



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

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

**TEMA: “ESTUDIO TÉCNICO Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO  
DE SMALL CELLS PARA SOLVENTAR PROBLEMAS DE  
CAPACIDAD, COBERTURA Y CALIDAD DENTRO DE UNA  
RED DE TELEFONÍA MÓVIL 4G LTE”**

**AUTOR: MORALES ÁLVAREZ, RANDY GABRIEL**

**DIRECTOR: PhD. NIKOLAI ESPINOSA**

**SANGOLQUÍ**

**2015**

## CERTIFICADO

Certifico que el presente Proyecto de Investigación para la obtención del Título en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones titulado: **“ESTUDIO TÉCNICO Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE SMALL CELLS PARA SOLVENTAR PROBLEMAS DE CAPACIDAD, COBERTURA Y CALIDAD DENTRO DE UNA RED DE TELEFONÍA MÓVIL 4G LTE”**, fue realizado en su totalidad por el Sr. Randy Gabriel Morales Álvarez con C.C. 171699012-0; bajo mi supervisión y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Sangolquí, Julio de 2015

Atentamente,



---

Dr. Nikolai Espinosa  
DIRECTOR

## **AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, Randy Gabriel Morales Álvarez

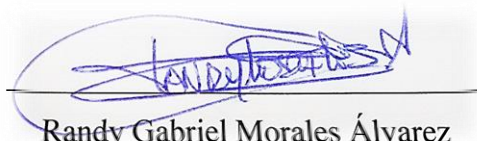
### **DECLARO QUE:**

El Proyecto de Investigación denominado: **“ESTUDIO TÉCNICO Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE SMALL CELLS PARA SOLVENTAR PROBLEMAS DE CAPACIDAD, COBERTURA Y CALIDAD DENTRO DE UNA RED DE TELEFONÍA MÓVIL 4G LTE”**, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan en el contenido, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Proyecto de Investigación en mención.

Sangolquí, Julio de 2015



Randy Gabriel Morales Álvarez

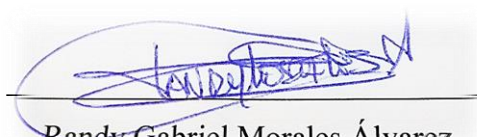
C.I.: 171699012-0

## AUTORIZACIÓN

Yo, Randy Gabriel Morales Álvarez

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, la publicación en la biblioteca virtual de la Institución el Proyecto de Investigación titulado: **“ESTUDIO TÉCNICO Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE SMALL CELLS PARA SOLVENTAR PROBLEMAS DE CAPACIDAD, COBERTURA Y CALIDAD DENTRO DE UNA RED DE TELEFONÍA MÓVIL 4G LTE”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Julio de 2015



Randy Gabriel Morales Álvarez

C.I.: 171699012-0

## DEDICATORIA

A mi madre María del Carmen, a quien respeto y admiro mucho por su incansable lucha, para formar a sus cuatro hijos como profesionales y sobre todo como personas de bien ante la sociedad, siempre preocupándose por nuestra salud y bienestar y que sin duda, haciendo el papel de padre y madre, ha logrado darnos su ejemplo de esfuerzo y perseverancia, para que sepamos enfrentar los problemas de la mejor manera, y lleguemos a definir y cumplir nuestros objetivos bien trazados en la vida, con su apoyo incondicional y correcto encaminamiento.

A mis hermanos Cindy, Dayanna y David con quienes compartí momentos muy especiales en mi vida, y que siempre me motivaron a seguir adelante.

A mi hijo Martín y a mi esposa Verónica, y a la bebé que viene en camino, quienes indudablemente han sido el motor para culminar mi carrera profesional y para seguirme superando continuamente y así forjar bases más sólidas para el cuidado y bienestar de todos en mi hogar.

Por último, el presente proyecto está dedicado a toda esa gente emprendedora, que hace posible el cumplimiento de sus metas, en base a su dedicación y arduo esfuerzo.

*Randy Gabriel Morales Álvarez*

## AGRADECIMIENTO

Todo mi agradecimiento a Dios, Jehová de los Ejércitos, por ser quien me ha acompañado en este largo camino hacia cumplir otra de mis metas.

A mi madre, María del Carmen, por brindarme su apoyo incondicional. A mi esposa, Verónica por colaborar a salir adelante, y a mi hijo Martin por tolerar el tiempo que dejé de compartir con él, para dedicarme a la culminación de mi carrera.

Al Dr. Nikolai Espinosa y al Ing. Christian Vega por compartirme sus conocimientos, y haberme orientado y guiado adecuadamente en el desarrollo del presente proyecto.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, y a todo el equipo de docentes que me encaminaron hacia la excelencia académica, y a practicar los valores morales que indudablemente me han llevado al éxito profesional y sobre todo personal.

*Randy Gabriel Morales Álvarez*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CERTIFICADO .....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....</b>	<b>iii</b>
<b>AUTORIZACIÓN.....</b>	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO .....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>xvii</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xx</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xxi</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Objetivo General .....	1
1.1.2 Objetivos Específicos .....	1
<b>1.2 DEFINICIÓN DEL PROYECTO .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Antecedentes .....	2
1.2.2 Justificación e Importancia.....	4
1.2.3 Alcance del Proyecto.....	8
<b>1.3 ESTADO ACTUAL DEL ARTE.....</b>	<b>9</b>
1.3.1 Estado Actual de la tecnología LTE en Latinoamérica.....	9
1.3.2 Estado Actual de la tecnología LTE en Ecuador.....	12
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>15</b>
<b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS REDES LTE .....</b>	<b>15</b>

<b>2.1</b>	<b>FACTORES QUE CONLLEVAN A IMPLEMENTAR LTE .....</b>	<b>15</b>
2.1.1	El crecimiento de datos móviles.....	15
2.1.2	Capacidad de un Sistema de Telecomunicaciones Móviles.....	17
2.1.3	Incremento de la Capacidad en un Sistema de Comunicaciones .....	18
2.1.4	Factores adicionales .....	19
<b>2.2</b>	<b>ARQUITECTURA LTE .....</b>	<b>20</b>
2.2.1	Evolución de UMTS a LTE .....	20
2.2.2	Elementos e Interfaces del Núcleo Evolucionado de la red EPC.....	22
2.2.3	Elementos e Interfaces de la red de acceso E-UTRAN.....	26
<b>2.3</b>	<b>INTERFAZ DE AIRE Uu.....</b>	<b>31</b>
2.3.1	Modos de Operación .....	32
2.3.2	Técnicas de acceso al medio .....	33
<b>2.4</b>	<b>REQUERIMIENTOS DE CALIDAD, CAPACIDAD Y COBERTURA LTE .....</b>	<b>39</b>
2.4.1	Requerimientos de Velocidad .....	39
2.4.2	Requerimientos de Capacidad.....	40
2.4.3	Requerimientos de Latencia .....	40
2.4.4	Requerimientos de Cobertura y Movilidad .....	40
<b>2.5</b>	<b>ESQUEMAS DE TRANSMISIÓN DE LAS SMART ANTENAS UTILIZADAS EN LTE.....</b>	<b>41</b>
2.5.1	Procesamiento de Diversidad .....	42
2.5.2	<i>Multiplexación Espacial MIMO</i> .....	46
2.5.3	Beamforming.....	54
2.5.4	Consideraciones para elegir un Esquema de Transmisión .....	59
	<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>61</b>
<b>3</b>	<b>REDES HETEROGÉNEAS Y SMALL CELLS LTE .....</b>	<b>61</b>
<b>3.1</b>	<b>AUTO ORGANIZACIÓN DE REDES .....</b>	<b>61</b>
3.1.1	Configuración Automática de un eNB .....	62



3.1.2	Coordinación de la Interferencia Inter-celda.....	65
3.1.3	Gestión de la Movilidad .....	66
3.1.4	RAN <i>Information Management</i> (RIM) .....	67
3.1.5	Minimización del <i>Drive Test</i> MDT .....	68
<b>3.2</b>	<b>REDES HETEROGÉNEAS .....</b>	<b>69</b>
3.2.1	Introducción .....	69
3.2.2	Mejoras en la Auto-Optimización de Redes Heterogéneas.....	73
3.2.3	CoMP Transmisión y Recepción Coordinada Multi-Punto .....	73
<b>3.3</b>	<b>SMALL CELLS.....</b>	<b>78</b>
3.3.1	Definición.....	78
3.3.2	Factores que conllevan a implementar <i>Small Cells</i> .....	78
3.3.3	Categorías de <i>Small Cells</i> .....	79
<b>3.4</b>	<b>CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DE LAS SMALL CELLS.....</b>	<b>85</b>
3.4.1	Auto-organización de <i>Small Cells</i> en la red LTE.....	87
3.4.2	Técnicas para el control de la Interferencia en <i>Small Cells</i> .....	89
3.4.3	Coordinación Mejorada de la Interferencia Inter-celda EICIC.....	91
3.4.4	Coordinación de Interferencias mediante señalización.....	92
3.4.5	Formas de acceso a las <i>Small Cells</i> .....	93
<b>3.5</b>	<b>CAMPOS DE APLICACIÓN DE LAS SMALL CELLS.....</b>	<b>95</b>
3.5.1	Residencial .....	96
3.5.2	Empresarial.....	96
3.5.3	Espacios públicos y Zonas Metropolitanas .....	97
3.5.4	Zonas Rurales .....	98
<b>3.6</b>	<b>INTEGRACIÓN DE LAS SMALL CELLS A LA RED LTE.....</b>	<b>99</b>
3.6.1	Integración con la arquitectura de un eNB.....	100
3.6.2	Integración independiente a través de un <i>Small Cell Gateway</i> .....	100
3.6.3	Escenarios de Despliegue.....	101

3.6.4	Estrategias de Despliegue.....	101
3.6.5	Desafíos de Despliegue .....	103
<b>3.7</b>	<b>DESVENTAJAS DE LAS SMALL CELLS.....</b>	<b>105</b>
<b>3.8</b>	<b>MEJORAS A LAS SMALL CELLS/REDES HETEROGÉNEAS.....</b>	<b>107</b>
	<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>109</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE SMALL CELLS LTE.....</b>	<b>109</b>
<b>4.1</b>	<b>MÉTODOS GENERALES PARA OPTIMIZAR UNA RED LTE .....</b>	<b>109</b>
4.1.1	Optimizando la red de <i>macroceldas</i> existente.....	109
4.1.2	Densificando la red de <i>macroceldas</i> .....	110
4.1.3	Adicionando <i>Small Cells</i> .....	110
<b>4.2</b>	<b>ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE ESTRATEGIAS DE EXPANSIÓN COMBINADAS CON SMALL CELLS .....</b>	<b>111</b>
4.2.1	Análisis del desempeño de una red Heterogénea HSPA 3.5G.....	111
4.2.2	Análisis del desempeño de una red Heterogénea LTE.....	115
<b>4.3</b>	<b>MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD EN UNA RED LTE.....</b>	<b>116</b>
4.3.1	Reducción de las Interferencias.....	117
4.3.2	Mejoramiento del <i>Throughput</i> .....	118
4.3.3	Servicios de Voz y SMS a través de LTE con <i>Small Cells</i> .....	120
<b>4.4</b>	<b>MEJORAMIENTO DE LA CAPACIDAD EN UNA RED LTE .....</b>	<b>122</b>
<b>4.5</b>	<b>MEJORAMIENTO DE LA COBERTURA EN UNA RED LTE.....</b>	<b>123</b>
<b>4.6</b>	<b>ESCENARIOS CLAVE PARA EL DESPLIEGUE DE SMALL CELLS .....</b>	<b>124</b>
4.6.1	Pequeñas Áreas Públicas Abiertas .....	126
4.6.2	Pequeñas Áreas públicas Cerradas .....	128
4.6.3	<i>Hotspots</i> internos de acceso público .....	129
4.6.4	Despliegue en Estadios – Sedes de alta demanda .....	131
4.6.5	Despliegue en Oficinas.....	132

<b>4.7</b>	<b>DETECCIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DE UNA RED PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SMALL CELLS.....</b>	<b>134</b>
<b>4.8</b>	<b>HERRAMIENTAS PARA LA PLANIFICACIÓN DEL DESPLIEGUE DE SMALL CELLS .....</b>	<b>136</b>
4.8.1	<i>Mentum Planet® de Infovista® .....</i>	137
4.8.2	Simulación Profesional de Cobertura Radioeléctrica <i>XIRIO®</i> .....	147
<b>4.9</b>	<b>CASO DE ESTUDIO: Análisis de cobertura de <i>Small Cells</i> en una zona de alta demanda de tráfico en la ciudad de Quito .....</b>	<b>149</b>
4.9.1	Determinación del punto crítico de despliegue .....	149
4.9.2	Análisis de Cobertura LTE utilizando <i>XIRIO®</i> .....	151
4.9.3	Parámetros para la predicción de Cobertura .....	152
4.9.4	Resultados de la predicción de Cobertura .....	157
<b>4.10</b>	<b>ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE SMALL CELLS Vs. DAS .....</b>	<b>160</b>
4.10.1	Sistemas de Antenas Distribuidas .....	160
4.10.2	Similitudes entre DAS y <i>Small Cells</i> .....	161
4.10.3	Diferencias entre DAS y <i>Small Cells</i> .....	161
<b>4.11</b>	<b>ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE SMALL CELLS LTE Vs. SISTEMAS Wi-Fi.....</b>	<b>162</b>
4.11.1	Escenario y entorno de pruebas.....	164
4.11.2	Análisis de resultados.....	164
<b>4.12</b>	<b>PROYECCIONES DE TRÁFICO A FUTURO PARA SMALL CELLS Y SUS SOLUCIONES COMPETIDORAS.....</b>	<b>167</b>
	<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>169</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>169</b>
<b>5.1</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>169</b>
<b>5.2</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>173</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>176</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1 Operadoras y Bandas 4G en América Latina [14].....</b>	<b>10</b>
<b>Tabla 2.1 Características principales de Interfaz de Aire WCDMA y LTE [1].</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 2.2 Características principales de la RAN de UMTS y LTE [1].....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 2.3 Características principales del núcleo de la red UMTS y LTE [1].....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 3.1 Categorías de Small Cells [28] .....</b>	<b>83</b>
<b>Tabla 4.1 Ganancia en la capacidad según la técnica utilizada [33] .....</b>	<b>123</b>
<b>Tabla 4.2 Creación de un nuevo estudio .....</b>	<b>152</b>
<b>Tabla 4.3 Nombre, ubicación y sectorización de la estación base.....</b>	<b>152</b>
<b>Tabla 4.4 Configuración de parámetros de la Estación Base y de la Antena...</b>	<b>154</b>
<b>Tabla 4.5 Configuración de parámetros del Terminal Móvil .....</b>	<b>154</b>
<b>Tabla 4.6 Modelo de Propagación COST231 Walfisch – Ikegami [57].....</b>	<b>155</b>
<b>Tabla 4.7 Propiedades del Método de Cálculo utilizado .....</b>	<b>155</b>
<b>Tabla 4.8 Configuración del área de cálculo .....</b>	<b>156</b>
<b>Tabla 4.9 Configuración de los rangos de señal .....</b>	<b>156</b>
<b>Tabla 4.10 Configuración de pruebas comparativas entre Small Cells LTE y Wi-Fi [46].....</b>	<b>164</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1 Suscripciones LTE en Latinoamérica 2013-2019 [14].....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 1.2 Suscripciones LTE de principales países de América Latina [14] ....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 1.3 Crecimiento previsto de conexiones LTE a nivel mundial [15].....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 2.1 Tráfico de voz y datos en la red Ericsson a nivel mundial [16].....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 2.2 Tendencia del tráfico de las comunicaciones móviles [16].....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 2.3 Capacidad de un sistema de comunicaciones. Ancho de banda de 5, 10 y 20 MHz [1] .....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 2.4 Evolución de la arquitectura LTE desde GSM y UMTS [1] .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 2.5 Arquitectura de la red LTE conforme a 3GPP.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 2.6 Arquitectura Interna del User Equipment [1] .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 2.7 Arquitectura e interfaces E-UTRAN [1] .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 2.8 Arquitectura interna de la Red de Transporte de E-UTRAN [1].....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 2.9 Protocolos de Transporte de la Interfaz de Aire LTE [1].....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 2.10 Modos de Operación FDD y TDD [1] .....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 2.11 Técnicas de acceso múltiple [1].....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 2.12 Técnicas de acceso al medio de los sistemas móviles [19] .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 2.13 Descripción Gráfica de un Resource Block.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 2.14 Representación de la señal OFDM en el dominio del tiempo y la frecuencia [17] .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 2.15 Asignación de sub-portadoras OFDM y OFDMA [17] .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 2.16 Técnicas OFDMA y SC-FDMA en el dominio del tiempo y la frecuencia [17] .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 2.17 Esquema de transmisión SIMO [1].....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 2.18 Operación de la Diversidad de Transmisión en Lazo Cerrado [1] .</b>	<b>44</b>
<b>Figura 2.19 Operación de la Diversidad de Transmisión en Lazo Abierto. Técnica de Alamouti [1].....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 2.20 Multiplexación Espacial MIMO 2 x 2 [1] .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 2.21 Esquemas MIMO m x n [1] .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 2.22 Throughput medido usando canal modelo EVA 3km/h, ancho de banda 10MHz [18].....</b>	<b>51</b>

<b>Figura 2.23 Throughput relativo a la ubicación de una antena configurada usando un ancho de banda de 10 MHz. Izquierda: 4x4 MIMO. Derecha: 2x2 MIMO [18].....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 2.24 Multi-user MIMO para Uplink [1] .....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 2.25 Mediante esta técnica, no es posible usar Multi-user MIMO para Downlink [1] .....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 2.26 Modo de operación básico del Beamforming [1] .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 2.27 Orientación del lóbulo usando desplazamientos de fase [1] .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 2.28 Beamforming utilizando dos sets de ponderadores en paralelo [1] .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 3.1 Procedimiento de Configuración Automática de Vecindades [8] .....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 3.2 Arquitectura de una red Heterogénea [4] .....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 3.3 Reducción de cobertura de una picocelda debido a la interferencia de una macrocelda cercana [1].....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 3.4 Reducción de cobertura de una macrocelda no perteneciente a un CSG, debido a la interferencia de una picocelda cercana perteneciente a un CSG [1].....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 3.5 Escenarios CoMP del Release 11 [1] .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 3.6 Arquitecturas de Control Distribuidas y Centralizadas [1] .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 3.7 Técnica CoMP Scheduling/Beamforming Coordinado [1] .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 3.8 Técnicas CoMP de Procesamiento Conjunto (JP) [1] .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 3.9 Comparación de Small Cells según el Alcance .....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 3.10 Varios tipos de Small Cells como parte integral de una red móvil moderna [33].....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 3.11 Tendencia del crecimiento de Small Cells por categoría [12].....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 3.12 Arquitectura de un sistema LTE-Advanced con Coordinador de Espectro [38] .....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 3.13 Afectación del SINR por no pertenecer al CSG.....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 3.14 EICIC Coordinación Mejorada de Interferencia Inter-Celda [35] .....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 3.15 Campos de aplicación de las Small Cells [33] .....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 3.16 Small Cells Campo de aplicación residencial [40] .....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 3.17 Small Cells Campo de aplicación Empresarial.....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 3.18 Small Cells Campo de Aplicación en Zonas Metropolitanas [61] ..</b>	<b>98</b>
<b>Figura 3.19 <i>Small Cells</i> Campo de Aplicación en Zonas Rurales [42] .....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 3.20 Formas de Integración de una Small Cell a la red LTE .....</b>	<b>100</b>

<b>Figura 4.1 Estrategias de mejoramiento de una red móvil [49].....</b>	<b>112</b>
<b>Figura 4.2 Resultados obtenidos al utilizar diferentes estrategias de mejoramiento. Volumen de Datos Mensual [49] .....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 4.3 Resultados obtenidos usando diferentes estrategias. Throughput [49] .....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 4.4 Incremento en la capacidad de una HetNet LTE [50].....</b>	<b>116</b>
<b>Figura 4.5 Incremento en el throughput de una HetNet LTE [50].....</b>	<b>116</b>
<b>Figura 4.6 Escenario de Despliegue. Pequeñas Áreas Públicas Abiertas. Plaza Foch - Quito [62] .....</b>	<b>126</b>
<b>Figura 4.7 Escenario de Despliegue. Pequeñas Áreas Públicas Cerradas [63] .....</b>	<b>128</b>
<b>Figura 4.8 Escenario de Despliegue. Hotspots Indoor de Acceso Público [64].</b>	<b>130</b>
<b>Figura 4.9 Escenario de Despliegue. Estadios – Sedes de alta demanda [66]...</b>	<b>131</b>
<b>Figura 4.10 Escenario de Despliegue. Oficinas Empresariales [65] .....</b>	<b>133</b>
<b>Figura 4.11 Principal campo de aplicación de las Small Cells [47] .....</b>	<b>135</b>
<b>Figura 4.12 Modelamiento 3D de la cobertura LTE, Mentum Planet® [51] ...</b>	<b>142</b>
<b>Figura 4.13 Mapa de tráfico 2D, Mentum Planet® [51].....</b>	<b>143</b>
<b>Figura 4.14 Mapa de recursos requeridos, Mentum Planet® [51] .....</b>	<b>144</b>
<b>Figura 4.15 Análisis de conectividad Backhaul, Mentum Planet® [51].....</b>	<b>145</b>
<b>Figura 4.16 Porcentaje de Evolución de capacidad vs. Número de Small Cells añadidas en una zona urbana [51].....</b>	<b>146</b>
<b>Figura 4.17 Mejoramiento de la capacidad en una red, Mentum Planet® [51]</b>	<b>147</b>
<b>Figura 4.18 Hueco de Cobertura y posible Hotspot en una zona céntrica de la Ciudad de Quito [56].....</b>	<b>150</b>
<b>Figura 4.19 Hueco de Cobertura en una zona céntrica-turística de Quito [56]</b>	<b>151</b>
<b>Figura 4.20 Emplazamiento y tipo de Small Cell a utilizar [59].....</b>	<b>153</b>
<b>Figura 4.21 Patrón de radiación Horizontal (izquierda) y Vertical (derecha).</b>	<b>153</b>
<b>Figura 4.22 Configuración del área de cálculo .....</b>	<b>156</b>
<b>Figura 4.23 Resultado de la predicción de cobertura con Xirio® .....</b>	<b>157</b>
<b>Figura 4.24 Resultados de cobertura en el rango de señal bueno.....</b>	<b>158</b>
<b>Figura 4.25 Resultados de cobertura en el rango de señal regular .....</b>	<b>159</b>
<b>Figura 4.26 Resultados de cobertura en el rango de señal malo.....</b>	<b>159</b>
<b>Figura 4.27 Resultados de cobertura 3D en Google Earth.....</b>	<b>160</b>
<b>Figura 4.28 Cobertura de las Small Cells versus un sistema DAS [55].....</b>	<b>161</b>
<b>Figura 4.29 Comparación de latencia entre una Small Cell LTE y Wi-Fi [46]</b>	<b>165</b>

<b>Figura 4.30 Comparación de tiempo de descarga entre una Small Cell LTE y Wi-Fi [46]</b> .....	165
<b>Figura 4.31 Comparación de throughput UL/DL entre una Small Cell LTE y Wi-Fi [46]</b> .....	166
<b>Figura 4.32 Predicción: Tráfico anual de datos móviles (EB), según el tipo de acceso a la red [4]</b> .....	167



## GLOSARIO

<b>3GPP</b>	<i>Third Generation Partnership Project</i>
<b>ABS</b>	<i>Almost Blank Subframe</i>
<b>AWS</b>	<i>Advanced Wireless Services</i>
<b>API</b>	<i>Application Programming Interface</i>
<b>BSC</b>	<i>Base Station Controller</i>
<b>CDMA</b>	<i>Code Division Multiple Access</i>
<b>CNT</b>	<i>Corporación Nacional de Telecomunicaciones</i>
<b>CoMP</b>	<i>Coordinated Multi-Point transmission and reception</i>
<b>COST</b>	<i>European Cooperation in Science and Technology</i>
<b>CRE</b>	<i>Cell Range Expansion</i>
<b>CS</b>	<i>Circuit Switched</i>
<b>CSFB</b>	<i>Circuit Switch Fallback</i>
<b>CSG</b>	<i>Closed Subscriber Group</i>
<b>DAS</b>	<i>Distributed Antenna System</i>
<b>dB</b>	<i>Decibel</i>
<b>dB<sub>i</sub></b>	<i>Decibels relative to an isotropic antenna</i>
<b>dB<sub>m</sub></b>	<i>Decibels relative to one milliwatt</i>
<b>DL/UL</b>	<i>Downlink/Uplink</i>
<b>EDGE</b>	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>
<b>EICIC</b>	<i>Enhanced Inter Cell Interference Coordination</i>
<b>eNB</b>	<i>Evolved Node B</i>
<b>EPC</b>	<i>Evolved Packet Core</i>
<b>E-UTRAN</b>	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
<b>EVA</b>	<i>Extended Vehicular A channel model</i>
<b>FCS</b>	<i>Fast Carrier Selection</i>
<b>FDD</b>	<i>Frequency Division Duplex</i>
<b>FDMA</b>	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
<b>FTP</b>	<i>File Transfer Protocol</i>
<b>GERAN</b>	<i>GSM EDGE Radio Access Network</i>
<b>GGSN</b>	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
<b>GIS</b>	<i>Geographic Information System</i>

<b>GPRS</b>	<i>General Packet Radio Service</i>
<b>GSM</b>	<i>Global System for Mobile communications</i>
<b>GTP</b>	<i>GPRS Tunneling Protocol</i>
<b>HeNB</b>	<i>Home evolved Node B</i>
<b>ICI</b>	<i>Inter Cell Interference</i>
<b>ICIC</b>	<i>Inter Cell Interference Coordination</i>
<b>IMS</b>	<i>IP Multimedia Subsystem</i>
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol</i>
<b>LOS</b>	<i>Line Of Sight</i>
<b>LTE</b>	<i>Long Term Evolution</i>
<b>MAC</b>	<i>Media Access Control</i>
<b>MDT</b>	<i>Minimization of Drive Tests</i>
<b>MGW</b>	<i>Media Gateway</i>
<b>MIMO</b>	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
<b>MME</b>	<i>Mobility Management Entity</i>
<b>MMTel</b>	<i>Multimedia Telephony service</i>
<b>MPLS</b>	<i>Multi Protocol Label Switching</i>
<b>MRO</b>	<i>Mobility Robustness Optimization</i>
<b>MSC</b>	<i>Mobile Switching Centre</i>
<b>MU-MIMO</b>	<i>Multiple user MIMO</i>
<b>NLOS</b>	<i>Line Of Sight</i>
<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<b>OFDMA</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access</i>
<b>OSS</b>	<i>Operations Support Systems</i>
<b>PAPR</b>	<i>Peak to Average Power Ratio</i>
<b>PCI</b>	<i>Physical Cell Identity</i>
<b>PDCP</b>	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
<b>PDN</b>	<i>Packet Data Networks</i>
<b>PDSCH</b>	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
<b>P-GW</b>	<i>Packet data network Gateway</i>
<b>PLMN</b>	<i>Public Land Mobile Network</i>
<b>PMI</b>	<i>Precoding Matrix Indicator</i>
<b>PRACH</b>	<i>Physical Random Access Channel</i>
<b>PSTN</b>	<i>Public Switched Telephone Network</i>

<b>PUSCH</b>	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
<b>QAM</b>	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i>
<b>RAN</b>	<i>Radio Access Network</i>
<b>RF</b>	<i>Radio Frequency</i>
<b>RIM</b>	<i>Radio access network Information Management</i>
<b>RLC</b>	<i>Radio Link Control</i>
<b>RNC</b>	<i>Radio Network Controller</i>
<b>RNTP</b>	<i>Relative Narrowband Transmit Power</i>
<b>ROI</b>	<i>Return On Investment</i>
<b>RRC</b>	<i>Radio Resource Control</i>
<b>RSRP</b>	<i>Reference Signal Received Power</i>
<b>SAE</b>	<i>System Architecture Evolution</i>
<b>SC-FDMA</b>	<i>Single-Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
<b>SGSN</b>	<i>Serving GPRS Support Node</i>
<b>S-GW</b>	<i>Serving Gateway</i>
<b>SIM</b>	<i>Subscriber Identity Module</i>
<b>SINR</b>	<i>Signal-to-Interference plus Noise Ratio</i>
<b>SON</b>	<i>Self-Optimizing Network/Self Organizing Network</i>
<b>SU-MIMO</b>	<i>Single User MIMO</i>
<b>TAC</b>	<i>Tracking Area Code</i>
<b>TCAC</b>	<i>Tasa de Crecimiento Anual Compuesto</i>
<b>TDD</b>	<i>Time Division Duplex</i>
<b>TDMA</b>	<i>Time Division Multiple Access</i>
<b>TIC</b>	<i>Tecnologías de la Información y la Comunicación</i>
<b>UE</b>	<i>User Equipment</i>
<b>UICC</b>	<i>Universal Integrated Circuit Card</i>
<b>UMTS</b>	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
<b>USIM</b>	<i>Universal Subscriber Identity Module</i>
<b>VANC</b>	<i>VoLGA Access Network Controller</i>
<b>VoIP</b>	<i>Voice over IP</i>
<b>VoLGA</b>	<i>Voice over LTE via Generic Access</i>
<b>WCDMA</b>	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
<b>X2-AP</b>	<i>X2 Application Protocol</i>

## RESUMEN

En este proyecto, se estudia las redes heterogéneas, con un enfoque principal en el despliegue de *Small Cells*, el cual se propone y analiza como una alternativa para la optimización de las redes LTE, para solventar problemas de capacidad, cobertura y calidad, haciendo uso de sus características de rentabilidad y eficiencia, así como de las ventajas de auto-configuración que ofrece. El estudio se enfoca en la utilización de herramientas para el óptimo despliegue de *Small Cells*, mediante la identificación de *Hotspots* y *Huecos de Cobertura*. La investigación concluye que los tres tipos de *Small Cells* existentes: *femtoceldas*, *picoceldas* y *microceldas*, pueden basarse en LTE, para soportar una amplia variedad de escenarios de implementación ya sean internos o externos, tanto para cubrir zonas donde la capa macro no lo hace, como para drenar el tráfico de la red de *macroceldas*, la cual presenta saturación principalmente en áreas metropolitanas de alta demanda. Se exponen y se evalúan investigaciones de otras fuentes, que comparan el desempeño de las *Small Cells* con el de soluciones similares. Se analiza también los esquemas de transmisión que utilizan sus antenas, y el proceso de integración al núcleo de la red. Por último, mediante el *software* de simulación *XIRIO*, se realizan predicciones de cobertura radioeléctrica de una *Small Cell*, que se ubicó estratégicamente en un área que se determinó crítica, dentro de una red LTE de la ciudad de Quito.

### PALABRAS CLAVE:

- *LTE*
- *SMALL CELLS*
- *HOTSPOTS*
- *SON*
- *XIRIO*

## ABSTRACT

In this project, heterogeneous networks are studied, with a primary focus on the deployment of *Small Cells*, which are proposed and discussed as an alternative to LTE networks optimization, to solve problems of capacity, coverage and quality, by using its cost-efficiency and performance features, as well as advantages of self-configuration that provides. This study focuses on the use of tools for optimal deployment of *Small Cells*, by identifying *Hotspots* and *Coverage Holes*. The research concludes that the three types of *Small Cells* existing: *femtocells*, *picocells* and *microcells* can be based on LTE, to support a large variety of deployment scenarios whether internal or external, both to cover areas where the macro layer does not, and macro layer traffic offload, which is mostly overloaded in high demand metropolitan areas. Research from other sources that compare the performance of the *Small Cells* with similar solutions, are exhibited and analyzed in this project. *Small Cells* antenna transmission schemes and integration process of *Small Cells* to the core network is also discussed. Finally, using *XIRIO* simulation software, a *Small Cell* radio coverage predictions are made, this *Small Cell* was strategically located in a coverage hole and *Hotspot* area determined, within a LTE network of Quito city.

### KEYWORDS:

- *LTE*
- *SMALL CELLS*
- *HOTSPOTS*
- *SON*
- *XIRIO*

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 OBJETIVOS

#### 1.1.1 Objetivo General

Realizar el estudio técnico de las *Small Cells*, como una propuesta a la solución de problemas relacionados a la capacidad, cobertura y calidad que se pueden suscitar dentro de una red de telefonía móvil de cuarta generación LTE.

#### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar un análisis introductorio generalizado, acerca del funcionamiento y arquitectura actual de una red de telefonía móvil LTE de cuarta generación, así como las características que adquiere al convertirse en red heterogénea.
- Investigar las principales características de las *Small Cells*, modos de operación, así como sus ventajas y desventajas en cuanto a la calidad de servicio, aditamentos y prestaciones, y como éstas pueden aportar a la optimización de una red Heterogénea LTE.
- Indagar sobre los esquemas de transmisión de las *Smart* antenas incorporadas en las *Small Cells*, así como el procedimiento de integración de las mismas en

las redes LTE, y su rendimiento en comparación con sus tecnologías competidoras.

- Determinar posibles escenarios de despliegue y emplazamientos para las *Small Cells* en un ámbito urbano, en base al análisis de tráfico y cobertura de la red, donde no ha sido posible optimizar mediante la modificación de parámetros físicos y/o lógicos en la capa macro.
- Mediante *software* especializado, realizar predicciones de cobertura radioeléctrica de una *Small Cell*, ubicada estratégicamente en un área que se determine crítica, dentro de una red LTE, donde se puedan suscitar problemas de capacidad, cobertura y/o calidad, tomando como referente principal el análisis de las condiciones topográficas y de los niveles de señal en la zona.
- Basados en las experiencias obtenidas en el desarrollo del proyecto, determinar conclusiones y recomendaciones para aplicarse en futuros trabajos de investigación.

## 1.2 DEFINICIÓN DEL PROYECTO

### 1.2.1 Antecedentes

Entre las consideraciones que se deben tener en cuenta para implementar una red de datos de banda ancha móvil, están la capacidad de red y la eficiencia en la cobertura, sin dejar de lado la relación costo beneficio al optimizar éstos parámetros. Al conocer los problemas de incremento exponencial del tráfico de datos, asociados con el actual crecimiento de usuarios y con la gran cantidad de nuevas aplicaciones disponibles para los *smartphones* y *tablets*, los operadores de redes móviles están elaborando estrategias para soluciones a corto y largo plazo que permitan aliviar la carga de datos en sus redes, ya que de no hacerlo estas se verían saturadas y la calidad de servicio (QoS) se degradaría, al punto de obtener la insatisfacción de sus clientes. La implementación de *Small Cells* como solución a problemas de calidad, cobertura y capacidad de la red, constituye una de las soluciones a mediano plazo.

En base a análisis estadísticos, se indica que para el año 2015 [11], el volumen de datos transmitido a través de redes inalámbricas será superado por el tráfico que circula a través de redes cableadas. Este cambio se viene dando desde la adquisición masiva de dispositivos móviles, que incursionan la evolución de las tecnologías en redes celulares 3G, 3.5G y LTE, siendo un paso importante para satisfacer parte del crecimiento en la demanda y ofrecer servicios de mayor capacidad.

La gestión eficiente de los recursos disponibles, implica maximizar el uso de las bandas de frecuencia asignadas, optimizar la potencia utilizada en los equipos terminales para no reducir su autonomía, y ofrecer mayor capacidad de transmisión. Estos factores están haciendo que el número de celdas, o radio bases aumente, reduciéndose así el radio de cobertura de éstas; lo cual se conoce como *Small Cells*, que actualmente están evolucionando en el ámbito de las redes de telefonía móvil. [11]

Comúnmente el despliegue de una red de telefonía móvil celular es mediante la implementación de *macrocelas* [12], lo que permite una amplia cobertura en un área en particular, sin embargo conforme va aumentando el tráfico o el número de usuarios, se hace necesaria la subdivisión celular, la cual consiste en aumentar el número de celdas que dan servicio a un área determinada. No obstante, se ha comprobado que al tener más celdas dentro de una zona determinada se tiene un rendimiento decreciente, debido a la interferencia de las estaciones de radio y a los efectos de compatibilidad electromagnética, además de las dificultades y costos que implican construir más infraestructura, torres o arrendar nuevos emplazamientos.[12]

Actualmente, la Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT) es la única operadora en el país que brinda el servicio de telefonía móvil LTE desde noviembre del año 2013, sin embargo los contratos de concesión para otorgar espectro para el despliegue de la red 4G- LTE para las compañías telefónicas privadas que operan en Ecuador, Claro y Movistar han sido concretados y están negociando la documentación respectiva para empezar a operar en 4G desde abril 2015, con lo que para este año, la CNT empezará a competir con la operadoras privadas, lo cual tentativamente reduciría la captación de clientes que hoy por hoy maneja la CNT. Al momento, el despliegue de la red LTE de CNT faculta la posibilidad de suscribir a esta red, a 300 000 usuarios en las principales ciudades del país.



La primera red 4G-LTE en Ecuador fue desplegada por la CNT el 11 de septiembre del 2013, inicialmente con el proveedor *Alcatel-Lucent* para brindar conectividad de ultra banda ancha a las ciudades de Quito, Guayaquil, Cuenca, Machala y Loja, y a las principales ciudades de la costa del Pacífico y el sur del país, sin afectación de los actuales servicios de 2G y 3G en las áreas mencionadas.

Hasta el momento la CNT ha podido ofrecer velocidades de navegación de hasta 100 Mbps en *Downlink* y 40 Mbps en *Uplink*, aumentando notablemente la capacidad para banda ancha móvil y habilitando una amplia gama de servicios y aplicaciones disponibles ahora en dispositivos móviles. Además, con esto será factible desplegar avanzados servicios y aplicaciones en lugares de gran concentración de usuarios como en centros financieros, industriales, residenciales, académicos y recreativos. [5]

La cobertura de servicios de banda ancha LTE también se extenderá a zonas rurales en Ecuador, donde la cobertura actual es limitada o nula, proveyendo conectividad de alta velocidad para una amplia gama de aplicaciones como el video de alta definición, juegos avanzados en línea, tele-presencia, *e-learning* y seguridad pública.

En la ESPE, anteriormente, se han realizado proyectos de investigación relacionados con la tecnología LTE, que abarcan estudios de factibilidad para la migración de la red 3G a 4G, diseño de una red LTE en Tumbaco y Los Chillos, y finalmente la implementación de la red 4G en el DMQ para la CNT, así como la implementación de 4G en zonas rurales del país. Lo que se pretende con este proyecto es dar continuidad al desarrollo de la red de cuarta generación en nuestro país, analizando la implementación de *Small Cells* como alternativa para su optimización.

### **1.2.2 Justificación e Importancia**

Ante un incremento exponencial de tráfico de voz y datos móviles, que es la tendencia a nivel mundial y en el país, es necesaria la implementación de nuevas tecnologías y topologías de red, que permitan enfrentar este incremento, sin degradar la calidad del servicio.

Las operadoras de telefonía móvil del país, como CNT, Claro y Movistar están comprometidas con seguir mejorando su cobertura y la calidad de la conectividad, brindando los más altos estándares de servicio, realizando inversión en soluciones efectivas y nuevas plataformas tecnológicas, ampliando a la vez, sus redes de telecomunicaciones.

Una solución fundamental para los operadores móviles, es la creación de redes heterogéneas (*HetNets*), lo que permite una buena cobertura y un alto rendimiento de la red LTE en un área en particular, y conforme va aumentando el tráfico o el número de usuarios, es recomendable la colocación de *Small Cells* para enfrentar la gran demanda de usuarios de las redes móviles.

La implementación de estos dispositivos genera gran expectativa y es una decisión estratégica a mediano plazo que se propone como alternativa de optimización a las operadoras de telefonía móvil para posicionar su actividad en el mercado de las Telecomunicaciones con tecnologías 3G, HSPA + y principalmente LTE. [1]

Las *Small Cells*, son bases celulares de baja potencia de radio que mejoran la cobertura de redes móviles al reducir las interferencias entre celdas próximas; a la vez que aumenta la calidad de la señal con el fin de incrementar la capacidad y el tráfico de la red de retorno a un menor costo que una *macrocelda* o nueva estación, misma que finalmente beneficiaría de manera sustancial a las operadoras para reposicionar su actividad económica alrededor de aplicaciones de telefonía e internet móvil, evolucionando hacia un nuevo operador de servicios globales. [12]

La solución que se plantea desarrollar en este proyecto es para mejorar la cobertura y rendimiento de la red, tanto en interiores como en exteriores, facilitando al mismo tiempo la operación y mantenimiento de una red LTE.

Se considera este proyecto de vital importancia, tomando en cuenta que actualmente los tres operadores móviles del país Claro, Movistar y CNT tienen ya, la adjudicación del espectro 4G para desplegar y operar en la tecnología de cuarta generación LTE, y por ende la necesidad de realizar ajustes y optimizar su red. La implementación de *Small Cells* no solo mejoraría la Capacidad, Cobertura y Calidad

de la red, sino que también, al operar en LTE, incrementarían la duración de la batería en los equipos celulares, el cual, hoy por hoy, es una característica de gran importancia para los usuarios de telefonía móvil.

Según datos de la Superintendencia de Telecomunicaciones, en el país, hasta agosto de 2014, había 4.973 líneas activas con el servicio de 4G. “La SENATEL prevé que en los próximos años el porcentaje de penetración del servicio móvil avanzado, supere el 100%, es decir, la totalidad del número de habitantes del país” [13]. Es en este razonamiento donde radica la importancia, para que el tema de las *Small Cells* tenga gran acogida en la industria de las Telecomunicaciones en estos tiempos.

Las redes de acceso móvil en las grandes ciudades, han de evolucionar a redes mucho más capilares con un mayor número de celdas de menor tamaño, con cada vez mayor número de emplazamientos dedicados al servicio en áreas exclusivas de edificios, estadios, coliseos, calles, puentes, túneles, etc.

Conociendo estos motivos, para reducir el número de zonas de mala/baja cobertura y/o falta de capacidad, la operadoras de telefonía móvil tienen como alternativa desplegar un gran número de *Small Cells*, en zonas críticas de influencia de su red, siendo ésta una de las posibles soluciones, tanto en el exterior (*outdoor*), espacios públicos urbanos y zonas rurales, como en el interior (*indoor*) de estructuras y edificios, haciendo uso de los recursos que las operadoras poseen como son: *Backhaul*<sup>1</sup> de microondas (IP MW) o de fibra óptica (FTTx) mediante un Gateway, para transportar el tráfico generado.

Para el año 2015 se estima que el tráfico de datos móvil mensual superará a todo el que se produjo en el año 2008 y, por tanto, se requerirán nuevas tecnologías y topologías de red para hacer frente al mismo, de una manera eficiente, sin degradar la calidad del servicio. Una solución a parte del problema, pasa por las redes heterogéneas (HetNets), de las cuales las *Small Cells* son un elemento fundamental.

---

<sup>1</sup> La red *Backhaul* es el medio de transporte que está contenido en la RAN (Radio Access Network), entre las estaciones base y los controladores necesarios. El término controladores, engloba a los elementos frontera de la red EPC (Evolved Packet Core), como son los MME, SGW y PDN-GW

Las *Small Cells*, permitirán a las operadoras de telefonía móvil, garantizar niveles de calidad de servicio, acorde a las expectativas de los usuarios, puesto que al reducirse el tamaño de la celda, la capacidad disponible es mayor dentro de su área de cobertura.

Además, este tipo de celdas ofrecen gran flexibilidad en el despliegue porque pueden complementar la cobertura de zonas con mala recepción de señal, mejorar la cobertura en el interior de edificios o reforzar la cobertura de zonas en las que, de manera puntual, se dan cita un gran número de personas (por ejemplo, durante un evento de masiva afluencia de personas).

Así pues, las áreas de alto tráfico, como pueden ser zonas comerciales, estadios, estaciones, aeropuertos, zonas de ocio, etc., requieren flexibilidad de espacio para instalar nuevas antenas en más lugares, lo que no siempre es factible debido a las limitaciones urbanísticas.

La alternativa a las *macrocelas* para la ganancia de mayor capacidad es la instalación de *Small Cells*, para proporcionar la capacidad adicional necesaria en el lugar adecuado, que no requiere de una amplia concesión de permisos y gastos para adquirir e instalar, existiendo varias soluciones técnicas y de infraestructura para ello.

Algunos ejemplos de predicciones de cobertura y proyecciones de instalación de *Small Cells* en la ciudad de Quito, serán presentados en este proyecto, con el objetivo de modelar una plataforma estratégica para la toma de decisiones en el despliegue y optimización de una red de telefonía móvil de cuarta generación LTE.

Por otro lado, realizar un estudio de este tipo se considera de vital importancia, ya que en un futuro, el número de *Small Cells* excederá el número de *macrocelas* implementadas en una red heterogénea. En noviembre de 2012, el número total de *Small Cells* desplegadas a nivel mundial, ya sobrepasó el número de celdas en la capa macro. La expectativa industrial, es que 5 a 10 *Small Cells* serán desplegadas por cada *macrocela*.

### 1.2.3 Alcance del Proyecto

Inicialmente se detallará fundamentos teóricos necesarios para comprender el funcionamiento, tanto de las redes de cuarta generación LTE, como de las *Small Cells* que operan en esta tecnología. Se realizará un estudio sobre su funcionamiento, arquitectura, tipos, tecnologías en las que pueden operar, ventajas, desventajas, así como sus características y complementos. Al mismo tiempo, se investigará sobre las *Smart Antenas* utilizadas.

Se va a exponer un estudio del rendimiento de las redes heterogéneas, tomando como punto de referencia principal la implementación de *Small Cells*, basados en los indicadores de Capacidad, Cobertura y Calidad. El estudio del *Backhaul*, o red de transporte, dentro del proceso de integración de las *Small Cells* al *Core*, no se incluye en el alcance de este proyecto.

Se definirá, los posibles escenarios de despliegue para las *Small Cells*. Se establecerá los parámetros de transmisión que se deben evaluar para garantizar Capacidad, Cobertura y Calidad de servicio en los denominados *Hotspots*<sup>2</sup> y así poder determinar posibles emplazamientos para la instalación de *Small Cells*.

Se estudiará herramientas vanguardistas, útiles para un despliegue efectivo de *Small Cells*. Además se efectuará predicciones de cobertura con el *software Xirio Online*®, en un determinado punto de la ciudad de Quito, donde exista falta de cobertura, y gran afluencia de usuarios de telefonía móvil, donde se establezca una alta demanda del servicio de voz, y principalmente de datos.

Se realizará la evaluación del desempeño de *Small Cells*, basados en indicadores de carga de tráfico o *huellas de cobertura*. Con esto se espera establecer lineamientos y estrategias que ayuden a los operadores nacionales a optimizar su combinación de *macrocelas* y *Small Cells*, en futuros despliegues.

---

<sup>2</sup> Área de alta demanda de acceso a internet a través de una red inalámbrica y un enrutador conectado a un ISP. En este caso el enrutador viene a ser la *Small Cell*.

## 1.3 ESTADO ACTUAL DEL ARTE

### 1.3.1 Estado Actual de la tecnología LTE en Latinoamérica

Aunque el despliegue de redes LTE está en pleno apogeo en la mayoría de los principales mercados de América Latina, la adopción de esta tecnología aún sigue siendo relativamente lenta. Hasta Marzo de 2015, comercialmente se han lanzado 49 redes LTE en América Latina, y se espera que a lo largo de este año se incrementen estas redes en Argentina, Ecuador, Centroamérica, Perú y Venezuela.

Conforme a la tendencia de los últimos años, se estima que habría 13.7 millones de conexiones LTE en Latinoamérica al cierre del año 2014, lo que representa un poco más del 1.9% del total de suscripciones móviles de la región. Esto se compara desfavorablemente con las cifras de América del Norte (47.6%), Europa Occidental (9.9%), Asia y el Pacífico (6.2%), y el resto de Europa que se estima con un 2.7%. [14]

Evidentemente, el principal factor que ha impedido el crecimiento de la red LTE en Latinoamérica en general, es la lentitud de la subasta del espectro radioeléctrico necesario, por parte de los entes reguladores en cada nación, por lo que los operadores móviles aún se enfocan en la migración de 2G a 3G, para maximizar el *retorno de la inversión* (ROI), realizando la densificación de sus redes 3G y mejoras de su calidad.

Además, otra barrera clave para impedir el crecimiento de las redes LTE es el precio de los equipos terminales 4G, como *smartphones* capaces de soportar esta tecnología. Actualmente, un *Smartphone* LTE es 15% a 25% más caro que un terminal móvil dual 2G/3G.

En diferentes medios [14] se destaca el rápido crecimiento en los últimos años de las redes 4G en el sur del continente Americano. La banda de frecuencias que ha tenido una mayor aceptación, ha sido la de 1700/2100 MHz (banda AWS), seguido por el rango de frecuencias situadas en los 2500/2690 MHz. En la siguiente tabla se puede ver un resumen de la situación actual de las redes 4G en América del Sur.

**Tabla 1.1**  
**Operadoras y Bandas 4G en América Latina [14]**

PAÍS	OPERADOR	FRECUENCIA	BANDA	ENTRA EN FUNCIONAMIENTO:
Argentina	Movistar	1700MHz	4	Dic 2014
	Personal	1700MHz	4	Dic 2014
Bolivia	Entel	700MHz	13	Abr 2013
	Tigo	700MHz	17	Jul 2014
Brasil	Claro	2600MHz	7	Dic 2012
	Nextel	1800MHz	3	Jun 2014
	Oi	2600MHz	7	Abr 2013
	On Telecom	2600MHz	38	Mar 2013
	SKY Brasil	2600MHz	38	Dic 2011
	TIM	1800MHz	3	Ene 2015
	Vivo	2600MHz	7	Abr 2013
Chile	Claro	2600MHz	7	Jun 2013
	Entel	2600MHz	7	Mar 2014
	Movistar	2600MHz	7	Nov 2013
Colombia	Avantel	1700MHz	4	Ago 2014
	Claro	1700 / 2600MHz	4 / 7	Feb 2014
	DirecTV	2600MHz	38	Jul 2014
	ETB	1700MHz	4	Oct 2014
	Movistar	1700MHz	4	Dic2013
	Tigo	1700MHz	4	Dic2013
	Une-EPM	2600MHz	7	Jun 2012
Ecuador	CNT Mobile	1700 / 2100MHz	4 (AWS)	Dic 2013
	Claro	1900MHz	2	Mar 2015
	Movistar	1700MHz	2	Mar 2015
México	Movistar	1900MHz	2	Oct 2012
	Nextel	1700MHz	4	Oct 2014
	Telcel	1700MHz	4	Nov 2012
Paraguay	Personal	1900MHz	2	Feb 2013
	VOX	1700MHz	4	Dic 2012
Perú	Claro	1900MHz	2	May 2014
	Movistar	1700MHz	4	Ene 2014
	Entel	1700MHz	4	Oct 2014
Uruguay	ANTEL	1700MHz	4	Dic 2011
	Claro	1700MHz	4	Feb 2014
	Movistar	1900MHz	2	Sep 2014
Venezuela	Digitel	1800MHz	3	Ago 2013
	Movistar	1700MHz	4	Feb 2015

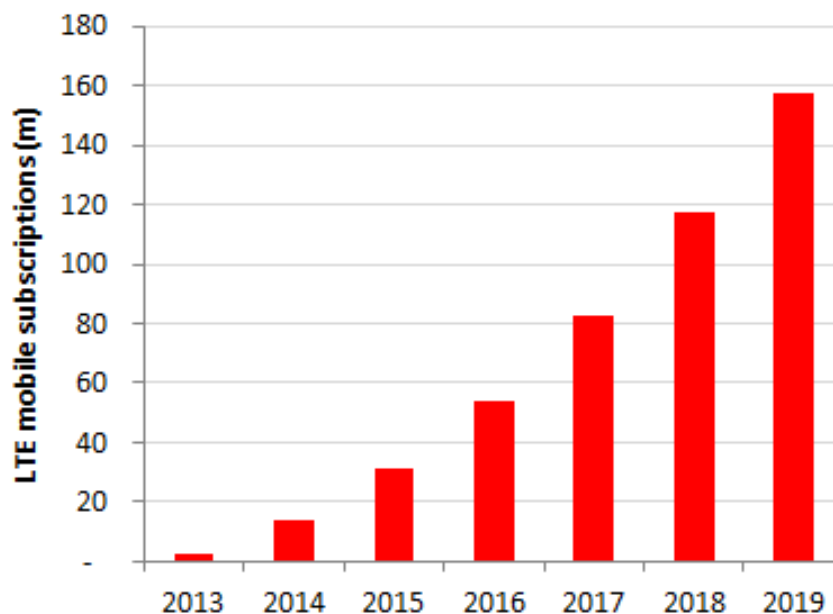


Figura 1.1 Suscripciones LTE en Latinoamérica 2013-2019 [14]

Se prevé un rápido crecimiento de estas redes durante el año 2015, que ayude a aumentar el despliegue 4G de diferentes operadores en países que ya cuentan con infraestructuras de este tipo, además se especula que nuevos países se sumen a la lista antes de fines del 2015.

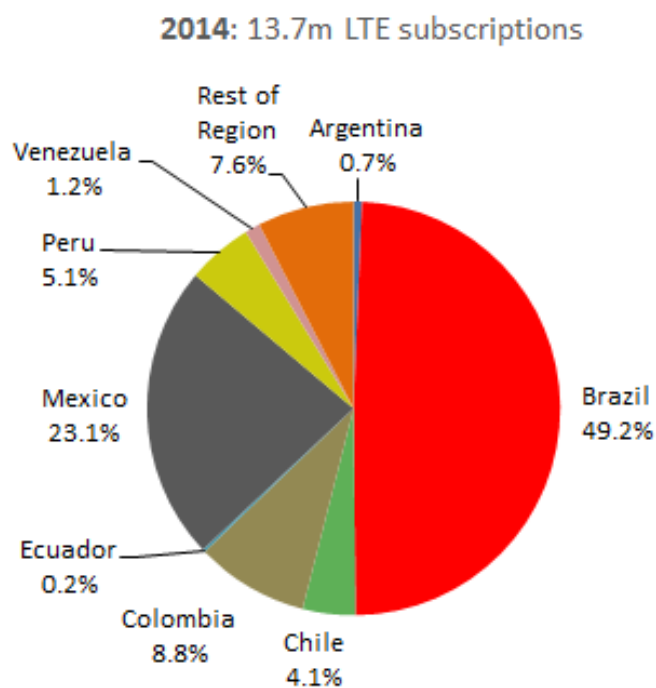


Figura 1.2 Suscripciones LTE de principales países de América Latina [14]



La creciente demanda de internet de banda ancha por parte de los usuarios y sus dispositivos móviles, cuyas aplicaciones cada vez más se basan en la utilización del servicio de datos, pone de manifiesto la necesaria evolución de la tecnología LTE, ya que por ella circulará el futuro de las telecomunicaciones móviles que exige el mercado global.

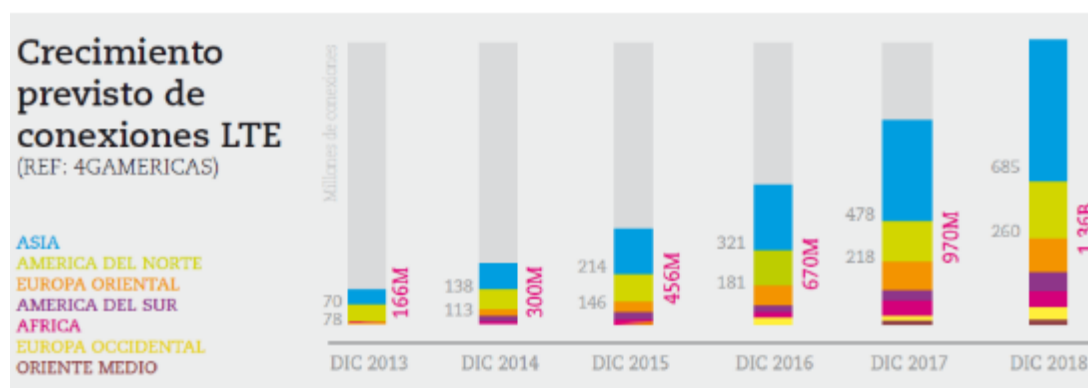


Figura 1.3 Crecimiento previsto de conexiones LTE a nivel mundial [15]

### 1.3.2 Estado Actual de la tecnología LTE en Ecuador

Como se conoce, en Ecuador, a fines del año 2013 la primera red LTE fue desplegada por la operadora estatal CNT (Corporación Nacional de Telecomunicaciones), la cual brinda servicios de telecomunicaciones móviles y fijas en el país. Con la llegada de esta red 4G, de la mano del proveedor *Alcatel-Lucent*, se pudo proveer una mayor capacidad para la banda ancha móvil (hasta 21Mbps de velocidad en DL) y habilitar una amplia gama de aplicaciones y servicios en dispositivos móviles, con *throughputs* muy superiores a los ofrecidos por la tecnología predecesora 3G. Actualmente CNT ofrece planes de datos, a un bajo costo (\$9.99 por 500MB/mes) [67].

Esto fue posible, gracias a que el Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONECEL), autorizó el uso de 30 MHz en la banda de 700 MHz, y de 40 MHz adicionales en la banda de 1700-2100 (AWS) para la operadora CNT [48].

Sin embargo en Febrero de 2015, se lleva a cabo una concesión del espectro radioeléctrico tanto para el despliegue de la red LTE, como para la ampliación del

espectro para la red 3G de las otras empresas de telefonía móvil que operan en el país: OTECEL (Movistar) y CONECEL (Claro), las cuales realizan una fuerte inversión económica para poder operar en la tecnología 4G, con lo que esperan brindar nuevos y mejores servicios a todos los usuarios locales.

De acuerdo con las condiciones legales, económicas y técnicas, la asignación de espectro establecida para Movistar es de 50 MHz y para Claro de 60 MHz en las bandas de 1700 MHz y 1900 MHz, respectivamente. De esta dotación de espectro, ambas operadoras han destinado 40 MHz para la banda 4G, y el resto para adicionar a la banda 3G. En efecto, se presenta una distribución desigual del espectro, pues en dicha concesión se le otorga más recursos a la operadora Claro, bajo la justificación de que esta operadora, en la actualidad, posee aproximadamente el 60% del total de abonados de telefonía móvil en Ecuador.

Junto con esta concesión, las tres operadoras móviles del país, CNT, Movistar y Claro, se ven comprometidas a cubrir cerca de 1000 kilómetros de carretera con el servicio móvil de voz y de datos, y a nivel *indoor* a varias estructuras como edificios, coliseos, y estadios que se ubican en zonas críticas de las principales ciudades, donde radica el posible campo de aplicación del despliegue de *Small Cells*, lo cual deberá traer consigo un beneficio para toda la población, hasta el final de dicha concesión en el año 2023.

Ahora bien, una vez que se han firmado los contratos, las operadoras han iniciado la fase de pruebas de esta tecnología 4G. Por ejemplo, en la ciudad de Quito se inauguró el Primer Centro de Experiencia 4G de Movistar en su local del Quicentro Shopping, donde uno de sus funcionarios se manifiesta acerca del despliegue de su red LTE, indicando que está marcha y que próximamente se conocerá qué ciudad contará con el servicio de forma masiva, remarcando que el costo para el usuario será similar al de los planes 3G. También afirmó que destinarán parte de los 50 MHz que se les asignó en la banda de 1900 MHz, para mejorar la calidad del servicio 3G. Actualmente la operadora Movistar tiene una captación de usuarios cercana al 30% de los 18 millones de líneas móviles registradas a nivel nacional [11].

Asumiendo que en Ecuador, los aranceles establecidos a la importación de dispositivos móviles como teléfonos inteligentes y *tablets*, sí fueron revisados adecuadamente, y no tengan un impacto negativo en la tendencia de penetración del servicio LTE en el país, se estima que el número de suscripciones 4G crezca a una tasa compuesta anual (CAGR) del 144.1% entre el 2014 y el 2019, para llegar a 2.5 millones de suscripciones en 2019, lo cual representa aproximadamente el 12.1% del total de suscripciones móviles en todas las tecnologías (2G/3G/4G) que ofrecerán las operadoras hasta entonces.[14]

En lo referente a las *Small Cells*, por simple inspección, en Ecuador se ha identificado varias de éstas instaladas en la ciudad de Quito. Sin embargo, las proyecciones de *Infonetics Research* indican que en 2016, la cuarta parte del tráfico generado por el uso de datos móviles en *smartphones* y dispositivos inteligentes, a nivel mundial, será soportado por las *Small Cells*, por lo que se proyecta un despliegue exponencial, inicialmente en las principales ciudades del país [56].

## CAPÍTULO II

### 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS REDES LTE

#### 2.1 FACTORES QUE CONLLEVAN A IMPLEMENTAR LTE

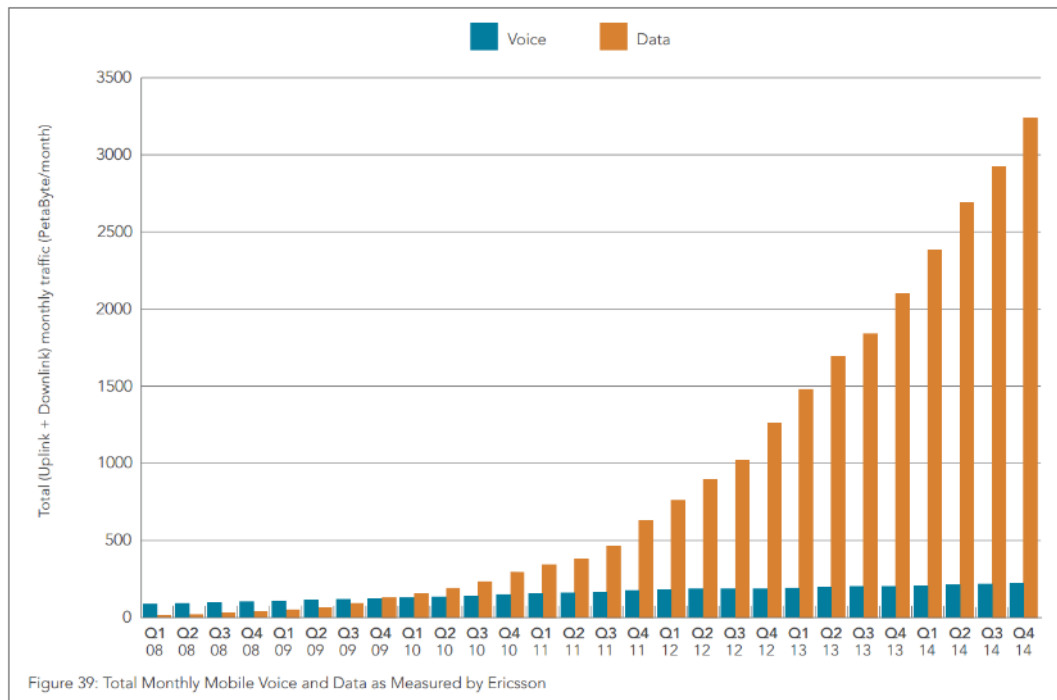
##### 2.1.1 El crecimiento de datos móviles

Durante varios años, el tráfico dominante de las comunicaciones móviles constituían las llamadas telefónicas, mientras que el servicio de datos móviles tenía un crecimiento desacelerado, sin embargo, a partir del año 2010 se experimenta un cambio en estas tendencias, pues la utilización de datos móviles empieza a incrementarse de manera casi exponencial a lo largo del tiempo, y por otro lado el servicio de voz empieza a mantenerse constante y con tendencia a reducirse.

Para ilustrar lo anterior, la Figura 2.1 muestra las mediciones realizadas por la compañía *Ericsson*, del tráfico total de voz y datos que cursa por sus redes de telefonía móvil, desplegadas alrededor del mundo. El eje vertical representa el total del flujo trimestral de tráfico de *Uplink* y *Downlink* medido en Peta Bytes<sup>3</sup>, mientras que el eje horizontal indica el intervalo de muestreo, que va desde el año 2007 hasta fines del año 2014. Como se observa, ha existido un incremento dramático del 65% en cuanto al tráfico de datos entre el 2013 y el 2014, esto se debe a que los *smartphones* ahora son más utilizados para acceder a servicios que tradicionalmente requerían un ordenador.

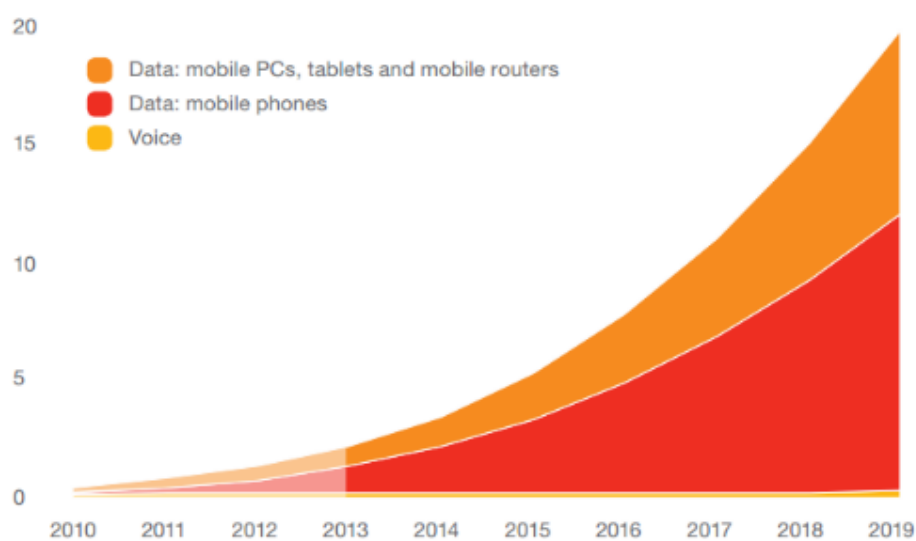
---

<sup>3</sup> Un peta byte es una unidad de almacenamiento de información cuyo símbolo es PB y equivale a  $10^{15}$  Bytes



**Figura 2.1** Tráfico de voz y datos en la red *Ericsson* a nivel mundial [16]

Y esta tendencia continúa, pues se espera que la TCAC<sup>4</sup> sea del 45% entre el 2015 y el 2019, esto significa que las redes móviles deberán soportar un equivalente a 10 veces el tráfico del 2013. El incremento de suscripciones móviles con *smartphones* es el factor determinante de esta tendencia, tomando en cuenta que los usuarios cada vez más dependen de este dispositivo para sus actividades cotidianas, inclusive para reproducir video, que es el servicio que consume mayor cantidad de bytes.



**Figura 2.2** Tendencia del tráfico de las comunicaciones móviles [16]

<sup>4</sup> TCAC o CAGR La tasa de crecimiento anual compuesto es un término específico de negocios e inversión para la ganancia anualizada lisa de una inversión sobre un periodo dado de tiempo

En parte estas tendencias fueron impulsadas por la mayor disponibilidad de la tecnología 3.5G, aunque sin duda lo que marcó el inicio de este incremento fue la introducción del *iPhone* (*Apple*) en 2007, seguido de los dispositivos basados en el sistema operativo *Android* (*Google*) en 2008. Estos teléfonos inteligentes fueron más atractivos y fáciles de usar que sus predecesores y fueron diseñados para apoyar la creación de aplicaciones de terceros. El resultado fue un incremento exagerado en la cantidad y utilización de aplicaciones móviles.

Asimismo, otro factor contribuyente fue la manera que tuvieron los operadores de redes móviles de fomentar la utilización del servicio de datos, mediante la introducción de planes ilimitados, razón por la cual ni los desarrolladores, ni los usuarios tenían la necesidad de limitar el consumo de este servicio.

Como resultado de todo esto, las redes 2G y 3G comenzaron a congestionarse a partir del 2010, como se observa en la Figura 2.1 y 2.2, lo que lleva a la necesidad urgente de aumentar la capacidad de la red. A continuación, se analizará los límites de *capacidad* de un sistema de comunicación móvil, y la posibilidad de lograr este incremento.

### 2.1.2 Capacidad de un Sistema de Telecomunicaciones Móviles

En 1948, Claude Shannon descubre un límite teórico sobre la velocidad de datos que se puede lograr en un sistema de comunicación, escrito en la forma más simple de la siguiente manera [2]:

$$C = B * \log_2(1 + SINR)$$

**Ecuación 2.1**

Donde, SINR (*Signal-to-Interference-Plus-Noise-Ratio*) representa la potencia de la señal requerida en el receptor, dividida para la potencia debido al ruido y a la interferencia:

$$SINR = \frac{\text{Potencia de la señal requerida en el receptor}}{\text{Potencia de la Interferencia} + \text{Potencia del ruido}}$$

**Ecuación 2.2**

$$SINR(dB) = 10 \log_{10}(SINR)$$

Ecuación 2.3

B es el ancho de banda (Hz) con el que cuenta el sistema de comunicaciones y C es la capacidad del canal en  $\text{bits s}^{-1}$ . Esto es teóricamente posible para un sistema de comunicaciones que envíe datos desde un transmisor hacia un receptor, sin ningún error y bajo la condición de que la velocidad de transmisión sea menor que la capacidad del canal. En un sistema de comunicaciones móviles, C es la velocidad de datos máxima que una celda puede manejar, siendo igual a la velocidad de datos combinada de todos los móviles en la celda.

Los resultados se muestran en la Figura 2.3, usando anchos de banda de 5, 10 y 20 MHz. El eje vertical indica la capacidad del canal en Mbps, mientras que el eje horizontal representa la SINR en decibeles (dB).

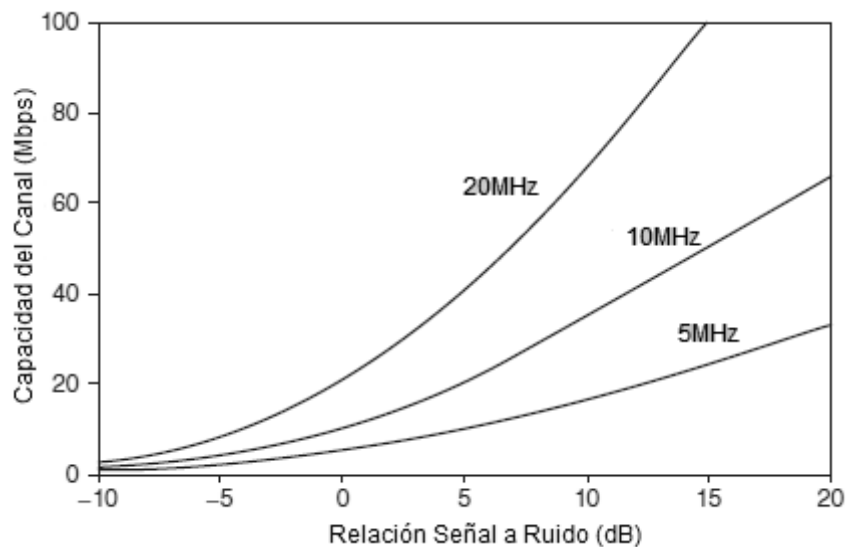


Figura 2.3 Capacidad de un sistema de comunicaciones. Ancho de banda de 5, 10 y 20 MHz [1]

### 2.1.3 Incremento de la Capacidad en un Sistema de Comunicaciones

Básicamente, se tiene tres formas para aumentar la capacidad de un sistema de comunicaciones móviles, las cuales se basan en la ecuación 2.1 y en la Figura 2.3. La primera y la más efectiva, es el uso de celdas más pequeñas: *Small Cells*. En una red celular, la capacidad del canal es la tasa de datos máxima que una sola celda puede manejar. Entonces, mediante la construcción de estaciones base adicionales, y

reduciendo el tamaño de cada celda, es posible aumentar la capacidad de una red, en este caso la capacidad total equivale a multiplicar el número de celdas que se añaden a la red, por la ecuación 2.1.

La segunda técnica es aumentar el ancho de banda. El espectro radioeléctrico es administrado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y por los organismos reguladores regionales y nacionales, donde el uso creciente de las telecomunicaciones móviles ha llevado al aumento de la asignación de espectro para los sistemas 2G y 3G. Sin embargo, solo se dispone de una cantidad limitada de espectro radioeléctrico, la cual también es requerida por otras diversas aplicaciones militares y de radio astronomía. Esto significa que esta técnica está limitada.

La tercera técnica es mejorar la tecnología de la comunicación que se está utilizando. Esto trae varios beneficios, pues permite acercarse cada vez más a la capacidad teórica del canal, y obtener más alto SINR, aprovechando al máximo el ancho de banda asignado. Esta mejora progresiva en la tecnología de la comunicación, ha sido un tema constante en el desarrollo de las telecomunicaciones móviles, y es la razón principal para la introducción de LTE.

#### **2.1.4 Factores adicionales**

Se pueden mencionar otros factores que han motivado la necesidad de LTE. En cuanto al operador, las tecnologías 2G y 3G tienen que mantener dos núcleos de red, uno en el dominio de conmutación de circuitos para el servicio de voz, y otro en el dominio de conmutación de paquetes para el servicio de datos, con el objetivo de que la red no se congestione demasiado, sin embargo con nuevas tecnologías también es posible transportar llamadas de voz sobre redes de conmutación de paquetes, usando técnicas tales como Voz sobre IP (VoIP). Al hacer esto, los operadores pueden migrar todo hacia el dominio de conmutación de paquetes, reduciendo así el capital de inversión y sus gastos operativos [1].

En este sentido, las redes 3G introducen retrasos del orden de 100 ms, durante la transferencia de paquetes de datos, tanto entre los elementos de la red, como a través de la interfaz de radio. Esto es algo tolerable en comunicaciones de voz, sin embargo,



causa dificultades para aplicaciones de datos más exigentes como video *streaming* y juegos interactivos en tiempo real. De esta manera, un segundo factor determinante se traduce en la necesidad de reducir el retardo *end-to-end*, o la denominada latencia.

Por otro lado, es importante considerar lo complejo que resultaría mejorar las especificaciones técnicas de UMTS y GSM, acorde a la necesidad de añadir nuevas características al sistema, y a la vez mantener la compatibilidad con dispositivos anteriores. Con la nueva tecnología LTE, es posible un nuevo comienzo que ayuda a la tarea de los diseñadores de red, al permitirles mejorar el rendimiento del sistema, sin la necesidad de apoyarse con dispositivos y elementos de red heredados [1].

## 2.2 ARQUITECTURA LTE

### 2.2.1 Evolución de UMTS a LTE

La 3GPP inició un estudio sobre la evolución a largo plazo de UMTS en el año 2004, cuyo objetivo era mantener sus sistemas de comunicación móvil de manera competitiva por un tiempo mínimo de 10 años, mediante la dotación a futuro de altas velocidades de transmisión de datos y bajas latencias.

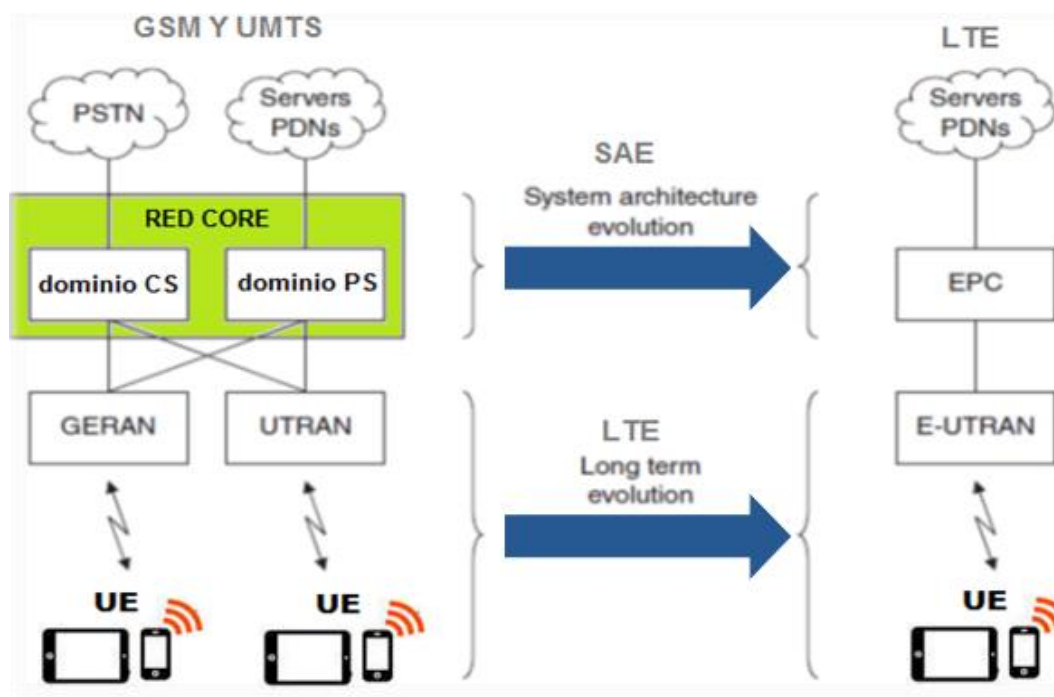


Figura 2.4 Evolución de la arquitectura LTE desde GSM y UMTS [1]

La Figura 2.4 muestra la arquitectura resultante y la manera en que ésta se desarrolló a partir de la arquitectura de UMTS. En esta nueva arquitectura, el EPC (*Evolved Packet Core*) que representa el núcleo evolucionado de la red en el dominio de paquetes, constituye el reemplazo directo del *Core* que realiza la conmutación de circuitos y de paquetes en UMTS y GSM.

En esta arquitectura desaparece el dominio de la conmutación de circuitos, lo que permite optimizar la red LTE para la transmisión del tráfico de datos, lo cual implica que se tiene que introducir nuevas estrategias y técnicas para habilitar el servicio de las llamadas de voz. Estas estrategias se analizan en la sección 4.3.3.

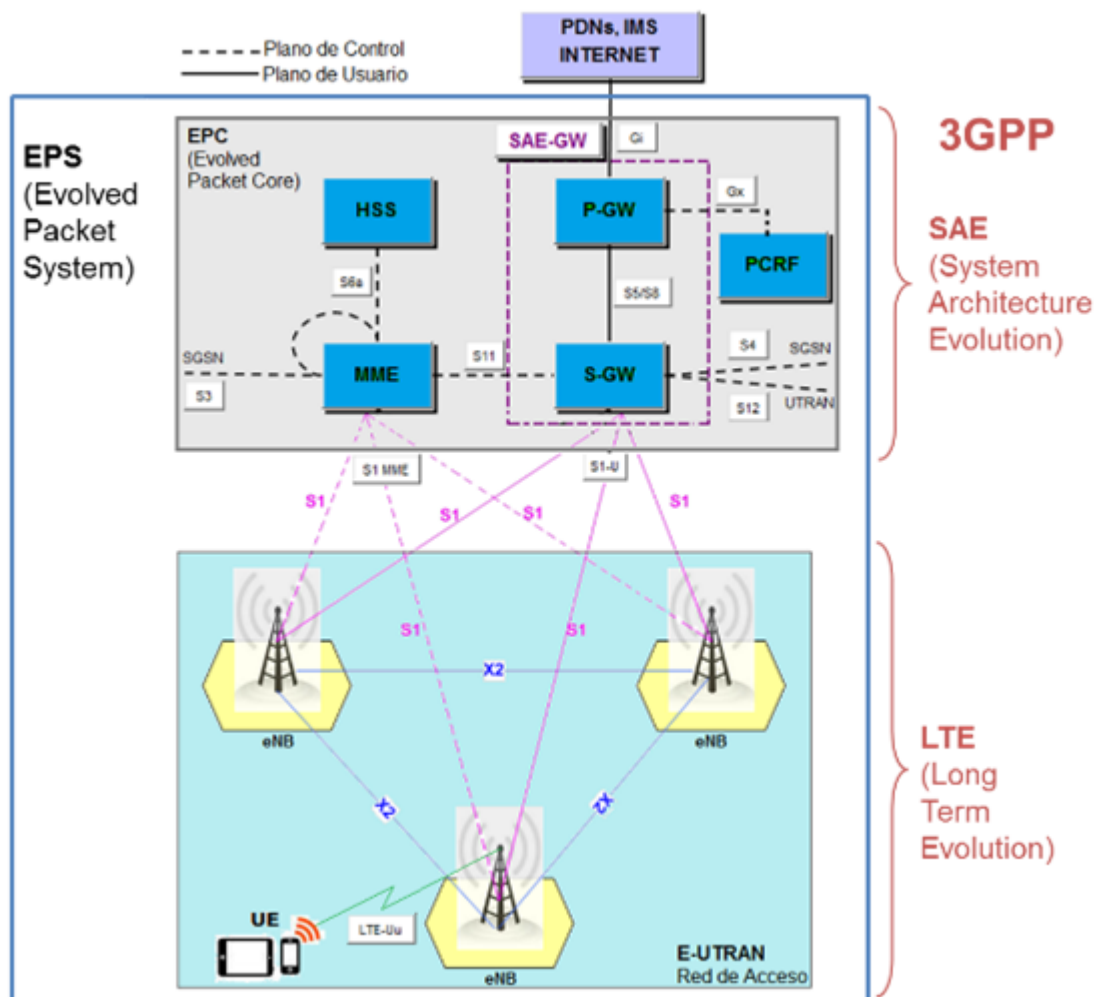


Figura 2.5 Arquitectura de la red LTE conforme a 3GPP

La red de radio-acceso, ahora llamada E-UTRAN, constituye el reemplazo directo de la UTRAN, por lo tanto, se encarga de las comunicaciones de la interfaz de radio entre el EPC y el terminal móvil UE (*User Equipment*), el mismo que aunque

mantiene su nombre dentro de la arquitectura, tiene un funcionamiento interno muy diferente al de UMTS, como se analizará posteriormente en la sección 2.2.3.

La tecnología 4G posee una nueva arquitectura diseñada por la 3GPP, que se clasifica en dos frentes de trabajo, siendo la SAE (*System Architecture Evolution*), que se enfoca en la evolución del núcleo de la red (*Core*); y LTE (*Long Term Evolution*) que abarca tanto la evolución de los dispositivos móviles, como de la red radio-acceso (RAN), a través de la interfaz de aire.

Oficialmente, el conjunto que engloba a todo el sistema SAE y LTE, se conoce como Sistema de Paquetes Evolucionado EPS (*Evolved Packet System*), mientras que el acrónimo LTE sólo se refiere a la evolución de la interfaz de aire. Sin embargo, la 3GPP utiliza regularmente las siglas LTE para nombrar a todo el sistema en general.

El enfoque principal de este proyecto radica en el estudio de la red de radio-acceso E-UTRAN, razón por la cual, no se profundizará el análisis de los elementos del *Core* EPC, mientras que se indagará con mayor detalle, los elementos que conforman la interfaz de aire, teniendo como elemento principal las *Small Cells*, que se estudiarán en el capítulo 3.

### 2.2.2 Elementos e Interfaces del Núcleo Evolucionado de la red EPC

Los exigentes requerimientos que demanda la tecnología LTE, necesitan de una arquitectura de red móvil completa, que permita obtener los rendimientos esperados de Capacidad, Cobertura y Calidad. Toda la arquitectura LTE/SAE fue diseñada para reducir el número de elementos de red que permitan la notable reducción de las latencias, y a su vez contribuyan a obtener anchos de banda eficientes [1].

Esta arquitectura, relativamente simple comparada con sus antecesores 2G y 3G, permite ofrecer alto desempeño en aplicaciones que requieren calidad de servicio QoS, como video *streaming*, y desde luego, los servicios de voz, siendo LTE una tecnología IP que permite aplicar esta característica, común en redes de fibra óptica que operan en MPLS (*Multi Protocol Label Switching*).

- **Elementos del EPC:**
- **HSS (*Home Subscriber Server*)** es la base de datos que contiene la información de suscripción para el móvil con la red EPS. Esta unidad almacena, por ejemplo la localización del móvil dentro del nodo MME, y parámetros de autenticación.
- **P-GW (*Packet Data Gateway*)** es el *Gateway* que enlaza la red EPS interna con la una red externa IP, por ejemplo, internet o una LAN corporativa. El móvil puede conectarse con varios P-GWs simultáneamente para el acceso múltiple a redes PDN.
- **PCRF (*Policy and Charging Rules Function*)** es un servidor que despliega un conjunto de reglas de negocio del operador. Estas reglas definen como los recursos de red deben asignarse a los suscriptores y aplicaciones, y bajo qué condiciones.
- **MME (*Mobility Management Entity*)** constituye una entidad del plano de control<sup>5</sup>, encargada únicamente de la señalización, ya que por ella no transitan los paquetes con tráfico de datos de usuario. Mediante la interfaz S3 basada en protocolo GTP<sup>6</sup>, al igual que la interfaz S4, se realiza el control de la señalización para la movilidad con redes 3GPP, e interactúa con el HSS a través del interfaz S6a, basado en *Diameter*<sup>7</sup> como responsable de realizar el proceso de autenticación de los usuarios.

Al disponer de un elemento de red, dedicado a la señalización y separado funcionalmente de los *Gateway*, se aporta a los operadores la ventaja de poder crecer la capacidad de señalización de forma independiente del tráfico de usuario. El MME maneja las funciones de movilidad y gestión de sesiones que figuran a continuación:

- **Conexión/desconexión del móvil:** Permite al móvil registrarse o cancelar su registro a la red;
- **Seguridad:** El MME implementa la función de Autenticación y Autorización para verificar las credenciales del usuario, permitir el acceso a la red y realizar un

---

<sup>5</sup> Plano funcional donde se distribuye y procesa la información de control propio del sistema y su interacción con los usuarios.[3]

<sup>6</sup> Protocolo de túnel de GPRS (GTP), basado en IP que se usa para portar el servicio GPRS dentro de las redes GSM y UMTS[3]

<sup>7</sup> Protocolo de autenticación, autorización, y conteo. Sucesor del Protocolo RADIUS.[3]

seguimiento de las actividades del usuario. Además, la MME realiza el cifrado y protección de integridad de los mensajes de señalización del protocolo NAS;

- Gestionar la Portadora EPS: El MME gestiona la creación, modificación y eliminación de la señal Portadora EPS. Se supone que en la E-UTRAN un móvil siempre tendrá una portadora EPS por defecto, en el momento de conexión. Además se encarga de la gestión de la Movilidad para el móvil en modo Idle.
- **S-GW (*Serving Gateway*)** se encarga del enrutamiento de la comunicación en el *plano de usuario*<sup>8</sup>, desde el móvil hasta el PG-W. El móvil permanece conectado a este S-GW durante la sesión completa. El S-GW tiene las siguientes responsabilidades:
  - Anclaje local para la movilidad: el S-GW actúa como un ancla local para brindar soporte a la movilidad de los UE entre los *eNodeB*, dentro de su zona de servicio;
  - Información de enrutamiento de la red: el S-GW es responsable del enrutamiento de los datos en el plano de usuario hacia el correcto P-GW, cuando el móvil está conectado a la red;
  - El S-GW es responsable de generar cargos a los usuarios de *Roaming*, el usuario es cobrado de acuerdo a las tasas aplicadas al servicio en particular, conforme a los valores de su suscripción a la red;
  - Intercepción legal, función que permite que las comunicaciones puedan ser electrónicamente interceptadas o espiadas, por los organismos judiciales, en caso de ser autorizado por reglamentos o mandatos.
  - Cuando el móvil se desplaza a una nueva zona, cambia de S-GW, mientras que el P-GW, normalmente se mantiene como único, mientras el móvil está conectado a la red;

---

<sup>8</sup> Plano funcional de una red, donde se distribuye y procesa la información de los servicios y aplicaciones finales.[3]

- **Interfaces del EPC:**
- **Gi** es la interfaz hacia una red de datos externa de paquetes, por ejemplo internet, y contiene el último punto de presencia IP de los usuarios finales. Toda la movilidad de terminales dentro de 3GPP es manejado por debajo de esta interfaz.
- **Gx** es la interfaz que proporciona transferencia de políticas de (QoS) y reglas de cobro desde el PCRF hacia el P-GW.
- **S5/S8** es la interfaz entre el S-GW y el P-GW. En principio S5 y S8 son la misma interfaz, la diferencia es que S8 es usado cuando se tiene *Roaming* entre diferentes operadores, mientras que S5 se usa en la red interna.
- **S3** es una interfaz de control entre el MME y las SGSN de tecnologías externas 2G/3G, tiene la funcionalidad para dar soporte de señalización de movilidad en modo idle entre LTE, UTRAN y GERAN.
- **S4** es la interfaz entre el P-GW y el SGSN de las otras tecnologías habilitadas 2G/3G.
- **S12** es la interfaz entre el S-GW y UTRAN para el plano de usuario, esta interfaz se habilita cuando la opción *Direct Tunnel* está establecida.
- **S11** es la interfaz entre el MME y el S-GW. Es el equivalente a la interfaz entre el SGSN y el GGSN del *Core* de 3G, con algunas funciones adicionales de coordinación de *paging*<sup>9</sup>.
- **S6a** permite la autenticación / autorización de acceso del usuario al EPS y actúa como interfaz entre MME y HSS.

---

<sup>9</sup> Es un mecanismo en el cual la red informa al UE que tiene algo para él. A partir de esta notificación el UE decodifica el contenido del *paging message* e inicia el procedimiento apropiado. [6]

Gracias a la flexibilidad de la arquitectura EPC, es posible el empleo de un único nodo para implementar el SGSN y el MME, permitiendo disponer de una red con un núcleo de paquetes común para múltiples tecnologías como GSM, UMTS y LTE.

### 2.2.3 Elementos e Interfaces de la red de acceso E-UTRAN

Como se ha mencionado anteriormente, es en la E-UTRAN donde se enfoca el estudio de este proyecto. Estas siglas en inglés describen a la red Evolucionada de Radio-Acceso Terrestre UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) ilustrada en la parte inferior de la Figura 2.5. Básicamente, E-UTRAN es la que maneja las comunicaciones de radio entre el equipo móvil del usuario y el *Core* EPC. Consta de un solo componente de red el eNB *Nodo B evolucionado (Evolved Node B)*, y las interfaces de red entre varios eNB (X2), y entre eNB y el *Core* EPC (S1). Además, como parte integrante de la E-UTRAN se considera también al móvil.

- **Elementos de la E-UTRAN**
- **Equipo de Usuario (UE)**

El equipo de usuario UE como su nombre lo indica, es el dispositivo que permite al usuario acceder a los servicios que ofrece la red móvil. De manera general, la arquitectura interna del Equipo de Usuario es idéntica a la usada en tecnologías anteriores por UMTS y GSM. Actualmente, el componente de comunicación que se encuentra al interior del UE, conocido como ME (*Mobile Equipment*), se subdivide en dos componentes llamados MT (*mobile termination*), el cual maneja todas las funciones de comunicación, y TE (*terminal equipment*) que es el dispositivo móvil por donde fluyen los datos. Un ejemplo para entender esta estructura sería una laptop que tiene una tarjeta LTE conectada para poder operar en esta tecnología, en cuyo caso el MT vendría a ser dicha tarjeta y el módulo TE sería la laptop.

El UICC (*Universal Integrated Circuit Card*) es una *Smart Card*, comúnmente conocida como SIM Card, la cual contiene una aplicación conocida como USIM

(módulo universal de identidad de abonado), que almacena datos específicos del usuario, tales como número de teléfono y la identidad de la red doméstica.

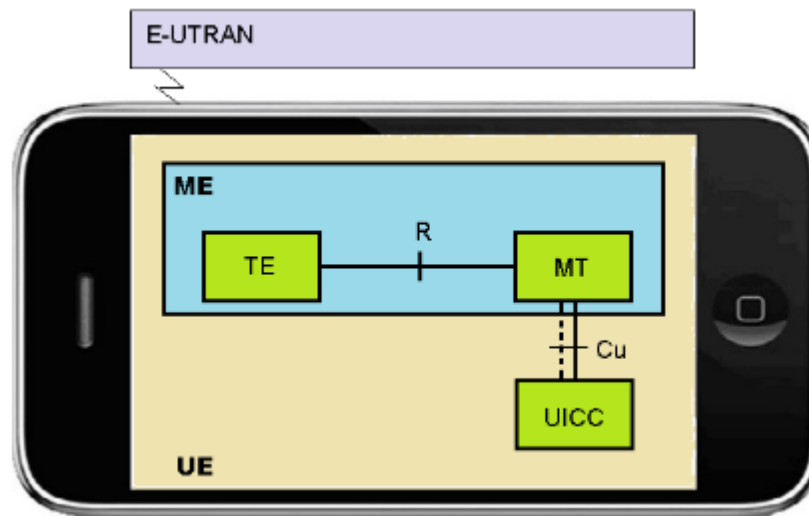


Figura 2.6 Arquitectura Interna del User Equipment [1]

LTE es compatible con los móviles que utilizan un USIM de *Release 99* o superior, pero no admite el módulo de identidad del abonado (SIM) que fue utilizado por versiones anteriores de GSM o WCDMA. Además, es compatible con los móviles LTE que utilizan IP versión 4 (IPv4), IP versión 6 (IPv6) o *dual stack* IP v4 / v6. El móvil recibe una dirección IP para cada red de paquetes de datos que se está comunicando; por ejemplo, uno para el internet y uno para cualquier red corporativa privada. Alternativamente, el móvil puede recibir una dirección IPv4, y una IPv6 simultáneamente, si el móvil y la red soportan las dos versiones del protocolo.

Los móviles pueden tener una amplia variedad de capacidades de radio, entre las cuales se mencionan, la máxima tasa de transferencia de datos que pueden manejar, los diferentes tipos de tecnología de radio-acceso que soportan, las frecuencias portadoras en las que pueden transmitir o recibir y el soporte móvil, características opcionales que existen dentro de las especificaciones LTE. Los móviles hacen saber de estas capacidades a la red de acceso, por medio de mensajes de señalización, de modo que la E-UTRAN sabe cómo controlarlos correctamente [1].

Con los primeros móviles LTE de categoría 3, se podían obtener velocidades máximas de 100 y 50 Mbps para DL y UL respectivamente. Al momento con el



*Release 9*, teóricamente, se pueden alcanzar velocidades de datos de DL: 300 Mbps y UL: 75 Mbps, para anchos de banda de 20 MHz.

- **Nodo B evolucionado eNB (*Evolved Node B*)**

Cada eNB es una estación base que controla los móviles en una o más celdas. Un móvil establece comunicación con sólo una estación base y una sola celda a la vez, esto equivale a decir que no existe el *soft Handover*, que se suscita en tecnologías anteriores como UMTS [1], donde el móvil podía estar conectado simultáneamente a más de una celda, fundamentalmente para realizar el proceso de *Handover*.

El eNB tiene dos funciones principales: En primer lugar, el eNB envía las transmisiones de radio hacia todos sus teléfonos móviles en el enlace descendente *Downlink* y recibe las transmisiones de los móviles en el enlace ascendente *Uplink* mediante el procesamiento análogo y digital de la señal que realiza la interfaz de aire LTE (Uu LTE).

En segundo lugar, el eNB controla el funcionamiento de bajo nivel de todos sus móviles, mediante el envío de mensajes de señalización tales como comandos de *Handover* referentes a las transmisiones de radio. En el desempeño de estas funciones, el eNB combina las características anteriores que reunían conjuntamente entre el Node B y el controlador de red de radio RNC (*Radio Network Controller*) con el objetivo de reducir la latencia que surge cuando el móvil intercambia información con uno o más elementos de red.

Algunos cambios significativos se han hecho a la asignación funcional del eNB, en comparación con UTRAN. A continuación, se describen las principales funciones de este componente de gran importancia dentro de la red LTE, donde radica el objeto de este estudio [1]:

- Control de la celda y soporte para MME: el eNB es dueño y controla los recursos de radio de sus propias celdas. Entrega de forma ordenada al MME los recursos de la celda que éste le solicita.

- Control de movilidad: el eNB es responsable de controlar la movilidad de los terminales en estado activo. Esto se hace ordenando al móvil, que primero efectúe la medición de la celda y luego realice el *Handover* cuando sea necesario.
- Control y seguridad del Plano de Usuario, mediante el cifrado y protección de la integridad de la señalización RRC.
- Multiplexación y Mapeo: el eNB realiza el mapeo de los canales lógicos sobre los canales de transporte.
- Funcionalidad de capa física: el eNB maneja las funciones de la capa física como aleatorización (*scrambling*), *Diversidad de Transmisión*, procesamiento para el *Beamforming*, y la modulación OFDM. El eNB se encarga también de ciertas funciones de la capa uno, como adaptación del enlace y control de potencia.
- Informes y Mediciones: el eNB proporciona la funcionalidad de configurar variables y condiciones internas del mismo eNB, y hacer mediciones en el entorno externo de radio.
- **Interfaces de la E-UTRAN**

Cada estación base está conectada al *Core EPC* por medio de la interfaz S1. También se puede conectar a las estaciones base cercanas a través de la interfaz X2, la cual se utiliza principalmente para el reenvío de señalización y de paquetes durante el proceso de *Handover*. La interfaz X2 es opcional en por dos razones principales:

En primer lugar, la comunicación sólo es necesaria entre las estaciones base cercanas que podrían estar involucradas en el proceso de *Handover*, mientras que se podría prescindir de esta interfaz con las estaciones base lejanas, con las que no se tiene una interacción directa.

En segundo lugar, las comunicaciones X2 más importantes se pueden realizar también por medio del núcleo *Core EPC*. Utilizando dos instancias de S1, aunque de

manera indirecta y más lentamente. Sin embargo, una red puede configurar todas sus interfaces X2 automáticamente, utilizando las funciones de auto-optimización *SON* (*Self Organizing Networks*). En el capítulo 3 se estudiará más a detalle acerca de este complemento de LTE.

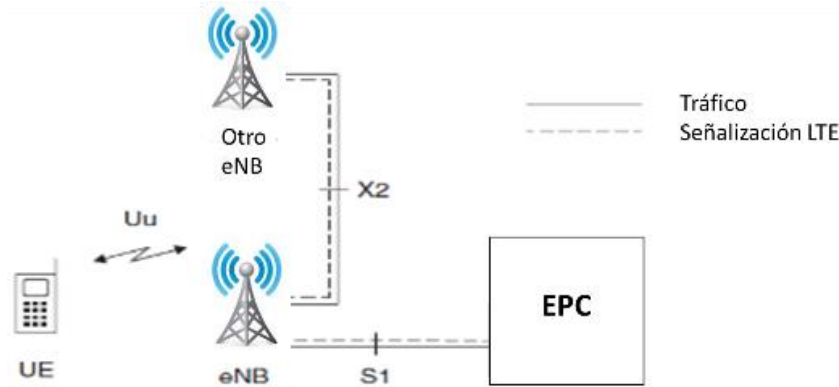


Figura 2.7 Arquitectura e interfaces E-UTRAN [1]

Por lo general, las interfaces S1 y X2 no constituyen conexiones físicas directas, llevándose a cabo el enrutamiento a través de una red de transporte IP subyacente, como se muestra en la Figura 2.8. Cada estación base y cada componente de la red, tiene una dirección IP, y los *routers* subyacentes utilizan estas direcciones IP para el transporte de datos y mensajes de señalización desde un dispositivo a otro. Las interfaces S1 y X2 son mejor entendidas como relaciones lógicas, a través de las cuales, los dispositivos obtienen información, acerca de las identidades de los demás elementos de red y pueden intercambiar información con ellos [1].

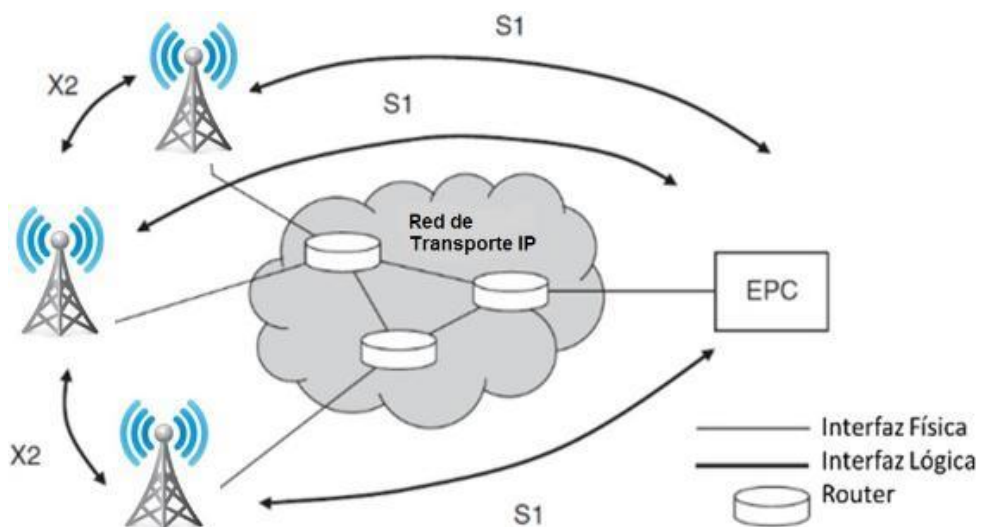
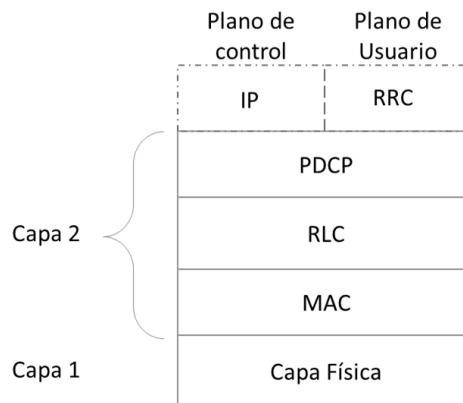


Figura 2.8 Arquitectura interna de la Red de Transporte de E-UTRAN [1]

### 2.3 INTERFAZ DE AIRE Uu

La interfaz de aire, conocida oficialmente como la interfaz Uu, se encuentra entre el móvil y la estación base. La Figura 2.9 muestra los protocolos de transporte de la interfaz de aire.



**Figura 2.9 Protocolos de Transporte de la Interfaz de Aire LTE [1]**

Conforme al modelo OSI, comenzando en la parte inferior, la capa 1 llamada capa física, contiene las funciones de procesamiento de señales digitales y analógicas que el móvil y la estación base utilizan para enviar y recibir información.

Los siguientes tres protocolos constituyen la capa 2 del modelo OSI, la capa de enlace de datos. El protocolo de control de acceso al medio (MAC), lleva a cabo el control de bajo nivel de la capa física, particularmente mediante la programación de las transmisiones de datos entre el móvil y la estación base.

El protocolo de control de enlace de radio (RLC) por ejemplo mantiene el enlace de datos entre los dos elementos, garantizando la entrega fiable de *data streams* necesarios para llegar correctamente.

Finalmente, el protocolo de convergencia de datos por paquetes (PDCP) lleva a cabo funciones de transporte de nivel superior que están relacionados con la compresión de cabecera y la seguridad. [1]

### 2.3.1 Modos de Operación

Un sistema de comunicaciones móviles puede operar en dos modos de transmisión, por División de Frecuencia Dúplex (FDD) y por División de Tiempo Dúplex (TDD). Cuando se utiliza FDD, la estación base y el móvil transmiten al mismo tiempo, pero usando diferentes frecuencias portadoras. Mientras que cuando se usa TDD, ambos transmiten y reciben en la misma frecuencia portadora pero a diferentes tiempos, como se muestra en la Figura 2.10. Los modos FDD y TDD tienen varias ventajas y desventajas:

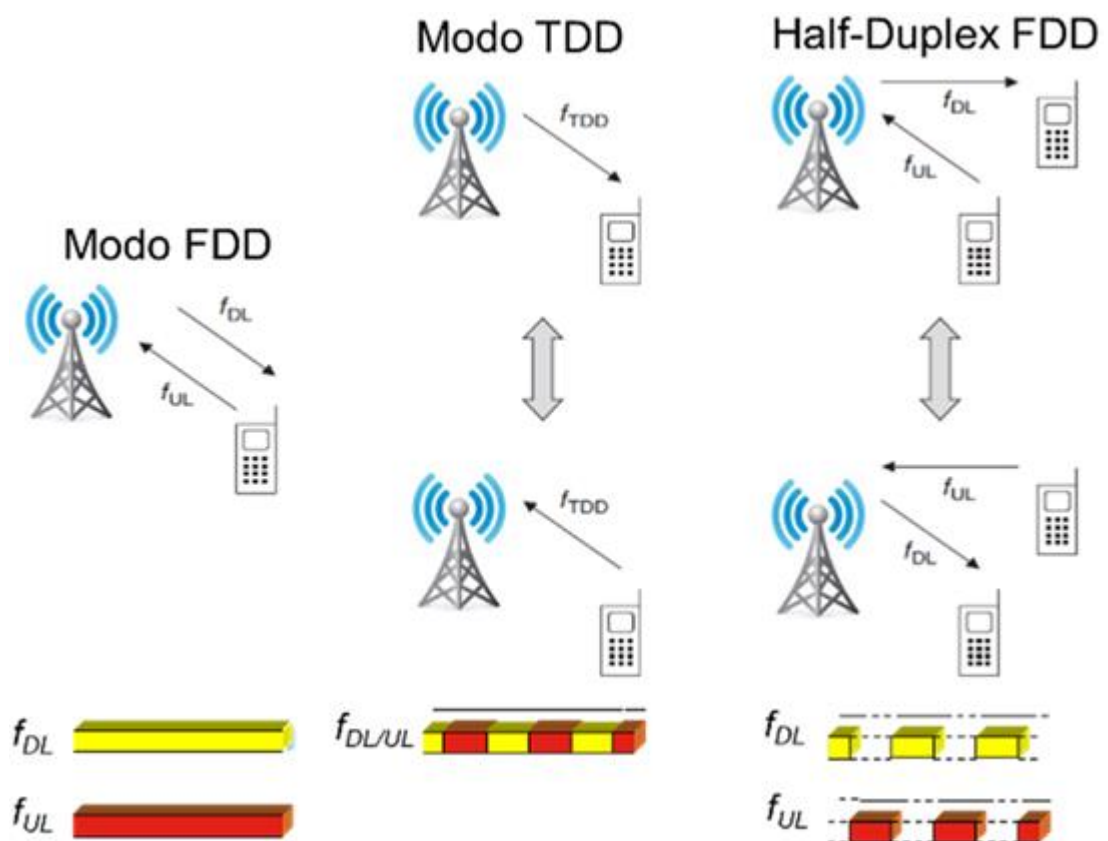


Figura 2.10 Modos de Operación FDD y TDD [1]

En el modo FDD, los anchos de banda de *Uplink* y *Downlink* son fijos y usualmente son los mismos. Esto hace que sea adecuado para comunicaciones de voz, en el que las velocidades de *Uplink* y *Downlink* son muy similares.

En el modo TDD, el sistema puede ajustar la cantidad de tiempo asignado para *Uplink* y *Downlink*. Esto hace que sea adecuado para aplicaciones como la navegación web, en la que la velocidad de *Downlink* puede ser mucho mayor que la de *Uplink*.

Este modo puede verse afectado por la interferencia, por ejemplo, si una estación base se encuentra transmitiendo, mientras otra estación base cercana se encuentra recibiendo. Para evitar esto, debe existir un sincronismo con las radio bases cercanas. El que todos hagan la transmisión y recepción al mismo tiempo, hace que TDD sea un modo de transmisión adecuado para las *Small Cells* en redes aisladas como *Hotspots*, ya que cada *Hotspot* puede tener una asignación de recursos y tiempo diferentes.

Por el contrario, FDD a menudo se prefiere para las redes externas (*macrocelas*), que no tienen regiones aisladas. Cuando se opera en el modo FDD, el móvil usualmente tiene que contener un filtro dúplex de alta atenuación para que aisle el transmisor *Uplink* del receptor *Downlink* [1].

Existe una variación conocida como modo *Half-Duplex* FDD, donde, si bien una estación base puede transmitir y recibir al mismo tiempo, el móvil sólo puede, o transmitir, o recibir, no ambas funciones simultáneamente. Esto significa que en el móvil no tiene que existir aislamiento entre el transmisor y el receptor, lo que facilita el diseño de su *hardware* de radio.

LTE soporta cada uno de los modos descritos anteriormente. Una celda puede operar en cualquiera de los modos FDD o TDD. De igual forma, un móvil puede soportar cualquier combinación, Full Dúplex FDD, *Half Duplex* FDD y TDD, aunque sólo operará en uno sólo modo a la vez [1].

### 2.3.2 Técnicas de acceso al medio

A diferencia del esquema de comunicación *uno a uno* en el que se basan otros sistemas de telecomunicaciones, en una red celular una estación base tiene que transmitir a muchos móviles diferentes a la vez. Esto se hace mediante el intercambio de recursos en la interfaz de aire, con una técnica conocida como acceso múltiple.

Los sistemas de comunicaciones móviles utilizan diferentes técnicas de acceso múltiple, dos de los cuales se muestran en la Figura 2.11. El acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), fue utilizado por los sistemas analógicos de primera generación. En esta técnica, cada móvil al mismo tiempo recibe en su propia frecuencia

portadora, la cual es distinguida de las demás frecuencias mediante el uso de filtros analógicos. Las portadoras están separadas entre sí por bandas de guarda inutilizadas, lo que minimiza la interferencia entre ellas. En cambio, en el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), los móviles reciben información sobre la misma frecuencia portadora pero en momentos diferentes [1].

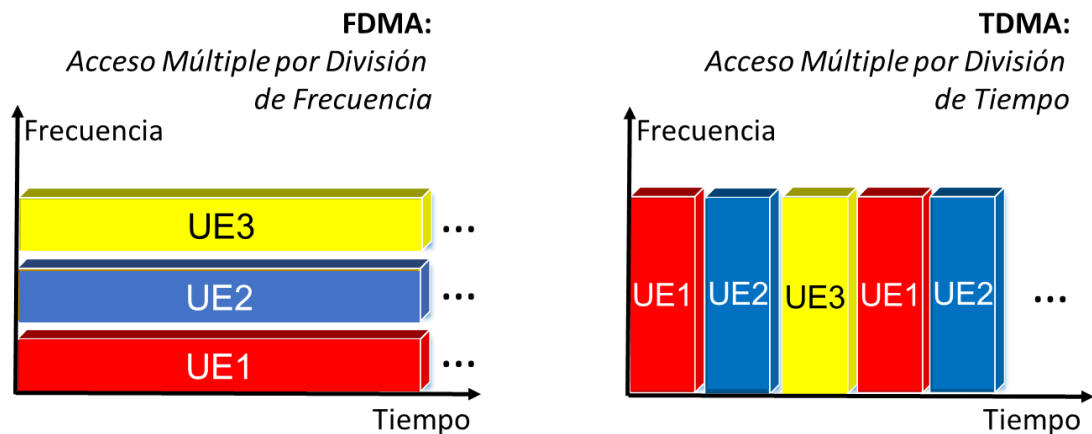


Figura 2.11 Técnicas de acceso múltiple [1]

GSM utiliza una combinación de FDMA y TDMA, en el que cada celda irradia en varias frecuencias portadoras que están compartidos entre cada ocho móviles diferentes, mediante *time slots*. LTE utiliza otra técnica mixta conocida como acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA).

Por otro lado en la tecnología 3G, se usa una técnica totalmente diferente conocida como CDMA, en esta técnica los móviles reciben en la misma frecuencia y al mismo tiempo, pero las señales se etiquetan mediante el uso de códigos, que permiten separar la señal que va a utilizar cada móvil. Aunque en esencia esta técnica CDMA no es implementada en LTE, LTE se basa en este concepto de CDMA para algunas de sus señales de control.

El acceso múltiple, es en realidad una generalización de una técnica más simple conocida como *Multiplexación*. La diferencia entre estos, es que un sistema de multiplexación lleva diferentes flujos de datos hacia o desde un único dispositivo, mientras que un sistema de acceso múltiple hace lo mismo pero con múltiples dispositivos [1].

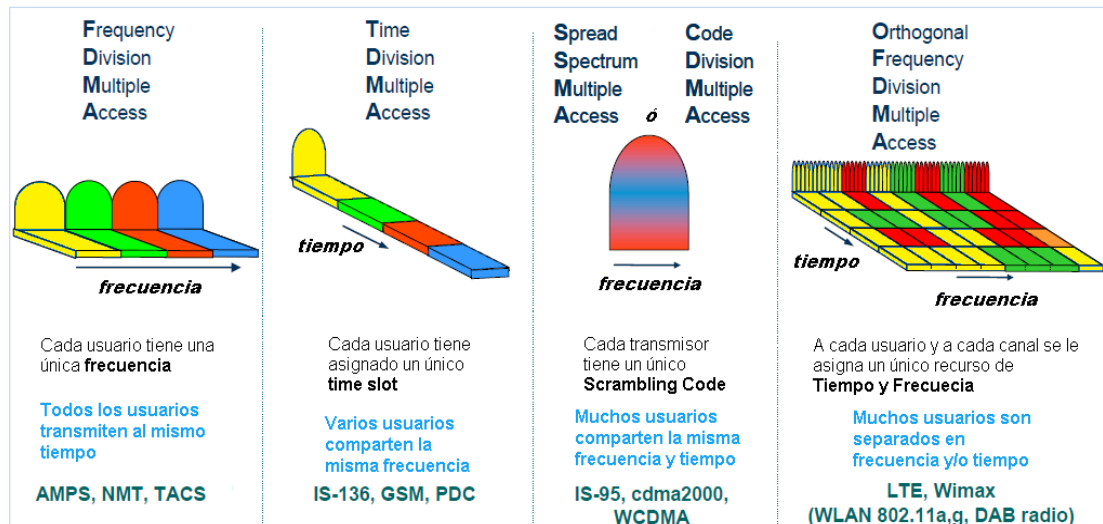


Figura 2.12 Técnicas de acceso al medio de los sistemas móviles [19]

A continuación se presenta un análisis exhaustivo de las técnicas de acceso al medio que utiliza LTE, estandarizándose con OFDMA para el enlace descendente *Downlink*, y SC-OFDMA para el enlace ascendente *Uplink*.

- **OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)**

Para poder analizar la técnica OFDMA, se debe empezar revisando los principios de OFDM, el cual es un esquema de modulación digital multi-portadora, frecuentemente utilizado en los sistemas inalámbricos, pero relativamente nuevo en los sistemas celulares.

Adicionalmente, se debe entender el concepto de *Resource Block*, el cual se lo definirá como el mínimo recurso de capa física, que un eNB puede asignar a un UE, es decir, un conjunto de 12 sub-portadoras, que contiene 84 *Resource Elements*, durante una sub-trama. Este concepto, se explica gráficamente, en la Figura 2.13.



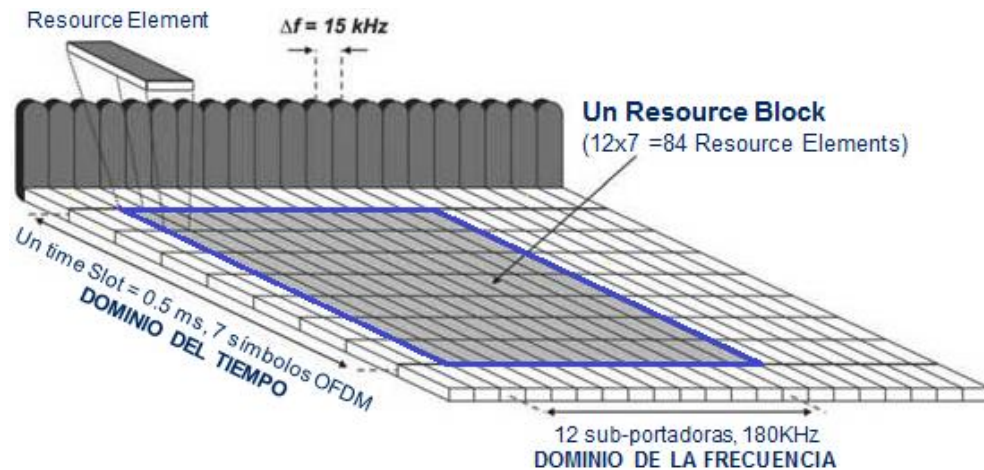


Figura 2.13 Descripción Gráfica de un Resource Block

Entonces OFDM, consiste en transmitir paralelamente hasta un total de 1200 sub-portadoras de banda estrecha, por lo general se transmiten en *Resource Blocks* de 12 sub-portadoras (Figura 2.13). En un ancho de banda de 20 MHz, hasta 100 *Resource Blocks* se pueden transmitir. Cada una de estas sub-portadoras, puede ser modulada con tres esquemas de modulación diferentes, QPSK, 16QAM, y 64QAM. [17].

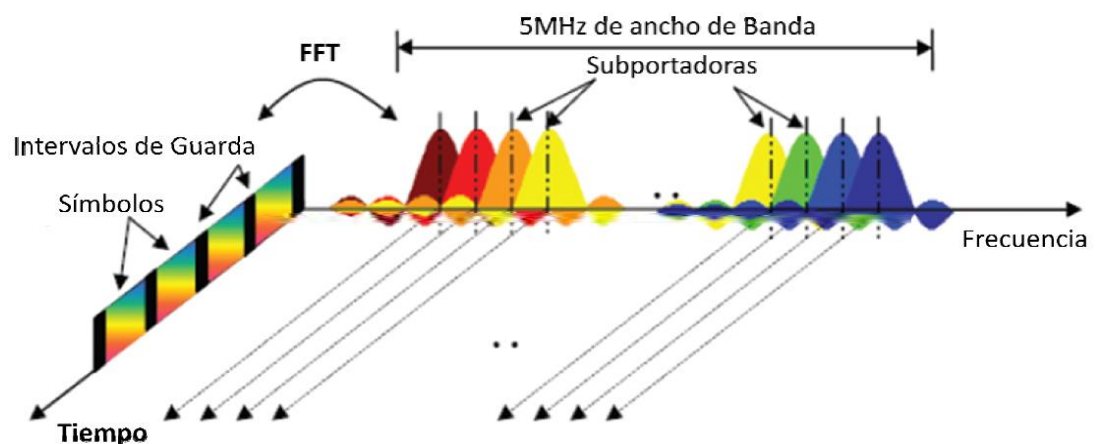


Figura 2.14 Representación de la señal OFDM en el dominio del tiempo y la frecuencia [17]

A continuación, se mencionan las principales características de OFDM:

- Se torna completamente inmune a los retardos por propagación *multi-trayecto*<sup>10</sup>. Esto es posible gracias a que la longitud de los símbolos usados puede ser separada por un intervalo de guarda denominado *Prefijo Cíclico CP*<sup>11</sup>.
- El *hardware* para OFDM es más fácil de implementar que los otros sistemas;

<sup>10</sup> Fenómeno de propagación que resulta cuando una antena recibe señales de radio por dos o más trayectos.

<sup>11</sup> Constituye una copia al final de la trama, de un símbolo que se fue insertado al comienzo.

- Puede ser fácilmente utilizado en amplios canales que tienen alta resistencia al desvanecimiento;
- Se torna sensible a los errores en frecuencia y ruidos de fase debido a la cercanía de las sub-portadoras.
- Tiene un mejor desempeño al trabajar con la configuración de antena *MIMO*. La representación en el dominio de la frecuencia de las señales permite una fácil pre-codificación para coincidir con la señal en frecuencia y con la característica de fase de un canal de radio *multi-trayecto*.
- En los bordes de cobertura de las celdas, OFDM presenta mayor probabilidad a la interferencia inter-celdas (ICI), una desventaja en relación a CDMA, el cual utiliza códigos aleatorios (*scrambling*) para protegerse contra la ICI.
- Con la técnica OFDM, las transmisiones entre móviles muy cercanos pueden sufrir desvanecimiento e interferencia, para prevenir esto, LTE utiliza la técnica OFDMA la cual ha incorporado características de TDMA.

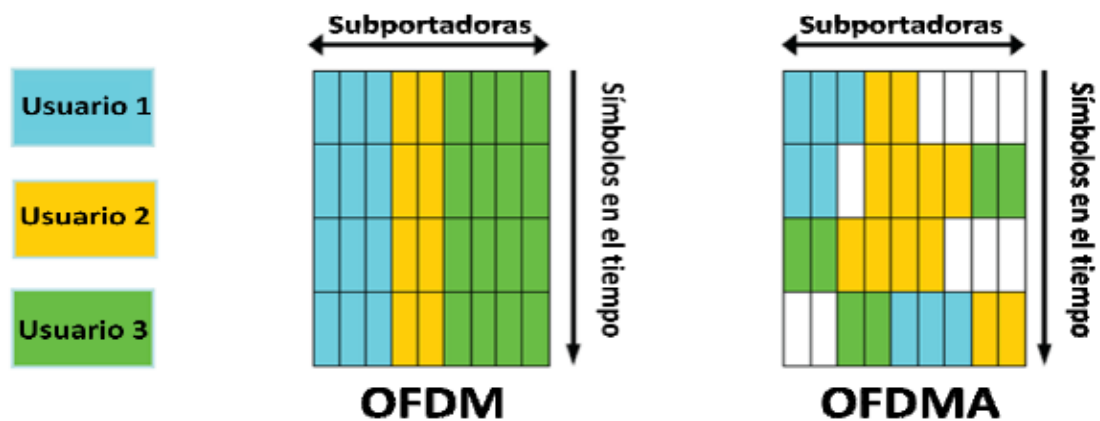


Figura 2.15 Asignación de sub-portadoras OFDM y OFDMA [17]

OFDMA se considera una técnica de transmisión mejorada y robusta, pues permite que los subconjuntos de las sub-portadoras se asignen dinámicamente entre los diferentes usuarios de un canal, tal como se muestra en la Figura 2.15. Adicionalmente, gracias a la eficiencia de la troncalización<sup>12</sup> de los usuarios con velocidades bajas, y a la habilidad para programar usuarios por frecuencia, OFDMA brinda resistencia al desvanecimiento selectivo de frecuencia.

<sup>12</sup> Es un sistema en el cual los usuarios comparten todos los canales disponibles (frecuencias asignadas), evitando así que dependan de un canal determinado.

- **SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access)**

OFDMA funciona bien para *Downlink* en LTE. Sin embargo, tiene un inconveniente, la potencia de la señal transmitida está sujeta a variaciones bastante grandes, debido a la variación de la amplitud de la señal que resulta de la modulación de cada una de las sub-portadoras. Estos picos de señal a su vez, se reflejan en la variación de potencia de la señal transmitida, la cual se dice que tiene un alto pico de relación de potencia media PAPR [1].

Estas variaciones de potencia pueden causar problemas para el amplificador de potencia que está en el transmisor, si este amplificador es lineal, entonces la potencia de salida es proporcional a la entrada, por lo que la forma de onda de la salida es exactamente igual a la forma de onda de la señal de entrada. Por el contrario, si el amplificador no es lineal, entonces la potencia de salida ya no es proporcional a la entrada, y se obtendrá una forma de onda de salida distorsionada. Cualquier distorsión de la forma de onda en el dominio del tiempo, distorsionará también la forma de onda en el dominio de la frecuencia, así que la señal invadirá bandas de frecuencias adyacentes causando interferencias a otros receptores.

En el caso del *Downlink*, los transmisores de las estaciones base son dispositivos grandes y de elevado costo, por lo que pueden evitar el problema mediante el uso de amplificadores de potencia que están muy cercanos a ser lineales. Por el contrario, en el *Uplink*, un transmisor móvil tiene que ser barato, y de bajo consumo energético, por lo que no aplica la opción de incorporar amplificadores lineales. Esto hace que OFDMA sea una técnica inadecuada para aplicarla en el *Uplink* de LTE. Por otro lado, no sería adecuado utilizar SC-FDMA en *Downlink* debido a que la estación base tiene que transmitir a varios móviles, no sólo uno (*Single Carrier*).

Finalmente, las diferencias entre estas dos técnicas de acceso OFDMA y SC-FDMA, se pueden distinguir de mejor manera gráfica en la Figura 2.16, donde se observa que en OFDMA los símbolos se transmiten en paralelo, mientras que en SC-FDMA los símbolos se transmiten en series a cuatro veces la velocidad. De acuerdo con esta figura, la señal OFDMA luce como una señal multi-portadora, mientras que

la señal SC-FDMA luce como de una sola frecuencia portadora, de allí el nombre de portadora simple.[17]

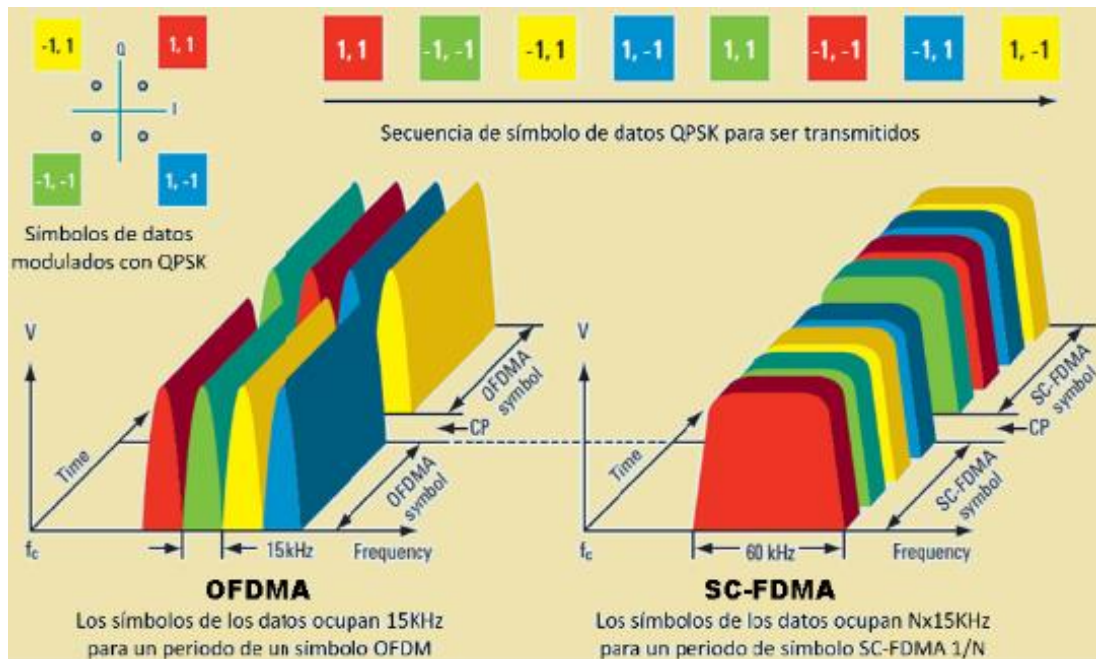


Figura 2.16 Técnicas OFDMA y SC-FDMA en el dominio del tiempo y la frecuencia [17]

## 2.4 REQUERIMIENTOS DE CALIDAD, CAPACIDAD Y COBERTURA LTE

El principal resultado del estudio sobre la evolución a largo plazo de LTE, fue especificar los requerimientos para la interfaz de aire, que involucran factores de *Calidad, Capacidad y Cobertura*, a continuación se mencionan los más importantes.

### 2.4.1 Requerimientos de Velocidad

Las *velocidades* de enlace descendente (*Downlink*) y ascendente (*Uplink*) debían llegar hasta 100 Mbps y 50Mbps, respectivamente. Los resultados iniciales fueron de DL: 300 Mbps y UL: 75 Mbps, lo cual superó las expectativas principalmente, si se compara con las especificaciones del *Release 6* del 3GPP para WCDMA que establecen 14Mbps para DL y 5.7Mbps para UL. Es importante mencionar, que éstos picos de velocidad únicamente pueden lograrse en condiciones ideales, y se tornan totalmente inalcanzables en cualquier escenario real [1].

**Tabla 2.1**  
**Características principales de Interfaz de Aire WCDMA y LTE [1]**

Característica	WCDMA	LTE
Esquema de acceso	WCDMA	OFDMA y SC-FDMA
Reúso de frecuencias	1	Flexible
Uso de antenas MIMO	Desde el Release 7	SI
Ancho de Banda	5 MHz	1.4, 3, 5, 10, 15 o 20 MHz
Duración de la trama	10 ms	10 ms
Intervalo de transmisión	2 o 10 ms	1 ms
Modos de operación	FDD and TDD	FDD and TDD

### 2.4.2 Requerimientos de Capacidad

Una mejor medida de la capacidad, es la *eficiencia espectral*, que expresa la capacidad típica de una celda por unidad de ancho de banda (MHz). LTE debía ofrecer una eficiencia espectral cuatro veces mayor a la del *Release 6* de WCDMA en DL y dos a tres veces mayor en UL [1].

### 2.4.3 Requerimientos de Latencia

La *latencia* es otro tema importante, especialmente para aplicaciones en tiempo real, como video llamadas y juegos interactivos. En este sentido, se enfatizó en dos aspectos, en primer lugar, el tiempo que tardan en viajar los datos entre el teléfono móvil y la red, debe ser inferior a 5ms, siempre que la interfaz de aire no presente congestión. En segundo lugar, los UE (*User Equipment*) funcionan en dos estados: uno activo en el que se ésta comunicando con la red, y un estado de espera de bajo consumo donde el móvil está en modo *standby*. El requerimiento de LTE establece que, un teléfono debe conmutar del modo de espera al estado activo, en menos de 100ms después de la intervención del usuario [1].

### 2.4.4 Requerimientos de Cobertura y Movilidad

También existen requerimientos de *Cobertura*. LTE tiene un funcionamiento óptimo para un radio de cobertura de hasta 5 Km, trabaja con un rendimiento degradado hasta 30 Km, y puede ser compatible con tamaños radios de cobertura de hasta 100 Km [1].

Asimismo en cuanto a la *movilidad*, puede tener un funcionamiento óptimo hasta 15 Km/h, funciona con un alto rendimiento hasta 120 Km/h, y soporta velocidades de hasta 350 Km/h [1].

**Tabla 2.2**  
**Características principales de la RAN de UMTS y LTE [1]**

Característica	UMTS	LTE
Componentes de la RAN	Node B, RNC	eNB
Estados del Protocolo RRC (Radio Resource Control) Control de recursos de radio	CELL_DCH, CELL_FACH, CELL_PCH, URA_PCH, RRC_IDLE	RRC_CONNECTED, RRC_IDLE
Handovers	Soft and Hard	Hard
Listas de vecinas	Siempre se requiere	No se requiere

Finalmente, LTE está diseñado para trabajar con una variedad de anchos de banda, que van desde 1.4 MHz hasta un máximo de 20 MHz. En las tablas 2.1, 2.2 y 2.3 se resumen las principales características técnicas de 4G, comparadas con las de 3G, clasificando los parámetros por: Interfaz de Aire, Red de acceso RAN (*Radio Access Network*), y el núcleo de la red (*Core Network*), respectivamente.

**Tabla 2.3**  
**Características principales del núcleo de la red UMTS y LTE [1]**

Característica	UMTS	LTE
Versión IP soportada	IPv4 / IPV6	IPv4 / IPV6
Mecanismos de transporte	Conmutación de circuitos y Conmutación de paquetes	Conmutación de Paquetes
Componentes del CS (Circuit Switch)	MSC server, MGW	n/a
Componentes del PS (Packet Switch)	SGSN, GGSN	MME, S-GW, P-GW
Conectividad IP	Después del Registro	Durante el Registro
Aplicaciones de Voz y SMS	Incluidas	Externas

## 2.5 ESQUEMAS DE TRANSMISIÓN DE LAS SMART ANTENAS UTILIZADAS EN LTE

Con el fin de aumentar la eficiencia espectral, la capacidad y las velocidades de transmisión de datos, se incluye en el estándar LTE, el uso de esquemas de transmisión

*multi-antena*, cuyo diseño se basa en que, tanto la estación base como el móvil puedan utilizar múltiples antenas para la transmisión y recepción. Utilizando múltiples antenas y procesamiento de señales avanzado tales como *multiplexación espacial*, el canal de radio se puede separar en varias capas, para el flujo de datos.

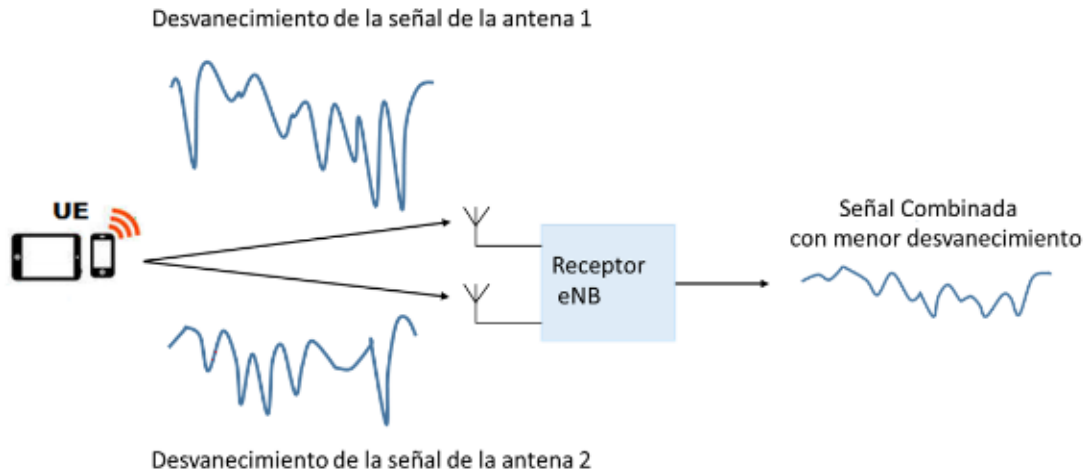
El estándar LTE ha hecho enormes avances en el uso eficiente de esquemas de antenas inteligentes, las cuales se han ido adoptando también en los sistemas HSPA, no obstante, LTE es la única tecnología en exigir como mínimo que todos los móviles incluyan una segunda antena de recepción para soportar los esquemas de transmisión, tales como[1]:

- ***Procesamiento de Diversidad.***- Es la técnica más conocida, utilizada desde los primeros sistemas de comunicaciones móviles, y que básicamente aumenta la potencia de señal recibida y reduce el desvanecimiento mediante el uso de múltiples antenas, ya sea en el transmisor, en el receptor o en ambos;
- ***Multiplexación Espacial.***- A menudo descrito como esquema de antenas, de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), donde tanto el transmisor y el receptor usan múltiples antenas a fin de aumentar la velocidad de datos, siendo una técnica relativamente nueva, que ha sido recientemente introducida en las comunicaciones móviles, y finalmente;
- ***Beamforming.***- Esta técnica utiliza múltiples antenas en la estación base, con el fin de aumentar la cobertura de la celda.

### 2.5.1 Procesamiento de Diversidad

- **Diversidad de Recepción SIMO (*Single Input - Multiple Output*)**

Este esquema se utiliza con mayor frecuencia en el *Uplink*, de la manera mostrada en la Figura 2.17. Aquí, la estación base utiliza dos antenas para recoger a dos copias de la señal recibida.



**Figura 2.17** Esquema de transmisión SIMO [1]

Las señales llegan a las antenas de recepción con diferentes desplazamientos de fase, pero éstos pueden ser eliminados mediante estimaciones del canal en la antena específica. La estación base puede entonces sumar las señales en fase, sin ningún riesgo de *interferencia destructiva* entre ellos. Ambas señales generan varios rayos más pequeños, por lo que ambas están sujetas al desvanecimiento. Si las dos señales individuales experimentan desvanecimientos al mismo tiempo, entonces la potencia de la señal combinada será baja. Pero si las antenas están lo suficientemente separadas entre ellas, unas pocas longitudes de onda de la frecuencia portadora ( $n \cdot \lambda$ ), existirá mayor probabilidad de que las señales sufran desvanecimientos en tiempos completamente diferentes. Con esto, se logrará reducir el desvanecimiento de la señal combinada resultante, lo cual a su vez reducirá la tasa de errores [1].

Las estaciones base por lo general tienen más de una antena de recepción, y se asume que el móvil está usando 2 antenas receptoras, por lo tanto, se espera que los sistemas de LTE usen *Diversidad de Recepción SIMO* tanto en el enlace descendente, como el enlace ascendente.

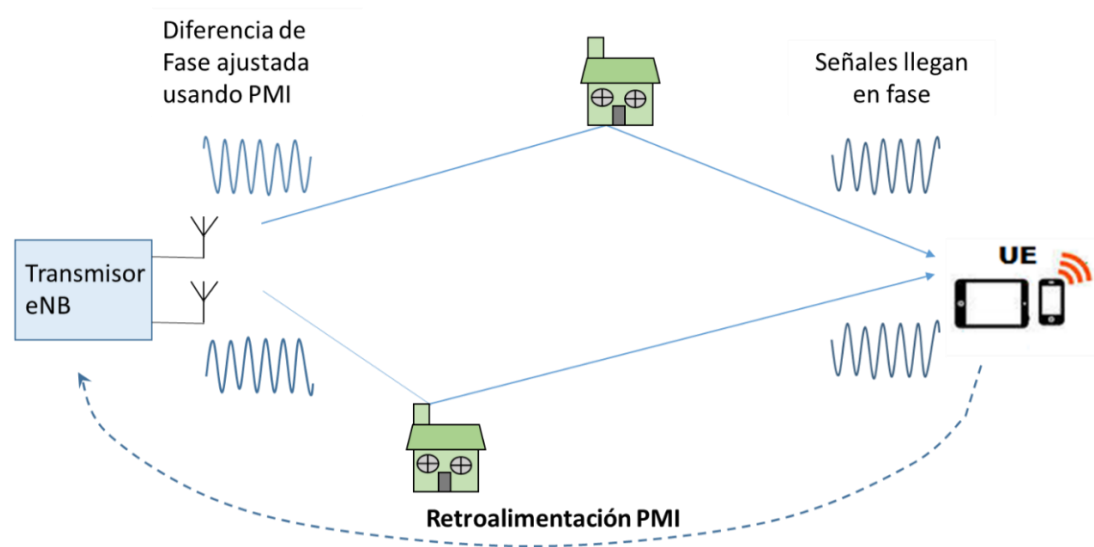
Las antenas de un móvil están más cercanas entre sí, que las antenas de una estación base, lo que reduce el beneficio de la *Diversidad de Recepción*, sin embargo este inconveniente puede ser superado usando antenas que midan dos polarizaciones independientes de la señal de entrada. Además, ya que no se requiere de métodos de codificación, este esquema es fácil de implementar.



- **Diversidad de Transmisión MISO (*Multiple Input - Single Output*)**

La *Diversidad de Transmisión* reduce el desvanecimiento mediante el uso de dos o más antenas en el transmisor. Es superficialmente similar a la *Diversidad de Recepción*, sin embargo, posee un problema crucial: las señales se suman en una única antena de recepción, lo cual que trae consigo un riesgo de *interferencia destructiva*. Se han planteado dos maneras de resolver este problema.

a) ***Diversidad de transmisión en Lazo Cerrado.***- Aquí el transmisor envía dos copias de la señal en la forma esperada, pero también se aplica un desplazamiento de fase a una o a ambas señales antes de la transmisión. Al hacer esto, se puede asegurar que las dos señales llegan al receptor en fase, sin ningún riesgo de *interferencia destructiva*. El desplazamiento de fase se determina mediante una Matriz Indicadora de Pre-codificación PMI (*Pre-Coding Matrix Indicator*), la cual es calculada por el receptor y se realimenta hacia el transmisor, como se muestra en la Figura 2.18 [1].



**Figura 2.18 Operación de la *Diversidad de Transmisión* en Lazo Cerrado [1]**

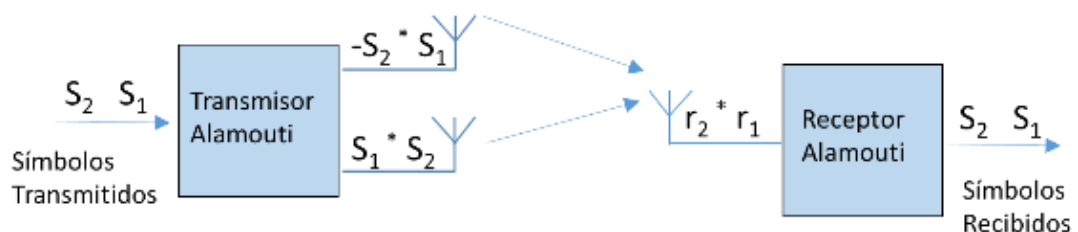
Una PMI podría indicar dos escenarios, si la transmisión de ambas señales fue sin cambios de fase, o la transmisión de la segunda señal fue con un desfase de  $180^\circ$ . Si la primera opción conduce a la *interferencia destructiva*, entonces, la segunda entrará en funcionamiento automáticamente. De nuevo, la amplitud de la señal combinada sólo es baja en el caso improbable de que las dos señales recibidas se sometían al desvanecimiento simultáneamente [1].

Los desplazamientos de fase introducidos por el canal de radio dependen de la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la señal portadora y por lo tanto de su frecuencia. Esto implica que la mejor opción de PMI debe estar diseñada en función de la frecuencia también.

En LTE, el móvil puede alimentar a diferentes valores de PMI de vuelta a la estación base para diferentes conjuntos de sub-portadoras *Downlink*. Sin embargo, las transmisiones *Downlink* desde la estación base, son por lo general mucho más que un ancho de banda estrecho, y únicamente utilizan un solo PMI.

La mejor elección del PMI, también depende de la velocidad de desplazamiento del móvil, entonces si un móvil se mueve rápidamente, tendrá un PMI que cambia frecuentemente. Por desgracia, el bucle de realimentación introduce retrasos en el sistema, lo cual afecta a los móviles que se desplazan a alta velocidad, ya que el PMI podría estar desactualizado en el momento de su utilización. Por esta razón, la *Diversidad de Transmisión en Lazo Cerrado* sólo es adecuada para los móviles que se mueven lentamente. Para los móviles que se mueven a mayor velocidad, es mejor utilizar la técnica en lazo abierto que se describe a continuación.

b) ***Diversidad de transmisión en Lazo Abierto***, aquí el transmisor usa dos antenas para enviar dos símbolos,  $S_1$  y  $S_2$ , en dos intervalos de tiempo sucesivos. En el intervalo  $t_1$ , el transmisor envía  $S_1$  desde la primera antena y  $S_2$  desde la segunda, mientras que en el intervalo  $t_2$ , envía  $S_2^*$  desde la primera antena y  $S_1^*$  desde la segunda<sup>13</sup>, como se muestra en la Figura 2.19 [1].



**Figura 2.19 Operación de la *Diversidad de Transmisión en Lazo Abierto*. Técnica de Alamouti [1]**

<sup>13</sup> El símbolo \* indica que el transmisor debe cambiar el signo de la componente en cuadratura, en el proceso de conjugación compleja.

El receptor puede ahora hacer dos mediciones sucesivas de la señal recibida, que corresponden a dos combinaciones diferentes de  $S_1$  y  $S_2$ . A continuación, al resolver las ecuaciones resultantes, recupera los dos símbolos transmitidos. Sólo hay dos requisitos: los patrones de desvanecimiento deben permanecer más o menos iguales entre el primer intervalo  $t_1$  y el segundo  $t_2$ , y además las dos señales no deben someterse a desvanecimiento al mismo tiempo. Ambos requisitos por lo general se cumplen.

### 2.5.2 Multiplexación Espacial MIMO

Durante muchos años, las antenas de las estaciones base, se han modificado de una u otra manera para optimizar la transmisión y recepción de señales. Múltiples elementos de una antena pueden ser utilizados para dar forma a los lóbulos de radiación y direccionarlos a conveniencia. En los móviles, ahora también es posible duplicar el número de antenas receptoras para casi duplicar la potencia recibida y aumentar la SINR<sup>14</sup> (*Signal to Interference & Noise Ratio*) hasta 3 dB [20].

La *Multiplexación Espacial* tiene un propósito diferente al del *Procesamiento de Diversidad*. Si el transmisor y el receptor poseen múltiples antenas, entonces es posible configurar múltiples flujos de datos (*data streams*) en paralelo entre ellos, a fin de aumentar la velocidad de datos.

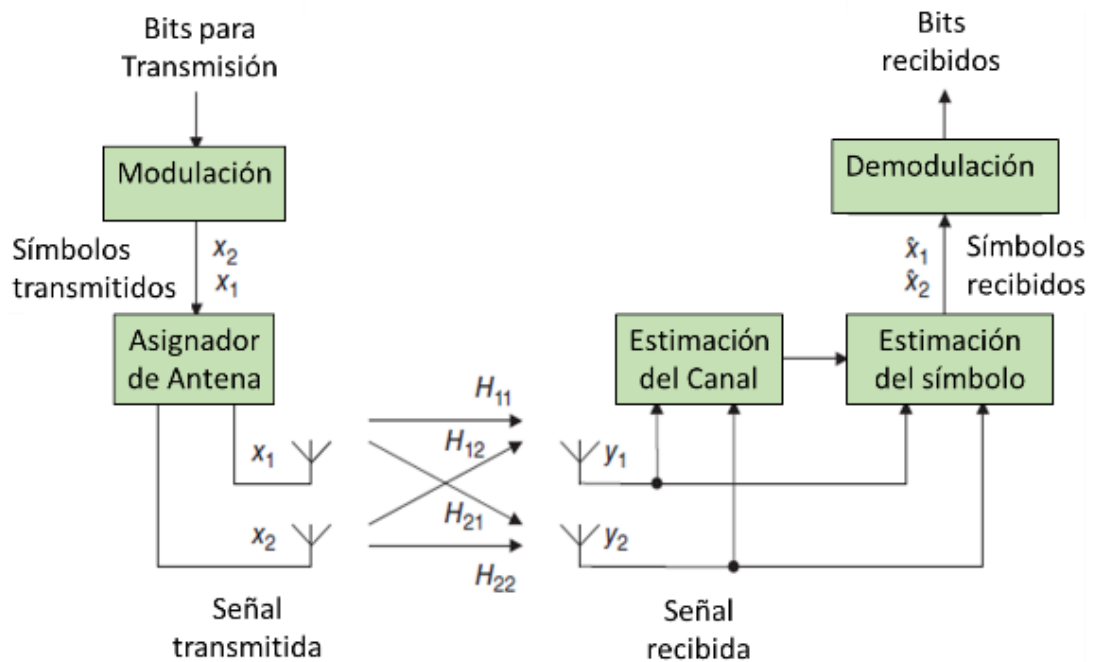
Un sistema de *Multiplexación Espacial* básica se muestra en la Figura 2.20, también llamado MIMO 2 x 2, en la que tanto el transmisor y el receptor poseen dos antenas. En el transmisor, el *asignador de antena* toma símbolos desde el modulador de dos en dos, y envía un símbolo a cada antena. Las antenas transmiten los dos símbolos simultáneamente, a fin de duplicar la velocidad de datos transmitida. Los símbolos viajan a las antenas receptoras por medio de cuatro trayectorias de radio separadas, por lo tanto las señales recibidas, matemáticamente se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}y_1 &= H_{11}x_1 + H_{12}x_2 + n_1 \\y_2 &= H_{21}x_1 + H_{22}x_2 + n_2\end{aligned}$$

**Ecuación 2.4**

<sup>14</sup> Relación señal Ruido plus Interferencia, es una cantidad que se usa para dar límites superiores teóricos sobre la capacidad del canal o la tasa de transferencia de datos. [21]

Donde,  $x_1$  y  $x_2$  son las señales enviadas desde las dos antenas transmisoras,  $y_1$  y  $y_2$  son las señales que reciben las antenas receptoras, y  $n_1$  y  $n_2$  representan el ruido y la interferencia.  $H_{ij}$  expresa la trayectoria por la cual los símbolos transmitidos son atenuados y desfasados, a medida que viajan hacia la antenna receptora (i), desde la antenna transmisora (j) [1].



**Figura 2.20 Multiplexación Espacial MIMO 2 x 2 [1]**

De manera general, todos los términos de la ecuación 2.4 son complejos. En los símbolos transmitidos ( $x_j$ ) y recibidos ( $y_i$ ) y los términos de ruido  $n_i$ , las partes real e imaginaria son las amplitudes de las componentes en fase y en cuadratura. Del mismo modo, en cada uno de los elementos de canal  $H_{ij}$ , la magnitud representa la atenuación de la señal de radio, mientras que la fase representa el desplazamiento de fase. Sin embargo, el uso de los números complejos haría los ejemplos innecesariamente complicados sin aportar información significativa, por lo que se simplificará los ejemplos utilizando únicamente números reales. Para ello, se va a suponer que el transmisor está modulando los bits utilizando modulación binaria por desplazamiento de fase, donde los componentes en fase serían 1 y -1, y los componentes de cuadratura son cero. También se va a suponer que el canal de radio puede atenuar o invertir la señal, pero no introducir cambios de fase. Asumiendo estas condiciones se va a considerar el siguiente ejemplo [1]:

$$\begin{array}{llll} H_{11} = 0.8 & H_{12} = 0.6 & x_1 = +1 & n_1 = +0.02 \\ H_{21} = 0.2 & H_{22} = 0.4 & x_2 = -1 & n_2 = -0.02 \end{array}$$

**Ecuación 2.5**

Sustituyendo estos valores en la Ecuación 2.4, la señal recibida se muestra a continuación:

$$y_1 = +0.22$$

$$y_2 = -0.22$$

**Ecuación 2.6**

La primera tarea del receptor es *estimar* los cuatro elementos de canal  $H_{ij}$ . Para hacerlo, el transmisor emite símbolos de referencia basado en la técnica de que cuando una antena transmite un símbolo de referencia, la otra antena se inhibe y no envía absolutamente nada. El receptor puede entonces *estimar* los elementos de canal  $H_{11}$  y  $H_{21}$ , mediante medir las dos señales recibidas en el momento en que la antena de transmisión 1 está enviando un símbolo de referencia. A continuación, se espera hasta la antena de transmisión 2 envíe un símbolo de referencia, antes de estimar los elementos de canal  $H_{12}$  y  $H_{22}$  [1].

El receptor tiene ahora suficiente información para *estimar* los símbolos transmitidos  $x_1$  y  $x_2$ . Existen varios métodos para hacer esto, pero el más sencillo es un *detector de cero forzado*, que opera de la siguiente manera: Si se ignora el ruido y la interferencia, entonces la ecuación 2.4 se puede expresar como un sistema de ecuaciones para dos cantidades desconocidas,  $x_1$  y  $x_2$ , despejando estos valores se tiene:

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \frac{\hat{H}_{22}y_1 - \hat{H}_{12}y_2}{\hat{H}_{11}\hat{H}_{22} - \hat{H}_{21}\hat{H}_{12}} \\ \hat{x}_2 &= \frac{\hat{H}_{11}y_2 - \hat{H}_{21}y_1}{\hat{H}_{11}\hat{H}_{22} - \hat{H}_{21}\hat{H}_{12}} \end{aligned}$$

**Ecuación 2.7**

Donde,  $\hat{H}_{ij}$  es la estimación del receptor del elemento del canal  $H_{ij}$ . Del mismo modo,  $\hat{x}_1$  y  $\hat{x}_2$  representan la estimación del receptor de los símbolos transmitidos  $x_1$

y  $x_2$ . Reemplazando los valores de las ecuaciones 2.4 y 2.5, se obtiene el resultado siguiente:

$$\hat{x}_1 = +1.1$$

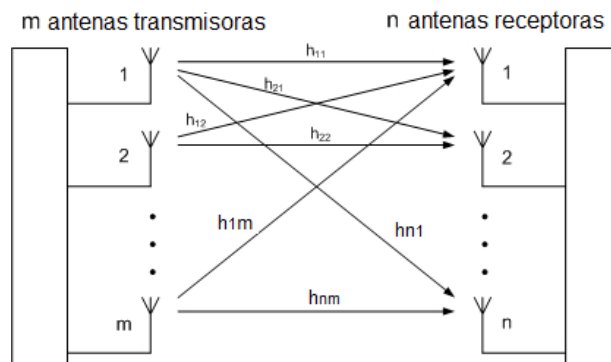
$$\hat{x}_2 = -1.1$$

**Ecuación 2.8**

Entonces, se verifica una mínima diferencia entre el resultado y los valores de los símbolos transmitidos de +1 y -1. Por lo tanto, se ha trasladado dos símbolos simultáneamente usando las misma sub-portadoras, y se ha duplicado la velocidad de transmisión [1].

Los esquemas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), básicamente se clasifican por el número de antenas del sistema transmisor,  $m$ , y el número de antenas del sistema receptor,  $n$ ; "MIMO  $m \times n$ ". Así, por ejemplo, si en el enlace descendente se utiliza 4 antenas de transmisión (desde la estación base), y dos antenas receptoras en el terminal, entonces se denomina esquema "MIMO 4x2". El " $m \times n$ " se refiere al número de antenas en cada extremo del enlace (enlace descendente o enlace ascendente) y no al número de antenas en un solo extremo del enlace.

Para aclarar esto, si un operador utiliza 2 antenas de transmisión y 4 antenas de recepción 4 en las estaciones base, y un móvil utiliza 2 antenas de recepción y una antena de transmisión, entonces en *Downlink* se tiene un esquema MIMO 2x2, mientras que para *Uplink* se denomina esquema SIMO 1x4. Para este caso, se dice que en la estación base es de tipo 2T4R y el terminal es de tipo 1T2R [20].



**Figura 2.21 Esquemas MIMO  $m \times n$  [1]**

Al utilizar el mismo canal, cada antena no sólo recepta los componentes directos de la transmisión, sino también los componentes indirectos de las otras antenas. Si se asume un canal de banda-estrecha invariante en el tiempo, la conexión directa desde la antena transmisora 1, hacia la antena receptora 1, se especifica con  $h_{11}$ , etc., mientras que la conexión indirecta desde la antena Tx1 a Rx2 se identifica como  $h_{21}$  y así sucesivamente [18].

- **Impacto en la Capacidad**

Los datos a transmitir se dividen en *data streams* independientes. El número de *data streams*,  $M$ , es siempre menor o igual al número de antenas; en el caso de configuraciones asimétricas de antena ( $m \neq n$ ),  $M$  es siempre menor o igual al número menor de antenas. Por ejemplo, un sistema de 4x4 podría ser utilizado para transmitir hasta cuatro *data streams*, mientras que un sistema de 3x2 podría transmitir dos o menos *data streams*. Teóricamente, según el teorema de *Shannon-Hartley* la capacidad  $C$  tiene una relación directamente proporcional con el número *data streams*  $M$  [18].

$$C = M B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

**Ecuación 2.9 Teorema de Shannon-Hartley**

Donde,

$C$  = Capacidad del canal [bits/s],

$M$  = Número de *data streams*,

$B$  = Ancho de banda del canal [Hertz],

$\frac{S}{N}$  = Relación señal ruido, siendo  $S$  la potencia de la señal útil [W] y  $N$  la potencia del ruido presente en el canal [W], que trata de enmascarar a la señal útil [22].

Por otro lado, cuando se debe aumentar la capacidad para un solo móvil, el esquema de transmisión se denomina *single user MIMO* (SU-MIMO); en el cual, si las condiciones del canal son buenas, el *single user* puede recibir múltiples *data streams*, llegando a establecerse una relación casi directamente proporcional, entre los valores del máximo *Throughput* obtenido y el número de antena, como se muestra en la Figura 2.22.

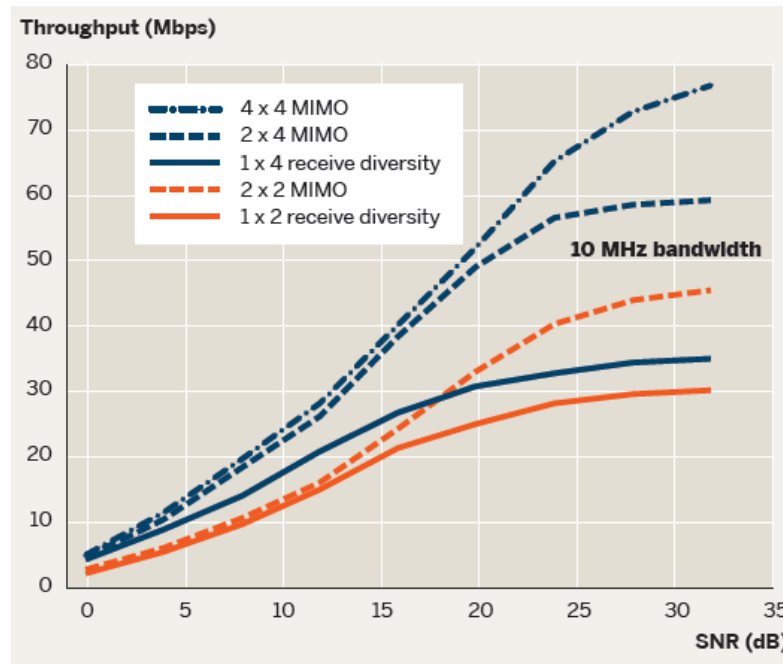


Figura 2.22 Throughput medido usando canal modelo EVA<sup>15</sup> 3km/h, ancho de banda 10MHz [18]

Alternativamente, el esquema MIMO multiusuario o "MU-MIMO", que se detallará en la siguiente sección, se refiere a tener múltiples *data streams* destinados a varios usuarios, multiplicando el rendimiento total de la celda por el número de antenas. Este modo es particularmente útil en el enlace ascendente *Uplink* debido a que, por limitaciones del móvil, en el móvil generalmente se dispone de una sola antena de transmisión [20].

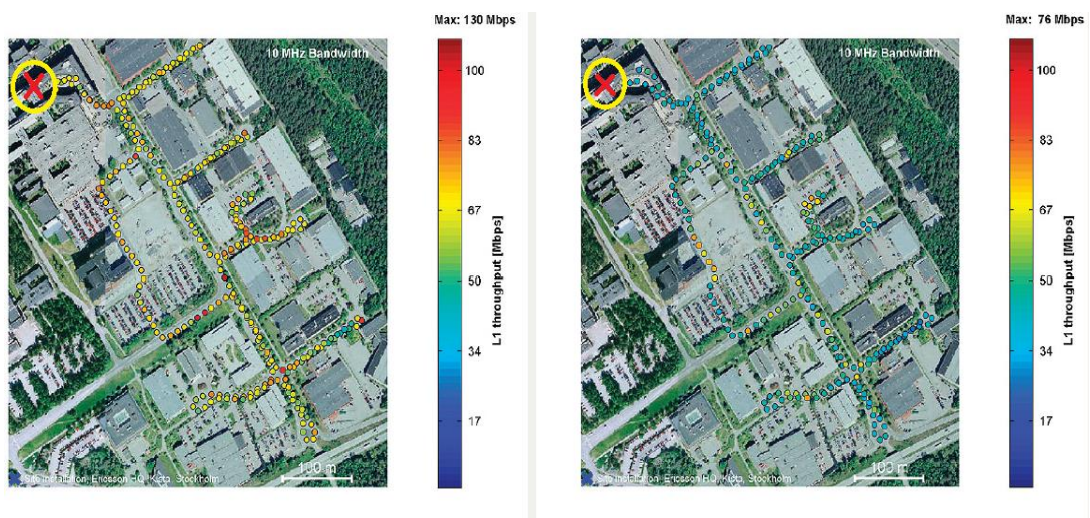


Figura 2.23 Throughput relativo a la ubicación de una antena configurada usando un ancho de banda de 10 MHz. Izquierda: 4x4 MIMO. Derecha: 2x2 MIMO [18]

<sup>15</sup> Extended Vehicular A channel model. Ver: 3GPP spec. 36.101, 8.1.0 B en Anexo "A"



- **MIMO Multi User MU-MIMO**

La Figura 2.24 muestra una técnica ligeramente diferente a MIMO. Aunque, al igual que antes dos antenas transmisoras y dos receptoras están compartiendo los mismos tiempos de transmisión y frecuencias, esta vez las antenas móviles están en dos móviles diferentes, en lugar de en uno. Esta técnica se conoce como MIMO de múltiples usuarios (MU-MIMO), en contraste con la técnica de *Multiplexación Espacial* anterior, que a veces se conoce como único usuario MIMO (SU-MIMO).

Específicamente, la Figura 2.24 muestra la implementación de *multi-user* MIMO en *Uplink*, que es la situación más común. Aquí, los móviles transmiten al mismo tiempo y en la misma frecuencia portadora, pero sin utilizar ninguna pre-codificación y sin incluso saber que son parte de un sistema de *Multiplexación Espacial*. La estación base recibe sus transmisiones y las separa utilizando diferentes técnicas de detección de errores<sup>16</sup>.

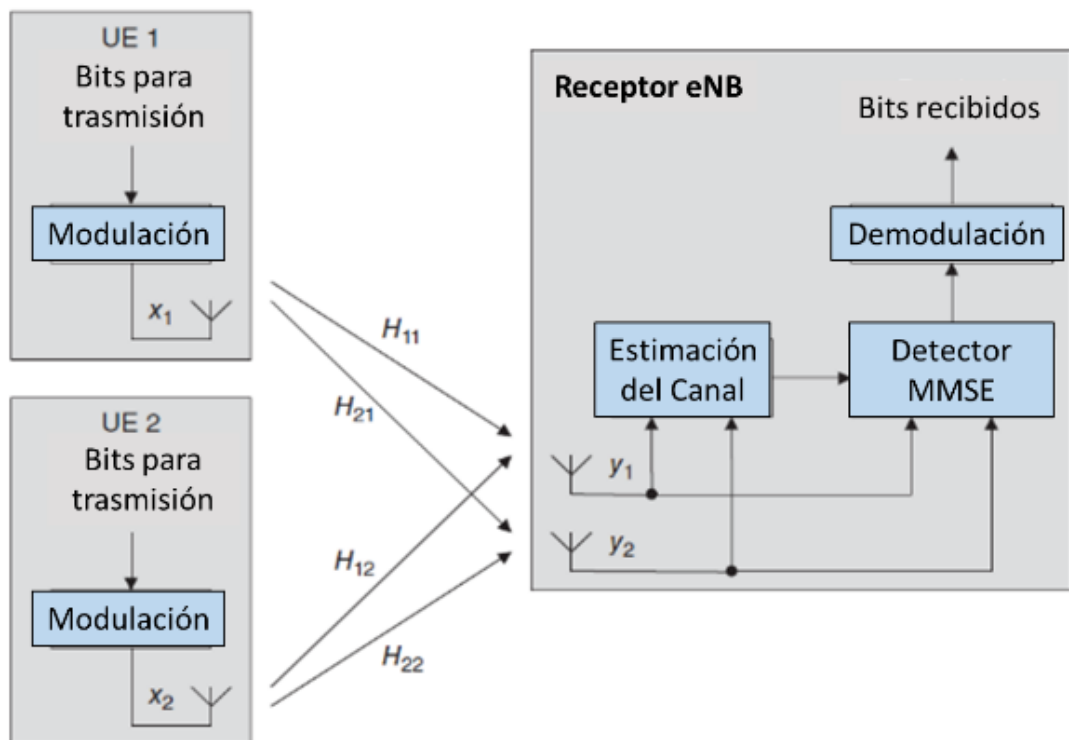
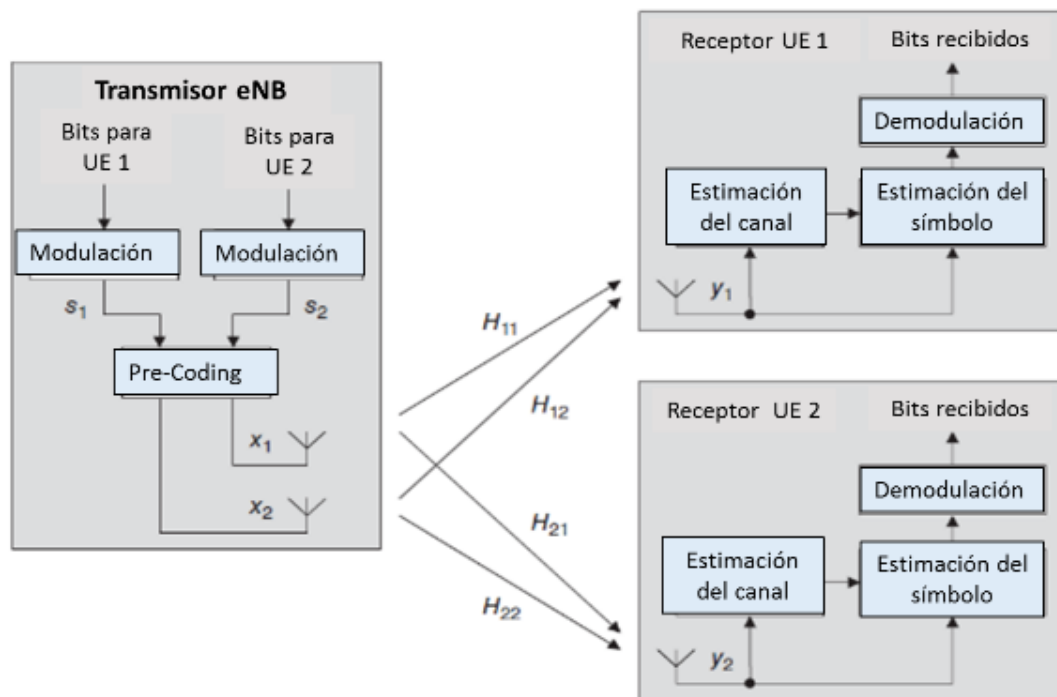


Figura 2.24 Multi-user MIMO para *Uplink* [1]

<sup>16</sup> El Detector de cero forzado ZF y *Mínimum Mean Square Error* MMSE, son técnicas utilizadas en la detección de errores.

Esta técnica sólo funciona si la matriz de canal se comporta bien, lo cual generalmente, es posible garantizar por dos razones. En primer lugar, es muy probable que los móviles estén muy separados, de manera que las trayectorias de sus ondas incidentes son muy distintas. En segundo lugar, la estación base puede elegir libremente los móviles que participan en la recepción, consecuentemente puede elegir libremente los móviles que conducen a una matriz de canal de buen comportamiento.

*Multi-user MIMO en Uplink* no aumenta la tasa de datos máxima de un móvil individual, sin embargo es un esquema beneficioso debido al aumento en el *Throughput* a nivel de celda. Otra ventaja es que, se puede implementar utilizando móviles de bajo costo que apenas contengan un amplificador de potencia y una antena de transmisión, no dos. Por estas razones, multi-user MIMO se establece como la técnica estándar para *Uplink* de LTE Release 8. Hasta el Release 10 no SU-MIMO no se ha introducido como técnica para *Uplink* [1].



**Figura 2.25** Mediante esta técnica, no es posible usar Multi-user MIMO para *Downlink* [1]

Se podría aplicar multi-user MIMO para *Downlink*, como se muestra en la Figura 2.25. No obstante, esta vez, aparece un problema: Si bien es cierto, el móvil 1 puede medir su señal recibida  $y_1$  y los elementos del canal  $H_{11}$  y  $H_{12}$ , en la misma manera que antes, sin embargo, no tiene conocimiento de la otra señal recibida  $y_2$ , o de los

otros elementos de canal  $H_{21}$  y  $H_{22}$ . La situación inversa se aplica para el móvil 2. Entonces, ningún móvil tiene la información completa acerca de los elementos de canal o de las señales recibidas, lo cual invalida el uso de esta técnica para *Downlink*.

Por lo tanto, la solución es implementar *Downlink multi-user MIMO* mediante la adaptación de otra técnica de multi-antena, conocida como *Beamforming*, la cual se analizará a continuación, y posteriormente al final de la siguiente sección se retomará este tema de *Downlink multi-user MIMO*.

### 2.5.3 Beamforming

La transmisión *Beamforming* permite a un punto de acceso concentrar su energía en la dirección de un cliente particular, utilizando técnicas de procesamiento de señales. Este esquema es similar al *Procesamiento de Diversidad de Recepción y Diversidad de Transmisión*, aunque tiene una geometría diferente y usa técnicas distintas.

La estación de base aún conserva múltiples antenas, pero la separación entre ellas es menor que antes, típicamente media longitud de onda de la frecuencia portadora ( $\lambda/2$ ). También se supone que hay poca propagación *multi-trayecto* entre la estación base y el móvil. Con esa geometría, el móvil recibe señales altamente correlacionadas desde las antenas de las estaciones base, por consiguiente los esquemas de *Multiplexación Espacial* revisados anteriormente, se vuelven inapropiados para este tipo de ambientes.

En cambio, las múltiples antenas utilizadas, incrementan la *cobertura* de la celda siguiendo los principios mostrados en la Figura 2.26, donde el móvil 1 tiene un largo camino desde la estación base, en una trayectoria que forma un ángulo recto con el arreglo de antenas. Las señales provenientes de cada antena, inciden en el móvil 1 en fase, por lo que existe *interferencia constructiva*, y la potencia de la señal recibida es alta. Por otro lado, el móvil 2 tiene una posición que genera una trayectoria oblicua, recibiendo señales de antenas alternativas que están con  $180^\circ$  de desfase. Estas señales *interfieren destructivamente*, por lo que la potencia de la señal recibida es baja. Por tanto, se ha creado un lóbulo de antena sintético, que tiene un apuntamiento del lóbulo

principal hacia el móvil 1 y un lóbulo nulo apuntando hacia el móvil 2. El ancho del lóbulo es más estrecho que el generado desde una sola antena, por lo que la potencia transmitida se enfoca hacia el móvil 1. Como resultado, se consigue un mayor alcance de la estación base en la dirección del móvil 1.

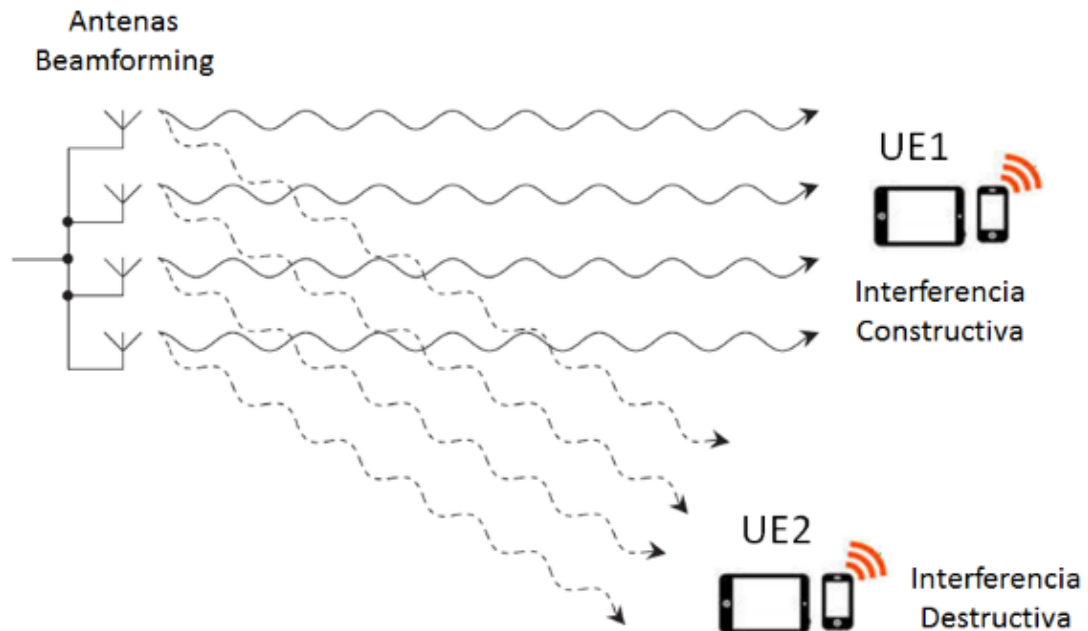


Figura 2.26 Modo de operación básico del *Beamforming* [1]

Ahora bien, en términos generales, para cambiar la dirección del lóbulo principal, de tal forma que se obtenga una *interferencia constructiva*, se puede ajustar las amplitudes y fases de las señales transmitidas, mediante la aplicación de un conjunto adecuado de ponderadores<sup>17</sup> para cada antena, como se muestra en la Figura 2.27.

Así en un sistema con  $N$  antenas, es posible ajustar la dirección del lóbulo principal y obtener hasta  $N-2$  lóbulos laterales. De la misma manera, se puede usar esta técnica para construir un *Lóbulo Sintético de Recepción* para *Uplink* mediante la aplicación de un conjunto de ponderadores en la estación base receptora, con esto se puede asegurar que las señales recibidas estén sumadas en fase e interferidas constructivamente. Como resultado, se obtiene un incremento del alcance para el *Uplink*.

<sup>17</sup> El "Weighting Method" es un medio para asignar ponderaciones a cada una de las antenas que conforman un arreglo de antenas.[23]

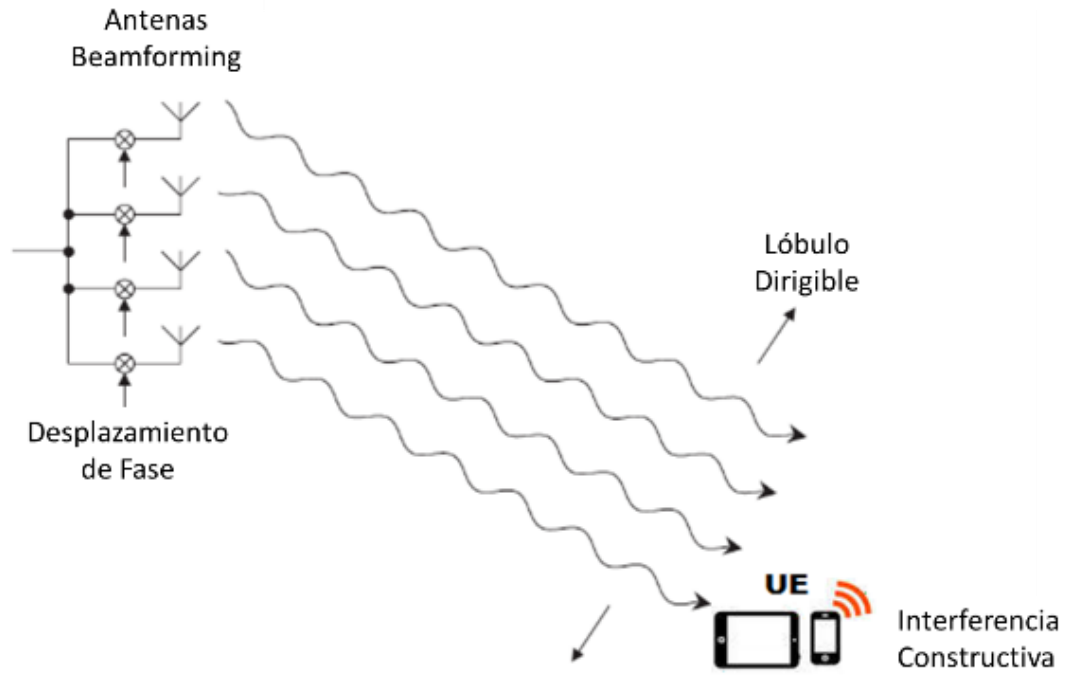


Figura 2.27 Orientación del lóbulo usando desplazamientos de fase [1]

- **Orientación del Lóbulo**

En el esquema *Beamforming* las diferentes trayectorias de los rayos están altamente correlacionadas entre sí, por lo que las ponderaciones de la antena permanecen estables durante largos períodos de tiempo, lo cual a menudo hace que sea factible que la estación base pueda estimar las ponderaciones sin ningún tipo de retroalimentación desde el móvil.

Para la recepción del Lóbulo en *Uplink*, existen dos técnicas principales [24]: Utilizando la técnica de *señal de referencia*, la estación base ajusta las ponderaciones de las antenas con el fin de reconstruir los símbolos de referencia del móvil con la fase correcta de la señal y la mejor posible relación señal ruido (SINR). Otra técnica es la orientación de la *dirección de llegada*, en la cual la estación base mide las señales que son recibidas por cada antena y *estima* la dirección del móvil de destino. Con esta cantidad, se puede *estimar* las ponderaciones necesarias para una recepción satisfactoria.

Para la transmisión de los lóbulos en *Downlink*, la respuesta depende del modo operación de la estación base. En el modo TDD, tanto el *Uplink* como el *Downlink* utilizan la misma frecuencia portadora, para que la estación base pueda usar las mismas ponderaciones de antena para ambos enlaces. En el modo FDD, las frecuencias portadoras son diferentes, por lo que las ponderaciones de antena de *Downlink* son diferentes y más difíciles de estimar. Por esta razón, *Beamforming* es más común en los sistemas que utilizan TDD.

El hecho de que no exista retroalimentación, aporta un beneficio adicional a este esquema, pues se simplifica su diseño, haciendo que el proceso de formación del lóbulo sea transparente para el móvil. Para lograr esto, la estación base aplica sus ponderaciones de antenas a todo lo que se transmite, incluyendo no sólo los datos, sino también las señales de referencia, que ahora son específicos para el móvil de destino. Como resultado, el móvil recibe todas sus transmisiones de *Downlink* con la amplitud y la fase correcta, por lo que la estación base no tiene que indicar ninguna información acerca de la elección de las ponderaciones.

A pesar de que las señales de referencia son específicas para cada móvil, una estación base OFDMA todavía puede transmitir a más de un móvil simultáneamente. Para lograr esto, simplemente se tiene que hacer el procesamiento de diferentes conjuntos de sub-portadoras, utilizando diferentes conjuntos de ponderadores de antena, a fin de crear lóbulos que apuntan hacia diferentes móviles. Por otra parte, la estación base también es capaz de transmitir a múltiples móviles en el mismo conjunto de sub-portadoras mediante la implementación del esquema *Downlink Multiple User MIMO* que se analizará a continuación [1].

- ***Downlink Multiple User MIMO***

Al analizar el esquema MU-MIMO, se trató de implementar *Downlink Multiple User MIMO* utilizando las mismas técnicas de *Multiplexación Espacial*. Sin embargo, se verificó que los móviles no poseen suficiente información para recuperar los símbolos transmitidos, por lo que el uso de estas técnicas era inapropiado para tal fin.

No obstante, este problema se puede enfrentar de la manera que se muestra en la Figura 2.28 donde, la estación base, en lugar de uno solo, envía dos *data streams* diferentes a su arreglo de antenas, el cual procesa los datos utilizando dos sets de ponderadores de antena diferentes, y suma los resultados antes de la transmisión. Al hacerlo, ha creado dos *lóbulos* de antena independientes, que comparten las mismas sub-portadoras pero llevan dos conjuntos diferentes de información [1].

La estación base puede entonces ajustar las ponderaciones de antena con el fin de orientar los *lóbulos principales* y los *nulos* hacia dos móviles diferentes, por lo que el primer móvil recibe *interferencia constructiva* del *lóbulo 1*, e *interferencia destructiva* del *lóbulo 2*, y viceversa. Valiéndose de esto, la estación base puede duplicar la *capacidad* de la celda, exactamente de la manera que *Downlink Multiple User MIMO* requiere.

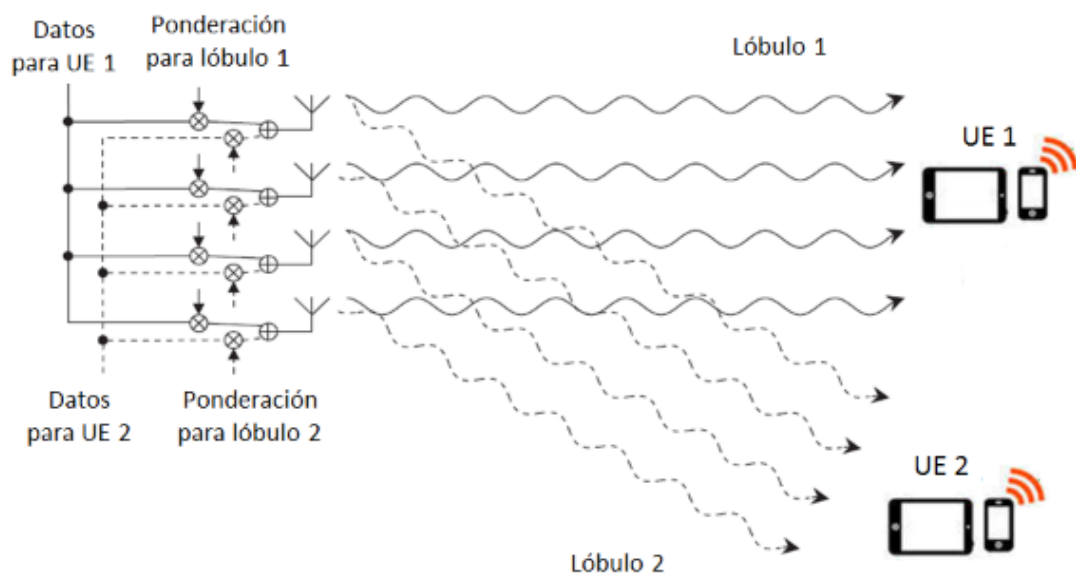


Figura 2.28 Beamforming utilizando dos sets de ponderadores en paralelo [1]

Para que el esquema trabaje eficazmente, se debe direccionar cada antena para que su *lóbulo* apunte hacia el móvil de destino y para que los *nulos* correspondientes, apunten hacia los otros móviles involucrados, lo cual es difícil lograr, por lo que LTE no ofrece soporte para este esquema hasta *Release 10*, en el cual, las especificaciones introducen retroalimentación precisa de PMI, que está diseñada para MU-MIMO y ayuda a la estación base a dirigir los *lóbulos* y los *nulos* con la precisión requerida.

Sin embargo en el *Release 8*, se tiene un soporte escaso para el esquema *Downlink Multi-User MIMO*, donde se tienen dos posibles técnicas. La principal, usa la misma retroalimentación PMI que SU-MIMO utiliza, por lo que sólo funciona de manera efectiva si el *codebook*<sup>18</sup> llega a contener una matriz de pre-codificación que es adecuada para MU-MIMO. A menudo no es así, por lo que el rendimiento de esta técnica en el *Release 8*, es relativamente bajo. Alternativamente, la estación base puede estimar las ponderaciones de antena sin ninguna retroalimentación en absoluto, usando las técnicas descritas anteriormente. Esta técnica es realmente eficaz, únicamente en el modo TDD, y generalmente es inadecuada para el modo FDD.

Se concluye entonces que este esquema *Downlink MU-MIMO* es una variedad de *Beamforming* y se implementa de mejor manera utilizando antenas de estaciones base que están muy unidas, mas no separadas [1].

#### 2.5.4 Consideraciones para elegir un Esquema de Transmisión

La *Multiplexación Espacial* se implementa en el *Downlink* de LTE *Release 8*, utilizando un máximo de cuatro antenas de transmisión en la estación base y cuatro antenas de recepción en el móvil. Sin embargo, hay situaciones similares al esquema de *Procesamiento de Diversidad*, que se deben tener en cuenta al momento de la implementación.

Considerando que las antenas en la estación base y el móvil, deben estar razonablemente distantes entre ellas, idealmente unas pocas longitudes de onda de la frecuencia portadora, o a su vez, deben manejar diferentes polarizaciones. Si las antenas están demasiado juntas, entonces los elementos del canal  $H_{ij}$  serán muy similares, lo cual fácilmente puede desembocar en una situación, donde la *Multiplexación Espacial* se vuelve inutilizable y se tiene que recurrir al esquema de *Procesamiento de Diversidad*. Una situación similar puede surgir fácilmente en el caso de la transmisión y recepción con *línea directa de vista* (LOS).

---

<sup>18</sup> Base de datos que almacena matrices indexadas, para ser utilizadas en un proceso de codificación.



Esto lleva a una conclusión, la *Multiplexación Espacial* en realidad funciona mejor, en condiciones *sin línea directa de vista* (NLOS), y con una significativa trayectoria múltiple (*multipath*) ya que, en estas condiciones, los elementos del canal  $H_{ij}$  no están correlacionados entre sí. En cambio, en condiciones de LOS, muchas veces se tiene que recurrir al esquema de *Procesamiento de Diversidad*.

Como se explicó anteriormente, en el esquema de *Procesamiento de Diversidad*, el PMI depende de la frecuencia portadora y de la posición del móvil. Entonces, para el caso en el que los móviles que se desplazan rápidamente, los retrasos en el bucle de realimentación, pueden hacer que el PMI sea poco fiable al momento que el transmisor lo va a utilizar, por lo que a menudo se prefiere al esquema de *Multiplexación Espacial* para la cobertura en este tipo de escenarios.

## CAPÍTULO III

### 3 REDES HETEROGÉNEAS Y SMALL CELLS LTE

#### 3.1 AUTO ORGANIZACIÓN DE REDES

Una red LTE, al igual que otras tecnologías de telecomunicaciones móviles, es controlada por un sistema de gestión de red, el cual tiene varias funciones como; gestionar su *software*, establecer los parámetros que tienen configurados los elementos de la red, y también tiene la capacidad de detectar y corregir las fallas en su funcionamiento. Mediante el uso de un sistema de gestión de este tipo, un operador puede configurar y optimizar, tanto las estaciones base de la red de radio-acceso, como cada uno de los componentes del *Core*. [1]

No obstante, el proceso requiere de una intervención manual, lo que implica que aún es propenso a errores, resulta costoso y demanda tiempo, especialmente si se trata de una red heterogénea, donde los costos operacionales aumentan al combinar *macroceldas* con *Small Cells*. Para enfrentar este problema, gradualmente la 3GPP ha introducido una técnica conocida como auto-optimización u auto-organización de redes, que por sus siglas en inglés *Self-Organizing-Networks* se la conoce como *SON*.

A continuación se analizarán las principales características de la técnica de auto-optimización de redes, la cual se va a dividir cuatro grandes categorías: a saber, la auto-configuración de una estación base LTE, la coordinación de la interferencia, la gestión de la movilidad y la reducción al mínimo del *Drive Test*. También se estudiará

una técnica conocida como *Gestión de la Información de la Red de Radio-Acceso* (RIM), a través de la cual, una estación base LTE puede intercambiar datos de auto-optimización con las redes de radio-acceso UMTS y GSM. El mayor impacto de estas técnicas, es sobre los procedimientos de señalización en la RAN, principalmente en la interfaz X2.

### 3.1.1 Configuración Automática de un eNB

- **Configuración Automática del PCI**

El objetivo principal del diseño de una red LTE es que un operador de red pueda configurar una nueva estación base de una manera relativamente simple, que incluya el nombre del dominio del sistema de gestión de la red, y los nombres de dominio de sus MME y *gateways* servidores. La estación base puede adquirir el resto de información necesaria mediante un proceso de auto-configuración [9]. Durante este proceso, la estación base contacta al sistema de gestión y se descarga el *software* que requerirá para esta operación. También descargará un conjunto de parámetros de configuración, tales como un TAC *Tracking Area Code*, un EGCI *Eutran Global Cell Identity*, una lista de identidades PLMN, y la potencia máxima de transmisión de cada celda.

En lo relativo a los parámetros de configuración, el sistema de gestión puede asignar expresamente un PCI para cada una de las celdas de la estación base. Sin embargo, esto implica una carga innecesaria para el planificador de la red, ya que cada celda debe tener una identidad diferente a cualquier otra celda cercana, además causa dificultades en las redes que contienen varios HeNB, los cuales pueden estar implementados sin tener absolutamente ninguna información de las celdas vecinas.

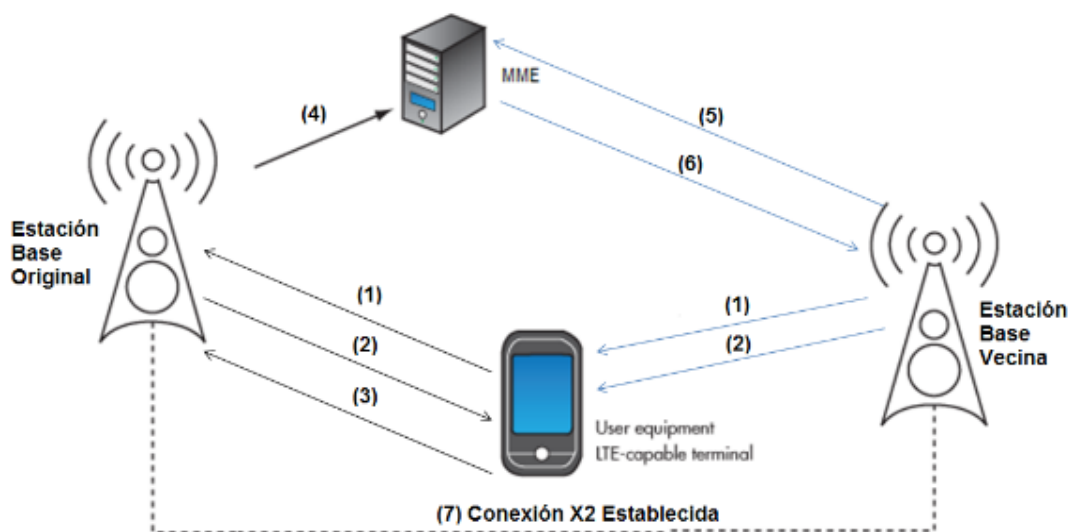
El sistema de gestión, alternativamente puede proveer a la estación base una lista reducida de PCI permitidos. Si la estación base tiene un adecuado receptor, entonces puede reconocer el PCI de las celdas LTE cercanas, para descartar de su lista de PCI y elegir aleatoriamente una identidad diferente. Para la configuración de las celdas subsiguientes, la estación base también puede descartar, tanto los PCI que reciba

durante los informes de medición, como la lista de PCI de estaciones base cercanas que reciba durante el procedimiento de configuración de la interfaz X2. [10]

Como parte del proceso de auto-configuración, la estación base también ejecuta un procedimiento de configuración de la interfaz S1, para establecer la comunicación con cada uno de los MME al que está conectada. En este procedimiento, la estación base informa a la MME, el TAC y las identidades de PLMN de cada una de sus celdas, así como el CSG al cual pertenece. Posteriormente, el MME responde con un mensaje que indica su identidad única global. Con esto se considera entonces que existe la comunicación entre la estación base y el MME sobre la interfaz S1 [1].

- **Configuración Automática de Vecindades ANR**

Durante el proceso de configuración descrito anteriormente, no existe la necesidad de que la estación base busque información para establecer su lista de vecinos. Esto disminuye la carga para el operador y a la vez elimina una potencial fuente de errores. Por el contrario, esta tarea puede ser realizada por el móvil, el cual puede identificar una celda vecina por sí mismo, para posteriormente indicar a la estación base mediante los informes de medición RRC<sup>19</sup>. En la Figura 3.1 [8], se muestra el procedimiento automático que realiza la estación base para establecer comunicación con su celda vecina.



**Figura 3.1 Procedimiento de Configuración Automática de Vecindades [8]**

<sup>19</sup> Protocolo que apila y maneja la señalización del plano de control de Capa 3, entre el UE y UTRAN.

Periódicamente el eNB solicita al móvil, que tome mediciones de calidad de las celdas vecinas, y el móvil en respuesta envía un reporte. El procedimiento de ANR inicia cuando la estación base detecta un PCI que no consta en su lista de vecinos en uno de estos reportes (1). Debido a que la estación base no puede ponerse en contacto con la nueva celda de inmediato, entonces ésta envía al móvil una segunda solicitud de medición para pedir más información acerca de esta celda (2).

En respuesta, el móvil completa el procedimiento de adquisición de la celda vecina, y en un segundo informe de medición devuelve el EGCI, el TAC y la lista PLMN a la estación base (3), la cual tiene ahora suficiente información para iniciar un *Handover* hacia la nueva celda, basado en la interfaz S1. Para soportar los *Handovers* basados en la interfaz X2, la estación base envía el ECGI a la MME y le pide que devuelva una dirección IP que la estación base vecina esté utilizando para las comunicaciones a través de X2 (4). El MME por defecto se está comunicando con la estación base vecina a través de S1, por lo que puede emitirle esta solicitud (5) y a su vez recibirla de su parte (6). De esta manera las dos estaciones base ahora pueden establecer comunicaciones a través de la interfaz X2 (7). Durante este procedimiento, las estaciones base intercambian información acerca de todas las celdas que están asociadas, incluyendo su EGCI, PCI y frecuencias portadoras. [1]

- **Optimización del Canal de Acceso Aleatorio (PRACH)**

La configuración manual del *canal de acceso aleatorio*, constituye otra potencial carga para el operador de red. Desde el *Release 9* en adelante, las estaciones base pueden intercambiar información acerca de los parámetros que se están utilizando para el PRACH, durante el procedimiento de configuración de X2. La información incluye la frecuencia *offset* PRACH y el índice de configuración PRACH. Usando esta información, las estaciones base pueden reducir al mínimo la interferencia entre las transmisiones de acceso aleatorio en las celdas cercanas, mediante la asignación de diferentes conjuntos de *Resource Blocks*.

Posteriormente, la estación base puede utilizar un mensaje de RRC, conocido como *UE Information Request* para recuperar información sobre el último intento exitoso de acceso aleatorio de un móvil. Usando esta información, la estación base

puede ajustar la configuración de potencia del canal de acceso aleatorio y las asignaciones de *Resource Blocks*, a fin de minimizar la carga que este canal produce en la interfaz de aire. [1]

### 3.1.2 Coordinación de la Interferencia Inter-celda

Este procedimiento conocido como ICIC, ayuda a una red a minimizar la interferencia entre estaciones base vecinas usando la interfaz X2-AP de *Load Indication*, e implementando los esquemas fraccionarios de la reutilización de frecuencias. Al iniciar el procedimiento, una estación base envía un mensaje X2-AP *Load Information* a una de sus vecinas. En este mensaje, la estación base puede incluir tres elementos informativos para cada celda involucrada. El primero, es la *potencia de transmisión relativa de banda estrecha*, el cual indica si la potencia transmitida en cada *Resource Block Downlink* se encuentra por encima o por debajo de un umbral. Con esta información, la estación base vecina puede evitar programar transmisiones *Downlink* a móviles distantes en *Resource Blocks* que están sujetos a altos niveles de interferencia en *Downlink*.

El segundo elemento informativo es la *indicación de alta interferencia UL*, el cual enumera los *Resource Blocks Uplink* en el que la estación base tiene la intención de programar a móviles distantes. La estación base vecina puede utilizar esto de una manera similar, por lo que no programará transmisiones *Uplink* desde móviles distantes en *Resource Blocks* que estén sujetos a la alta interferencia *UL*.

El tercer elemento es la *UL Interference Overload Indication*, que indica si la interferencia recibida en cada *Resource Block Uplink* es alta, moderada o baja. Aquí, la estación base vecina, nuevamente podría evitar la programación de transmisiones *Uplink* desde móviles distantes que estén en *Resource Blocks* sobrecargados, esta vez para asegurarse de que no genera altos niveles de interferencia en *Uplink*.

No obstante, desde el *Release 10*, la estación base puede incluir un cuarto elemento de información conocido como *sub-trama casi blanca* ABS por sus siglas en inglés *Almost Blank Subframe*. Esto soporta las técnicas mejoradas de coordinación de la interferencia inter-celda que se analizarán en la sección 3.4.3.

### 3.1.3 Gestión de la Movilidad

- **Balance de Carga en la Movilidad MLB**

El MLB *Mobility Load Balancing* es una función donde las celdas que sufren congestión, pueden transferir la carga a otras celdas que aún disponen de recursos libres. El MLB incluye el intercambio de reportes entre eNBs, los cuales contienen información acerca del nivel de carga y capacidad disponible de la celda. La periodicidad de la presentación de informes se puede solicitar en un intervalo de 1 a 10 s. Dicho informe puede contener, carga de *hardware*, el estatus de la carga de la red transporte en S1, y el estado de los recursos de radio.

El MLB también puede ser utilizado entre las diferentes tecnologías de radio-acceso, como es el caso del *Handover* Inter-RAT, los informes de carga del protocolo RIM, se utilizarán para transferir la información a través del *Core* entre las estaciones base de diferentes tecnologías de radio. Un *Handover* debido a *Load Balancing* se lleva a cabo como un *Handover* regular, aunque puede ser necesario modificar los parámetros de modo que el equipo de usuario (UE) no retorne a la celda congestionada [26].

- **Optimización Robusta en la Movilidad MRO**

El MRO *Mobility Robustness Optimization*, es una técnica de auto-optimización, para la detección y corrección de errores, mediante la cual, una estación base puede recopilar información acerca de los problemas que han surgido debido al uso de umbrales inadecuados en los reportes de medición.

Esta información es utilizada entonces, para ajustar dichos umbrales y corregir el problema. En el *Release 9* la atención se centra en los errores causantes del Enlace de Radio Fallido *Radio Link Failure* (RLF), debido al tardío o muy temprano *Handover*, o al *Handover* hacia una celda incorrecta. [26]

- **Ahorro de Energía**

Ahora bien, con el fin de ahorrar energía, algunas celdas pueden ser apagadas cuando no se necesita de su *capacidad*. El consumo de energía en una estación base no sólo está relacionado con la carga, ya que también se requiere energía para otra serie de funcionalidades, incluso si no hay usuarios a servir.

Legalmente un operador no puede permanecer con una de sus celdas apagada, ya que siempre existen requerimientos de *cobertura*, la cual debe mantenerse en todo momento. Por tal motivo, la suspensión de la celda únicamente puede ocurrir cuando el último usuario sale de la celda, entonces todos los *Handovers* entrantes durante dicho período de tiempo serán rechazados. Las celdas que aún permanecen brindando cobertura, pueden despertar a una celda suspendida, cuando la carga de tráfico se incrementa. Esto se puede hacer mediante una solicitud de activación de la celda *X2-AP Cell Activation Request* [26].

### 3.1.4 RAN Information Management (RIM)

Aunque inicialmente, el protocolo RIM fue desarrollado para la transferencia de información dentro de redes de acceso GSM, posteriormente, se extendió a la transferencia de información entre redes de radio-acceso GSM, UMTS y LTE, concretamente entre el BSC de GSM, el RNC de UMTS y el eNB de LTE. En el nivel más bajo, la red *Core* transporta información entre las tres RAN, mediante mensajes embebidos en las interfaces de señalización intermedias. En un siguiente nivel, la transferencia de información *end-to-end*, es gestionada por el protocolo RIM, el cual soporta la presentación de informes individuales y por eventos, y que garantiza la entrega fiable por medio de reconocimientos y retransmisiones. En el nivel más alto, las especificaciones definen varias aplicaciones de RIM que manejan diferentes tipos de información. Estas aplicaciones permiten a una estación base LTE descubrir la información del sistema de celdas cercanas UMTS y GSM, y ampliar la capacidad de auto-optimización de redes, cubriendo también optimización entre sistemas. Este procedimiento se realiza en dos etapas. En la primera etapa, una estación base LTE nueva, descubre uno de sus vecinos UMTS y agrega el vecino a su lista de objetos 3G



medidos. En la segunda etapa, la estación base utiliza un procedimiento de RIM para solicitar información del sistema del vecino.

Ahora bien, existen varios procedimientos similares para transferir tres tipos de datos para la auto-optimización. En primer lugar, la RAN puede intercambiar información acerca de la carga de la celda, para el soporte de MLB entre sistemas. En segundo lugar, las RAN pueden intercambiar información para el soporte de MRO, y ayudar a detectar los *Handovers Inter-System* innecesarios. Después de un *Handover* desde LTE hacia UMTS o GSM, la nueva RAN puede pedir al móvil que continúe midiendo la potencia de la señal que está recibiendo de celdas LTE cercanas, si la potencia medida es suficientemente alta, entonces la RAN puede indicar a la estación base LTE original, que desencadenó un *Handover* innecesario. De esta manera la estación base LTE puede utilizar una serie de informes como este, para ajustar sus umbrales de notificación. En tercer lugar, las RAN pueden intercambiar información para soportar el *ahorro de energía inter-system*. Esto funciona de la misma manera que el procedimiento de *ahorro de energía* LTE descrito en la sección anterior, permitiendo a una celda reportar que ha sido desconectada o preguntando a una celda vecina, si debe encenderse.

### 3.1.5 Minimización del *Drive Test* MDT

La manera tradicional con la cual los operadores de redes evalúan la cobertura de una RAN, es mediante dispositivos de medición que recolectan datos durante un recorrido alrededor de su área prevista de cobertura, esta técnica se conoce como *Drive Test*. Además de ser lenta y costosa, esta técnica proporciona datos de cobertura limitados a la ruta del *Drive Test* y suministra poca o ninguna información sobre la cobertura en interiores. Sin embargo, los operadores de red tienen ahora otra fuente de medición del ambiente de radio que perciben los móviles de los usuarios, mediante una técnica que aparece desde el *Release 10* y que se conoce como *Minimización del Drive Test* (MDT) [27], en la cual un operador puede pedir a sus móviles que devuelvan mediciones, que complementan o incluso reemplazan a las mediciones obtenidas a partir de los *Drive Test* tradicionales.

Conforme a las políticas de privacidad del cliente, el operador está obligado a obtener el consentimiento de los usuarios para el uso de sus teléfonos móviles en el proceso MDT. La red almacena la información relevante en el HSS y la verifica antes de la activar una medición. Una vez que se cuenta con el consentimiento del usuario, se dispone de dos modos de medición: en modo conectado RRC\_CONNECTED o en modo idle RRC\_IDLE. El móvil realiza las mediciones de RSRP o RSRQ en *Downlink* y las reporta a la estación base, también reporta si se dispone de datos de ubicación. Ahora la estación base puede devolver al sistema de gestión la información recolectada por el móvil, utilizando los procedimientos de gestión de red existentes para el reporte de trazas.

Desde el *Release 11* se mejora la técnica MDT de dos maneras. En primer lugar, el móvil devuelve mediciones adicionales a la estación base. El *Throughput* de *Uplink* y *Downlink* indica la *calidad* del servicio a nivel de usuario, en cambio el volumen de datos de *Uplink* y *Downlink* indica donde hay mayor concentración de tráfico, el *Uplink Power Headroom*<sup>20</sup> indica la cobertura de *Uplink*, mientras que el número de enlaces de radio versus el número de conexiones fallidas RRC, proporcionan más información acerca de *Huecos de Cobertura*. En segundo lugar, la red puede instruir al móvil para medir y devolver su ubicación únicamente para el propósito del MDT. Esto otorga al operador de la red una información muy valiosa, no obstante, puede aumentar el consumo de energía del móvil. Sin embargo esto normalmente puede ser gestionado por una opción de suscripción adicional, contenida en el HSS del *Core*. [1]

## 3.2 REDES HETEROGÉNEAS

### 3.2.1 Introducción

Para entender el concepto de una red heterogénea, se iniciará por definir a una red homogénea, que es aquella red donde exclusivamente se utiliza una única tecnología para el radio-acceso, independientemente de la potencia de transmisión de cada estación base, que conforma la red de un operador. En una red homogénea, todas las estaciones base realizan transmisiones con un orden de potencia común para todas

---

<sup>20</sup> Potencia de transmisión restante, para que el UE use de manera adicional.  $Power\ Headroom = (UE\ Max\ Transmission\ Power) - (PUSCH\ Power)$

las tecnologías de radio-acceso, GSM, UMTS y LTE, el elemento de red típico es la *macrocelda*. [27]

Ahora bien, impulsados tanto por incentivos técnicos como económicos, el siguiente salto en el rendimiento en las redes móviles, proviene de una evolución de la topología de red, mediante la cual los operadores utilizarán en sus redes de radio-acceso una mezcla de *macroceldas* y *micro-celdas*, complementadas o no con *Sistemas de Antenas Distribuidas* (DAS), así como los puntos de acceso Wi-Fi, licenciados o no para el uso del espectro.

Actualmente, un operador de red puede minimizar la interferencia entre estos tipos de celdas, haciendo un despliegue de estas celdas en diferentes frecuencias portadoras. No obstante, esta técnica no siempre es factible, ya que el operador puede no disponer de suficientes frecuencias portadoras, haciendo que el uso del ancho de banda total del operador, no sea del todo eficiente. Como alternativa, un operador de red puede desplegar diferentes tipos de celdas en la misma frecuencia portadora, ocupando la misma banda; dicha red se conoce como una red heterogénea o *HetNet* [29].

A medida que los operadores móviles siguen aumentando su cantidad de usuarios de banda ancha móvil con todo tipo de dispositivos, especialmente *smartphones* y *tablets*; el concepto de *HetNet*, se va considerando como una implementación fundamental. *HetNet* introduce el concepto de infraestructura de *Small Cells* (micro, pico y femto), que se estudiarán en la siguiente sección, así como el uso de otras tecnologías de acceso que no pertenecen a la familia 3GPP como Wi-Fi (el estudio de esta tecnología en redes heterogéneas, está fuera del alcance de este proyecto). Esta heterogeneidad, permite que al emplear estas tecnologías en conjunto, sea posible proporcionar una cobertura que faculte el *Handover* entre éstas.

Por otro lado, la introducción de *Small Cells* en la red implica un rápido aumento en el número de puntos de acceso, para lo cual los operadores tendrán que ofrecer algún tipo *Backhaul* para soportarlos y evitar  *cuellos de botella*<sup>21</sup>, tales como fibra,

---

<sup>21</sup> Se refiere a la cantidad de tráfico que puede converger en la red *Core* de un operador.

cobre, medios no guiados, etc., lo cual tampoco está dentro del alcance de investigación de este proyecto.

El despliegue de este tipo de redes permite a los operadores, mantener competitivas sus ofertas de acceso de banda ancha móvil, además de complementar la red para que puedan enfrentar la saturación urbana y enfocarse a incrementar sus ingresos en zonas de alto valor. Una *HetNet*, comúnmente, está formada por múltiples tecnologías de radio-acceso, arquitecturas superpuestas, soluciones de *Backhaul* y estaciones base de diversas potencias de transmisión.

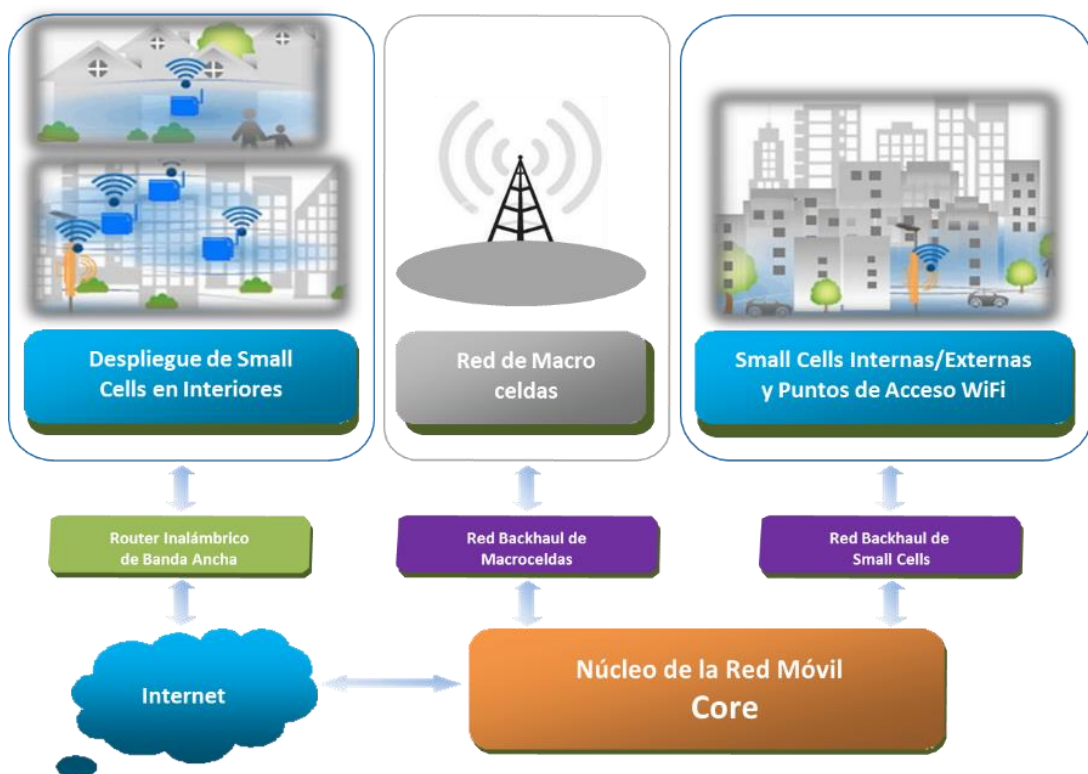


Figura 3.2 Arquitectura de una red Heterogénea [4]

En este tipo de redes una estación base eNB, se puede conectar a una *micro/pico/femto* celda, y/o a unidades remotas de radio RRH (*Remote Radio Heads*) para disponer de una red sobrepuesta a la red macro. En el caso de LTE, se hace uso de la tecnología *SON* (*Self Organizing Network*) anteriormente descrita, para la optimización de los recursos, lo cual permite equilibrar los costos operacionales que incurren al fusionar macro estaciones base convencionales con *Small Cells*, facilitando al mismo tiempo la operación y el mantenimiento de la red.

Las redes heterogéneas sufren, básicamente de dos problemas de interferencia. El primer problema (Figura 3.3), ocurre si una estación base de alta potencia, como una *macrocelda*, está cerca de una estación base de baja potencia, como una *Small Cell*. El área de cobertura de la *picocelda* es reducida a causa de la interferencia causada por la *macrocelda*, esto limita los beneficios que la *picocelda* debe proporcionar.

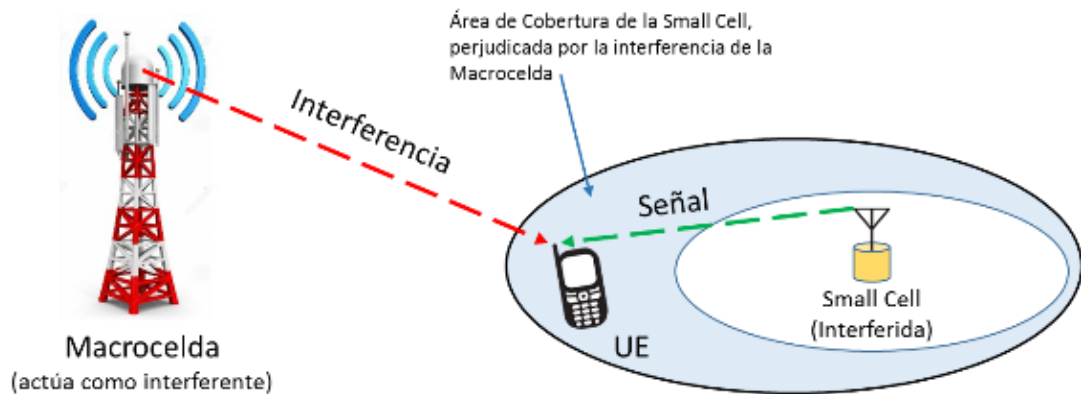


Figura 3.3 Reducción de cobertura de una *picocelda* debido a la interferencia de una *macrocelda* cercana [1]

El segundo problema (Figura 3.4) ocurre cuando la *picocelda* pertenece a un *grupo cerrado de suscriptores* (CSG). Si un móvil no pertenece a dicho CSG, entonces es posible que no pueda comunicarse con la *macrocelda*, debido a la interferencia que provoca la *Small Cell*. Se debe tomar en cuenta la diferencia entre estos dos escenarios, en el primer escenario, la *macrocelda* es el *interferente* y la *picocelda* es la *interferida*, mientras que en el segundo escenario, sucede lo contrario.

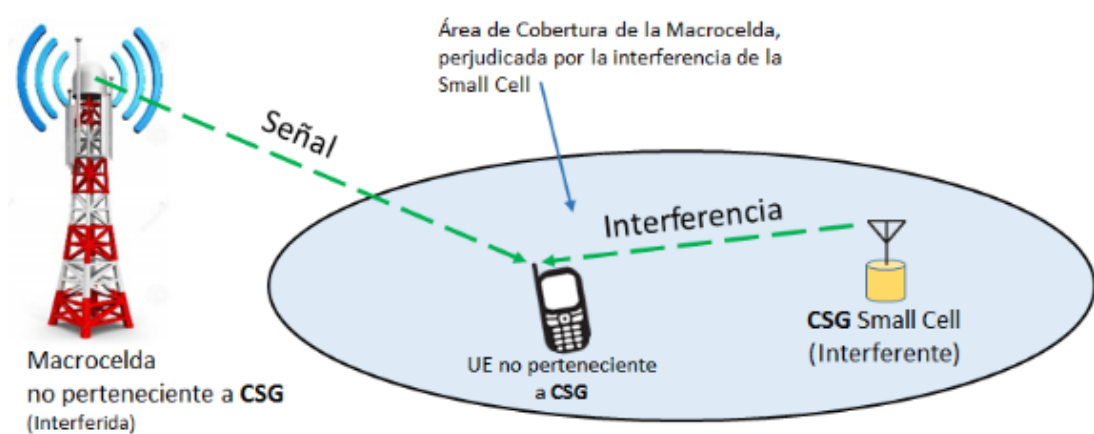


Figura 3.4 Reducción de cobertura de una *macrocelda* no perteneciente a un CSG, debido a la interferencia de una *picocelda* cercana perteneciente a un CSG [1]

### 3.2.2 Mejoras en la Auto-Optimización de Redes Heterogéneas

La introducción del concepto de ABSs en la funcionalidad de la auto-optimización de redes, básicamente brinda dos mejoras. La primera, referente al procedimiento para la coordinación de la interferencia inter-celda, donde la estación base ahora como un elemento adicional, puede agregar la información ABS a su mensaje X2-AP. El campo enumera las ABS que sus celdas han configurado, y una celda vecina puede utilizarlas para programar los móviles que son vulnerables a las interferencias.

La segunda es en cuanto al procedimiento de *balanceo de carga en la movilidad*, donde una celda vecina puede agregar un *ABS status*, como un elemento de información adicional, para su mensaje X2-AP. El campo reporta la utilización de los recursos de la celda vecina, dentro de sub-tramas que la estación base original ha configurado previamente como ABS. La estación base original puede utilizar la información para ajustar el número de ABS que tiene configurado; por ejemplo, mediante la adición de más ABSs, si existe alta utilización de los recursos de la celda vecina [1].

### 3.2.3 CoMP Transmisión y Recepción Coordinada Multi-Punto

Se debe tomar en cuenta que siempre existe la probabilidad de que un móvil se mueva distante de las antenas de una estación base, en dirección hacia el borde de una celda, donde recibirá una señal más débil proveniente de la celda servidora y más interferencia provocada por otras celdas cercanas. Tomados en conjunto, estos dos efectos, reducen el *throughput* y degradan la *calidad* de servicio que percibe el usuario.

En esta técnica conocida como *transmisión y recepción multipunto coordinada* (COMP) [3], las antenas cercanas cooperan a fin de aumentar la potencia recibida por un móvil en el borde de la celda, reduciendo su interferencia y aumentando su *throughput* alcanzable. Se debe recalcar que, CoMP no tiene gran efecto sobre el *throughput* promedio al interior de la celda, sino más bien, en el borde de las celdas [1].

- **Escenarios**

La 3GPP ha considerado cuatro diferentes escenarios en el diseño del soporte para CoMP en LTE, los mismos que se muestran en la Figura 3.5. El escenario A, representa a una red homogénea, donde la señal que incide en el móvil, proviene de antenas diferentes que pertenecen al mismo sistema radiante (sitio). El escenario B es similar, pero las antenas se encuentran en diferentes sitios. En cambio el escenario C, representa una red heterogénea que contiene *macroceldas* y *picoceldas*, mientras que en el escenario D, estas *picoceldas* han sido reemplazadas por *remotizaciones* RRHs, que resultan ser ampliaciones de un sector, y por lo tanto tienen el mismo PCI del servidor donante [30].

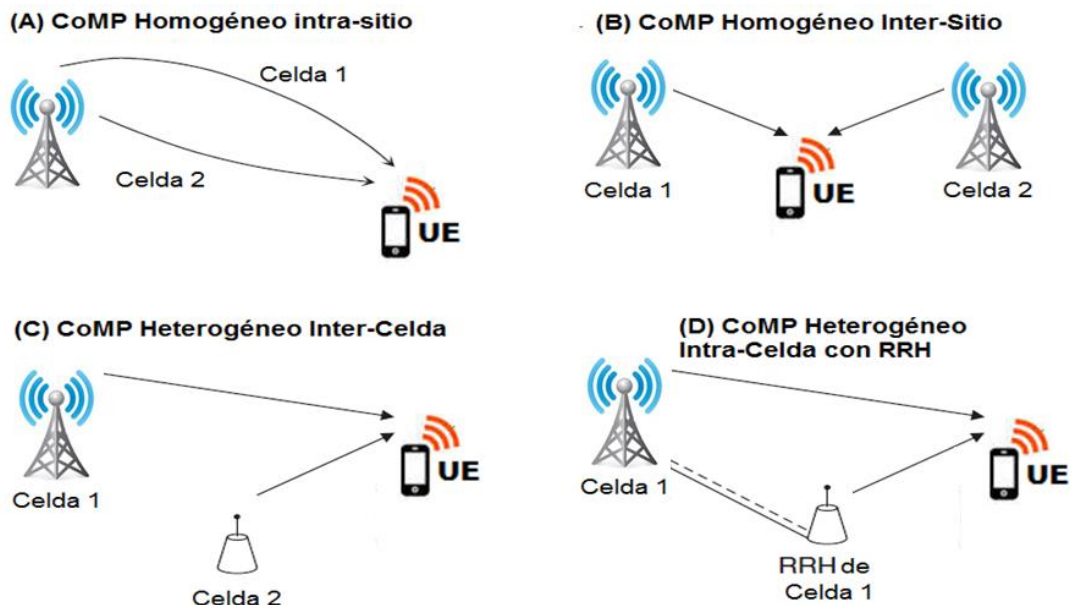


Figura 3.5 Escenarios CoMP del Release 11 [1]

Estos escenarios ponen de manifiesto algunas cuestiones relevantes. En primer lugar, a menudo es más fácil para las diferentes celdas cooperar si sus antenas son del mismo sitio (escenario A), que si se encuentran en diferentes sitios (escenarios B y C). Sin embargo, un operador puede configurar para que exista cooperación de distintos sitios, como se muestra en la Figura 3.6, de dos maneras diferentes:

La configuración más obvia es el uso de diferentes eNBs, que cooperan ya sea a través de la interfaz X2 o mediante el uso de técnicas propias, Figura 3.6 (a).

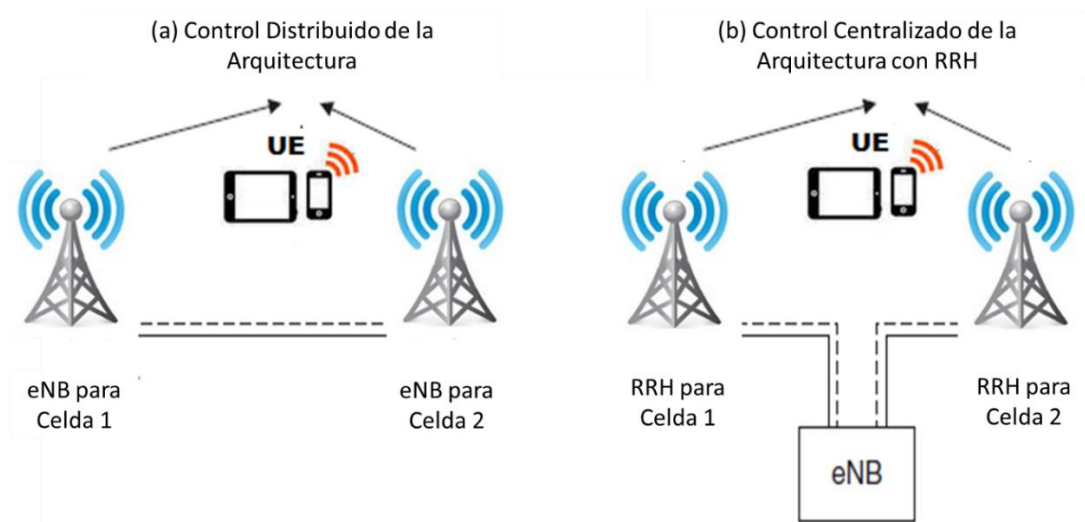


Figura 3.6 Arquitecturas de Control Distribuidas y Centralizadas [1]

No obstante, los sitios también se pueden configurar usando RRHs que se comunican con un eNB centralizado a través de un enlace de comunicación digital de alta velocidad, Figura 3.6 (b). Esta segunda opción, es la más sencilla para la implementación de CoMP inter-sitios.

En segundo lugar, las antenas cooperantes pueden estar en diferentes celdas, o en la misma celda como en el escenario D, donde también se ilustra otra aplicación de RRHs en combinación con una *macrocelda*. Para describir cada arquitectura expuesta, las especificaciones 3GPP han definido, como un *punto*, al conjunto de antenas geográficamente co-localizadas, de tal manera que diferentes *puntos* pueden cooperar utilizando técnicas CoMP. Los sectores co-sitio, se tratan como diferentes *puntos*, como en el escenario A, mientras que diferentes RRH dentro de un mismo sector también pueden ser tratados como diferentes *puntos*, como en el escenario D [1].

Las técnicas CoMP, utilizadas para *Uplink* y para *Downlink* son distintas, partiendo del hecho de que los eNBs están interconectados mediante una red con otros eNBs, mientras que los móviles son elementos individuales [31].



- **Técnicas CoMP para Downlink**
- **Scheduling<sup>22</sup> Coordinado (CS) o Beamforming Coordinado (CB)**, en esta técnica los datos están disponibles para la transmisión a un solo *punto*, que se elige usando el procedimiento normal de *Handover*, y que cambia muy ocasionalmente. Los *puntos* cercanos coordinan sus decisiones de *scheduling*, a fin de minimizar la interferencia que ellos están enviando al móvil de destino, transmitiendo sobre diferentes *Resource Blocks*, por ejemplo. Por otro lado, estos *puntos* cercanos pueden coordinar sus decisiones de *beamforming*, por ejemplo, mediante direccionar sus lóbulos *nulos* hacia el móvil de destino, como se ilustra en la Figura 3.7 [1].

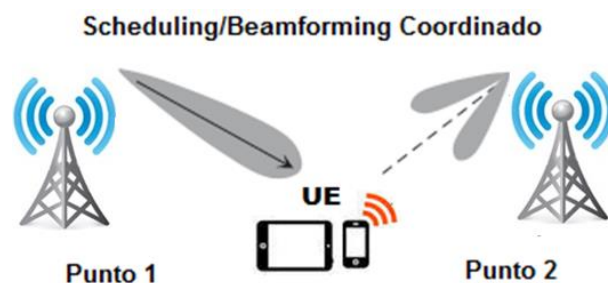


Figura 3.7 Técnica CoMP *Scheduling/Beamforming* Coordinado [1]

- **Procesamiento Conjunto (JP)**, en esta técnica los datos están disponibles para la transmisión desde múltiples *puntos*. Se tiene dos variantes, la primera, *Selección Dinámica del Punto* (DPS), donde en realidad, la red transmite desde un solo *punto* a la vez, seleccionando cada sub-trama; y la segunda, *Transmisión Conjunta* (JT), donde la red puede transmitir simultáneamente, desde más de un *punto*, como se muestra en la Figura 3.8 [1].



Figura 3.8 Técnicas CoMP de Procesamiento Conjunto (JP) [1]

<sup>22</sup> Es un algoritmo de asignación de recursos, responsable de la distribución de los recursos radioeléctricos, a los usuarios que comparten un canal de comunicación, su principal objetivo es satisfacer las expectativas de tantos usuarios en el sistema como sea posible.

- **Técnicas CoMP para Uplink**

En el *Uplink* CoMP se utiliza técnicas similares a *Downlink*, pero más sencillas, puesto que ahora los datos, están ya listos y disponibles en múltiples puntos de recepción.

En la técnica, *Scheduling Coordinado* (CS) o *Beamforming Coordinado* (CB), los *puntos* cercanos coordinan sus decisiones de *Uplink Scheduling* y de *Beamforming*, a fin de minimizar la interferencia que reciben de otros móviles. En DPS, la red recibe datos en múltiples puntos, pero sólo selecciona datos de un punto a la vez. En la *Recepción Conjunta* (JR), la red recibe datos en múltiples puntos y los combina para mejorar la calidad de la señal recibida.

Las técnicas CoMP resultan eficientes, ya que los conjuntos de cooperación CoMP para *Uplink* y *Downlink*, pueden ser diferentes entre sí, al igual que los *puntos* CoMP de recepción y transmisión [1].

- **Rendimiento de CoMP**

La 3GPP ha llevado a cabo simulaciones de las diferentes técnicas CoMP en los cuatro escenarios anteriormente descritos, obteniendo resultados muy variables, dependiendo de la técnica CoMP elegida y la configuración de la antena.

Sin embargo, en una red heterogénea que carezca de EICIC, se ha generalizado un resultado típico para la *transmisión y recepción conjunta*, siendo que la velocidad de datos en el borde de la celda, se eleva un 24% en *Downlink* y un 40% *Uplink*, mientras que la capacidad de la celda, aumenta en 3% en *Downlink* y 14% en *Uplink*.

Como se mencionó al inicio del estudio CoMP, éste tiene más impacto en los móviles del borde de la celda, que en otros lugares, y también tiene más impacto en el *Uplink* que el *Downlink*. [1]

### 3.3 SMALL CELLS

#### 3.3.1 Definición

“Celdas Pequeñas” o *Small Cells* es un término genérico mediante el cual se denomina a los nodos de baja potencia que forman parte de la red de radio-acceso, en un sistema de comunicaciones móvil, las mismas que operan en el espectro en bandas licenciadas y no licenciadas (Wi-Fi), y que tienen un alcance mínimo de 10 metros, llegando hasta varios cientos de metros. El término abarca a *femtoceldas*, *picoceldas*, *microceldas*, además al reciente concepto de *Metroceldas*. En un contexto más generalizado, las *Small Cells* difieren de las *macroceldas* por su alcance, teniendo en cuenta que las *macroceldas* tienen un alcance máximo de hasta varias decenas de kilómetros.

Otra definición que se le puede otorgar a las *Small Cells*, es que: son elementos de radio que permiten el acceso a la red de telefonía móvil de un operador inalámbrico, proporcionando una mejor calidad de servicio, mejor cobertura celular y capacidad dedicada, con gran aplicabilidad para hogares y empresas, así como para espacios públicos metropolitanos y rurales.

#### 3.3.2 Factores que conllevan a implementar *Small Cells*

Como se mencionó en el Capítulo I, el tráfico en redes móviles, principalmente de datos, está creciendo a un ritmo exponencial y se prevé que continúe en los próximos años. El número de usuarios y dispositivos de acceso a la red, están aumentando de manera similar, ya sea por necesidad, entretenimiento o negocios, esto va de la mano con las expectativas del usuario de tener conectividad fiable y soporte para aplicaciones de *streaming* en tiempo real, en cualquier momento y en cualquier lugar.

La nueva generación de aplicaciones de negocios y para el consumidor, por ejemplo: salud móvil, educación móvil, casas inteligentes, infraestructura de red inteligente, trasportación inteligente, y otras aplicaciones telemáticas; que en ciertos

países desarrollados se están implementando, y que en otros están próximos a hacerlo; ha comenzado a saturar la red de *macroceldas* especialmente en áreas de alta densidad de usuarios.

La ingeniería de la red móvil, no logra proporcionar el alto nivel de QoS requerido para garantizar la calidad que esperan los usuarios y entidades empresariales, en todos los puntos contenidos en el área de cobertura de una *macrocelda*. Esta situación ha creado una oportunidad de diferenciación de servicios para que los operadores puedan hacer una reingeniería de sus *macroceldas*, y proporcionar calidad de servicio a nivel empresarial.

La arquitectura de la red móvil tendrá que ser flexible para equilibrar la red y gestionar el exponencial crecimiento del tráfico de datos, enfrentar las limitaciones de espectro, y generar capital frente al declive del precio del servicio de datos. Los operadores se deben enfocar en la integración de *Small Cells* LTE en su red móvil, específicamente para:

- Optimizar el rendimiento total de la red, permitiendo establecer políticas de nivel de servicio para el tráfico de datos y mejorar su gestión.
- Controlar los costos de expansión de la red y reducir su relación costo-beneficio.
- Incrementar la capacidad y cobertura de la red en interiores, en exteriores y *Hotspots*, para cubrir zonas con carente o inadecuada cobertura.
- Permitir nuevos servicios de valor añadido, características y aplicaciones de nueva generación, así como soluciones TIC.

### 3.3.3 Categorías de *Small Cells*

Según su potencia de transmisión, radio de cobertura, y número de usuarios soportados, varios autores típicamente las han clasificado en tres principales categorías: *femtoceldas*, *picoceldas* y *microceldas*; cuyos alcances geográficos van desde 10 metros hasta cerca de 2 kilómetros. Aunque "*Metrocelda*", no se considera como un término técnico, es un término de marketing que está emergiendo como una

cuarta categoría, la cual abarca los tres tipos de *Small Cells* antes mencionados y que proveen soluciones de capacidad *offload*<sup>23</sup>, para localidades metropolitanas de alta ocupación [28].

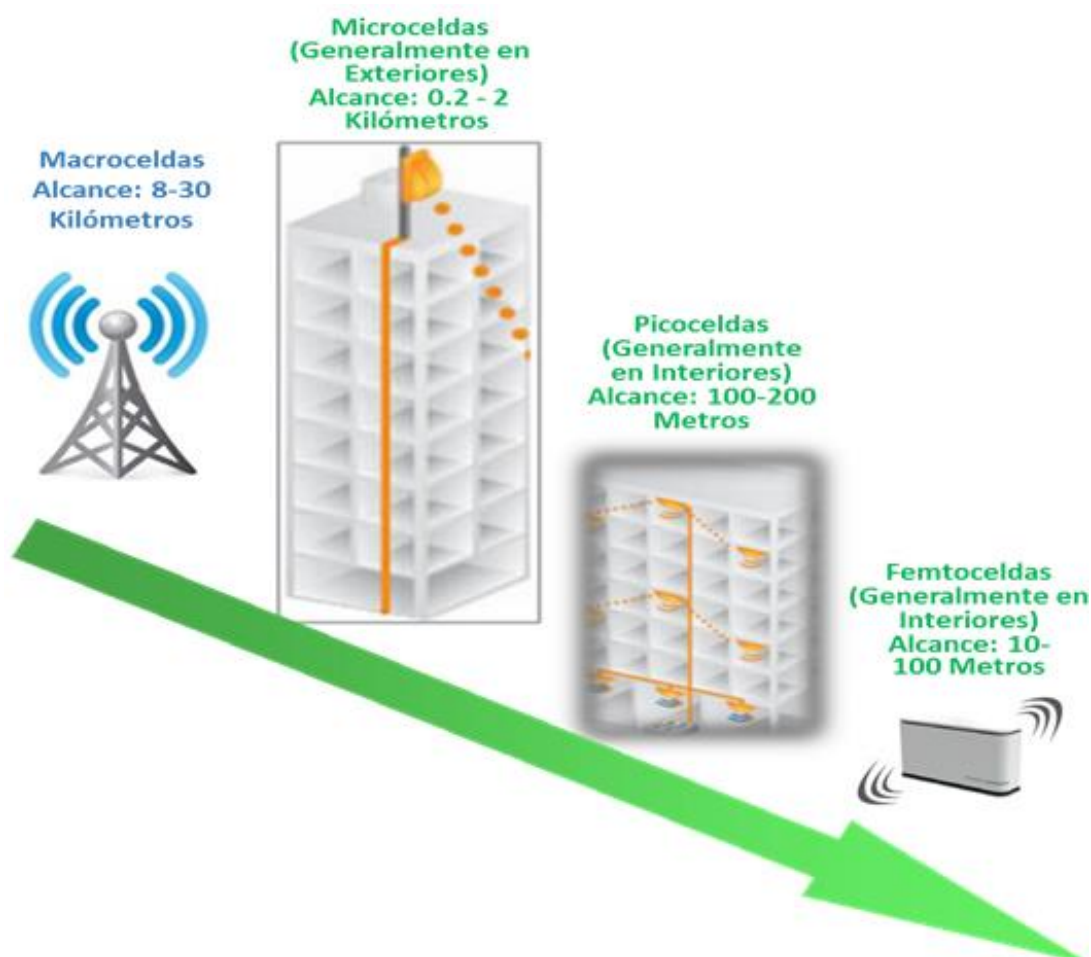


Figura 3.9 Comparación de *Small Cells* según el Alcance

Dentro de las *Small Cells* de corto alcance, también se puede categorizar al denominado HeNB por sus siglas en inglés: *Home* eNodeB, que quiere decir eNodeB para hogares, y que generalmente por sus características se incluyen en la categoría de *Femtoceldas*. A continuación, se hará un estudio de cada una de las categorías de *Small Cells* mencionadas, y en la Tabla 3.1, se resumirá, en comparación con una *macrocelda* tradicional, las categorías de *Small Cells* existentes.

<sup>23</sup> Se refiere a la liberación de carga para aumentar la capacidad, en este caso de un sistema de comunicaciones.

- **Femtoceldas - Home eNB**

El más pequeño ejemplo de celda, es el *Home eNB* (HeNB) que es una estación base generalmente adquirida por un usuario, para obtener una cobertura mejorada dentro de viviendas residenciales. Un HeNB trae consigo el beneficio, tanto para el usuario a través de la prestación de una mejor capacidad, cobertura y calidad (*throughput*), como también para el operador de red, reduciendo de cierta manera, la adopción de tráfico de las *macroceldas* circundantes [1].

Su principal inconveniente es el costo elevado que aún mantienen. El hecho de que a menudo sean desplegadas por los propios usuarios, agrega otra particularidad interesante, ya que utilizan su propia *última milla*, siendo su servicio de internet residencial el que hace las veces de *Backhaul*, aliviando este tramo de la red del operador, para evitar los  *cuellos de botella*.

Un *Home eNB* pertenece a un *grupo cerrado de suscriptores* (CSG), por medio del cual se puede proporcionar acceso exclusivo o preferencial a los móviles que pertenecen a dicho CSG. La lista de este grupo exclusivo de suscriptores móviles es almacenada conforme al USIM de cada UE, y puede ser descargada desde un servidor de gestión de dispositivos, que es controlado por el operador de red.

Los *Home eNBs* tienen una mayor limitación de potencia, que las estaciones base normales (las cuales por defecto inician controlando 3 celdas), ya que únicamente controlan una celda y, hasta el *Release 10* de LTE, no son compatibles con la interfaz X2. Por medio de la interfaz S1, un *Home eNB* puede comunicarse con el *Core* directamente o a través de un dispositivo conocido como *Gateway Home eNB*, el cual protege al *Core EPC* de las potencialmente enormes cantidades de *Home eNBs* que pueden intentar conectarse [1].

Es importante mencionar, que en algunos casos el término *femtocelda*, se ha expandido para abarcar unidades de alta capacidad para empresas, y áreas rurales y metropolitanas. Entre los atributos clave con los que cuentan actualmente, están: *Backhaul IP*, auto-optimización, bajo consumo de potencia, y facilidad de despliegue. En los últimos años, la aplicación de las *femtoceldas* ha evolucionado

considerablemente, siendo así que las primeras *femtoceldas* soportaban hasta 4 usuarios activos simultáneos y estaban dirigidos a uso residencial, mientras que hoy por hoy, las *femtoceldas* modernas pueden soportar hasta 30 usuarios. Asimismo, el enfoque en los bajos costos de operación y *hardware*, ha llevado a sofisticadas capacidades de auto-configuración y auto-optimización en la mayoría de las *femtoceldas*.

- **Picoceldas**

Las *picoceldas* son comúnmente empleadas como estaciones base, compactas y de bajo consumo, que se implementa en una empresa o en zonas públicas cerradas, sin embargo, cumpliendo ciertas condiciones de impermeabilidad y protección contra agentes ambientales externos, las *picoceldas* incluso pueden ser desplegadas en exteriores, al aire libre. Para un uso en interiores, se requiere ser cuidadoso al elegir la ubicación y el número de *picoceldas* a instalarse, por el tema de las interferencias, aunque las características de auto-optimización de las nuevas *picoceldas*, tomadas de la tecnología de las *femtoceldas*, reducen al mínimo la necesidad de tener un conocimiento especializado para tal fin. [33]

- **Microceldas**

Una *microcelda* comúnmente puede ser descrita como una estación base de mediano alcance para instalarse en exteriores, destinada a mejorar la cobertura para los usuarios a nivel interno y externo, donde la cobertura de las *macroceldas* es insuficiente. En ocasiones, también pueden ser instaladas en interiores para proporcionar calidad de servicio, cobertura y capacidad en zonas, que por su área, superan del alcance de una *picocelda*. En zonas urbanas pueden llegar a cubrir hasta 500 metros cuadrados. [33]

- **Metroceldas**

El término reciente *Metrocelda*, se utiliza para describir la tecnología de *Small Cells*, diseñada para la implementación en áreas metropolitanas de alta capacidad. Estos dispositivos se instalan normalmente en las paredes de edificios o estructuras

urbanas, por ejemplo, en farolas o postes. Esta categoría puede abarcar categorías como *femtoceldas*, *picoceldas* y *microceldas* que reúnan estos criterios de implementación. [33]

**Tabla 3.1**  
Categorías de *Small Cells* [28]

Categoría	Metroceldas			Macroceldas
	Femtoceldas	Picoceldas	Microceldas	
Potencia de transmisión	1mW - 250mW	250mW - 1W	1-10W	10-50W
Radio de Cobertura	10 - 100 metros	100 - 200 metros	0.2 - 2 Km	8 - 30 Km
Número de Usuarios	1-30	30 - 100	100 - 2000	más de 2000
Backhaul	DSL, Cable, Fibra	Microondas, Fibra	Microondas, Fibra	Microondas, Fibra
Ubicación	Interiores	Interiores /Exteriores	Interiores /Exteriores	Exteriores
MIMO	2x2	2x2	4x4	4x4
Soporte (DAS) Sistema de Antenas Distribuidas	NO	SI	SI	SI

Ahora bien, para el despliegue de *Small Cells*, se requiere de una inversión de capital significativamente menor que para el despliegue de *macroceldas*, ya que su operación, mantenimiento e instalación, es menos costosa. Además, las *Small Cells* que son objeto de este estudio, incorporan características LTE, para ofrecer mayor capacidad de inteligencia operacional y gestión del tráfico, que otras alternativas, tales como Wi-Fi o DAS. Por tal razón, los principales operadores a nivel mundial, se encuentran planificando la integración de HetNets con *Small Cells* en sus redes móviles, como una solución a corto plazo más factible, para la creciente demanda de usuarios.

En tal virtud, la incorporación de *Small Cells*, drenará el tráfico de datos de los clientes de la red de *macroceldas*, haciendo uso de Internet, o a través de una estación base dedicada para *microceldas*, que actúa como *Backhaul* hacia el *Core* o núcleo de la red, como se aprecia en la Figura 3.10.



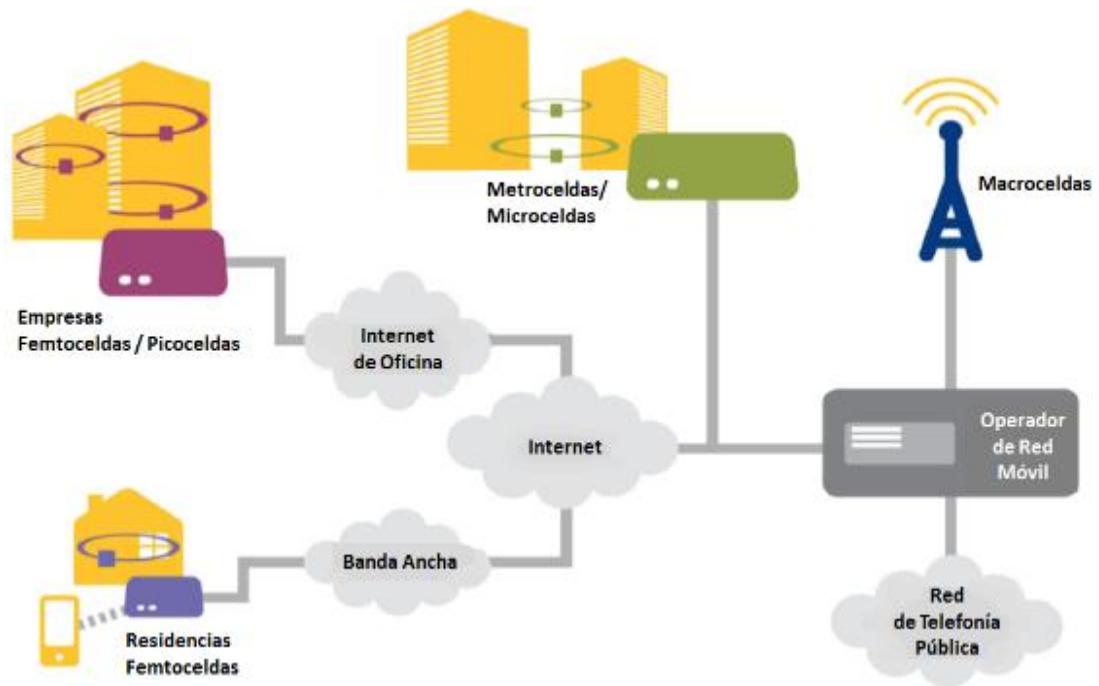


Figura 3.10 Varios tipos de *Small Cells* como parte integral de una red móvil moderna [33]

Esta evolución de tecnologías, ha dado lugar a una funcionalidad similar entre *femtoceldas*, *picoceldas* y *metrocelas*, cuyas tecnologías han convergido para crear un concepto conjunto, que actualmente es abarcado por las *Small Cells*. Aunque cabe recalcar la importancia de las *Femtoceldas*, por encima del despliegue de otras *Small Cells*. En la Figura 3.11 se muestra el resultado de los estudios realizados por *Telecoms & Media*, donde, se proyecta que existan 90 millones de *Small Cells* como puntos de acceso a la red móvil, a nivel global para el año 2016 [12].

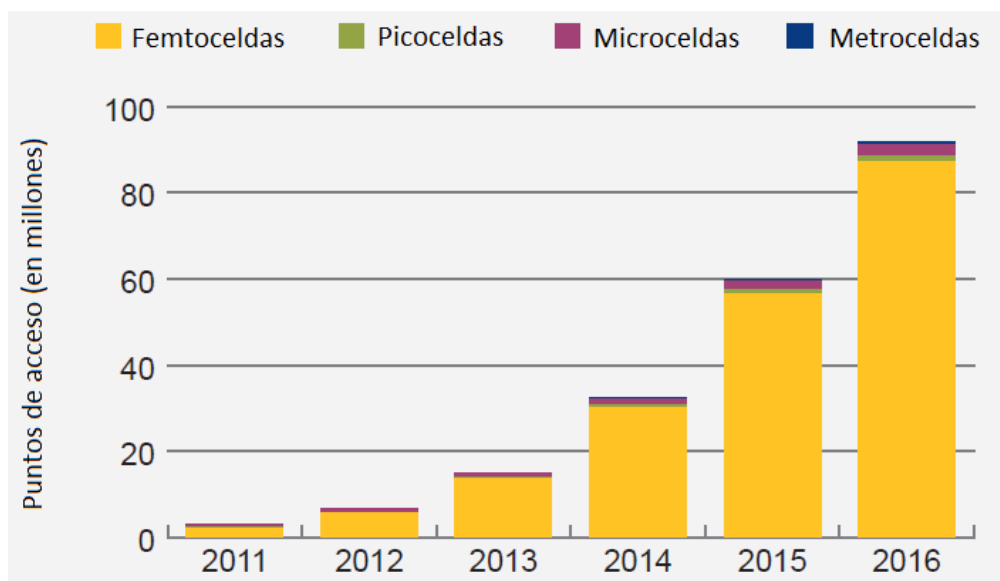


Figura 3.11 Tendencia del crecimiento de *Small Cells* por categoría [12]

### 3.4 CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DE LAS SMALL CELLS

Las *Small Cells* proporcionan una solución de bajo costo para un operador de comunicaciones móviles inalámbricas, permitiendo proveer servicios que requieren altas tasas de transmisión de datos, en aquellos lugares donde la señal de las *macroceldas* se muestra atenuada o de baja calidad.

Estas además, proveen de una cobertura celular mejorada, aumentando la capacidad para aplicaciones de hogar y corporativas, tanto en espacios públicos metropolitanos, como rurales, aunque en este último no está su mayor campo de aplicación, sino en las áreas de alto tráfico, como pueden ser zonas comerciales, estadios, estaciones de autobús, aeropuertos, zonas de ocio, etc.

Una alternativa innovadora y distinta a la implementación de *macroceldas* para incrementar capacidad, consiste en la instalación de *Small Cells*, que provean la capacidad adicional necesaria en un emplazamiento determinado, sin requerir de una gran concesión de permisos y gastos para infraestructura civil, existiendo varias soluciones técnicas para aquello.

De la misma manera, en comparación con las *macroceldas*, el despliegue de *Small Cells* puede ser mucho más flexible y próximo a los puntos de acceso de los usuarios, facilitando la atención a altas demandas de tráfico en los denominados *Hotspots*.

Las *Small Cells* fueron originalmente pensadas para mejorar la calidad de la señal en viviendas, sin embargo, hoy por hoy, representan una manera eficiente en cuanto a la relación costo-beneficio, para alivianar el tráfico de datos de la red macro. Para inicios del 2011, se estima que 2.3 millones de *femtoceldas* fueron desplegadas a nivel global, y se espera que los puntos de acceso globales entre todas las tecnologías de celdas complementarias, incluyendo las *femtoceldas*, lleguen a 60 millones para el 2015 [32].

El hecho de que la tecnología LTE utilice esquemas de modulación adaptativos, significa que cuanto mejor sea la *calidad* de la señal, mayor será la velocidad de

transmisión de datos. Por lo tanto, una estación base que actúa como servidora, presenta la máxima eficiencia cuando todos los usuarios que pertenecen a la celda, se encuentran cercanos a ésta, lo cual resulta lógico en términos de propagación y desvanecimiento de la señal, y que a su vez se manifiesta en un menor consumo de la batería los móviles.

Se debe tomar en cuenta, que los recursos de una celda son compartidos entre todos los usuarios que están dentro de la misma, lo que significa que la calidad de servicio QoS, (*Quality of Service*) que se traduce en la percepción del usuario, mejora notablemente cuando el número de usuarios conectados a la celda es menor.

La implementación de *Small Cells*, también puede ser una solución que permite a los operadores desplegar los dispositivos móviles basados en IP, utilizando la existente infraestructura IP, mientras que proporciona una evolución paulatina hacia a IMS (*IP Multimedia Subsystem*).

Con el fin de reducir el número de zonas que tengan su capacidad al límite, o mala o baja cobertura, los operadores móviles pueden desplegar un gran número de *Small Cells*, típicamente entre 200 y 300 por cada *macrocela*, esto en LTE dependerá del uso eficiente que se le pueda dar al espectro radioeléctrico para evitar las interferencias, convirtiéndose en una posible solución, tanto para exteriores: zonas rurales, espacios públicos o urbanos, así como para interiores de estructuras.

El objetivo de los operadores de aumentar la capacidad de banda ancha móvil y conseguir más cobertura se puede lograr de manera eficiente, si conjuntamente se ponen en marcha varios procedimientos, como la implementación de *Small Cells*, la *densificación* de *macrocelas*, la contratación de espectro adicional LTE y el denominado Wi-Fi *offload* que consiste en el drenaje de tráfico hacia una red Wi-Fi, éste último puede ser objeto de futuros trabajos de investigación.

A su vez, el objetivo de mejorar las condiciones de radio y por ende la calidad del servicio en un área determinada mediante la implementación de *Small Cells*, se debe complementar con la optimización, haciendo uso de un *Backhaul* eficiente para el transporte del tráfico captado por las *Small Cells* hacia los elementos de frontera de

la red *Core EPC*, lo cual se puede realizar a través de enlaces microondas (IP *Microwave*) o de fibra óptica (FTTx). Éste último, también puede ser un tema de futura investigación.

### 3.4.1 Auto-organización de *Small Cells* en la red LTE

La implantación de *HetNets* aumentará el número y la diversidad de celdas en la red, con el consiguiente incremento de parámetros interdependientes de cada celda y la interoperabilidad entre todos los elementos de la red. Se ofrece un gran paso hacia la solución de estos problemas, aprovechando la gran capacidad de procesamiento que actualmente es posible gracias a la evolución de los sistemas electrónicos, por medio de la implementación de la tecnología de auto-organización de redes (*SON*), principalmente en la industria de las *Small Cells*. Esto promete reducir radicalmente la necesidad de reconfiguración de bajo nivel, en lugar de ello, la red supervisará continuamente su propio desempeño, el tipo de tráfico y la fuente, adaptándose automáticamente para lograr un rendimiento óptimo.

La industria de *Small Cells*, ha desarrollado una extensa experiencia y capacidad en el manejo de *SON*. De hecho, las *Small Cells* han sido el primer y más grande ejemplo comercial de *SON*, ayudando a desarrollar y comprobar sus características en la red de una manera más amplia. Con el fin de lograr bajos costos de operación, ha sido clave el hecho de que exista la facultad de que un gran número de consumidores auto-instalen su equipo. Esta característica es igualmente aplicable a los más amplios despliegues de *Small Cells*, dentro de las zonas que se detallarán en la sección 3.5.

En el proceso de auto-organización de las *femtoceldas*, una alternativa al mecanismo de decisión cooperativa, basado en la información que se intercambia a través de la interfaz X2; consiste en la centralización de la toma de decisiones en una nueva entidad, el *Coordinador de Espectro* (CE), asociada con el HeNB-GW de la manera mostrada en la Figura 3.12. Aquí, la misión del CE es notificar a cada *Small Cell*, los recursos que puede utilizar de forma oportunista en la banda cognitiva<sup>24</sup>,

---

<sup>24</sup> Banda de la comunicación inalámbrica en el cual tanto las redes como los mismos nodos inalámbricos cambian los parámetros particulares de transmisión o de recepción para ejecutar su cometido de forma eficiente, sin interferir con los usuarios registrados.

conforme a la actividad de las *Small Cells* circundantes. La introducción de este nuevo elemento central presenta dos nuevos retos: el mecanismo para detectar todas las vecinas alrededor de una *Small Cell* y la forma en que se reparten los recursos, de forma que no se produzcan interferencias graves entre las mismas [38].

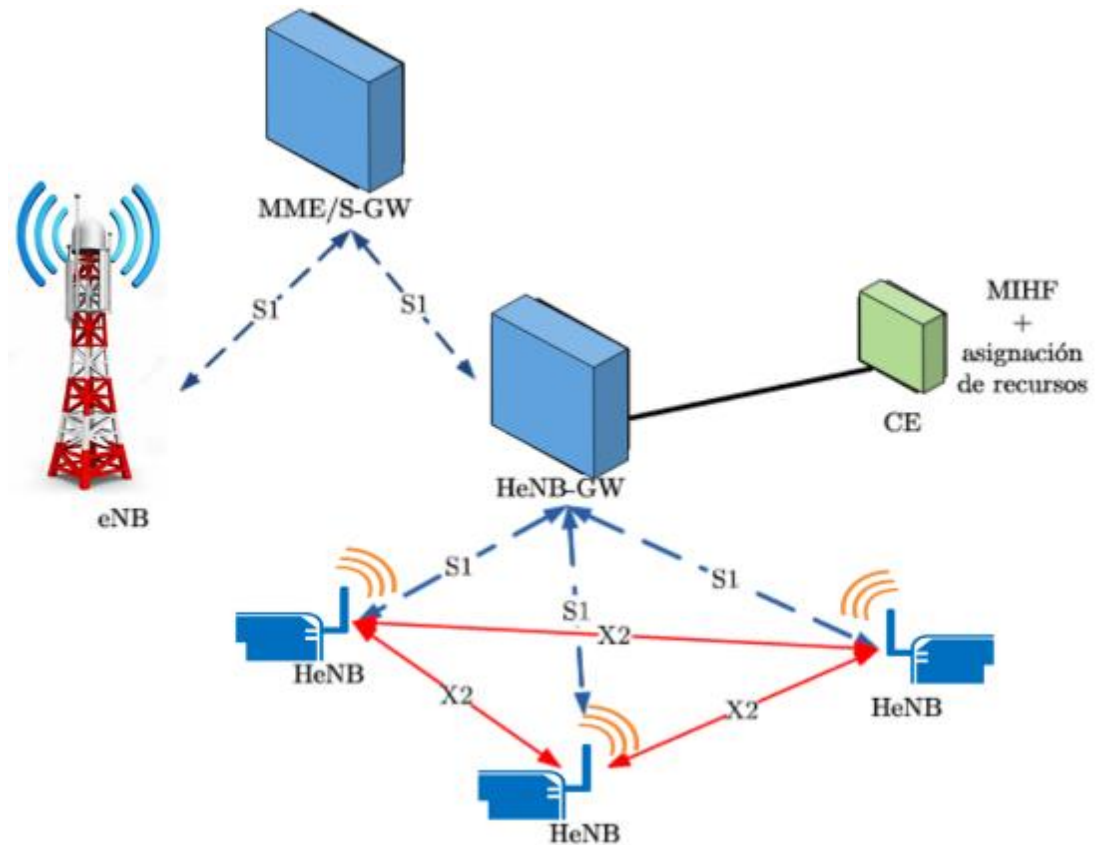


Figura 3.12 Arquitectura de un sistema LTE-Advanced con Coordinador de Espectro [38]

Mientras la gestión del espectro cognitivo está en marcha, el CE elabora una lista dinámica que contiene todas las *Small Cells* activas y sus correspondientes vecinas que son potencialmente interferentes. Para poder desempeñar esta función, el CE requiere que las *Small Cells* reporten medidas en la banda cognitiva utilizando una señalización específica. Dado que el estándar LTE-Advanced no contempla esta posibilidad, en [38] se propone la utilización de un tipo de señalización: *Media Independent Handover* (MIH), el cual hará uso de la funcionalidad *Media Independent Event Services* (MIES), que consiste básicamente en la notificación de eventos de la capa física [39]. El CE implementa una entidad denominada *Media Independent Handover Function* (MIHF), que es la encargada de realizar la asignación de recursos, que evite las interferencias entre *Small Cells*, en medida de lo posible [38].

Por otro lado, a medida que el número de *Small Cells* y celdas en general, aumenta en una red móvil, se generan más fronteras o bordes de celdas, lo que conlleva a una mayor posibilidad de interferencia. Por lo tanto, se requiere una selección mejor automatizada de frecuencias, con niveles de potencia cuidadosamente establecidos para equilibrar la interferencia y la cobertura.

La característica *SON* implementada también en redes con *Small Cells*, permite que exista coordinación entre todas las celdas (*macrocelas* y *Small Cells*), para armonizar los parámetros y maximizar el rendimiento de toda la red [33].

Desde luego, esto no quiere decir que ya no se requerirá del servicio de los ingenieros planificadores de red. La experiencia de ellos continúa siendo necesaria para determinar cuándo y dónde instalar o desplazar un equipo, y cómo gestionar los indicadores de alto nivel de la red en cuanto a calidad.

#### **3.4.2 Técnicas para el control de la Interferencia en *Small Cells***

A pesar de que el concepto del control de interferencias, ya se introdujo en la sección anterior, a continuación se analizará otras técnicas para el control de la interferencia en un escenario *HetNet*, donde se torna beneficioso drenar el tráfico de datos, migrando a los usuarios a celdas más pequeñas (*Small Cells*). Aquí generalmente existen menos usuarios conectados que compiten por la asignación de recursos. Esta migración produce problemas en el SINR para ciertos usuarios [1].

Las *Small Cells* de acceso restringido, tienen el potencial de generar aún más problemas de interferencia a los usuarios pertenecientes a la red de *macrocelas* externas, que se encuentran divagando en el área de cobertura de una *Small Cell*, sin ser un miembro del *grupo cerrado de suscriptores* (CSG) respectivo. Esto hace que el usuario sea incapaz de conectarse a la *Small Cell* donde tendría acceso a una señal con alto SINR; en su lugar, se perjudica su calidad de servicio, al verse forzado a usar la red de *macrocelas* donde se tiene una SINR muy baja, como se ilustra en la Figura 3.13.

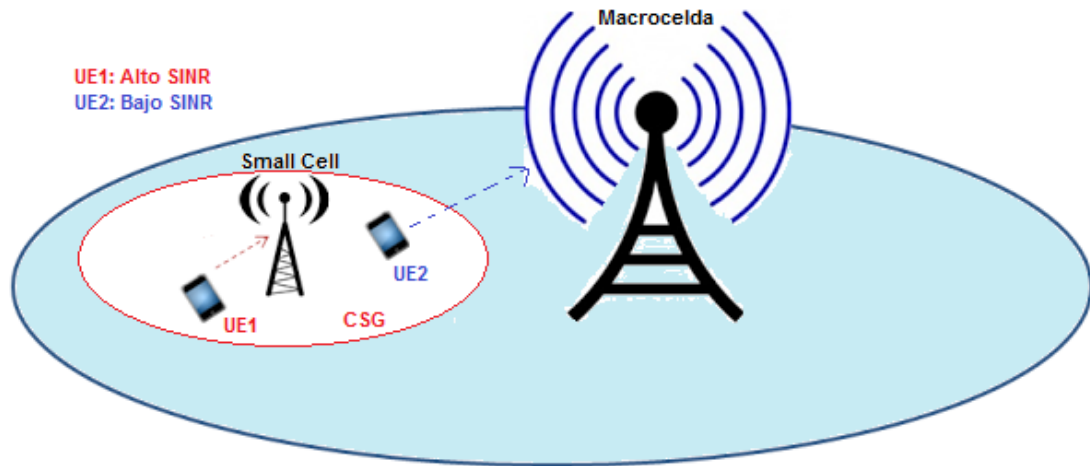


Figura 3.13 Afectación del SINR por no pertenecer al CSG

En la sección 3.1.2 se analizó la técnica utilizada en sistemas LTE para el control de la interferencia (ICIC), la cual también se aplica en entornos que contienen *Small Cells*. Sin embargo, se debe reconocer las dificultades que aún persisten debido al elevado efecto adverso de las interferencias en sistemas LTE, lo cual ha motivado a los grupos de asociaciones de telecomunicaciones como 3GPP y *Femto-Forum*, a seguir realizando trabajos de investigación para el control de la interferencia en redes heterogéneas LTE.

Por lo general, los niveles de señal de la red móvil, se reducen de manera drástica al interior de infraestructuras civiles, debido a las pérdidas de penetración provocadas por el espesor y/o material de la misma estructura. Sin embargo, es posible aprovechar esta situación de aislamiento, en el despliegue de *Small Cells*, si el desvanecimiento de la señal de las *macroceldas* exteriores es complementado con la configuración de potencias de transmisión reducidas en las *Small Cells*, cuyos valores pueden estar entre 10 y 20 dBm. De esta manera, no se requiere la operación en otras bandas de frecuencias, y se logra reutilizar los recursos espectrales asignados a las *macroceldas*, para el consecuente incremento de la capacidad y control de la interferencia.

No obstante, si el aislamiento a nivel *indoor* no existe, y a nivel *outdoor* se presenta sobre-propagación de la señal proveniente de las *macroceldas*, entonces el problema de la coordinación de interferencias entre *macroceldas* y *Small Cells* se torna complejo, razón por la cual, en la actualidad este es un tema de exhaustiva investigación, uno de los cuales se lleva a cabo en [34], donde las soluciones

propuestas se basan en el pre-procesamiento de las medidas de cada celda y el intercambio de información entre elementos de la red, para ajustar los parámetros de transmisión, con el objetivo de minimizar o evitar las interferencias.

El éxito de los despliegues de *Small Cells* LTE radica en la baja complejidad y, por tanto en el bajo precio del equipamiento necesario, por lo que deben diseñarse soluciones simples que permitan el desarrollo práctico del *acceso oportuno al espectro* en estos entornos, estudio que se lleva a cabo en [35] donde se propone que las *Small Cells* podrían buscar otras bandas de frecuencia pertenecientes a otras tecnologías que estén desocupadas, por ejemplo *espacios en blanco* de la banda utilizada para televisión.

Además, las técnicas de *Coordinación de Interferencia entre Celdas* (ICIC) han sido objeto de estudio de la 3GPP para las estandarizaciones en LTE-Advanced, desarrollándose la técnica EICIC, que se analiza a continuación.

### 3.4.3 Coordinación Mejorada de la Interferencia Inter-celda EICIC

Los problemas de interferencia se pueden reducir utilizando una técnica conocida como *coordinación de interferencia en el dominio del tiempo* o *coordinación mejorada de la interferencia inter-celda* (EICIC). Cuando se utiliza esta técnica, la celda interferente configura ciertas sub-tramas como *sub-tramas casi blancas* (ABSs), a fin de reducir los niveles de interferencia en la celda interferida [1].

Los ABSs incluyen sólo los canales de control y las señales de referencia de la celda específica, no contienen datos de usuario, y se transmiten con potencia reducida. Cuando se utiliza eICIC, la *macrocela* transmitirá ABSs de acuerdo con un patrón semi-estático. Durante estas sub-tramas, los móviles del borde de la celda, por lo general en la región de expansión de la *Small Cell* (CRE), pueden recibir información *Downlink*, tanto datos de control como datos de usuario. La *macrocela* informará a la *Small Cell* acerca del patrón ABS [35].

El uso de ABSs, reduce el número de sub-tramas que están disponibles para la celda interferente, por lo que se reduce su eficiencia espectral promedio. Esto sin



embargo, a su vez permite que, tanto la celda interferente como la interferida, compartan la misma banda de frecuencia, aumentándose el ancho de banda disponible para cada una. En una red adecuada, el segundo efecto tiene un mayor impacto que el primero, por lo que el resultado es el aumento de la capacidad de la red [35].

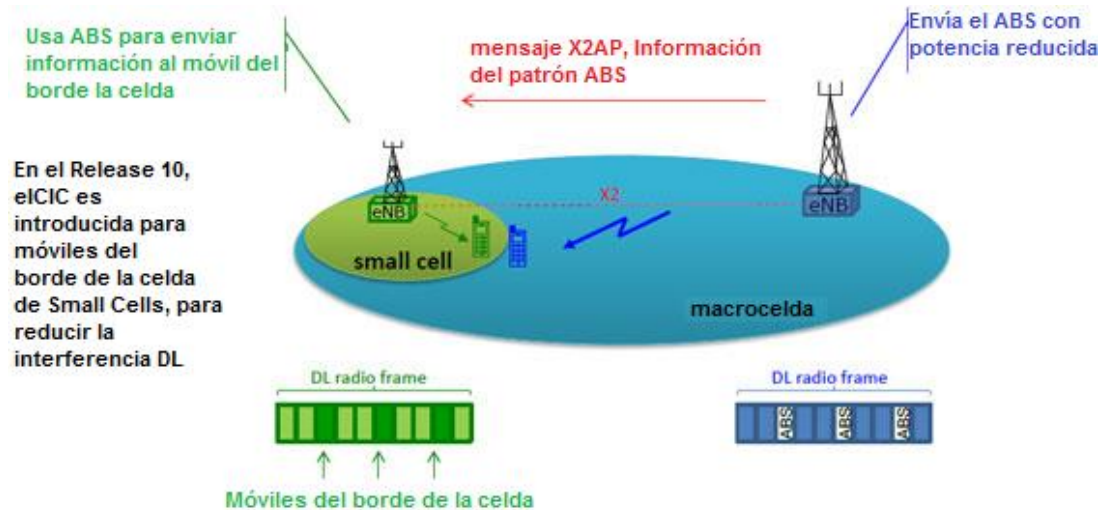


Figura 3.14 EICIC Coordinación Mejorada de Interferencia Inter-Celda [35]

Ahora bien, con el uso de ABSs, existe el riesgo de causar un problema adicional: la interferencia en la celda víctima, que puede fluctuar desde una sub-trama a la siguiente y puede interrumpir las mediciones de los móviles. No obstante, la red puede resolver este problema mediante el uso de *patrones de restricción de medición*. Estos patrones limitan las mediciones de un móvil de una celda interferida, y dejan que el móvil haga un conjunto coherente de medidas acerca de la *re-selección*, el *Handover*, y estatus del canal. [1]

#### 3.4.4 Coordinación de Interferencias mediante señalización

Las especificaciones de LTE destacan la importancia de la señalización para el control de interferencias entre *Small Cells*. Consecuentemente, en el estándar se ha incluido el intercambio directo de mensajes de señalización entre *Small Cells* a través de la interfaz X2. Aunque el flujo de información y los mecanismos concretos de reducción de interferencias no se especifican, esta comunicación directa requiere conocer la lista de celdas vecinas con anterioridad, lo cual no representa un problema ya que generalmente las *Small Cells* están conectadas a través de la interfaz S1 al *Home*

*Evolved Node B Gateway* (HeNB-GW), el cual puede proporcionarles una lista de *Small Cells* vecinas [36].

Una vez conectadas, las *Small Cells* pueden auto-coordinarse de forma autónoma utilizando el procedimiento *load indication X2-AP*. Este procedimiento permite a las *Small Cells* informar a sus *Small Cells* vecinas acerca de sus condiciones de carga e interferencia.

En cuanto al estatus de interferencias en *Downlink*, las *Small Cells* pueden intercambiar un mapa de bits conocido como indicador RNTP *Relative Narrowband Transmit Power*, para informar a sus vecinos sobre sus intenciones de transmitir en un determinado *Resource Block* por encima de un umbral o no, un bit por *Resource Block*, siendo el nivel umbral y el periodo de envío completamente configurables.

En relación al *Uplink*, se pueden intercambiar dos mensajes: el *Interference Overload Indication* (IOI), que indica el nivel de interferencia monitoreado por la *Small Cell* en todos los *Resource Blocks*, y el *High Interference Indication* (HII), el cual sirve para informar sobre próximas transmisiones en *Uplink*. El uso de estos mensajes permite a las *Small Cells* decidir cuál es la mejor asignación de recursos para los usuarios a los que están brindando el servicio, de acuerdo a los niveles de interferencia introducidos por sus celdas vecinas [37].

### 3.4.5 Formas de acceso a las *Small Cells*

La organización internacional *Small Cell Forum*, determina tres tipos de acceso a la red de *Small Cells*, siendo *Acceso Cerrado*, *Acceso Abierto* y *Acceso Híbrido* [33].

Las *Small Cells* residenciales comúnmente se han diseñado con un modelo de *acceso cerrado*, lo cual restringe su uso para el propietario y para una serie de números móviles nominados en una *lista blanca*. Esto evita posibles abusos por los usuarios invitados o desconocidos que se encuentren en zonas cercanas, y que sin saberlo pueden utilizar la capacidad total de la *Small Cell*, otorgando a su propietario una conectividad limitada o nula.

Sin duda, una alternativa más sofisticada constituye el *acceso híbrido*, el cual aunque requiere mayores recursos para el procesamiento, otorga prioridad de acceso a los móviles de la *lista blanca*, permitiendo aún, el acceso abierto a cualquier móvil para que utilice la capacidad restante [33].

Una de las razones para utilizar el tipo de *acceso cerrado* en escenarios Residenciales y Empresariales, está relacionada con la cantidad de ancho de banda consumida, la cual provee generalmente el servicio de internet local. Restringir el acceso evita la preocupación de que el propietario de la *Small Cell* tenga que pagar por capacidad adicional del servicio internet que no le corresponde, ya que podría estar siendo utilizada por otro usuario.

De igual manera existe una opción más sofisticada para solventar este posible inconveniente, que se torna factible cuando el servicio de internet y de telefonía móvil son provistos por el mismo operador, el cual tiene la facultad de brindar un servicio diferenciado, teniendo cero costo para la banda ancha utilizada por el tráfico que genera la *Small Cell*, por lo que no se incurre en gastos adicionales de utilización [33].

Un efecto secundario indeseable del *acceso cerrado*, es que crea algunas situaciones que pueden afectar al servicio de los usuarios que no pertenecen al CSG. El *Small Cell Forum* ha realizado varios estudios de escenarios de interferencia, poco frecuentes, donde existe una degradación de la calidad del servicio para los usuarios que constan en la *lista blanca* de la *Small Cell* [33].

Ahora bien, lo más común en escenarios empresariales y públicos de despliegue de *Small Cells*, es el *acceso abierto* el mismo que permite utilizar el servicio a cualquier móvil suscrito a la red. Este tipo de despliegues, debe estar correctamente gestionado por el operador de la red o por la empresa propietaria, pues el objetivo es eliminar la preocupación que recae sobre el operador, acerca del costo o la calidad de la banda ancha del *Backhaul*, al otorgar servicio a todos los usuarios que se encuentren en el área de cobertura de la *Small Cell*, ya sean de prepago, post-pago y/o usuarios con *Roaming* [33].

### 3.5 CAMPOS DE APLICACIÓN DE LAS SMALL CELLS

La tecnología de *Small Cells*, será clave para la expansión de la cobertura de la red móvil y de los servicios 4G LTE, hacia una amplia gama de nuevas aplicaciones y emplazamientos, donde anteriormente, brindar servicio había sido un reto, o al utilizar sólo *macroceldas*, existía la limitación de costos.

Ahora bien, dado que las *Small Cells* tienen ventajas de costos y características de funcionamiento significativamente más flexibles que las *macroceldas*, éstas tienen una gama mucho más amplia de aplicación, en comparación con las *macroceldas*, las cuales tienen un número limitado de zonas de aplicación. Por otro lado, se debe considerar la gran inversión de capital que debe hacer un operador para el despliegue de *macroceldas*, en cuanto a equipamiento electrónico, infraestructura de torres, aumento de la capacidad del *Backhaul*, requerimientos de potencia, refrigeración, cerramientos, seguridad del lugar, etc., lo que a menudo impide su uso para situaciones específicas, como la cobertura en túneles o en el interior de edificios.

Por otro lado, las *Small Cells* son altamente rentables y adaptables para abordar zonas de específica afectación dentro de una red de *macroceldas*, ya que se pueden instalar prácticamente en cualquier lugar geográfico, y de esta manera estar aún más cercanas a los lugares de alta demanda, como zonas residenciales, empresariales, espacios públicos, zonas metropolitanas y/o rurales.



Figura 3.15 Campos de aplicación de las *Small Cells* [33]

### 3.5.1 Residencial

El Residencial, es el campo de aplicación principal de una femtocelda, la cual tiene características de autonomía y auto-configuración, siendo una estación base compacta de baja potencia, integrada al *Core* a través de una conexión a Internet de banda ancha, por lo general provista por el propio usuario. Estas *femtoceldas* suelen soportar simultáneamente, de cuatro a ocho usuarios activos.

Al estar dirigido a aplicaciones de alto consumo de datos, la efectividad es un factor importante. Esto se ha logrado a través de altos niveles de integración en la arquitectura interna del dispositivo, el cual está conformado por varios elementos SoC (System-on-a-Chip), que congregan todo un sistema dentro de un circuito integrado, otras mejoras se han logrado a través de un *software* inteligente, que automatiza muchos de los procesos externos de planificación y configuración, normalmente requeridos en estaciones base más grandes.

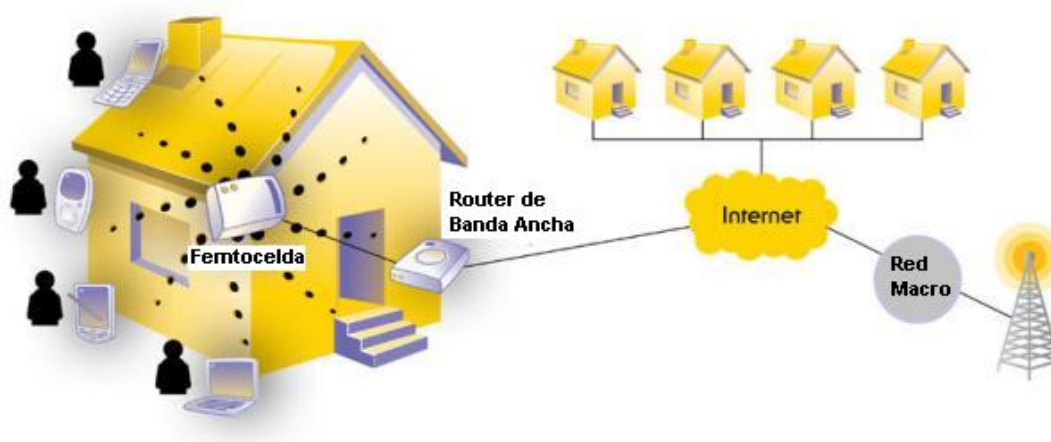


Figura 3.16 *Small Cells* Campo de aplicación residencial [40]

### 3.5.2 Empresarial

Las *Small Cells* pueden ser ubicadas al interior de edificios para entornos residenciales o empresariales. Físicamente son unidades más grandes que una femtocelda, irradian con una mayor potencia RF, por lo que poseen un mayor alcance y por ende mayor capacidad de tráfico, comúnmente cada dispositivo soporta de 8 a 32 usuarios simultáneos, aunque se puede lograr una mayor capacidad de usuarios

instalando múltiples *Small Cells*. Por ejemplo, se podría instalar múltiples unidades en un solo edificio, bajo apropiadas directrices de implementación. La red *Backhaul* puede estar compartida, ya sea con una conectividad a internet existente, y/o con una conexión dedicada, tal como se muestra en la Figura 3.17.

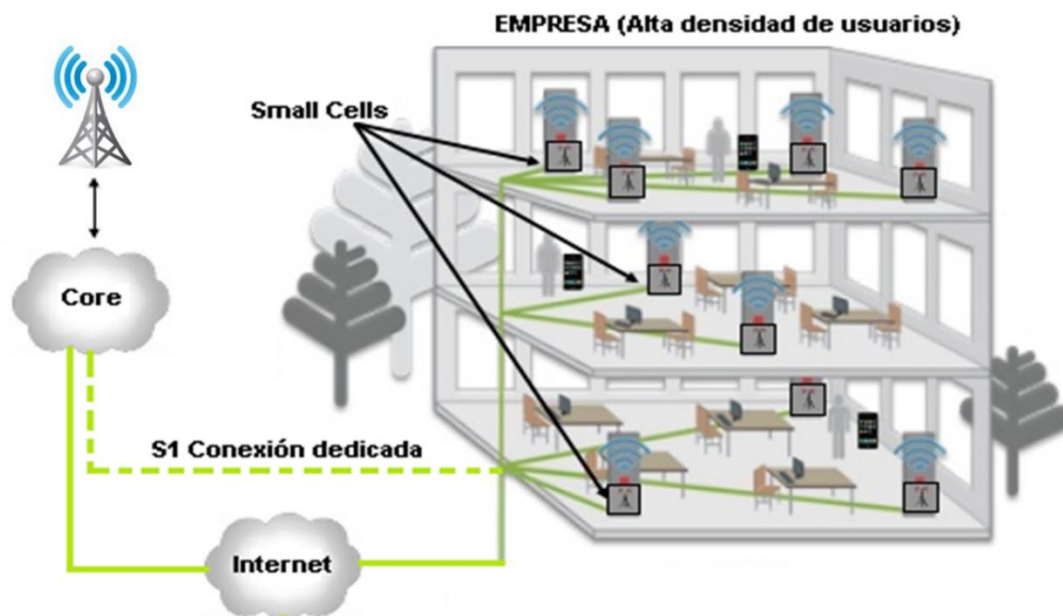


Figura 3.17 *Small Cells* Campo de aplicación Empresarial

### 3.5.3 Espacios públicos y Zonas Metropolitanas

La implementación de *Small Cells* en espacios públicos y zonas metropolitanas de alto tráfico, también es esencial, sobre todo si se ha detectado que existe un *Hueco de Cobertura*. Aquí se utiliza modelos urbanos diseñados con recubrimientos robustos, adecuados para el despliegue en áreas sin supervisión. Aunque soportan una mayor capacidad de tráfico de entre 16 y 64 usuarios simultáneos, éstas pueden no requerir una potencia de radiación significativamente alta, debido a que su objetivo de cobertura es relativamente reducido, por ejemplo para lugares públicos; centros de trasporte como aeropuertos y terminales, lugares de entretenimiento; escenarios deportivos, estadios, teatros y centros comerciales.

Ahora bien, gracias a estos requisitos de baja potencia y reducida cobertura, las *Small Cells* pueden ser rápidamente desplegadas en la cima de un edificio o en sus paredes laterales, principalmente si se desea penetrar en *túneles urbanos*, también se

pueden montar en la parte superior de postes, semáforos y otros elementos auto-soportados de un paisaje urbano que puedan proveer de energía y enlace *Backhaul*.

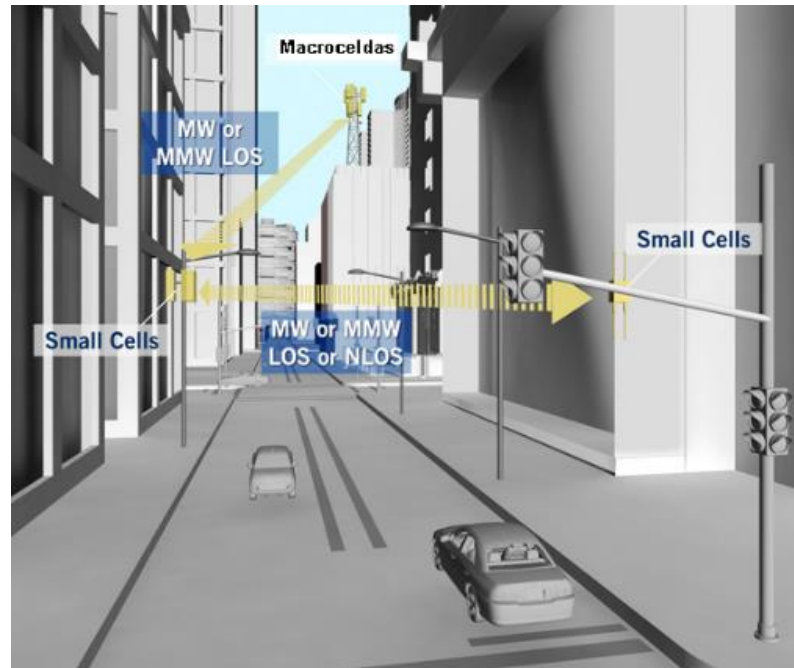


Figura 3.18 *Small Cells* Campo de Aplicación en Zonas Metropolitanas [61]

Estrategias similares se pueden utilizar para extender la cobertura celular en el interior de localidades congestionadas, como centros comerciales, estadios, e incluso grandes edificios de oficinas.

### 3.5.4 Zonas Rurales

Los modelos rurales de despliegue de *Small Cells*, están diseñados para satisfacer la necesidad de servir a *Hotspots* localizados en áreas remotas, como aldeas y pequeños pueblos, que de otro modo, serían servidos por la señal atenuada y de baja calidad proveniente de una *macrocela* distante.

En lugar de utilizar un repetidor, una *Small Cell* añade capacidad a la red y libera uno de los recursos más caros para brindar servicio, que constituye la infraestructura de la *macrocela*. También es posible implementar en lugares donde no existe siquiera cobertura de *macrocelas*, como en el ejemplo de la Figura 3.19, donde se aprecia una *Small Cell*, montada sobre un mono-polo, energizada con paneles solares, y que dispone de un enlace *Backhaul* satelital.



**Figura 3.19 *Small Cells* Campo de Aplicación en Zonas Rurales [42]**

Debido a los costos que puede generar este tipo de implementaciones, en las zonas rurales, el desafío para el operador, consiste en obtener rentabilidad de esto, es decir brindar cobertura con una eficiente relación costo-beneficio, para los servicios móviles de banda ancha, y a la vez mantener una buena experiencia del usuario final.

Por tal razón, se recomienda como última alternativa considerar la implementación de *Small Cells* en áreas rurales, ya que primero se debe agotar todas las posibles opciones de optimizar el área, haciendo uso de la red de *macrocelas*.

### **3.6 INTEGRACIÓN DE LAS SMALL CELLS A LA RED LTE**

La comunicación entre una *Small Cell* y el núcleo de la red *Core*, se la puede realizar mediante un *Small Cell Gateway*, o prescindiendo de él. Para ambos casos, este enlace está asegurado por una función obligatoria llamada Security Gateway (SEGW), que es una entidad lógica que puede ser implementada, ya sea como un elemento físico independiente, o co-ubicada con una entidad de red arquitectónica existente [40].

En una red inalámbrica LTE, la integración de las *Small Cells* al *Core* se la realiza también haciendo uso de la arquitectura de un eNodeB, o de manera independiente a través de un *Small Cell Gateway* [4].



### 3.6.1 Integración con la arquitectura de un eNB

Como se aprecia en la parte superior de la Figura 3.20, basándose en la arquitectura de un eNB, las *Small Cells* pueden ser integradas de la misma manera que una *macrocela*. En esta implementación las *Small Cells* usan la interfaz S1 para establecer comunicación bidireccional con el núcleo de la red *Core*, mientras que por medio de la interfaz X2 se logran comunicar con otras celdas, ya sea *macrocelas* o *Small Cells*.

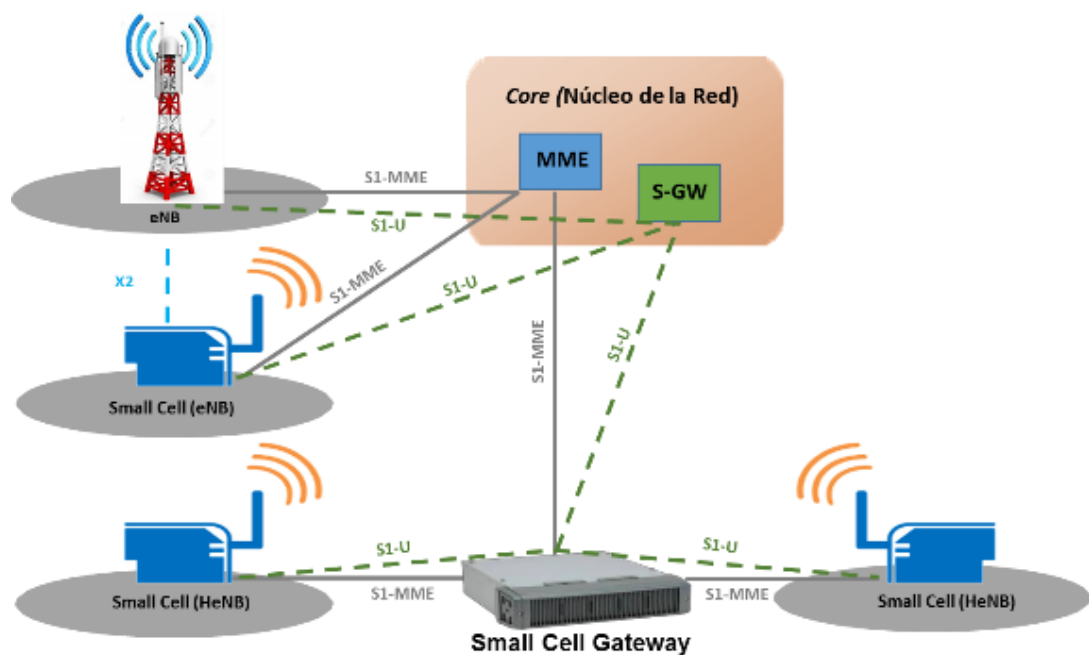


Figura 3.20 Formas de Integración de una *Small Cell* a la red LTE

### 3.6.2 Integración independiente a través de un *Small Cell Gateway*

Dejando de lado la arquitectura de red de las *macrocelas*, las *Small Cells* también pueden ser integradas al *Core* basándose en la arquitectura de un HeNB *Home eNode B*, la cual es común en *femtoceldas* desplegadas por un usuario, donde se incorpora un elemento a la red llamado *Small Cell Gateway*, que como su nombre lo indica es la puerta de enlace entre la *Small Cell* y el núcleo de la red *Core*, y que concentra la señalización y el tráfico entrante desde una o varias *Small Cells* sobre una sola interfaz S1, hacia el *Core*. Como se observa en la parte inferior de la Figura 3.20, en esta implementación la interfaz X2 no se utiliza en absoluto.

### 3.6.3 Escenarios de Despliegue

Se menciona dos tipos de escenarios de despliegue de *Small Cells* LTE; con infraestructura W-CDMA pre-existente y sin ella, sin embargo, para ambos escenarios, se deben considerar los siguientes casos [40]:

- a) *Despliegue para la cobertura controlada*: el operador define las zonas donde la cobertura debe ser mejorada, según la percepción de los usuarios en cuanto al servicio y conforme a las mediciones de la RAN (*Drive Test* por ejemplo), entonces, las *Small Cells* se instalan en estas zonas de cobertura limitada.
- b) *Despliegue libre para cobertura en residencias*, utilizado también como técnica de *offloading* para el operador, además del caso a), la oferta de despliegue de *Small Cells* por los propios usuarios está disponible, en cuyo caso, las estrategias de marketing han determinado que el cliente conoce de la necesidad de una *Small Cell*. Estos usuarios generalmente optan por comprar una *Small Cell*, ya sea para mejorar su cobertura o para aumentar el rendimiento dentro de su vivienda. Sin embargo, el operador puede lucrar de estas circunstancias y proveer al cliente de esta solución *Small Cell*, por un precio relativamente alto.
- c) *Despliegue por empuje para cobertura en residencias*, utilizado también como técnica de *offloading* para el operador. Sobre el escenario b), la oferta de *Small Cells* está fuertemente empujada hacia el cliente. El objetivo es tener una buena relación con los clientes *Premium*<sup>25</sup> que utilizan las *Small Cells*, por lo tanto el operador provee de esta solución con una oferta económica extraordinaria, o generalmente de manera gratuita.

### 3.6.4 Estrategias de Despliegue

Se presentan estrategias para el operador determinadas por *Femto Forum*, para ser seleccionadas, durante o después de un despliegue de *Small Cells* [40].

---

<sup>25</sup> Se refiere a usuarios con una elevada cifra de facturación desde el operador.

1. **Escoger el Proveedor de la tecnología.-** En base a los requisitos estándar o mandatorios, el operador tiene la facultad de seleccionar el proveedor de las *Small Cells*, independientemente de la marca que tenga su infraestructura de red. Por ejemplo, si el operador dispone de una red *Core Huawei*, podría utilizar *Small Cells Ericsson* y viceversa. Entre los principales proveedores de Macro/*Small Cells* LTE en el 2014, se puede mencionar a *Ericsson, Huawei, y Nokia* [41].
2. **Costo de la Arquitectura.-** Se debe tratar de minimizar el impacto en los costos de la arquitectura, mediante la reducción de infraestructura de red adicional, por ejemplo se podría considerar la implementación de *Small Cells* LTE, sobre una infraestructura de red existente, por ejemplo: W-CDMA o GSM.
3. **Infraestructura IP.-** Se debe tomar en cuenta que, al ser LTE una red basada sobre IP, cualquier restricción sobre la infraestructura IP representa un inconveniente, tales como direccionamiento y protocolos.
4. **Organización y Mantenimiento.-** Se debe tener la precaución de que exista capacidad para unir varios sistemas, organizaciones y equipos de mantenimiento.
5. **Evolución.-** Debe existir la capacidad de soportar características evolutivas que se proyecten para un futuro, con un impacto mínimo en la red existente.
6. **Interoperabilidad.-** Como en el punto 1, debe existir la capacidad de integrarse con equipamiento de diferentes proveedores, para una estrecha interacción que es requerida entre las diferentes capas de una red heterogénea. Es importante que se implementen interfaces abiertas y estándar, para permitir que productos de diferentes proveedores, puedan ser utilizados en varias partes de la red, de modo que, para cada tarea se pueda seleccionar los mejores productos y proveedores.
7. **Escalabilidad.-** Se debe considerar la capacidad para soportar cualquier tamaño de despliegue, ya sea a nivel de un clúster, una ciudad, o a nivel nacional por ejemplo.

### 3.6.5 Desafíos de Despliegue

Los costos de implementación varían significativamente con las diversas condiciones del lugar, el tamaño del despliegue y el tipo de celda. En el entorno de despliegue de las *Small Cells*, la determinación de la efectiva relación costo-beneficio se puede considerar crítica, ya que solventar los problemas de capacidad, cobertura y calidad dentro de una red, debe ir de la mano con la rentabilidad del despliegue. A continuación se mencionan varios desafíos que se presentan al momento de la implementación de *Small Cells*:

- **El acceso al sitio**

Este debe estar disponible en cada ubicación estratégica de las *Small Cells*, para que mediante un mínimo mantenimiento, se pueda garantizar el óptimo rendimiento del servicio que el operador requiere brindar a sus clientes. Debido al reducido tamaño geográfico de cobertura de la celda, y a las potencialmente extremas variables de localización, el emplazamiento preciso del sitio, es un parámetro crítico para la exitosa implementación de *Small Cells*.

Esto involucra la adquisición de derechos de instalación, en gran cantidad de lugares accesibles al público. La adquisición de estos derechos podría tornarse complicada, al tener que enfrentarse a discrepancias con los propietarios, como: organizaciones privadas, y/o agencias gubernamentales locales; en el momento del acceso a la infraestructura; además de la posible oposición pública para la instalación en algunos lugares sensibles, por ejemplo, por el potencial impacto de contaminación visual.

- **La Disponibilidad y Aprovisionamiento de la Red Backhaul**

El aprovisionamiento y la disponibilidad de la Red *Backhaul* para cada sitio, constituye un reto de coordinación compleja que requiere una planificación anticipada, ya que a toda costa se debe evitar la formación de *cuernos de botella*.

La disponibilidad de la infraestructura del *Backhaul* también puede representar un problema, dependiendo de los requerimientos individuales de ancho de banda; escalabilidad, latencia, fiabilidad y calidad de servicio para cada sitio, los cuales pueden variar conforme al propósito y al tipo de la *Small Cell* a implementar.

- **La Disponibilidad de una fuente de alimentación confiable 24/7**

El hecho de que exista una fuente de alimentación confiable que provea disponibilidad 24/7 (24 horas al día, 7 días a la semana) para cada emplazamiento de las *Small Cells*, puede pasar desde una preocupación trivial en la mayoría de los despliegues en interiores, hasta un desafío importante en entornos externos a nivel de calle, donde por defecto no existe la acometida para esta necesidad.

- **La Gestión de la Red**

Indudablemente, un reto constante para los operadores, será el despliegue de un gran número de *Small Cells*. Varios enfoques escalables a la instalación y el mantenimiento de las celdas, serán cruciales para que los despliegues de *Small Cells* a gran escala, sean rentables.

La instalación y mantenimiento de un potencialmente elevado número de sitios de *Small Cells*, por ejemplo, a nivel nacional, requiere de una planificación sólida para limitar el número de visitas de mantenimiento, y el trabajo que implica la puesta al aire de una nueva estación.

Por otro lado, los operadores tendrán el reto de contar con el personal técnico suficiente para la implementación, operación y mantenimiento de las *Small Cells*, por lo que se recomienda hacer énfasis en los procesos automatizados para su integración a la red, como el uso de las características de *Self-Organizing-Networks (SON)*.

### 3.7 DESVENTAJAS DE LAS SMALL CELLS

Una de las principales desventajas de las *Small Cells* es el tema de las interferencias que se puede producir por la cercanía entre las celdas vecinas. Sin embargo, se está trabajando arduamente en técnicas efectivas para controlarlas, como por ejemplo, emitir con menor potencia y/o, al tener la facultad de hacerlo en LTE, utilizar antenas inteligentes y esquemas de transmisión MIMO o *Beamforming*; otro método que paralelamente incrementa la calidad de la señal y reduce en un menor consumo de batería en el dispositivo móvil, es mediante la *coordinación* CoMP entre la capa de *macrocelas* y las *Small Cells*.

El principal problema de un mecanismo de coordinación de interferencias distribuido, basado en la comunicación por la interfaz X2, como el mencionado en la sección 3.4.4, es que consumiría una parte significativa de la capacidad computacional en las *Small Cells*. Además, la carga extra de señalización también colapsaría en las *Small Cells*, en el caso haber sido diseñadas para ser elementos de red de bajo costo.

Tomando en cuenta que el principal campo de aplicación de las *Small Cells* es en interiores, si el aislamiento que se produce al interior de las estructuras, no es lo suficientemente elevado para prevenir las interferencias entre *Small Cells* y *macrocelas*, se debe considerar la utilización de otras bandas de frecuencias para las *Small Cells*, lo cual no siempre es posible debido a las limitaciones de espectro que establecen los entes reguladores.

Se debe tener en cuenta que para el caso de *Femtocelas* y HeNB, los datos y mensajes de señalización de la interfaz S1, son transportados por el proveedor de servicios de internet del usuario, en lugar de ser transportados por el operador de la red, esto implica un mayor riesgo en la seguridad, por lo tanto, ese tipo de *Backhaul* de las *Small Cells*, tiene que ser asegurado más cuidadosamente, que al utilizar un *Backhaul* por interfaces S1 normales.

En una red heterogénea, la señalización para la *coordinación de interferencia* en múltiples niveles (macro, micro, pico o *femtocelas*) puede ser logísticamente difícil de lograr, tanto para los *grupos cerrados de suscriptores* CSG, como para los abiertos.

Además la coordinación entre los niveles puede dificultarse por las grandes diferencias en las potencias de las señales, incluso se pueden suscitar problemas de latencia, dado que las *Small Cells*, por lo general no están conectadas directamente con el núcleo *Core* de la red del operador.

Las *Small Cells* han evolucionado de forma agresiva desde un producto centrado en el consumidor dirigido principalmente para usuarios domésticos, a un tipo de solución como un nodo de baja potencia para la RAN que se puede conectar directamente a la red de *macroceldas*. Algunas operadoras por ejemplo, en zonas rurales han hecho un despliegue distribuido de *femtoceldas* de baja potencia, para hacerlas operar como si fuesen una red de *macroceldas*. Sin embargo, los despliegues a gran escala de las *Small Cells*, aún pueden verse perjudicados en las áreas metropolitanas, debido a las dificultades que se presentan por el excesivo número de *Handovers* en ciertos escenarios, como por ejemplo, mientras el usuario se desplaza en un automóvil.

En el mismo ámbito de movilidad, la desventaja que se puede mencionar, es que la implementación de *Small Cells* convierte a la red móvil en heterogénea (*HetNet*), lo cual la hace más compleja en términos de cobertura e interferencias, por lo que su planificación, gestión de canales radio y traspaso entre celdas (*Handover*), resultan algo más complicadas que en una red homogénea.

Nuevamente, y recalcando en la movilidad, con el aumento del número de celdas en una red, un menor número de usuarios finales estarán conectadas a cada una, razón por la cual la eficacia de las estadísticas tomadas por cada celda será menor, además existirá un mayor número de *Handovers* en la red, lo que requiere una elevada y eficiente capacidad para manejar el alto tráfico de señalización y la velocidad de las transmisiones. Adicionalmente habrá más gestión vecindades, teniéndose que manejar y gestionar listas de celdas vecinas más extensas y otros datos relacionados, a través de clústeres de *Small Cells*; por lo que serán esenciales interfaces abiertas para optimizar el rendimiento entre varios operadores de telefonía móvil.

### 3.8 MEJORAS A LAS SMALL CELLS/REDES HETEROGÉNEAS

La 3GPP llevó a cabo varios estudios durante el *Release 12* [43], entre los cuales estuvo el estudio de las alternativas para mejorar el rendimiento de las *Small Cells* y las redes heterogéneas [44], donde se proponen dos formas de mejorar el *Throughput* en las *Small Cells*.

En primera instancia, la potencia de señal recibida desde una *Small Cell*, es mayor de lo habitual, por lo que los móviles se pueden beneficiar de esto para utilizar esquemas de modulación de orden superior [45]. Es probable que un nuevo esquema de modulación, *Downlink 256-QAM*, forme parte de las especificaciones del *Release 12*.

En segunda instancia, el bajo retardo de la propagación resulta en una coherencia con el ancho de banda, mayor que lo habitual, mientras que la baja velocidad de los móviles resulta en una mayor coherencia con el tiempo. Estas condiciones sugieren la introducción de una nueva señal de referencia específica para los móviles, la cual ocupa menos recursos que lo habitual, incrementando de esta manera la capacidad para los canales físicos compartidos de *Downlink* (PDSCH) y *Uplink* (PUSCH) [1].

En la sección 3.1 se hizo el estudio de la *auto-optimización de redes (SON)*, donde se mencionó que una celda puede apagarse cuando no está en uso, para reducir al mínimo su consumo de energía. En el *Release 11*, una celda puede hacer esto cada pocos segundos, a intervalos de tiempo dictados por la necesidad de las mediciones y de la señalización para el *Handover*.

Si una celda podría encenderse y apagarse más a menudo, entonces podría reducir su consumo de energía aún más y podría reducir también la interferencia que se genera en otros lugares. Con esto, intervalos de tiempo de decenas de milisegundos son alcanzables, por ejemplo, si se garantiza que las celdas inactivas ocasionalmente continúen transmitiendo señales de sincronización, lo cual se espera que forme parte de las especificaciones del *Release 12*. El objetivo final sería una celda que pueda encenderse y apagarse en la transmisión de cada sub-trama [1].



La *Conectividad Dual* en LTE es la capacidad de un móvil para comunicarse simultáneamente con dos estaciones base, a saber, un maestro eNB y un esclavo eNB, los cuales generalmente son una *macrocelda* y una *picocelda* que usan diferentes frecuencias portadoras. La *Conectividad dual* tiene tres motivaciones principales; la más importante es reducir el número de *Handovers* fallidos en una red heterogénea. Los *Handovers* constituyen una dificultad para un móvil que se mueve fuera del alcance de una *picocelda*, ya que puede no disponer del tiempo suficiente para descubrir una *macrocelda* circundante, antes de perder su señal original, produciéndose inestabilidad en el servicio.

La robustez del proceso de *Handover* puede ser mejorada mediante el mantenimiento de la señalización RRC dentro de la *macrocelda*. Además, la carga de señalización de la red puede ser reducida, al minimizar el número total de *Handovers*, mientras que la capacidad de la red y el *throughput*, por consiguiente, la calidad de servicio para el usuario, pueden incrementarse [1].

## CAPÍTULO IV

### 4 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE SMALL CELLS LTE

#### 4.1 MÉTODOS GENERALES PARA OPTIMIZAR UNA RED LTE

Ahora bien, con el fin de *solventar problemas de capacidad, cobertura y calidad dentro una red de telefonía móvil 4G LTE*, tanto en el borde de una *macrocelda*, como en el interior de edificios y otras estructuras, donde existen dificultades para que la señal de la *macrocelda* penetre, los operadores pueden combinar varias opciones:

##### 4.1.1 Optimizando la red de *macroceldas* existente

Esto implica encontrar valores adecuados para los parámetros lógicos (a nivel de eNB y MME), y para los parámetros físicos (a nivel del sistema radiante, como *tilts* y *azimuts*), ya sea por medio del análisis de indicadores de calidad KPIS o estadísticas, o mediante el análisis de los resultados obtenidos en pruebas de campo *Drive Test*.

Adicionalmente, puede implicar el despliegue de más espectro, el uso de técnicas avanzadas para la transmisión y recepción en las antenas, como MIMO o diversidad de orden superior en el receptor y/o en el transmisor, y que dentro de cada *macrocelda* eNB exista una mayor capacidad de procesamiento de la señal en banda base, entre otras alternativas.

### 4.1.2 Densificando la red de *macroceldas*

Las redes de telefonía móvil, han sufrido grandes cambios en los últimos años, tanto en entornos urbanos, como suburbanos [11]. Aunque originalmente fueron diseñadas para la cobertura de voz, estas redes se han densificado sucesivamente con un número creciente de *macroceldas*, para satisfacer la creciente demanda de una mejor cobertura y una mayor capacidad para datos.

Inicialmente, las *macroceldas* se desplegaban en la parte superior de los edificios más altos con el fin de llegar lo más lejos posible, sin embargo ahora se las encuentra generalmente colocadas en mástiles y azoteas con poca altura, y con considerable inclinación hacia abajo (*downtilt*), o incluso por debajo de los techos, con el objetivo de limitar la interferencia con las celdas vecinas.

Se ha demostrado que la tecnología LTE funciona bien en despliegues muy densos [48]. Siempre que sea posible hacerlo, la densificación de *macroceldas* es una forma poderosa y rentable para mejorar la cobertura y/o capacidad. Esto implica la adición de *macroceldas* estratégicamente geo-ubicadas, con potencia y radio de cobertura reducidos.

### 4.1.3 Adicionando *Small Cells*

Es aquí donde radica el estudio de este proyecto. Los métodos mencionados en las secciones anteriores, aún tienen varios desafíos por superar. Por ejemplo, para resolver la necesidad de una mayor calidad, capacidad y cobertura, la densificación de *macroceldas*, no constituye un enfoque rentable a largo plazo, sobre todo para ambientes internos. Por otro lado, se debe considerar la intensiva inversión de capital que se requiere para la implementación de estaciones base de *macroceldas*, y la creciente dificultad para ubicar los sitios nuevos.

Esto deja a los operadores, realmente con pocas opciones rentables para mejorar sus más importantes parámetros de red, que constituyen la capacidad, la cobertura y la calidad de servicio, requisitos necesarios para soportar aplicaciones de nueva generación y soluciones TIC. Por tal motivo, se estima que el consenso de la industria

LTE terminará apuntando hacia técnicas relacionadas con el despliegue e implementación de *Small Cells*.

El servicio que brindan las *macroceldas* de una red, puede ser complementado con *Small Cells*, tales como *microceldas*, *picoceldas* o soluciones dedicadas para ambientes internos. Como se verá más adelante, esto ofrece gran capacidad para cada usuario y una eficiente cobertura en las zonas de alto tráfico, con el potencial de mejorar el rendimiento de la red macro, mediante el drenaje del tráfico generado en los puntos críticos. No obstante, el rendimiento global de la red dependerá del grado de integración y coordinación que se puede lograr a través de la red heterogénea.

Se debe considerar la implementación de *Small Cells*, ya que en diversas áreas, la red de *macroceldas* actual, está llegando a su límite práctico de implementación. Esto se debe al crecimiento exponencial del tráfico de datos y a la consecuente saturación que han sufrido sus denominados *objetivos de cobertura*. A medida que aumenta la demanda de tráfico en una *macrocelda*, obviamente su capacidad se ve afectada, y paralelamente disminuye el área efectiva en el borde de las celdas.

## 4.2 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE ESTRATEGIAS DE EXPANSIÓN COMBINADAS CON SMALL CELLS

### 4.2.1 Análisis del desempeño de una red Heterogénea HSPA 3.5G

A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos por Landström S., y otros autores, en el artículo relativo al incremento de la capacidad celular con redes heterogéneas, contenido en [49]. Aquí, se discute más detalladamente los enfoques expuestos en la sección 4.1, mediante un ejemplo tomado en un área con alta densidad de usuarios, específicamente, con los siguientes parámetros:

- **Tráfico y comportamiento de usuarios:** 6000 suscriptores por km<sup>2</sup>, el 80% de los usuarios activos se encuentra en ambientes internos, la transferencia de archivos constituye el 6% del tráfico total durante la hora más cargada.

- **Densidad de despliegue y propagación:** Entorno urbano, con una distancia entre sitios macro de 425 o 300 metros, los clústeres fueron desplegados con nodos de baja potencia, conforme al volumen de tráfico.
- **Sistema:** HSPA con un ancho de banda de 10 o 20 MHz, la configuración de las antenas es 2x2 en *Downlink* y 1x2 en *Uplink*, la potencia de las *macroceldas* y *picoceldas* es de 46dBm y 30dBm respectivamente.

Lo que se intenta demostrar con los resultados, es que mediante la actualización de la red de radio-acceso, es posible obtener altas tasas de transferencia por usuario y a su vez, incrementar la capacidad del sistema. Estas mejoras, permiten determinar que la implementación de redes heterogéneas, en combinación con otras técnicas, constituye una forma efectiva de optimizar una red, ya que reducen la necesidad de implementar nuevas estaciones base para *macroceldas*.

En la Figura 4.1, se ilustra gráficamente las técnicas utilizadas para la optimización de la red, básicamente se muestran 4 escenarios co-relacionados entre sí.

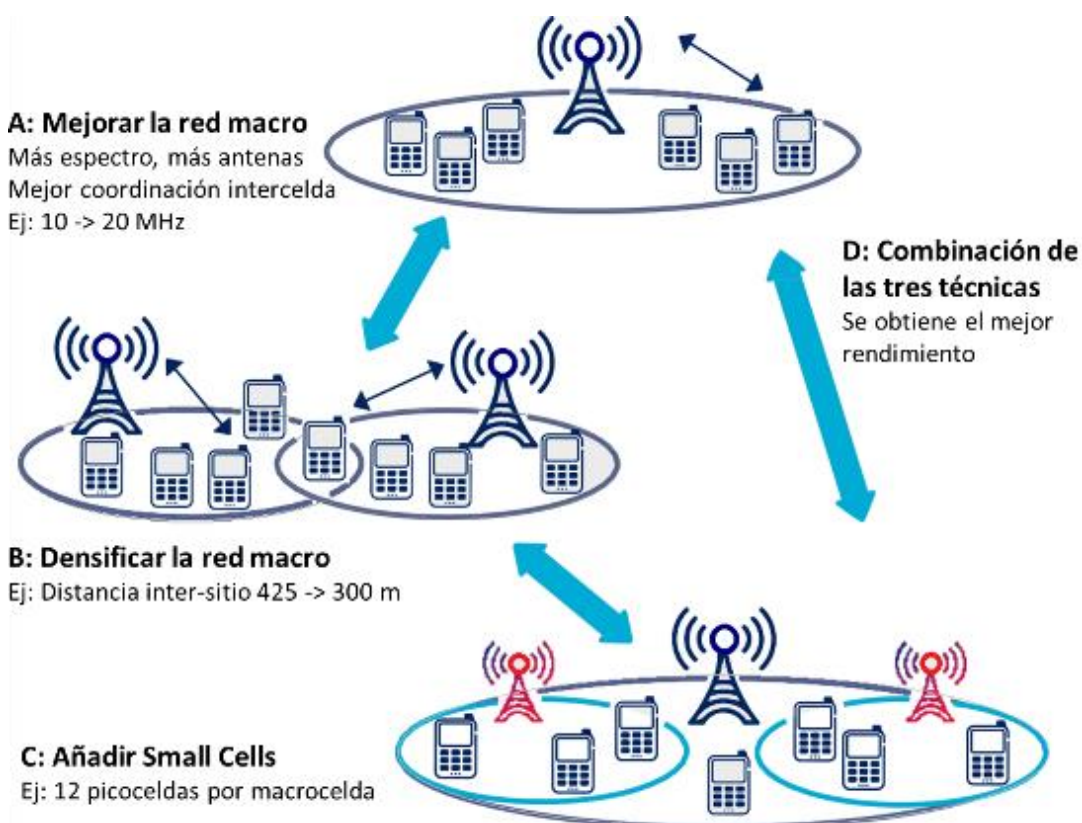


Figura 4.1 Estrategias de mejoramiento de una red móvil [49]

Para el escenario A, se ha duplicado el ancho de banda del *espectro* de 10 a 20 MHz, se ha incrementado el *número de antenas* y se ha utilizado *técnicas de coordinación de la interferencia*; además se ha implementado un *procesamiento avanzado* dentro de cada nodo y entre nodos.

Para el escenario B, se ha *densificado* la red de *macroceldas*, es decir para el ejemplo, se ha reducido la distancia entre sitios, de 425 metros a 300 metros. Como se analizó en la sección anterior, para que la técnica de la *densificación* sea efectiva, el número de sitios debe mantenerse relativamente bajo, y el rendimiento de la red debe ser invariable a la localización del tráfico.

Para el escenario C, se ha complementado la red macro agregando nodos de baja potencia (*picoceldas*) y así formar una red heterogénea. Para el ejemplo, se realiza un despliegue de 12 *picoceldas* por cada *macrocelda*, en diferentes *Hotspots* y *Huecos de Cobertura*. Como se analizó en la sección anterior, el despliegue de *Small Cells* representa un desafío, ya que depende de la proximidad a los lugares donde se genera el tráfico, además debido al reducido alcance de estas, se requiere un mayor número de *Small Cells*. Superar este desafío, requiere de un adecuado diseño e integración de las mismas.

Y por último, el escenario D representa la combinación de las tres técnicas anteriores, pues se optimiza la red de *macroceldas* duplicando el espectro a 20 MHz, se densifica la red de *macroceldas* reduciendo la distancia entre celdas  $ISD = 300$  m, y se despliega *picoceldas* en los *Hotspots*, 6 por cada *macrocelda*. En definitiva los resultados obtenidos luego de aplicar todas las estrategias, demuestran que esta es la forma más viable de mejorar *la calidad, cobertura y capacidad de una red*.

En las siguientes ilustraciones, se muestra los resultados obtenidos por dicho estudio, el cual se realizó en ambientes con una cobertura mínima del 95%, donde se aprecia el incremento en el volumen de datos mensual (Figura 4.2) y en el *throughput* de datos (Figura 4.3), conforme a cada estrategia implementada. Adicionalmente, se presenta los resultados de una medición de referencia, para establecer la comparación individual con cada una de las estrategias, y finalmente con el rendimiento obtenido al combinarlas todas.

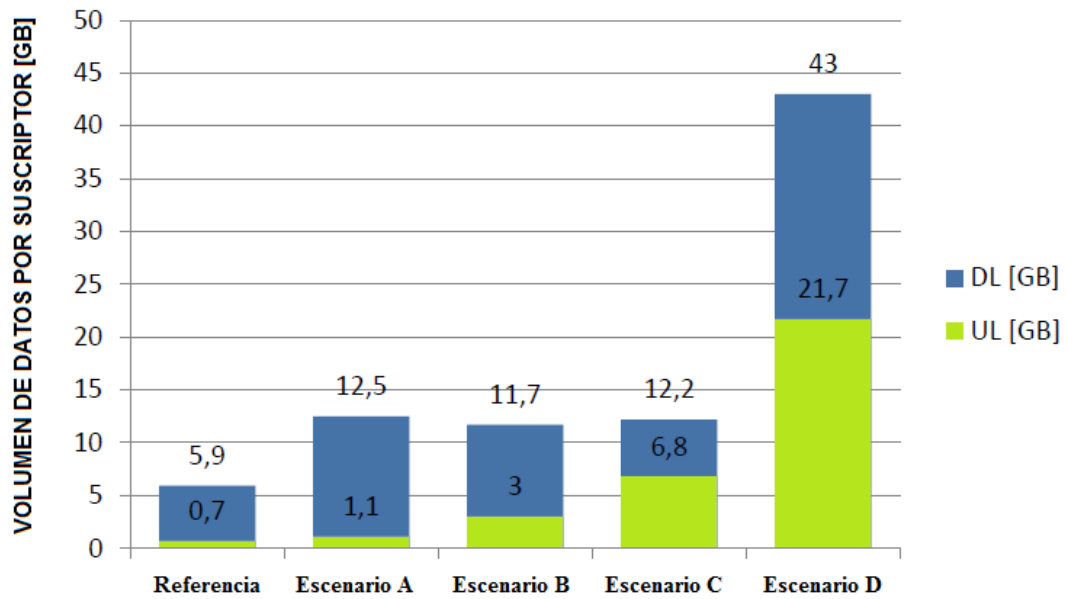


Figura 4.2 Resultados obtenidos al utilizar diferentes estrategias de mejoramiento. Volumen de Datos Mensual [49]

Al analizar los resultados obtenidos con los parámetros de referencia, en comparación con los resultados obtenidos al combinar las tres estrategias, se verifica que el volumen de datos que consume cada suscriptor mensualmente se multiplica por un factor de 7 aproximadamente, mientras que el *throughput* se duplica. Por lo que se concluye, que la combinación de las técnicas antes mencionadas constituye una solución para solventar problemas de *capacidad*, *calidad* y *cobertura* dentro de una red de telefonía móvil.

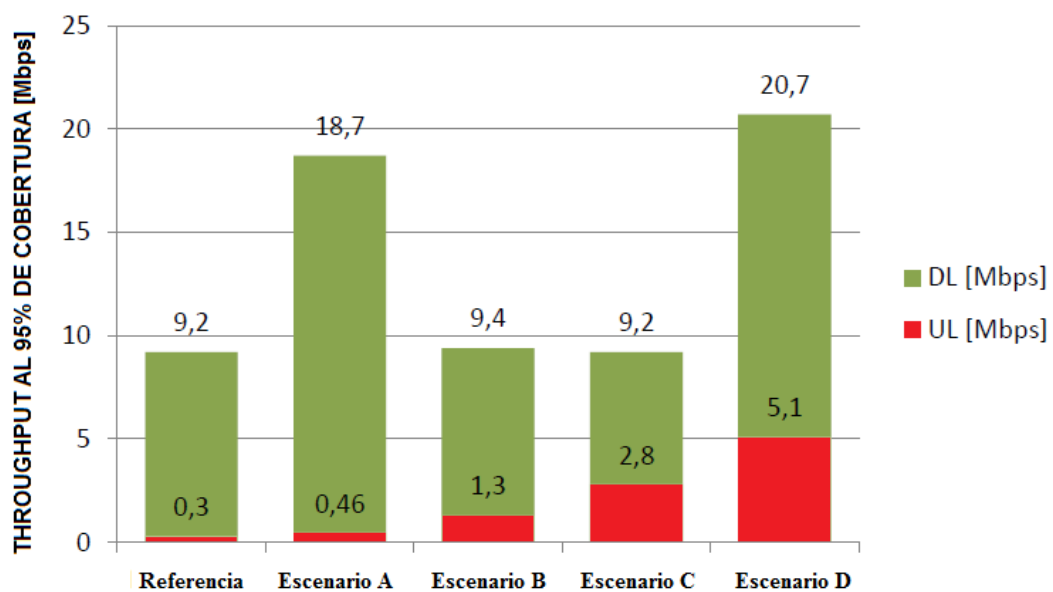


Figura 4.3 Resultados obtenidos usando diferentes estrategias. *Throughput* [49]

### 4.2.2 Análisis del desempeño de una red Heterogénea LTE

Según proyecciones de uno de los principales proveedores de tecnología para redes móviles, *Huawei*, una red LTE puede proporcionar 30 veces más capacidad [50] si en ella se combinan múltiples técnicas como: despliegue de redes heterogéneas que incluya coordinación de *macrocelas* con *Small Cells*, operaciones multi-RAT y esquemas de transmisión MIMO.

Con la evolución de las redes heterogéneas hacia despliegues multi-capa con un elevado número de *Small Cells*; con el ejemplo estándar de 12 *picoceldas* por cada *macrocela*; y con la aplicación de la coordinación inter-celda entre las capas, la capacidad de la red podría incrementarse casi 9 veces en comparación con una red LTE homogénea.

Adicionalmente, se puede lograr un 30% de ganancia utilizando las técnicas CoMP estudiadas en la sección 3.2.3 [50]. Incluso, la capacidad de la red podría incrementarse 25 veces, si se implementan 2 frecuencias portadoras para el uso dedicado en *picoceldas*, e incorporan las características: *Inter-Cell Listening* ICL y *Fast Carrier Selection* (FCS), para evitar la interferencia y mejorar la coordinación.

Adicionalmente, si se aplica técnicas que mejoran la eficiencia espectral, como la modulación de orden superior 256 QAM y *overhead reduction*<sup>26</sup>, la capacidad de la red al interior de una celda puede mejorar 30 veces, mientras que el *throughput* en el borde de la celda puede mejorar hasta 12 veces, esto comparado con la capacidad de un sistema LTE convencional. Si se emplea esquemas de transmisión MIMO 4x4 y/o *Beamforming*, la cobertura y capacidad de una red LTE podría mejorar aún más, como se ilustra en las Figuras 4.4 y 4.5 [50].

---

<sup>26</sup> Se refiere a una técnica para reducir la transmisión de información innecesaria.



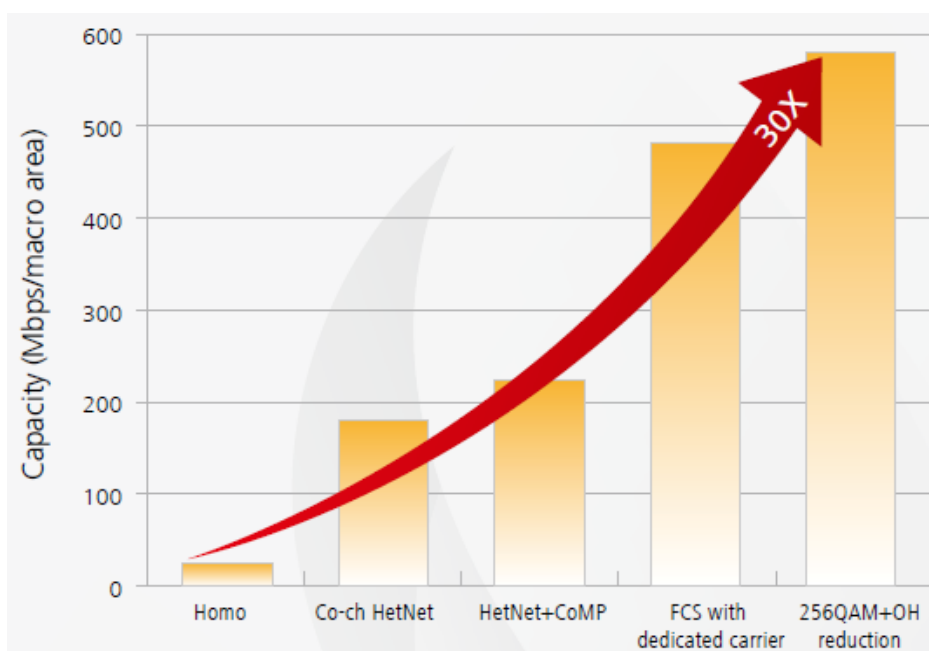


Figura 4.4 Incremento en la capacidad de una HetNet LTE [50]

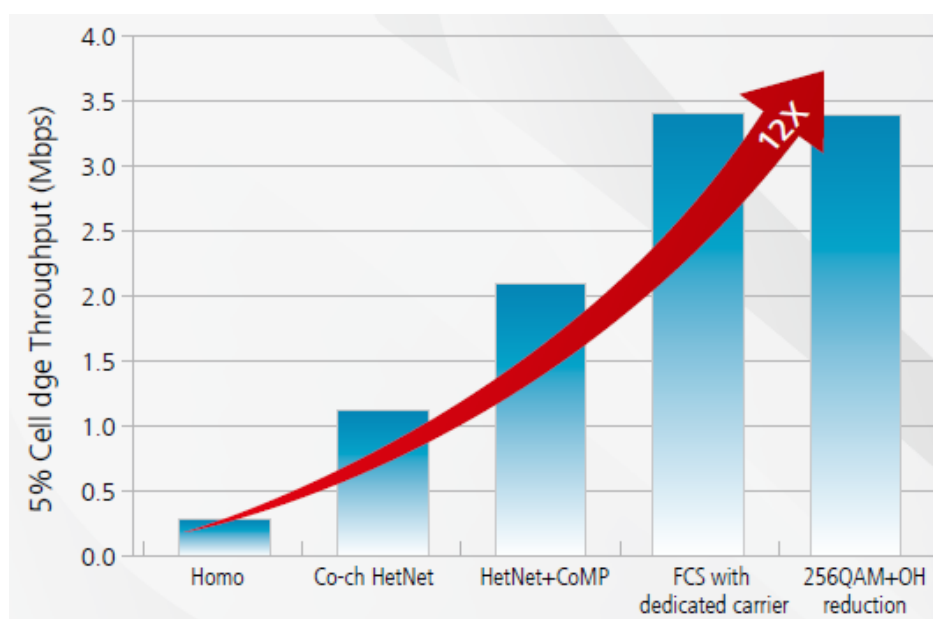


Figura 4.5 Incremento en el *throughput* de una HetNet LTE [50]

### 4.3 MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD EN UNA RED LTE

En este proyecto, el enfoque principal que se le da a la Calidad del servicio, se centra en dos indicadores principales, la interferencia del sistema y la eficiencia del *throughput*. Ambos indicadores están íntimamente relacionados entre sí, por lo que la reducción de las interferencias aumentará el *throughput* que perciba el usuario, lo cual a su vez desembocará en el mejoramiento de la calidad.

### 4.3.1 Reducción de las Interferencias

Como se analizó en la sección 2.3.2, el esquema de acceso radio de LTE proporciona *ortogonalidad* entre los usuarios de una misma celda, tanto en *Uplink* como en *Downlink*, mientras que entre usuarios de distintas celdas no evita la interferencia. Por esta razón, las prestaciones de LTE en términos de eficiencia espectral y tasas de transmisión pico, están limitadas sobre todo por las interferencias producidas por las celdas vecinas, las cuales aumentan en número al desplegar *Small Cells*.

Por lo tanto, cualquier técnica que permita reducir las interferencias inter-celda, resultará una mejora, principalmente en términos de calidad de servicio que perciben los usuarios en los bordes de las celdas. Para lograr este objetivo, se han catalogado varias técnicas [38]: técnicas de cancelación, técnicas de promediado y técnicas de evasión de interferencias.

En primer lugar, las técnicas de cancelación de interferencias se basan en estimar la interferencia de la señal recibida y restar su valor a la componente de la señal deseada. En segundo lugar, las técnicas de promediado de interferencias se basan en organizar la transmisión de manera que las interferencias se distribuyan equitativamente entre todos los usuarios. Y por último, las técnicas de evasión de interferencias se basan en encontrar un factor de reutilización de frecuencias óptimo, para restringir ciertas frecuencias y realizar un control de potencia para conseguir el objetivo, como ocurre con la técnica ICIC, descrita en la sección 3.1.2.

El objetivo final de las redes LTE, en cuanto al control de interferencias, consiste en la reutilización universal de frecuencias, lo que se traduce en utilizar, en todas las celdas, todo el ancho de banda disponible, y de esta manera maximizar la eficiencia espectral del sistema 4G. No obstante, en redes móviles basadas en OFDMA, esto supone una degradación significativa del *throughput* que perciben los usuarios situados en el borde de la celda, puesto que las pérdidas de propagación son proporcionales a la distancia entre el receptor y el transmisor, de modo que, a medida que el móvil se aleja de su estación base servidora, no sólo experimenta un decremento

en la potencia de la señal útil, sino también un incremento en la potencia de las señales interferentes producidas por celdas vecinas.

En efecto, si la SINR de los móviles es elevada, es decir, si los usuarios están cerca de sus estaciones bases servidoras, entonces la calidad del servicio se maximiza, siempre y cuando todos los eNBs circundantes, transmitan a la potencia mínima requerida para obtener el máximo *throughput* que el sistema puede proporcionar.

Con el fin de evitar la interferencia, también se podría pensar en dividir en dos al espectro asignado para la tecnología LTE, y de esta manera hacer que las *macrocelas* operen en un rango de frecuencias, mientras que las *Small Cells* en otro. Sin embargo, se debe tener en cuenta que existen funcionalidades, como la estudiada en la sección 3.2.3 CoMP que trabajan únicamente bajo la modalidad de espectro compartido, es decir con la capa de *macrocelas* y *Small Cells* en la misma frecuencia.

Adicionalmente, la división de espectro implica que se generen *Handovers inter-frecuencia*, lo cual aumenta la probabilidad del *ping-pong Handover*, y/o re-selecciones y *Handovers fallidos*, lo que puede afectar a la continuidad del servicio y provocar inestabilidad.

Por lo mencionado anteriormente, no se recomienda hacer una división del espectro diferenciada para cada capa de celdas, sino más bien utilizar un espectro compartido entre capas. En consecuencia, la ubicación estratégica y organizada de *Small Cells*, constituye un elemento clave para la reducción al mínimo de las interferencias, que producen degradación de calidad del servicio.

#### **4.3.2 Mejoramiento del *Throughput***

Los valores pico de *throughput* alcanzados en los *Release* 10 y 11 de LTE operando en modo FDD, han alcanzado valores de 1200 Mbps y 600 Mbps para *Downlink* y *Uplink* respectivamente. También es posible obtener estas tasas de transferencia pico al implementar *Small Cells* en una red LTE, si se toma en cuenta los siguientes criterios [1]:

Como primer punto, la *Small Cell* debe estar transmitiendo en su ancho de banda máximo de 20 MHz. Esto es probablemente una asignación inusual de espectro, al menos en los despliegues iniciales de tecnología LTE, siendo más común la asignación de 5 o 10 MHz. Con estos valores inferiores de ancho de banda, la tasa de transferencia pico obtenida, se puede reducir en un factor de 2 o 4.

Como segundo punto, el móvil debe tener las características más avanzadas que dispone cada *Release*. En el *Release* 8, por ejemplo, la categoría 5 de los móviles es la única que soporta cuatro capas de *multiplexación espacial* en *Downlink*, o la modulación 64-QAM en *Uplink*. En cambio, si se analiza el desempeño de la red con un móvil de la categoría 3, común en los primeros dispositivos LTE, entonces la tasa de transferencia pico; en *Downlink* se reduce en un factor de 3, y en *Uplink* también se reduce en un factor de 1,5.

Como tercer punto, y como se ha analizado anteriormente, el móvil debe estar lo más cercano posible de la estación base. Si no es así, entonces la SINR recibida puede ser baja, y el receptor puede ser incapaz de manejar los esquemas de modulación rápidos que se requieren para una alta velocidad de datos.

Como cuarto punto, las *Small Cells* deben estar bien aisladas de las otras celdas cercanas. A menudo, esta condición se puede lograr con *femtoceldas* y *picoceldas*, que generalmente son implementadas en ambientes internos, donde existe el aislamiento que ofrece la propia estructura del lugar. Un resultado de aislamiento similar, pero más débil, se aplica a las *microceldas*, las cuales están parcialmente aisladas unas de otras, por los edificios circundantes. En cambio, a nivel de la red macro existe un aislamiento escaso o nulo, por lo que el receptor puede ser afectado significativamente por la interferencia de las celdas cercanas. Al igual que el caso anterior, esto reduce la SINR, impidiendo que el receptor maneje esquemas rápidos de modulación y/o codificación.

La condición final para que un móvil pueda obtener las tasas de transferencia pico, que se mencionan al inicio de esta sección, es que debe ser el único móvil activo en la celda. Si no lo es, lo cual regularmente sucede, entonces la capacidad de la celda será compartida entre todos sus móviles, lo que resulta en una gran disminución del *throughput* que está disponible para cada uno.

### 4.3.3 Servicios de Voz y SMS a través de LTE con *Small Cells*

Otra forma de mejorar la calidad de una red LTE, es brindando servicios de voz y SMS por medio de *Small Cells* en los denominados *Hotspots* o en cualquier otro punto crítico de la red.

El EPC (*Evolved Packet Core*) está diseñado como un sistema que simplemente transporta información desde y hacia el usuario, sin tomar en cuenta el contenido de la información o la aplicación que se está ejecutando en el terminal móvil. Debido a este particular, las aplicaciones de voz y SMS no forman parte integrante del estándar LTE. Sin embargo, existen otras alternativas para poder seguir brindado el servicio de voz y SMS, a móviles que cuentan con la tecnología LTE. A continuación, se mencionan las alternativas que actualmente se pueden utilizar:

- **Voz sobre IP - Third Party**

La técnica más simple para ofrecer servicios de voz en una red LTE, constituye la voz sobre IP (VoIP). Mediante el servicio de internet móvil y usando los mismos principios que cualquier otra aplicación basada en IP, se puede acceder a proveedores *thrid-party*<sup>27</sup> de VoIP, como por ejemplo *Skype*, para realizar llamadas de voz.

Con esta técnica, el usuario establece una llamada mediante el intercambio de mensajes de señalización de VoIP con un servidor externo, y el sistema LTE los transporta a través del EPS, exactamente de la misma manera, que si se tratara de cualquier otro tipo de datos. El operador también puede brindar soporte a *media gateways*, estos convierten los paquetes de VoIP, que van hacia, y desde los flujos de información, que usan las redes de conmutación de circuitos tradicionales. Si se efectúa esto, entonces el usuario será también capaz de comunicarse con un teléfono móvil 2G / 3G, o con una línea de fija convencional [1].

---

<sup>27</sup>Es el nombre con el cual se conoce a las empresas que desarrollan *software* libremente, para cualquier tipo de plataforma, sin mantener exclusividad con ninguna.

- **CSFB (Circuit Switched Fallback)**

El CSFB significa volver a la conmutación de circuitos. Cuando el ancho de banda que dispone el operador no es suficiente para cubrir todas las necesidades de los usuarios que están conectados a través de la E-UTRAN, la red posee la facultad de transferir al móvil, desde el dominio de conmutación de paquetes (LTE), hacia el dominio de conmutación de circuitos, que puede ser la red GERAN o UTRAN, conforme a la estrategia que el operador tenga establecida, para que el usuario realice la llamada de voz o envíe el SMS.

Es importante mencionar que para poder realizar este procedimiento de *Handover*, debe existir solapamiento de cobertura de las RAN de las tecnologías involucradas 2G o 3G. Sin embargo, para solventar este inconveniente, se utilizan otras tres alternativas: MMTEL, SRVCC, y VoLGA que se describirán a continuación, las cuales están basadas en una plataforma externa a la tecnología LTE/SAE que es implementada en el *Core* y recibe el nombre de IMS (*Subsistema Multimedia IP*) [1].

- **MMTEL (Multimedia Telephony)**

Basado en la plataforma IMS, es un estándar global para la evolución de la telefonía que ofrece servicios multimedia en tiempo real, con una cobertura fija y móvil. El estándar MMTEL es compatible con estándares más antiguos de telefonía móvil y fija, garantizando el soporte a las llamadas desde una red LTE, hacia la PSTN (red telefónica pública conmutada) y hacia redes 2G/3G.

- **SRVCC (Single Radio Voice Call Continuity)**

También basado en la plataforma IMS. Es un proceso que se realiza en el *Core*, donde interactúa el MME y define una solución de telefonía de nueva generación que facilita una introducción gradual hacia redes de acceso LTE, dentro de una infraestructura GERAN/UTRAN, permitiendo el *Handover* entre la conmutación de paquetes y la conmutación de circuitos.

- **VoLGA (Voice over LTE generic Access)**

Voz sobre acceso genérico LTE, este método propone utilizar la red de acceso de radio basada en IMS, pero manteniendo la red conmutación de circuitos (GSM o WCDMA), introduciendo un nuevo elemento en el *Core*, llamado Controlador de Red de Acceso VOLGA (VoLGA Access Network Controller VANC), este dispositivo permite que la red de acceso LTE basada en conmutación de paquetes, se conecte a la red de conmutación de circuitos, sin necesidad de realizar cambios en el MSC.

- **Dispositivos de Radio Duales**

Otro enfoque provisional, es utilizar móviles con dos transceptores<sup>28</sup> completamente separados, uno para las comunicaciones de datos a través de LTE, y otro para las comunicaciones de voz a través de una red 2G / 3G. Este enfoque tiene dos ventajas, pues es sencillo de diseñar y entrega conectividad continua de voz y datos al usuario. Sin embargo, también tiene dos inconvenientes: los dispositivos son voluminosos y la duración de la batería se reduce en gran medida. Además, no es adecuado para los operadores que están bajo el legado 3GPP, ya que sus especificaciones, no permiten que un móvil se comunique usando dos tecnologías 3GPP de radio al mismo tiempo [1].

#### 4.4 MEJORAMIENTO DE LA CAPACIDAD EN UNA RED LTE

Se han llevado a cabo una gran cantidad de investigaciones, en casi todas las formas imaginables de aumentar la capacidad y la calidad de las comunicaciones inalámbricas. Las opciones principales han sido documentadas por Martin Cooper, uno de los inventores del teléfono móvil portátil, quien observó que la capacidad teórica de la comunicación inalámbrica en una localidad, se duplica cada dos años y medio. Un análisis de este incremento de la capacidad [33], revela que en la mayoría de los casos se logró mediante el re-uso del espectro, combinado con la implantación de un mayor número de celdas.

---

<sup>28</sup> Se refiere a dispositivos que cuenta con un transmisor y un receptor, y que comparten parte de la circuitería o se encuentran dentro de la misma estructura.

Esta tendencia tendrá que continuar soportando el crecimiento de la demanda en el futuro. LTE y LTE-Advanced actualmente ofrecen velocidades de datos eficientes de más de 100 Mbps, así como baja latencia y alta eficiencia espectral. Sin embargo, como se ha podido comprobar, en los despliegues en el campo real, es ampliamente aceptado que para lograr un aumento significativo de la velocidad de datos, y cubrir con el crecimiento previsto de la demanda, entonces se necesitará un despliegue a gran escala de *Small Cells*.

La capacidad también será mayor, si en las *Small Cells* se utiliza esquemas de transmisión MIMO en *Downlink*, ya que los móviles con una alta SINR, serán entonces capaces de recibir a una velocidad de datos más alta. Finalmente, la capacidad de *Downlink* fluctuará si las *Small Cells* contienen solamente unos pocos móviles conectados, los cuales pueden acceder a velocidades de datos mucho más altas, al haber menor utilización de recursos, y al estar más cerca de las estaciones base.

**Tabla 4.1**  
Ganancia en la capacidad según la técnica utilizada [33]

Técnica Utilizada	Factor de Ganancia en la Capacidad
División de la Frecuencia	5
Técnicas de Modulación	5
Acceso a una más amplia gama de espectro de frecuencias	25
Reutilización de frecuencias por medio de más sitios celulares	1600

#### 4.5 MEJORAMIENTO DE LA COBERTURA EN UNA RED LTE

Es necesaria una planificación cuidadosa de la cobertura de la red, para minimizar el número total de *Small Cells* a desplegar, y para disminuir el costo total de la red, permitiendo una suave migración de las redes, y garantizando un servicio robusto. Un análisis oportuno y preciso de la cobertura y capacidad en un sistema LTE, permite contar con una red estable para todos los servicios ofrecidos, por lo cual, es necesario la utilización de herramientas o *software* especializado que permita obtener una simulación del comportamiento de la red móvil, tanto en su desempeño, como en



su carga de tráfico. Definiendo algunos parámetros de propagación y carga de tráfico, es posible proyectar de manera razonable y con precisión, las estimaciones del rendimiento de la red.

Desde una perspectiva de radio, la ubicación de una *Small Cell* tiene una influencia clave sobre el valor del despliegue, pues una ubicación cerca de una *macrocela*, ofrecerá relativamente poco valor agregado a un despliegue de *Small Cells*. En cambio, aislándose correctamente de la señal de la *macrocela*, las *Small Cells* pueden desempeñar un rol muy importante, y el valor agregado que aporten, puede ser mucho mayor.

Sin embargo, al planificar la ubicación de las *Small Cells*, no es suficiente con sólo mirar los patrones de tráfico y las condiciones de radio. Otros factores deben ser tomados en cuenta para incluirse en el proceso de planificación desde el principio, como la disponibilidad del sitio y del *Backhaul*. La cobertura que se pueda brindar estará estrechamente ligada a la presencia de una infraestructura *Backhaul* existente, ya que los costos de la instalación de una nueva conectividad *Backhaul* cableada, son altos.

Se puede implementar soluciones de *Backhaul* cableadas, para interconectarse con las *Small Cells*, ya sea soterrando la red *Backhaul* o por dentro de edificios, asimismo puede ser con cableado visto, o con soluciones inalámbricas que requieren la consideración del entorno de propagación entre los transceptores, tanto del *Backhaul*, como de las *Small Cells* [4].

#### **4.6 ESCENARIOS CLAVE PARA EL DESPLIEGUE DE SMALL CELLS**

Al contrario que en los primeros días de la telefonía celular, más del 70% del uso de dispositivos móviles hoy tiene lugar en ambientes *indoor* [46], es en este tipo de entornos donde se encuentran los usuarios "problema", quienes debido a su intensidad de señal baja, pueden enviar y recibir menos datos por unidad de tiempo. Por tal motivo, una proporción significativa de los recursos de las *macrocelas* se está dedicando a estos usuarios, limitando su capacidad de servir a otros. En efecto, estos usuarios "problema" son el factor limitante para toda la capacidad del sistema. En otras

palabras, existe un vínculo entre el aumento de la capacidad total del sistema, y la mejora de la tasa de cobertura para estos usuarios "problema".

Mientras un *Hotspot* en exteriores tenga una alta densidad de usuarios y se encuentre servido satisfactoriamente por una *macrocelda*, no existe la necesidad de implementar una *Small Cell* en dicho *Hotspot*. En lugar de aquello, se necesitaría desplegar *Small Cells* en los bordes de la *macrocelda*, donde están los usuarios "problema", con el fin de drenar el tráfico de dicha *macrocelda*.

Dado que la mayoría de los usuarios que son objetivo de las *Small Cells*, se encuentran en ambientes *indoor*; las *Small Cells* que se instalen en exteriores, necesitan tener la suficiente potencia para penetrar las estructuras civiles, las cuales generalmente tienen valores típicos de pérdidas por penetración de  $10 < L_{\text{Bldg}} < 30$  dB [7], y superiores a 30 dB si las ventanas poseen algún tipo de recubrimiento metálico. Una *Small Cell* de baja potencia que no logre cubrir las áreas en las que se encuentran los usuarios "problema", agregará poco valor al rendimiento de la red.

Investigaciones [7] demuestran que generalmente es suficiente una potencia de radiación de 5 a 10 W, para llegar a usuarios *indoor* desde una estación base externa de baja potencia *Small Cell*. Del mismo modo, para el caso del *Uplink*, una instalación externa de *Small Cells*, debe ir de la mano con un adecuado rendimiento del receptor, con parámetros tales como su sensibilidad.

Una opción de implementación complementaria obvia, para llegar a estos usuarios problemáticos, constituyen las soluciones *indoor*. Para estos casos existe una variedad de escenarios de despliegue, en las que el rol que desempeñan las *Small Cells* varía de acuerdo con la naturaleza de la estructura en cuestión.

También en algunos lugares, como oficinas de empresas, existe un potencial de ingresos adicionales, en el despliegue de soluciones dedicadas de alta calidad. Esto representa una oportunidad para implementar *Small Cells* y soluciones *indoor* dedicadas basados en el estándar 3GPP, incluyendo las *microceldas*, *picoceldas* y *femtoceldas*.

No existe una solución genérica para abarcar todos los posibles escenarios de despliegue de *Small Cells*, puesto que las necesidades de cobertura y expansión de capacidad, varían en base a múltiples factores de las áreas urbanas y densamente urbanas, por lo que cada uno requiere una estrategia de implementación diferente. Sin embargo, en las siguientes secciones, se analizan cinco escenarios clave, los cuales, se estima que cubren la mayoría de tipos de escenarios para despliegue de *Small Cells*.

#### 4.6.1 Pequeñas Áreas Públicas Abiertas

En las calles y plazas altamente transitadas, los retos principales son la alta concentración de usuarios y la gran cantidad de tráfico generado en oficinas, tiendas, apartamentos y otras áreas interiores. Sin embargo, el operador tiene que mantener una buena experiencia para usuarios de *alto perfil*, para evitar la publicidad negativa, la cual, puede desembocar en un incremento del *churn*<sup>29</sup>.

En estos lugares, la cobertura que brindan las *macroceldas* implementadas en sitios altos como azoteas, puede ser débil, debido a la atenuación que sufren por las altas pérdidas de penetración, provocadas por las estructuras circundantes. En consecuencia, el tráfico *indoor* consumirá más recursos de radio desde las *macroceldas*, convirtiéndose en un cuello de botella en el sistema.



Figura 4.6 Escenario de Despliegue. Pequeñas Áreas Públicas Abiertas. Plaza Foch - Quito [62]

<sup>29</sup> Término empresarial empleado para hacer referencia a la migración, rotación o pérdida de clientes

Otro desafío es la creciente dificultad de encontrar nuevos sitios para *macroceldas*, especialmente, si existe ya un despliegue de estaciones de operadores competidores que llevan más años en el mercado. Además, se debe tomar en cuenta que los costos de alquiler del sitio, están aumentando debido a que los propietarios de los posibles emplazamientos se han dado cuenta de la gran rentabilidad que pueden obtener los operadores con ello.

Básicamente existen dos maneras para implementar *Small Cells* en dichas áreas, puede ser; en las fachadas de las estructuras, o utilizando la infraestructura de la ciudad, tales como postes, paradas de autobús y farolas.

La implementación en fachadas de edificios puede ser más difícil desde el punto de vista de la adquisición del sitio: en muchos casos, los permisos deben ser otorgados ya sea por dueño del edificio, por entidades municipales y/o aprobaciones obtenidas de otras autoridades. En cambio, lograr acuerdos grandes con los propietarios de varios edificios, puede ser muy ventajoso. Otro factor que puede ayudar al despliegue de *Small Cells* a gran escala, es si se efectúa una negociación de adquisición para la utilización de muchos sitios en conjunto, con una sola entidad, por ejemplo, con la municipalidad local.

Para el despliegue en exteriores, el impacto visual es importante, ya que las municipalidades pueden ser muy sensibles a la "contaminación visual". Entonces, mientras exista mayor capacidad de *mimetización* de las *Small Cells*, será mejor. Existe un gran potencial para desplegar *Small Cells* en instalaciones multifunción, por ejemplo, las *Small Cells* se pueden integrar con vallas informativas o publicitarias de una ciudad.

- **Características clave para la coordinación**

Para la implementación de *Small Cells* en estos escenarios, las características de coordinación que se recomiendan, son el uso de eICIC con asistencia para la interfaz X2, con el fin de permitir el futuro crecimiento del tráfico, además de coordinación CoMP para enlace ascendente y descendente. Los beneficios de estas funciones de coordinación fueron descritas en las secciones 3.2.3 y 3.4.3.

#### 4.6.2 Pequeñas Áreas públicas Cerradas

Uno de los principales desafíos a los que se enfrenta el despliegue de *Small Cells* en pequeñas áreas públicas cerradas, tales como en túneles de alto tráfico, cafeterías, restaurantes, bibliotecas, auditorios, supermercados, etc., es la alta concentración de usuarios. Por otro lado, a menudo se tiene limitada cobertura *indoor* principalmente en niveles inferiores como la planta baja, puesto que la señal de las *macrocelas* es usualmente atenuada por una alta pérdida de penetración causada por los muros de las edificaciones.



Figura 4.7 Escenario de Despliegue. Pequeñas Áreas Públicas Cerradas [63]

En este tipo de escenarios, los operadores tienen la oportunidad de crear ofertas específicas para los propietarios de edificios o de negocios, para entregar una mayor capacidad y calidad de servicio para sus clientes, por ejemplo, a través de una oferta de banda ancha móvil que incluye acceso Wi-Fi. El aumento de rendimiento del servicio de banda ancha móvil que se logra a través de un despliegue *indoor*, es tanto para mejorar la cobertura y la capacidad en el lugar, como para drenar el tráfico de las *macrocelas* circundantes.

Al trabajar en colaboración con el propietario del edificio o negocio, los operadores pueden desplegar *Small Cells* con relativa facilidad y rapidez, ya que generalmente se requiere de pocos o ningún permiso para el despliegue en interiores.

De igual forma, existe la opción de llegar a acuerdos con grupos grandes, por ejemplo con cadenas de restaurantes, con el objetivo de acceder a otros múltiples sitios.

También los emplazamientos interiores de sitios Wi-Fi, pueden ser reutilizados y complementados con tecnologías de acceso LTE. Un factor clave para el despliegue exitoso de *Small Cells*, es la facilidad de implementación, especialmente si se tiene en cuenta que se puede requerir un número elevado de unidades.

Idealmente, debería ser posible para el propietario del lugar, desplegar su propia infraestructura, lo cual implica habilitar las características de auto-configuración de las *Small Cells*, e implementar formas simplificadas de conectarlas al punto de conexión *Backhaul*, siempre y cuando se disponga de este punto al interior del edificio. Además, se recomienda configurar las mismas características de coordinación expuestas en la sección anterior, para el despliegue de *Small Cells* en este tipo de escenarios.

#### **4.6.3 Hotspots internos de acceso público**

Un desafío clave en grandes *Hotspots* internos de acceso público, tales como estaciones de autobús, centros comerciales y aeropuertos, es la alta concentración de usuarios en un área cubierta limitada.

Al mismo tiempo, la cobertura *indoor* de las *macroceldas* circundantes, puede estar limitada por la gran pérdida de penetración, causada por las estructuras propias de cada lugar. También puede haber altas exigencias en materia de movilidad, especialmente en las estaciones de autobús y aeropuertos.

Una manera de enfrentar estos desafíos, es añadir *Small Cells indoor*, en el lugar donde se encuentra la mayor parte del tráfico, para mejorar el rendimiento del usuario y la capacidad. Se debe proporcionar excelente experiencia de usuario para voz y datos, en zonas donde se encuentran empresarios de alto grado y usuarios *Roaming*. La interferencia puede ser un problema, si el entorno se compone de áreas abiertas donde no exista un buen aislamiento, como los galpones de las estaciones de autobús, No obstante la interferencia puede ser mitigada de manera eficiente, empleando la técnica CoMP para *Uplink* y *Downlink*



**Figura 4.8 Escenario de Despliegue. Hotspots Indoor de Acceso Público [64]**

Una vez que se llegue a un acuerdo con el propietario del lugar, para proporcionarle una solución *indoor* para sus instalaciones, es relativamente sencillo ubicar un emplazamiento para la *Small Cell* dentro de estos lugares, pues se requiere de pocos o ningún permiso para la implementación, y el acceso al *Backhaul* es potencialmente fácil.

Sin embargo, en este tipo de escenarios, a menudo también existe la alternativa de brindar buena cobertura y calidad de servicio, mediante la implementación de un sistema de antenas distribuidas (DAS) que, dependiendo de las necesidades y condiciones del lugar, puede ser alimentado por una *macrocela* o por una *Small Cell*. En la sección 4.10 se describe la evolución de los sistemas DAS.

- **Características clave para la coordinación**

En el escenario de estaciones de autobús, centros comerciales, aeropuertos y similares, los despliegues de *Small Cells* generalmente se realizan adicionando, varias o una pequeña unidad remota de radio comúnmente denominada RRU (*Remote Radio Unit*), la cual contiene los elementos de antena y el módulo RF. Por esta razón, se recomienda utilizar técnicas CoMP tanto para *Downlink* como para *Uplink* para la coordinación en LTE, acompañadas con la combinación de *Small Cells*, para proporcionar una movilidad robusta y mejorar el rendimiento de LTE.

#### 4.6.4 Despliegue en Estadios – Sedes de alta demanda

Indudablemente, uno de los desafíos clave en lugares como estadios, consiste en la altísima concentración de usuarios en un área limitada, ya que en los grandes eventos puede haber más de 50.000 usuarios congregados en áreas relativamente reducidas. Al mismo tiempo, el graderío se encuentra en zonas abiertas, por lo que la probabilidad de interferencia por LOS es alta, y la planificación celular se torna compleja.

Es por esta razón, que este puede considerarse como uno de los escenarios más complejos, ya que en ellos es necesario efectuar la optimización de interferencias, tanto dentro del estadio, así como entre las *macrocelas* circundantes, con el objetivo de minimizar la superposición de las celdas y lograr un mejor rendimiento.

Es importante mencionar que la carga de tráfico en los estadios, a menudo es de elevada carga en *Uplink*, ya que muchos usuarios comparten sus experiencias a través de redes sociales, por ejemplo. Además, durante eventos de *alto perfil*, para evitar la publicidad negativa, es especialmente importante proporcionar una buena experiencia de usuario para los servicios de voz y datos en sus *smartphones*. También puede haber la necesidad de proporcionar servicios localizados dentro del estadio, como *streaming* de vídeo para publicidad.



Figura 4.9 Escenario de Despliegue. Estadios – Sedes de alta demanda [66]



De la misma manera que en los escenarios de la sección anterior, el despliegue de *Small Cells* se debe realizar usando RRUs, para los cuales se recomienda emplear técnicas de coordinación CoMP, tanto para *Uplink* como para *Downlink*, para mejorar el desempeño de la red LTE.

Un acontecimiento importante que está próximo a suscitarse en Ecuador, es la llegada del Papa Francisco. Sin duda, el evento de mayor magnitud de los que se llevará a cabo durante su estadía en nuestro país, será el que se realizará el día 7 de Julio del 2015 en el parque Bicentenario de la ciudad de Quito, el cual será dividido en 33 cuadrantes, separados con vallas metálicas para distribuir a los asistentes a la misa campal. En cada espacio estarán entre 23 000 y 34 000 personas [58].

Se pueden mencionar los siguientes factores clave, para ser tomados en cuenta en atención a la gran demanda de usuarios que conlleva un evento de esta magnitud:

- Una adecuada planificación y dimensionamiento, tanto de las celdas servidoras como del *Backhaul*.
- Una buena utilización de espectro y de las tecnologías de radio en el acceso.
- Una elevada densificación de celdas por medio de la sectorización estrecha, usando *Small Cells* y/o Sistemas DAS, tomando en cuenta que el aislamiento de las celdas es un punto clave para lograr una alta capacidad.
- Una constante supervisión del rendimiento de los KPIS, permitiendo una sintonización precisa.
- El servicio de telefonía móvil se puede complementar con la combinación de tecnologías 3GPP y Wi-Fi, para manejar las necesidades de capacidad extremas.

#### **4.6.5 Despliegue en Oficinas**

En entornos de oficina, incluidas las pequeñas, medianas y grandes empresas, así como en hoteles y edificios de gran altura, un desafío clave es garantizar la excelente calidad del servicio de voz, la eficiencia del *throughput* y la alta capacidad para los usuarios de negocios a nivel *indoor*.

En este tipo de escenarios como en edificios de gran altura, la cobertura de las *macroceldas* en los pisos inferiores puede verse limitada, mientras que en las plantas superiores la cobertura puede ser buena, aunque aquí la interferencia de las *macroceldas* puede ser un desafío aún mayor. No obstante, el aislamiento en el ámbito RF, entre los pisos de un edificio, a menudo es aprovechable, alrededor de 20 dB [7], por lo que las *Small Cells* pueden ser utilizadas para proporcionar la cobertura necesaria en interiores, para ofrecer alta capacidad y una buena experiencia de usuario.

Los operadores tienen la oportunidad de ofrecer una oferta muy exclusiva de banda ancha móvil de alta calidad, para las empresas. El objetivo es ofrecer muy buena experiencia de usuario y capacidad para servicios empresariales de voz y datos, dentro y fuera de la oficina. Para los negocios como hoteles, dichas ofertas de banda ancha móviles, son también una manera de atraer a nuevos clientes y fidelizarlos [12].



**Figura 4.10** Escenario de Despliegue. Oficinas Empresariales [65]

En este tipo de escenarios, la adquisición del sitio y del *Backhaul* para el despliegue de *Small Cells indoor*, a menudo es más fácil y más rentable, que para un despliegue en exteriores, asumiendo que se ha llegado a acuerdos comerciales adecuados entre el operador y la empresa, particularmente con el departamento de TIC.

Trabajando con el auspicio de la empresa, se puede tornar relativamente sencillo para los operadores, desplegar redes de *Small Cells indoor*, ya que para esto se

requieren pocos, o ningún permiso, lo contrario a las implementaciones exteriores. Además, también existe la opción de lograr un acuerdo marco con una empresa más grande con múltiples oficinas, para acceder y desplegar potencialmente muchos sitios de *Small Cells indoor*, en diversos lugares, con sólo una negociación.

Para la implementación de *Small Cells* en este tipo escenarios, las características de coordinación que se recomiendan, son el uso de eICIC con asistencia para la interfaz X2, para permitir el futuro crecimiento del tráfico.

#### **4.7 DETECCIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DE UNA RED PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SMALL CELLS**

A pesar de que la red constituye un solo conjunto, necesita diferentes soluciones para satisfacer la demanda de capacidad y cobertura, la cual se torna variable según la zona y densidad poblacional. Tal es el caso, de las áreas rurales [8], donde el reto es proporcionar una cobertura eficiente y de bajo costo, para los servicios móviles de banda ancha, y a la vez mantener una buena experiencia del usuario final. El despliegue o la optimización de la red macro, es a la postre, la forma más rentable para hacer frente a este desafío en estas zonas menos pobladas.

En cambio, en las zonas urbanas y suburbanas que contienen construcciones de poca altura y con un relieve relativamente plano, existe la necesidad de optimizar y densificar la red macro, especialmente para satisfacer la creciente demanda de altas velocidades de datos. El aprovechamiento de la gran área de cobertura de las *macroceldas*, a menudo, puede ser la forma más rentable de satisfacer este tipo de demanda, antes que un despliegue masivo de *Small Cells*.

Por otro lado, varios estudios [47] han revelado que las *Small Cells* son principalmente requeridas en áreas metropolitanas, áreas urbanas y áreas densamente urbanas, a nivel *outdoor*, y principalmente a nivel *indoor*. Además de optimizar y densificar la red macro, las *Small Cells* se proponen como un elemento rentable para su utilización en *Hotspots*, en *Huecos de Cobertura*, y en ciertas edificaciones. Para este último campo de aplicación, se debe tomar muy en cuenta la relación costo-

beneficio. Por ejemplo, se puede implementar *Small Cells* en aeropuertos o en empresas con clientes *Premium*.

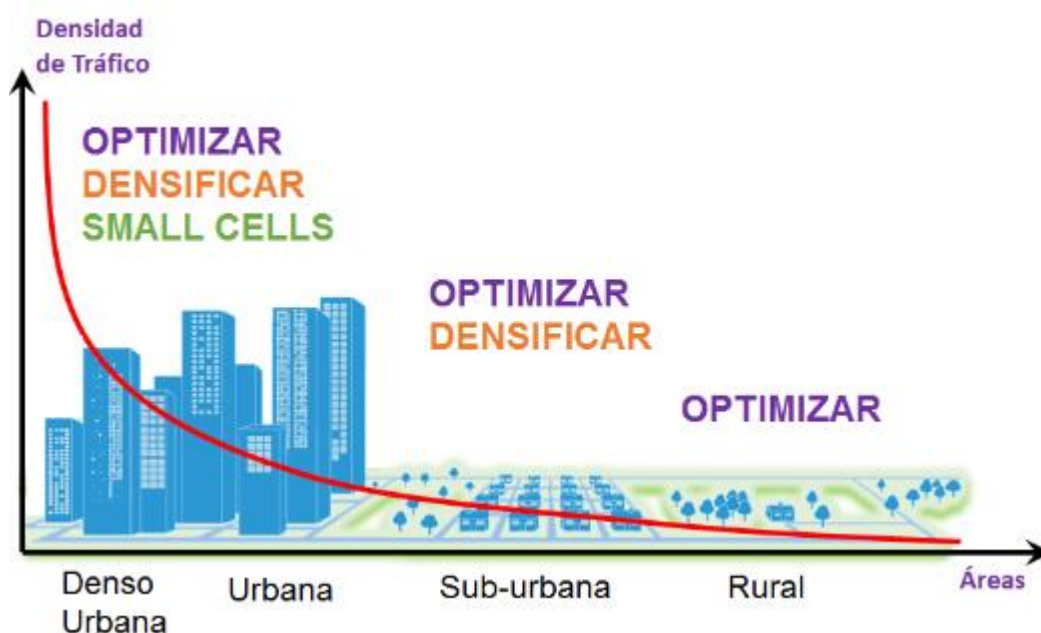


Figura 4.11 Principal campo de aplicación de las *Small Cells* [47]

En este estudio, se propone que la búsqueda y localización de sitios adecuados, o "puntos clave" para la implementación de *Small Cells*, forme parte de la fase de planificación y optimización de una red de servicios móviles de cualquier tecnología, y en especial de LTE, tanto para el beneficio de los operadores, como de los usuarios.

Ahora bien, encontrar las ubicaciones adecuadas para las *Small Cells*, de tal forma que mejoren el rendimiento de la red y a la vez sea un despliegue rentable, no es una tarea sencilla. El rendimiento de la red macro existente, debe ser analizado y comprendido correctamente, pues no es suficiente con encontrar las áreas de alto tráfico *Hotspots*, y ubicar *Small Cells* en esos lugares.

Como el objetivo es drenar el tráfico del sistema existente, se debe encontrar los "puntos clave", donde la carga y saturación es la más alta. Obviamente, esta es una combinación de la densidad del tráfico y el rendimiento de la cobertura, ya que la red macro otorga una gran cantidad de recursos de radio a los usuarios "problema".

Para poder determinar estos puntos, la información de la red debe estar correlacionada con una posición geográfica. Esto significa que las estaciones base tienen que ensamblar y entregar información correlacionada y altamente precisa, incluyendo eventos de tráfico localizados con precisión, que sirvan de base para encontrar dichos "puntos clave" para la implementación de las *Small Cells*. También podría ayudar otra información correlacionada, como por ejemplo, localizar los lugares donde se encuentran los usuarios *Premium*.

La información necesita ser procesada en el *Operations Support System* (OSS<sup>30</sup>), y los resultados deben ser presentados de manera comprensiva, como mapas superpuestos. Estos resultados deben permitir discernir cual es el tipo de *Small Cell* apropiado para implementar, y la mejor ubicación geográfica para la misma. En el futuro, las herramientas deberán ayudar a la subsecuente planificación de sistemas *indoor*, para identificar "puntos clave" a nivel *indoor*. El objetivo de estas herramientas "predictivas", debe ser, el permitir a los operadores realizar el análisis de forma remota, evitando la necesidad de efectuar pruebas de elevado costo operacional y que consumen mucho tiempo, como los *drive test* [47].

#### 4.8 HERRAMIENTAS PARA LA PLANIFICACIÓN DEL DESPLIEGUE DE SMALL CELLS

Se pondrá sobre la mesa de estudio, dos herramientas que pueden ayudar a cumplir con los objetivos planteados en la sección anterior, tanto para ambientes *indoor* como *outdoor*. En primera instancia, se detallará el funcionamiento de un potente *software* de *Infovista*®, denominado *Mentum Planet*®, como herramienta que involucra el estudio de la *cobertura* y principalmente el análisis de la *capacidad* de un sistema de comunicaciones móviles. Y en segunda instancia, se revisará una herramienta *On-line* actualizada de *Aptica*®, denominada *XIRIO*, que hará las veces de simulador, para realizar predicciones de *cobertura* en un área determinada. Considerando que si un sistema móvil LTE, logra ofrecer estas dos características: *Capacidad* y *Cobertura*, entonces la *Calidad* de servicio vendrá por añadidura.

---

<sup>30</sup> Sistema computarizado para gestionar las funciones y operaciones de una red.

#### 4.8.1 *Mentum Planet*® de *Infovista*®

*Mentum Planet*® es una solución de diseño y optimización de redes, que proporciona la mejor oportunidad para maximizar el retorno de la inversión (ROI) para un operador. Durante los últimos años, el enfoque del desarrollo de esta herramienta, ha sido en proveer a los operadores de soporte para la planificación de *Small Cells* y *HetNets* [51].

Para evaluar completamente los escenarios de interés e identificar *Huecos de Cobertura* y/o posibles *Hotspots*, las zonas típicas necesitan ser modeladas y analizadas con un *software* de diseño y optimización de red. En este caso, se puede tomar decisiones estratégicas para el despliegue de *Small Cells*, en base a las siguientes capacidades que soporta *Mentum Planet*® [51]:

- Soporte para todas las tecnologías de red actualmente desplegadas, como LTE;
  - Características de planificación automática de redes, para rápidamente crear y evaluar diferentes escenarios;
  - Gestión de la carga de tráfico, permitiendo la eficiente creación de mapas de tráfico;
  - Simulaciones avanzadas, incluyendo mapas de eficiencia espectral;
  - Análisis integrado de soluciones *Backhaul*;
  - Funcionalidades para facilitar la comparación de diferentes escenarios;
  - Sistemas de información geográfica actualizada, para la geo-localización;
  - Modelamiento avanzado de configuraciones complejas de antenas;
  - Planificación de redes en vivo: *Live Mobile Network Planning*.
- **Planificación de redes móviles en vivo**

Definir una estrategia adecuada de despliegue de *Small Cells*, es clave para los operadores móviles. Actualmente, es posible realizar un despliegue de *Small Cells*, basados en la planificación de redes móviles en vivo. *Infovista* introduce el concepto de *Live Mobile Network Planning*, que no es más que la planificación de redes con múltiples datos actualizados de la red. Para tal fin, en *Mentum Planet*® se debe cargar

los *dumps*<sup>31</sup> más actualizados que se disponga, de tal manera que no exista discrepancias entre la información real y la que muestra la herramienta. Lo que quiere decir que se efectuará una planificación de red integrada. Este concepto se lleva a cabo, a través de 3 habilidades de *Mentum Planet*® [52].

- Capacidad de obtener datos de configuración desde el OSS; no hay necesidad de hacer la congruencia de datos mediante herramientas adicionales como Excel;
- Inclusión de contadores de desempeño; poder recopilar todos los KPIS diarios;
- Integración de trazas de llamadas geo-localizadas *geo-located call traces*.

El objetivo principal es poder valerse de estas tres capacidades, para realizar las tareas de planificación y optimización de las redes heterogéneas, y para el caso específico de este estudio, de las *Small Cells*. Por ejemplo, en el área de planificación, esta herramienta tiene la *capacidad* de identificar los *Hotspots*, lo cual ahora es muy necesario ya que las redes se están sobrecargando cada vez más, y es importante conocer donde se debe implementar más recursos de red, para maximizar su desempeño.

Todo lo mencionado anteriormente, desencadena en la parte del diseño e implantación de las *Small Cells*, las cuales, como se ha venido diciendo, tienen una cobertura reducida con respecto a las macro celdas, e incrementan la eficiencia en puntos críticos.

La herramienta también puede utilizar la información de los *dumps*, para la optimización de listas de vecinos, y para la optimización de la configuración de los parámetros de RF; es decir *tilts*, azimuts, altura y tipo de antenas, por ejemplo, mediante el análisis de matrices de interferencia. Además, es posible realizar la optimización de los denominados "*Soft Parameters*", como por ejemplo, *Scrambling Codes* en WCDMA, o *PCIs y/o Tracking Area Codes (TAC)* en LTE, etc. Todas estas capacidades de análisis, conllevarán a una eficiencia mejorada, donde el esfuerzo de planificar y optimizar, se realice de manera conjunta.

---

<sup>31</sup> Se refiere a archivos que contienen una información determinada, que se ha capturado de una red, en un intervalo de tiempo definido.

- **Análisis de trazas de llamadas para el despliegue de Small Cells**

El término *Call Traces* o traza de llamada, se refiere a un rastro que se deja durante la conexión que fue establecida, entre el móvil y la red. Mientras el usuario utiliza la red, envía y recibe constantemente mensajería, dicha información es almacenada en estos archivos llamados *trazas de llamadas*, las cuales se alojan en diferentes puntos lógicos de la red, como en las RNC y eNodeB, en el caso de WCDMA y LTE, respectivamente. Adicionalmente, estas trazas contienen información de eventos, información de señalización, y permiten hacer la identificación de los móviles a través del IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*) [52].

La recolección de esta información se puede dar de 2 maneras: a través de la red, donde cada fabricante, posee formatos específicos para la adquisición de datos, y la otra manera es a través de *sondas pasivas*, las cuales se conectan a la red para capturar la información del tráfico cursado [52].

Las características principales de las trazas de llamadas es que entregan una visibilidad de hasta el 100%, permitiendo la identificación de los suscriptores locales, como de los que se encuentran en *Roaming*. También es posible adquirir datos de la red constantemente, por lo general se recolectan cada 15 minutos, lo cual da una percepción muy cercana al tiempo real. Una de las funciones más importantes que tiene *Mentum Planet*® en relación a las trazas de llamadas, es que se pueden geo-localizar.

Las *trazas de llamadas* son tomadas en formato nativo, es decir que se importa las trazas de llamada en el formato de cualquiera de los fabricantes, y *Mentum Planet*® se encarga de interpretarlos y traducirlos, para posteriormente geo-localizarlos y desencadenar en algunos de los tópicos mencionados anteriormente, como la identificación de los *Hotspots* para el planeamiento de *Small Cells*. Lo que en una versión futura ofrecerá la herramienta, es hacer la identificación de las áreas críticas, donde exista gran cantidad de eventos negativos, como por ejemplo: llamadas caídas o accesos fallidos a la red.



Por otro lado, basado en las medidas que se tienen de estos *call traces*, esta información se puede cargar en el ACP (*Automatic Cell Planning*), el cual es un modelo que *Infovista* pone a disposición para la optimización de parámetros de RF, como la calibración de *soft-parameters* y la planificación de celdas vecinas.

Y por último, *Mentum Planet*® tiene la capacidad para crear mapas, basados en el patrón de *call traces*, los cuales ya están debidamente geo-localizadas y permiten generar los *plots* de cobertura, idénticos a los que se generan basados en predicciones, pero en este caso, basados en medidas de conexiones reales. Indudablemente, esto lleva a una mejor planificación de la red, porque permite identificar los puntos exactos, donde se está teniendo la demanda más alta de tráfico.

*Mentum Planet*®, presenta una ventaja sobre herramientas de otros proveedores, que solamente se apoyan en la información que proporcionan los *call traces*, niveles de señal e identificador de los servidores; se trata del "*Pattern Matching*" (coincidencia de patrones), el cual toma las mediciones del *call trace*, y las compara con las mediciones de las predicciones, entonces se reúne la información de los *dumps*, que deben estar actualizados, y los modelos de propagación, que indican cual es el nivel de señal que se espera en ciertos puntos.

Comparando los niveles de señal con la geo-localización se puede detectar, por ejemplo, si la llamada está dentro o fuera de un edificio, con esta información es posible calcular el porcentaje de llamadas que se establecen desde interiores, para determinar si es necesaria la implementación de una *Small Cell*. Por ejemplo, en Tokio el 78% de las llamadas de una red móvil, se genera a nivel *indoor* [52].

También, es posible determinar el porcentaje de llamadas que se realizan de forma estacionaria o itinerante, por ejemplo dentro de un vehículo, en base a efectuar un análisis temporal. Por último se mencionará la característica particular e innovadora de esta herramienta, que es la geo-localización de las zonas con mayor generación de tráfico, por el uso de redes sociales como *Twitter* [52].

Un despliegue exitoso de *Small Cells* depende de la inversión en lugares adecuados en el momento adecuado. Aprovechando las capacidades de la herramienta,

mencionadas anteriormente, los planificadores de redes estratégicas, serán capaces de evaluar escenarios para el óptimo despliegue de *Small Cells*.

Ahora bien, una vez que se haya determinado la estrategia global de la red, la asignación de frecuencias; y la selección de equipamiento y tecnología, se iniciará el trabajo de diseño y optimización de la red. Este es un proceso que tiene fases destinadas a crear un plan óptimo para el despliegue de *Small Cells*. A continuación se resumirá cada una de las fases del proceso, que se proponen realizar con esta herramienta [51]:

- **Fase 1: Optimizar la red de *macroceldas***

Como primera instancia, la capa macro de la red debe ser optimizada, ya que esto determinará la necesidad y el emplazamiento para las *Small Cells*. Es recomendable realizar al mismo tiempo, la redistribución del espectro de frecuencias (*refarming*). La forma más eficiente para optimizar esta capa de red (macro), es utilizar una herramienta de Planificación Automática de Celdas (ACP), la cual viene integrada en el paquete *network design and optimization*. Dicha herramienta permite optimizar rápidamente la configuración de red, proporcionando varios beneficios que incluyen: la *capacidad* de minimizar los niveles de interferencia y de superposición de celdas. El objetivo es maximizar la eficiencia espectral a nivel global, en la capa de *macroceldas*.

Un requisito previo para la optimización de la capa macro, es utilizar un modelo de propagación adecuado, por ejemplo para entornos urbanos, especialmente uno que ha sido afinado cuidadosamente en base a un conjunto preciso de datos geo-localizados.

Además, es necesario el soporte para la tecnología aplicable, en este caso LTE, mapas de tráfico de red 3D, predicciones de cobertura y el modelado del rendimiento. Un ejemplo del análisis 3D en *Mentum Planet®*, de la potencia de la señal de referencia LTE recibida en un área urbana, se muestra en la Figura 4.12. En rojo se muestra los altos niveles de señal, y los bajos niveles en celeste.

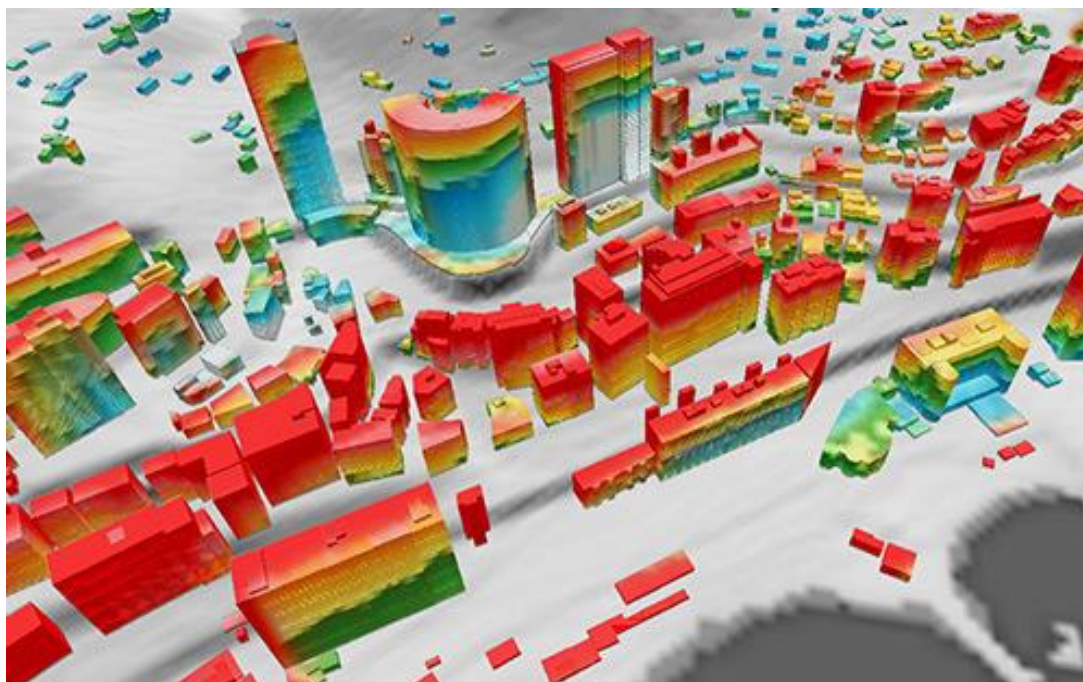


Figura 4.12 Modelamiento 3D de la cobertura LTE, *Mentum Planet*® [51]

- **Fase 2: Crear un mapa de tráfico en 3D**

Uno de los propósitos de las *Small Cells*, es drenar el tráfico de la red macro para aliviarla, lo cual no es factible, si no existe un buen entendimiento de carga actual del tráfico que se soporta. Un mapa 3D de tráfico se crea a partir de varias fuentes (ejemplo: *dumps* y *call traces*), reflejando la localización geográfica de la carga de tráfico y los *Hotspots*.

El tráfico actual por celda de la capa de macro, se puede combinar con mediciones geo-localizadas, datos geográficos de alta resolución para la precisa difusión del tráfico en 3D, y más datos dinámicos, como los patrones geográficos de uso provistos por las redes sociales (ejemplo: *Twitter*). Consolidando esta información en la herramienta, es posible lograr una buena comprensión de la variación geográfica de la demanda de tráfico, no sólo en dos dimensiones, sino también en 3D, con información de la demanda de tráfico a diferentes alturas dentro de los edificios. Un ejemplo de este tipo de mapas de tráfico 3D, es ahora mostrado en 2D en la Figura 4.13, donde se aprecia el modelamiento del tráfico total de una ciudad. Las áreas con alta demanda de tráfico se muestran en rojo, en amarillo las de mediana carga de tráfico, y en azul las de baja demanda.

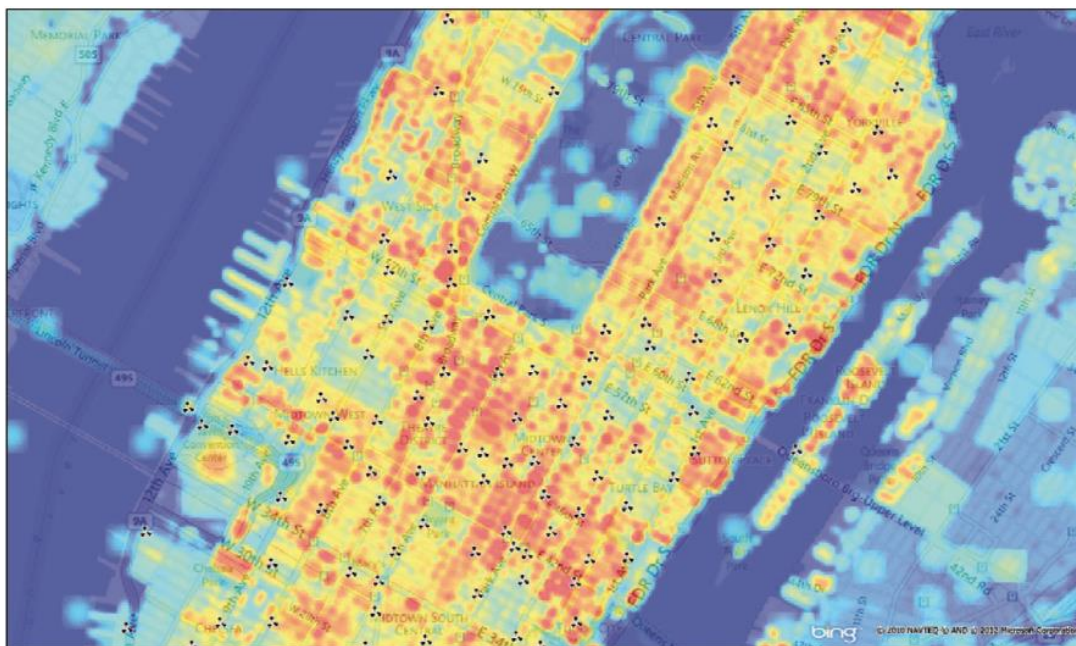


Figura 4.13 Mapa de tráfico 2D, *Mentum Planet*® [51]

- **Fase 3: Evaluar en qué lugares se obtendrá un mejor beneficio al implementar *Small Cells***

Como se mencionó anteriormente, en una red heterogénea una *Small Cell* capturará el tráfico, que de otra manera sería manejado por las *macrocelas*, aliviando la capa macro de ese tráfico y liberando recursos significativos. La cantidad de recursos liberados dependerá del área en la cual la *Small Cell* ha sido implementada. Entonces mediante el despliegue de *Small Cells* se obtiene dos beneficios: la *capacidad* adicional que puede ofrecer la *Small Cell* y la más eficiente utilización de los recursos de la capa macro.

El enfoque más eficaz es el despliegue de *Small Cells* en áreas con baja eficiencia espectral, que típicamente es el resultado de una combinación de bajos niveles de señal y altos niveles de interferencia, lo que se traduce áreas donde se obtiene un SINR reducido. Se encontrará estas condiciones en un entorno urbano, por ejemplo, en el área contenida en la intersección de dos bordes de celdas de la capa macro. Combinando los mapas de la capa macro (tanto el mapa de la eficiencia espectral como el mapa de tráfico), puede crearse un *mapa de recursos requeridos*, el cual indicará las áreas donde el despliegue de *Small Cells* será más beneficioso.



Figura 4.14 Mapa de recursos requeridos, Mentum Planet® [51]

La Figura 4.14 muestra un mapa de este tipo (*resource-need map*), que ilustra la combinación de la eficiencia espectral con la información de tráfico. Las áreas que necesitan *capacidad* adicional se pintan en rojo y amarillo. Mientras tanto, las áreas donde la red aún puede manejar la demanda de tráfico, se muestran en azul y verde.

- **Fase 4: Seleccionar la potencial ubicación de las *Small Cells* en base al criterio de *Backhaul***

También es conveniente analizar la posible ubicación de las *Small Cells*, basándose en la selección de soluciones de *Backhaul*. Esta fase dependerá de las soluciones de *Backhaul* seleccionadas y los datos disponibles que se han cargado a la herramienta. A continuación, se muestra dos ejemplos de cómo se puede crear un subconjunto de posibles ubicaciones de *Small Cells*. El número de posibles ubicaciones debe ser mayor que el número final de *Small Cells*, que se identificarán en la fase 5.

Ejemplo 1: Las *Small Cells* deben ser desplegadas en los postes de alumbrado público, a lo largo de las calles de una ciudad. Se ha adquirido una base de datos, con coordenadas de los postes y las alturas. Esto combinado con otros datos geográficos detallados, como altura de edificios y relieve del terreno, ha permitido identificar como

posibles candidatos, los postes con condiciones de LOS hacia sitios de la capa macro, como se ilustra en la Figura 4.15, donde se aprecia en color verde las potenciales ubicaciones de *Small Cells* (puntos con LOS), y en rojo las ubicaciones con NLOS, los cuales no son candidatos para emplazamientos de *Small Cells* con *Backhaul* inalámbrico, al no existir línea de vista.



Figura 4.15 Análisis de conectividad *Backhaul*, *Mentum Planet*® [51]

Ejemplo 2: Las *Small Cells* deben ser desplegadas en una zona urbana, pero no se ha identificado información acerca de las posibles ubicaciones de los sitios. En este caso, una herramienta *automática de colocación de sitio ASP*, puede ser usada para crear una base de datos de las posibles ubicaciones de los sitios. Dentro de esta lista de ubicaciones creada, se han seleccionado como candidatos potenciales, a los sitios que son capaces de conectarse a un sistema NLOS, por debajo de una condición de atenuación de enlace *Backhaul*, que se establezca.

- **Fase 5: Determinar los emplazamientos y configuración de las *Small Cells***

Con la funcionalidad *ACP Automatic Cell Planning* es posible determinar el óptimo número de *Small Cells*, su configuración y ubicación, basándose preferentemente en la eficiencia espectral, con el fin de maximizar la ganancia de *capacidad* en toda la red. La *ACP* seleccionará las ubicaciones, y las configuraciones óptimas para las *Small Cells*. Además, proporcionará el número óptimo de *Small Cells*

que se deben desplegar. Implementar *Small Cells* adicionales, más allá de ese número, serían con beneficio limitado, e incluso podrían causar interferencias que disminuirían la *capacidad* de la red.

En la Figura 4.16, se ilustra un resultado que sirve para ejemplificar la evolución de la *capacidad* al añadir *Small Cells* en una zona urbana, donde se aprecia que a partir de añadir 14 y 15 *Small Cells* adicionales, hay un decremento de la *capacidad* en el área, debido al aumento de los niveles de interferencia.

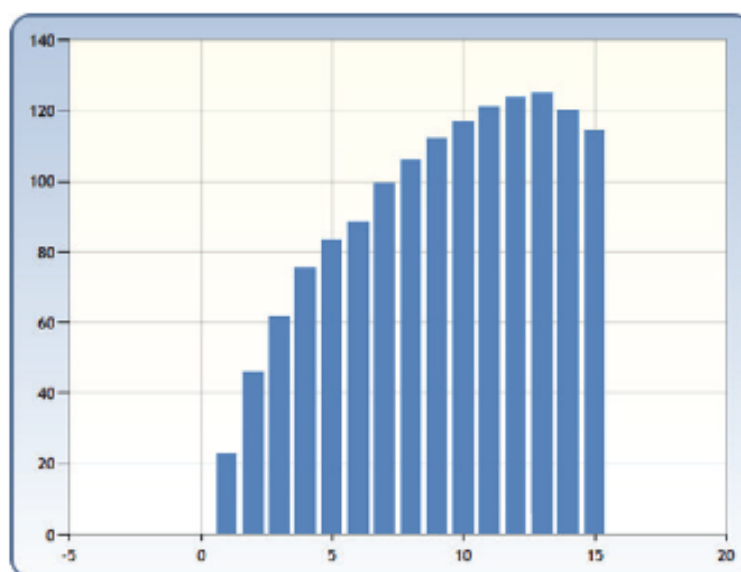


Figura 4.16 Porcentaje de Evolución de *capacidad* vs. Número de *Small Cells* añadidas en una zona urbana [51]

Tanto para efectuar la planificación de los códigos PCI o de los identificadores de celda CI, como para generar una lista de vecinos multi-tecnología, es preferible utilizar funciones automatizadas, que ofrece esta herramienta. Posteriormente, puede llevarse a cabo, las contrataciones de las ubicaciones de los sitios deseados, y el diseño final de la red de transporte *Backhaul*.

- **Fase 6: Verificar las mejoras en cuanto a *capacidad* y cobertura**

Una vez realizadas todas las fases anteriores, puede llevarse a cabo el análisis del diseño final de la red, mediante las simulaciones de *Monte Carlo*, para verificar las

mejoras en la cobertura y *capacidad* de la red, tanto en la capa de *macroceldas*, como en la capa de las propias *Small Cells*.

En la Figura 4.17 se ilustra un ejemplo de la *capacidad* de la red mejorada, antes (izquierda) y después (derecha) de la adición de *Small Cells*, donde se demuestra que un despliegue optimizado de *Small Cells*, incrementa la *capacidad* de la red. Las áreas de alta *capacidad*, se pintan en rojo y amarillo, las cuales se ha logrado expandir; mientras que las áreas con menor *capacidad*, se muestran en verde y azul.

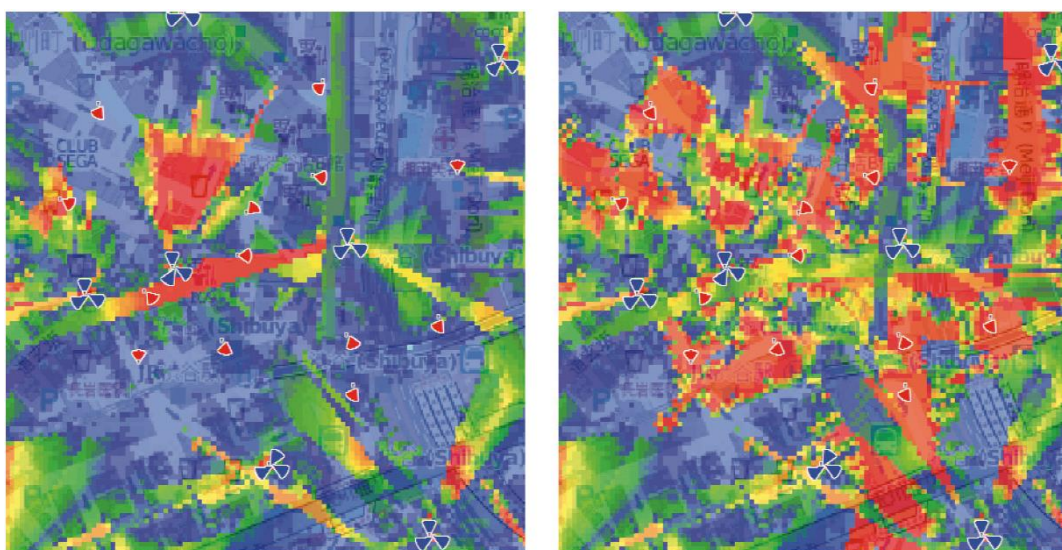


Figura 4.17 Mejoramiento de la *capacidad* en una red, *Mentum Planet*® [51]

La implementación de *Small Cells outdoor*, podrá también mejorar la cobertura a nivel *indoor*. Ahora bien, basándose en la disponibilidad de este nuevo mapa de *capacidad* y cobertura, puede ser analizada la necesidad de sistemas para el mejoramiento *indoor*.

#### 4.8.2 Simulación Profesional de Cobertura Radioeléctrica *XIRIO*®

*Sirenet*, como *software* de predicción, ya ha sido anteriormente empleado en proyectos de investigación de la ESPE [7] [57], entidad que posee licencia para el uso del mismo. Presenta un entorno de trabajo simple e intuitivo, además permite realizar simulaciones de la tecnología LTE, para el análisis de la propagación de la señal mediante *huellas de cobertura*. Sin embargo, tomando en cuenta que se pretende realizar predicciones de cobertura de estaciones de baja potencia *Small Cells* - cuya



huella de cobertura tendrá un radio de celda reducido -, y al no disponer de la cartografía digital (información de mapas) con la resolución suficiente para acercarse hasta una altura, que permita visualizar los resultados de las predicciones (100m), no fue posible utilizar *Sirenet*, para este tipo de estudio.

No obstante, una herramienta de la misma empresa Aptica®, aunque con menores prestaciones, dispone de cartografía actualizada con la resolución suficiente (100m), para mostrar la *huella de cobertura* de estaciones base con propagación reducida, como la de las *Small Cells*, además de que permite simular coberturas de sistemas LTE de última generación, incluso LTE – *Advanced*.

Se trata de *Xirio® Online*, que es la primera herramienta de planificación radioeléctrica que opera sobre una plataforma *web* y que permite al usuario trabajar de manera *Online*. Constituye una manera rápida y económica de realizar simulaciones profesionales de cobertura radioeléctrica, sobre cualquier entorno alrededor del planeta, ya sea urbano o rural, valiéndose cartografía actualizada y de alta resolución.

*Xirio® Online* en su página *web* presenta dos tipos de acceso, a través del portal *Planningtool* o *Sharepoint*. El acceso a ambas plataformas es libre y gratuito, luego de haberse registrado. A su vez, permite la gestión de la información cartográfica, de forma completamente gratuita a través de la API de *Google Maps* [60].

*Planningtool* permite la planificación radioeléctrica, realizando tareas y cálculos que abarcan, desde la parametrización y análisis de la cobertura radioeléctrica de una única estación, hasta la planificación de la cobertura de redes en escenarios complejos. Mientras que *Shareplace*, permite a los usuarios de *XIRIO® Online*, publicar los resultados de sus estudios y compartirlos con otros miembros de su organización, clientes, proveedores o incluso al público en general [60].

*XIRIO® Online*, permite el acceso libre a las funcionalidades de la herramienta, así como a realizar cálculos a baja resolución, de forma completamente gratuita. El usuario únicamente paga, cuando desea realizar los cálculos con una calidad profesional (alta resolución), lo que además, le proporciona el derecho de compartir los resultados con usuarios terceros o descargarlos a su equipo local. Este servicio

complementario de pago, fue empleado en este estudio, que utilizó cálculos y cartografía de alta resolución, para cumplir el objetivo de la siguiente sección.

#### **4.9 CASO DE ESTUDIO: Análisis de cobertura de *Small Cells* en una zona de alta demanda de tráfico en la ciudad de Quito**

Es probable que los operadores móviles nacionales que actualmente operan con la tecnología LTE, como CNT y Movistar, pronto comiencen el aumento gradual de despliegue de *Small Cells*, en base a una lista de objetivos priorizados, en zonas con mala cobertura y/o saturación de *capacidad*, ya sean *outdoor*, *indoor*, o principalmente en áreas urbanas densamente pobladas, que demandan alta utilización del servicio de voz y datos.

En este estudio, se realizará la simulación para predecir la cobertura de una *Small Cell* en un entorno exterior, dentro de una zona con alta densidad de usuarios en horas pico (*busy hour*). El análisis de la propagación de la señal, se efectuará en base a las predicciones de cobertura proporcionadas por *XIRIO® Online*, las cuales se realizarán enfocándose en una red móvil LTE 4G, que tiene implementada la CNT (Corporación Nacional de Telecomunicaciones), en la ciudad de Quito.

##### **4.9.1 Determinación del punto crítico de despliegue**

En las figuras siguientes, se ilustra los mapas que muestran la cobertura actual de la tecnología LTE, tanto en interiores como exteriores de una zona céntrica y de gran afluencia de usuarios, en la ciudad de Quito. Dichos mapas fueron obtenidos del sistema de información geográfica de cobertura (GIS) de CNT, que se encuentra disponible al público en [56], cuyas *huellas de cobertura* se encuentran actualizadas hasta Febrero 2015.

Basándose en esta información GIS de CNT, se efectuó por simple inspección, la búsqueda de un *Hotspot* densamente urbano, para la implementación de una *Small Cell*.

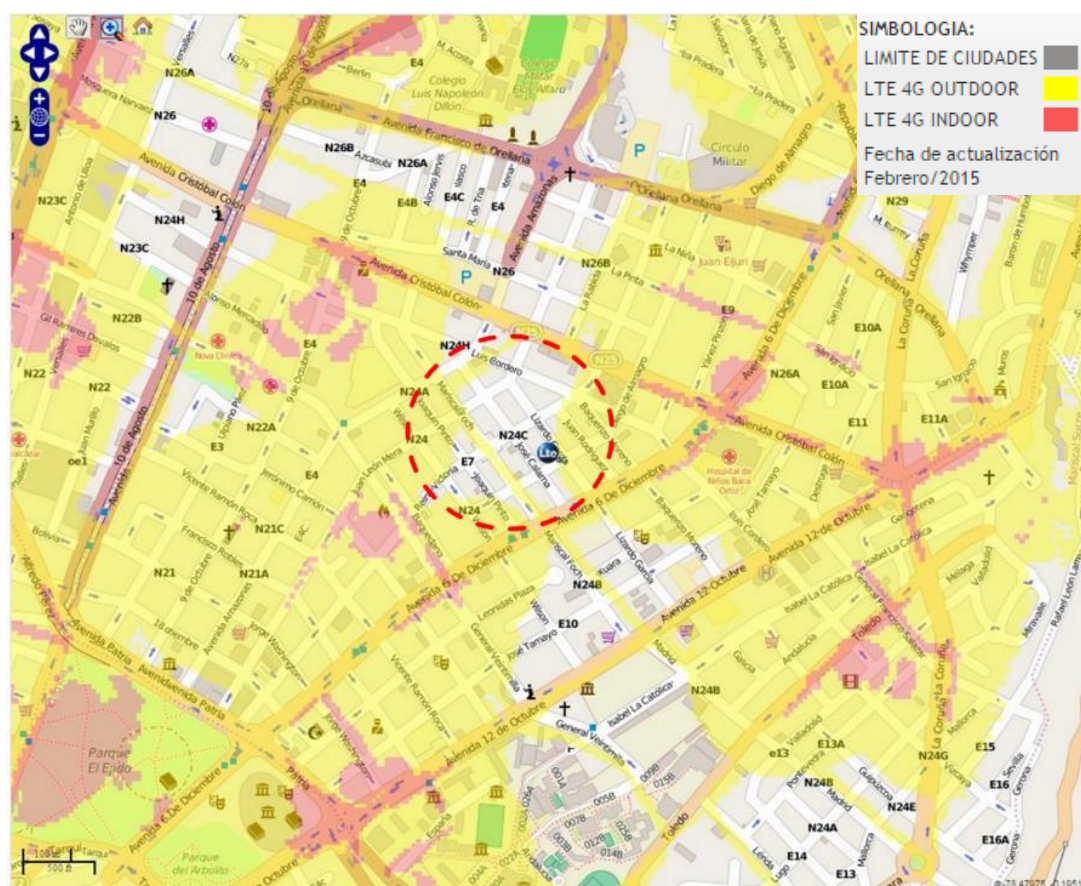


Figura 4.18 *Hueco de Cobertura* y posible *Hotspot* en una zona céntrica de la Ciudad de Quito [56]

Luego de analizar varios posibles escenarios de despliegue, por simple inspección, se determinó que existe un *Hueco de Cobertura* de la tecnología LTE, en la zona de la *Plaza Foch*, en la ciudad de Quito. Esta constituye una zona con alta demanda de tráfico, al ser un sitio turístico, con gran afluencia de usuarios o potenciales usuarios, de servicios de telefonía móvil LTE, como se muestra en la Figura 4.19.

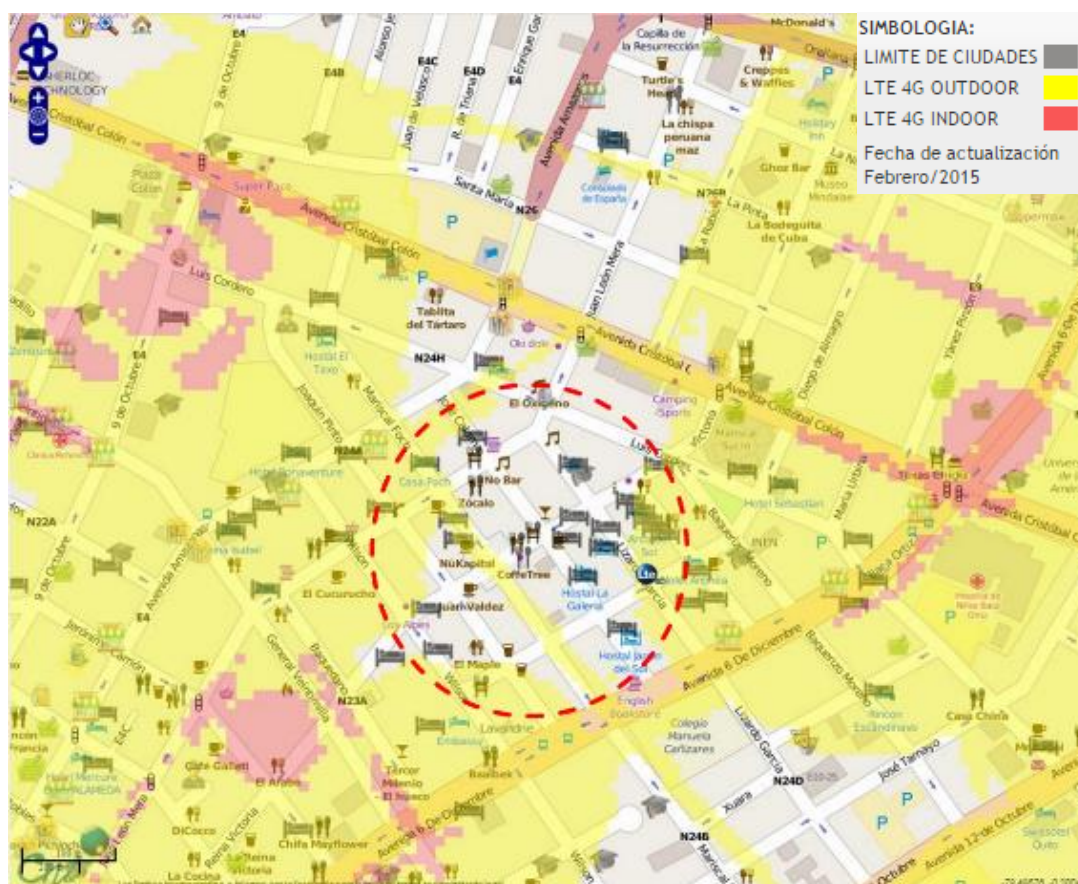


Figura 4.19 Hueco de Cobertura en una zona céntrica-turística de Quito [56]

#### 4.9.2 Análisis de Cobertura LTE utilizando XIRIO®

Se empezará indicando que, la información de coberturas de GSM y WCDMA, que también proporciona el GIS de CNT, no es tomada en cuenta para el análisis, ya que se tiene el objetivo específico de brindar cobertura 4G LTE. Además, como se estudió en la sección 4.3.3, existe la facultad del IRAT *Handover*, y ya que todas las tecnologías operan en frecuencias portadoras distintas, por lo general, no se tiene inconvenientes de interferencia, al suscitarse una posible superposición de las zonas de cobertura entre tecnologías diferentes.

Por otro lado, se va a asumir que las *macrocelas* circundantes (sitios macro LTE), se encuentran aproximadamente en el centro de las zonas que se pintan en rosado en las Figuras 4.19 y 4.20.

### 4.9.3 Parámetros para la predicción de Cobertura

A continuación, se va a determinar los datos de entrada necesarios para la simulación en *XIRIO*®, con el fin obtener los resultados de la *Cobertura individual* de una estación base de baja potencia *Small Cell*, ubicada estratégicamente, conforme a las apreciaciones anteriores. Estos resultados representan valores de la señal impuesta por un transmisor - en términos de campo eléctrico o potencia-, en todos los puntos dentro del área que se seleccione, teniendo en cuenta el modelo de propagación y las características elegidas, tanto del transmisor y como del receptor.

**Tabla 4.2**  
Creación de un nuevo estudio

PARÁMETRO	VALOR ELEGIDO
Tipo de Servicio	<b>Servicio Móvil.</b> En función de la selección de este parámetro, <i>XIRIO</i> ® propone una serie de parámetros radioeléctricos por defecto, adecuados para el cálculo a realizar, aunque siempre existe la posibilidad de modificarlos.
Modo de Operación	<b>LTE - TDD.</b> Como se mencionó en la sección 2.3.1, el modo de operación apropiado para las <i>Small Cells</i> es División de Tiempo Dúplex TDD
Ancho de Banda	<b>20 MHz.</b> Se ha seleccionado este valor con el objetivo de que los usuarios puedan obtener mejores <i>throughputs</i> .

Las especificaciones técnicas del tipo de *Small Cell* a implementar, se muestran en el Anexo "B". Entonces, utilizando el modo asistente se va a crear el estudio de cobertura, el cual solicita cierta información, que se ha tabulado de la siguiente manera:

**Tabla 4.3**  
Nombre, ubicación y sectorización de la estación base

PARÁMETRO	VALOR ELEGIDO
Nombre	<b>SmallCell_LTE_PlazaFoch_UIO</b>
Ubicación Estratégica	<b>Latitud:</b> 00°12'09.37"S <b>Longitud:</b> 078°29'26.43"W
Sectorización	<b>Tres Sectores.</b> Para obtener mejor capacidad



Figura 4.20 Emplazamiento y tipo de Small Cell a utilizar [59]

Ahora bien, habiendo determinado los parámetros anteriores, corresponde ingresar la parametrización tanto del Transmisor (enlace descendente) y del Receptor (enlace ascendente), que en este caso es la *Small Cell*, y el dispositivo móvil LTE, respectivamente. Lo recomendable para el ingreso de datos en un *software* de simulación, es considerar los valores más altos en lo referente a pérdidas y ruido [57].

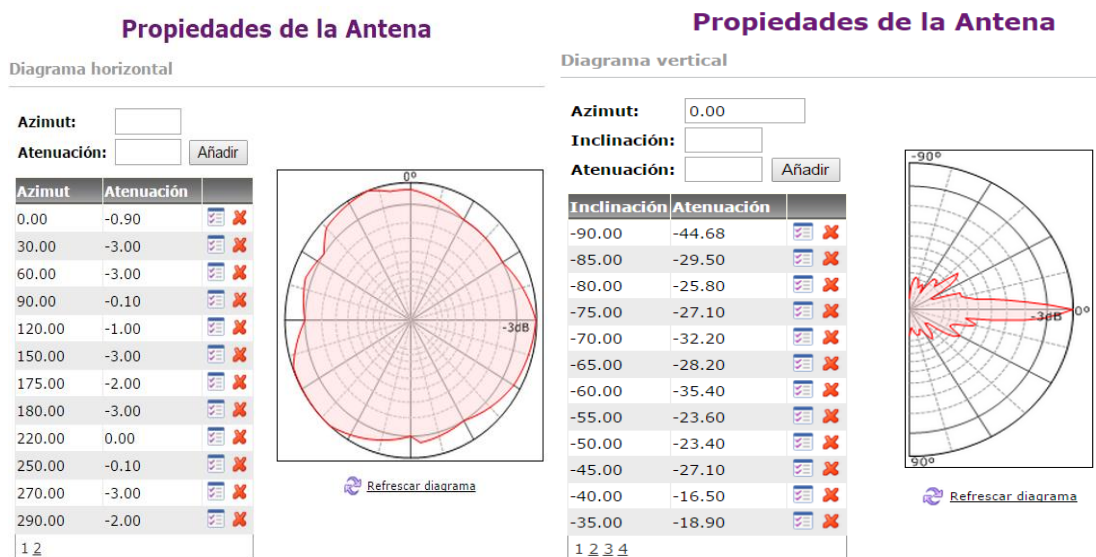


Figura 4.21 Patrón de radiación Horizontal (izquierda) y Vertical (derecha)

**Tabla 4.4**  
**Configuración de parámetros de la Estación Base y de la Antena**

PARÁMETRO	VALOR ELEGIDO
Tipo de Antena y Ganancia	<b>4G Antena 6.8 dBi Omnidireccional 360°.</b> Especificaciones y patrones de radiación, se muestran en el Anexo "C". <i>Tri-Sector Pseudo Omni Cylindrical Antenna</i>
Diagrama Polar de la Antena	<b>Figura 4.21.</b> Diagramas Horizontal y Vertical
Frecuencia de Transmisión	<b>1700 MHz</b>
Polarización de Antena	<b>Vertical</b>
Altura de Antena	<b>10m.</b> Sobre el nivel del terreno. Para coberturas micro-celulares, las antenas de las estaciones base generalmente se sitúan bajo los tejados de estructuras urbanas, cuyas alturas fluctúan ente 3 y 10 metros sobre el nivel del suelo [57].
Orientación	<b>0° Azimut.</b> Por ser una antena omnidireccional, no influye la orientación
Inclinación	<b>0° Tilt Mecánico</b>
Potencia de transmisión	<b>32 dBm</b>
Pérdidas	<b>10dB.</b> Entre la antena y el amplificador
Tipo ICIC	<b>Dinámico</b>
Eficiencia ICIC	<b>50%</b>
MIMO	<b>2x2</b>
Ganancia MIMO	<b>1.7 dB</b>
Carga de Tráfico	<b>70%</b>
Factor de Ruido	<b>6dB</b>

**Tabla 4.5**  
**Configuración de parámetros del Terminal Móvil**

PARÁMETRO	VALOR ELEGIDO
Tipo de Antena y Ganancia	<b>4G Antena 2 dBi Omnidireccional.</b>
Polarización Antena	<b>Vertical</b>
Altura Antena	<b>1.5m.</b> Altura promedio de una persona
Pérdidas	<b>5dB</b>
Potencia de transmisión	<b>23 dBm</b>
Frecuencia de transmisión	<b>0° Azimut</b>
Factor de ruido	<b>7 dB</b>
MIMO activo	<b>SI</b>
RSRP <i>threshold</i>	<b>-112 dBm.</b> Umbral de medición

Se tomará como escenario ejemplo, el entorno urbano que rodea a la *Plaza Foch* en la ciudad de Quito, donde las condiciones topográficas de la zona permiten

determinar que prácticamente se trata de una planicie, que carece de declives geográficos.

Tomando en cuenta estas particularidades, y el rango de parámetros para la utilización de COST 231 *Walfisch – Ikegami*, mostrado en la Tabla 4.6, este sería el modelo de propagación apropiado para la simulación, según el estudio realizado en [57].

**Tabla 4.6**  
**Modelo de Propagación COST231 *Walfisch – Ikegami* [57]**

MODELO DE PROPAGACIÓN	COST231 <i>Walfisch - Ikegami</i>
Entornos:	Urbanos, para servicios móviles y acceso a banda ancha
Rango de Frecuencia:	800MHz < $f$ < 2000 MHz
Altura del Transmisor:	4m < $ht$ < 50m
Altura del Receptor:	1m < $hr$ < 3m;
Alcance:	0,02Km < $d$ < 5Km;

**Tabla 4.7**  
**Propiedades del Método de Cálculo utilizado**

PARÁMETRO	VALOR ELEGIDO
Método de propagación	<b>COST 231 <i>Walfisch - Ikegami</i></b>
Resolución	<b>100 m/pixel.</b> Mapa de Altimetría mundial de Aptica
Factor K	<b>1,333.</b> Es el factor por el que se debe modificar el radio de la tierra para calibrar la curvatura de la onda electromagnética. Se utilizó el valor por defecto.
Margen de desvanecimiento	<b>10 dB.</b> Es el valor por el cual, el nivel de señal recibida puede ser reducido, sin causar que el rendimiento del sistema caiga por debajo de un valor umbral especificado.
Pérdidas por penetración en interiores	<b>5 dB</b>
Tipo de terreno	<b>Centros Metropolitanos</b>

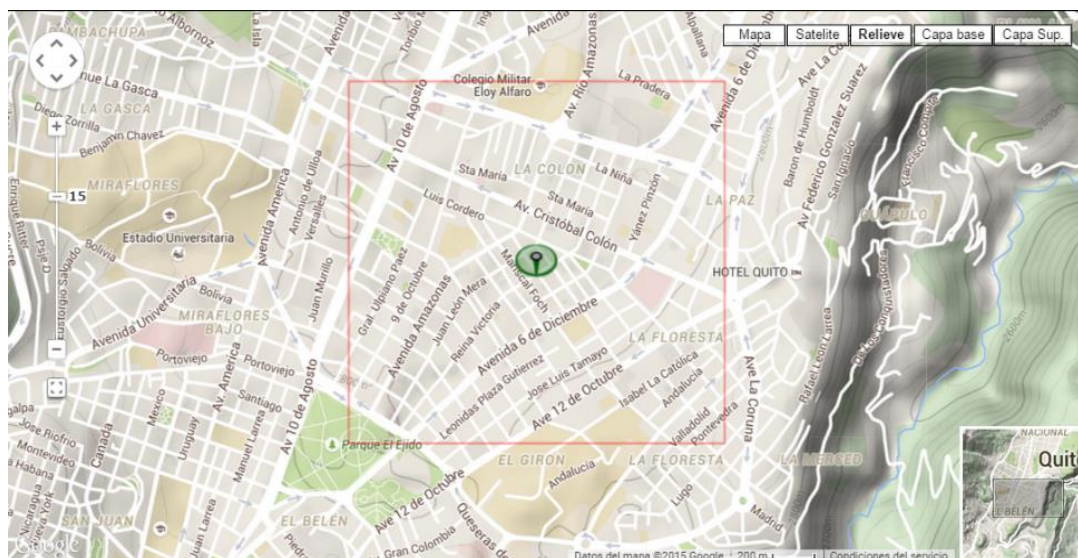
#### • Configuración de área de cálculo

El área de cálculo define los puntos donde se va a realizar el cálculo de señal recibida. Se puede introducir manualmente las coordenadas de esta área, o dibujarla directamente sobre el visor, tal como se muestra en la Figura 4.22.



**Tabla 4.8**  
Configuración del área de cálculo

PARÁMETRO	LATITUD	LONGITUD
Esquina NorOeste	00°11'43.43"S	078°29'52.84"W
Esquina SurEste	00°12'32.40"S	078°28'59.70"W



**Figura 4.22** Configuración del área de cálculo

#### • Configuración de los rangos de señal

El resultado del estudio de cobertura es una mancha de transparencia formada por múltiples colores, los cuales representan el nivel de señal disponible en cada punto. Es posible modificar dichos colores, y los niveles de señal asociados a cada color, para obtener un resultado personalizado [60].

**Tabla 4.9**  
Configuración de los rangos de señal

COLOR	RANGOS DE SEÑAL	DESCRIPCIÓN
Verde	[-92, Infinito] dBm	Bueno
Gris	[-102, -92] dBm	Medio
Celeste	[-112, -102] dBm	Regular
Sin color	[-Infinito, -112] dBm	Sin cobertura

#### 4.9.4 Resultados de la predicción de Cobertura

Al finalizar el ingreso de datos, se crea el estudio "Cobertura\_4G\_PlazaFoch\_UIO", posteriormente se selecciona el tipo de cálculo a realizarse, el cual puede ser *Calculo gratuito a baja resolución*, o el *Cálculo a alta resolución*. Este último fue utilizado para este caso, que luego de un proceso de validación y cálculo del precio, generó un monto a pagar. Una vez realizado el pago, se obtiene la predicción de cobertura, tal como se muestra en la Figura 4.23, la cual muestra los rangos de señal, representados por colores sobre el mapa.

Al realizar el análisis de propagación de la señal, entre la *huella de cobertura* que proporciona la simulación, en contraste con la información de coberturas 4G del GIS de CNT (Figura 4.18), se verifica que el solapamiento entre la cobertura de las *macroceldas* circundantes y la cobertura de la *Small Cell* es mínimo, razón por la cual probabilidad de interferencias se minimiza, causando un mínimo o nulo impacto a la capa de *macroceldas*.

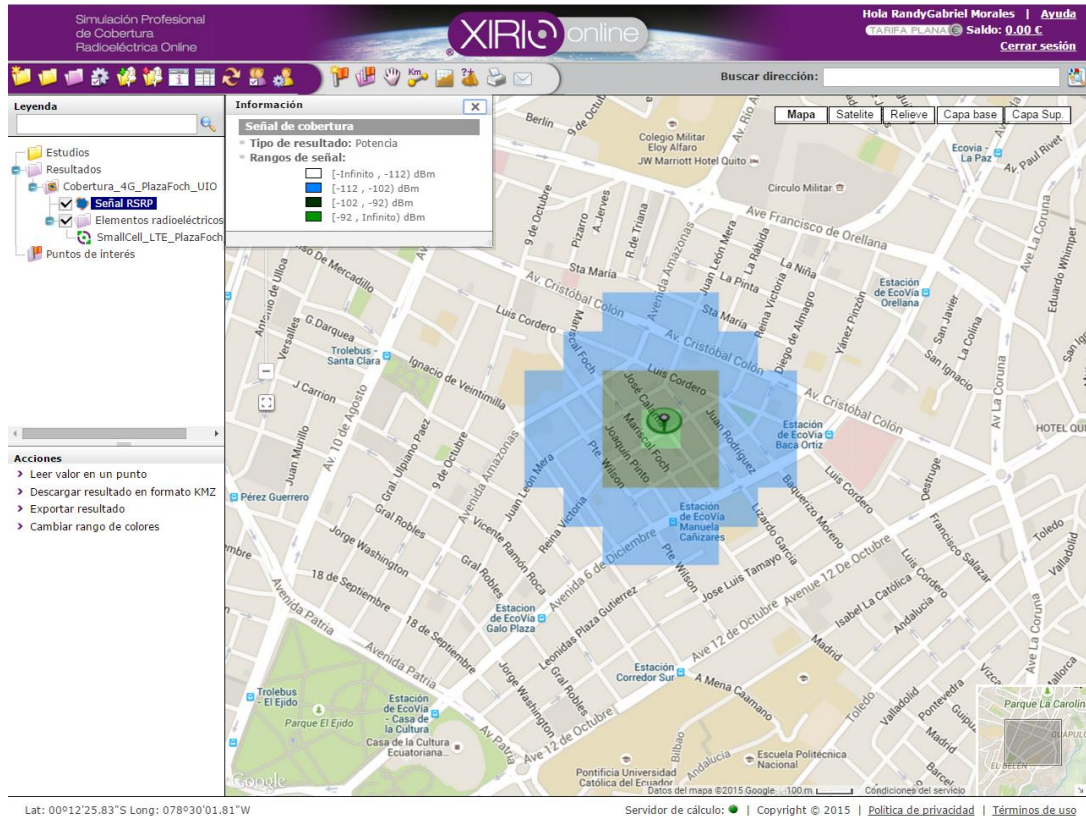


Figura 4.23 Resultado de la predicción de cobertura con Xirio®

El resultado que se obtiene tras el cálculo de una cobertura, es el nivel de señal en cada punto. El resultado del estudio de cobertura tiene asociada la acción "leer valor en un punto", que permite obtener el nivel de señal en una ubicación mediante la selección de la misma en el visor. El valor de señal será mostrada en una ventana de información [60].

Las Figuras siguientes, 4.24, 4.25 y 4.26, muestran los niveles de señal que se proyecta obtener en cada punto, según su rango ubicado. En este caso, fue posible proyectar la cobertura que tendrá una *Small Cell*, en un área donde la cobertura de las *macrocelas* circundantes de CNT es limitada.

Con esto se determina, que los problemas de cobertura en este *Hotspot*, podrán ser solventados de manera eficiente en un radio de cobertura efectivo de aproximadamente 150 metros. Adicionalmente, la Figura 4.27, muestra los resultados exportados al formato de *Google Earth*, donde pueden ser apreciados en 3D.

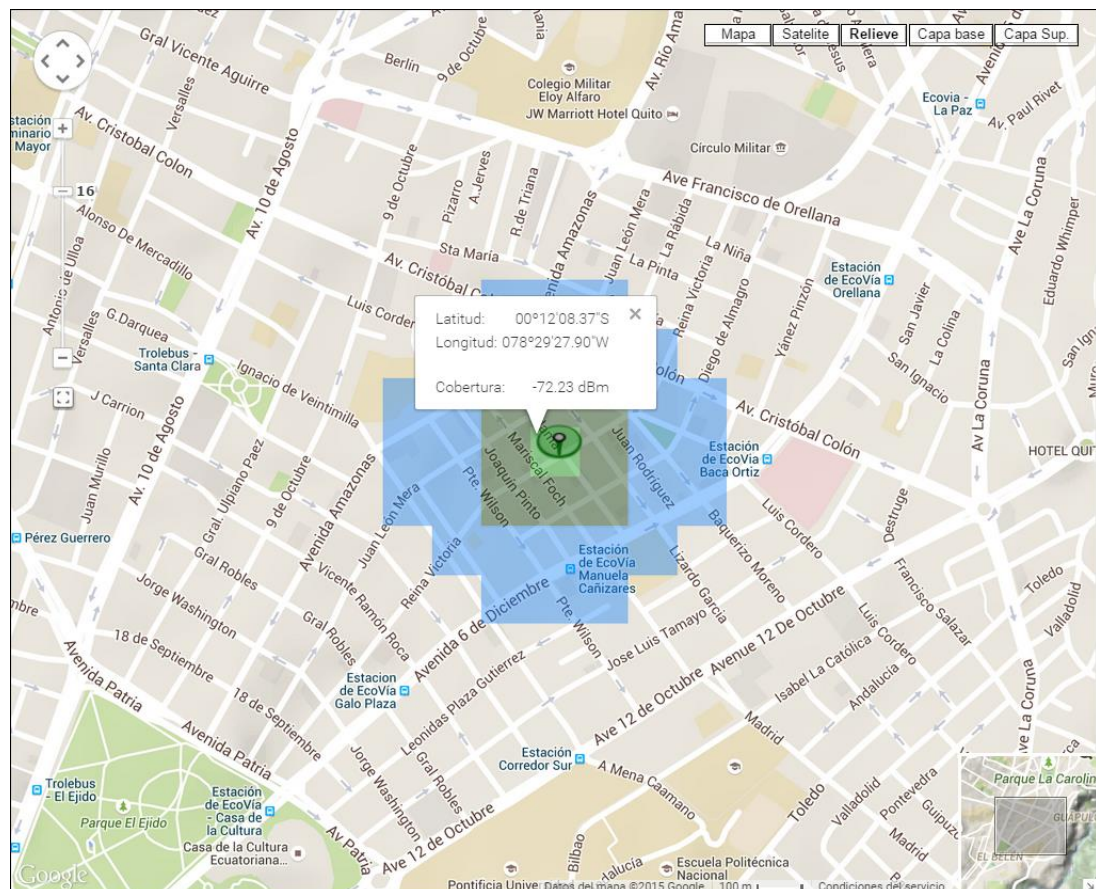


Figura 4.24 Resultados de cobertura en el rango de señal bueno

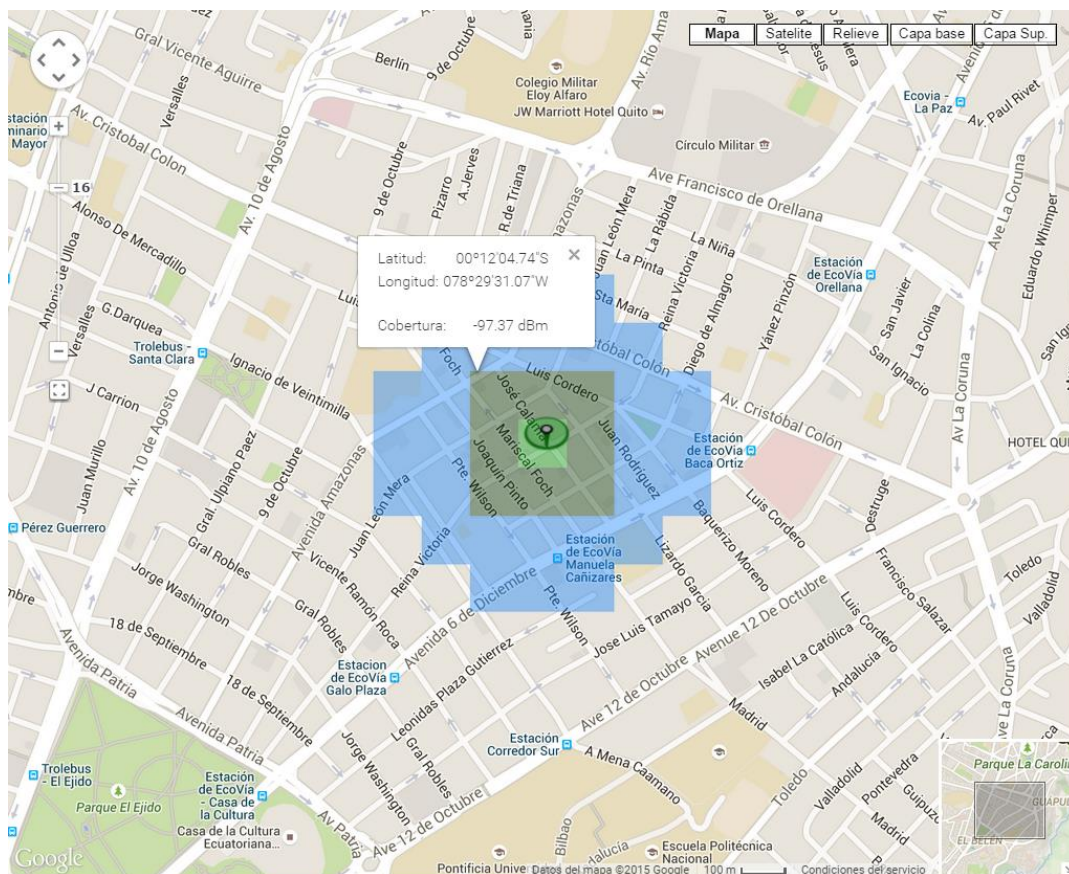


Figura 4.25 Resultados de cobertura en el rango de señal regular

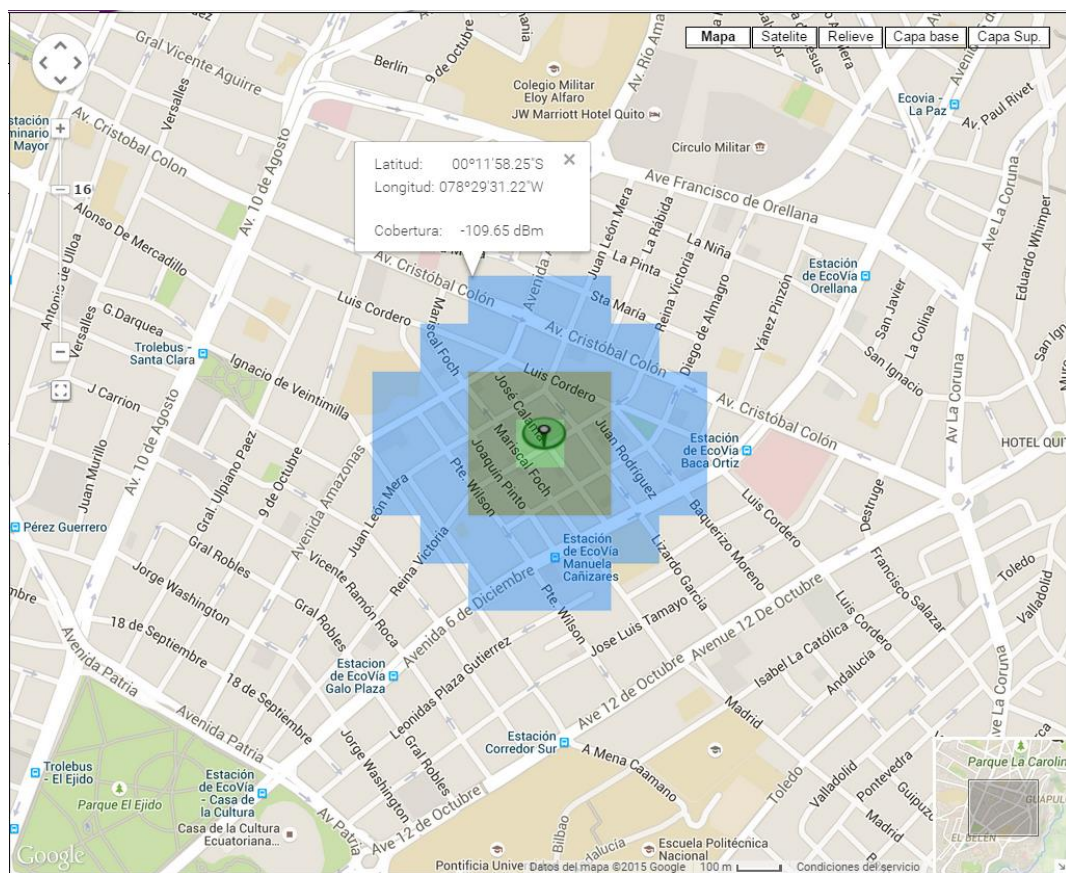
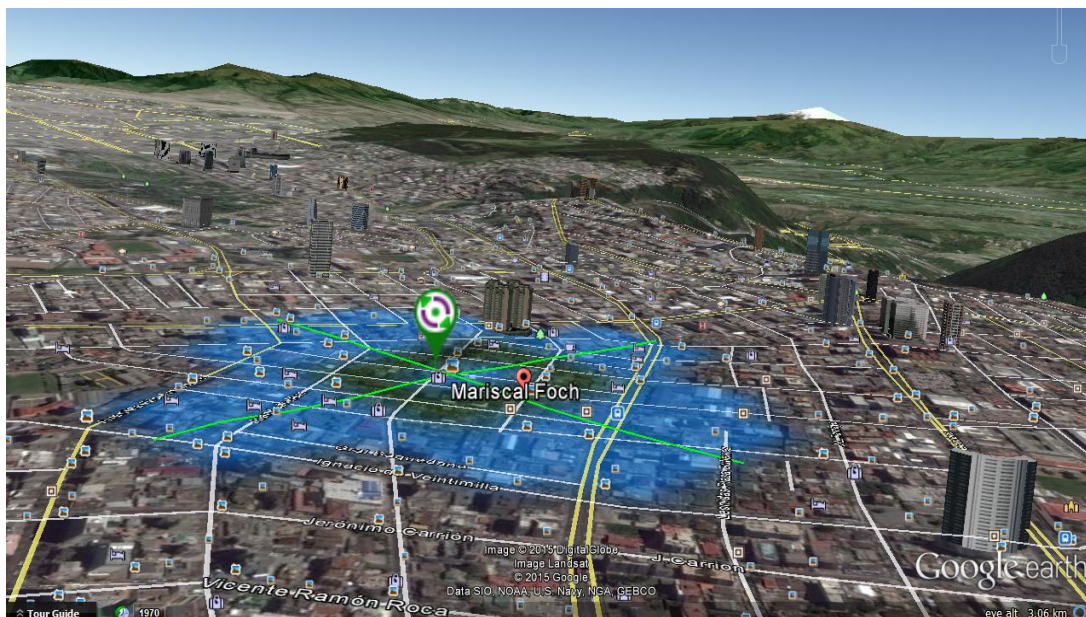


Figura 4.26 Resultados de cobertura en el rango de señal malo



**Figura 4.27 Resultados de cobertura 3D en Google Earth**

En base a este estudio y análisis, se propone la implementación de una *Small Cell*, para solventar problemas de *capacidad*, cobertura y calidad en dicha zona. El objetivo de la simulación de cobertura en este escenario, es que sirva de ejemplo estratégico para futuros despliegues de *Small Cells* en zonas con condiciones similares de cobertura y carga de tráfico.

#### **4.10 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE SMALL CELLS Vs. DAS**

La capa de *Small Cells*, también puede incluir otros tipos de tecnologías complementarias de acceso inalámbrico, el uso de Sistemas Wi-Fi para la utilización de espectros no licenciados, o Sistemas de Antenas distribuidas (DAS).

##### **4.10.1 Sistemas de Antenas Distribuidas**

Los sistemas de antenas distribuidas (DAS) a menudo proporcionan cobertura inalámbrica en áreas que experimentan baja intensidad de señal; por ejemplo, en túneles, y lugares de alta concurrencia como centros comerciales.

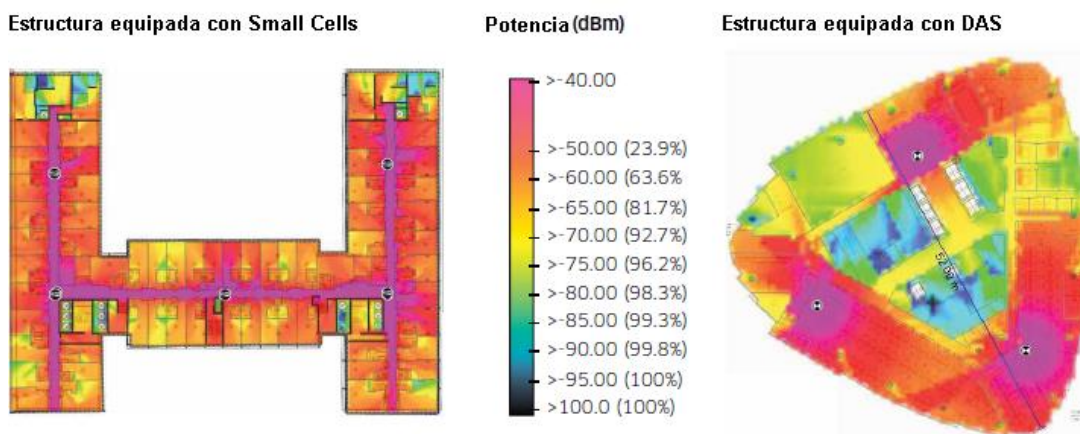
Del mismo modo, las *Small Cells* inicialmente también se han dirigido a zonas de cobertura reducida. Aunque ambos parecen apuntar a las mismas aplicaciones,

puede haber diferencias significativas en la arquitectura y el diseño entre ellos, dependiendo de la situación que se está abordando [55].

#### 4.10.2 Similitudes entre DAS y *Small Cells*

Las principales similitudes entre los DAS y las *Small Cells*, se pueden resumir de la siguiente manera:

- Ambos satisfacen la necesidad de ampliar la cobertura.
- Ambos son compatibles con la tecnología MIMO.
- Tanto el DAS como las *Small Cells* dependen de la conectividad de alta velocidad que provea el *Backhaul*.
- Ambos requieren las mismas consideraciones de ingeniería y despliegue.



Nota: Los resultados mostrados son únicamente ilustrativos

Figura 4.28 Cobertura de las *Small Cells* versus un sistema DAS [55]

#### 4.10.3 Diferencias entre DAS y *Small Cells*

Ahora bien, las diferencias principales entre el DAS y las *Small Cells* se pueden resumir de la siguiente manera:

- Un DAS puede requerir más esfuerzo de instalación que una *Small Cell*.

- Un DAS requiere un transpondedor<sup>32</sup> intermedio entre los puntos de acceso y la estación base transceptora, mientras que las *Small Cells* LTE pueden conectarse directamente con el *Core*.
- Las *Small Cells* proveen de mayor *capacidad*, al ser elementos de red con independencia de tráfico. La *capacidad* de los DAS en cambio, está limitada a la capacidad restante que tiene la estación base transceptora (donante), cuando están conectados a un sistema repetidor.
- Un sistema DAS puede ser desplegado con un *Backhaul* de alta *capacidad* y baja latencia, como lo es Ethernet basado en fibra óptica. Por otro lado, las *picoceldas* y *microceldas* necesitan ser desplegadas con un *Backhaul* dedicado hacia el *Core*, o con un *Backhaul* que se cargue sobre internet.
- Los sistemas DAS a menudo, no ofrecen soporte para el uso de MIMO, ya que requiere de una red coaxial doble. Para habilitar MIMO, con el objetivo de incrementar el *throughput* y la *capacidad*, en efecto, requerirá entonces de una instalación DAS adicional, completamente nueva, en paralelo a la existente.

#### 4.11 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE SMALL CELLS LTE Vs. SISTEMAS Wi-Fi

Como se ha mencionado en secciones anteriores, según estadísticas y proyecciones aproximadamente el 80% del tráfico de datos móviles se genera a nivel *indoor*, y en los denominados *Hotspots*. Para satisfacer la gran demanda de *capacidad* en estos lugares, dos soluciones populares serán tratadas en esta sección: la expansión de los sistemas Wi-Fi, y el despliegue de *Small Cells* con tecnología LTE.

Las *Small Cells* y los sistemas Wi-Fi, actualmente pueden compartir algunas características. Pese a que la mayoría de *smartphones* y dispositivos móviles en general, vienen ahora equipados con receptores Wi-Fi, los operadores móviles aún promueven el uso de *Small Cells*, en los diferentes escenarios estudiados anteriormente.

---

<sup>32</sup> O *Transponder*, es un dispositivo utilizado en telecomunicaciones que contiene un transmisor y un contestador.

Como se sabe, el servicio Wi-Fi también puede ser aprovechado en los dispositivos móviles, para realizar llamadas VoIP con algunos de los métodos analizados en la sección 4.3.3, a la vez que es práctico para obtener altas velocidades de datos en un amplio ambiente *indoor*.

Sin embargo, el número de llamadas simultáneas VoIP se verá limitado por los sistemas Wi-Fi, ya que estos limitan la cantidad de tráfico, para evitar la puesta en cola de paquetes que pueden causar latencia. Dado que las llamadas de voz tienen requisitos en tiempo real, la latencia en VoIP no es tolerable. No obstante Wi-Fi puede aplicar mecanismos de calidad de servicio QoS, para dar alta prioridad a los paquetes de voz durante su transmisión para evitar *cuellos de botella* [53].

En términos de fiabilidad, las *Small Cells* son convenientes, ya que éstas permiten un *Handover* automático y sin problemas, entre la red celular principal y la red doméstica. Otra ventaja es que cuando se usa los HeNB, los usuarios no tienen que preocuparse de perder su conexión, mientras se alejan del rango de cobertura de su casa, evitando así, por ejemplo: la caída de llamadas, y el corte momentáneo del servicio de datos.

Por otra parte, como se ha mencionado las *Small Cells* por defecto utilizan un espectro *licenciado* estrictamente asignado por el operador, lo que hace que su servicio sea menos vulnerable a la afectación que puedan causar otras transmisiones Wi-Fi aleatorias. Sin embargo, recientemente algunos fabricantes, han incorporado a sus *Small Cells*, el soporte para el uso de espectro *no* licenciado, lo cual ha comenzado a atraer cierta atención, y aún se encuentra en discusión para su desarrollo, en miras a la generación 5G [54].

A continuación se muestra el análisis de los resultados de las pruebas realizadas por *Huawei*, con respecto al desempeño de sistemas Wi-Fi versus *Small Cells* LTE, donde se demuestra que las *Small Cells*, proporcionan muy buena estabilidad y brindan satisfacción de calidad de servicio a la experiencia del usuario, especialmente en escenarios con alta carga de tráfico.



### 4.11.1 Escenario y entorno de pruebas

La comparación de desempeño se hace en torno a una *Small Cell* LTE y un punto de acceso Wi-Fi (*Access Point*), LTE se basa en el *Release 8*, mientras que Wi-Fi se basa 802.11n. El entorno de pruebas se desarrolla con las configuraciones detalladas en la Tabla 4.10, en un escenario de una sola celda (sin interferencia inter-celda), ya que Wi-Fi comúnmente es desplegado en escenarios *indoor* aislados. Además, puesto que Wi-Fi es un sistema TDD, se ha elegido *Small Cells* TDD-LTE para dichas pruebas comparativas [46].

**Tabla 4.10**  
Configuración de pruebas comparativas entre *Small Cells* LTE y Wi-Fi [46]

Configuración	<i>Small Cell</i>	AP Wi-Fi
Frecuencia Portadora	2.6 GHz	2.4 GHz
Potencia de Transmisión	23 dBm	24 dBm
Tipo	TD-LTE eNodeB, basado en Release 8	TP-link <i>router</i> , basado en 802.11n
Móviles de prueba	5 móviles que soportan hasta 150 Mbps a 20 MHz con 2 antenas	5 estaciones de categoría alta, 3 laptops y 2 <i>routers</i>
Antenas MIMO	DL: 2x2 UL: 1x2	DL: 2x2 UL: 2x2

### 4.11.2 Análisis de resultados

- **Latencia**

Mediante una aplicación para subir paquetes pequeños a un servidor FTP, *Huawei* realizó pruebas de *ping*, para medir la *latencia*. Se simularon diferentes escenarios de carga, hasta con 4 usuarios concurrentes. La Figura 4.29 muestra la variación de la latencia versus el incremento de usuarios conectados. Se aprecia que la latencia del sistema LTE, permanece estable en 10 ms, mientras que el sistema Wi-Fi, a medida que acoge a más usuarios, aumenta drásticamente su latencia desde 7 hasta 70 ms [46].

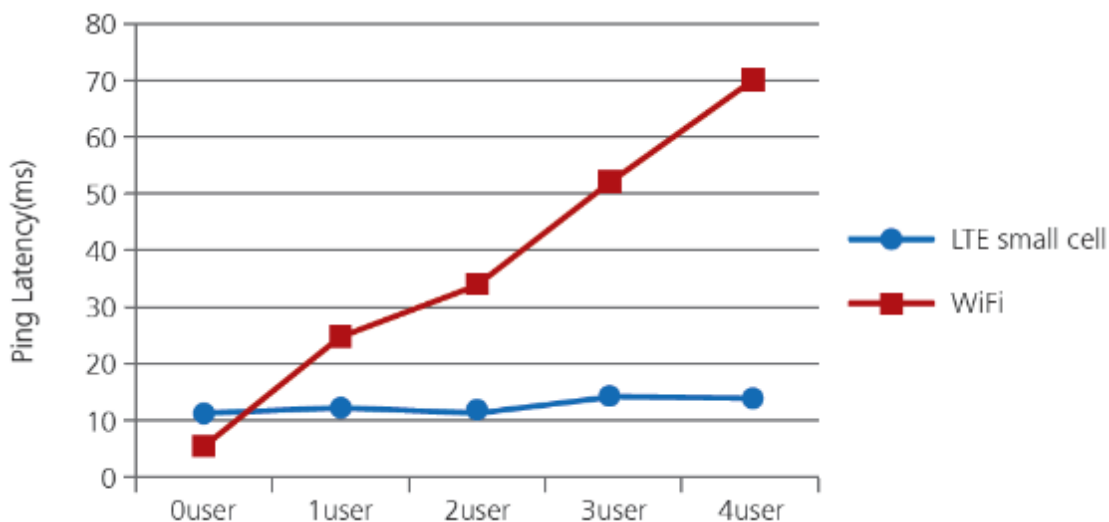


Figura 4.29 Comparación de latencia entre una *Small Cell* LTE y Wi-Fi [46]

- **Tiempo de Descarga**

De igual forma, *Huawei* realizó pruebas del tiempo que se tardan los dispositivos en descargar información de un servidor FTP, en un escenario que contiene desde uno hasta 5 usuarios. Luego combinó 2 usuarios descargando archivos de un FTP y 3 usuarios haciendo uso del servicio de *video online*. En la Figura 4.30 se muestran los resultados obtenidos, donde se aprecia que el tiempo de descarga con una *Small Cell* LTE se mantiene constante, bajo condiciones multi-usuario. Mientras que el tiempo de descarga con Wi-Fi, se incrementa a medida que acoge a más usuarios.

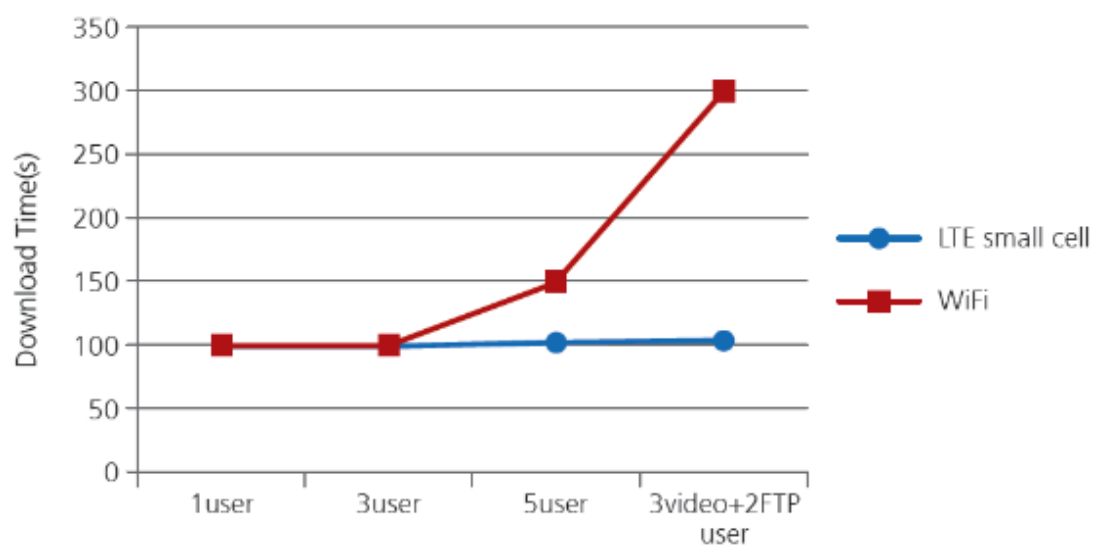
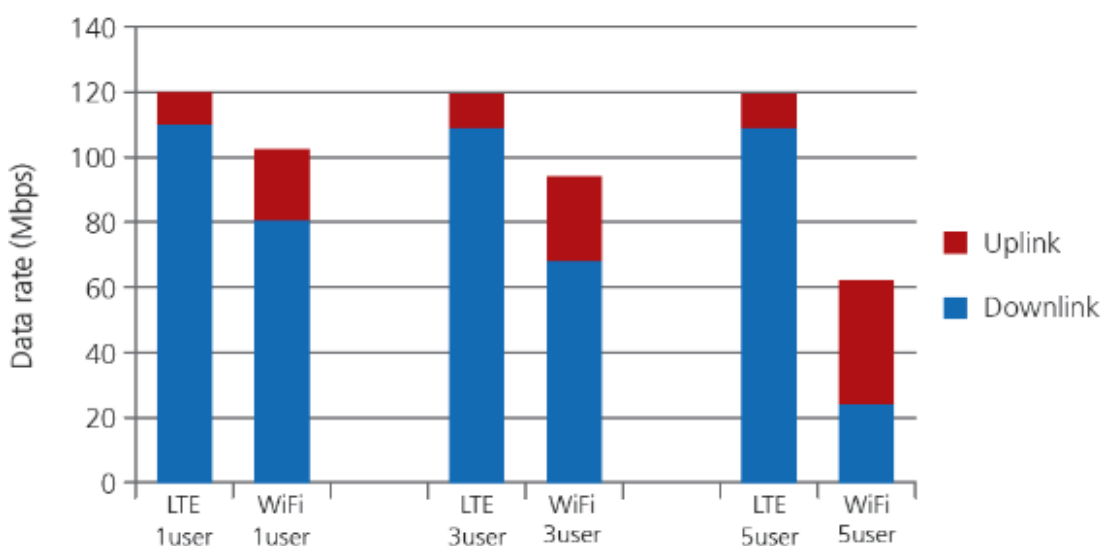


Figura 4.30 Comparación de tiempo de descarga entre una *Small Cell* LTE y Wi-Fi [46]

- **Throughput - Calidad**

En la Figura 4.31, se muestra los resultados del *throughput* alcanzado por un número diferente de usuarios activos, dentro de una celda LTE y en un área Wi-Fi. *Huawei* realizó las pruebas con diferente densidad de usuarios, registrando las velocidades *Uplink* y *Downlink* de una transferencia, desde y hacia un servidor FTP.

Los resultados demuestran que *throughput* que brinda la celda LTE se mantiene invariante, independientemente del número de usuarios conectados, mientras que nuevamente, el servicio Wi-Fi ofrece menores prestaciones a medida que aumenta el número de usuarios, lo que se refleja en velocidades de transmisión reducidas [46].



**Figura 4.31** Comparación de *throughput* UL/DL entre una *Small Cell* LTE y Wi-Fi [46]

En base al análisis de resultados, se puede concluir que la tecnología Wi-Fi es adecuada para aplicarse en despliegues residenciales o de pequeña cobertura, donde exista un mínimo número de usuarios, como por ejemplo en una casa, o en una empresa pequeña.

Como se observó, la gestión de la red de un escenario de alta densidad de usuarios, se puede convertir en un *cuello de botella* para los sistemas Wi-Fi, lo cual se traduce en la inestabilidad e ineficiencia del servicio.

Se pueden realizar estudios, para mejorar el rendimiento de Wi-Fi bajo las condiciones anteriormente mencionadas, considerando siempre la relación costo-beneficio, para una máxima eficiencia. Teniendo en cuenta las fortalezas de cada una, se hace evidente que las tecnologías Wi-Fi y *Small Cells* juntas pueden completar el conjunto de herramientas que los operadores necesitan para manejar el reto de la capacidad.

#### 4.12 PROYECCIONES DE TRÁFICO A FUTURO PARA SMALL CELLS Y SUS SOLUCIONES COMPETIDORAS

Se espera que el caudal anual de tráfico de datos móviles aumente de 58 exabytes<sup>33</sup> en 2013, a cerca de 335 exabytes en 2020. Esto representa una tasa de incremento anual compuesto del 28%, durante un período de 7 años entre el 2013 y 2020. La Figura 4.32, muestra gráficamente el resultado de estas proyecciones realizadas por *SNS Research* [4].

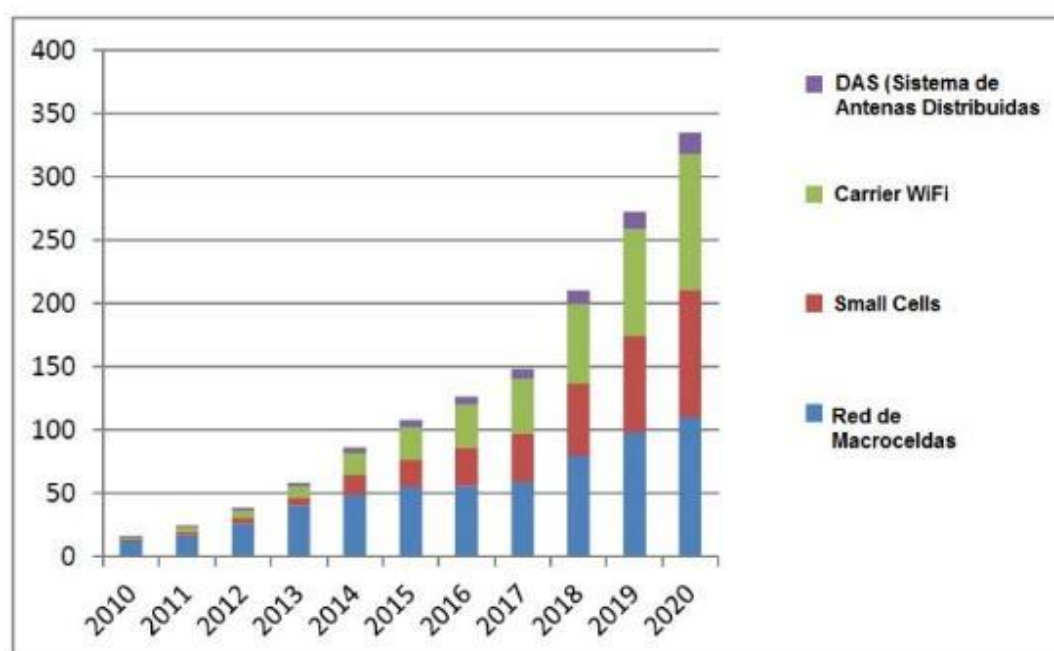


Figura 4.32 Predicción: Tráfico anual de datos móviles (EB), según el tipo de acceso a la red [4]

<sup>33</sup> Exabyte EB = 1 000 000 terabytes

Indudablemente, este aumento de seis veces en el volumen de tráfico anual, será un importante motor para las inversiones, tanto en *Small Cells* como en sistemas *Carrier Wi-Fi* y DAS, ya que la red de *macroceldas*, no estará en la *capacidad* de soportar este volumen de tráfico por si sola. Consecuentemente, la *SNS Research* estima que entre las *Small Cells* y las redes Wi-Fi se transportarán cerca de 208 Exabytes anualmente, lo que representa el 62% del total de tráfico, que se proyecta exista para el 2020 [4].

## CAPÍTULO V

### 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- Pese a que en la actualidad, están desplegadas un gran número de redes 3G, cada vez es mayor el número de redes LTE que se van implementando, debido, en parte, al gran incremento del tráfico de banda ancha móvil. LTE es un proyecto reciente de 3GPP, diseñado para brindar mayor velocidad de datos, baja latencia y alta eficiencia espectral en redes móviles de nueva generación. Aprovechando las ventajas de OFDMA, LTE puede proporcionar, un *throughput Downlink* de 100 Mbps y en *Uplink* de 50 Mbps aproximadamente. Esta tecnología podría reemplazar a GSM y WCDMA en zonas de alta demanda de tráfico, como lugares públicos, empresas grandes, o aeropuertos. A pesar de que LTE soporta altas tasas de transferencia de datos, puede, al igual que otras tecnologías, incidir con bajos niveles de cobertura en ciertas áreas cerradas, y congestionarse al punto de perder capacidad, en áreas de alta demanda.

- Los operadores móviles continúan luchando contra la pérdida de clientes, debido a la mala calidad del servicio que perciben los usuarios en sus redes de tecnologías inferiores como GSM y 3G, al experimentar, por ejemplo, llamadas caídas, baja calidad en los servicios de voz, señal débil o intermitente al interior de sus domicilios, lugares de trabajo, o centros de masiva concurrencia de personas; junto con la degradación del servicio de datos, que hoy por hoy, juega un rol muy importante

en las comunicaciones móviles. Las zonas urbanas, en particular, tienen problemas tanto con la cobertura (por el desvanecimiento de la señal a nivel *indoor*), como por la saturación de la *capacidad* de la red, problemas que a menudo, no pueden ser abordados mediante tecnologías 3G o Wi-Fi. Por lo que se concluye, que al implementar la tecnología LTE, y convertir a las redes en heterogéneas, mediante el despliegue de soluciones específicas para ambientes internos o externos, como las *Small Cells*, es posible enfrentar el crecimiento de la demanda, previsto para los próximos años.

- Las *Small Cells*, son estaciones base de baja potencia que utilizan espectro licenciado, y por lo general se implementan en zonas residenciales, empresariales, espacios públicos y metropolitanos, o en entornos rurales. Además, proporcionan una excelente experiencia de usuario, brindando una mayor *capacidad*, cobertura y calidad, tanto para el servicio de voz, como para aplicaciones de datos móviles en cualquier tecnología, y de manera más eficaz, con LTE.

- Se concluye que el mayor campo de aplicación de las *Small Cells*, está en las zonas urbanas, metropolitanas y de alto tráfico, donde, luego de haber realizado trabajos de optimización y densificación de la red, se puede conseguir una buena *capacidad*, cobertura y calidad de servicio, al implementarlas. En zonas sub-urbanas es a menudo suficiente con la optimización y la densificación de la red, mientras que en zonas rurales de baja demanda de tráfico, generalmente se puede alcanzar las condiciones de eficiencia, solo con efectuar la optimización de la red macro.

- Con un despliegue adecuado, basado en el estudio de condiciones de radio y tráfico, las *Small Cells* pueden llegar a ser un método de optimización altamente rentable para los operadores, tanto para mejorar su gestión de la red móvil, en cuanto a la *capacidad* y cobertura, como para drenar el tráfico de datos de la red de *macrocelas* y de su *Backhaul*; lo cual, a su vez, puede mejorar la economía global de la red y la experiencia del usuario, reduciendo al mínimo la tasa de pérdida de clientes (*churn*).

- Se espera que la tecnología de *Small Cells* domine en una gran parte de la futura arquitectura de red móvil, para facilitar el despliegue de los servicios 4G de alta velocidad. Este entorno LTE, permite aprovechar una amplia gama de oportunidades móviles anteriormente no realizables, incluidos los servicios de valor agregado de banda ancha, por ejemplo, aplicaciones de nueva generación como la videoconferencia y las comunicaciones unificadas, entre otras aplicaciones, que requieren mayores niveles de estabilidad y confiabilidad de la red.

- La creación de una red heterogénea mediante la introducción de nodos de baja potencia, es un enfoque atractivo para satisfacer las demandas de tráfico y las expectativas de rendimiento, sobre todo en situaciones en las que se concentra el tráfico, como en *Hotspots* o zonas que no pueden ser cubiertas adecuadamente por la red de *macrocelas*. Sin embargo, la implantación de HetNets aumentará el número y la diversidad de celdas en la red, con el consiguiente incremento de parámetros interdependientes de cada celda y la interoperabilidad entre todos los elementos de la red. No obstante, se ofrece un gran paso hacia la solución de estos problemas, aprovechando el gran nivel de procesamiento que actualmente poseen los sistemas electrónicos, por medio de la implementación de la tecnología de auto-organización de redes (*SON*), principalmente en la industria de las *Small Cells*. Esto promete reducir radicalmente la necesidad de reconfiguración de bajo nivel, en lugar de ello, la red supervisará continuamente su propio desempeño, el tipo de tráfico y la fuente, adaptándose automáticamente para lograr un rendimiento óptimo.

- En cuanto a la tecnología de antenas MIMO, se concluye que es un componente clave de las tecnologías inalámbricas de nueva generación, al punto que la mayor parte de las ganancias de *throughput* pico de LTE, son proporcionadas por MIMO. Sin embargo, estas ganancias, sólo pueden realizarse en una red totalmente optimizada. La optimización de la tecnología MIMO, tiene un enfoque diferente al método tradicional de optimización de una red, puesto que evalúa las condiciones de *multi-trayecto* de la señal, las cuales desempeñan un rol clave para la eficiencia del *throughput*. Los datos precisos de las condiciones de *multi-trayecto* en redes LTE existentes, pueden conducir hacia una mejor planificación de las futuras redes que soportarán MIMO. Esta tecnología será cada vez más valiosa, a medida que más usuarios requieran de LTE para explotar sus capacidades, sobretodo en cuanto a velocidades de datos, que serán



necesarias para aplicaciones vanguardistas, que van desde la banca móvil hasta la alta definición en video *streaming*. Los operadores que maximicen el rendimiento de MIMO en sus redes LTE, serán capaces de ofrecer el mejor servicio a estos usuarios, con una menor inversión en infraestructura, y proporcionando una clara ventaja competitiva, tanto en precio, como en calidad de servicio.

- Durante el proceso de encontrar los puntos geográficos ideales para la implementación de *Small Cells*, es necesario valerse de herramientas informáticas que permitan determinar, tanto las áreas con mayor densidad de usuarios, o específicamente mayor demanda de tráfico; como las áreas que presenten condiciones de radio degradadas. Condensando esta información sobre un mismo mapa, se puede llegar a determinar gráficamente, las áreas propicias para el despliegue. En este proyecto, se destaca la importancia de la herramienta *Mentum Planet*®, para cumplir eficazmente con este proceso de búsqueda, al permitir evaluar completamente los escenarios de interés, e identificar *Huecos de Cobertura* y/o posibles *Hotspots*, para modelarlos y analizar los resultados. En este sentido, se puede tomar decisiones estratégicas para el despliegue de *Small Cells*, en base a las capacidades de *Mentum Planet*® que fueron estudiadas. Un despliegue exitoso de *Small Cells*, también depende de la inversión en lugares adecuados, en el momento adecuado, si se aprovecha las capacidades de esta herramienta, el equipo de planificadores de redes estratégicas de un operador, estará en la capacidad de evaluar escenarios, para el óptimo despliegue de *Small Cells*.

- Los estudios para el despliegue de *Small Cells* basados en predicciones de cobertura, como en realizado en este proyecto utilizando *XIRIO*®, permiten proyectar los niveles de propagación de la señal, que se tendrá en determinados puntos geográficos, sin embargo, la utilización de cartografía 3D que muestre edificaciones, se torna cada vez más necesaria para este tipo de estudios, donde el modelo de propagación a utilizar, también constituye un factor determinante para el cálculo de las pérdidas.

- La implementación de *Small Cells* incrementa la capacidad de una red y mejora las condiciones de radio en lugares con cobertura deficiente o nula, a la vez que aumenta la velocidad de acceso a la red inalámbrica, por el hecho de estar más cerca

del usuario. Sin embargo, el futuro exitoso de las *Small Cells* estará determinado por el avance en las técnicas de control de la interferencia, y el aumento de la capacidad del *Backhaul*, para evitar que esta *red de retorno*, se convierta en un cuello de botella.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- El hecho de implementar una capa de *Small Cells*, además de facilitar nuevas oportunidades de servicio, constituye un medio para obtener beneficios económicos de la red móvil, de una forma más productiva que antes. En este sentido, se recomienda a los operadores, que establezcan como objetivo prioritario al mercado de negocios, es decir las empresas, ya que estas pueden ofrecer la ruta más directa hacia la monetización de sus redes móviles, teniendo en cuenta que las empresas, en comparación con el mercado común, pueden tener mayor disposición a pagar por servicios *indoor premium*, ya sea para soportar nuevas aplicaciones, o indirectamente para incrementar el rendimiento de sus negocios, por ejemplo, a través de videoconferencias.

- Se recomienda dar un mayor énfasis a la planificación RF, a medida que las redes crezcan en complejidad; ya que a pesar de que la auto-organización de redes (*SON*) constituye una herramienta muy poderosa para la gestión del tráfico y la interferencia, a menudo *SON*, no puede compensar la mala ubicación de los elementos de radio-acceso. Además se recomienda que esta planificación RF, se realice en sincronía con un análisis de las localidades donde existe mayor utilización del servicio de datos móviles.

- Parte de la naturaleza de una *HetNet* es su complejidad, por lo que se recomienda a los operadores adaptar sus procesos y formas de trabajar, para cuando el número de celdas en las redes móviles se multiplique. Antes de iniciar un despliegue de *Small Cells*, la red debe ser optimizada y evaluada en cuanto a cobertura y capacidad. Para esto existen herramientas avanzadas de diseño y optimización de redes, que son capaces de modelar y analizar las redes multi-tecnología, de las cuales se recomienda a *Mentum Planet*®, como una herramienta muy útil para tal fin.

- En una red homogénea de *macroceldas*, la interferencia principalmente se produce en el borde de las celdas. Mientras que, en una red heterogénea, si se comparten las bandas del espectro entre *macroceldas* y *Small Cells*, existe mayor probabilidad de interferencia por la superposición de cobertura y la contigüidad de los elementos de RAN. Por tal razón, se recomienda evaluar previamente el impacto en la capacidad de una red, al añadir una *Small Cell*, es decir, evaluar la capacidad adicional que brindará, en relación al decremento de la capacidad de la capa macro, a causa de la interferencia provocada.

- Tomando en cuenta que OFDMA proporciona un alto grado de flexibilidad de ancho de banda, que puede ser explotado en una nueva manera de abordar el problema de interferencias. Se recomienda realizar trabajos de investigación acerca de mecanismos dinámicos de ICIC, basados en la reutilización de frecuencias, cuando la carga de las celdas no esté al 100%. El estudio de estos mecanismos dinámicos para el control de interferencias, puede ser de gran utilidad para entornos de *Small Cells*, en los que se requiera la funcionalidad de auto-organización de las celdas.

- Se recomienda que los operadores empiecen con un despliegue paulatino de *Small Cells*, hasta lograr aprender a instalar y gestionar una capa de *Small Cells*, de una forma efectiva y rentable, en lugar de realizar un despliegue masivo inicial.

- En despliegues *indoor* que demanden mediana *capacidad*, se recomienda implementar *Small Cells* con un solo sector, mediante la utilización de antenas directivas. Mientras que, para despliegues *outdoor* que requieren de mayor *capacidad*, se recomienda implementar tres sectores, mediante antenas *tri-sector pseudo-omnidireccionales* (Anexo C), tanto para aprovechar su patrón de radiación y evitar propagaciones indeseadas (lóbulos posteriores), como para reducir el tamaño de total del sistema radiante y el impacto visual externo, que las antenas pudieren provocar.

- Se recomienda realizar estudios para el funcionamiento autosustentable de las *Small Cells*, y que al implementarlas garanticen continuidad del servicio.

- Se recomienda realizar estudios sobre el impacto de las radiaciones no ionizantes, sobre la salud de las personas, al tener las antenas cada vez más cerca e irradiando con mayor potencia.

- La descarga de tráfico de las *macrocelas* hacia una red Wi-Fi, sin perder continuidad de servicio, puede ser objeto de futuros trabajos de investigación, ya que Wi-Fi es el sistema inalámbrico sin licencia más prominente, y que ofrece múltiples características particulares. En este sentido, con el fin de mejorar aún más la eficiencia espectral, se recomienda también realizar estudios sobre *Small Cells* Wi-fi Carrier, para el uso del espectro no licenciado.

- Pese a que los operadores móviles, cada vez más están arrendando sus servicios de *backhaul*, a los operadores de telefonía fija; se recomienda realizar trabajos de investigación sobre la capacidad (para evitar *cuernos de botella*) y las alternativas de *backhaul*, ya que este constituye un desafío constante para el despliegue de *Small Cells*. Aunque no sea el más económico, el *backhaul* por fibra, es el más utilizado debido a su seguridad, ubicuidad y eficiencia. No obstante, el uso de fibra puede tornarse muy complejo o imposible en algunos lugares, en cuyo caso se recomienda realizar estudios para diversas soluciones, tales como el *backhaul por medios de transmisión no guiados*, como microondas terrestres o microondas satelitales.

- Con el objetivo de obtener una mejor utilización del espectro asignado a LTE, se recomienda realizar trabajos de investigación acerca de las alternativas para el servicio de voz y SMS en LTE, tales como la gestión rápida y oportuna del *Handover* en el CSFB, y VoLTE sobre IMS.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cox Christopher, An Introduction to LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications, Second Edition, John Wiley & Sons Editorial, 2014.
- [2] Holma Harri, Antti Toskala, LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access”, First Edition, John Wiley & Sons Editorial, 2009.
- [3] Ali-Yahiya Tara, “Understanding LTE and its Performance,” First Edition, Springer Science Business Media, 2011.
- [4] Signals and Systems, Sample\_Pages\_The HetNet Bible (Small Cells and Carrier Wi-Fi) - Opportunities, Challenges, Strategies and Forecasts: 2013 – 2020 – With an Evaluation of DAS & Cloud RAN, Disponible: [http://4g-market.com/?paiddownloads\\_id=96](http://4g-market.com/?paiddownloads_id=96), 10 de mayo de 2013, Último Acceso: Mayo 2015.
- [5] NOTICIAS DE LTE EN ECUADOR [Online]. Disponible <http://www.elcomercio.com/search/?query=LTE>, Último Acceso Mayo 2015.
- [6] Paging, <http://es.wikipedia.org/wiki/Telem%C3%A1tica>, Último Acceso: Mayo 2015.
- [7] Vega Ayo, Juan Alexis, (2014). Estudio y Diseño de una Red Inalámbrica de banda ancha para ofrecer servicios de voz y datos en las comunidades del milenio. Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones. ESPE. Sede Sangolquí.
- [8] 3GPP TS 36.423 (2013) Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 Application Protocol (X2AP), Release 11, Section 8.3.3, Septiembre 2013.
- [9] 3GPP TS 32.762 (2013) Telecommunications Management; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Network Resource Model (NRM) Integration Reference Point (IRP); Information Service (IS), Release 11, Section 6, Marzo 2013.
- [10] 3GPP TS 36.413 (2013) Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 Application Protocol (S1AP), Release 11, Section 8.7.3, Septiembre 2013.

- [11] Velasco, JJ, Small Cells el mosaico con el que construir las redes del futuro, <http://blogthinkbig.com/small-cells-mosaico-redes-futuro/>, 3 de enero de 2013, Último Acceso: Mayo 2015.
- [12] Huidrobo, José Manuel, La pequeña gran solución para construir redes se llama 'Small Cells', <http://www.redestelecom.es/telefonía/reportajes/1063305002903/pequena-gran-solucion-construir.1.html> , 18 de octubre 2012, Último Acceso: Mayo 2015.
- [13] Ortega, Diego, Penetración de telefonía móvil en Ecuador llega al 87% de la población, <http://lte-movil4g.blogspot.com/2012/04/ultimas-noticias-respecto-la-telefonía.html> , Último Acceso: Mayo 2015.
- [14] Hurtado, Guillermo, LTE on track to account for 4.2% of Latin America's total mobile subscriptions at year-end 2015, <http://www.pyramidresearch.com/analyst-notes/pyramid-points/lte-on-track-to-account-for-42-of-latin-america-s-total-mobile-subscriptions-at-year-end-2015/>, 07 May 2015, Último Acceso: Mayo 2015.
- [15] LTE, la evolución de las telecomunicaciones, <http://www.iquall.net/es/novedades/whitepapers/lte-evolucion-de-las-telecomunicaciones.html>, Último Acceso: Mayo 2015.
- [16] Akamai: Global average Internet speed grew 20% year over year to 4.5 Mbps, mobile traffic jumped by 54%, <http://venturebeat.com/2015/03/24/akamai-global-average-internet-speed-grew-20-year-over-year-to-4-5-mbps-mobile-traffic-jumped-by-54/>, Último Acceso: Mayo 2015.
- [17] Restrepo Piedrahita, José Fernando (2011). Análisis y estudio técnico de la transferencia de tecnología para la prestación de servicios de telefonía y banda, ancha móvil en Colombia, a través de operadores móviles virtuales soportados por tecnología LTE. Universidad Nacional de Colombia.
- [18] Schindler, Schulz, Introduction to MIMO, Application Note, 07.2009-1MA14\_0e, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Munich Julio 2009.
- [19] Karlsson, Jonas, Riback Mathias, Initial Field Performance Measurements of LTE, [http://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/2008\\_03/files/LTE.pdf](http://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/2008_03/files/LTE.pdf) , Último Acceso: Mayo 2015.
- [20] MIMO and Smart Antennas for Mobile Systems, 4G Americas, Julio 2013.

- [21] M. Franceschetti and R. Meester. Random networks for communication: from statistical physics to information systems, volume 24. Cambridge University Press, 2007.
- [22] Teorema de Shannon-Hartley, [http://es.wikipedia.org/wiki/Teorema\\_de\\_Shannon-Hartley](http://es.wikipedia.org/wiki/Teorema_de_Shannon-Hartley), Último Acceso: Mayo 2015.
- [23] Arreglos de Antenas, <http://www.antenna-theory.com/arrays/weights/main.php>, Último Acceso: Mayo 2015.
- [24] Godara, L.C. (1997) Applications of antenna arrays to mobile communications, part I: performance improvement, feasibility, and system considerations. *Proceedings of the IEEE*, 85, 1031–1060.
- [25] Huidrobo, José Manuel, Redes heterogéneas. La solución para LTE, Antena de Telecomunicación, <http://www.coitt.es/res/revistas/11a%20Redes.pdf>, Noviembre 2013, Último acceso: Último Acceso: Mayo 2015.
- [26] 3GPP Self-Organizing Networks, <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/105-son>, Último Acceso: Junio 2015.
- [27] 3GPP TS 37.320 (2013) Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); RadioMeasurement Collection for Minimization of Drive Tests (MDT); Overall Description; Stage 2, Release 11, Marzo 2013.
- [28] Picado, Ernesto, Análisis de las tecnologías de Redes Heterogéneas (HetNet) en los sistemas móviles, Universidad de Costa Rica, Julio 2012.
- [29] 3GPP TS 36.300 (2013) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall Description; Stage 2, Release 11, Section 16.1.5, Annex K, Septiembre 2013.
- [30] 3GPP TR 36.819 (2013) Coordinated Multi-point Operation for LTE Physical Layer Aspects, Release 11, Septiembre 2013.
- [31] Poole, Ian, 4G LTE CoMP, Coordinated Multipoint Tutorial, <http://www.radio-electronics.com/info/cellular/telecomms/lte-long-term-evolution/4g-lte-advanced-comp-coordinated-multipoint.php>, Último acceso: Junio 2015
- [32] Informa Telecoms & Media, “Small Cell Market Status,” Small Cell Forum, Whitepaper. Junio 2012.

- [33] Small Cell Forum Ltd, Small Cells – what’s the big idea, [http://smallcellforum.org/smallcellforum/Files/File/SCF-Small\\_Cells\\_White\\_Paper.pdf](http://smallcellforum.org/smallcellforum/Files/File/SCF-Small_Cells_White_Paper.pdf), 15 February 2012, Último Acceso: Junio 2015
- [34] M. Rahman, H. Yanikomeroğlu, y W. Wong, Interference Avoidance with Dynamic Inter-Cell Coordination for Downlink LTE System, Proceedings of the 2009 IEEE conference on Wireless Communications & Networking Conference, ser. WCNC'09, Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2009.
- [35] Wannstrom Jeanette, 3GPP HetNet/Small Cells, <http://www.3gpp.org/hetnet>, Último Acceso: Junio 2015.
- [36] 3GPP, Heterogeneous Networks in LTE, <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/1576-hetnet>, Último Acceso: Junio 2015
- [37] TS 36.420 Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 General Aspects and Principles, 3GPP Std.
- [38] Osa, Vicente (2013). Planificación y Optimización Automática de Redes Móviles LTE. Departamento de Comunicaciones Universidad Politécnica de Valencia. Mayo 2013.
- [39] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 21: Media Independent Handover, Media Independent Handover Services Working Group Std. IEEE 802.21.
- [40] Femto Forum, HeNB (LTE Femto), <http://es.slideshare.net/zahidtg/henb-lte-femto-network-architecture>, Último Acceso Junio 2015
- [41] PR Newswire, LTE Macro and Small Cell RAN Market to Exceed \$24 B by 2019 According to New Forecast Report by Dell'Oro Group, <http://www.prnewswire.com/news-releases/lte-macro-and-small-cell-ran-market-to-exceed-24-b-by-2019-according-to-new-forecast-report-by-delloro-group-300022613.html>, Último Acceso: Junio 2015.
- [42] Gilat, Small Cell, [http://www.gilat.com/dynimages/t\\_solutions/images/Small-cellll-main.jpg](http://www.gilat.com/dynimages/t_solutions/images/Small-cellll-main.jpg), Último Acceso: Junio 2015
- [43] 3GPP TR 36.932 (2013) Scenarios and Requirements for Small Cell Enhancements for E-UTRA and E-UTRAN, Release 12, Marzo 2013.
- [44] 3GPP TR 36.872 (2013) Small Cell Enhancements for E-UTRA and E-UTRAN – Physical Layer Aspects, Release 12, Septiembre 2013.



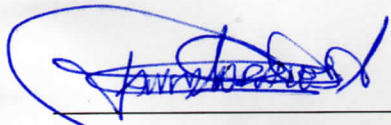
- [45] 3GPP TR 36.842 (2013) Study on Small Cell Enhancements for E-UTRA and E-UTRAN – Higher Layer Aspects, Release 12, Junio 2013.
- [46] Huawei Technologies, LTE Small Cell vs. WiFi User Experience, [www.huawei.com/ilink/en/download/HW\\_323974](http://www.huawei.com/ilink/en/download/HW_323974), 2013, Último Acceso: Junio 2015.
- [47] Yaron, Rami, LTE/LTE-A Small Cell *Backhaul*, <http://es.slideshare.net/zahidtg/mef-lteltea-small-cell-Backhaul>, 06 de enero de 2015, Último Acceso: Junio 2015
- [48] León Felipe, Recalde Lenin (2014). Diseño e implementación de la red de cuarta generación LTE en el Distrito Metropolitano de Quito para la CNT EP. Carrera de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones. ESPE. Sede Sangolquí.
- [49] Landström, Sara, Heterogeneous networks – increasing cellular capacity, [http://www.ericsson.com/res/thecompany/docs/publications/ericsson\\_review/2011/heterogeneous\\_networks.pdf](http://www.ericsson.com/res/thecompany/docs/publications/ericsson_review/2011/heterogeneous_networks.pdf) , Junio 2011, Último Acceso: Junio 2015
- [50] Huawei Technologies, The second phase of LTE-Advanced, [www.huawei.com/ilink/en/download/HW\\_259010](http://www.huawei.com/ilink/en/download/HW_259010), 2013, Último Acceso: Junio 2015.
- [51] Infovista, Improving the ROI of Small Cells through Planning, [http://africa.comworldseries.com/files/28121-sb\\_improving\\_roi\\_of\\_small\\_cells\\_network\\_planning\\_aw\\_0613\\_0\[1\].pdf](http://africa.comworldseries.com/files/28121-sb_improving_roi_of_small_cells_network_planning_aw_0613_0[1].pdf), 2013, Último Acceso: Junio 2015.
- [52] Infovista, Webinar bajo demanda: Planificación y optimización de redes móviles usando datos operacionales en Mentum Planet, [http://jump.infovista.com/On\\_demand\\_Webinar\\_Spanish\\_Live\\_Network\\_Planning\\_and\\_Optimization\\_in\\_Mentum\\_Planet.html?CID=7016000000K02G](http://jump.infovista.com/On_demand_Webinar_Spanish_Live_Network_Planning_and_Optimization_in_Mentum_Planet.html?CID=7016000000K02G), Último Acceso: Junio 2015.
- [53] Houngrinou, Kebo David, Femtocell vs. Voice-over-WiFi, <http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-10/ftp/femto/#Section4.3>, Abril 2010, Último Acceso: Junio 2015.
- [54] Bicheno, Scott, Ericsson adds unlicensed spectrum support to small cells, <http://telecoms.com/314072/ericsson-adds-unlicensed-spectrum-support-to-small-cells/>, Enero 2015, Último Acceso: Junio 2015.

- [55] Alcatel-Lucent, Small Cells and Distributed Antenna Systems, Strategic White Paper, <http://www.stjohnpatrick.com/12/ec/2Small-Cells-DAS.pdf>, Último acceso: Junio 2015.
- [56] CNT EP, Sistemas de Información Geográfica - Coberturas de red CNT EP, <http://gis.cnt.com.ec/apppublico/>, Febrero 2015, Último acceso: Junio 2015.
- [57] Manosalvas Barriga, Henry Vladimir; Santamaría Naranjo, Adriana Lucía. Estudio, Diseño y Simulación de una Red LTE (Long Term Evolution) para Telefonía Móvil en los Valles de Tumbaco y Los Chillos utilizando *Software* Predictivo. 2012, ESPE. Sede Sangolquí.
- [58] El Comercio.com, El Parque Bicentenario se cerrará 11 días por la visita del Papa Francisco, <http://www.elcomercio.com/actualidad/bicentenario-misa-papa-ecuador-catolicos.html>, 19 Junio de 2015, Último acceso: Junio 2015.
- [59] Airspan, AirHarmony, <http://www.airspan.com/products/airharmony-2/>, Último acceso: Junio 2015.
- [60] Xirio Online, Descripción, <http://www.aptica.es/productos?op=xirio-online>, Último acceso: Junio 2015.
- [61] Mudoi Uday, Understanding Small-Cell Unification's Vital Role In LTE And 4G, <http://electronicdesign.com/4g/understanding-small-cell-unification-s-vital-role-lte-and-4g>, Último acceso: Junio 2015.
- [62] Morejón Cesar, Plaza Foch en el barrio La Mariscal, <http://in-lan.com/viajes-es/cae-la-noche/>, Último Acceso: Junio 2015.
- [63] Imagen Obtenida de:  
[https://elenacoreano.files.wordpress.com/2015/03/greendale\\_cafeteria.png](https://elenacoreano.files.wordpress.com/2015/03/greendale_cafeteria.png)
- [64] La Hora, Pasajes se agotaron por éxodo de feriado, <http://www.lahora.com.ec/index.php/noticias/fotoReportaje/1101767567#.VZPnfPmqkko>, Último Acceso: Junio 2015.
- [65] Imagen Obtenida de:  
[http://www.ericsson.com/medias/sys\\_master/8904166768670.jpg](http://www.ericsson.com/medias/sys_master/8904166768670.jpg)
- [66] La República, Estadio 'Casablanca' fue suspendido tres fechas, <http://www.larepublica.ec/>, 7 de marzo de 2012, Último Acceso: Junio 2015.
- [67] CNT, Tarifas, <https://www.cnt.gob.ec/movil/plan/plan-voz-datos-lte-4g/>, Último Acceso: Junio 2015.

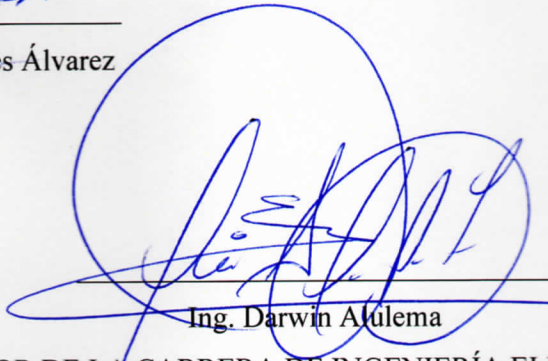
## ACTA DE ENTREGA

El proyecto de grado titulado: "ESTUDIO TÉCNICO Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE SMALL CELLS PARA SOLVENTAR PROBLEMAS DE CAPACIDAD, COBERTURA Y CALIDAD DENTRO UNA RED DE TELEFONÍA MÓVIL 4G LTE", fue entregado en el Departamento de Eléctrica y Electrónica, y reposa en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Sangolquí, 18/08/2015



Randy Gabriel Morales Álvarez



Ing. Darwin Alulema

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
TELECOMUNICACIONES

