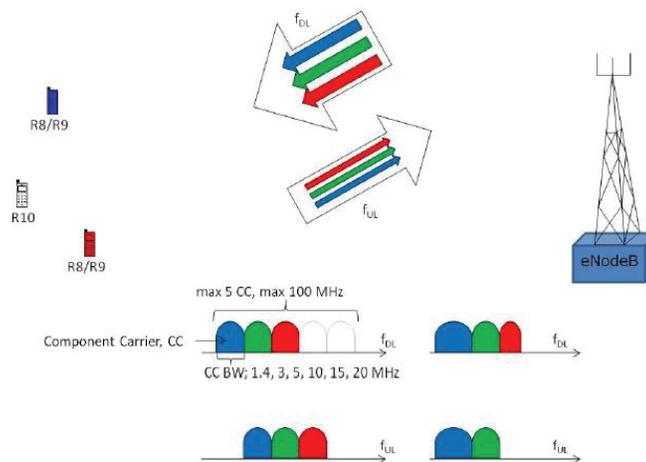
<sup>22</sup> IPv6: protocolo Internet versión 6 al cual se pretende migrar en el futuro para albergar el gran número de dispositivos conectados a Internet.

### 1.3.3 CAPA FÍSICA DE LTE-A

La capa física de LTE trabaja con esquemas de acceso SC-FDMA en UL y OFDMA en DL, además de los esquemas de modulación con los que se trabaja en LTE son QPSK, 16QAM y 64 QAM. Para LTE-A se tienen esquemas de acceso de *Clustered* SC-FDMA en UL y OFDMA en DL, mientras los esquemas de modulación son los mismos.

Se hicieron algunas mejoras en la capa física de LTE-A para mejorar aspectos de velocidad de UL y DL, eficiencia espectral, etc, gracias a esto se pudo alcanzar la tecnología 4G. Entre estos están:

#### 1.3.3.1 Agregación de portadoras



**Figura 1. 8** Agregación de portadoras [15]

Esta técnica es usada para 3 objetivos principales [9]:

- Para lograr una transmisión con gran ancho de banda mediante la agregación de componentes portadoras (CC, *Component Carriers*), por lo tanto se puede tener un ancho de banda de hasta 20MHz CC ya que en *Release 8* el máximo ancho de banda es de 20MHz.
- Para lograr un uso más eficiente del espectro fragmentado, es decir que, soporta la agregación de una variedad de arreglos de CCs diferentes ya sean

del mismo ancho de banda o de distinto en la misma banda de frecuencias o en diferentes bandas. Cabe recalcar que para FDD<sup>23</sup> el número de portadoras agregadas en el enlace de subida es menor que el número de portadoras agregadas en el enlace de bajada; mientras que en el caso de TDD<sup>24</sup> el número de portadoras agregadas en el enlace de subida es el mismo del enlace de bajada.

- Para soportar el uso de redes heterogéneas, es decir que se podría usar portadoras diferentes para cada celda que esté usando ineficientemente el espectro, por lo que la agregación de portadoras permite que cualquier celda utilice múltiples portadoras.

Hay dos tipos de *Component Carriers* [9], [14]:

#### 1.3.3.1.1 *Primary Component Carrier (PCC)*

Se relaciona directamente con la celda de servicio primario (PSC, *Primary Serving Cell*), la cual está definida como la celda que es inicialmente configurada durante el establecimiento de la conexión y juega un papel importante en cuanto a seguridad. Entonces la PCC se encarga de:

- Manejar los procesos RRC (*Radio Resource Control*)
- Hacer reportes de mediciones y movilidad
- Es necesario utilizar el canal PUSCH<sup>25</sup>

#### 1.3.3.1.2 *Secondary Component Carrier (SCC)*

Está relacionada con la celda de servicio secundario (SSC, *Secondary Serving Cell*), es aquella que puede ser configurada luego del establecimiento de la

---

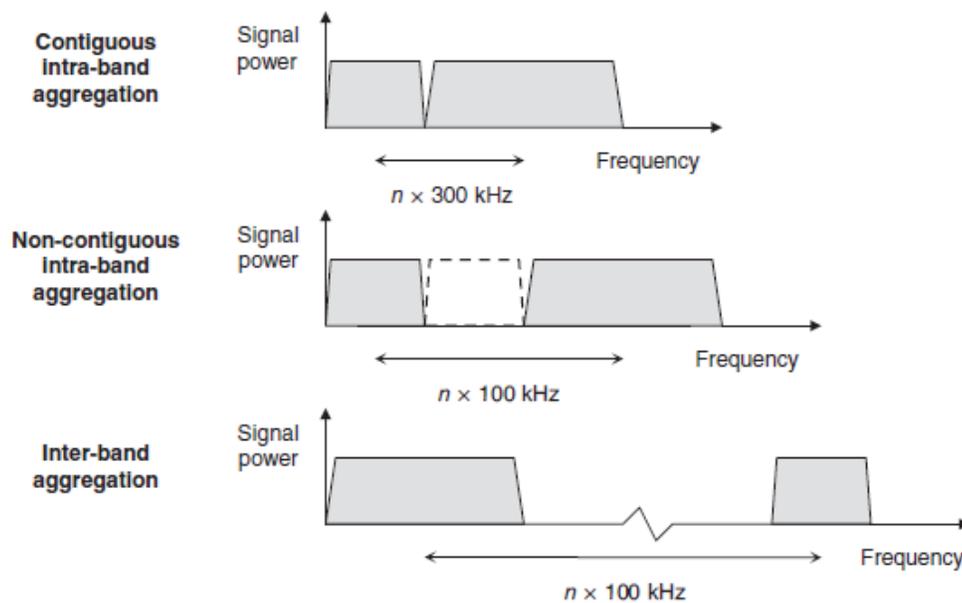
<sup>23</sup> FDD: *Frequency Division Duplex*, separa el enlace de subida y el enlace de bajada mediante una banda de guarda en el orden de decenas de MHz.

<sup>24</sup> TDD: *Time Division Duplex*, opera en la misma frecuencia pero separa en tiempo los dos enlaces.

<sup>25</sup> PUSCH: *Physical Uplink Shared Channel*, es un canal físico de enlace de subida que lleva datos de usuario, acuses de recibo y puede hacer *frequency hopping* (técnica de espectro ensanchado).

conexión para proporcionar recursos de radio adicionales. Entonces la SCC puede ser activada o desactivada dinámicamente y el uso del PUSCH es opcional.

Las *Component Carriers* son compatibles solo con *Release 8* y además los equipos de usuario pueden conectarse solamente a un PCC y hasta 4 SCC, lo que hace que pueda utilizar máximo 5 *Component Carriers* las cuales pueden tomar valores de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz (Figura 1. 8). Hay 3 escenarios (Figura 1. 9) en los que se puede agregar portadoras a un terminal [13],[16]. Estos escenarios se revisan a continuación.



**Figura 1. 9** Escenarios de agregación de portadoras [16]

#### a) Agregación intra-banda con componentes contiguos

Las *Component Carriers* están en la misma banda y son adyacentes una con otra, en este escenario las portadoras están separadas por un múltiplo de 300 kHz para que sean ortogonales y no causen interferencias entre sí [16]. De esta manera, el equipo de usuario detecta la banda resultante como un único componente y no requiere más recursos espaciales, es decir, transmisores o receptores adicionales (parte superior de la Figura 1. 9).

#### b) Agregación intra-banda con componentes no contiguas

Las *Component Carriers* están en la misma banda, pero están separadas por un múltiplo de 100 kHz y la señal no puede ser interpretada como una sola transmisión por lo que necesitará más recursos espaciales, es decir transmisores o receptores adicionales (parte media de la Figura 1. 9) [16].

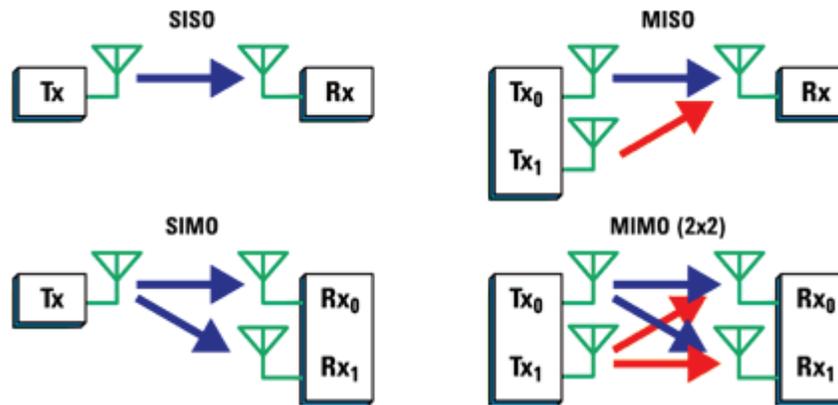
#### c) Agregación inter-banda

Las *component carriers* están en diferentes bandas de frecuencia y están separadas por un múltiplo de 100 kHz y también necesitan más recursos espaciales debido a la separación de las portadoras (parte inferior de la Figura 1. 9) [16].

### 1.3.3.2 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Es una tecnología que trabaja con varias antenas tanto en transmisión como en recepción, creando así varios canales entre sí y a su vez aumenta la velocidad de transmisión, asegurando una mayor cobertura y mayor capacidad de usuarios sin aumentar el ancho de banda ni la potencia de transmisión [7], [12]. Dependiendo del número de antenas en el transmisor y en el receptor se pueden tener diferentes casos. En la Figura 1. 10 se observan los diferentes casos de configuraciones de antena, los cuales se detallan a continuación:

- *SISO (Single Input Single Output)*: Este sistema trabaja solo con una antena en transmisión y una antena en recepción.
- *MISO (Multiple Input Single Output)*: Este sistema está formado por varias antenas en transmisión y una antena en recepción.
- *SIMO (Single Input Multiple Output)*: Este sistema trabaja con una antena en transmisión y varias antenas en recepción.
- *MIMO (Multiple Input Multiple Output)*: En este caso, el sistema trabaja con varias antenas en transmisión y varias antenas en recepción.

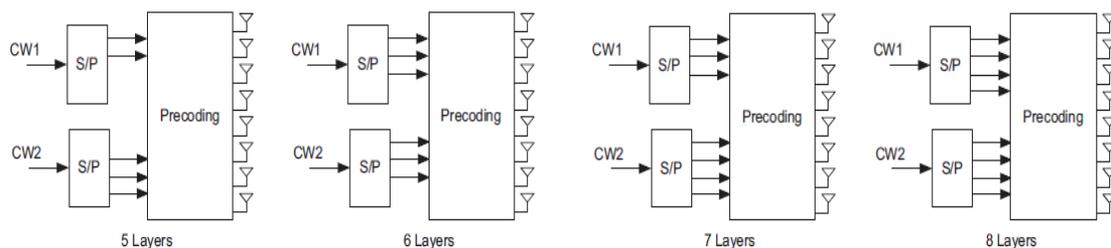


**Figura 1. 10** Sistemas SISO, SIMO, MISO, MIMO (2x2) [12]

### 1.3.3.2.1 Mejoras en enlace de bajada

Una de las mejoras de LTE-A con respecto LTE en el enlace de bajada es la utilización de SU-MIMO (*Single User – MIMO*), en la cual se usa 8 capas espaciales y máximo 2 codewords<sup>26</sup> con 8 puertos de antena (Figura 1. 11) para mejorar la velocidad de transmisión [12].

También se puede usar MU-MIMO (*Multi User - MIMO*), pero alternando dinámicamente con SU-MIMO. LTE-A soporta multiplexación de 8 layers<sup>27</sup> pero el máximo para el multiplexación MU-MIMO es de 4 layer.



**Figura 1. 11** Codewords y layers para 8 puertos de antena [12]

<sup>26</sup> *Codeword*: representa los datos de usuario antes de ser modificados para su transmisión [12]

<sup>27</sup> *Layer*: hace referencia al flujo, por ejemplo para MIMO deben usarse al menos 2 *layers* y deben ser menor al número de antenas [12].

### 1.3.3.2.2 *Mejoras en enlace de subida*

Se introduce la transmisión SU-MIMO y se lo realiza en 4 capas espaciales para incrementar la velocidad de transmisión del canal PUSCH, tiene dos modos de transmisión:

- *Modo de transmisión 1 PUSCH*: Cuando solo transmite una antena.
- *Modo de transmisión 2 PUSCH*: Cuando transmiten varias antenas, en este modo el equipo de usuario se puede configurar para trabajar con 2 o 4 antenas.

Para mejorar la señalización de control mediante el canal PUCCH<sup>28</sup> se usa diversidad de transmisión ayudando a la vez con la compatibilidad con LTE.

### 1.3.3.3 *Relaying*

El *relaying* se basa en el uso de nodos de red adicionales conocidos como *Relay Nodes*, los cuales fueron diseñados para complementar a las macroceldas con el fin de incrementar la capacidad y el área de cobertura [12]. Debido a que no procesan la señal que reciben, se los considera como repetidores pero existen ciertas diferencias.

Los repetidores se encargan de amplificar la señal que reciben inclusive la interferencia, por lo tanto la señal se degrada y claramente no es igual que una estación base [9], [12]. Además, ya que operan independientemente de la red de acceso significa que genera un costo adicional al operador.

A los *relay nodes* se los considera como una evolución de los repetidores que resuelven los problemas que éstos generan. Un *relay node* es un nodo que se conecta inalámbricamente a un eNB fuente llamado *donor eNB*. Cabe recalcar que los *relay nodes* tienen funciones de los eNB como el monitoreo y control remoto,

---

<sup>28</sup> PUCCH: Physical Uplink Control Channel, canal físico de control de enlace de subida.

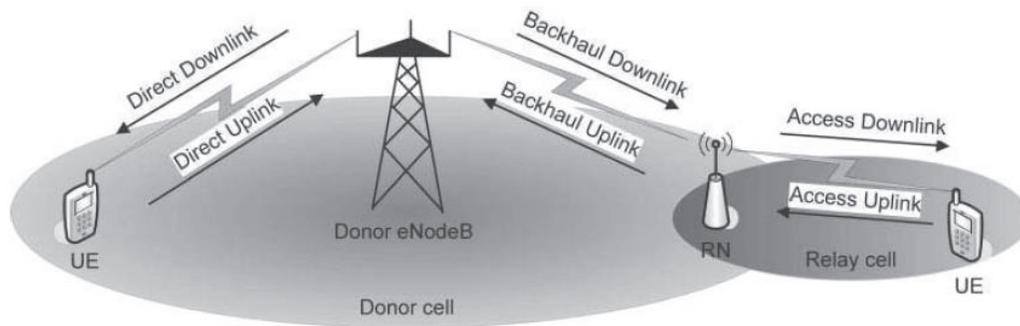
además procesan la señal antes de reenviarla y pueden ser procesos de Capa 1, 2 o 3 [9].

En la Figura 1. 12 se muestra la terminología que se usa para *relaying* y se detalla a continuación [9], [12]:

- *Donor eNB*: Es el eNB fuente del cual el *relay node* recibe la señal.
- *Relay Cell*: Es el área de cobertura del *relay node*.
- *Backhaul link (Uplink / Downlink)*: Es el enlace entre el *donor eNB* y el *relay node*.
- *Access Link (Uplink / Downlink)*: Es el enlace entre el *relay node* y el equipo de usuario.
- *Direct Link (Uplink / Downlink)*: Es el enlace entre el eNB y el equipo de usuario.

De la diferenciación de los términos que se detallan a continuación depende que trabaje bien el *relay node* [9]:

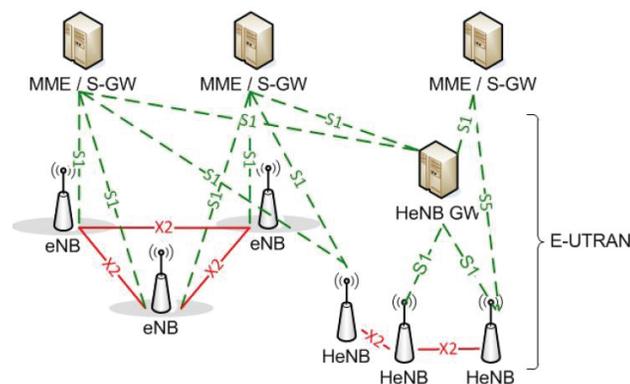
- *Dentro de la banda*: Cuando un *relay node* usa la misma frecuencia de portadora para el *backhaul link* y para el *access link* (ver Figura 1. 12).
- *Fuera de banda*: Cuando un *relay node* usa diferentes frecuencias de portadora para el *backhaul link* y para el *access link*.
- *Half dúplex*: Cuando un *relay node* no puede recibir información en el *backhaul link* mientras transmite en el *access link* y viceversa. Además se lo considera como *relay node* dentro de banda.
- *Full Dúplex*: Cuando un *relay node* puede recibir información en el *backhaul link* mientras transmite en el *access link* y viceversa. Además se lo considera como *relay node* fuera de banda.



**Figura 1. 12** Terminología para Relaying [9]

### 1.3.4 SOPORTE DE FEMTOCELADAS EN LTE-A

El soporte de femtoceldas necesita de ciertas mejoras en la arquitectura de red del sistema celular, en la Figura 1. 13 se muestra la arquitectura E-UTRAN en presencia de femtoceldas [17]. Además se observa que dos de las entidades de la EPC (MME y S-GW) se conectan a los FAP o HeNB. La MME realiza tareas como señalización para la movilidad entre las redes de acceso, manejo de movilidad en estado libre, administración de la lista del área de seguimiento, *roaming*, seguridad y autenticación [17]; por otro lado, el S-GW realiza funciones de interceptación legal, carga, cuenta, enrutamiento y envío de paquetes [17].



**Figura 1. 13** Soporte de femtoceldas en la arquitectura E-UTRAN [17].

La arquitectura E-UTRAN, en este caso, está conformada por eNBs, HeNBs y HeNB Gateways (HeNB GW) [17].

- La eNB soporta las funciones de administración de los recursos de radio, control de admisión, configuración de la medida de movilidad además del enrutamiento de los datos del plano de usuario.
- La HeNB soporta las mismas funciones que las eNB, incluyendo los procedimientos que se dan entre las HeNB y la EPC.
- El HeNB GW actúa como un concentrador para el plano de control para soportar un gran número de HeNB de manera escalable. Su despliegue es opcional.

Se observa también en la Figura 1. 13 que los elementos del sistema celular se conectan a través de las interfaces X2 y S1.

#### 1.4 TRASPASO (*HANDOVER*)

La ventaja de los sistemas celulares es que permite la movilidad del usuario mientras camina o va por alguna carretera de manera que puede pasar de una celda hacia otra manteniendo una llamada, a éste proceso se le denomina traspaso, *handover* o *handoff* (HO) [18]. Este proceso por muy simple que parezca tiene mucha importancia ya que si no se controla adecuadamente se puede perder la señal por completo dejando al usuario sin ningún servicio.

En este proceso el equipo de usuario trata de enlazarse a la estación base más cercana, de manera que cuando se realiza un traspaso entre celdas este es transparente para el usuario.

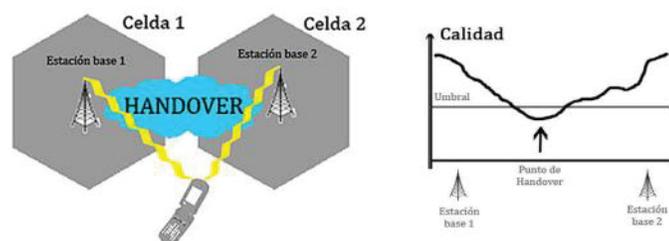


Figura 1. 14 *Handover* o traspaso [19]

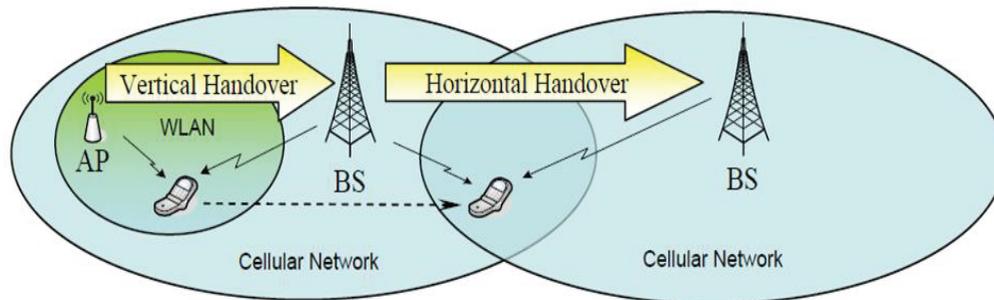
### 1.4.1 TIPOS DE *HANDOVER*

Existen diferentes tipos de *handover* que se clasifican según varios criterios que se describen a continuación [18]:

#### 1.4.1.1 Según la tecnología

Se debe diferenciar entre *Vertical Handover* (VHO) y *Horizontal Handover* (HHO) [20] (Figura 1. 15):

- *Vertical Handover* (VHO): traspaso inter sistemas, se da cuando un usuario pasa de una celda de una tecnología hacia una celda de distinta tecnología (redes heterogéneas).
- *Horizontal Handover* (HHO): traspaso intra sistemas, también conocido como traspaso tradicional, se da cuando un usuario pasa de una celda hacia otra celda de la misma tecnología (redes homogéneas).



**Figura 1. 15** Traspaso horizontal y vertical [21]

#### 1.4.1.2 *Softer-Handover*

La estación base recibe dos señales separadas a través del canal de propagación. La señal enviada desde el equipo de usuario llega a dos sectores distintos de la estación base debido a las reflexiones sobre edificios, dichas señales recibidas durante el proceso de *softer handover* se tratan como si fuesen señales multitrayectoria (Figura 1. 16) [22].

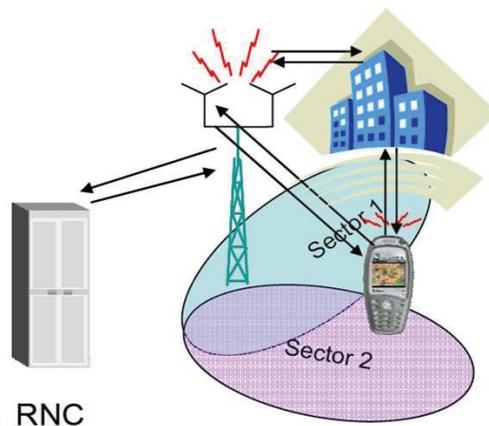


Figura 1. 16 Softer-handover [23]

#### 1.4.1.3 Soft-handover

Es similar al *softer-handover* pero en éste caso el equipo de usuario se encuentra en el área de cobertura de celdas superpuestas de dos sectores que pertenecen a diferentes estaciones base (Figura 1. 17). Para realizar el *soft-handover* se hace una combinación mediante la RNC<sup>29</sup> (*Radio Network Controller*) [22].

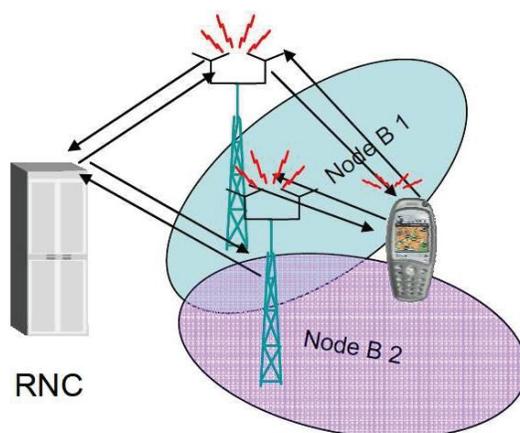


Figura 1. 17 Soft handover [23]

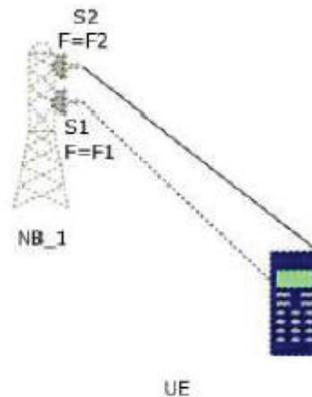
<sup>29</sup> RNC: *Radio Network Controller*, realiza funciones de control de acceso, control de conexión y controla los recursos de radio en su dominio [22].

#### 1.4.1.4 *Hard-handover*

Este tipo de traspaso se da entre portadoras o entre sistemas como se describe a continuación:

##### 1.4.1.4.1 *Intra-frecuencia*

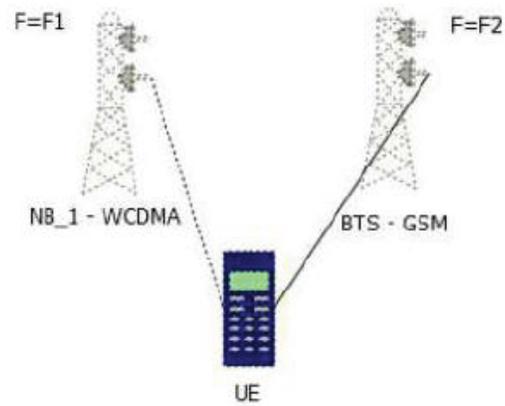
Este proceso se da cuando el equipo de usuario que mantiene una llamada necesita pasar a otra frecuencia mediante la implementación de una nueva portadora dentro de la misma estación base (Figura 1. 18) [18].



**Figura 1. 18** Traspaso de llamadas Intra-frecuencia [18].

##### 1.4.1.4.2 *Inter-frecuencia*

Este proceso se da cuando el equipo de usuario necesita cambiar la llamada a otra tecnología, por lo general a otra frecuencia [18]. Por ejemplo, cuando se realizan llamadas de voz los operadores de la red hacen que se liberen recursos (Figura 1. 19).



**Figura 1. 19** Traspaso de llamadas Inter-frecuencia [18].

Existen diferentes algoritmos para realizar traspasos dependiendo de la tecnología con la que se trabaje. Este trabajo de titulación se enfoca en los tipos de traspasos de la tecnología 4G. En el siguiente capítulo se analizan dichos algoritmos.

## **CAPÍTULO 2**

### **ESCENARIO DE ANÁLISIS DEL ALGORITMO DE HANDOVER PARA 4G (LTE-A)**

El traspaso o *handover* es uno de los principales desafíos a tomarse en cuenta en el desarrollo e implementación de una tecnología celular ya que esto asegura la movilidad del usuario entre distintas celdas, ya sean de la misma tecnología (redes homogéneas) o de distintas tecnologías (redes heterogéneas).

Las femtoceldas son estaciones base de baja potencia y no muy costosas, por lo que se puede implementar de manera no planificada para cubrir zonas de sombra que presentan las macroceldas, mejorando significativamente las necesidades del usuario. Puede haber una o varias femtoceldas ubicadas dentro de una macrocelda, por lo que incrementa la complejidad del procedimiento para realizar el traspaso. Debido a esto, el número de traspasos puede ser un número grande y a la vez innecesario.

#### **2.1 ESTRATEGIAS DE TRASPASO**

Existen dos estrategias que permiten al terminal realizar traspaso entre celdas, se denominan traspaso reactivo y traspaso proactivo.

##### **2.1.1 TRASPASO REACTIVO**

El traspaso reactivo empieza solamente cuando el terminal casi ha perdido la señal de la estación base fuente a la que se encuentra conectado, por lo que es una estrategia que tiende a retrasar el traspaso tanto como sea posible [24]. Esta estrategia tiende a ser demorosa ya que se debe buscar nuevas celdas, elegir una de ellas y preguntar si se puede asociar a la nueva celda.

Desde el punto de vista de un sistema femtocelda, debido a su baja potencia de transmisión y su poca área de cobertura [25], se puede tener un número grande e innecesario de traspasos ya que puede haber más de una femtocelda en un área determinada; por lo que el traspaso reactivo es útil para mitigar la sobrecarga de traspasos.

### **2.1.2 TRASPASO PROACTIVO**

El traspaso proactivo tiende a realizar el traspaso antes de que el terminal pierda la señal de la estación base fuente a la que se encuentra conectado [24], es decir, que si recibe una señal con mayor intensidad que la que se encuentra realiza el traspaso.

Esta estrategia es menos efectiva desde el punto de vista del número de traspasos innecesarios ya que en sistemas femtocelda se puede tener un número muy grande de traspasos debido a la alta densidad de femtoceldas existentes en un área.

## **2.2 ESCENARIO DE TRASPASO**

En el capítulo anterior se realizó una descripción de la tecnología de cuarta generación LTE-A que soporta redes heterogéneas, es decir, incluye picoceldas, femtoceldas o *relay nodes*, con el fin de extender su área de cobertura incrementando la capacidad del sistema y disminuyendo la potencia de transmisión de la macrocelda. Por lo que existirán traspasos entre estos elementos, generando así diferentes escenarios en los cuales se dan dichos traspasos. Así, se tendría traspasos entre macrocelda-femtocelda, femtocelda-macrocelda y femtocelda-femtocelda.

A continuación, se detallará el procedimiento de cómo se realiza un traspaso y cómo interactúan estos elementos.

## 2.2.1 PROCEDIMIENTO DE TRASPASO

Para realizar un traspaso generalmente es necesario seguir los siguientes pasos: identificación de la celda, control de acceso, búsqueda de la celda, selección ó re-selección de la celda, decisión del traspaso y ejecución del traspaso.

### 2.2.1.1 Identificación de la celda

Este procedimiento consiste en usar identificadores para distinguir a las macroceldas de las femtoceldas entre sí. Los sistemas celulares usan identificadores de celda de capa física, por lo general son un número limitado de identificadores (PCI<sup>30</sup>, *Physical Cell Identifiers*) sobre la red para permitir la identificación de las celdas en una escala local.

Debido al número limitado de PCI y el gran número de celdas pequeñas dentro del área de cobertura de la macrocelda, en presencia de femtoceldas se espera un re-uso denso de PCI, lo que hace imposible que las entidades de red identifiquen únicamente a las celdas objetivo basándose solamente en los reportes que brinda el terminal; es decir, que la lista de mediciones que entrega el terminal pueden ser de diferentes celdas con un mismo PCI [17]. Por ejemplo, en la Figura 2. 1 se observa que surge un problema de confusión debido a la presencia de femtoceldas, el terminal UE<sub>1</sub> reporta a su actual estación base con PCI4 en la lista de mediciones, además se observa que tiene más de una celda con el mismo PCI, lo que resulta en que la estación base fuente no pueda identificar por ejemplo a la estación base con PCI2 ya que puede ser una macrocelda o una femtocelda, por lo tanto, no sabe hacia cual debe hacer el traspaso.

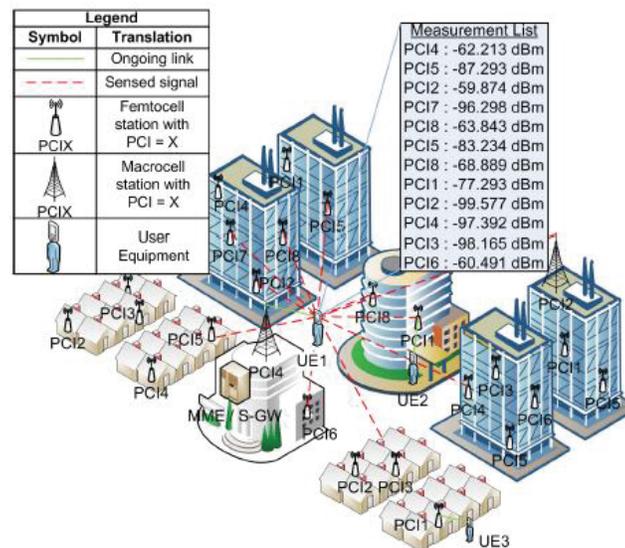
La fase de identificación de la celda tiene dos desafíos a enfrentar [17]:

- Minimizar el re-uso denso de PCI: para esto se debe usar algoritmos eficientes para la selección del PCI.

---

<sup>30</sup> PCI: *Physical Cell Identifier*, es el identificador de una celda a nivel de capa física [28].

- Procedimientos que garantizan la identificación única de las celdas cercanas: para esto se puede (a) usar estructuras jerárquicas de celdas, permitiendo que el operador de red categorice las celdas en diferentes capas y asignar diferentes prioridades; (b) separar identificadores de redes públicas, para dar un identificador a cada nivel de la red por ejemplo un nivel para la macrocelda, uno diferente para la femtocelda, etc.; (c) reservar portadoras, permite reservar un conjunto de portadoras o frecuencias por capa y (d) enfoques de capas superiores, el cual admite un único identificador global de celda (CGI<sup>31</sup>, *Cell Global Identifier*).



**Figura 2. 1** Problema de confusión en presencia de femtoceldas [17]

En la tecnología LTE-A, se tiene 504 valores de PCI que se asignan a las eNB basándose en un sistema centralizado o en un sistema distribuido [17] y el problema de confusión se resuelve configurando al terminal para que adquiera un único identificador de celda global E-UTRAN (ECGI, *E-UTRAN Cell Global Identifier*) de las celdas objetivo. En el caso que el sistema LTE-A quiera reservar un rango de valores PCI o frecuencias portadoras exclusivas para el uso de femtoceldas deben enviar esta información a las demás celdas.

<sup>31</sup> CGI: identificador global de celda, proporciona medios para localizar geográficamente los terminales conectados [28].

### 2.2.1.2 Control de acceso

Este proceso es muy importante ya que las femtoceldas soportan pocos usuarios. Se puede acceder a las femtoceldas de 3 maneras: (1) acceso abierto, puede acceder un grupo abierto de usuarios (OSG, *Open Subscriber Group*); (2) acceso cerrado, puede acceder un grupo cerrado de usuarios (CSG, *Closed Subscriber Group*) y (3) acceso híbrido, puede acceder un grupo de usuarios de ambos accesos anteriores [8].

Desde el punto de vista de la movilidad del usuario, el control de acceso se complica cuando se trabaja con femtoceldas ya que el terminal debe saber a cuáles femtoceldas puede acceder, la femtocelda debe permitir que los usuarios cercanos identifiquen el tipo de acceso que soporta con el fin de evitar el proceso de traspaso para usuarios que no sean parte de alguno de los grupos detallados anteriormente y minimizar el consumo de energía mientras se identifica a la femtocelda [17]. Además, una entidad de red confiable debe validar el estado de los miembros del grupo de los terminales antes de acceder a las estaciones base de las femtoceldas. Esta entidad debe estar en la red de acceso o en la de núcleo para que el control de acceso sea seguro.

Desde el punto de vista de la tecnología LTE-A, un terminal siempre es considerado como miembro del CSG, incluso se le permite ser miembro de algunos CSG (miembro de celdas CSG) o si es miembro de un grupo de acceso híbrido (miembro de celdas híbridas) en el cual se prioriza el acceso.

Para habilitar el tipo de acceso que soportan las femtoceldas, las HeNB deben enviar el indicador CSG (se configura en verdadero si es miembro de celdas CSG o falso si es miembro de celdas híbridas) y la identidad CSG (denominado información CSG ID que se transmite a todas las celdas E-UTRAN) [17]. La MME es responsable de realizar el control de acceso basándose en los datos de suscripción CSG almacenados para los terminales antes de acceder a las celdas

CSG, de tal manera que la señalización de ejecución del traspaso se da a través de la MME y la interfaz S1 [17].

### 2.2.1.3 Búsqueda de la celda

Es el proceso en el cual un terminal adquiere sincronización en tiempo y frecuencia con celdas vecinas para identificarse y tomar medidas de la calidad de la señal [17]. La fase de medición es importante para la movilidad entre celdas y se realiza mediante la transmisión de señales de referencia o señales piloto por las celdas.

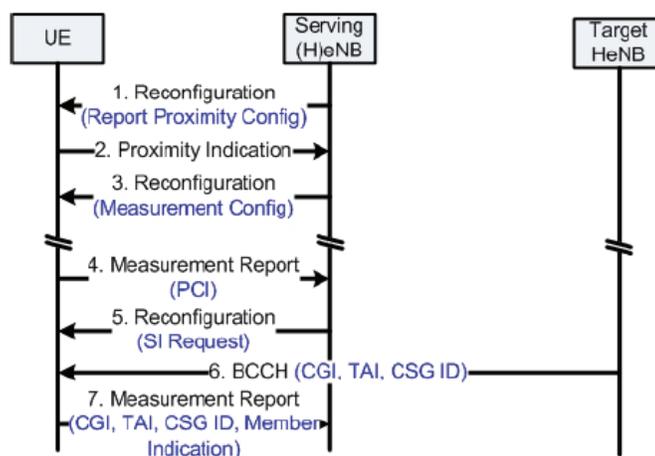
En despliegues de femtoceldas, este proceso se dificulta ya que la fuerza de la señal recibida de estaciones base cercanas pueden ser causa de variaciones rápidas debido a la baja potencia de transmisión, por lo que la búsqueda de celdas debe ser re-evaluado para evitar derivaciones de medidas innecesarias. Típicamente, la red proporciona una lista de celdas vecinas (NCL, *Neighbor Cell List*) para ayudar al terminal en la búsqueda de celdas pero los terminales que quieren acceder a las femtoceldas no encuentran muy útil esta información debido a [17]:

- El uso de femtoceldas está sujeto a un control de acceso en el cual las NCL deben ser adaptadas de acuerdo a los terminales subscriptores.
- Las femtoceldas son instaladas y administradas por los usuarios de manera aleatoria, por lo que pueden instalar o desinstalar, encender o apagar las femtoceldas o cambiar el modo de acceso de manera que los usuarios lo requieran.
- Existe un número limitado de 32 celdas vecinas que pueden ser asignadas a una NCL.

Por estas razones, el soporte de femtoceldas dispone que se migre de procedimientos de búsqueda de celda controlado por la red hacia procedimientos de búsqueda de celda autónomos basados en el terminal.

Para el proceso de búsqueda de femtoceldas en sistemas LTE-A, se necesita de dos medidas de calidad de señal básicas en el terminal: la potencia recibida de la señal de referencia (RSRP<sup>32</sup>, *Reference Signal Received Power*) y la calidad recibida de la señal de referencia (RSRQ<sup>33</sup>, *Reference Signal Received Quality*). Ambas mediciones son realizadas en señales de referencia de enlaces de bajada transmitidas por cada celda E-UTRAN [17].

Dependiendo si el terminal está en estado conectado (usando algún servicio) o en estado desconectado (sin usar algún servicio) se tiene distintos procedimientos de búsqueda de celda. Si el terminal está conectado, el procedimiento de la búsqueda de celda E-UTRAN se basa en la configuración dada por la red en la que la celda LTE-A fuente no necesita dar información de las celdas vecinas del terminal pero por lo menos debe indicar la frecuencia portadora de las celdas vecinas. Además, el procedimiento de búsqueda de celdas es diferente ya que se usa una estimación de proximidad en la que la celda fuente configura al terminal para que indique la proximidad cuando lo requiera; una vez que reciba esto, la celda fuente configura al terminal para realizar mediciones de calidad de la señal y adquirir información de la nueva celda [17]. Para tener una idea más clara, en la Figura 2. 2 se indica el intercambio de mensajes para obtener dichas mediciones:



**Figura 2. 2** Señalización de búsqueda de la celda y medición [17]

<sup>32</sup> RSRP: es un promedio de todas las contribuciones de los elementos que llevan señales de referencia de celdas específicas [29].

<sup>33</sup> RSRQ: es un indicador de la calidad de la señal basado en el número de estaciones base y en el RSRP [29].

- La celda fuente configura al terminal para que indique su proximidad (mensaje 1).
- Usando procedimientos de búsqueda autónomos, el terminal identifica la presencia de femtoceldas cercanas y reporta esa información a la celda fuente (mensaje 2).
- La celda fuente reconfigura al terminal para medir y reportar la calidad de la señal de la celda objetivo (mensaje 3 y 4).
- La celda fuente reconfigura al terminal para adquirir información de la celda objetivo mediante el canal de control de transmisión (BCCH, *Broadcast Control Channel*) (mensaje 5 y 6).
- El procedimiento concluye cuando el terminal reporta la información de la celda que adquirió a la celda fuente (mensaje 7).

Cuando el terminal está en modo desconectado, la búsqueda de celdas CSG se basa en funciones de búsqueda autónomos, las cuales determinan por él mismo cuándo o dónde buscar celdas sin ser asistidos por la información de la red.

#### **2.2.1.4 Selección o re-selección de celda**

La selección de celda se refiere al procedimiento de asociación donde el terminal está desconectado y no se encuentra dentro de una celda durante el encendido del terminal o cuando está por perder la cobertura de la red [17]. El terminal busca todas las bandas de frecuencia del sistema celular, identifica las celdas que operan con cada frecuencia portadora y sigue un proceso de acceso aleatorio para pertenecer a la celda más cómoda. Se puede usar información almacenada temporalmente en el terminal para la fase de selección, por lo que se pueden usar varios criterios además de la calidad de señal como criterio principal.

La re-selección de celdas se refiere al procedimiento de movilidad inter-celdas donde el terminal está desconectado y ya pertenece a una celda [17]. Se basa en la medición de la calidad de señal de las celdas vecinas usando un criterio de rango entre celdas, prioridad de celdas otorgada por la red u otros criterios de

optimización. Este procedimiento puede ser asistido por una NCL y también puede ser optimizado con información almacenada o temporal del terminal.

Se tiene dos desafíos al momento de realizar la selección o re-selección de celdas en presencia de femtoceldas:

- Formación de áreas de rastreo optimizadas: la red mantiene el rastreo de los terminales usando áreas de rastreo en un grupo de celdas vecinas. Las áreas de rastreo se usan para avisar al terminal en caso de una llamada de voz entrante o la conexión de paquetes de datos. Incluso por el uso de áreas de rastreo grandes, se reduce la señalización de sección o re-selección de celdas y la sobrecarga de consumo de energía por el lado del terminal pero por el lado de la red se incrementa la señalización, el consumo de energía y se sobrecarga el recurso de radio. La presencia de femtoceldas es desafiante ya que la red celular consistiría de estaciones base pequeñas aleatorias con un despliegue no uniforme.
- El uso de estrategias de selección o re-selección de femtoceldas específicas: La selección o re-selección de celdas se basa típicamente en un rango de celdas o en prioridades de frecuencias [17]. De todas maneras el uso de femtoceldas impulsa al uso de estrategias más sofisticadas para la descarga de la macrocelda mediante el uso de las femtoceldas, estas estrategias anticipan la señalización y retardan la sobrecarga para la selección o re-selección adaptándose a las características de femtoceldas específicas como control de acceso y la rápida variación del medio inalámbrico. El uso de información almacenada o temporal en el terminal también puede ser usado para hacer más rápido este proceso y manejar eficientemente el gran número de celdas candidatas a hacer el traspaso.

Como en la selección de celdas, la re-selección de celdas para celdas CSG se basa en funciones de búsqueda autónoma del terminal, además también se puede señalar al terminal una NCL con celdas CSG para manejar casos específicos de movilidad inter-celda. Se puede usar también la selección o re-selección manual de celdas [17].

### **2.2.1.5 Decisión de traspaso**

Consiste en todos los procedimientos de señalización y decisión del traspaso de celdas requeridos para transferir sin problema las conexiones que están en marcha de un terminal, desde la celda fuente hacia la celda objetivo [17]. Se denomina fase de decisión y lo realiza la celda fuente basándose en las medidas de calidad de la señal provistas por el terminal. Esta fase se realiza para descongestionar la carga de la macrocelda y mejorar la calidad de la señal que recibe el terminal.

Debido a la naturaleza de las femtoceldas, esta fase destaca más ya que a más de la fuerza de la señal recibida, se debe tomar en cuenta: (a) los niveles de interferencia dentro de la celda, (b) la potencia de transmisión desigual de las señales de referencia de las estaciones base de la macrocelda y de la femtocelda y (c) la sensibilidad incrementada en la movilidad del usuario [17].

Existen varios algoritmos para decidir el traspaso entre macroceldas y femtoceldas en los que se prioriza el acceso a la femtocelda basándose en la fuerza de la señal, la velocidad del terminal o de acuerdo al tipo de tráfico.

### **2.2.1.6 Ejecución del traspaso**

Para este paso son necesarios todos los procedimientos de señalización para realizar el traspaso cuando un terminal está en estado conectado. En presencia de femtoceldas se requiere de un retardo en la sobrecarga e incremento de señalización para ejecutar el traspaso cuando las femtoceldas se conecten al núcleo de la red a través de la red de banda ancha del usuario y la carga de señalización pase a través de entidades de red ya sean alguna entidad de control de acceso o el GW de las femtoceldas [17]. La Tabla 2. 1 resume los escenarios para la ejecución de traspasos entre macro y femtoceldas, en donde los traspasos se realizan tomando en cuenta el tipo de celda fuente, el tipo de celda objetivo, la necesidad de realizar control de acceso, el tipo de traspaso y la interfaz por la que se realizará el traspaso.

**Tabla 2. 1** Escenarios para la ejecución del traspaso en redes LTE-A con macro y femtoceldas [17].

Escenario de traspaso	Celda fuente	Celda objetivo	Control de acceso	Tipo de traspaso	Interfaz para la ejecución del traspaso
1	eNB	eNB	No se aplica	Regular E-UTRAN	X2
2	HeNB	eNB	No se aplica	Saliente de la HeNB	S1
3	(H)eNB <sup>34</sup>	HeNB	Si	Entrante a la HeNB	S1
4	eNB	HeNB	No	Entrante a la HeNB	S1
5	HeNB	HeNB	No	Entrante a la HeNB	X2 / S1

En la Tabla 2. 1 se observa que en los escenarios 1 y 2 no es necesario el control de acceso ya que el traspaso se da hacia una macrocelda y se lleva a cabo un traspaso normal, mientras que en los escenarios 3, 4 y 5 se tienen terminales que requieren conectarse a la femtocelda de los cuales, el escenario más complicado es el 3 ya que un terminal de la macrocelda requiere conectarse a la femtocelda.

### 2.2.2 SECUENCIA DE MENSAJES DE SEÑALIZACIÓN

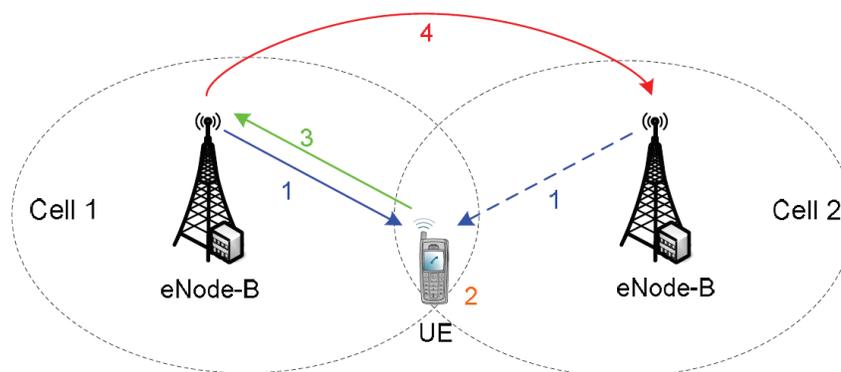
A continuación se detallan los mensajes que se intercambian entre macroceldas y femtoceldas antes de realizar un traspaso:

<sup>34</sup> (H)eNB: la celda fuente puede ser un eNB o un HeNB.

### 2.2.2.1 Traspaso entre macroceldas

Anteriormente se detalló los pasos para realizar un traspaso de forma general, pero para simplificar la comprensión se define el escenario descrito en la Figura 2. 3 en la que el proceso de traspaso se divide en 4 partes [25]:

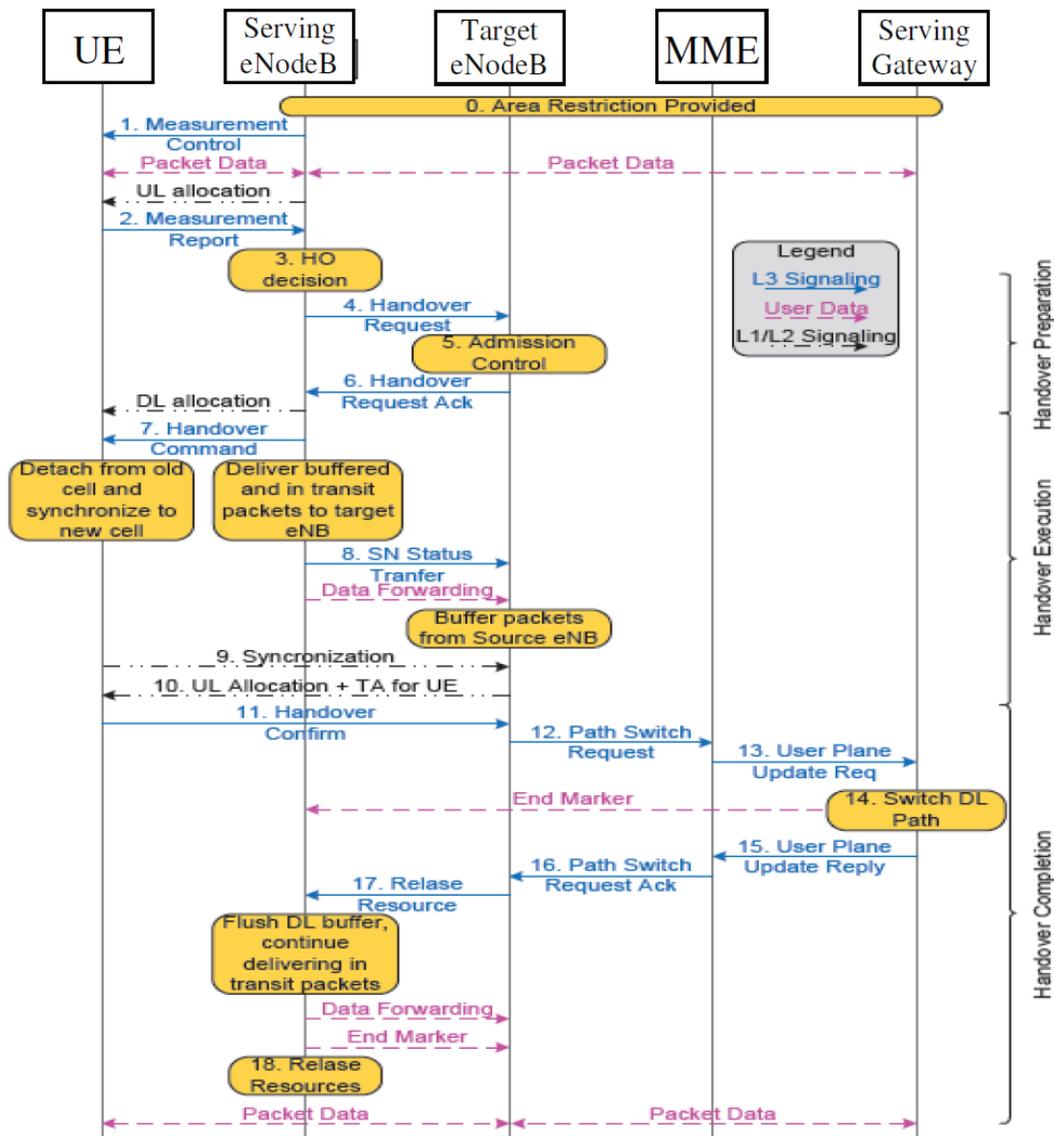
1. El terminal de usuario (UE) mide la intensidad de señal del enlace de bajada tanto en la estación base (eNode-B) fuente, como de la estación base objetivo. En la Figura 2. 3 se ha representado por la línea azul continua para la estación base de la celda de la izquierda (*Cell 1*) y por la línea azul segmentada para la estación base de la derecha (*Cell 2*).
2. El UE realiza el procesamiento de los resultados de la medición.
3. El UE envía el reporte de medición hacia la estación base que está brindando el servicio o estación base fuente (*Cell 1*), representado por la línea continua verde.
4. Finalmente la estación base fuente decide si hace o no el traspaso basándose en el reporte de medición, para ello hay una coordinación entre eNode-B, representada por la línea continua roja.



**Figura 2. 3** Traspaso entre macroceldas [25].

En [25] se presenta el diagrama de secuencia de mensajes para el procedimiento de traspaso (Figura 2. 4) el cual consiste de 3 etapas: preparación del traspaso, ejecución del traspaso y finalización del traspaso. A continuación los detalles.

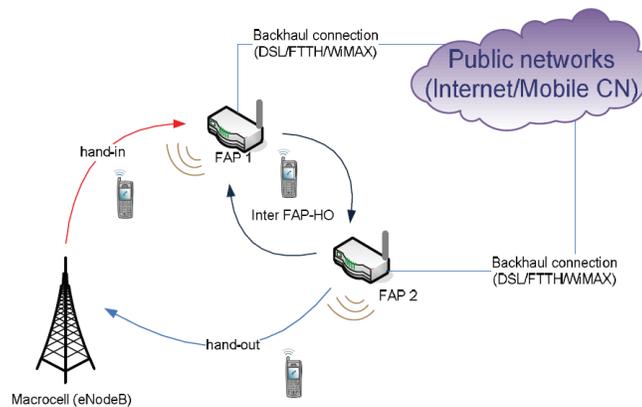
- **Preparación del traspaso:** ésta etapa tiene el objetivo, como su nombre lo indica, de preparar al terminal para el traspaso y está compuesta desde el mensaje 1 hasta el mensaje 7 que se describen a continuación:
  - Control y reporte de medición: la estación base fuente configura y manda un proceso de medición al terminal y éste manda un mensaje en el que reporta la medida obtenida (mensajes 1 y 2).
  - Decisión del traspaso: la estación base fuente ofrece la decisión del traspaso basándose en el mensaje de reporte de medición del terminal (mensajes 3 y 4).
  - Control de admisión: la segunda estación base denominada estación base objetivo realiza el control de admisión dependiendo de la información de calidad de servicio y prepara el traspaso (mensajes 5 y 6).
  - Comando de traspaso: la estación base fuente envía el comando de traspaso al terminal (mensaje 7).
- **Ejecución del traspaso:** en ésta etapa se envía la información desde la estación base fuente hacia la estación base objetivo para que el terminal se desconecte y pueda realizar el traspaso:
  - Separación de la estación base fuente y sincronización con la estación base objetivo: la estación base fuente envía la información a la estación base objetivo y el terminal realiza la sincronización con dicha estación base (mensajes 8, 9 y 10).
- **Finalización del traspaso:** en esta etapa solo se concluye el proceso de traspaso:
  - Confirmación de traspaso y cambio de camino: la estación base objetivo envía una solicitud de cambio de camino a la MME y ésta solicita al S-GW el cambio de camino de datos de enlace de bajada hacia la estación base objetivo (mensajes 11, 12, 13, 14, 15 y 16).
  - Liberación del recurso: se envía un mensaje de liberación de recurso de radio y control a la estación base fuente y a su vez la estación base objetivo puede transmitir paquetes de datos en el enlace de bajada hacia el terminal (mensaje 18 y 19).



**Figura 2. 4** Diagrama de secuencia de mensajes del proceso de traspaso entre macroceldas [25]

### 2.2.2.2 Traspaso entre macro y femtoceldas

En la Figura 2. 5 se representa la estación base de una macrocelda (eNodeB) y dos femtoceldas (HeNB también llamados *Femto Access Point*, FAP), cabe recalcar que las femtoceldas se encuentran dentro del área de cobertura de la macrocelda.



**Figura 2. 5** Escenario de *handover* en redes femtocelda [25]

Al principio, según la especificación 3GPP<sup>35</sup>, solo se tenía el escenario en que se puede realizar un traspaso desde la femtocelda hacia la macrocelda pero en realidad se tiene 3 casos de traspaso: *hand-in*, *hand-out* e *inter FAP*.

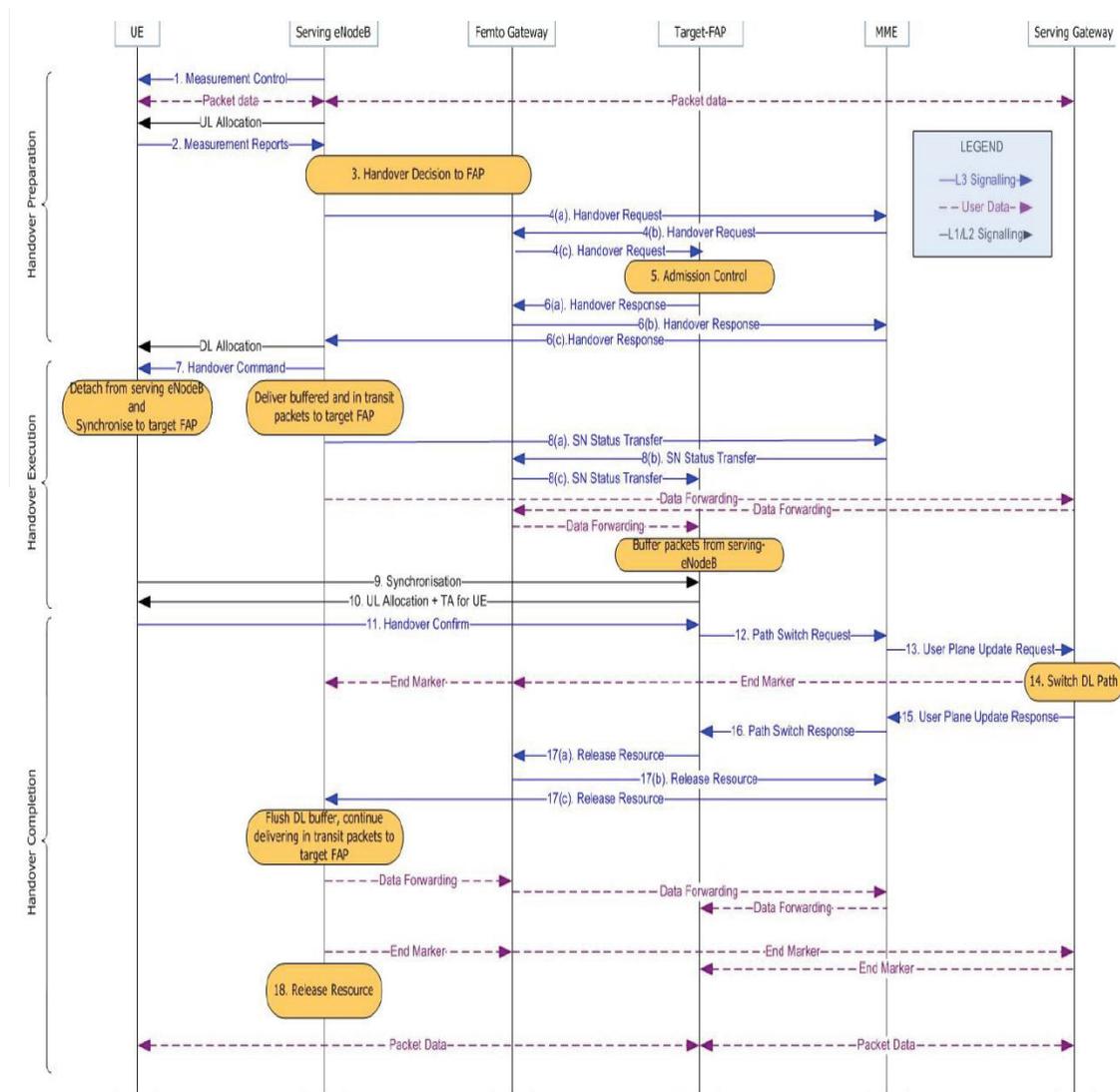
#### 2.2.2.2.1 *Traspaso hand-in*

Es el traspaso de una macrocelda hacia una femtocelda, es el más desafiante debido a que puede haber un gran número de HeNB o FAP [25]. En este caso de traspaso, el terminal necesita seleccionar el FAP más adecuado, donde se puede considerar la estimación de proximidad para optimizar el proceso de traspaso. En la Figura 2. 6 se presenta el flujo de mensajes de señalización del traspaso de una macrocelda hacia una femtocelda.

#### 2.2.2.2.2 *Traspaso inter – FAP*

Es el traspaso que se realiza desde una femtocelda hacia otra femtocelda, el flujo de mensajes es el mismo del traspaso desde una macrocelda hacia una femtocelda (Figura 2. 6) ya que se tiene el mismo número de posibles celdas objetivo.

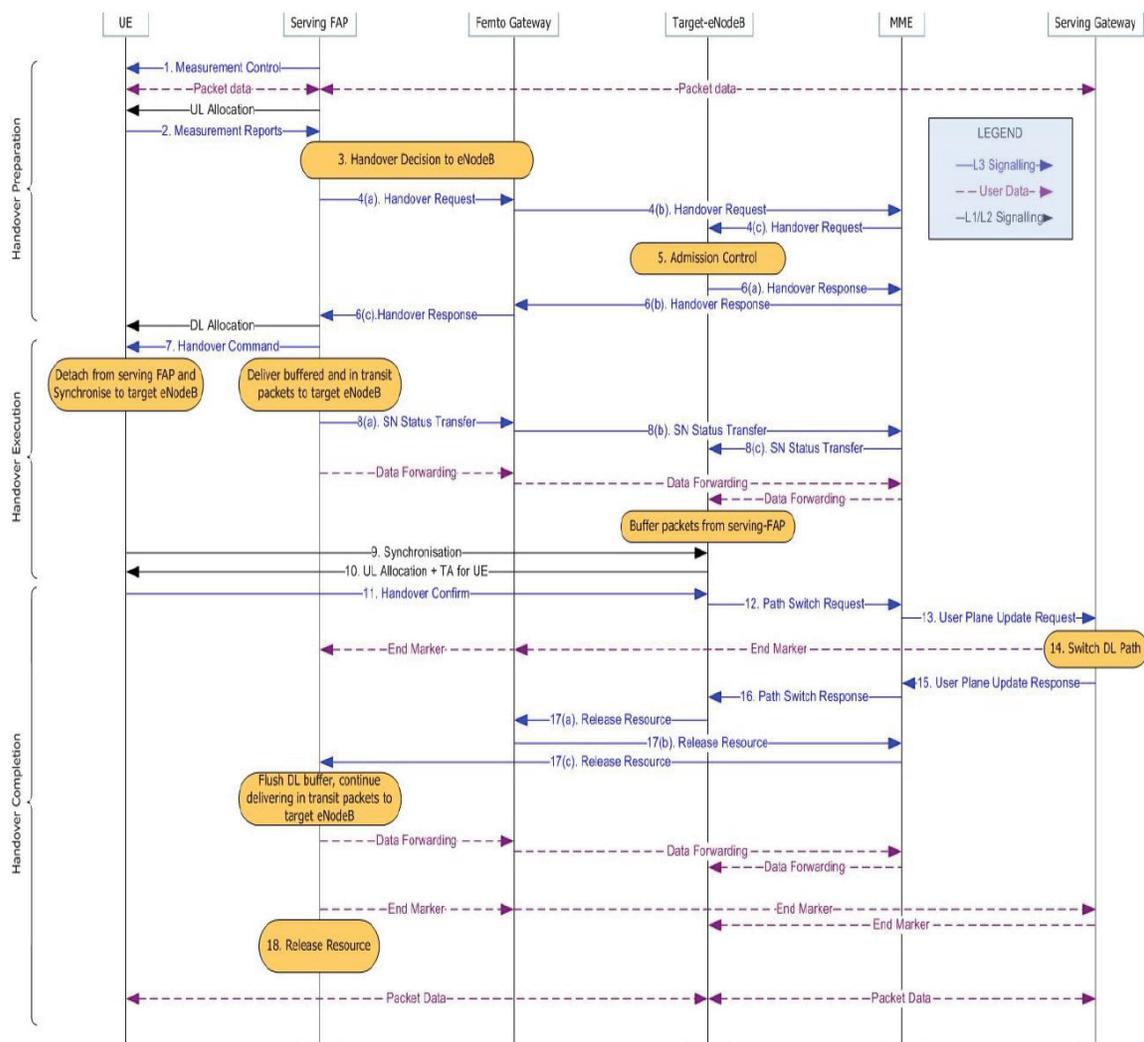
<sup>35</sup> 3GPP: *3rd Generation Partnership Project*, une 7 grupos organizativos para producir reportes y especificaciones que definen las tecnologías 3GPP [30].



**Figura 2. 6** Flujo de mensajes de señalización del traspaso de una macrocelda hacia una femtocelda o entre femtoceldas [25].

### 2.2.2.2.3 Traspaso hand-out

Es el traspaso de una femtocelda hacia una macrocelda y no es muy complicado ya que el terminal no debe elegir una macrocelda debido a que solo hay una en el escenario planteado. Cuando el indicador de la fuerza de la señal recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*) de la macrocelda es más grande que el de la femtocelda [25], el terminal se conectará directamente sin mayor complicación.



**Figura 2. 7** Flujo de mensajes de señalización del traspaso desde una femtocelda hacia una macrocelda [25].

En la Figura 2. 7 se observa los mensajes de señalización necesarios para realizar el traspaso desde una femtocelda hacia una macrocelda.

El detalle de los mensajes en las fases de preparación, decisión y ejecución del traspaso son similares al que se detalla en la sección de traspaso entre macroceldas (2.2.2.1).

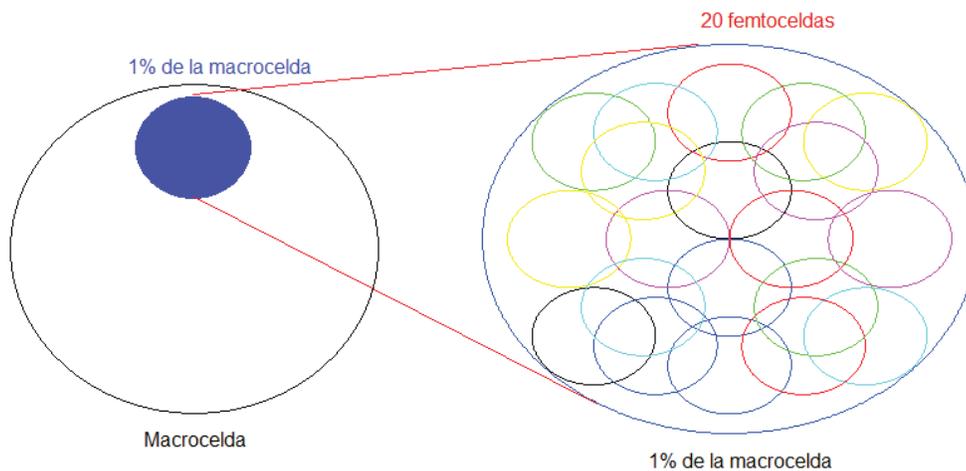
## CAPÍTULO 3

### SIMULACIÓN DEL ESCENARIO

El objetivo es comparar las estrategias de traspaso reactivo y proactivo para determinar el número de traspasos con cada algoritmo. Para realizar dicha comparación, se ha desarrollado un programa enteramente en MATLAB (específicamente *scripts* o archivos con extensión .m), en el que se ha simulado la trayectoria que siguen los usuarios dentro de diferentes femtoceldas, que a su vez se encuentran dentro de una macrocelda, se emplea una lista de control de acceso para determinar si el usuario está permitido asociarse a determinadas femtoceldas (restricciones) y, así determinar el número de traspasos realizados en función del número de usuarios, y del número de femtoceldas.

#### 3.1 ESCENARIO DE SIMULACIÓN

El escenario a simular consta de una macrocelda y varias femtoceldas (1,2,3,..., 20), las celdas tienen una geometría circular en donde el centro del círculo representa a la estación base (marcador "x") y la circunferencia representa la periferia del área de cobertura de dichas celdas, se considera que las femtoceldas están dentro del área de cobertura de la macrocelda.



**Figura 3. 1** Sección de macrocelda

Debido a la gran diferencia entre el área de cobertura entre macro y femtoceldas, se toma solo una sección en donde se ubican las femtoceldas, es decir, el área donde se ubicarán las femtoceldas representa el 1% del área de la macrocelda.

Así, considerando una macrocelda con un radio de cobertura de 1,5 km, se tiene un área de cobertura aproximada de 7000000 m<sup>2</sup>, por lo tanto, el 1% de esa área es de alrededor de 70000 m<sup>2</sup>.

Por otro lado, se considera a las femtoceldas de 30m de radio de cobertura, por lo que ocupan un área de 2800 m<sup>2</sup>. Entonces, si se consideran 20 femtoceldas, se obtiene un área de aproximadamente 57000 m<sup>2</sup>. Como se observa en la **¡Error! No e encuentra el origen de la referencia.**, se toma en consideración el 1% de la macrocelda donde se ubicaa máximo 20 femtoceldas.

Todos los usuarios están permitidos ingresar a la macrocelda, mientras que a las femtoceldas, por sus características se permite asociar máximo 6 usuarios en cada una.

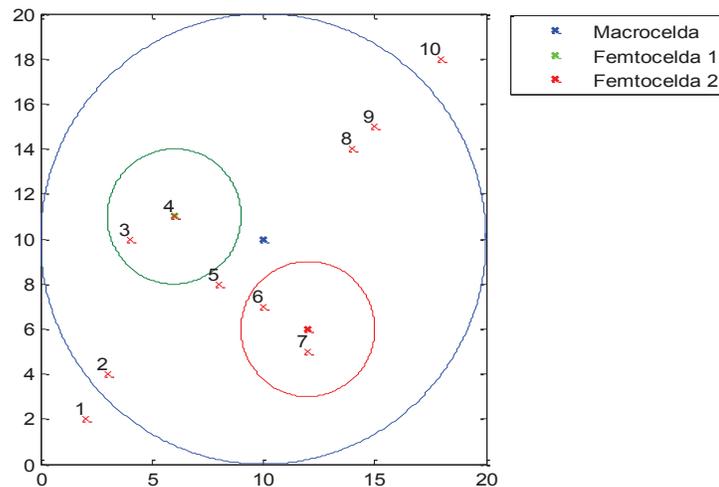
La trayectoria de cada usuario es aleatoria, por lo que para simular dicha trayectoria se define la posición inicial de cada uno. Se considera que el usuario se puede mover en 4 direcciones o mantenerse en el mismo lugar, por lo que tiene el 20% de probabilidad de dirigirse a cualquiera de ellas.

Un ejemplo de esta trayectoria se presenta en la Figura 3. 2, en la que se observa la trayectoria de un usuario y solamente 2 femtoceldas.

Cada vez que el usuario entre o salga de una celda, se llama a una función específica, la cual mostrará un mensaje que indique el tipo de traspaso realizado, los mensajes se describen a continuación:

- Handin macrocelda: este mensaje se despliega cuando el terminal ingresa a la macrocelda.

- Handin femtocelda  $n$ : este mensaje se despliega cuando el terminal ingresa a una femtocelda  $n$ .
- Handout macrocelda: este mensaje se despliega cuando el terminal sale de la macrocelda.
- Handout femtocelda  $n$ : este mensaje se despliega cuando el terminal sale de una femtocelda  $n$ .
- Macrocelda: este mensaje se despliega cuando el terminal sigue en la macrocelda
- Femtocelda  $n$ : este mensaje se despliega cuando el terminal sigue en la femtocelda  $n$ .



**Figura 3. 2** Trayectoria de un usuario

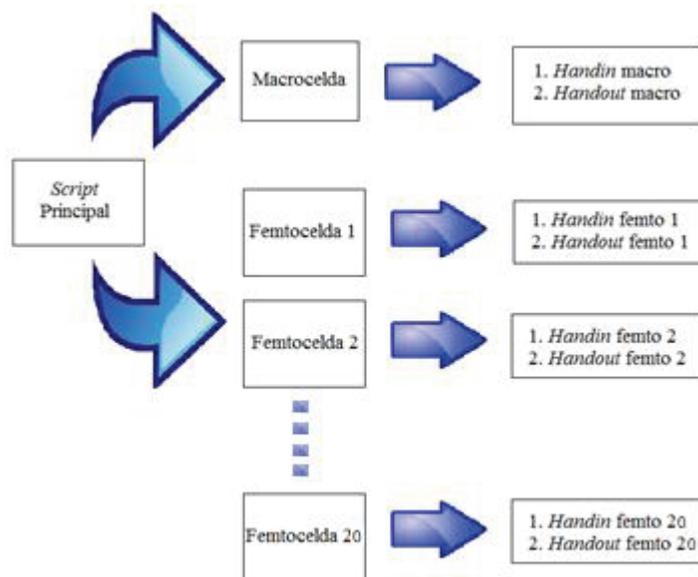
Para facilidad en la implementación del programa, la macrocelda y las femtoceldas se identifican como macro y femto, respectivamente.

Debido a que las femtoceldas se encuentran dentro del área de cobertura de la macrocelda y considerando como se realiza el traspaso reactivo, cada usuario realiza este tipo de traspaso cuando entre o salga a la macrocelda y también cuando salga de las femtoceldas.

Con respecto a los traspasos proactivos, cada usuario aumenta o disminuye el número de dichos traspasos dependiendo del acceso que tenga a las femtoceldas, es decir que, depende de los usuarios que consten en la lista de control de acceso, además se tiene éste tipo de traspaso cuando el usuario ingresa a la macrocelda.

### 3.2 IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB

En la Figura 3. 3 se observa la estructura del programa implementado, el cual consta de un *script* principal y de varias funciones adicionales que se crearon para implementar el escenario, simular los procesos de *handover* y realizar el conteo de los traspasos.



**Figura 3. 3** Estructura del programa

En el *script* principal se crea primero las celdas (1 macro y varias femto) y se las identifica con un color de circunferencia diferente, luego se crea la trayectoria de cada usuario. Para determinar si en cada paso, el usuario se conecta a la macro o a una femto, se calcula la distancia a la que éste se encuentra respecto a la radio base (centro de la celda). Dependiendo de si está dentro del área de cobertura de la macrocelda o femtocelda, se compara con el valor del radio de cada celda para etiquetar con M, F1, F2,...,o F20, según sea el caso.

Debido a que las femtoceldas se encuentran dentro de la macrocelda, el punto es etiquetado con  $F_n$ , con  $n=1, \dots, 20$  y  $M$  para indicar que se encuentra dentro de la femtocelda  $n$ -ésima; y en caso que se encuentre dentro de varias celdas se etiqueta por ejemplo con  $F_1, F_2, M$ , etc.

### 3.2.1 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

El programa consta de un *script* principal llamado “*main*”, el cual una vez que termine la ejecución del mismo, muestra los resultados por medio de curvas, donde se cuenta el número de traspasos reactivos y proactivos en función del número de usuarios y del número de femtoceldas respectivamente.

El *script main* llama a diferentes funciones que dinamizan el proceso para la obtención de las curvas. Las funciones creadas son: *celdas*, *trayectoria*, *distancia\_celdas*, *inout*, *sumatoria*. Dichas funciones se detallan a continuación:

#### 3.2.1.1 Función “celdas”

Esta función tiene como objetivo principal dibujar las celdas (macro y femto), además define los límites de los ejes. Ésta función tiene solamente parámetros de entrada, estos son: las coordenadas del centro de la macrocelda y de las femtoceldas, el radio de las celdas y el número de femtoceldas. En la Figura 3. 4 se presenta el pseudocódigo dónde se observa su funcionamiento.

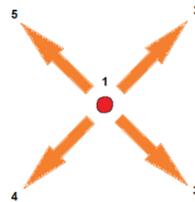
1. Inicio #celdas
2. Dibujar macrocelda #coordenadas polares
3. Crear femtocelda #coordenadas polares
4. Examinar número de femtocelda
5. Dibujar la femtocelda con colores diferentes #número de femtocelda

**Figura 3. 4** Función “celdas”

### 3.2.1.2 Función “trayectoria”

El objetivo de esta función es dibujar la trayectoria de cada usuario de acuerdo a la comparación entre dos valores, es decir que, se simula la aleatoriedad del movimiento del usuario tomando en cuenta solamente la posición inicial donde se encuentra.

Para esto se genera un vector aleatorio de 5 valores entre 1 y 0, debido a que el usuario puede moverse en 5 direcciones distintas con una misma probabilidad, ésta es del 20%. Por lo tanto, el usuario se dirige a la posición donde el valor aleatorio creado sea el más cercano al 20%. En la Figura 3. 5 se muestra la posición a la que se dirige luego de la comparación.



**Figura 3. 5** Aleatoriedad del movimiento

La función trayectoria tiene como parámetros de entrada la posición inicial de cada usuario, el número de pasos y el número de usuario. Los parámetros de salida son dos vectores en los que se almacena las posiciones de cada paso que da cada usuario. El pseudocódigo de esta función se resume en la Figura 3. 6.

```

1. Inicio #trayectoria
2. for #desde 1 hasta el número de usuarios
   Crear el vector de valores aleatorios #5
   Comparar valores #el más cercano al 20%
   Comparar la posición del valor en el vector
   Variar la posición inicial del usuario
   Almacenar la posición en vectores
   Dibujar la trayectoria #colores diferentes
3. end

```

**Figura 3. 6** Función “trayectoria”

### 3.2.1.3 Función “distancia\_celdas”

Esta función tiene como objetivo determinar la distancia desde el centro de cada celda hasta la posición del usuario, estos valores son almacenados en un vector para la macrocelda y en una matriz para las femtoceldas.

Los parámetros de entrada de esta función son: los vectores de posición que se determinan con la función “trayectoria” y las coordenadas del centro de cada celda. Los parámetros de salida son: un vector que almacena las distancias para la macrocelda y una matriz en la que en cada fila se almacena la distancia de cada usuario hacia cada femtocelda. En la Figura 3. 7 se muestra el pseudocódigo de la función “distancia\_celdas”.

```

1. Inicio #distanciaceldas
2. for #desde 1 hasta el número de posiciones del
   usuario

   Calcular distancia del usuario a la macrocelda
   #se almacena en un vector

   Calcular distancia del usuario a la femtocelda
   #se almacena en una matriz

3. end

```

**Figura 3. 7** Función “distancia\_celdas”

### 3.2.1.4 Función “inout”

Esta función tiene como objetivo comparar las distancias determinadas por la función “distancia\_celdas” y determinar si el usuario se encuentra dentro o fuera de cada celda. Además, utiliza funciones extra para determinar los traspasos que realiza el usuario. Para facilitar la comprensión de ésta función primero se detalla el funcionamiento de las funciones extra.

Las funciones extra son: *handin\_macro*, *macro*, *handout\_macro*, *handin\_femto*, *femto*, *handout\_femto*. Estas funciones tienen por objetivo realizar el conteo de

traspasos de acuerdo a la posición a la que se encuentre el usuario y a contadores de posición definidos para llamar a estas funciones.

- Contadores de posición: Estos contadores tienen el objetivo de determinar las condiciones para llamar a las funciones de *handout* o cuando se mantiene dentro de alguna celda, es decir que cuando el usuario se asocia a la celda (se encuentre a una distancia menor o igual al radio de la celda), estos contadores tienen el valor 1 y se llama a las funciones de *handin*. A medida que el usuario se mueve dentro de las celdas, los contadores aumentan, es decir que van a tener un valor mayor a 1 y se llama a las funciones femto o macro mientras se cumpla esa condición. Para llamar a las funciones de *handout* se debe cumplir que el usuario se encuentre a una distancia mayor al radio de la celda y que el valor del contador sea mayor o igual a 1.
- Contadores de traspasos: El objetivo de estos contadores es almacenar en variables diferentes las veces que el usuario entra y sale de las celdas. En el programa se definen 2 contadores para cada celda debido a que se diferencia si es el contador de ingreso (*in*) o de salida (*out*).

Entre estas funciones se tiene ciertas similitudes, es decir las funciones *handin\_macro* y *handin\_femto* tienen el mismo principio de funcionamiento, de igual manera las funciones femto y macro, también las funciones *handout\_macro* y *handout\_femto*.

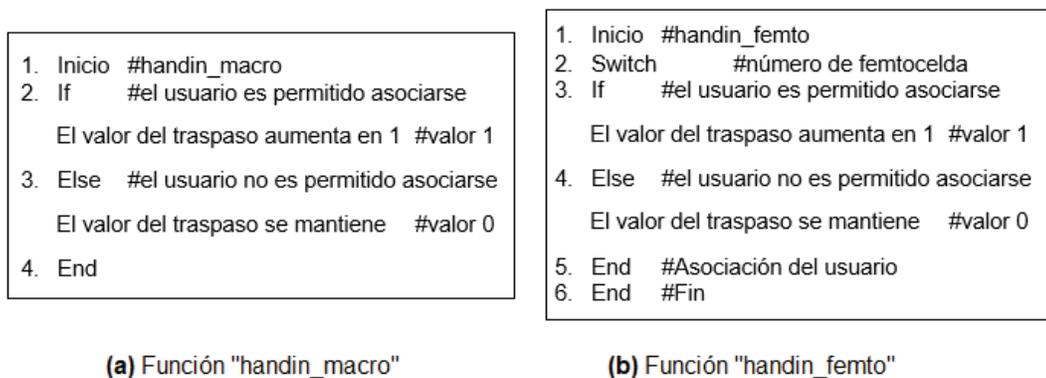
#### 3.2.1.4.1 Funciones “*handin\_macro*” y “*handin\_femto*”

Ambas funciones son llamadas cuando el usuario ingresa a la macrocelda o a cualquiera de las femtoceldas. Por lo tanto los parámetros de entrada para ambas son el número de usuario, el valor del traspaso anterior, que en este caso es cero y en el caso de las femtoceldas se envía también el número de femtocelda.

Por otro lado los parámetros de salida son: para la macrocelda, un vector que almacena el valor de los traspasos de entrada y para la femtocelda, una matriz que almacena en cada fila los traspasos de entrada de cada usuario.

Debido a que estas funciones son llamadas al ingresar a las celdas, éstas tienen una lista de control de acceso la cual se simula con un comparador del número de usuario.

La macrocelda no tiene restricción debido a la gran capacidad que tiene, mientras que las femtoceldas tienen acceso restringido y limitado a 6 usuarios como máximo, esto es por la poca capacidad de la misma. En la Figura 3. 8 se resume el funcionamiento de cada una.



**Figura 3. 8** Funciones "handin\_macro" y "handin\_femto"

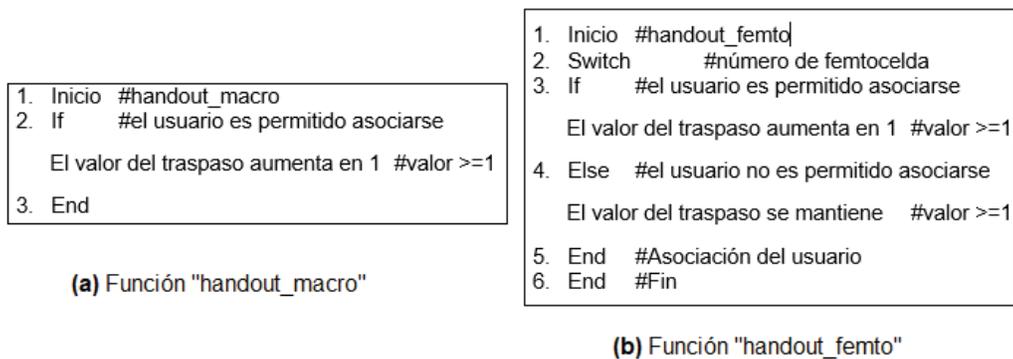
#### 3.2.1.4.2 Funciones "macro" y "femto"

Estas funciones son llamadas cuando el usuario se mueve dentro de las celdas y su objetivo es aumentar el contador de posición de cada usuario, es decir que en este caso el contador de posición tiene un valor al menos de 1. Los parámetros de entrada son: en el caso de la macrocelda, el número de usuario y en el caso de las femtoceldas, el número de usuario y el número de femtocelda.

### 3.2.1.4.3 Funciones “*handout\_macro*” y “*handout\_femto*”

Estas funciones tienen por objetivo contar los traspasos de salida de cada usuario, por lo que tiene el número de usuario y los valores de traspaso como valores de entrada (valor al menos igual a 1), para la función “*handout\_femto*” se envía también el número de la femtocelda.

Los parámetros de salida son similares a los de las funciones *handin*, es decir, un vector con los traspasos de salida para la macrocelda y para las femtoceldas, estos valores se almacenan en una matriz. La Figura 3. 9 muestra las funciones descritas.



**Figura 3. 9** Funciones “*handout\_macro*” y “*handout\_femto*”

Una vez detallado el funcionamiento de las funciones extras, se describe el pseudocódigo de la función “*inout*”.

Los parámetros de entrada de esta función son: las distancias calculadas en la función “*distancia\_celdas*”, las posiciones de cada usuario, el número de femtoceldas y el número de usuario.

Los parámetros de salida son: los traspasos de entrada y salida tanto de la macrocelda como de las femtoceldas. La Figura 3. 10 muestra el pseudocódigo de la función “*inout*”.

```

1. Inicio #inout
2. If #usuario está dentro de la macrocelda
3. If #contador de macrocelda == 1
    Llamar a función "handin_macro"
4. Elseif #contador de la macrocelda >=1
    Llamar a la función "macro"
5. End #comprobar salida de macrocelda
6. If #el usuario está dentro de la femtocelda "n"
7. If #contador de femtocelda == 1
    Llamar a función "handin_femto"
8. Elseif #contador mayor a 1
    Llamar a la función "femto"
9. End #Comprobar salida de la femtocelda "n"
10. Elseif #el usuario está fuera de la femtocelda "n"
11. If #contador de la femtocelda >=1
    Llamar a la función "handout_femto"
    Reiniciar el contador de posición de la femtocelda "n"
12. End #Comprobar si esta fuera de la macrocelda
13. Elseif #usuario esta fuera de la macrocelda
    Llamar a la función "handout_macro"
    Reiniciar el contador de posición de la macrocelda
14. End #Fin

```

**Figura 3. 10** Función "inout"

### 3.2.1.5 Función "sumatoria"

Esta función tiene como objetivo obtener un vector en el que se obtenga la suma de los elementos anteriores, es decir que en el primer elemento se obtiene la suma del primer elemento de ese vector, en el segundo elemento se muestra la suma del primer elemento y el segundo elemento. Así para el elemento "n" se obtiene la suma de los "n" elementos anteriores.

Por lo tanto, el parámetro de entrada es el vector original y el parámetro de salida será el vector que contiene la suma de los elementos del vector original. La Figura 3. 11 muestra el funcionamiento de la función "sumatoria".

```

1. Inicio #sumatoria
2. Suma = [ ] #crear un vector vacío
3. Suma (1) = 0 #el primer elemento es 0
4. For #desde 1 hasta la longitud del vector original

    Tomar los elementos del vector original con el índice
    del bucle for

    Realizar la suma de los elementos del vector y
    almacenar el resultado en el elemento correspondiente
    del vector suma

5. End #Fin

```

**Figura 3. 11** Función “sumatoria”

### 3.2.1.6 *Script “main”*

Una vez detalladas todas las funciones creadas, se facilita la comprensión del *script* principal (*main*).

En este *script* primero se inicializan los contadores, se crean las celdas (1 macrocelda y 20 femtoceldas), para lo cual se definen las posiciones y radios de dichas celdas. Para esto se utiliza un bucle de repetición.

Se define la posición inicial de cada usuario y los pasos que dará cada uno, con ayuda de un bucle de repetición se llama una a una las funciones explicadas, esto con el fin de obtener el vector de traspasos macrocelda y la matriz de traspasos femtocelda de cada usuario.

Finalmente se construyen las gráficas de traspasos en función del número de usuarios y en función del número de femtoceldas.

Debido a que el movimiento del usuario es aleatorio, las curvas obtenidas son el resultado de promediar varias simulaciones, en este caso se promedian 100 simulaciones. La Figura 3. 12 muestra el funcionamiento del *script main*.

```

1. Inicio #main
2. Iniciar contadores de traspaso y posición
3. For #desde 1 hasta el número de simulaciones

   Ingresar datos de las celdas #radio y centro

   Llamar función "celdas"

   Ingresar datos de usuarios #posición y pasos

   For #desde 1 hasta el número de usuarios

   Llamar función "trayectoria"

   Llamar función "distanciaceldas"

   Llamar función "inout"

   Guardar los traspasos macrocelda #suma de
   traspasos de entrada y salida de la macrocelda

   End #Fin bucle usuarios

   Guardar los traspasos femtocelda #suma de los
   traspasos de entrada y salida de las femtoceldas

   Obtener los traspasos reactivos de cada usuario y de
   cada celda #suma de los traspasos macrocelda y
   los traspasos de salida de las femtoceldas

   Obtener los traspasos proactivos de cada usuario y de
   cada celda #suma de los traspasos femtocelda y de
   los traspasos de entrada de la macrocelda

   Llamar a función "sumatoria" #ambos vectores

4. End #Fin de simulaciones
5. Figure #traspasos vs número de usuarios
6. Figure #traspasos vs número de femtoceldas

```

**Figura 3. 12** Script "main"

El código MATLAB completo se presenta en el ANEXO 1.

### 3.3 RESULTADOS

Una vez detallado la implementación del programa, se presentan los resultados obtenidos en la simulación del escenario formado por una macrocelda, varias femtoceldas y varios usuarios, en este caso se consideran 7 usuarios para diferenciar que los 6 pueden asociarse a las femtoceldas y el otro solo puede asociarse a la macrocelda. Este número de usuarios es debido a la capacidad limitada que tienen las femtoceldas.

En un femtocelda se puede restringir el número de usuarios que conectarse a dicha femtocelda, por lo que en las simulaciones se presentan los resultados sin ninguna restricción (es decir que no se ha restringido la conexión de cualquier usuario a la femtocelda) y con restricciones. Para simular la restricción que tiene cada usuario para conectarse o no a una femtocelda, en la Tabla 3. 1 se muestra un ejemplo de restricción; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, cabe mencionar ue los 7 usuarios son permitidos asociarse a la macrocelda y solos ciertos usuarios pueden asociarse a las femtoceldas.

**Tabla 3. 1** Restricción de las femtoceldas

Usuario	Macro	No. de Femtocelda																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	X	X			X	X		X			X		X	X			X	X	X	X	
2	X	X		X		X			X	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X
3	X	X		X		X	X	X		X		X	X	X	X	X	X		X	X	
4	X		X	X		X	X	X			X		X	X			X		X	X	X
5	X		X		X	X	X		X	X		X	X	X		X		X		X	X
6	X		X		X		X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7	X																				

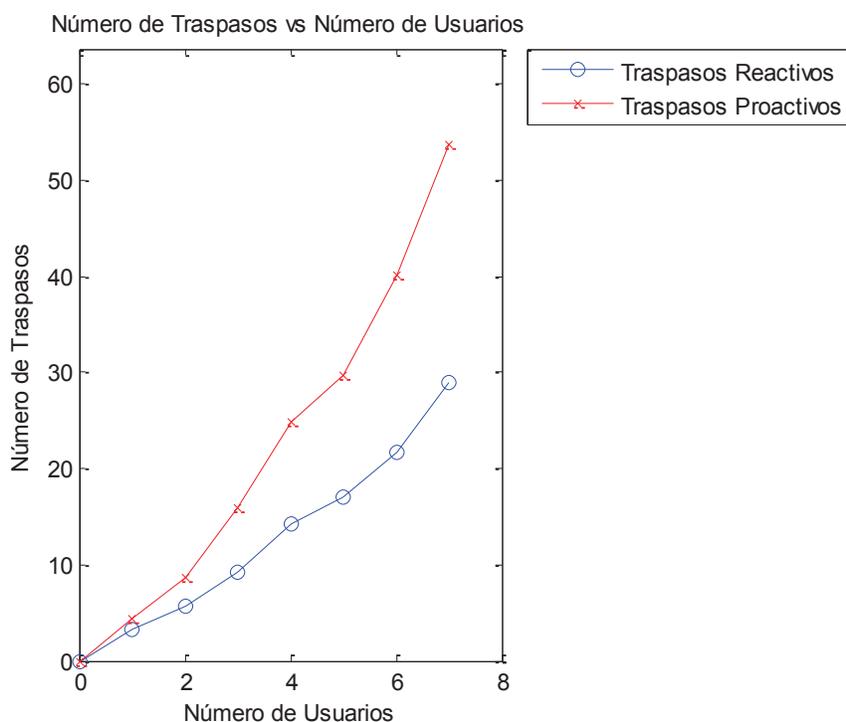
Los resultados se presentan a través de curvas, donde se muestra el número de traspasos con respecto al número de usuarios y al número de femtoceldas.

### 3.3.1 RESULTADOS SIN RESTRICCIONES

Los resultados del rendimiento de los procedimientos de handover cuando no se consideran restricciones de conexión en las femtoceldas se muestran en la Figura 3. 13 y Figura 3. 14, donde se presenta el número de traspasos reactivos y proactivos en función de número de usuarios y el número de femtoceldas, respectivamente.

En la Figura 3. 13 se observa el rendimiento de los traspasos en función del número de usuarios, se considera un máximo de 7 usuarios por femtocelda. Se observa que el número de traspasos proactivos es mayor que el número de traspasos reactivos. La diferencia entre los dos algoritmos es mayor a medida que aumenta el número

de usuarios. Por ejemplo, cuando se han conectado 6 usuarios, se ha contado alrededor de 40 traspasos proactivos, mientras que 20 reactivos. La diferencia se debe a que los traspasos proactivos consideran los traspasos de entrada y salida de las femtoceldas, mientras que los traspasos reactivos consideran solamente los traspasos de salida de las femtoceldas.

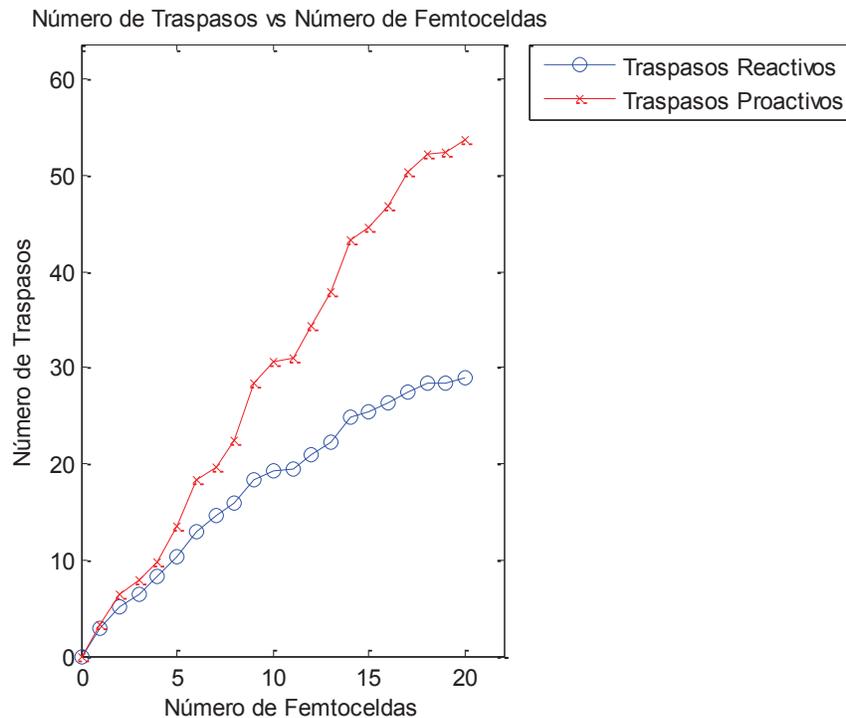


**Figura 3. 13** Número de traspasos vs Número de usuarios (sin restricciones)

En la Figura 3. 14 se presenta el número de traspaso en función del número de femtoceldas, en la que se observa que el número de traspasos proactivos es mayor que el número de traspasos reactivos debido a la cantidad de femtoceldas.

Al considerar más femtoceldas, se tiene un mayor número de traspasos de entrada y salida de la misma ya que el usuario cambia de celda mientras se mueve. Por lo tanto, el número de traspasos proactivos aumenta. Respecto a los traspasos reactivos, consideran solo los traspasos de salida de cada femtocelda.

Por ejemplo, al considerar solamente 5 femtoceldas, se tiene una diferencia de aproximadamente 5 traspasos mientras que, al considerar 20 femtoceldas la diferencia de traspasos aumenta a 25 aproximadamente.

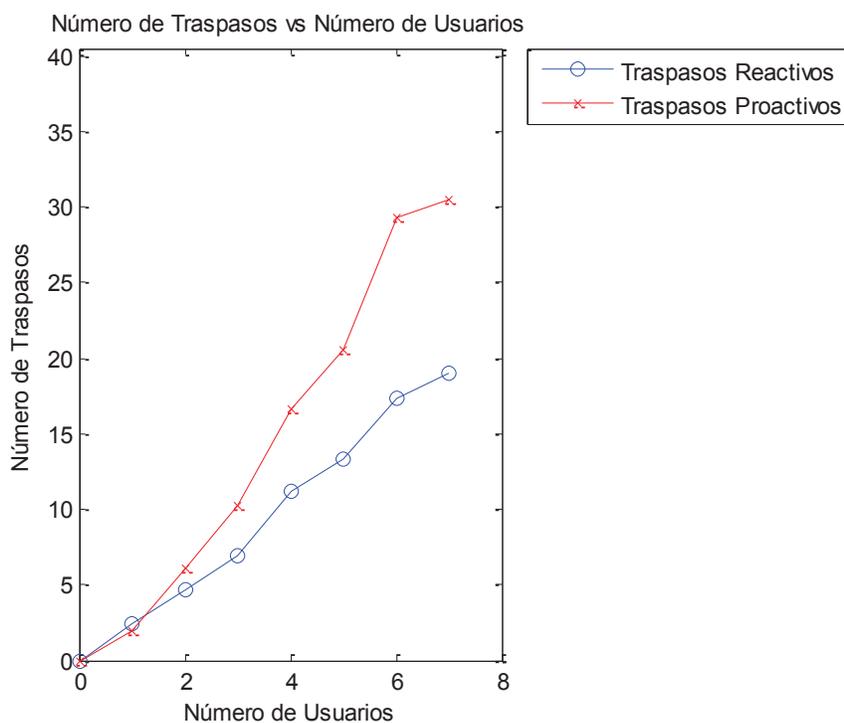


**Figura 3. 14** Número de traspasos vs número de femtoceldas (sin restricciones)

### 3.3.2 RESULTADOS CON RESTRICCIONES

Considerando las restricciones mostradas en la Tabla 3. 1 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se ha contado el número de traspasos en función del número de usuarios y del número de femtoceldas.

La Figura 3. 15 muestra el número de los traspasos realizados por cada usuario dependiendo de la trayectoria que sigue y de la restricción con la que se encuentre. Se observa que el número de traspasos proactivos es mayor al número de traspasos reactivos a medida que el número de usuarios aumenta. Por ejemplo, al considerar 6 usuarios se tiene una diferencia de 20 traspasos.

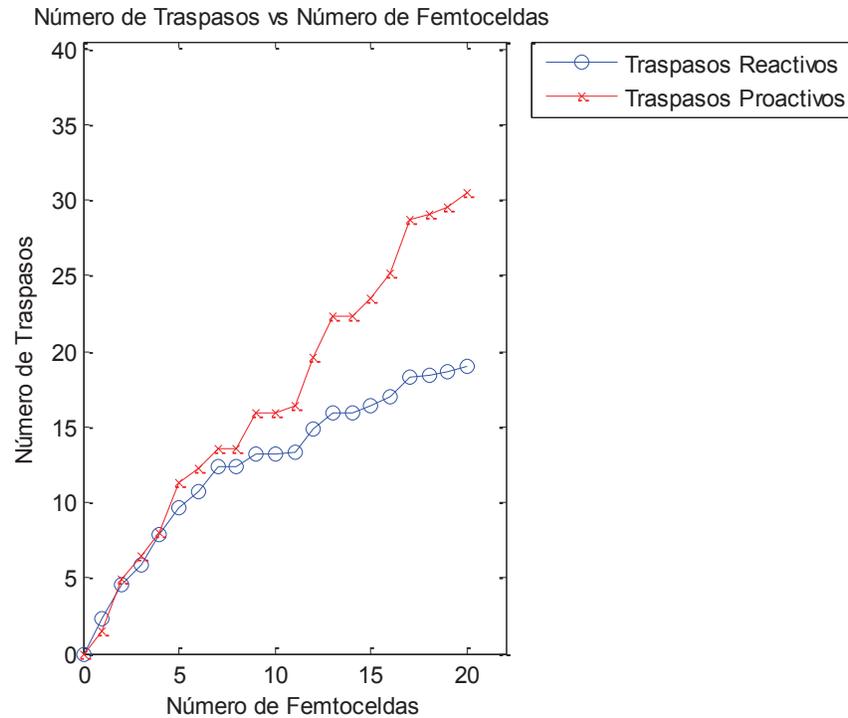


**Figura 3. 15** Número de traspasos vs número de usuarios (con restricciones)

Considerando las restricciones impuestas en las femtoceldas, en la Figura 3. 16 se observa el número de traspasos reactivos y proactivos en función del número de femtoceldas. Se ha fijado el número de usuarios a 6 que se pueden asociar a las femtoceldas.

Se observa que el número de traspasos entre los dos algoritmos se mantiene casi igual cuando se consideran solamente 5 femtoceldas. A medida que se aumenta el número de femtoceldas la diferencia entre cada tipo de traspaso aumenta.

Por ejemplo, al considerar 5 femtoceldas hay una diferencia de 5 traspasos aproximadamente mientras que al considerar las 20 femtoceldas se tiene una diferencia de 10 traspasos aproximadamente.



**Figura 3. 16** Número de traspasos vs número de femtoceldas (con restricciones)

Nótese que el número de traspasos proactivos es mayor, ya que el escenario en el que se realiza la simulación existe varias femtoceldas. La curva muestra que, mientras más usuarios se asocian a las femtoceldas, habrá un mayor número de traspasos.

Al comparar ambos resultados (con y sin restricciones), se observa que en ambos casos el número de traspasos proactivos es siempre mayor a los reactivos, se observa además que el número total de traspasos en la red con femtoceldas es alto por lo que podrían generar problemas al momento de la señalización requerida entre los elementos de la red para realizar los traspasos.

El aumento notable de traspasos proactivos y reactivos de la Figura 3. 13 y Figura 3. 14, se da por el acceso que tienen los usuarios a las femtoceldas, por lo que el control de acceso a dichas celdas es un factor importante para controlar este tipo de traspasos.

## **CAPÍTULO 4**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1 CONCLUSIONES**

- En el presente trabajo se realizó un análisis del proceso de traspaso en redes celulares heterogéneas, es decir, entre macroceldas y femtoceldas, diferenciando entre las estrategias de traspaso reactivo y proactivo. Debido a que el movimiento de los usuarios se genera con valores aleatorios, las gráficas resultantes representan el promedio de varias simulaciones. Se ha determinado a través de las simulaciones que el número de traspasos proactivos es mayor que el número de traspasos reactivos debido a la presencia de femtoceldas, ya que a medida que el usuario se mueve a través de ellas se realizan traspasos que pueden ser innecesarios. Incluso con las restricciones de acceso que tiene cada femtocelda, el número de traspasos sigue siendo alto, por lo que esto requiere la utilización innecesaria de recursos de red. Además, el proceso de traspaso generaría interferencias entre los terminales que intentan conectarse a las femtoceldas. Los resultados varían de acuerdo a la trayectoria que sigue cada uno de los usuarios, el acceso que tienen los usuarios a las femtoceldas y también del número de femtoceldas que se implementen. Por lo tanto, los resultados obtenidos sugieren que el traspaso reactivo es mejor para aplicaciones de tiempo real, debido a que es un número más pequeño de traspasos, mientras que el traspaso proactivo es bueno para aplicaciones que no trabajen en tiempo real, ya que el usuario puede trabajar bien a pesar de que exista retardo en los traspasos.

#### **4.2 RECOMENDACIONES**

- Este trabajo puede ser complementado con trabajos posteriores mediante asignación de modelos de propagación para comparar además de las

distancias a las que se encuentran, las diferentes potencias en la periferia de las celdas.

- Un tema importante además del número de traspasos es la administración de las interferencias generadas por las femtoceldas, por lo que puede ser tratado como un trabajo posterior.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Morales, «Gestión de Interferencias en Sistemas Femtocelda», Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [2] Arcotel, «Líneas activas por servicio y densidad», 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.arcotel.gob.ec/servicio-movil-avanzado-sma/>.
- [3] Arcotel, «Líneas activas por tecnología», 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.arcotel.gob.ec/servicio-movil-avanzado-sma/>.
- [4] A. Sendín, *Fundamentos de los sistemas de comunicaciones móviles*, Primera Ed. España: McGrawHill, 2004.
- [5] D. Muñoz, *Sistemas Inalámbricos de Comunicación Personal*. México: Alfaomega, 2002.
- [6] E. Narvaez, «Planificación de telefonía celular y diseño de aplicación para la ciudad de Tulcán», Escuela Politécnica Nacional, 1997.
- [7] M. Granja, «Propuesta de un software basado en CRM (Customer Relationship Management) orientado al diseño de redes celulares de tercera y cuarta generación», Escuela Politécnica Nacional, 2016.
- [8] J. Zhang y G. De la Roche, *Femtocells: technologies and deployment*, Primera. John Wiley & Sons, 2011.
- [9] S. Sesia, I. Toufik, y M. Baker, *LTE - The UMTS Long Term Evolution from Theory to Practice*, Segunda. John Wiley & Sons, 2009.
- [10] E. Apú Picado, «Análisis de las tecnologías de Redes Heterogéneas ( HetNet ) en los sistemas móviles Estudio caso : Tecnologías lightRadio <sup>TM</sup> Análisis de las tecnologías de Redes Heterogéneas», Universidad de Costa Rica, 2012.
- [11] C. Hurtado, «Estudio de factibilidad para la implementación de LTE (Long Term Evolution) en el Ecuador», Escuela Politécnica Nacional, 2011.
- [12] C. Calle, «Estudio y análisis técnico comparativo entre las tecnologías 4g Long Term Evolution (LTE) y LTE Advanced», Escuela Politécnica Nacional, 2013.
- [13] Z. Becvar, P. Mach, y I. Pravda, *Redes móviles*, Primera Ed. České vysoké učení technické v Praze, Praha, Czech Republic, 2013.

- [14] A. Reyes, «SISTEMAS CELULARES: Apuntes de clase». Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2015.
- [15] J. Wannstrom, «LTE-Advanced». Third Generation Partnership Project (3GPP), 2013.
- [16] C. Cox, *AN INTRODUCTION TO LTE: LTE, LTE-Advance, SAE and 4G Mobile Communicatios*, Second Edi. John Wiley & Sons, 2012.
- [17] D. Xenakis, N. Passas, L. Merakos, y C. Verikoukis, «Mobility Management for Femtocells in LTE-Advanced : Key Aspects and Survey of Handover Decision Algorithms», *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, n.º 1, pp. 64-91, 2014.
- [18] R. Veintimilla, «Estudio de los beneficios de la implementación de una segunda portadora en UMTS para una operadora móvil.», Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2016.
- [19] C. Brunner, A. Garavaglia, M. Mittal, M. Narang, y J. V. Bautista, «Inter-system handover parameter optimization», en *Vehicular Technology Conference*, 2006, pp. 1-6.
- [20] C. A. Ríos Lopez, «Trasposos verticales: Visión General e innovaciones.», *Sistemas & Telemática*, vol. 7, n.º 14, pp. 47-69, 2009.
- [21] SuShant, «Handover Processes», *Vertical Handover in 4G networks*, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://verticalhandover.blogspot.com/2011/08/handover-processes.html>.
- [22] N. Orozco, «Estudio de factibilidad para la migración del sistema móvil UMTS/HSPA a LTE», Escuela Politécnica del Ejército, 2011.
- [23] P. Panigrahi, «Soft & Softer Handover In UMTS System», *3GLTEinfo*, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.3glteinfo.com/soft-softer-handover-in-umts-system/>.
- [24] P. Bellavista, A. Corradi, y C. Giannelli, «Adaptive Buffering-based on Handoff Prediction for Wireless Internet Continuous Services», en *The 2005 International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC-05)*, 2005, pp. 1021-1032.
- [25] R. B. Ardian Ulvan y M. Ulvan, «Handover Scenario and Procedure in LTE-based Femtocells Networks», en *UBICOMM 2010: The Fourth International*

- Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies.*, 2010, pp. 213-218.
- [26] L. V. de Galicia, «Zonas de sombra: Apuntes de clase», *Universidad de Vigo*, 2002. [En línea]. Disponible en:  
[http://www.com.uvigo.es/radio/zonas\\_de\\_sombra.htm](http://www.com.uvigo.es/radio/zonas_de_sombra.htm).
- [27] J. López García, «Simulación de tramas de comunicación para UMTS», *Universidad de las Américas Puebla*, 2005.
- [28] SearchTechnote, «LTE Quick Reference». .
- [29] 3GPP, «Physical layer; Measurements», *TS 36.214*, vol. 10.1.0, pp. 0-14, 2011.
- [30] 3GPP, «About 3GPP», 2017. [En línea]. Disponible en:  
[www.3gpp.org/about-3gpp](http://www.3gpp.org/about-3gpp).

## ANEXOS

- I. Código (Ver anexo digital)