



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**OPTIMIZACIÓN DE CLÚSTER EN REDES 3G MEDIANTE
PLANIFICACIÓN CELULAR AUTOMÁTICA**

Joel Enmanuel Arriola Urrutia

Asesorado por el Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar

Guatemala, febrero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPTIMIZACIÓN DE CLÚSTER EN REDES 3G MEDIANTE
PLANIFICACIÓN CELULAR AUTOMÁTICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JOEL ENMANUEL ARRIOLA URRUTIA

ASESORADO POR EL ING. CARLOS EDUARDO GUZMÁN SALAZAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García (a.i.)
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carillo
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Durán Córdova
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

OPTIMIZACIÓN DE CLÚSTER EN REDES 3G MEDIANTE PLANIFICACIÓN CELULAR AUTOMÁTICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 10 de octubre de 2015.

Joel Enmanuel Arriola Urrutia

Guatemala, 21 de julio de 2016

Señor
Coordinador Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

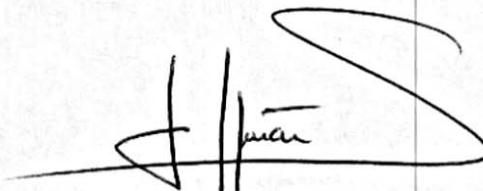
Estimado Coordinador:

Hago de su conocimiento por este medio que he concluido la revisión del trabajo de graduación del estudiante Joel Enmanuel Arriola Urrutia, titulado **"OPTIMIZACIÓN DE CLUSTER EN REDES 3G MEDIANTE PLANIFICACIÓN CELULAR AUTOMÁTICA"**. Y el mismo cumple con los objetivos que se propusieron. Pudiendo entonces, continuar el trámite que en ley corresponda.

Así mismo, indico que, tanto el suscrito como el señor Arriola Urrutia, somos los únicos responsables de lo que dice y se propone en el trabajo referido.

Quedo en la mejor disposición de ampliar lo expresado en los párrafos precedentes.

Atentamente,



Carlos Guzmán Salazar
ASESOR

CARLOS GUZMAN SALAZAR
Ingeniero Electricista
Col. No. 2762

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 58. 2016.
Guatemala, 25 de JULIO 2016.

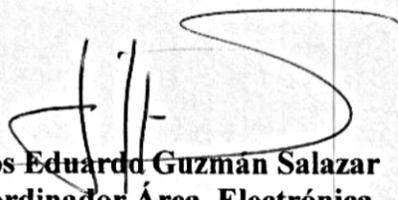
Señor Director
Ing. Francisco Javier González López
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**OPTIMIZACIÓN DE CLUSTER EN REDES 3G MEDIANTE
PLANIFICACIÓN CELULAR AUTOMÁTICA,** del estudiante Joel
Enmanuel Arriola Urrutia, que cumple con los requisitos establecidos
para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. 
Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Área Electrónica



sro

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 58. 2016.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; JOEL ENMANUEL ARRIOLA URRUTIA titulado: OPTIMIZACIÓN DE CLUSTER EN REDES 3G MEDIANTE PLANIFICACIÓN CELULAR AUTOMÁTICA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Francisco Javier González López



GUATEMALA, 4 DE OCTUBRE 2016.

Universidad de San Carlos
De Guatemala

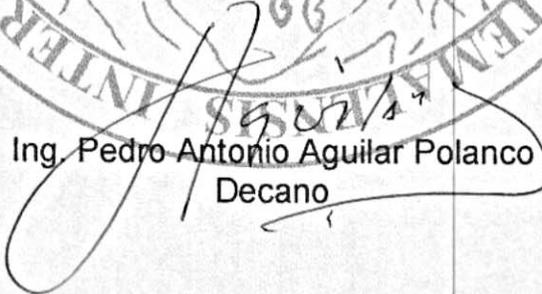


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.D.077.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **OPTIMIZACIÓN DE CLÚSTER EN REDES 3G MEDIANTE PLANIFICACIÓN CELULAR AUTOMÁTICA**, presentado por el estudiante universitario: **Joel Enmanuel Arriola Urrutia**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, febrero de 2017

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser el guía en mi vida.
Mis padres	José Arriola y Maritza de Arriola, por darme la oportunidad de vivir y su ejemplo.
Mis hermanas	Lia, María Ester y Mónica Arriola, por ser un apoyo importante en mi vida.
Mis abuelos	Por ser un apoyo en mi motivación como estudiante.
Mis compañeros	Por el apoyo mutuo en el transcurso de la carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser una importante influencia en mi carrera y sus enseñanzas.

Facultad de Ingeniería

Por las experiencias y el conocimiento que me compartió.

**Escuela de Mecánica
Eléctrica**

Por la experiencia profesional que entregan hacia todos los alumnos.

Sergio Martinez

Por el apoyo mutuo en la carrera y amistad.

Jaime Gonzalez

Por el apoyo en mi carrera.

Compañeros de trabajo

Por su apoyo en todo momento para la realización de este trabajo, Carlos Vielman, Joao Pérez, Francisco Contreras, Eduardo Alvarado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
GLOSARIO	XVII
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. TEORÍA SOBRE ANTENAS.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.1.1. Origen del electromagnetismo.....	1
1.1.2. La primera antena.....	1
1.1.3. Espectro electromagnético	2
1.2. Tipos de antenas	3
1.2.1. Antenas de bocina	3
1.2.2. Antenas de bucle	4
1.2.3. Antenas helicoidales.....	5
1.2.4. Antena monopolo.....	5
1.2.5. Antena dipolo.....	6
1.3. Parámetros de las antenas.....	7
1.3.1. Patrón de radiación.....	7
1.3.2. Directividad de una antena	8
1.3.3. Ganancia de una antena	8
1.3.4. Apertura y altura efectiva.....	9
1.3.5. Impedancia de entrada	10
1.3.6. Eficiencia y resistencia de radiación	11

1.3.7.	Ancho de banda y VSWR.....	12
1.3.8.	Polarización.....	14
1.4.	Antenas de telefonía	14
1.4.1.	Como una antena radia	14
1.4.2.	El efecto de acople entre antenas	15
1.4.3.	Impedancia mutua.....	16
1.4.4.	El uso de filtros.....	17
1.4.5.	Antenas Macros	17
1.4.6.	Parámetros físicos.....	18
1.4.7.	Acopladores y duplexores	19
1.4.7.1.	Acoplador de 3dB.....	19
1.4.7.2.	Acoplador de cavidad.....	20
1.4.7.3.	Acoplador <i>catnose</i>	20
1.4.7.4.	Duplexor rechaza banda	21
1.4.7.5.	Duplexor pasa banda	22
1.4.7.6.	<i>Splitter</i>	22
1.4.8.	Mediciones de una antena	23
1.4.8.1.	Medición de VSWR	23
1.4.8.2.	Medición de frecuencias parasitas	24
1.4.8.3.	Mediciones de ruido y SINAD.....	24
1.4.8.4.	Mediciones de intermodulación	25
1.4.8.5.	Medición de ganancia y patrón de la antena	27
2.	TECNOLOGÍA 3G (UMTS)	29
2.1.	Introducción.....	29
2.1.1.	Evolución de GSM a UMTS.....	29
2.1.2.	Arquitectura de red 3G	29
2.1.3.	Características de radio.....	31

2.1.4.	Técnicas de acceso múltiple.....	32
2.1.4.1.	FDMA (frequency division multiple access)	32
2.1.4.2.	TDMA (<i>time division multiple access</i>)..	33
2.1.4.3.	CDMA (<i>code division multiple access</i>)	34
2.1.4.4.	Otras técnicas.....	34
2.1.5.	Estandarización	36
2.2.	UTRAN	36
2.2.1.	UE y Nodo B	37
2.2.2.	RNC y <i>red core</i>	38
2.2.3.	Interfaces	39
2.2.4.	Técnicas de modulación	41
2.3.	Pila de protocolo.....	43
2.3.1.	Capa RRC	43
2.3.1.1.	Estados RRC	44
2.3.1.2.	RRC <i>idle mode</i>	45
2.3.1.3.	RRC <i>connected mode</i>	46
2.3.2.	Capa RLC.....	46
2.3.2.1.	Servicios RLC.....	48
2.3.2.2.	Funciones RLC.....	49
2.3.2.3.	Capa MAC	49
2.3.2.4.	Funciones y servicios	49
2.3.3.	Capas PDCP y BMC.....	51
2.3.4.	Capa física.....	52
2.3.4.1.	Sincronización	53
2.3.4.2.	Medidas de radio e indicaciones a capas superiores	54
2.3.4.3.	<i>Spreading y scrambling codes</i>	55

2.4.	Tipos de canales y HSPA.....	56
2.4.1.	Canales lógicos	56
2.4.2.	Canales de transporte	57
2.4.3.	Canales físicos	59
2.4.4.	Introducción a HSPA+	62
2.4.4.1.	Dual-cell	62
2.4.4.2.	Ganancia con 64QAM	63
2.4.4.3.	MIMO 2x2.....	63
3.	PLANEACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UNA RED UMTS.....	65
3.1.	Planeación	65
3.1.1.	Dimensionamiento.....	65
3.1.2.	Link budget.....	66
3.1.3.	Propagación de la onda	67
3.1.4.	Planeación de cobertura.....	69
3.1.5.	Planeación de capacidad	71
3.1.6.	Planeación del <i>scrambling code</i>	72
3.1.7.	Planeación de parámetros.....	73
3.2.	Optimización de una red UMTS	74
3.2.1.	Control de potencia	74
3.2.2.	Tipos de <i>handover</i>	77
3.2.2.1.	Soft HO inter sistema y frecuencia	77
3.2.2.2.	Hard HO intra frecuencia y sistema.....	78
3.2.2.3.	HO inter sistema.....	79
3.2.2.4.	Parámetros HO intra frecuencia	79
3.2.3.	Control de congestión	81
3.2.4.	Lista de vecindades.....	81
3.2.5.	Parámetros de reelección.....	82
3.3.	Proceso de optimización	84

3.3.1.	<i>Drive test</i>	84
3.3.1.1.	Equipo y rutas.....	84
3.3.1.2.	Postproceso de la información.....	86
3.3.1.3.	Interpretación de las mediciones	87
3.3.2.	Parámetros físicos de una antena	88
3.3.2.1.	<i>Tilt</i> mecánico.....	88
3.3.2.2.	<i>Tilt</i> eléctrico.....	89
3.3.2.3.	Azimut.....	90
3.3.2.4.	Altura	91
3.3.3.	Objetivos de optimización	91
3.3.3.1.	<i>Activeset</i> y <i>pilot pollution</i>	92
3.3.3.2.	<i>Ec/lo</i>	93
3.3.3.3.	RSCP.....	94
3.3.3.4.	CQI	96
3.3.4.	Herramienta de planificación celular (PCA)	97
3.3.4.1.	Características.....	98
3.3.4.2.	Datos de entrada	98
3.3.4.3.	Parámetros optimizables	99
3.3.5.	Monitoreo de KPIs	99
3.3.5.1.	Retenibilidad.....	100
3.3.5.2.	Accesibilidad.....	100
3.3.5.3.	Disponibilidad	101
3.3.5.4.	Usuarios activos y <i>throughput</i>	101
3.3.5.5.	SHOO	102
4.	DISEÑO DE OPTIMIZACIÓN DE UN CLÚSTER	103
4.1.	Herramientas de trabajo	103
4.1.1.	Herramienta de planificación celular automática capesso	103

4.1.2.	Herramienta de planificación asset	103
4.1.3.	Herramienta de <i>drive test swissqual</i>	104
4.1.4.	Herramienta de monitoreo U2000	104
4.2.	Preanálisis del clúster	104
4.2.1.	Descripción del diagrama de bloques del sistema	105
4.3.	Definición de un clúster por malos KPIs.....	109
4.3.1.	Descripción de las variables de estudio	110
4.4.	Proceso de diseño.....	110
4.4.1.	Etapa 1: prediseño, estado actual del clúster.....	110
4.4.1.1.	Simulación de los KPIs (Ec/No, PP, RSCP)	111
4.4.1.2.	<i>Drive test</i> inicial	113
4.4.1.3.	Estadísticas iniciales	114
4.4.2.	Etapa 2: definición de diseño de OPT	115
4.4.2.1.	OPT del clúster.....	116
4.4.2.2.	OPT por reducción de altura	118
4.4.2.3.	OPT de vecinas.....	120
4.4.3.	Etapa 3: diseño de Ingeniería de OPT	123
4.4.3.1.	Diseño OPT clúster OC.....	123
4.4.3.2.	Diseño de OPT por reducción de altura	126
4.4.3.3.	Diseño de OPT de vecinas.....	129
4.4.4.	Etapa 4: implementación	132
4.4.5.	Etapa 5: presentación de resultados	133
4.4.5.1.	Análisis resultados OPT clúster.....	134
4.4.5.2.	Análisis de resultados OPT reducción altura.....	140
4.4.5.3.	Análisis de resultados OPT de vecinas	145

CONCLUSIONES 149
RECOMENDACIONES 153
BIBLIOGRAFÍA 157

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Plano de la antena	2
2.	Espectro electromagnético	3
3.	Antena de bocina	4
4.	Antena de bucle	4
5.	Antena de hélice	5
6.	Antena monopolo	6
7.	Antena dipolo	7
8.	Representación de un patrón	8
9.	Fórmula directividad	8
10.	Fórmula ganancia	9
11.	Apertura efectiva	9
12.	Altura efectiva	10
13.	Impedancia de una antena	10
14.	Circuito equivalente de la resistencia	11
15.	Relación de la eficiencia	12
16.	Cálculo del VSWR	12
17.	Diferentes polarizaciones	14
18.	Funcionamiento de una antena	15
19.	Efecto de acoplamiento	16
20.	Antena direccional y omni	17
21.	<i>Tilt</i> eléctrico y mecánico	19
22.	Acoplador de cavidad	20
23.	Gráfica rechaza banda	21

24.	Sistema antena-receptores.....	22
25.	Medición de VSWR.....	23
26.	Cálculo SNR	24
27.	Medidor SINAD.....	25
28.	Intermodulación en analizador.....	26
29.	Proceso de medición	26
30.	Medición de patrón	27
31.	Medición y cálculo de ganancia.....	28
32.	Arquitectura UMTS	30
33.	Red celular.....	31
34.	Principio FDMA.....	33
35.	Principio de TDMA.....	33
36.	Principio de CDMA.....	34
37.	Red UTRAN UE-RNC.....	38
38.	Red UTRAN-Core.....	39
39.	Modulación QPSK.....	41
40.	Modulación 64 QAM	42
41.	Diagrama de estado RRC.....	44
42.	Modos transparentes y MA.....	47
43.	Mapeo de canales.....	50
44.	Capa BMC	52
45.	Modelo interfaz de aire	53
46.	Unidades de tiempo.....	54
47.	Mapeo entre canales lógicos y de transporte	59
48.	Mapeo entre los canales.....	62
49.	Velocidad de descarga dual carrier vs single carrier.....	63
50.	Efecto de MIMO en <i>throughput</i>	64
51.	Proceso de dimensionamiento.....	66
52.	Ejemplo link budget UL.....	67

53.	Ecuaciones de propagación	68
54.	Impacto del <i>cell breathing</i>	69
55.	Diseño de coberturas	70
56.	Cálculo interferencia UL	71
57.	Cálculo de carga para DL.....	72
58.	Ejemplo de PSC	73
59.	Control de potencia lazo externo.....	76
60.	Algoritmo SHO	78
61.	Ecuación servidora vecina	79
62.	Reducción de <i>drops</i> por optimización de vecinas	82
63.	Equipo de DT	85
64.	Pruebas con el software.....	86
65.	Rutas.....	86
66.	Análisis gráfico de degradación de Ec/No.....	88
67.	Predicción y físicamente <i>tilt</i> mecánico.....	89
68.	Predicción y vista física del <i>tilt</i> eléctrico	90
69.	Medición de azimut	90
70.	<i>Pilot pollution</i> , antes-después optimización.....	92
71.	Efectos de optimización del Ec/Io	94
72.	Optimización de RSCP.....	95
73.	Ejemplo de un export de sitios en XML.....	99
74.	Cálculo de la disponibilidad.....	101
75.	Cálculo de <i>throughput</i>	102
76.	Etapa 1: prediseño	105
77.	Etapa 2: definición de diseño de OPT	106
78.	Etapa 3: diseño ingeniería de OPT	107
79.	Etapa 4: implementación.....	108
80.	Etapa 5: presentación de resultados.....	109
81.	Ejemplo de simulación	111

82.	Ejemplo de DT	114
83.	Ejemplo de accesibilidad y retenibilidad	115
84.	Predicción clúster OC de OPT	116
85.	DT clúster OC	118
86.	Alta carga de 2 sitios.....	119
87.	Coberturas y <i>Throughput</i> de los sitios A y B, clúster ORA.....	120
88.	Detección mediante DT	121
89.	Degradación del Ec/No, clúster OV	122
90.	Objetivos en PCA.....	124
91.	Antes y después, simulación	125
92.	Balanceo de alturas	127
93.	Análisis de predicción, coberturas	128
94.	Eventos por servicio.....	130
95.	Líneas para agregar vecinas	131
96.	Resultados de DT clúster OC	134
97.	Distribución estadística de las muestras.....	135
98.	KPIs clúster OC	136
99.	SHOO clúster OC	138
100.	DT resultados de clúster ORA	140
101.	Distribución de muestras <i>throughput</i> clúster ORA	141
102.	KPIs clúster ORA	142
103.	SHOO clúster ORA.....	144
104.	Mejoras del Ec/No.....	145
105.	Distribución de muestras de EcNo.....	146
106.	Mejora de los eventos.....	147

TABLAS

I.	Valores típicos de VSWR.....	13
----	------------------------------	----

II.	Sumario de técnicas.....	35
III.	Lanzamientos 3GPP-UMTS.....	36
IV.	Comparativo entre técnicas.....	43
V.	Procedimientos <i>idle mode</i>	45
VI.	Canales lógicos.....	57
VII.	Canales de transporte.....	59
VIII.	Canales físicos.....	61
IX.	Comparativo de modelos.....	68
X.	Ejemplo objetivos de diseño.....	71
XI.	Valores comunes de potencia en DL.....	76
XII.	Parámetros HO intra frecuencia.....	80
XIII.	Parámetros de reelección.....	83
XIV.	Umbral de diseño.....	93
XV.	Umbral de diseño E_c/I_0	94
XVI.	Umbral de diseño RSCP.....	96
XVII.	Valores de CQI Cat G.....	97
XVIII.	Ejemplo de objetivos de diseño.....	112
XIX.	Objetivos clúster OC.....	117
XX.	Estadísticas de predicción.....	125
XXI.	Ejemplo de Ingeniería de OPT.....	126
XXII.	Objetivos de optimización.....	129
XXIII.	Declaración de vecinas faltantes.....	130
XXIV.	Tiempo aproximado de movimientos.....	132
XXV.	<i>Timeplan</i> de clústeres.....	133
XXVI.	Ganancias antes-después.....	139
XXVII.	Ganancias antes-después, sitios altos.....	144
XXVIII.	Ganancia en E_c/N_0	147

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
dBm	Decibelio-milivatio
dB	Decibelios
GHz	Gigahercio
°	Grados
Hz	Hertz
Kbps	Kilobits por segundo
KHz	Kilohercio
Km	Kilómetros
λ	Longitud de onda
Mbps	Mega bits por segundo
Mcps	Megachips por segundo
MHz	Megahercio
Mts	Metros
us	Microsegundos
ms	Milisegundos
%	Porcentaje
s	Segundos
W	Watts

GLOSARIO

Analizador de espectro	Es una herramienta capaz de representar las componentes espectrales de una determinada señal a partir de su transformada de Fourier.
Antena isotrópica	Es una antena ideal que radia potencia en todas las direcciones.
Armónico	Es el resultado de una serie de variaciones adecuadamente acomodadas en un rango o frecuencia de emisión, denominado paquete de información o fundamental.
Atenuador	Conjunto de resistencias que disminuye la magnitud de señales eléctricas.
Banda de frecuencia	Son intervalos de frecuencias del espectro electromagnético asignados a diferentes usos dentro de las radio comunicaciones.
<i>Broadcast</i>	Se basa en un único proceso de envío, independientemente del número de potenciales máquinas receptoras, de una misma información.
Canales de radio	Es la asignación en dominio de la frecuencia para acceder a un ancho de banda específico.

Erlang	Es una unidad de medición de tráfico en las telecomunicaciones y representa el uso de la voz. Describe el tráfico de una hora.
Ethernet	Es un estándar de transmisión de datos para redes de área local.
Generador de señal	Es un aparato electrónico que produce ondas senoidales, cuadradas y triangulares.
Guía de onda	Es un tubo conductor a través del cual se transmite la energía en la forma de ondas electromagnéticas.
IMSI	<i>International mobile subscriber identity</i> (identidad internacional del abonado a un móvil). Es un código de identificación único para cada dispositivo de telefonía móvil, integrada en la tarjeta SIM, que permite su identificación a través de las redes GSM y UMTS.
Longitud de onda	Es la distancia entre picos de una onda.
Modulación	En telecomunicaciones el término modulación engloba el conjunto de técnicas para transportar la información sobre una onda portadora, que es la señal que porta y transporta la información a más alta velocidad.

Multicast

Se basa en un único proceso de envío, independientemente del número de potenciales máquinas receptoras, de una misma información desde una máquina origen a todas las máquinas destinatarias que posean al menos un miembro de un determinado grupo de multidifusión y que, además, compartan una misma dirección de multidifusión.

Portadora de frecuencia

Las ondas portadoras son ondas de radio que han sido modificadas para enviar información, aunque una onda sin modificar también se puede llamar portadora.

Resonancia

Se produce cuando la frecuencia angular de la fuerza externa coincide con la frecuencia natural de oscilación del sistema, con un aumento de la amplitud.

WiMax

Es una novedosa forma de transmisión de datos usando microondas de radio. Esta tecnología es usada comúnmente para Internet inalámbrica de banda ancha dentro de un área geográfica determinada.

RESUMEN

Desde siglos pasados diferentes científicos, ingenieros, inventores han desarrollado estudios para comprender el comportamiento de dos fenómenos: campo eléctrico y campo magnético. Posteriormente un físico llamado James Maxwell postuló una serie de ecuaciones que agrupaban no solo sus observaciones de estos fenómenos, sino que también de otros científicos. De esto surge una rama muy importante de la física: la teoría electromagnética.

La teoría electromagnética fundamentada en las ecuaciones de Maxwell, demuestra que la electricidad, el magnetismo, entre otros fenómenos, son gracias a campos electromagnéticos. Estos conceptos se han utilizado a través de ese momento para desarrollar diferentes modelos o invenciones para describir el comportamiento de un campo electromagnético en la vida real. Un elemento muy importante creado es una antena. Este dispositivo propaga una onda electromagnética a través del espacio para comunicar dos personas mediante un teléfono.

Paralelamente el desarrollo de formas de comunicación entre personas han generado el nacimiento de un campo importante: telecomunicaciones. No es más que la transmisión y recepción de ondas electromagnéticas en el espacio y su posterior procesamiento mediante la electrónica. De esto han surgido redes de conexiones de telefonía móvil para comunicar a las personas. Desde la primera generación AMPS (*advanced mobile phone system*) utilizando sistemas análogos de transmisión, hasta la actualidad con LTE (*long term evolution*) usando sistemas digitales de comunicación. La diferencia entre un

sistema análogo y digital, es que un digital es más fácil de manipular una onda ya que solo está contenida en dos estados: 1 o 0.

Específicamente se centrará este informe en la tecnología UMTS (*universal mobile telecommunications system*) que pertenece a una tecnología 3G, que en la actualidad ampliamente se utiliza por su capacidad de utilizarla para llamadas de voz o una sesión de datos para ver Internet. Al adentrarse en el análisis de una red de este tipo, existen varias etapas en su diseño: desde por el análisis de ganancias y pérdidas, hasta la capacidad por la cantidad de usuarios; en la etapa de madurez de la red es muy importante optimizar las radiobases para obtener un mayor performance en la percepción del usuario.

La planificación celular automática será fundamental en el diseño de los valores deseados en las radiobases para una mejora, no solo en los usuarios si no en los KPIs (*key performance indicator*) de la red.

OBJETIVOS

General

Utilizar la planificación celular automática para rediseñar la red, aprovechando el nivel de madurez, con base en parámetros físicos o lógicos: azimuts, *tilt*, altura, potencia, etc. Analizar los resultados en KPIs y *drive test*.

Específicos

1. Entender y analizar el comportamiento de una antena, como base fundamental en la propagación de la onda en un sistema de telefonía móvil.
2. Comprender los fundamentos de una red UMTS (3G).
3. Analizar el proceso de diseño de una red UMTS, profundizando en el tema de optimización.
4. Analizar y desarrollar un clúster de optimización, definiendo los pasos del diseño; además, planear un eficiente listado de vecindades para evitar malos niveles de RF. Se utilizará la herramienta necesaria para definir un plan de optimización efectivo así como también la implementación física o lógica de los cambios propuestos, analizando los resultados finales.

INTRODUCCIÓN

Como parte de mi experiencia en el estudio de la electrónica, siempre me han interesado las telecomunicaciones por ser parte importante en la vida del ser humano, ya que sin estas no se podría estar comunicado; esto ha ido evolucionando hacia una tecnología de comunicación más versátil y flexible: las comunicaciones inalámbricas. Este trabajo está orientado hacia el diseño y análisis de la telefonía móvil específicamente 3G.

Las antenas ofrecen el medio de transmisión y recepción de la información enviada y recibida. Las antenas se desarrollaron bajo el perfecto modelaje de un sistema físico basado en las ecuaciones de Maxwell, mediante el procesamiento y análisis de campos electromagnéticos en el espacio. La tecnología UMTS es un grupo de reglas que establecen la forma de envío de paquetes o señales de voz para establecer una llamada normal de voz o una sesión de datos.

El primer capítulo presente el análisis explícito de una antena. Los tipos que existen y cuáles son los más eficientes para una red de telefonía celular. También se descubrió como parámetros propios como la Ganancia o directividad pueden ser manipulados para diferentes escenarios reales. Fundamental en el proceso de puesta en servicio de una antena son las mediciones de armónicos, *VSWR (voltage standing wave ratio)* o acople de impedancias.

El segundo capítulo se adentrar en la teoría de UMTS, como fue la evolución de GSM (*global system for mobile*), una red UTRAN (*UMTS terrestrial*

radio access network) como se compone y funciona. Como cualquier otro tipo de tecnología de comunicación está conformada por arquitectura de diferentes capas que establecen las formas de comunicación entre dispositivos, así como los diferentes canales de comunicación para el transporte o control de potencia en un enlace de comunicación.

En el tercer capítulo se tratará esta tecnología a nivel práctico. Como se diseña o planifica una red desde sus primeros pasos hasta una etapa en la que se consolida la red y hay que realizar un proceso de optimización. Este proceso es el ajuste hecho a las radiobases, preferiblemente agrupadas por clústeres o grupos, de sus parámetros físicos (*tilt*, altura o azimut) o parámetros lógicos (planeación de vecinas). Optimizar también sus listados de vecinas para evitar mayores KPIs de *drop call* mediante el control de *handovers*. También cuáles son los objetivos de medición y análisis de un *drive test* (es la recolección de datos que registra un móvil de la red en un vehículo) que es una herramienta ampliamente utilizada ya que provee de una medición real en la zona.

El cuarto capítulo plantea el análisis mediante las herramientas de diseño sobre cómo funciona la planificación celular automática, optimizando recursos mediante datos como tráfico o cargas de potencias de las celdas para generar un plan de optimización eficiente y el análisis previo y posterior mediante un *drive test*. Todo esto aplicado en la vida real y también monitoreando el desempeño a nivel de estadísticas o KPIs.

1. TEORÍA SOBRE ANTENAS

1.1. Introducción

1.1.1. Origen del electromagnetismo

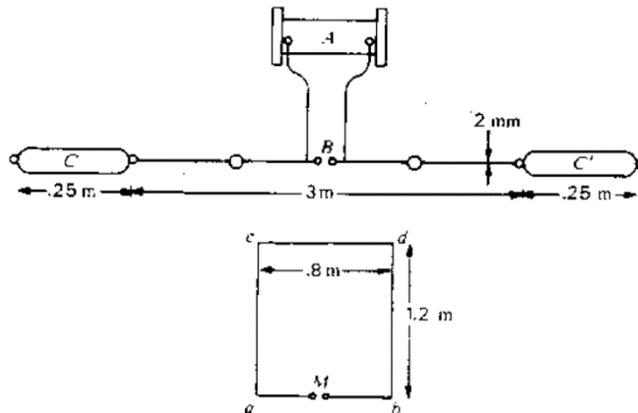
Desde tiempos pasados, cuando los griegos descubrieron que cuando frotaban el ámbar se creaban cargas que atraían otros objetos ligeros que era una fuerza atractiva entre estos 2 objetos, a lo largo de todos los siglos se han hecho experimentos sobre los fenómenos magnéticos y eléctricos. Desde Benjamín Franklin con sus experimentos con los rayos eléctricos para enunciar el principio de conservación de electricidad, hasta los pioneros de la teoría electromagnética: Gauss, Faraday, Coulumb, Ampere, Maxwell, etc.

Estos personajes desarrollaron fórmulas matemáticas a base de experimentación demostrando la interdependencia entre el magnetismo y la electricidad. James Clerk Maxwell unificó estas formulaciones y funda lo que es la ciencia del electromagnetismo. Con base en los análisis que realizó Maxwell, postuló una serie de ecuaciones las cuales sirvieron para describir la propagación de una onda electromagnética la cual es un concepto clave para el desarrollo de las antenas.

1.1.2. La primera antena

Heinrich Hertz realizó las primeras pruebas con un conductor de una longitud de onda de 8 mts e incluía un reflector parabólico cilíndrico.

Figura 1. Plano de la antena



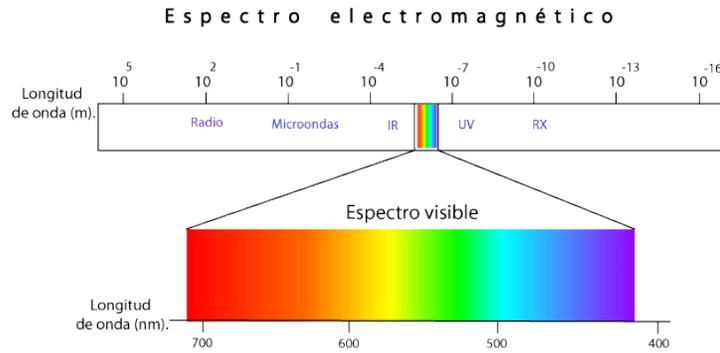
Fuente: KRAUS, John. *Antenas*. p. 4.

C y C' eran los extremos del dipolo de la antena de transmisión y abcd era la antena receptora de bucle, cuando la bobina de inducción en el punto A era encendida, inducía los extremos de la antena de transmisión en el punto B.

1.1.3. Espectro electromagnético

La energía de onda radiada oscila a una frecuencia dada. El espectro electromagnético es el rango de todos los tipos de radiación electromagnética. La radiación es la energía que utiliza una onda para viajar y extenderse a lo largo de un medio de propagación por lo que el espectro está asociado al equivalente de energía, algunos tipos son: ondas de radio, microonda, rayos ultravioleta, rayos gama, rayos x, entre otros.

Figura 2. **Espectro electromagnético**



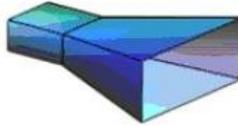
Fuente: http://www.aulaclic.es/fotografia-photoshop/t_4_7.htm. Consulta: 15 de diciembre de 2015.

1.2. Tipos de antenas

1.2.1. Antenas de bocina

Son adecuadas para frecuencias muy altas; en el final extremo de la guía de onda puede tener una forma cuadrada, elíptica o circular. La apertura se puede diseñar de tal manera que se tenga una mejor resonancia ya que se logra una mejor distribución del campo electromagnético. Un mejor lóbulo central se logra realizando que la longitud de la bocina sea grande en comparación con el ancho de la apertura.

Figura 3. **Antena de bocina**



Fuente:

http://datateca.unad.edu.co/contenidos/203532/exelearning/Modulo/leccin_2caractersticas_de_las_antenas.html. Consulta: 15 de diciembre de 2015.

1.2.2. **Antenas de bucle**

Es una antena simple de bucle de cable con un radio y se pueden obtener muchas configuraciones: elípticas, circulares, entre otras. Son utilizadas para recepción debido a que por su baja resistencia de radiación, tiene baja radiación en modo de transmisión. Se usan ampliamente como receptores de radio por su relación a ruido bajo.

Figura 4. **Antena de bucle**

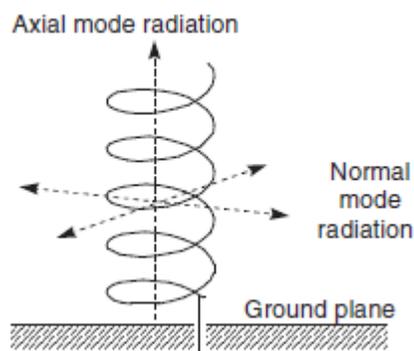


Fuente: BALANIS, Constantine. *Antenna theory analysis and design*. p. 232.

1.2.3. Antenas helicoidales

Es considerada como un elemento vertical de varios bucles, formando una hélice. Este puede operar de 2 formas, en modo normal el rendimiento de radiación es más intenso en el eje normal de la hélice. El modo axial existe una máxima radiación a lo largo del eje de la hélice. Es un tipo de antena omnidireccional con poco tamaño y una alta eficiencia pero su ancho de onda es bastante estrecho, se utiliza para aplicaciones móviles de tamaño reducido.

Figura 5. Antena de hélice



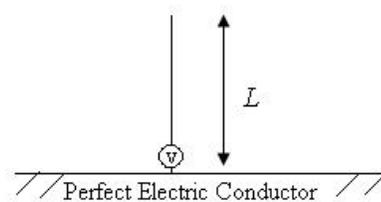
Fuente: SAUNDERS, Simon. *Antennas and propagation for wireless communication systems*.
p. 84.

1.2.4. Antena monopolo

Este tipo de antena es considerada como la mitad de una antena dipolo (se verá adelante), consta de una barra recta construida sobre algún tipo de plano encima de la tierra. Una señal transmitida o recibida es tomada a lo largo de la antena y la alimentación está conectada a la punta de la antena y el otro lado está unido al plano de tierra. Este tipo de antena es resonante ya que su

longitud de onda corresponde al largo de la antena; es considerada omnidireccional porque su patrón de radiación emite potencia en todas las direcciones.

Figura 6. **Antena monopolo**

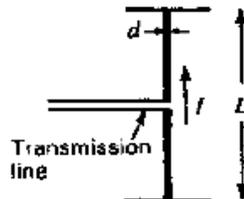


Fuente: <http://www.antenna-theory.com/antennas/monopole.php>. Consulta: 19 de diciembre de 2015.

1.2.5. **Antena dipolo**

Es un tipo de antena compuesto por 2 barras idénticas que tienen simetría, en un extremo de estos 2 hilos está la alimentación o fuente de emisión de la onda y el otro extremo está el circuito abierto que es donde se transmite o se recibe la información. Debido a que la corriente fluye en direcciones opuestas se cancelan y no existe un campo radiado en lo lejano. Cada mitad de la onda es transmitida por cada pedazo de barra por lo que la longitud de onda está dada por la suma de las 2 longitudes.

Figura 7. Antena dipolo



Fuente: KRAUS, John. *Antenas*. p. 201.

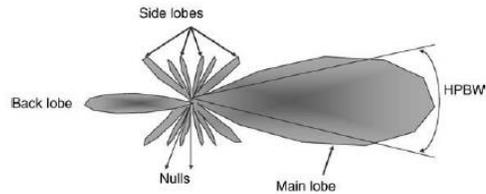
1.3. Parámetros de las antenas

1.3.1. Patrón de radiación

Es una gráfica que se utiliza para saber cómo se comporta la radiación en un campo lejano. Es una gráfica de la potencia radiada por ángulo sólido o su intensidad de radiación. Existen 3 parámetros que definen un patrón:

- El *half-power beamwidth (HPBW)*: es la potencia media del ancho de haz, es el rango de ángulos que contiene la mitad de la potencia del lóbulo principal.
- *Main lobe*: o lóbulo principal donde está contenida la mayor potencia de radiación.
- *Side lobe*: o lóbulo lateral, es cualquier lóbulo que emite radiación que no sea el principal.
- *Nulls and back lobe*: son lóbulos que no emiten nada y los traseros están a 180° del HPBW.

Figura 8. **Representación de un patrón**



Fuente: SAUNDERS, Simon. *Antennas and propagation for wireless communication systems*.
p. 66.

1.3.2. **Directividad de una antena**

Matemáticamente se puede definir como la relación de la intensidad de radiación dada una dirección con la intensidad de radiación emitido en todas las direcciones. En otras palabras es la relación de una antena no isotrópica con una isotrópica; es un parámetro de medición que calcula cuan directiva es una antena con respecto a su patrón de radiación o que tan direccional puede ser.

Figura 9. **Fórmula directividad**

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{\text{rad}}}$$

U= Intensidad de Radiacion
U₀= Intensidad de Radiacion de una antena isotropica
P_{rad}= Potencia total radiada

Fuente: BALANIS, Constantine. *Antenna theory and analysis design*. p. 44.

1.3.3. **Ganancia de una antena**

La ganancia de una antena se puede definir matemáticamente como la relación de la intensidad de radiación en una directividad dada con la intensidad

de radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena radiara isotrópicamente. Cuando una antena no contiene ganancia, irradia toda su potencia en todas las direcciones, mientras si una antena utiliza ganancia concentra la potencia en una dirección dada o ángulo.

Figura 10. **Fórmula ganancia**

$$G = eD.$$

e= Eficiencia de Radiacion
D= Directividad

Fuente: STUTZMAN, Warren. *Antenna theory and design*. p. 38.

1.3.4. **Apertura y altura efectiva**

La apertura efectiva es un parámetro muy apegado a su directividad. Se podría describir una onda viajera que se desplaza hacia una antena receptora, que su directividad está orientado hacia la onda, la apertura es el área donde se captura la mayor cantidad de energía:

Figura 11. **Apertura efectiva**

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$$

λ = Longitud de onda
G= Ganancia

Fuente: <http://www.antenna-theory.com/basics/aperture.php>. Consulta: 20 de enero de 2016.

La altura efectiva es la altura en la que están situada la antena sobre la tierra para la radiación de la onda. Matemáticamente es la relación del voltaje sobre el campo eléctrico.

Figura 12. **Altura efectiva**

$$h = \frac{V}{E} \quad \begin{array}{l} V = \text{Voltaje inducido} \\ E = \text{Campo electrico} \end{array}$$

Fuente: KRAUS, John. *Antenas*. p. 40.

1.3.5. **Impedancia de entrada**

Es la impedancia que está en una antena entre sus terminales o como la Ley de Ohm es la relación del voltaje y corriente. La impedancia depende de la frecuencia y está representado de la siguiente forma:

Figura 13. **Impedancia de una antena**

$$Z_A = R_A + jX_A$$

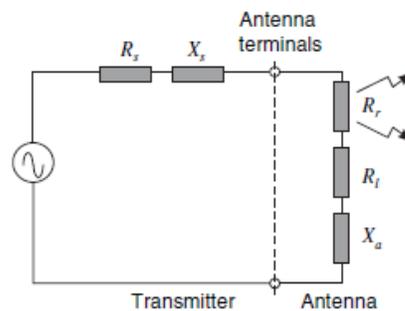
Fuente: BALANIS, Constantine. *Antenna theory and design*. p. 80.

R_A representa disipación; ejemplo perdidas que suponen calor debido al hardware o por la línea de transmisión. X_A representa la potencia almacenada de los campos cercanos de la antena.

1.3.6. Eficiencia y resistencia de radiación

Como se vio anteriormente la RA representa disipación y está compuesta por la suma de 2 resistencias: R_r y R_l . R_r es llamada resistencia de radiación y no es más que la potencia disipada por la antena debido a la radiación. La R_l es la resistencia debido a la potencia disipada en lo interior a la antena por las partes que generan calor en el *hardware*.

Figura 14. Circuito equivalente de la resistencia



Fuente: SAUNDERS, Simon. *Antennas and propagation for wireless communication systems*.
p. 67.

La eficiencia es la relación entre la potencia entregada a la antena y la potencia radiada o disipada dentro de la misma. Una antena de alta eficiencia es porque casi toda la potencia que le es suministrada es irradiada, mientras que si tiene una baja eficiencia es porque la mayor parte de su potencia se queda por la absorción de las pérdidas interna que pueda tener.

Figura 15. **Relación de la eficiencia**

$$e = \frac{\text{Power radiated}}{\text{Power accepted by antenna}} = \frac{R_r}{R_r + R_l}$$

Fuente: SAUNDERS, Simon. *Antennas and propagation for wireless communication systems*. p. 68.

1.3.7. **Ancho de banda y VSWR**

El ancho de banda de una antena es la capacidad que tienen de trabajar sobre una amplia gama de frecuencias, regularmente la ganancia se mantiene a menos de 3dB de su máximo valor o cuando el valor de VSWR no sea mayor a 2:1. El VSWR (*voltage standing wave ratio*) es un parámetro que mide como la impedancia de una antena se adapta a una línea de transmisión, describe que tanta potencia se refleja de la antena.

Figura 16. **Cálculo del VSWR**

$$\text{VSWR} = \text{voltage standing wave ratio} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Fuente: BALANIS, Constantine. *Antenna theory analysis and design*. p. 67.

Tabla I. Valores típicos de VSWR

VSWR	Γ (S11)	Potencia reflejada (%)	Potencia reflejada (dB)
1	0	0	infinito
1.5	0,2	4	-14
2	0,333	11,1	-9,55
2.5	0,429	18,4	-7,36
3	0,5	25	-6
3.5	0,556	30,9	-5,1
4	0,6	36	-4,44
5	0,667	44	-3,52
6	0,714	51	-2,92
7	0,75	56,3	-2,5
8	0,778	60,5	-2,18
9	0,8	64	-1,94
10	0,818	66,9	-1,74
15	0,875	76,6	-1,16
20	0,905	81,9	-0,87
50	0,961	92,3	-0,35

Fuente: <http://www.antenna-theory.com/definitions/vswr.php#vswrtable>. Consulta: 22 de enero de 2016.

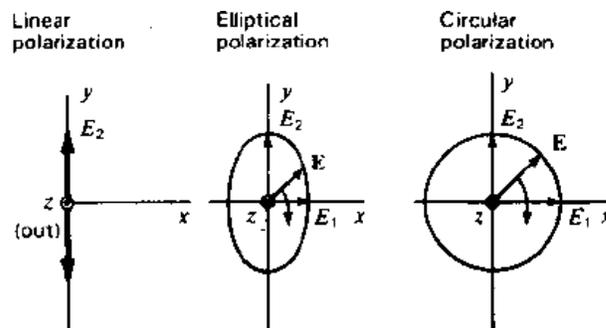
Un valor de VSWR de 1 es ideal, es decir, no habrá potencia reflejada pero en la práctica es imposible por las diversas pérdidas que puede tener una línea de transmisión. Un valor práctico ideal es de 1 a 2 máximos, ya que en un VSWR de 1.5 del 100 % de potencia entregada; 4 % de esa potencia se refleja. Una potencia reflejada puede dañar los equipos cuando mayor sea, por los picos de voltaje que pueda tener.

1.3.8. Polarización

La polarización de una antena en una dirección dada de la onda transmitida que describe la orientación de un campo eléctrico. Es un gráfico que describe como varía en el tiempo una onda transmitida. Existen 3 tipos de polarización:

- Lineal: es la propagación de las ondas magnéticas y eléctricas en una dirección.
- Elíptica: es la propagación que define una elipse en su trayectoria.
- Circular: es la propagación que define un círculo en su trayectoria.

Figura 17. Diferentes polarizaciones



Fuente: KRAUS, John. *Antennas*. p. 71.

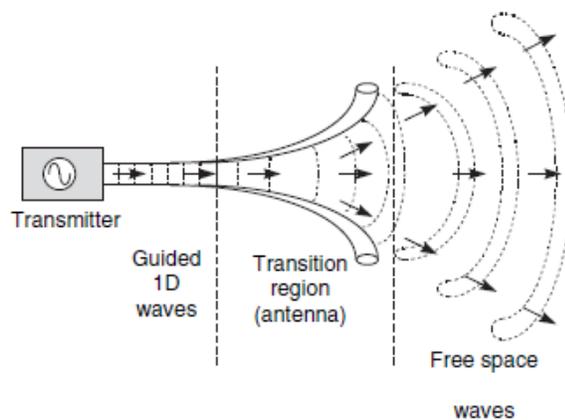
1.4. Antenas de telefonía

1.4.1. Como una antena radia

Una antena es un dispositivo que convierte una serie de ondas guiadas en una línea de transmisión en onda de radio que viaja en el espacio o puede

funcionar en la dirección contraria. En modo de recepción toda esa potencia transmitida como se ha visto es interceptada en el área efectiva de una antena, para su posterior conversión a una onda guiada.

Figura 18. **Funcionamiento de una antena**



Fuente: SAUNDERS, Simon. *Antennas and propagation for wireless communication system*.
p. 61.

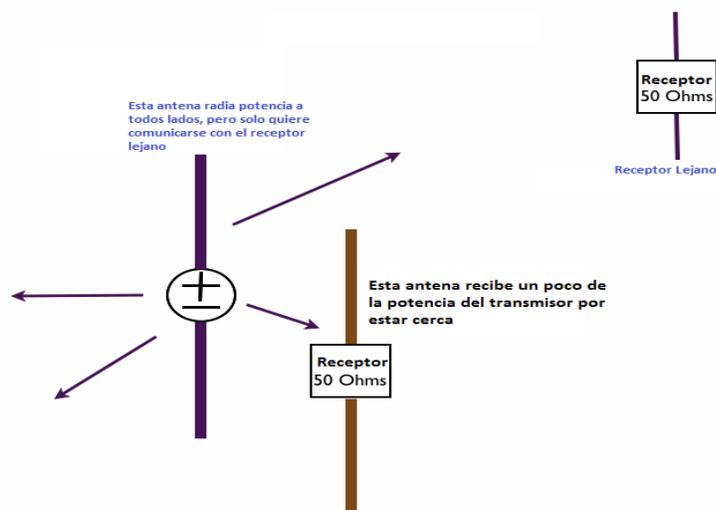
1.4.2. **El efecto de acople entre antenas**

Este efecto describe como la potencia de una antena es absorbida por otra que está cerca y las 2 funcionando; en la práctica es un problema porque debido a la reciprocidad de un par de antenas en modo de transmisión y recepción, el acoplamiento reduce tanto la eficiencia como el rendimiento de las antenas porque la comunicación no está establecida entre esas 2 antenas.

Un transmisor desea comunicarse con un receptor lejano, pero cerca tiene otro receptor con el cual no quiere establecer comunicación. El transmisor emite

potencia en todas las direcciones pero el receptor cercano recibe una pequeña porción de esa potencia. Como lo ilustrado en la siguiente figura:

Figura 19. **Efecto de acoplamiento**



Fuente: <http://www.antenna-theory.com/definitions/mutualcoupling.php>. Consulta: 25 de enero 2016.

1.4.3. Impedancia mutua

Si se tiene una antena que radia bien, su resistencia total sería la resistencia de radiación. Por el mismo tema de la cercanía entre antenas reciben potencia, estas también ven afectadas su impedancia porque entre menor impedancia tenga una antena cercana mayor potencia consumirá y la comunicación con la antena lejana se verá con interferencia.

1.4.4. El uso de filtros

El uso de filtros se usa ampliamente debido a su versatilidad en cuanto a discriminación de frecuencias en un ancho de banda definido. Existen antenas que están diseñadas para una amplia gama de frecuencias, cuando una antena está en modo de recepción e intercepta una onda; el proceso de tratamiento de la señal incluye un filtro que selecciona la onda a una frecuencia específica porque existen varias frecuencias que no sirven ya que solo se quiere tratar la que es de nuestro uso. Ejemplo en un mismo ancho de banda pueden viajar señales de *wifi*, *bluetooth*, telecomunicaciones, etc. y nos interesa la frecuencia de telecomunicaciones.

1.4.5. Antenas Macros

La función principal de este tipo de antenas es tener una cobertura uniforme en el punto que irradie según la orientación de su azimut. Cuanta mejor directiva será la antena, mejor provecho se obtendrá de la potencia que le es suministrada. Una antena omnidireccional es la que no tiene un patrón específico a una dirección dada, sino que esta irradia potencia en los 360° por lo que no es directiva sino que son de alta ganancia en muchas ocasiones.

Figura 20. Antena direccional y omni



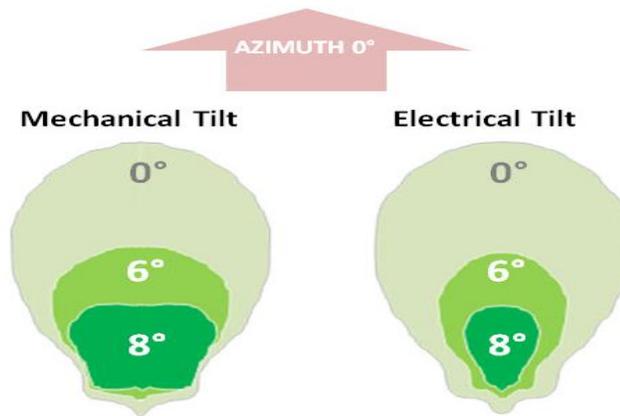
Fuente: elaboración propia.

1.4.6. Parámetros físicos

Una antena físicamente consta de 4 parámetros principales que pueden optimizar su máxima configuración para que tenga una mejor cobertura. Desde la orientación como la cantidad en metros de cobertura, son cruciales en el diseño de una red ya que se debe realizar de tal manera que todas las antenas convivan juntas sin causar interferencia. Los parámetros a tomar en cuenta son los siguientes:

- **Altura:** la altura es crucial porque de esta depende mucho la cantidad de terreno que se quiera cubrir. En la etapa de cobertura, que se verá más adelante, es necesario tener antenas altas para cubrir lo máximo. En la etapa de capacidad ya la red entra en una etapa de madurez por lo que para no causar diversos problemas de interferencia la altura debe ser la promedio entre las que estén cercanas.
- **Azimut:** es la orientación física que tiene una antena medida en grados con respecto a su norte geográfico en sentido a las agujas del reloj.
- **Tilt mecánico:** es la orientación mecánica que se realiza a la antena para inclinarla hacia arriba o hacia abajo y se utiliza para reducir o aumentar la cobertura de una antena. Se realiza sobre el eje vertical y medido en grados.
- **Tilt eléctrico:** es la modificación del patrón de radiación de la antena de tal manera que su cobertura sufre una reducción en la orientación del azimut, a diferencia del *tilt* mecánico es más uniforme y medido en grados.

Figura 21. **Tilt eléctrico y mecánico**



Fuente: <http://www.telecomhall.com/ES/que-es-tilt-electrico-y-mecanico-de-la-antena-y-como-lo-usa.aspx>. Consulta: 29 de enero de 2016.

1.4.7. Acopladores y duplexores

Un acoplador es un dispositivo que se utiliza para conectar un sistema de radio con una antena teniendo en cuenta el acople de impedancias entre ellos. El uso de multiacoplador es utilizado para más de una antena para compartir el mismo tipo de radio solo que teniendo en cuenta un espaciado de frecuencia si son antenas de diferente banda para evitar problemas de pérdidas de paquetes. Un *duplexor* es un dispositivo que permite una comunicación bidireccional en una sola línea de transmisión. La ventaja es que se puede transmitir y recibir.

1.4.7.1. Acoplador de 3dB

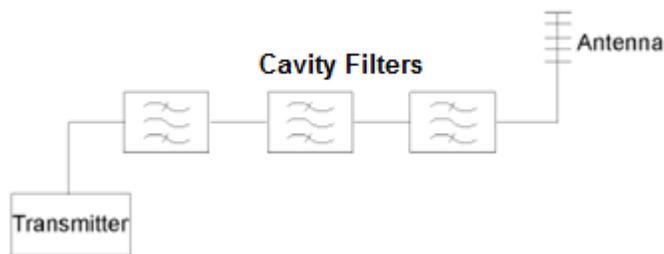
Es un acoplador que de entrada tiene 2 señales y sirve como divisor o combinador de potencia con un desfase de la señal a 90° en la salida de igual amplitud. Esto es muy útil en diseños de RF en donde se necesite compartir

equipo de radio a varias antenas distribuidas y lo que proporciona este acoplador es 3dB de pérdidas en la línea de acople.

1.4.7.2. Acoplador de cavidad

Aparte de ser un acoplador funciona como un filtro pasa banda de cavidad y se usa para filtrar señales parasitas que puedan enviar los equipos de radio y para acoplar múltiples antenas.

Figura 22. Acoplador de cavidad



Fuente: BAILEY, David. *Practical radio engineering and telemetry for industry*. p. 66.

Un acoplador puede introducir entre 1 y 3 dB de pérdidas en la línea de transmisión, así mismo puede ayudar a que otro equipo de radio interfiera. A menudo puede funcionar colocar varios en serie para prevenir problemas de intermodulación o interferencia y debe mantenerse una separación de 300KHz en la banda de 800-950MHz.

1.4.7.3. Acoplador catnose

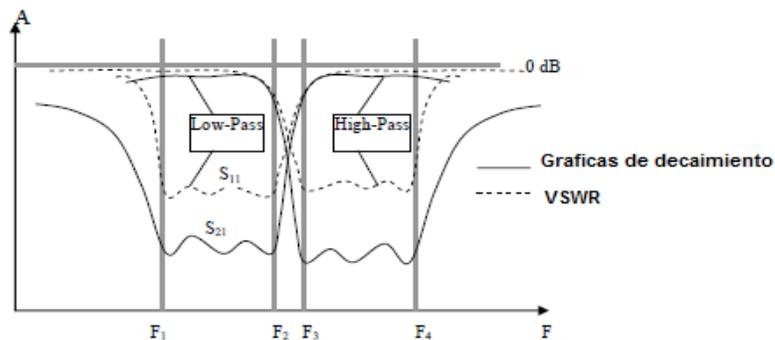
Este tipo de acoplador económico fue concebido para tener una mejor directividad y al menos poder transportar 8 señales. Contiene una impedancia

de 50Ω que es la adecuada para un mejor ajuste en el acople con el sistema de radio.

1.4.7.4. Duplexor rechaza banda

Este tipo de duplexor está formado por 2 resonadores: un rechazo paso bajo y un rechazo paso alto. El análisis gráfico permite observar que la conjugación de sus gráficas solo permite el paso de cierto ancho de banda para la comunicación entre dispositivos.

Figura 23. Gráfica rechaza banda



Fuente: PIETTE, Bernard. *VHF/UHF filters and multicouplers*. p. 131.

Entre F₂ y F₃ están las frecuencias aceptadas por el duplexor. En un sistema de varias antenas, funciona bien cuando se tienen muchas bandas de frecuencias; entonces, este atenúa las frecuencias que no correspondan a un canal de comunicación de transmisión o comunicación cuando quieren interactuar 2 antenas.

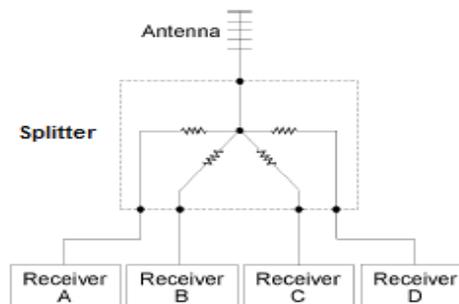
1.4.7.5. Duplexor pasa banda

Es un duplexor que está conformado por 2 filtros pasa banda que están unidos en un punto en común llamado nodo. A diferencia del rechaza banda, este duplexor permite la transmisión/recepción de un ancho de banda definido y esto permite protección sobre otros sistemas de radio. La protección contra la desensibilización del receptor lo hace adecuado para su uso en sitios urbanos congestionados.

1.4.7.6. Splitter

Es un dispositivo que se utiliza para permitir conectar un sistema de radio a diversas antenas o viceversa, pero con el inconveniente que la potencia se dividirá en igual proporción a las antenas conectadas, no cumple funciones de adaptación de impedancias por lo que puede tener pérdidas de inserción atenuando aún más la potencia en 1 a 3 dB. El *splitteo* permite combinar varias antenas que tengan una mayor cobertura pero reduciendo su ganancia.

Figura 24. Sistema antena-receptores



Fuente: BAILEY, David. *Practical radio engineering and telemetry for industry*. p. 70.

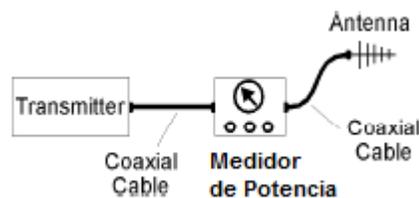
1.4.8. Mediciones de una antena

En la instalación de los equipos en un sistema que comprende una antena radiando, hay diversos factores a tomar en cuenta para un correcto funcionamiento. Existen herramientas especializadas para medir posibles causas que no puedan interferir en el correcto funcionamiento del sistema: armónicos, intermodulación, mal VSWR, entre otros.

1.4.8.1. Medición de VSWR

Se tiene una onda viajera en un cable coaxial, se coloca un aparato entre un sistema de radio y la antena que se llama medidor de potencia RF. Se mide la tensión de la onda estacionaria (donde las oscilaciones deben pasar de positivo a negativo) y comparándolo con la tensión resultante en el extremo contrario donde debería ser aproximadamente 0 para determinar la cantidad de energía reflejada. Un valor normal es igual o menor a 1.5, si excede esta cantidad será necesario revisar todos los conectores y la línea del cable coaxial.

Figura 25. Medición de VSWR



Fuente: BAILEY, David. *Practical radio engineering and telemetry for industry*. p. 89.

1.4.8.2. Medición de frecuencias parasitas

Este tipo de mediciones son hechos a dispositivos que transmiten potencia RF, estas mediciones deben cumplir con ciertos límites de frecuencia para no interferir con otros sistemas que emitan señales en la misma banda de frecuencia. Se verifica que los sistemas de transmisiones no emitan fuera de su canal de frecuencia y se realiza con un analizador de espectro.

1.4.8.3. Mediciones de ruido y SINAD

Una de las mediciones para analizar el efecto del ruido es SNR (*signal to noise ratio*) y es una comparación de la potencia de la señal más el ruido contra el ruido en un punto específico. Se calcula así:

Figura 26. Cálculo SNR

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{señal}} + P_{\text{ruido}}}{P_{\text{ruido}}} \right)$$

Fuente: BAILEY, David. *Practical radio engineering and telemetry for industry*. p. 76.

La medición se realiza en el receptor de la antena y una buena medición se da cuando en la entrada del receptor tenga una baja señal de RF obteniendo valores de entre 3 a 6 dB de SNR y un nivel de 12 dB se refiere a un nivel SINAD que es un parámetro que mide la relación señal ruido y distorsión. Las mediciones se realizan con un equipo llamado medidor SINAD.

Figura 27. **Medidor SINAD**



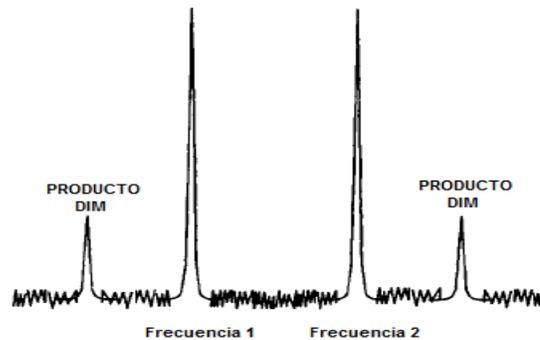
Fuente: BAILEY, David. *Practical radio engineering and telemetry for industry*. p. 77.

El generador de RF producirá una señal de 1Khz a la entrada de la antena produciendo armónicos y ruido en las líneas de audio, por lo que el medidor SINAD medirá la potencia, ruido y distorsión de la señal.

1.4.8.4. **Mediciones de intermodulación**

La distorsión de intermodulación (DIM) se produce cuando 2 frecuencias se mezclan en un transmisor, receptor o cercano a ellos, ocasionando que se produzca una tercera frecuencia que genera más interferencia con otros usuarios. En la siguiente imagen se puede observar un producto de intermodulación:

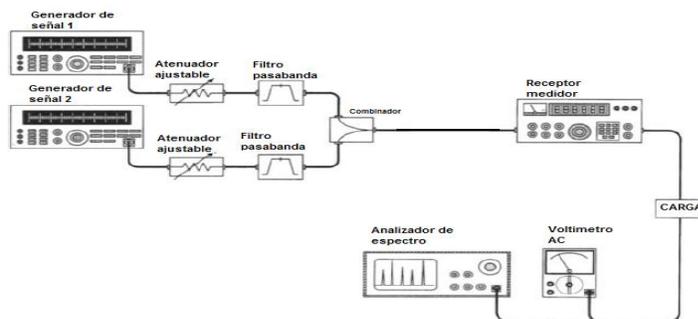
Figura 28. **Intermodulación en analizador**



Fuente: CARR, Joseph. *Practical radio frequency test & measurement*. p. 211.

La medición se hace colocando 2 generadores de señal (simulando nuestros transmisores de antenas) y las salidas tienen un atenuador para simular una línea de transmisión, un filtro pasa banda se coloca para eliminar posibles armónicos y que la señal sea lo más transparente posible. Estas señales se combinan y se introducen en un receptor, que a su vez tiene varios equipos conectados para medir la amplitud del voltaje y un analizador de espectro.

Figura 29. **Proceso de medición**



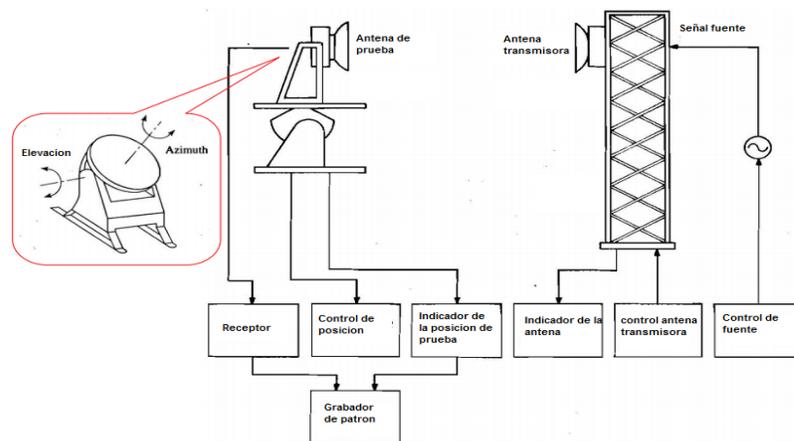
Fuente: CARR, Joseph. *Practical radio frequency test & measurement*. p. 211.

1.4.8.5. Medición de ganancia y patrón de la antena

La medición de un patrón de radiación es una de las características más importantes y más difíciles ya que una antena irradia en todas las direcciones en poca o bastante potencia. Un diagrama de radiación es la representación de la amplitud y fase, una forma de medición es por medio de una antena transmisora y prueba. La fuente transmisora debe ser lo más transparente, lo más ideal posible.

La antena de prueba debe estar montada sobre un sistema rotacional para dibujar los parámetros de azimut y elevación; un dispositivo llamado grabadora de patrón graba todos los valores obtenidos y proporciona una gráfica lineal y polar. Un valor de 40 dB es el valor promedio de calibración para obtener una mejor resolución de los lóbulos.

Figura 30. Medición de patrón

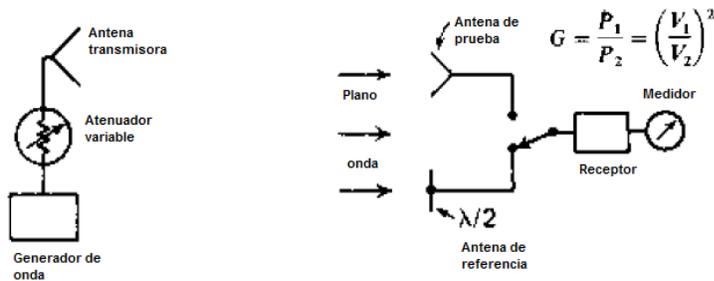


Fuente: Hui, Hon. *Antenna measurement*.

<https://www.ece.nus.edu.sg/stfpage/elehht/Teaching/EE6832/Lecture%20Notes%5CAntennas%20Measurement.pdf>. Consulta: 29 de enero de 2016.

Uno de los parámetros más importantes en la radiación de una antena es la ganancia. Montando una antena frente de otra y en la antena de prueba se tiene una antena de referencia de $\lambda/2$, se mide el voltaje de la antena de prueba y transmisora mediante un voltímetro; se mide la potencia de las 2 antenas, la potencia de la antena transmisora se calibra con un atenuador y se calcula con una fórmula.

Figura 31. **Medición y cálculo de ganancia**



Fuente: KRAUS, John. *Antennas*. p. 825.

2. TECNOLOGÍA 3G (UMTS)

2.1. Introducción

2.1.1. Evolución de GSM a UMTS

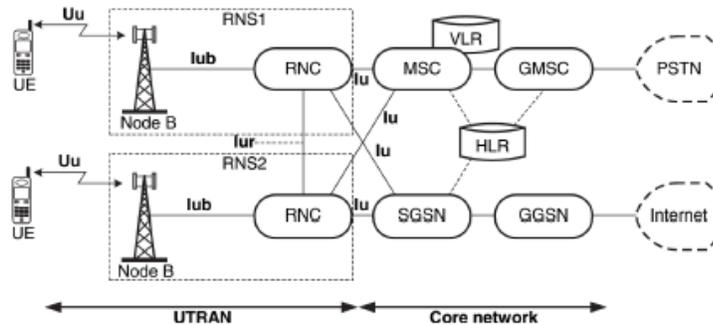
La *International Telecommunications Union*(ITU) es la institución a nivel mundial que regula las telecomunicaciones y desarrolla nuevos estándares de comunicación, fue la que definió los estándares para *International Mobile Telecommunications 2000* (IMT-2000) más conocido como 3G; dentro de estos estándares se desarrolló la tecnología UMTS que fue la sucesora de GSM. La 3GPP que es otro grupo de desarrollo, fue la responsable de establecer las especificaciones del estándar UMTS basados en las de GSM.

Entre las especificaciones está aumentar las velocidades de descargas, mejorar la calidad de servicios, reutilizar el equipo utilizado por GSM pero con mejores prestaciones, modulaciones más veloces, etc.

2.1.2. Arquitectura de red 3G

La arquitectura de red establece los elementos y formas de comunicación de todos los dispositivos que conforman una red UMTS (3G) y consta de 3 subredes: *User equipment* (UE), *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN) y *Core Network* (CN). Cada subred tiene su propia interfaz de conexión y las 3 están comunicadas con sus propias interfaces.

Figura 32. **Arquitectura UMTS**



Fuente: EHEDURU, Marcellinus. *Indoor radio measurement and planning for UMTS/HSDPA with antennas*. p. 16.

UE se conoce como el móvil que tiene el usuario para solicitar algún servicio y esta a su vez contiene un chip llamado USIM (*universal subscriber identity module*) que contiene la información del usuario así como protocolos de seguridad para ingresar a una red. La estación central en la red UTRAN se llama nodo B y se compone de varios módulos electrónicos para procesar las solicitudes de un UE, sea de voz o datos, la interfaz de comunicación entre el UE y nodo B se llama Uu o aire. El nodo B se comunica con la RNC, el UE envía las mediciones constantemente al nodo B.

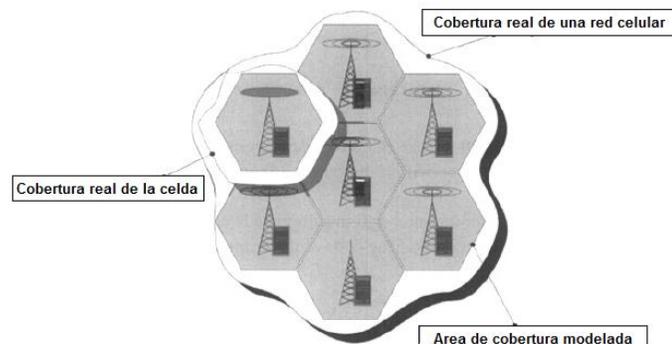
El RNC evalúa estos informes para saber la calidad del servicio y ajustar la potencia dependiendo del requerimiento y la distancia el UE. La RNC es el elemento que puede controlar varios nodos B, control de tráfico, entre otros. Dependiendo del servicio, la RNC se conecta con el MSC (*mobile switching center*) para llamadas de voz o con el SGSN (*serving GPRS support node*) para servicios de datos (internet). Más adelante se verá la descripción específica de cada elemento.

2.1.3. Características de radio

Un sistema de comunicación de radio tiene cierta limitación para cubrir una gran demanda de tráfico de usuarios. En primer lugar en una zona abierta, la intensidad de señal en un receptor se deteriora conforme la distancia entre el transmisor y receptor se hace más larga ocasionando que la calidad del servicio sea mala. La capacidad se ve limitada cuanto más usuarios se quieran conectar para realizar algún servicio, ya que cada nodo B ofrece un número limitado de enlaces / canales de radio. Lo que encierra la palabra celular es solucionar estos problemas; si se va a diseñar una red celular en alguna zona, y donde hay un nodo B o estación base se llama célula.

Cada célula tiene la capacidad de establecer un enlace celular con un número limitado de personas al mismo tiempo.

Figura 33. Red celular



Fuente: KAARANEN, Heikki. *UMTS network architecture, mobility and services*. p. 33.

Como se puede observar, en el sistema anterior de radio se logra corregir la mayoría de problemas descritos pero surgen otros: interferencia entre los

nodos B y entre usuarios, problemas de capacidad de las celdas, problemas de movilidad, entre otros. La reutilización de frecuencias es muy importante ya que se puede utilizar una frecuencia diferente, esto evita problemas de interferencia de los canales de radio.

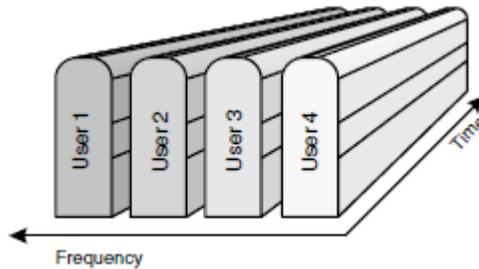
2.1.4. Técnicas de acceso múltiple

Una de las limitantes en un servicio de un sistema de radio es la capacidad hacia los usuarios. Si se ve desde el punto de espectro de frecuencia disponible, es la capacidad de asignar varios usuarios al mismo tiempo y precisamente este control de asignación se ha vuelto crítico para cualquier sistema de comunicación de radio. Para esto se han diseñado técnicas de acceso para combatir el problema de asignación simultáneo, algunas técnicas serán enunciadas a continuación.

2.1.4.1. FDMA (frequency division multiple access)

Es una técnica que asigna una frecuencia a usuarios diferentes en una celda específica. Esta asignación se realiza a 2 bandas ya que debe haber una frecuencia para transmisión y una para recepción, a cada usuario se le asigna una portadora de radio que ocupa entre 25 y 30KHz del ancho de banda. Cuando un usuario termina el servicio requerido, devuelve la portadora usada y la celda la mantiene lista para otra asignación. Por lo tanto, FDMA logra acceso múltiple mediante la separación de usuarios en frecuencia.

Figura 34. **Principio FDMA**

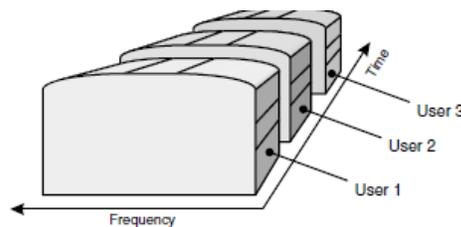


Fuente: RICHARDSON, Andrew. *WCDMA design handbook*. p. 67.

2.1.4.2. **TDMA (time division multiple access)**

La técnica de acceso múltiple por división de tiempo, se caracteriza porque utiliza una portadora de radio que transporta datos a una velocidad alta, mucho más que la que un usuario requiera. Esta técnica fue ampliamente utilizada en GSM, utiliza 2 frecuencias para transmisión y recepción, los usuarios asignados por un periodo corto de tiempo, comúnmente llamado ranura de tiempo. Otros usuarios pueden estar en la misma portadora de frecuencia pero asignados en diferentes ranuras de tiempo.

Figura 35. **Principio de TDMA**

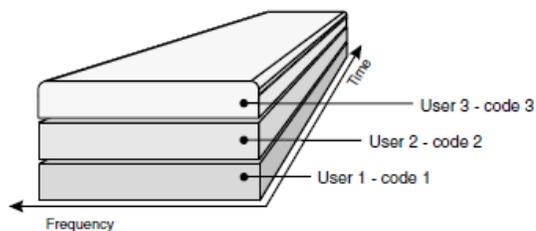


Fuente: RICHARDSON, Andrew. *WCDMA design handbook*. p. 67.

2.1.4.3. CDMA (*code division multiple access*)

Con la técnica de acceso múltiple por división de códigos los usuarios están uno encima de otro. Cada usuario utiliza la misma frecuencia para transmitir y recibir en el mismo tiempo, en este mismo espacio los usuarios están identificados por un código diferente. Este código sirve para que el receptor sepa de qué usuario es y poder atender el requerimiento.

Figura 36. Principio de CDMA



Fuente: RICHARDSON, Andrew. *WCDMA design handbook*. p. 67.

2.1.4.4. Otras técnicas

Las técnicas descritas anteriormente son las bases de las cuales se desprenden otras más:

- CSMA: acceso múltiple por detección de portadora, sirve para controlar el tráfico de red, su fin principal es evitar colisiones de paquetes escuchando antes de transmitir si hay un canal disponible. En caso de haber una colisión obliga al trasmisor a retransmitir el mensaje.

- OFDMA: esta técnica trata de conseguir que un grupo de usuarios compartan un mismo canal de frecuencia pero a bajas velocidades. El canal se divide en subportadoras y se le asigna a un usuario dependiendo del servicio que solicite, debido a la velocidad que requiera.
- ODMA: la función de esta técnica es mejorar las prestaciones de capacidad o cobertura en el borde de una celda.
- SDMA: acceso múltiple por división de espacio, es una técnica que divide el espacio sectorizándolo, usando antenas de una dirección, es muy útil combinándola con TDMA, FDMA o CDMA.

Tabla II. **Sumario de técnicas**

Acrónimo	Nombre	Uso típico
FDMA	acceso múltiple por división de frecuencia	Generación 1G celular
TDMA	acceso múltiple por división de tiempo	Generación 2G celular
CDMA	acceso múltiple por división de códigos	Generación 3G celular
CSMA	acceso múltiple por detección de portadora	Ethernet
OFDMA	acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal	WiMax, LTE
ODMA	acceso múltiple por oportunidad de manejo	Generación 3G celular
SDMA	acceso múltiple por división de espacio	Satélites, telefonía

Fuente: RICHARDSON, Andrew. *WCDMA design handbook*. p. 66.

2.1.5. Estandarización

La importancia de estandarizar UMTS radica en 3 razones: La 3GPP ha querido involucrar a más organizaciones, entre proveedores y operadores, que los que tuvo la 2da generación. En segundo las normas que se establecieron fueron más estudiadas, por ejemplo, existen más interfaces abiertas que la 2da generación. En tercero es el valor que adquieren las patentes en el mundo de telecomunicaciones, ya que existe una mayor protección para la investigación y desarrollo. La 3GPP ha presentado varios lanzamientos a modo de actualización del estándar.

Tabla III. Lanzamientos 3GPP-UMTS

Año	Lanzamiento	Característica
1999	Rel.99	UMTS FDD & TDD (W-CDMA), compatibilidad con GSM
	Rel.4	TD-SCDMA, servicios IP
	Rel.5	HSDPA, IPv6
	Rel.6	HSUPA, integración WLAN
	Rel.7	HSPA+, MIMO 64QAM
	Rel.8	<i>Dual-Cell</i> HSDPA
2010	Rel.9	<i>Dual-Cell</i> HSUPA

Fuente: elaboración propia.

2.2. UTRAN

Es una pequeña parte de una red de un sistema UMTS. Se compone de varias subredes llamadas *radio network subsystems* (RNS), que a su vez están formados de una RNC y uno o varios Nodo B. Su principal función es comunicar

un UE con el *core network* y para esto utiliza un Portador de acceso de radio (RAB, siglas en ingles) para establecer ese túnel de conexión; un RAB se caracteriza por los parámetros de calidad. Un nodo B es controlado por la RNC y a su vez la RNC controla las funciones de una red UTRAN.

2.2.1. UE y Nodo B

El UE o *user equipment*, es el nombre utilizado a los dispositivos móviles de un usuario en una red UTRAN. Puede soportar varias tecnologías y contiene un chip llamado USIM (*universal subscriber identity module*) que contiene la información del plan del usuario, el UE tiene características de procesamiento de señal: tales como modulación, codificación, así como tiene que adaptarse a la potencia enviada, recibe un listado de posibles celdas a conectarse por parte de la RNC, evalúa la más fuerte y se engancha a esa celda, con base en ciertos parámetros de calidad.

Una RNS (*radio network subsystem*) se compone de una RNC y varios nodo B como visto. Algunas funciones de un nodo B son:

- Aplicación se ha operación y mantenimiento (O&M) del nodo B.
- Mapeo de los recursos lógicos dentro de los físicos.
- Separación de flujo de datos dentro del nodo B.
- Control de potencia en modo FDD.
- Medidas de interferencia en enlaces de subida y control de potencia en enlaces de bajada.
- Detección de errores en la capa de transporte y aviso a capa superiores.
- Codificación y decodificación.
- Modulación, demodulación, desanchamiento de canales físicos.
- Sincronización de tiempo y frecuencia.

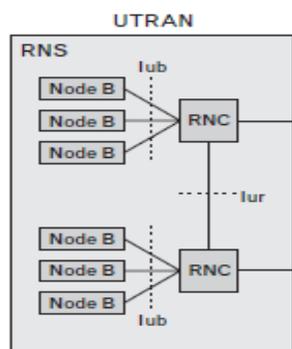
- Mediciones de *Handovers* entre celdas y mediciones de radio.

2.2.2. RNC y red core

Radio network controller (RNC) es un elemento fundamental de una red UTRAN y subred RNS, puede controlar a varios *nodoB*. Puede conectarse a la red core por medio de las interfaces a un MSC (IuCS) o un SGSN (IuPS). Entre las funciones que tiene están:

- Gestión de recursos de la interfaz de transporte.
- Control de los nodo B's y O&M de los recursos lógicos.
- Manejo de tráfico de los canales comunes.
- Combinación y separación de los datos de los diferentes nodo B que maneje.
- Asignación de los códigos para *downlink*.
- Control de potencia para *downlink* y *uplink*.
- Gestión de informes y tráfico.

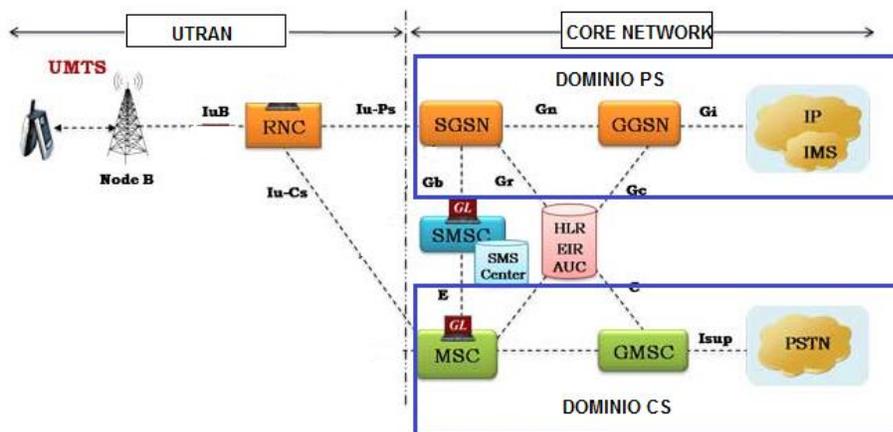
Figura 37. Red UTRAN UE-RNC



Fuente: KORHONEN, Juha. *Introduction to 3G mobile communication*. p. 214.

Una red core consta de 2 dominios: PS (*packet switch*) y CS (*circuit switch*). El dominio PS corresponde a servicios de datos y el dominio de CS corresponde a servicios de llamadas de voz. VLR (*visitor location register*)/MSC son elementos que corresponden al dominio CS; los elementos SGSN y GGSN (*GPRS core network*) corresponden al dominio PS. Ambos dominios comparten los elementos HLR (*home location register*) y AUC (*authentication center*) que son los encargados de verificar el estatus de la USIM del usuario, si es llamada internacional, robado, que tipo de plan contiene el usuario, entre otros.

Figura 38. Red UTRAN-Core



Fuente: <http://www.gl.com/newsletter/short-message-service-sms-testing-solutions-newsletter.html>. Consulta: 30 de enero de 2016.

2.2.3. Interfaces

Las interfaces son las diferentes formas de conexión entre los diferentes dispositivos que conforman una red UTRAN. La nomenclatura utilizada sigue la convención hecha con GSM, entre las cuales se puede mencionar las siguientes:

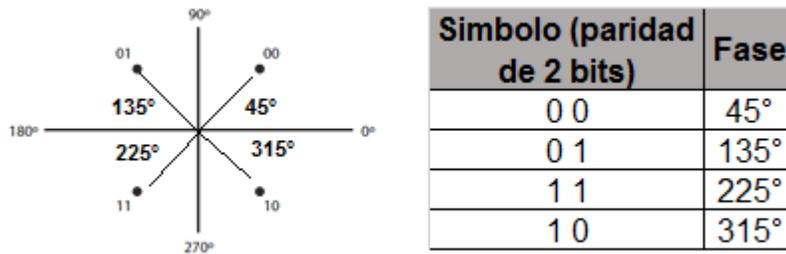
- Interfaz Gb: esta interfaz es la conexión que sirve para conectar el dominio PS con el dominio CS o de la tecnología UMTS a la infraestructura GSM.
- Interfaz IuPS: esta interfaz conecta una RNC al dominio PS o al elemento SGSN. Es uno de los puntos de unión entre una red UTRAN y la red *core*.
- Interfaz IuCS: esta interfaz conecta una RNC al dominio CS o al elemento MSC. Es el otro punto de unión entre una red UTRAN y la red *core*, así como también es el punto de unión entre la tecnología UMTS y GSM.
- Interfaz Iub: es la interfaz propiamente de una red UTRAN, ya que conecta un Nodo B con una RNC. Es la interfaz de transporte que maneja tráfico de control y usuarios, entre algunas funciones tiene: gestión de recursos del transporte, O&M sobre losnodo B, tiempos y sincronizaciones, gestión de canales compartidos, comunes y dedicados.
- Interfaz Iur: es la interfaz que conecta dos o más RNCs. Apoya en el intercambio de información de señalización del usuario para establecer que mejor nodo B puede darle servicio.
- Interfaz Uu: es la llamada interfaz de aire o inalámbrica que conecta un UE con un nodo B, para solicitar algún servicio.

2.2.4. Técnicas de modulación

Una técnica de modulación se utiliza en redes UMTS para optimizar su rendimiento, maximizando la interfaz de aire. Hay varios aspectos a tomar en cuenta como la eficiencia que se tiene sobre el uso del espectro, asegurando la transmisión de datos y esto se logra utilizando una técnica que sea capaz de maximizar el rendimiento del amplificador de potencia de RF del móvil pero sacrificando un cierto porcentaje del consumo de la batería. Entre algunos esquemas más utilizados se puedan mencionar:

- Modulación QPSK: el acrónimo QPSK significa *quadrature phase shift keying*, utiliza el ancho de banda de manera eficiente, ya que puede enviar 2 símbolos por bit transmitido en una fase y consta de 4 fases de onda para codificar cada símbolo.

Figura 39. Modulación QPSK



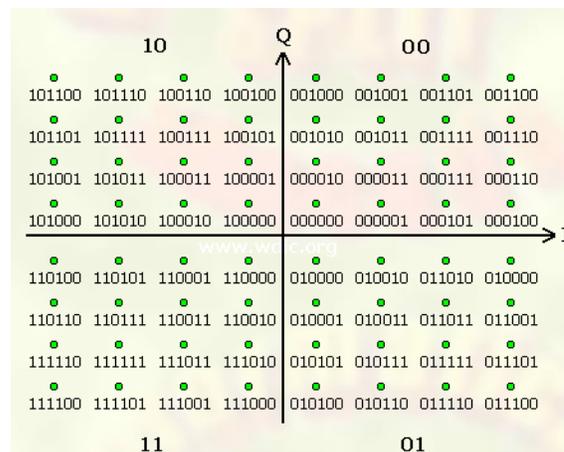
Fuente: elaboración propia.

La onda portadora que transporta la información en la interfaz Uu realiza las transiciones en las fases especificadas, codificando cada símbolo dado. Es decir, cuando la fase de la onda esté en 45° transportará el símbolo 00.

Recuerde que todos los sistemas electrónicos se comunican a través del sistema binario.

- Modulación 16 QAM: *quadrature amplitude modulation*, es una técnica digital mucho más eficiente que la anterior, así como también la onda portadora se modula en amplitud y fase esto reestablece el balance para optimizar el ancho de banda ya que lleva más símbolos en la onda modulada en fase y en amplitud. En cada transición de fase y amplitud lleva 4 bits por símbolo.
- Modulación 64 QAM: es una de las técnicas digitales más recientes y avanzadas, comparte el mismo concepto de la 16 QAM pero con la diferencia que puede modular 6 bits por símbolo en cada transición de fase y amplitud.

Figura 40. **Modulación 64 QAM**



Fuente: <http://www.informatics.buzdo.com/extras/dvb.htm>. Consulta: 30 de enero de 2016.

En este mapa, el eje I significa las transiciones que la portadora efectúa en amplitud y el eje Q las transiciones que efectúa en fase.

Tabla IV. **Comparativo entre técnicas**

Modulación	Eficiencia espectral (bits/Hz)	Margen de error
QPSK	2	0.71
16-QAM	4	0.23
64-QAM	6	0.1

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar entre las 3 técnicas la más eficiente es la de 64-QAM, porque puede transportar 6 bits por Hertz dependiendo del ancho de banda disponible. La desventaja es que se necesita una electrónica mucho más compleja entre más alta es la modulación, las modulaciones son importantes en una red UMTS porque impactan en la calidad de la velocidad de descarga en una sesión de datos.

2.3. Pila de protocolo

2.3.1. Capa RRC

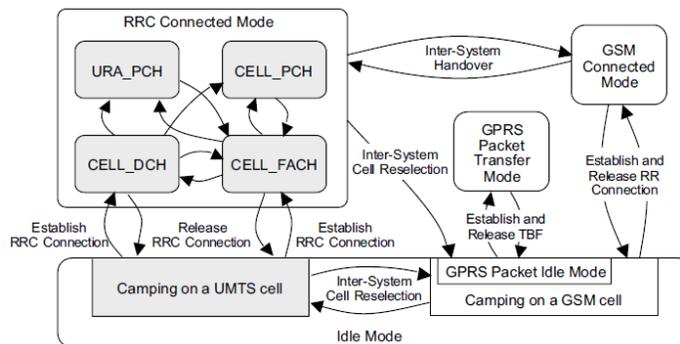
RRC (*radio resource control*) que representa el plano de control de la interfaz de radio, en modo transmisión, es la capa encargada de los mensajes de señalización de una *signallings radio bearers* (SRB) entre la RNC y la UE, incluyen los criterios de selección y re selección de una celda. Cuando está en modo de recepción debe interpretar los mensajes de señalización y realizar la tarea que corresponda. Existe una cadena de mensajes RRC para establecer o

colgar una llamada por parte del usuario, a continuación se verán los diferentes estados RRC.

2.3.1.1. Estados RRC

El protocolo establece una serie de parámetros que el UE debe completar y el tipo de conexión, el diagrama de estado siguiente establece el punto inicial de un UE y es llamado *idle mode* o en reposo. El estado *connected* implica una conexión RRC entre el UE y la RNC y la operación viceversa primero se tiene que liberar la conexión, más adelante se hablará de los diferentes estados o modos.

Figura 41. Diagrama de estado RRC



Fuente: JOHNSON, Cris. *Radio access network for UMTS*. p. 29.

Una conexión RRC se inicia con una petición de conexión al RNC y este a la vez responde; la liberación de la conexión, es decir, de *connected mode* a *idle mode*; la RNC envía un mensaje RRC liberando la conexión o cuando el UE está mucho tiempo fuera de cobertura, automáticamente entra en *idle mode*. Para este tipo de comunicaciones existen canales como CELL_DCH, CELL_FACH, CELL_PCH, entre otros que veremos más adelante. Además, en

el diagrama se integran las tecnologías GSM o GPRS ya que se permiten *handovers* entre el *connected mode* GSM a *connected mode* UMTS o viceversa, conmutaciones entre PS y CS cuando una tecnología este fuera de cobertura o más cargada que otra.

2.3.1.2. RRC *idle mode*

Durante este estado el móvil o UE permanece inactivo y una de las razones principales es lograr maximizar la vida de la batería. La única petición que se podría realizar es una de conexión de RRC; en este estado el UE selecciona una celda y se registra en la red.

Tabla V. Procedimientos *idle mode*

<i>Idle mode</i>	
Procedimiento	Descripción
Recepción	Recepción de mensajes de información del sistema
Selección	Selección registro de red
Selección	Selección de la celda
Registro	Requerido para establecer una conexión RRC
Recepción	De mensajes de paginación
Celdas	Re selección de una mejor celda
Locación	Requerido para actualizar áreas de enrutamiento
Recepción	Mensajes de <i>Broadcast</i>

Fuente: JOHNSON, Cris. *Radio access network for UMTS*. p. 29.

La RNC nunca mantiene un informe sobre la ubicación de una UE; procedimiento IMSI adjunta es cuando el UE en este modo se registra en los

dominios PS y CS. Cuando una UE tiene una llamada de voz o video que entra al teléfono, una sección del dominio CS llamada control de llamada envía un mensaje NAS al UE para habilitar una conexión RRC inmediatamente. En el dominio PS Los canales CELL_FACH y CELL_PCH se utilizan en transferencia de datos, para evitar una liberación inmediata de todos los recursos que brinda una celda al UE; además, el tráfico de los servicios se libera con tiempos de retardo a fin de evitar que exista mucha espera.

2.3.1.3. RRC *connected mode*

CELL_DCH es el canal más importante cuando se habla de transferencia de información. La diferencia con el canal CELL_FACH es que DCH permite la transferencia de archivos grandes tanto en CS y PS, mientras que FACH solo permite cantidades pequeñas de información en PS, DCH así mismo es el canal que más recursos consume tanto de la red como el UE. Las mediciones CPICH RSCP y CPICH Ec/Io del UE en *idle mode*, permiten evaluar los criterios de selección y reelección ya que con base en estos el móvil tiene la capacidad de medir si la celda donde está acampada le pueda dar mejor cobertura o si otra celda tiene mejores criterios se pueda mover a dicha celda. El RSSI es otra medición que permite al móvil evaluar otras tecnologías, llamando a estos traspasos *intra frequency handover* que le puedan dar mejores niveles de señal. Cuando un móvil completa una selección de celda debe leer los mensajes del canal P-CCHPCH. Cuando un móvil tiene recursos de CS y requiere de PS, los libera para una conexión RRC para PS.

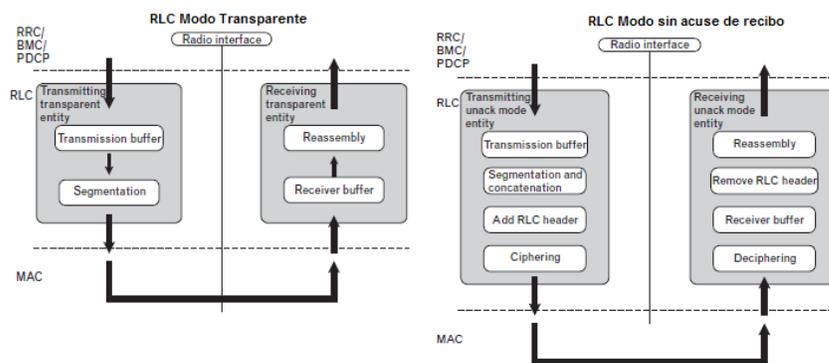
2.3.2. Capa RLC

Entre las tareas de esta capa es el contenido de varias entidades funcionales. Los llamados *bearers* o portadores son túneles creados entre el UE

y cualquier dispositivo de dominio PS y CS para crear conexiones, el modo sin acuse de recibo (MA) es cuando hay un transmisor y receptor creando un portador; el modo de servicio reconocido (MR) es cuando hay un transmisor combinado para un receptor. Cuando se tiene datos importantes es recomendado usar el modo MA ya que permite mayor seguridad, pero no es recomendado para llamadas de voz por las posibles retransmisiones y con esto no se garantiza una llamada de buena calidad.

Esta capa maneja paquetes de datos, que puedan contener control o datos de usuario transmitidos sobre la interfaz de aire. Se encarga de empaquetar los datos manteniendo un cifrado y retransmisión en caso de pérdidas de paquetes y se utiliza para los canales CCH, PCCH, SHCCH, DCCH, DTCH, CCCH. Para enlaces descendentes solo se usa modo transparente y tiene funciones de retransmisión y muy poco procesamiento de datos.

Figura 42. Modos transparentes y MA



Fuente: KORHONEN, Juha. *Introduction to 3G mobile communications*. p. 145.

2.3.2.1. Servicios RLC

Los siguientes servicios son los que se proveen a capas superiores, servicios de transferencias de datos en modo transparente:

- Segmentación y reensamblado
- Transferencia de datos del usuario
- Descartes de paquetes SDU

Servicios de transferencia de datos en modo sin acuse de recibo:

- Segmentación y reensamblado
- Concatenación de paquetes
- Transferencia de datos del usuario
- Cifrado y números secuenciales para verificación

Servicios de transferencia de datos en modo acuse de recibo:

- Segmentación y re ensamblado.
- Concatenación de paquetes.
- Transferencia de datos del usuario
- Corrección de errores y detección de datos duplicados
- Cifrado y control de flujo
- Mantenimiento de calidad de servicio

2.3.2.2. Funciones RLC

Entre las funciones que tiene esta capa están:

- Segmentación y reensamblaje de paquetes SDU
- Concatenación
- Transferencia de datos de usuario
- Corrección de errores
- Detección de duplicado y control de flujo
- Chequeo de números de secuencia
- Cifrado

2.3.2.3. Capa MAC

En la entrada de la capa existen canales lógicos y en la salida hay canales de transporte, los lógicos son los encargados de saber qué información transportar, mientras que los de transporte definen como transportar esos datos; por la tanto, la capa MAC tiene como función principal asignar un canal lógico a uno de transporte.

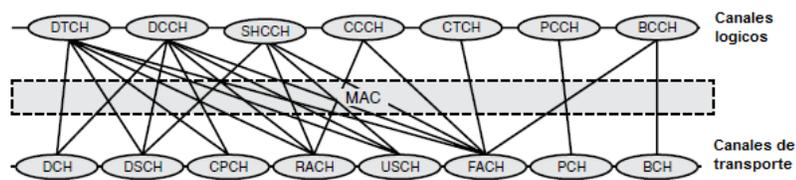
2.3.2.4. Funciones y servicios

Entre otras funciones tiene servicios TFS, tratamiento prioritario de los flujos de información; entre otras se tiene:

- Mapeo de los canales lógicos y de transporte; adelante se verá una descripción de cada uno, para la transmisión y asignar canales de transporte con los lógicos para recepción de datos. Estas asignaciones dependen del carácter de comunicación que desee un UE, las funciones

de mapeo dependen de 2 características: el tipo de conexión física y el tipo de información a transportar en la interfaz de aire.

Figura 43. **Mapeo de canales**



Fuente: RICHARDSON, Andrew. *WCDMA design handbook*. p. 258.

- TFS es una de las funciones principales y proporciona una coincidencia entre el tráfico que ofrece la capa MAC y los recursos de radio. Esto se logra indicándole a la capa MAC cuantos recursos existen en capas superiores ejemplo RLC y en los canales lógicos dependiendo el volumen de datos y de esta manera se hace más eficiente el uso de recursos disponibles con el UE.
- El manejo de la identificación del UE es para cuando este en modo transmisión o recepción, es la identificación del canal de transporte a través de la capa física por medio de *spreading and scrambling codes*, canales como RACH/CPICH para UL o FACH para DL; sin embargo, estos son compartidos por diferentes UEs en una celda por lo que en la capa MAC se inserta en el mensaje el UE destino.
- Para asegurar que el funcionamiento de la interfaz de radio esté bien, MAC informa a RRC de las estimaciones de los volúmenes de tráfico según el servicio requerido. Esto se logra mediante constantes mediciones y creando informes y estadísticas en la red UTRAN.

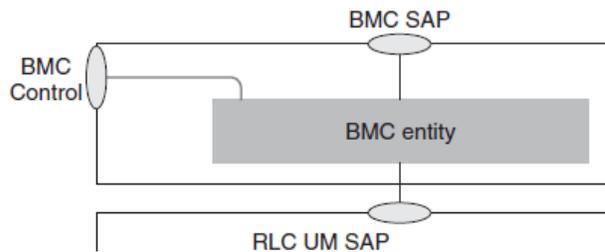
- El cifrado y encriptación es otra función de MAC pero solo lo hace cuando RLC funciona en modo transparente y cifra o encripta canales lógicos que correspondan a RLC.

2.3.3. Capas PDCP y BMC

La capa PDCP solo existe en el plano usuario y solo para servicios PS, contiene métodos de compresión, a su vez son necesarios para hacer más eficiente el espectro con los paquetes de IP. Algunas funciones: compresión y descompresión de información, transferencia de datos de usuario, soporte para pérdidas de paquetes.

La capa BMC está diseñado para adaptar los servicios de *broadcast* y *multicast*, originados desde el dominio *broadcast* en la interfaz de radio. Funciones: monitoreo del volumen de tráfico y recursos de radio a petición del CBS, calendarización de los mensajes BMC y sirven para indicar los parámetros calendarizados de la capa RRC y transmisión de mensajes BMC al UE.

Figura 44. **Capa BMC**



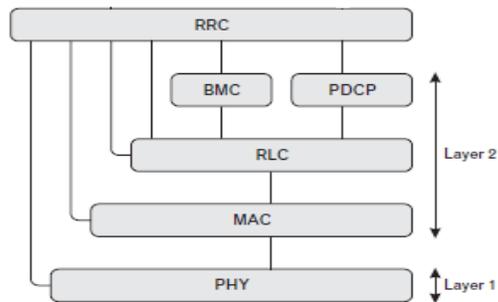
Fuente: HOLMA, Harri. *WCDMA for UMTS-HSPA evolution and LTE*.

p. 151.

2.3.4. **Capa física**

Esta capa es la encargada de procesar todos los paquetes de transporte que genera la capa MAC para luego modularla en una portadora de RF, además de agregar bits para la detección y codificación de errores en el receptor y la decodificación. El UL utiliza adaptación de velocidad dinámica para asegurar para que los datos codificados en el canal no superen la capacidad del canal DPDCH y en DL utiliza adaptación estática para que los datos se mantengan constantes. El *spreading* se usa para aumentar la velocidad de los *bits* enviados.

Figura 45. **Modelo interfaz de aire**

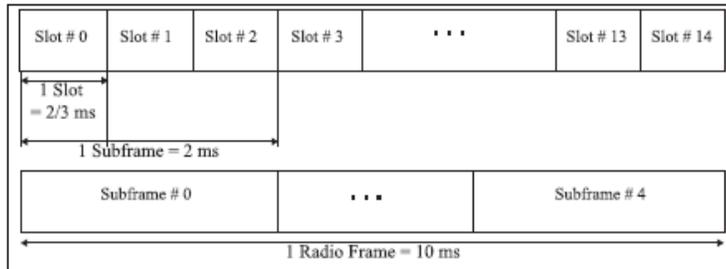


Fuente: KORHONEN, Juha. *Introduction to 3G mobile communications*. p. 50.

2.3.4.1. **Sincronización**

En una red UMTS la velocidad chip es la tasa a la cual se codifican los mensajes como una secuencia de bits de 1 o -1 de amplitud. El factor de ensanchamiento o SF (*spreading factor*) es la relación entre la tasa de chip y tasa de símbolo, esto permite que puedan coexistir señales transmitidas con diferentes tasas binarias en el medio de acceso de radiofrecuencia; la velocidad chip estándar para una red UMTS es de 3.84 Mcps. En términos de tiempo, un T_{chip} equivale a $1/3.84 \text{ Mcps} = 0.26\mu\text{s}$ y es la unidad de tiempo más pequeña.

Figura 46. **Unidades de tiempo**



Fuente: VIJ, Kamal. *Let's learn 3G in 10 days*.p. 67.

- Radio Frame: tiempo de procesamiento que equivale a 15 slots. La longitud corresponde a 38400 chips, en tiempo sería de 10 ms.
- Slot: consiste en la duración de campos que contienen bits y su longitud corresponde a 2560 chips. A diferencia de 2G, 3G utiliza la combinación de un radio frame y slot, un radio frame se compone de 15 slots pero los times slots se asignan a los mismos usuarios. Una de las ventajas de usar slots es que la información de control enviada al UE sea lo más rápido posible y tiene una duración de 2/3 ms.
- Sub-frame: es el intervalo básico para los canales de señalización E-DCH y HS-DSCH y corresponden a 3 slots (7680 chips).

2.3.4.2. **Medidas de radio e indicaciones a capas superiores**

Estas mediciones se llevan a cabo en la interfaz de aire y tienen como propósito reportar a capas superiores de los resultados, son efectuadas tanto en el UE como en el nodo B. Algunas mediciones pueden ser: RSCP (indicador

de la potencia recibida), RSSI (Indicador de la intensidad de la señal recibida), E_c/N_0 (Calidad de la señal), BLER (tasa de error de bloques), potencia transmitida del UE, entre otros.

2.3.4.3. Spreading y scrambling codes

Los códigos *spreading* utilizan los códigos OVFSF (*orthogonal variable spreading factor*) para garantizar la ortogonalidad o que no exista interferencia entre cada código asignado a los diferentes canales físicos para cada usuario. Para una conexión en DL (*DownLink*) se utiliza para separar los diferentes servicios de una conexión. Para una conexión en UL (*UpLink*) se utiliza para separar diferentes conexiones. Por ejemplo, para un servicio de video llamada (paquetes de 64 kbps) se tiene para DL un SF=32, es decir, se tiene un máximo de 32 servicios de voz en una portadora.

Los códigos *scrambling* se utilizan para distinguir celdas o usuarios. En una red generalmente un UE está rodeado por muchos nodos B, si por ejemplo este UE quisiera solicitar un servicio; primero debe distinguir las diferentes señales que transmitan los nodos B. Generalmente estas señales se transmiten en la misma frecuencia, por lo que se hace indispensable el uso de SC (*scrambling codes*) para distinguir cada sector de un nodo B. en DL un código SC se utiliza para distinguir la celda y un código OVFSF para distinguir un usuario; para UL un código SC se utiliza para distinguir un usuario y un código OVFSF para distinguir los canales de un usuario.

2.4. Tipos de canales y HSPA

2.4.1. Canales lógicos

Son canales que existen entre la capa MAC y RLC; pueden dividirse entre canales de control y canales de tráfico. Un canal de control puede ser común o dedicado, un común es un canal en una celda para todos los usuarios. Los canales de control de transferencia de plano de control (plano C) y el plano de los canales de tráfico de usuario (plano U). Entre algunos canales se puede enumerar:

- *Broadcast control channel* (BCCH): canal de control de enlace descendente (*downlink* o DL), sistema de difusión e información específica de la celda.
- *Paging control channel* (PCCH): canal de *downlink*, transferencias de información de paginación y otras notificaciones.
- *Dedicated control channel* (DCCH): canal bidireccional punto a punto con información de control entre el UE y el RNC; este canal es parte del procedimiento de establecimiento de una conexión RRC.
- *Common control channel* (CCCH): canal bidireccional de transmisión de información de control entre la red y los UEs. Este canal se asigna siempre a los canales de transporte RACH/FACH.
- *Shared channel control channel* (SHCCH): canal bidireccional, transfiere control de información para *uplink* y canales compartidos de *downlink*.

- *Dedicated traffic channel* (DTCH): canal bidireccional punto a punto dedicado para un UE para la transferencia de información del usuario, puede ser para *uplink* y *downlink*.
- *Common traffic channel* (CTCH): canal solamente para *downlink*, usado para transmitir información dedicada de usuario a un solo UE o grupos de UEs.

Tabla VI. **Canales lógicos**

Canal Lógico	Tipo	Uplink	Downlink
<i>Broadcast control channel</i> (BCCH)	Control		x
<i>Paging control channel</i> (PCCH)	Control		x
<i>Common control channel</i> (CCCH)	Control	x	x
<i>Dedicated control channel</i> (DCCH)	Control	x	x
<i>MBMS control channel</i> (MCCH)	Control		x
<i>MBMS scheduling channel</i> (MSCH)	Control		x
<i>Common traffic channel</i> (CTCH)	Tráfico		x
<i>Dedicated traffic channel</i> (DTCH)	Tráfico		x
<i>MBMS traffic channel</i> (MTCH)	Tráfico		x

Fuente: JOHSON, Chris. *Radio access network for UMTS*. p. 156.

2.4.2. **Canales de transporte**

Estos canales establecen cómo y con qué tipo de características los datos son transferidos en la capa física, se dividen en comunes y dedicados. Todos son unidireccionales, entre ellos están:

- *Broadcast channel (BCH)*: canal *downlink* de *broadcast* de sistema e información específica de la celda entre esta información se tienen códigos de acceso, espacios de acceso, etc.
- *Paging channel (PCH)*: canal DL usado para transmisiones de paginación y notificaciones, la paginación indica el canal físico PICH. Indica a los UEs de llamadas entrantes, SMS y conexiones de datos.
- *Random access channel (RACH)*: canal UL se usa para el inicio o el control dedicado en tiempo no real de tráfico de datos, transporta información de control desde UE como establecimientos de conexiones.
- *Common packet channel (CPCH)*: canal que transmite tráfico de datos en espacios cortos, esto ayuda a controlar la potencia más rápidamente proporcionando más capacidad.
- *Forward access channel (FACH)*: canal común DL, puede transportar cantidades pequeñas de datos de usuario.
- *Downlink shared channel (DSCH)*: canal DL que comparten varios UEs, se usa para control dedicado o tráfico de datos.
- *High-speed downlink shared channel (HS-DSCH)*: canal compartido por varios UEs, está optimizado para una alta velocidad de transferencia de datos.
- *Uplink shared channel (USCH)*: canal compartido por varios UEs, transporta control dedicado o tráfico de datos.

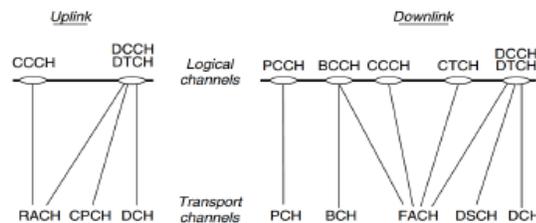
- *Dedicated channel (DCH)*: único canal dedicado para UL y DL, solo para un UE.

Tabla VII. **Canales de transporte**

Canal de transporte	Tipo	Uplink	Downlink
<i>Broadcast channel (BCH)</i>	Común		x
<i>Paging channel (PCH)</i>	Común		x
<i>Random access channel (RACH)</i>	Común	x	
<i>Forward access channel (FACH)</i>	Común		x
<i>High speed downlink shared channel (HS-DSCH)</i>	Común		x
<i>Dedicated channel (DCH)</i>	Dedicado	x	x
<i>Enhanced dedicated channel (E-DCH)</i>	Dedicado	x	

Fuente: JOHSON, Chris. *Radio access network for UMTS*. p.159.

Figura 47. **Mapeo entre canales lógicos y de transporte**



Fuente: EHEDURU, Marcellinus. *Indoor radio measurement and planning for UMTS/HSPDA with antennas*. p. 57.

2.4.3. Canales físicos

Estos canales son usados para transportar información en la interfaz de aire. Están categorizados como dedicados o comunes, los comunes pueden ser usados por más de un UE y los dedicados solo pueden ser usados por un UE.

- *Common pilot channel* (CPICH): es un canal no modulado que es mezclado con los *scrambling codes* de una celda específica; su función es estimar el canal dedicado en el UE y proporcionar una referencia de la estimación para los canales comunes. Existen 2 tipos de canales: primario y secundario, y la diferencia es que el primario está bajo el *scrambling code* con una asignación de canal fijo y solo hay uno por celda. El secundario puede tener cualquier código de canalización y puede estar bajo cualquier *scrambling code*, más adelante se verá el control de potencia con este canal.
- *Synchronization channel* (SCH): se utiliza para la búsqueda de celdas y consta de canal primario y secundario, el primario usa una secuencia de ensanchamiento de 256 chips igual en cada celda. Cuando un UE identifica el canal secundario obtiene información sobre el grupo de celdas a la cual pertenece.
- *Common control physical channel* (CCPCH): consta de primario y secundario, el primario transmite el sistema de identificación (BCH) e información de control de acceso. El secundario transmite el FACH y provee información de control.
- *Random access channel* (RACH): este canal se utiliza para procesos de señalización para registro de una terminal, actualización de la ubicación después de pasar de una zona a otra o para iniciar una llamada.
- *Acquisition indicator channel* (AICH): este canal se utiliza para indicar la recepción del canal de acceso aleatorio desde el nodo B.

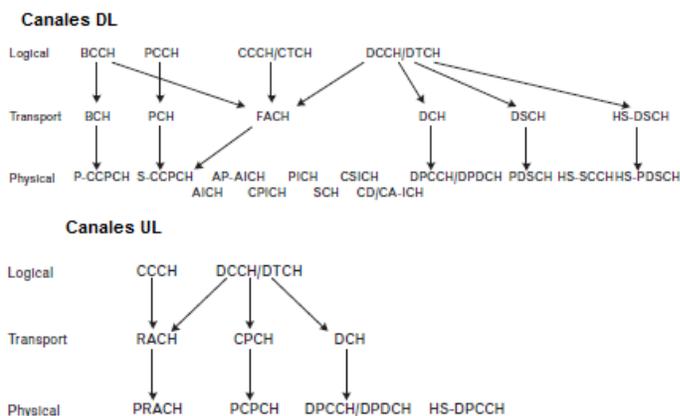
- *Paging indicator channel (PICH)*: provee al UE un modo *sleep* más eficiente, utiliza un código de canalización de 256 de largo. Este canal permite al UE controlar el PCH cuando su grupo se página, provocando que el UE pueda entrar en modo *sleep* y preservar la batería.
- *MBMS indicator channel (MICH)*: este canal se utiliza para notificaciones *broadcast* MBMS por toda la cobertura de una celda.
- *Dedicated physical channel (DPCH)*: este canal es usado para transferir datos del usuario y de control de señalización tanto en UL como DL. La alta velocidad con el canal (HS DPCCH).

Tabla VIII. **Canales físicos**

Canal Físico	Tipo	Uplink	Downlink
<i>Synchronous channel (SCH)</i>	Común		x
<i>Common pilot channel (CPICH)</i>	Común		x
<i>Primary common control physical channel (P-CCPCH)</i>	Común		x
<i>Secondary common control physical Channel (S-CCPCH)</i>	Común		x
<i>Paging indication channel (PICH)</i>	Común		x
<i>Access indication channel (AICH)</i>	Común		x
<i>High speed physical downlink shared channel (HSPDSCH)</i>	Común		x
<i>E-DCH absolute grant channel (E-AGCH)</i>	Común		x
<i>MBMS indicator channel (MICH)</i>	Común		x
<i>Physical random access channel (PRACH)</i>	Común	x	
<i>High speed shared control channel (HS-SCCH)</i>	Común	x	
<i>Dedicated physical data channel (DPDCH)</i>	Dedicado	x	x
<i>Dedicated physical control channel (DPCCH)</i>	Dedicado	x	x
<i>Fractional dedicated physical channel (F-DPCH)</i>	Dedicado		x
<i>E-DCH relative grant channel (E-RGCH)</i>	Dedicado		x
<i>E-DCH hybrid ARQ Indicator channel (E-HICH)</i>	Dedicado		x
<i>High speed dedicated physical control channel (HSDPCCH)</i>	Dedicado	x	
<i>E-DCH dedicated physical data channel (E-DPDCH)</i>	Dedicado	x	
<i>E-DCH dedicated physical control channel (E-DPCCH)</i>	Dedicado	x	

Fuente: JOHSON, Chris. *Radio access network for UMTS*. p.168.

Figura 48. Mapeo entre los canales



Fuente: KORHONEN, Juha. *Introduction to 3G mobile communications*. p. 81.

2.4.4. Introducción a HSPA+

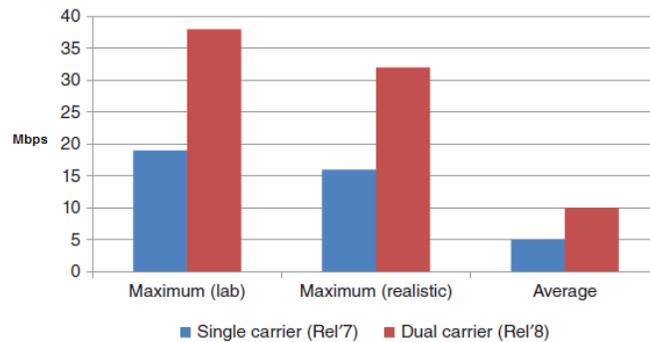
HSPA+ es una red de tecnología avanzada, muy madura a nivel mundial. Soporta modulación 64QAM, receptores avanzados y *dual cell*. En resultados hechos, esta tecnología puede entregar en UL una tasa de 6 Mbps o más y una latencia de 60ms; es decir, que existe un mejor retardo temporal dentro de una red, y por consiguiente menos pérdida de paquetes aumentando el *throughput*. *dual cell* puede entregar entre 4 y 44 Mbps a una baja latencia como 30ms, esto es suficiente como para entregar servicios de datos en tiempo real. El problema principal es encontrar UEs que soporten estas tecnologías.

2.4.4.1. Dual-cell

También llamada *dual carrier*, ha sido un éxito para HSPA+ desde su lanzamiento desde 2010; además que ha venido acompañado con el aumento de *smartphones* de gama media-alta a alta. En este reléase soporta doble

portadora para UL, doble banda portadora dual así como agregación multiportadora; *dual carrier* para DL permite la agregación de 2 portadoras adyacentes UMTS en un solo canal de transporte por lo que esto duplica la tasa de *bits*. Esta introducción de dos portadoras agrega eficiencia en la movilidad, aparte de que esta tecnología otorga una experiencia similar a LTE.

Figura 49. **Velocidad de descarga dual carrier vs single carrier**



Fuente: HOLMA, Harri. *HSPA+ evolution to release 12*. p. 189.

2.4.4.2. Ganancia con 64QAM

DL 64QAM fue una de las características más importantes cuando se lanzó HSPA+, esta técnica de modulación supone un aumento de hasta del 50% en las velocidades de transferencia de datos en áreas con buena intensidad de señal y baja interferencia.

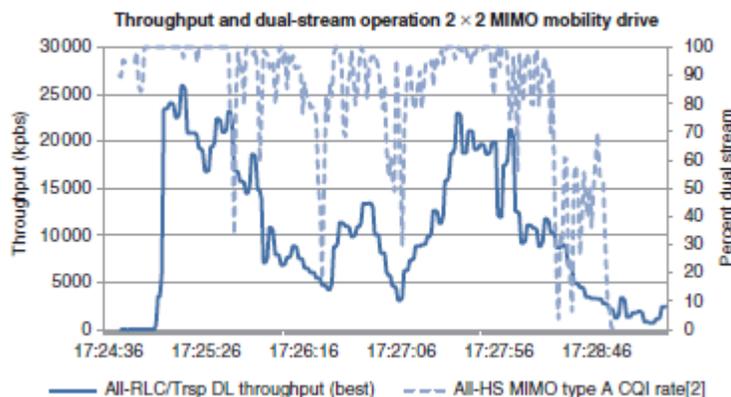
2.4.4.3. MIMO 2x2

Esta tecnología soporta MIMO (*Multiple in multiple out*) 2X2, con 64QAM para DL. Esta característica en conjunto ofrece hasta 42Mbps en DL por una portadora de 5 MHz HSPA+. Las mejoras asociadas al rendimiento del MIMO,

proviene del multiplexado espacial, donde dos flujos de datos son enviados paralelamente al UE sobre el DL. Esto resulta efectivo ya que duplica el *throughput* (velocidad de datos) cuando el SNR (*signal to noise ratio*) es lo suficientemente alto y las dos señales están correlacionadas. En el apartado físico en la instalación de las antenas, ya que MIMO necesita dos puertos de antenas por sector usado para diversidad del receptor.

Se necesitan 2 amplificadores de potencia por puerto, asimismo es muy importante tener activa la modulación 64 QAM.

Figura 50. Efecto de MIMO en *throughput*



Fuente: HOLMA, Harri. *HSPA+ evolution to release 12*. p. 2.

3. PLANEACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UNA RED UMTS

3.1. Planeación

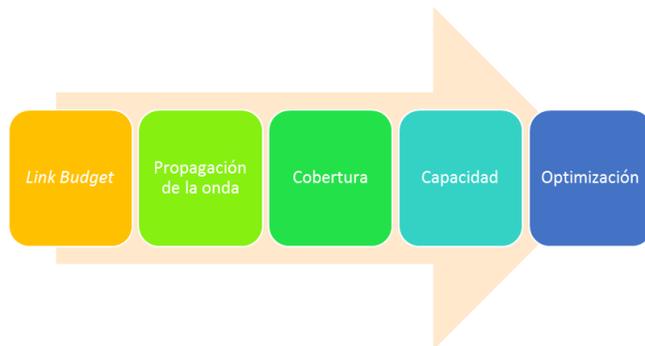
3.1.1. Dimensionamiento

Esta es la primera etapa en la planeación de una red y su objetivo principal es diseñar la configuración inicial del sistema de radio y la implementación a futuro. Esta define los valores de los parámetros iniciales y las tecnologías a desplegar en una red, a tener muy en cuenta estos parámetros de diseño inicial ya que tienen un impacto una sobre otra ya que de esto depende obtener los valores óptimos dimensionados dentro de los rangos acordados. Hay que contemplar los diferentes escenarios de cómo podrá comportarse la cobertura en diferentes escenarios de tráfico; este concepto de “tráfico” será muy importante en el futuro ya que se tendrá que hacer un *forecast* o un estimado de 1 a 3 años del crecimiento del mismo.

El tema de las antenas es muy importante ya que en la etapa de cobertura se necesitan macros para cubrir grandes terrenos en áreas rurales y suburbanas, para áreas urbanas se usan antenas micros y picos para soluciones *indoor*. Es importante tener en cuenta lo siguiente:

- Tamaño del área a cubrir
- Umbrales de cobertura
- Bandas de frecuencias para la propagación de la onda
- Tráfico total a cubrir para efectos de capacidad

Figura 51. **Proceso de dimensionamiento**



Fuente: elaboración propia.

3.1.2. **Link budget**

Llamado en español cálculo del presupuesto, parte en el cálculo para *uplink*, la interferencia o ruido entre los móviles es uno de los factores limitantes en redes UMTS. El punto de inicio para este análisis es el tipo de datos requeridos por área (urbano, suburbano y rural) o el *throughput* o velocidad de transferencia a entregar y el E_b/N_0 (relación de la energía por bit sobre la densidad de potencia del ruido), parámetro que se verá más adelante. El siguiente paso es recolectar toda la información de los proveedores de los equipos tales como potencia de salida del receptor, ruidos, tipo de cableados, tipos de antenas y sus parámetros.

Tiene que definirse el objetivo de E_b/N_0 por área geográfica, servicios de datos, un factor de crecimiento de tráfico, velocidades estimadas, diferentes pérdidas de penetración, cobertura, entre otros. Otras cuestiones como potencia de los móviles, velocidades chip, ganancias de los procesos definidas por las normas UMTS. El análisis final otorga un valor de celdas y las áreas de coberturas a tener.

Figura 52. Ejemplo link budget UL

UMTS UL Link budget example.	
TX	
Mobile max power = 0.125W (dBm)	21
Body loss - Antenna gain (dB)	2
EIRP (dBm)	19
RX	
BTS noise density (dBm/Hz) = Thermal noise density + BTS noise figure	-168
RX noise power (dBm) = $-168 + 10 \cdot \log(3840000)$	-102.2
Interference margin (dB)	3
RX interference power (dBm) = $10 \cdot \log(10^{(-102.2+3)/10} - 10^{(-102.2/10)})$	-102.2
Noise & interference (dBm) = $10 \cdot \log(10^{(-102.2)/10} + 10^{(-102.2/10)})$	-99.2
Process gain (dB), 144k voice = $10 \cdot \log(3840/144)$	14.3
Required Eb/No for speech (dB)	5
Antenna gain (dB)	19
Cable and connector losses (dB)	2
Fast fading margin (dB) = slow moving mobile	4
RX sensitivity (dBm)	-121.4
Total available path loss (dB)	140.4
Dimensioning	
Log normal fading margin (dB)	7
Indoor / In-vehicle loss (dB)	0
Soft handover gain (dB)	3
Cell edge target propagation loss (dB)	136.4
Okamura-Hata cell range (km) $L = 137.4 + 35.2 \cdot \log(R)$	0.94
Site hexagon coverage area (km ²)	2.3
Coverage overlap for handovers (%)	20%
Required Suburban coverage area (km ²)	200
Required Suburban coverage sites	105

Fuente: <http://www.umtsworld.com/technology/coverage.htm>. Consulta: 30 de enero de 2016.

3.1.3. Propagación de la onda

Los modelos de propagación se han desarrollado para estimar con mejor precisión como se propaga la onda en el espacio vacío, han sido creados para que sean capaces de predecir las pérdidas ocasionadas en algún trayecto entre emisor y receptor de cualquier tecnología de radio. Regularmente estos modelos creados son sumamente complejos porque deben ser capaces de recrear todos los parámetros que contienen la propagación de una onda: difracción, reflexión, pérdidas de espacio libre, pérdidas físicas internas; otra cosa importante para tener un mejor panorama es la clase de terreno tiene que atravesar una onda, los mapas son cruciales ya que también de esto depende en gran medida un posible desvanecimiento de la señal recibida.

Uno de los modelos más utilizados es el modelo Okumura–Hata que se aplica para antenas macros y puede predecir una atenuación media de la onda

de radio. Al ser un modelo empírico, necesita de mediciones de campo; el japonés Okamura publicó los resultados obtenidos en campo y Hata diseñó una fórmula donde se pueden aplicar dichos resultados. La desventaja es que no toma en cuenta reflexiones y sombras. El otro modelo llamado Walfish–Ikegami es empírico pero a diferencia del otro puede ser aplicado a antenas micro para zonas urbanas.

Figura 53. **Ecuaciones de propagación**

$$\begin{aligned}
 &\text{Modelo Okamura-Hata} \\
 L &= A + B \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(H_b) - a(H_m) \\
 &\quad + [44.9 - 6.55 \log_{10}(H_b)] \log_{10}(d) + L_{\text{other}} \\
 &\text{Modelo Walfish-Ikegami} \\
 L &= 32.4 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f + L_{\text{rts}} + L_{\text{msd}}
 \end{aligned}$$

Fuente: MISHRA, Ajay. *Advanced cellular network planning and optimization*. p. 41.

Tabla IX. **Comparativo de modelos**

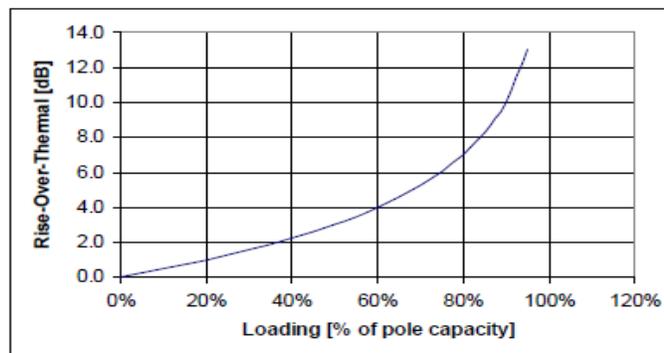
	Okamura-Hata	Walfisch-Ikegami
Rangos de frecuencia de operación	150 MHz a 1.0 GHz, 1.5 a 2.0 GHz	800 MHz a 2.0 GHz
Alturas de las antenas	30 a 200 mts	4 a 50 mts
Alturas de antena del UE	1 a 10 mts	1 a 3 mts
Rango de operación	1 a 20 km	30 m a 6 km
Aplicación	Macro celdas	Micro celdas

Fuente: SONG, Lingyang. *Evolved cellular network planning and optimization for UMTS and LTE*. P. 133.

3.1.4. Planeación de cobertura

Esta etapa es crucial en el inicio de una planificación, el link budget arroja un número estimado de sitios para poder cubrir una zona con base en los objetivos ingresados. Hay que tomar en cuenta tanto *uplink* como *downlink* para lograr satisfacer los servicios a ofrecer tanto en voz y datos. El fenómeno del *cell breathing* sucede cuando entre más usuarios se agreguen a la red mayor interferencia se tendrá en los Nodo B, este ruido tiene un impacto en los UE o móviles porque estos requieren mayor potencia de transmisión para superar esta barrera de ruido ocasionando que la cobertura se reduzca y afecta tanto en UL como en DL.

Figura 54. Impacto del *cell breathing*



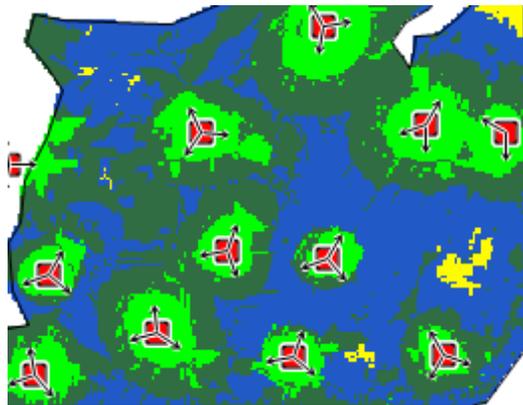
Fuente: QUALCOMM. *WCDMA network planning and optimization*. p. 4.

La predicción de una cobertura se realiza utilizando herramientas especializadas que grafican visualmente el patrón de radiación de una antena. Regularmente el número de sitios proporcionados por el *link budget* sirven de partida para colocarlos en clúster al azar típicamente, obviamente ubicándolos en áreas pobladas y que tengan la mayor cobertura posible. Regularmente se

establece un porcentaje de cobertura por clúster, el parámetro RSCP es fundamental porque es la potencia recibida por el móvil del canal CPICH y dependiendo de esta se sabrá que tanto se cubrirá una zona.

El otro parámetro importante es el E_c/N_0 ya que este nos indica el nivel de interferencia que existe por otras celdas vecinas, y la relación entre RSCP y E_c/N_0 no es afectada por la carga y la calidad. Cuando la carga aumenta se degrada el E_c/N_0 pero el RSCP se mantiene constante, y entre más lejano se este de la celda el RSCP se va degradando pero el E_c/N_0 va mejorando porque los niveles de ruido van descendiendo.

Figura 55. **Diseño de coberturas**



Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Ejemplo objetivos de diseño**

Indicador	KPI	KPI Objetivo
Cobertura	RSCP	>-88 dBm al menos 97 % de área
Interferencia	Ec/No	>-9 dB al menos 95 % área
Traslape celdas	<i>Pilot pollution</i>	< 3 celdas al menos 95% área

Fuente: QUALCOMM. *WCDMA network planning and optimization*. p. 8.

3.1.5. Planeación de capacidad

A nivel de interferencia en el *uplink*, en capacidad es importante calcularla ya que de esto se puede saber la cantidad de tráfico en la celda. Esta interferencia tiene un gran impacto en la capacidad de la celda y el radio y se puede calcular de la siguiente manera:

Figura 56. **Cálculo interferencia UL**

$$\eta_u = \frac{E_b RN}{WN_0}(1 + i)v_j$$

where

E_b/N_0 = signal energy per bit/noise spectral density

N = total number of users/cell

R = bit rate

W = chip rate

i = other cell-to-own cell interference

v_j = activity factor of user j

Fuente: MISHRA, Ajay. *Advanced cellular network planning and optimization*. p. 69.

En *downlink* la potencia que emite una celda es compartida entre todos usuarios o UE; por lo tanto, la capacidad se calcula por la potencia transmitida, la ubicación del UE y la interferencia. Los parámetros involucrados son la potencia transmitida por la celda y el canal BCCH, la carga se puede calcular como:

Figura 57. **Cálculo de carga para DL**

$$\text{load}_j = \frac{1}{1 + (W/R_j)/(E_b/N_0)_j 1/v_j}$$

Fuente: MISHRA, Ajay. *Advanced cellular network planning and optimization*. p. 70.

Este valor de carga de una celda es diferente para UL y DL; por lo tanto, en DL es mayor carga porque el ruido de la celda es mayor que la del UE. La cantidad de usuarios que una celda puede servir, se puede calcular por erlangs o kilobits por usuario que se pretende entregar por usuario; para luego estimar también un factor de crecimiento de tráfico.

3.1.6. **Planeación del *scrambling code***

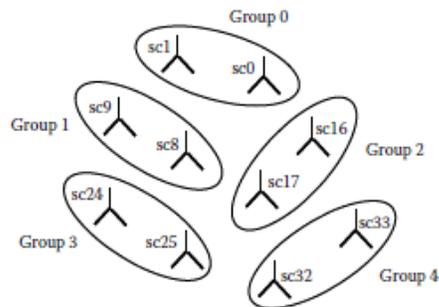
Las normas de especificación de 3GPP establecen 512 *scrambling codes* cifrados para DL, cada sector que corresponde a una celda debe tener asignado un código. La regla más importante es aislar los códigos de tal manera que el UE no pueda detectar 2 códigos iguales, ya que de suceder esto la RNC no puede ser capaz detectar a que celda está asignada por las mediciones de RRC del UE lo confunde. La normativa específica 512 códigos primarios para DL organizados en 64 grupos de 8 códigos, del 0 al 7 son un grupo, del 8 al 15 otro, y así sucesivamente.

Esta organización de grupos de códigos ayuda al móvil a realizar los siguientes pasos para sincronizarse con una celda o medir su calidad:

- El UE usa el P-SCH para lograr la sincronización.
- UE utiliza el S-SCH para sincronizarse con una trama e identificar al grupo de códigos.
- UE utiliza el CPICH para identificar el código primario.

El paso 2 es cuando el UE identifica al grupo de 0 a 64 y el paso 3 cuando el UE selecciona un código de 8 posibles. La planificación implica que las celdas vecinas estén incluidas en el mismo grupo de códigos.

Figura 58. **Ejemplo de PSC**



Fuente: SHEN, Jia. *Evolved cellular network planning and optimization for UMTS and LTE*. p. 176.

3.1.7. Planeación de parámetros

El propósito de planificar los parámetros de red, es optimizar su uso y utilizar la cobertura y capacidad prevista. Junto con la planificación de cobertura y capacidad están previstos los siguientes parámetros:

- Gestión de recursos de radio (admisión de usuarios, carga, potencia, control de *handover*).
- Mediciones.
- Acampamiento de *idle mode*.
- *Connected mode*.
- Las potencias de los canales comunes.
- Los *scramblingcodes*.
- Las potencias asignadas a los canales comunes son relativamente mayores a los asignados a los canales dedicados.

3.2. Optimización de una red UMTS

3.2.1. Control de potencia

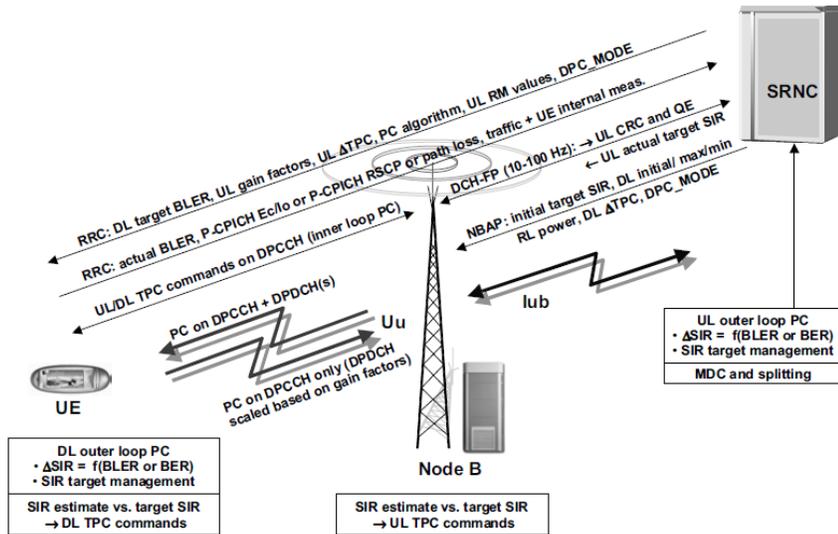
La gestión de potencia es de mucha relevancia en redes 3G. Múltiples usuarios pueden compartir el mismo ancho de banda al mismo tiempo, ocasionando una interferencia entre ellos, en UL un UE ubicado cerca de la celda y una potencia excesiva, puede ocasionar que sobrepase a los demás usuarios y hasta bloquear una celda; en DL la interferencia se ve por la potencia de código para cada UE; por lo tanto es crucial mantener un nivel mínimo de potencia. El control de potencia se necesita para controlar la *signal to interference plus noise ratio* (SINR) para usuario conectado, el nivel de ajuste es el mínimo permitido de SINR para que cualquier enlace obtenga la calidad deseada y así retenerla y, por lo tanto, reducir la interferencia al máximo.

- Control de potencia de lazo abierto: en una red UMTS tanto las frecuencias de UL y DL están en el mismo ancho de banda por lo que existe una correlación de las pérdidas promedio entre las 2. Esto hace posible que el UE, antes de acceder a la red, cuando se establece una

conexión se puede estimar las potencias necesarias tanto para UL y DL con base en los cálculos de pérdidas de trayecto. Este modo de control se utiliza cuando el UE cuando pasa *idle mode* a *connected mode* usando el canal RACH, la potencia inicial del UE se calcula por medio del CPICH, posteriormente aumenta la potencia conforme la celda logra reconocer al UE.

- Control de potencia lazo cerrado: este control se aplica para adaptar los niveles de potencia de los canales DCH, E-DCH, adapta la potencia de transmisión de los tiempos variables de las condiciones de un enlace de radio o cuando el UE está en modo de tráfico. Este control está basado por dos bucles de realimentación: el bucle interno es de control de potencia rápido entre la UE y el nodo B y su objetivo es la adaptación rápida de potencia causada por el desvanecimiento rápido. El valor SINR se calcula en la estación receptora (nodo B en el UL y UE en el DL), los comandos de control se envían a un ritmo de 1500 por segundo.
- Control de potencia lazo externo: este modo de control tiene como objetivo la calidad de la comunicación definidos por los requerimientos de calidad del servicio del *bearer* o túnel para producir un SINR adecuado. Esta operación se realiza para cada canal DCH por cada conexión RRC, el nivel SINR necesita ser ajustado cuando la velocidad del UE o la propagación del trayecto cambian, cuanto mayor variación de potencia mayor será ajustado el valor del SINR.

Figura 59. Control de potencia lazo externo



Fuente: LAIHO, Jaana. *Radio network planning and optimisation for UMTS*. p. 202.

Tabla XI. Valores comunes de potencia en DL

Canal común DL	Nivel típico de potencia	Nota
P-CPICH	30-33 dBm	5-10 % potencia máxima de la celda (20W)
P-SCH and S-SCH	-3 dB	Relativo a potencia P-CPICH
P-CCPCH	-5 dB	Relativo a potencia P-CPICH
PICH	-8 dB	Relativo a potencia P-CPICH
AICH	-8 dB	Potencia de un AICH
S-CCPCH	-5 dB	Relativo a potencia P-CPICH y SF= 256

Fuente: LAIHO, Jaana. *Radio network planning and optimisation for UMTS*. p. 200.

3.2.2. Tipos de *handover*

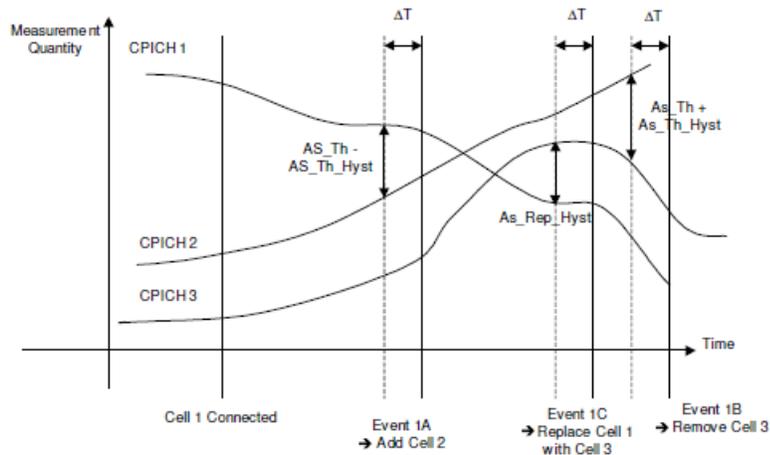
Los HO (*HandOvers*) se pueden diferenciar en 2 categorías: *soft and hard* HO. Para *soft* HO el UE está conectado a varias celdas en una región de transición entre 2 celdas; en el caso de *hard* HO el UE está conectado a una celda a la vez. *Soft* HO es posible para realizar HO entre celdas que utilizan las misma frecuencia, *hard* HO sin embargo puede permite entre 2 celdas de diferentes RNCs, 2 celdas UMTS que operan en diferentes portadoras o entre GSM y UMTS entre diferentes tecnologías. A continuación se verán algunos tipos.

3.2.2.1. Soft HO inter sistema y frecuencia

Estos HO son una característica general de una red 3G, en la cual celdas vecinas operan a diferente frecuencia. En modo conectado del UE realiza mediciones de posibles celdas servidoras y vecinas, El UE compara los valores de los umbrales medidos de HO proporcionados por la RNC, y envía un reporte de regreso a la RNC cuando se cumplen los criterios requeridos. El algoritmo de SHO se encuentra en la RNC, basados en las mediciones del UE (periódicas u ocasionadas por algún evento) la RNC ordena al UE que agregue o elimine celdas de su *active set* (son las celdas listas en el UE a servir).

Algunos objetivos de SHO son optimizar el control de potencia lazo cerrado logrando que la UE se acampe con la celda más fuerte, no permitir alguna desconexión RAB. Combinando la señal recibida en el nodo B (*softer* HO) o en el RNC (SHO) mejora la calidad de la señal en DL y UL, por consiguiente la potencia del UE disminuye.

Figura 60. Algoritmo SHO



Fuente: TURKE, Ulrich. *Efficient methods for WCDMA radio network planning and optimization*. p. 21.

3.2.2.2. Hard HO intra frecuencia y sistema

Este tipo de HO se utiliza cuando las celdas involucradas en el HO pertenecen a diferentes RNCs en situaciones en las que el SHO no se puede ejecutar solo en una RNC. Las decisiones son tomadas por la RNC basados en reportes de medición intra frecuencia enviados por el UE, debido a reportes por eventos. Un algoritmo sencillo HHO podría basarse en el parámetro P-CPICH E_c/I_0 como valores promediados de la celda servidora y sus vecinas, y un umbral para evitar HHOs repetitivos entre las celdas. Antes de realizar un HHO intra frecuencia, la medición de una celda vecina debe cumplir con la siguiente ecuación:

Figura 61. **Ecuación servidora vecina**

$$AveEcIoDownlink + EcIoMargin(n) < AveEcIoNcell(n)$$

Fuente: LAIHO, Jaana. *Radio network planning and optimisation for UMTS*. p. 213.

Donde *AveEcIoDownlink* es el promedio del parámetro P-CPICH Ec/lo de la mejor celda servidora, *AveEcIoNcell(n)* es el promedio del parámetro P-CPICH Ec/lo de la celda vecina n y *EcIoMargin(n)* es el margen en el cual Ec/lo la celda vecina n debe ser mayor que el Ec/lo de la celda servidora para hacer posible el HO.

3.2.2.3. **HO inter sistema**

Este HO se produce entre dos tecnologías, a veces se llama IRAT (*inter radio access technology*), se puede producir entre una celda vecina que no sea UMTS o 3G. La mayoría de veces este HO se produce cuando hay áreas con poca o nula cobertura 3G causando un HO por ejemplo a GSM, muchas veces cuando hay traslape de tecnologías funciona para controlar la carga. Ejemplo los servicios de voz pueden ser tratados en GSM y de datos en UMTS; el algoritmo de decisión se halla en la RNC pero el UE es la que envía reportes de medición y con base en estos reportes y otros parámetros la RNC puede reconocer el IRAT HO. De GSM a UMTS el algoritmo se localiza en la BSC y puede hacer los mismos procedimientos que la RNC.

3.2.2.4. **Parámetros HO intra frecuencia**

Cuando el UE entra en modo conectado, UTRAN envía un mensaje con los parámetros que controlan el HO intra frecuencia y HO entre sistemas. Para

cualquier tipo de HO el UE es notificado de las diferentes mediciones involucradas de las celdas: CPICH Ec/Io, CPICH RSCP, pérdidas, RSSI, reportándolas por separado (celdas activas, celdas monitoreadas y celdas detectadas); cuando se cumplen estos criterios el UE responde con un mensaje de reporte de medición al UTRAN. Cuando se recibe el mensaje la RNC actualiza el listado de celdas activas según los recursos.

Tabla XII. **Parámetros HO intra frecuencia**

Parámetro	Rango, unidades	Comentario
Informe medición modo transferencia	Modos admitido y no admitido RLC	Indica modo de medida de informe de transferencia
Reportes periódicos de eventos	Eventos por disparo	indicaciones periódicas o disparo por evento
Medidas de calidad	CPICH Ec/No, CPICH RSCP	Las mediciones hechas por el UE para HO intra frecuencia
Coefficiente de filtrado	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 19	Filtro usado para la calidad Ec/No, y el UE lo usa para evaluar la condición de disparo de evento
Rango de reporte (evento 1a)	0–14.5 dB en pasos de 0.5 dB	Constante que evalúa cuando debe cumplirse el evento 1a
Histéresis (evento 1a)	0–7.5 dB, en pasos de 0.5 dB	Usado para activar o desactivar los reportes de evento 1a
Tiempo de disparo (evento 1a)	0, 10, 20, 40, 60, 80, 100,120, 160, 200, 240, 320,640, 1280, 2560, 5000 ms	Periodo de tiempo donde la condición de evento se dispara, después de reportarlo
Umbral de desactivación de reporte	0 (no aplica), 1,2 – 7 conjunto de celdas activas	Máximo de conjunto de celdas activas, cuando ocurra evento 1a
Cantidad de informes (evento 1a)	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64,infinito	Número máximo de mediciones del UE
Intervalo de reporte (evento 1a)	0, 250, 500, 1000, 2000,4000, 8000, 16000 ms	Periodo de transmisión de los reportes de medición por el UE
Rango de reporte (evento 1b)	0–14.5 dB en pasos de 0.5 dB	Constante que evalúa cuando debe cumplirse el evento 1b
Histéresis (evento 1b)	0–7.5 dB, en pasos de 0.5 dB	Usado para activar o desactivar los reportes de evento 1b
Tiempo de disparo (evento 1b)	0, 10, 20, 40, 60, 80, 100,120, 160, 200, 240, 320,640, 1280, 2560, 5000 ms	Periodo de tiempo donde la condición de evento se dispara, después de reportarlo
Tiempo de disparo (evento 1b)	0, 10, 20, 40, 60, 80, 100,120, 160, 200, 240, 320,640, 1280, 2560, 5000 ms	Periodo de tiempo donde la condición de evento se dispara, después de reportarlo
Rango de reporte (evento 1c)	0–14.5 dB en pasos de 0.5 dB	Constante que evalúa cuando debe cumplirse el evento 1c
Histéresis (evento 1c)	0–7.5 dB, en pasos de 0.5 dB	Usado para activar o desactivar los reportes de evento 1c
Tiempo de disparo (evento 1c)	0, 10, 20, 40, 60, 80, 100,120, 160, 200, 240, 320,640, 1280, 2560, 5000 ms	Periodo de tiempo donde la condición de evento se dispara, después de reportarlo
Umbral de desactivación de reporte (evento 1c)	0 (no aplica), 1,2 – 7 conjunto de celdas activas	Máximo de conjunto de celdas activas, cuando ocurra evento 1c
Cantidad de informes (evento 1c)	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64,infinito	Número máximo de mediciones del UE
Intervalo de reporte (evento 1c)	0, 250, 500, 1000, 2000,4000, 8000, 16000 ms	Periodo de transmisión de los reportes de medición por el UE

Fuente: CHEVALLIER, Christophe. *WCDMA(UMTS) deployment handbook*.p. 142.

Evento 1a: una celda está dentro del umbral dinámico de mejor servidora.

Evento 1b: una celda es inferior del umbral dinámico de mejor servidora.

Evento 1c: una celda está dentro del umbral dinámico del conjunto de celdas activas.

3.2.3. Control de congestión

Es de suma importancia mantener la carga de usuarios en la interfaz de aire con relación de los umbrales definidos en sistemas UMTS, tener una red muy cargada no garantiza los requisitos establecidos. Esto podría ocasionar una degradación en la calidad de servicio y unas condiciones inestables; las funciones de control de congestión se dividen en:

- Control de admisión: es el encargado de controlar el tráfico nuevo entrante y comprueba si un nuevo paquete o un servicio CS puede ser admitido.
- Control de carga: se encarga de manejar cuando la carga de usuarios supera el umbral definido y se toman contramedidas para que la red vuelva tener una carga estable.
- Programación de paquetes: es el encargado del tráfico que no es en tiempo real, es decir paquetes de usuarios de datos. Se decide cuando se inicia una transmisión de datos.

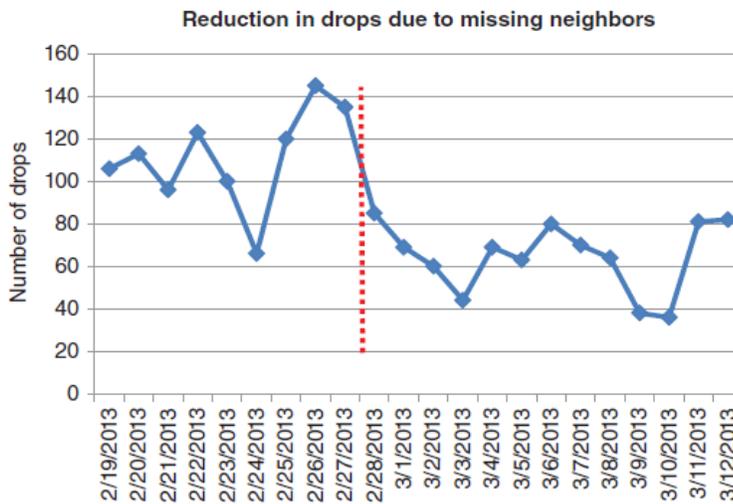
3.2.4. Lista de vecindades

La optimización de este listado es algo que debe hacerse con bastante frecuencia, HO inter, intra y IRAT deben ser modificados para hacer frente a cambios de tráfico e introducción de sitios nuevos vecinos. El problema de no actualizar este listado, aumentara los *drops* o aumento de caídas de llamadas y

problemas de sincronización en el UL. Al inicio estos listados deben ser configurados con base en la planificación hecha e incluye la primera y segunda línea de celdas vecinas alrededor. La reciprocidad con otras celdas no es algo imperioso pero hacerlo facilita el balanceo de carga de tráfico.

En sitios muy rurales es muy importante mantener vecindades con celdas GSM, el mantenimiento de estos listados está basados en estadísticas como por ejemplo intentos de HO exitosos y no exitosos, tasas de caídas de llamadas, etc. Es muy importante mantener este listado bien identificado, como retirar celdas vecinas que ya no estén, porque existe cierta limitación de celdas.

Figura 62. **Reducción de *drops* por optimización de vecinas**



Fuente: HOLMA, Harri. *HSPA+ evolution to releaase12*. p. 264.

3.2.5. **Parámetros de reelección**

En un sistema UMTS uno de los indicadores clave es el tiempo de espera, en *idle mode* el tiempo de espera depende de los mecanismos de res elección

de celdas y su parametrización. Para poder diferenciar los servicios, las operadoras realizan ajustes al tiempo de espera y mejorar el rendimiento de la calidad para lograr acampar en una celda mediante optimización de los parámetros de res elección; estos mecanismos garantizan que el UE tenga una calidad aceptable y el nivel necesario para lograr acampar en una celda y logrando así disminuir los tiempos de espera.

Tabla XIII. **Parámetros de reelección**

Parámetro	Rango, unidades	Recomendación	Comentario
Medición de calidad	CPICH Ec/No o RSCP	CPICH Ec/No	El término ruido e interferencia es el mismo para diferentes celdas en el mismo lugar
Ciclo DRX	80 ms a 5.12s incrementos discretos	1.28s	Este ciclo mejora el tiempo de espera en un 25%
Tres elección	0 a 31s	0s o 1s	Si no hay consideración inter sistemas
Qrxlevmin	-115 a -25 dBm, en incrementos de 2 dB	-113 dBm	Valor mínimo de RSCP de la celda
Qqualmin	-24 a 0 dB	-16 a -18 dB	Valor mínimo de Ec/No de la celda
Sintrasearch	-32 a +20 dB, incrementos de 2 dB	Qqualmin + Sintrasearch= 10 dB	Medida de otras celdas intra frecuencia si CPICH Ec/No < Qqualmin + Sintrasearch
Qhyst1s	0 a 40 dB, incrementos de 2 dB	-2 dB	Histéresis, si la medida de calidad es RSCP
Qoffset1s,n	-50 a 50 dB	-1 dB	Offset entre 2 celdas, si la medida de calidad es RSCP
Qhyst2s	0 a 40 dB, incrementos de 2 dB	Si Tres elección = 1s, Qhyst2s+ Qoffset2n= 3 dB	Histéresis, si la medida de calidad es Ec/No
Qoffset2s,n	-50 a 50 dB	Si Tres elección = 0s, Qhyst2s+ Qoffset2n= 7 dB	Offset entre 2 celdas, si la medida de calidad es Ec/No

Fuente: CHEVALLIER, Christophe. *WCDMA (UMTS) deployment handbook*. p. 154.

Al comienzo de cada ciclo DRX el UE se despierta vuelve acampar en una celda y dependiendo de la calidad de la celda acampada el UE puede desencadenar mediciones intra frecuencia y evaluar el criterio de res elección de la celda. Las mediciones se activan si el valor del Ec/No o RSCP caen por debajo de Qqualmin + Sintrasearch, estos criterios de res elección aseguran que el UE mida una nueva celda si la calidad de la nueva es al menos el

valor $set2s \cdot Q_{hyst2s} + Q_{off}$, n dB. Al utilizar las medidas de calidad el valor del E_c/N_0 , $Q_{offset1s,n}$ y Q_{hyst1s} afectan solamente la res elección inter sistema.

3.3. Proceso de optimización

A continuación se describirá el proceso de optimización, incluyendo *drive test* que es fundamental para tener un panorama real de la situación de red en el clúster asignado. Se evaluará en análisis estadístico que conlleva una optimización, analizando los indicadores cruciales para llevar un buen control.

3.3.1. Drive test

Las mediciones a nivel estadístico no siempre son suficientes para evaluar algún problema, muchas veces es necesario concentrar los análisis en los *hot-spots* y estudiar el rendimiento de la red, problemas como *pilot pollution*, *drops call*, HO o problemas de calidad para realizar cualquier servicio. Los DT son una de las partes más importantes en el proceso de optimización de una red, ya que también puede indicar posibles fallas de cobertura en alguna zona o el problema en específico; regularmente se realizan los recorridos con un equipo llevado en un carro.

3.3.1.1. Equipo y rutas

El equipo a utilizar regularmente es una PC, una licencia de software para realizar las pruebas, GPS, un teléfono (para pruebas de voz) y un *data card* (para pruebas de datos).

Figura 63. **Equipo de DT**



Fuente:http://www.airteltower.com/yahoo_site_admin/assets/images/DriveTest_picx_3.174142720_std.jpg. Consulta: 2 de febrero de 2016.

El principal objetivo del DT es recopilar datos que se pueden analizar/ver en tiempo real en la PC mediante el software de análisis. El software es capaz de grabar cada dato como un punto con latitud y longitud a lo largo de las calles donde se realiza el recorrido.

Figura 64. Pruebas con el software



Fuente: elaboración propia.

La ruta se establece mediante la asignación de cualquier clúster donde se agrupa una cantidad de sitios para realizar los análisis estipulados.

Figura 65. Rutas



Fuente: elaboración propia.

3.3.1.2. Postproceso de la información

En este proceso se extraen todos los datos obtenidos de las unidades de medición en el DT, debido a que muchas veces la información es demasiado grande este tiene como objetivo tabular esa información en hojas de tal manera

sea fácil su lectura. Este paso es importante porque pone en relieve el análisis hecho en el DT en esta herramienta, lo que da la ventaja de procesar esta información y realizar los análisis en otras herramientas (Google Earth, Mapinfo, Arcmap, etc.) para visualizar en donde se tienen problemas de KPIs y si en el área específica es crítica.

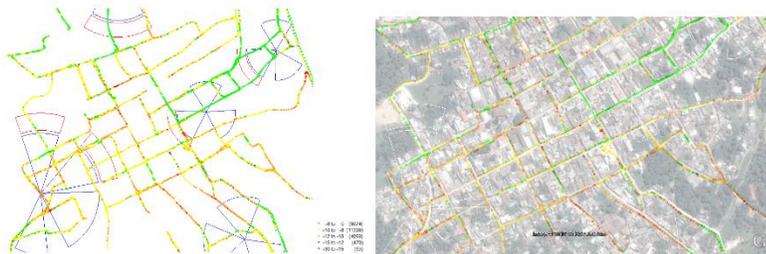
Otro análisis fundamental es el estadístico porque nos dice la cantidad de muestras bajas que se tienen, esto es un buen indicador si se está por debajo de los objetivos de diseño; es decir, si cumple como por ejemplo -8dB de E_c/N_0 en área urbana, 800 Kbps al menos entregado, etc.

3.3.1.3. Interpretación de las mediciones

En esta etapa se tiene que interpretar en las diferentes herramientas de análisis el porqué de la degradación de los KPIs en alguna zona específica. En el DT en las pruebas de voz se realizan de dos formas: las llamadas cortas se usan para verificar que un usuario pueda realizar y establecer una llamada y las llamadas largas para verificar los HO entre las diferentes celdas vecinas. Regularmente se realizan las llamadas cortas porque en estas se puede evaluar si existe una degradación en la calidad para acceder y retener llamadas en una celda, así como también se tiene buenos niveles de cobertura para garantizar la potencia suficiente de la celda al UE.

En caso de haber algún tipo de degradación, se analiza la posible causa y solución; como por ejemplo *pilot pollution* (más de 4 sectores apuntando a un mismo punto), reajuste de potencias, optimizaciones físicas, etc.

Figura 66. **Análisis gráfico de degradación de Ec/No**



Fuente: elaboración propia.

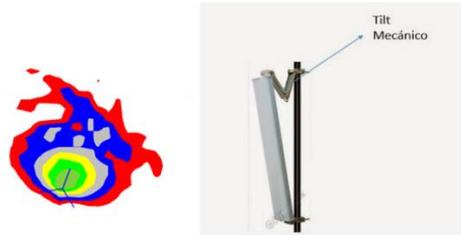
3.3.2. **Parámetros físicos de una antena**

En todo proceso de optimización, los parámetros primarios a realizar cambios para mejorar la experiencia de los KPIs, son los parámetros físicos. Regularmente están asociados con el funcionamiento diario de una antena, existen modificaciones que pueden dar como resultado el mejoramiento de una zona mala de cobertura o definir de una mejor manera las coberturas de cada sitio y evitar *pilot pollution* o mejorar el *throughput* debido a que un sitio demasiado alto se está presentando en una zona que no debería. A continuación se verán los parámetros principales.

3.3.2.1. **Tilt mecánico**

Este movimiento hace posible inclinar la antena los grados deseados para lograr recortar su cobertura. La inclinación se realiza en la misma dirección de la máxima ganancia de la antena, aproximadamente un azimut de $\pm 90^\circ$ la inclinación es 0; el principal problema es que entre mayor inclinación, mayor distorsión se tiene en el patrón de radiación ocasionando que el lóbulo principal se reduzca pero aumentando la radiación de los lóbulos laterales, esto provoca una mala calidad de señal si no se logra controlar.

Figura 67. **Predicción y físicamente *tilt* mecánico**



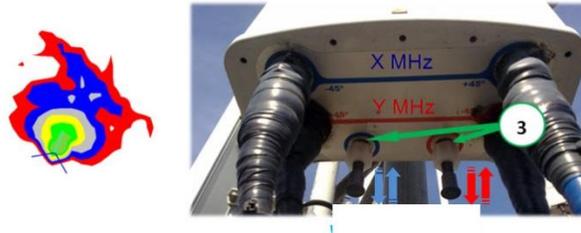
Fuente:<http://telnet360.blogspot.com/2015/05/antenas-paneles-partes-y-calculatilt.html>.

Consulta: 3 de febrero de 2016.

3.3.2.2. ***Tilt* eléctrico**

Este tipo de *tilt* es la modificación del patrón de radiación de una antena, por consiguiente modificando la fase de la onda. Al utilizar este *tilt* el patrón sufre una reducción solo que más uniforme en la dirección dada de la antena; esto provoca que la ganancia se reduzca uniformemente. A diferencia del *tilt* mecánico, este no deforma el patrón manteniendo la calidad de los servicios entregados a los usuarios conectados a una celda. La utilidad de usar *tilts* es muy variada, se utiliza *tilt* mecánico para sitios muy altos que puedan ocasionar interferencias en áreas urbanas o suburbanas; se utiliza *tilt* eléctrico también para reducir coberturas y reducir interferencias. Como recomendación es primero utilizar el eléctrico antes que el mecánico y tener siempre en cuenta que es necesario utilizarlo pero también conlleva reducción de cobertura.

Figura 68. **Predicción y vista física del *tilt* eléctrico**

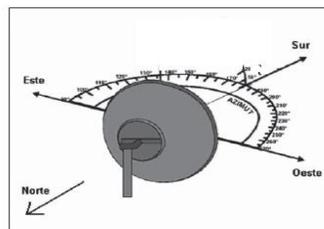


Fuente: <http://www.telecomhall.com/ES/que-es-tilt-electrico-y-mecanico-de-la-antena-y-como-lo-usa.aspx>. Consulta: 3 de febrero de 2016.

3.3.2.3. Azimut

El acimut es la orientación medida en grados de un plano de 360° se le da a una antena, se mide con una brújula en el norte y sentido de las manecillas del reloj. Este movimiento físico puede servir para girar la antena a un área con mala cobertura, pero balanceando con otra antena para no dejar sin cobertura alguna otra zona. Es funcional para cuando se quiere mejorar zonas con mal *throughput* o E_c/N_0 ya que combinando con los criterios de *tilt* apropiados se puede realizar mejoras en varias áreas.

Figura 69. **Medición de azimut**



Fuente: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-921X2013000100003&script=sci_arttext. Consulta: 4 de febrero de 2016.

3.3.2.4. Altura

La altura es una de las partes más importantes en la puesta de funcionamiento de una radiobase. Como se puede observar en páginas anteriores, la primera fase del diseño de una red UMTS cobertura, es fundamental la altura ya que lo que pretende es cubrir la mayor cantidad de área geográfica y más en áreas rurales. Conforme una red va creciendo y madurando la altura debe ser reducida para entrar en la etapa de capacidad, lo que se calcula es con una altura entre 15 a 21 mts cubrir al menos un radio de 400 mts en zonas urbanas, por lo que tener sitios muy altos al lado de pequeños puede ser contraproducente.

Un sitio muy alto en una zona urbana y con una cantidad considerable de sitios vecinos produce una alta interferencia ya que cualquier conexión de voz o datos este sitio alto será la mejor servidora inclusive a kilómetros de distancia y esto se conoce como *pilot pollution* o traslape de celdas. Esto acarrea una degradación de la calidad o E_c/N_0 provocando un mal servicio de voz y bajos niveles de *throughput*, una alta congestión de la celda degradando las estadísticas. Es parte de la optimización balancear las alturas entre todos los sitios para tener un mejor balance de tráfico y compartir los usuarios.

3.3.3. Objetivos de optimización

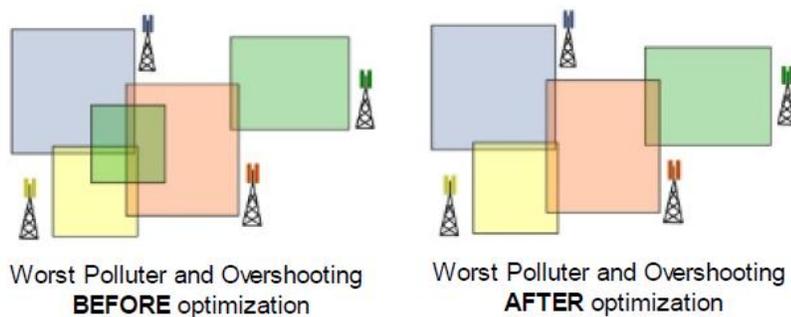
Estos son los parámetros de los cuales se desea obtener en la realidad para ofrecer un nivel de cobertura y calidad a los usuarios que requieran servicios de voz o datos. Los diseños de optimización de una red se basan en criterios dependiendo las zonas geográficas a las cuales se desea penetrar con buenos indicadores, por ejemplo el peso que se le da a una zona urbana no es el mismo a una zona rural; en este caso se debe ser más estrictos con el

objetivo de Ec/No ya que obviamente en una zona urbana se tiene más usuarios, por lo tanto, más interferencia. En una zona rural predomina un objetivo de RSCP que uno de Ec/No ya que son zonas poco habitables y lo que se necesita cubrir es la mayor cantidad de población.

3.3.3.1. **Activeset y pilot pollution**

Es un indicador de calidad en una red 3G, un número de celdas activas listas para un HO se conoce como *active set* y se tiene un umbral de entre 5-8 dB, este valor sirve para separar un número mínimo de 5 dB y máximo de 8 dB entre cada celda para que el móvil pueda decodificar la celda servidora. La finalidad de reducir el impacto de las peores servidoras que ocasionan un traslape mayor a 4 en una zona y reducir el *overshooting* (conexiones lejanas) es para que el móvil sepa con que celda acampar, de lo contrario esto provoca muchos efectos negativos como un *drop call* o mala calidad de Ec/No y por consiguiente un mal *throughput*.

Figura 70. **Pilot pollution, antes-después optimización**



Fuente: AIRCOM, Teoco. *Capesso ai user guide 5.11.1*. p. 51.

En la OPCA (optimización por planificación celular automática) se mejora la calidad reduciendo el *overshooting*, mejora el rendimiento de conexiones lejanas, reduce la interferencia causada por el peor servidor, etc. Algunos objetivos de diseño:

Tabla XIV. **Umbrales de diseño**

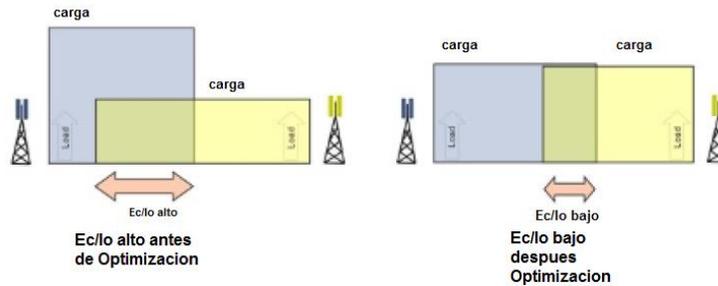
Pilot pollution 5dB	Urbano (área)	Suburbano (área)	Rural (área)
Hasta 1 servidora >=	xx %	xx %	xx %
>= 2 Servidoras <	xx %	xx %	xx %
>= 3 Servidoras <	xx %	xx %	xx %
>= 4 Servers <	95 %	95 %	95 %
>= 5 Servers	xx %	xx %	xx %
>= 6 Servers	xx %	xx %	xx %

Fuente: elaboración propia.

3.3.3.2. **Ec/Io**

Es un objetivo de calidad pero objeto de análisis para efectos de capacidad, es la relación entre energía de la señal recibida por chip y la interferencia de señal y el ruido. Esto tiene un alto impacto en el DL ya que produce mucha interferencia debido a la alta carga de la celda y por consiguiente reduce significativamente el *throughput*; se ha demostrado que el parámetro *Io* es crucial porque si una celda tiene una trayectoria de pérdidas similar a muchas otras celdas, valores como mucho a 5 portadoras se encuentran y producen una baja de capacidad en el DL en esas regiones con alta interferencia, por esta razón el *pilot pollution* y este objetivo están ligados.

Figura 71. Efectos de optimización del Ec/Io



Fuente: AIRCOM, Teoco. *Capesso AI User Guide 5.11.1.* p. 52.

La optimización de este parámetro realiza un balanceo de carga entre las celdas contribuyendo a balancear también las interferencias aumentando la disponibilidad de algún servicio, *throughput* más alto, redes mejor balanceadas y un sistema de capacidad más alto. Un valor mínimo dependiendo el área geográfica se puede tomar como entre -8 y -12 dB.

Tabla XV. Umbrales de diseño Ec/Io

Ec/Io (dB)	Urbano (área)	Suburbano (área)	Rural (área)
Entre 0 y -8	95,0 %		
Entre <-8 y -10		95,0 %	
Entre <-10 y -12			95,0 %

Fuente: elaboración propia.

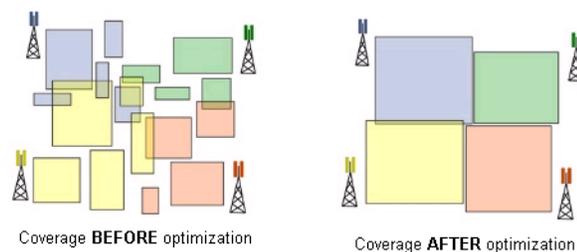
3.3.3.3. RSCP

Este objetivo está asociado con la cobertura de una zona, la optimización es fundamental cuando se tienen cierta madurez de sitios en la red porque se

pueden optimizar al máximo los parámetros de una antena a fin de poder ahorrar un sitio en una zona con malos niveles de RSCP. Este parámetro es el nivel potencia del CPICH en dBm que la celda transmite a un móvil, por lo tanto se debe obtener una potencia mínima de transmisión para que el UE esté bajo cobertura UMTS; una suficiente cobertura es necesaria para los requerimientos de servicios inalámbricos.

La potencia recibida en el móvil depende de su sensibilidad para recepción de señales débiles, los objetivos de optimización de RSCP pueden ser variables: *indoor*, *outdoor* o *incar*, siendo más agresivos según el entorno escogido. Para este análisis será un entorno *outdoor*, tratando de tener un objetivo agresivo de diseño para no descuidar la cobertura *indoor*, ya que la herramienta de propagación pueda o no tomar en cuenta pérdidas producidas en la penetración de materiales de construcción.

Figura 72. Optimización de RSCP



Fuente: AIRCOM, Teoco. *Capesso al user guide 5.11.1*. p. 47.

La selección del entorno es crucial para optimizar una mejor cobertura del canal del CPICH, optimizando se obtiene: aumentar las zonas de cobertura, mejorar la probabilidad de cobertura, reducir la probabilidad de los agujeros de cobertura y proporcionar suficiente cobertura *indoor*.

Tabla XVI. **Umbrales de diseño RSCP**

RSCP (Outdoor)	Urbano (área)	Suburbano (área)	Rural (área)
>= -80 dBm	95 %	N/A	N/A
>= -85 dBm	95 %	95 %	N/A
>= -91 dBm	95 %	95 %	95 %
>=-94 dBm	95 %	95 %	95 %

Fuente: elaboración propia.

3.3.3.4. CQI

CQI (*channel quality indicator*) como su nombre lo indica es un parámetro que indica que bueno o malo es el canal de comunicación. El UE es el que envía esta información a la red e implica: la comunicación actual de la calidad del canal y el UE desea obtener los datos del bloque de transporte que a la vez se convierte en el *throughput* entregado al UE. Los valores son entre 0-30 donde 0 es la mala calidad y 30 la mejor calidad; al tener un valor alto de CQI se podrán recibir bloques de datos a mayor velocidad. También es el indicador del tipo de modulación que está recibiendo el UE, ya que de este depende en gran medida la velocidad de algún servicio de datos (internet, whatsapp, entre otros).

Tabla XVII. Valores de CQI Cat G

Valor CQI	Tamaño del bloque de transporte	Números códigos Spreading	Modulación	Throughput esperado (Mbps)
1	136	1	QPSK	0.068
2	176	1	QPSK	0.088
3	232	1	QPSK	0.116
4	320	1	QPSK	0.16
5	376	1	QPSK	0.188
6	464	1	QPSK	0.232
7	648	2	QPSK	0.324
8	792	2	QPSK	0.396
9	928	2	QPSK	0.464
10	1264	3	QPSK	0.632
11	1488	3	QPSK	0.744
12	1744	3	QPSK	0.872
13	2288	4	QPSK	1.144
14	2592	4	QPSK	1.296
15	3328	5	QPSK	1.664

Valor CQI	Tamaño del bloque de transporte	Números códigos Spreading	Modulación	Throughput esperado (Mbps)
16	3576	5	16-QAM	1.788
17	4200	5	16-QAM	2.1
18	4672	5	16-QAM	2.336
19	5296	5	16-QAM	2.648
20	5896	5	16-QAM	2.948
21	6568	5	16-QAM	3.284
22	7184	5	16-QAM	3.592
23	9736	7	16-QAM	4.868
24	11432	8	16-QAM	5.716
25	14424	10	16-QAM	7.212
26	15776	10	64-QAM	7.888
27	21768	12	64-QAM	10.884
28	26504	13	64-QAM	13.252
29	32264	14	64-QAM	16.132
30	38576	15	64-QAM	19.288

Fuente: 3GPP. 3rd Generation partnership project; technical specification group radio access network; physical layer procedures (FDD) (release 8). p. 58.

Existen diferentes categorías de UE de A a I, por lo que dependiendo de la categoría existe una con diferentes valores de CQI, las características del móvil definen que utilizar porque no todos móviles pueden por ejemplo soportar modulaciones 64-QAM.

3.3.4. Herramienta de planificación celular (PCA)

La herramienta a utilizar realiza la optimización de parámetros físicos de una antena de una manera eficiente para obtener el desempeño deseado de una red 3G. Realiza los análisis con base en un algoritmo complejo que va

unido con la herramienta de planificación, toma en cuenta variables como por ejemplo topología del terreno, *pathloss*, entre otros.

3.3.4.1. Características

Entre algunas características se pueden tener:

- Permite planificar y optimizar una red de radio asegurando una correcta expansión continua de cobertura, capacidad y calidad.
- Optimizar el rendimiento de la red con el menor tiempo posible.
- Encontrar el mejor diseño de la red teniendo en cuenta las limitaciones y sacarle provecho a lo que se tenga.
- Ser más eficientes en el proceso de optimización.
- Estrechamente integrado con alguna herramienta de planificación celular para correr las predicciones.

En resumen lo que se trata de hacer es ser más eficientes y en el menor tiempo posible para lograr generar un diseño de optimización confiable, seguro y rentable.

3.3.4.2. Datos de entrada

Dependiendo de la herramienta de predicciones, es necesario generar alguna extensión que sepa reconocer el programa PCA. En la herramienta utilizada se requiere que los datos de entrada (tilts, azimut, altura, tipo de antena, patrón de radiación, potencias, etc.) sean ingresados en una extensión XML para su correcta lectura; esta extensión permite tabular los datos de una manera sencilla y fácil de reconocer.

Figura 73. Ejemplo de un export de sitios en XML

Node B ID	Antenna Index	Instance ID	Azimuth	Down Tilt	Height - Inv	Height - Pred - Offset	Height - Pred	DL Cor. Gain
WGTA026	1		65.000000	0	15.000000	0	15.000000	0
WGTA026	2		190.000000	0	15.000000	0	15.000000	0
WGTA026	3		325.000000	0	15.000000	0	15.000000	0
WGTA027	1		20.000000	0	14.000000	0	14.000000	0
WGTA027	2		110.000000	0	14.000000	0	14.000000	0
WGTA027	3		200.000000	0	14.000000	0	14.000000	0
WGTA063	1		120.000000	0	18.000000	0	18.000000	0
WGTA063	2		210.000000	0	18.000000	0	18.000000	0
WGTA063	3		320.000000	0	18.000000	0	18.000000	0
WGTA074	1		60.000000	0	14.000000	0	14.000000	0
WGTA074	2		180.000000	0	14.000000	0	14.000000	0
WGTA074	3		280.000000	0	14.000000	0	14.000000	0
WGTA131	1		50.000000	0	30.000000	0	30.000000	0
WGTA131	2		150.000000	0	30.000000	0	30.000000	0
WGTA131	3		270.000000	0	30.000000	0	30.000000	0
WGTA135	1		110.000000	0	42.000000	0	42.000000	0
WGTA135	2		210.000000	0	42.000000	0	42.000000	0
WGTA135	3		340.000000	0	42.000000	0	42.000000	0
WGTA149	1		100.000000	4.000000	30.000000	0	30.000000	0

Fuente: elaboración propia.

3.3.4.3. Parámetros optimizables

Dependiendo de los requerimientos necesarios, se pueden plantear varios escenarios de algunos parámetros a optimizar. El criterio del ingeniero de optimización es fundamental porque la herramienta necesita de los correctos datos de entrada y de diseño para su buen funcionamiento; el ingeniero es el que dará la pauta de que quiere realizar y que la herramienta lo plasme en un plan de optimización adecuado. Por ejemplo, al realizar una reducción de altura por *pilot pollution*, es importante realizar un reajuste de los demás sitios para realizar un balanceo de carga; esto implica que se deben optimizar la mayoría de parámetros ya que es importante mantener la cobertura lo más que se pueda pero sin dañar los KPIs.

3.3.5. Monitoreo de KPIs

En el proceso de optimización de un clúster, es fundamental realizar constantes monitoreos a nivel estadístico de cómo se están comportando las celdas ante los cambios efectuados. ¿Y qué son las estadísticas? Son números

que se pueden recolectar en una red por celda, y evaluar estos datos ya sea un análisis con fórmulas matemáticas para saber por ejemplo cuantos rechazos se encontraron por acceso a una celda a nivel de voz o datos, cuantos llamadas o sesiones de datos se lograron retener y no generar un *drop*, el *throughput* entregado por celda, entre otros. A continuación se evaluará los KPIs más frecuentes.

3.3.5.1. Retenibilidad

Como se ha visto, cuando un UE requiere ingresar a una red UTRAN las capas RRC y RAB son las encargadas de la utilización y autorización para interactuar con la red. Es fundamental realizar un monitoreo para localizar si hubo algún fallo a nivel de estas capas, la más usual es la medición del estado RAB ya que es cuando el usuario decide a que servicio requiere y, por lo tanto, se puede medir los rechazos que obtuvo a nivel de esta capa:

$$\% \text{ rechazos RAB} = \frac{(\text{total de rechazos RAB}) * 100}{\text{Accesos con éxito RAB}}$$

Este nos da un porcentaje que se debe mantener por arriba de un objetivo del 95 %, es decir, de 100 intentos minimizarlos solo a 5.

3.3.5.2. Accesibilidad

La accesibilidad es la capacidad de un UE de poder acceder a una red UMTS y es exitosa cuando realiza una comunicación a doble vía con ella misma. Se puede medir los accesos a nivel de capa RRC y RAB, estas dos capas utilizan los mismos canales de comunicación con la diferencia que hacen uso diferente de la utilización de la red. La capa RRC es la encargada de

notificar que un UE desea ingresar y al saber qué tipo de servicio se requiere la capa RAB es la encargada de, con base en el tipo de servicio, entregarle al UE los recursos que necesita el UE.

$$\% \text{ accesibilidad (RAB, RRC)} = \frac{(\text{total accesos exitosos})}{\text{Total intentos de acceso a red}} * 100$$

3.3.5.3. Disponibilidad

Este KPI mide que tan disponible es una celda a la hora de tratar de acceder. Realiza una medición de los códigos disponibles y la potencia cuando un UE intenta realizar un servicio cuando ya tiene el permiso de acceso mediante las capas RRC y RAB. El porcentaje de disponibilidad de una celda se puede calcular con el total del tiempo que este sin disponibilidad de una celda, entre el tiempo de medición.

Figura 74. **Cálculo de la disponibilidad**

$$CellAvailability = \frac{\text{measurement_period} - \sum_{\text{cause}} RRU.UTRANCellUnavailableTime.[cause]}{\text{measurement_period}} \times 100$$

Fuente: ETSI. *Telecommunication management; key performance indicators (KPI) for UMTS and GSM*. p. 23.

3.3.5.4. Usuarios activos y throughput

Las mediciones de *throughput* se realizan a nivel de RNC se lleva un conteo del total de bytes enviados a la celda servidora y cuando termina la medición, la RNC divide el tiempo total de transmisión de datos por el número

total de bits para *throughput* DL. Para el cálculo de usuarios activos, el sistema muestrea la cantidad de usuarios o UEs conectados cada 5 segundos.

Figura 75. **Cálculo de *throughput***

$$\frac{\text{Max number of transport blocks per TTI}}{TTI} \times \text{transport block payload size}$$

Fuente: KREHER, Ralf. *UMTS performance measurement*. p.102.

3.3.5.5. SHOO

SHOO es la medición *soft handover overhead* y que realiza son las mediciones de la cantidad de conexiones que aumentan los recursos causadas por SHOs. La RNC envía una actualización del *active set* al UE durante un SHO por lo cual se realiza un conteo de las conexiones cuando se establecen o rechazan. La fórmula de medición es la siguiente:

$$\text{SHOO} = (\text{promedio tamaño } \textit{active set} - \text{tráfico total}) / \text{tráfico primario}$$

Un valor normal es del 30 % de SHO.

4. DISEÑO DE OPTIMIZACIÓN DE UN CLÚSTER

4.1. Herramientas de trabajo

Las herramientas de trabajo a utilizar son todo el conjunto de programas a utilizar para realizar los diseños y análisis correspondientes a la optimización de un clúster. Desde las herramientas de planificación y diseño de los parámetros a optimizar, monitoreo de KPIs y procesamiento de los DT, a continuación se verá una breve descripción de cada herramienta importante a utilizar.

4.1.1. Herramienta de planificación celular automática capesso

Es la herramienta que se utilizará para realizar los cálculos correspondientes de *tilt*, azimut para obtener el mejor plan de optimización de acuerdo a los objetivos de diseño para cumplir con los umbrales correspondientes. Una de las ventajas que ofrece es que se integra perfectamente con la herramienta de predicción para corroborar que el análisis realizado sea el mejor y realizar las pruebas que correspondan antes de ponerlo a prueba en vivo.

4.1.2. Herramienta de planificación asset

Es la herramienta a utilizar para realizar las predicciones correspondientes, aquí se realizarán las simulaciones de cómo deberían comportarse los diferentes KPIs en la vida real. Las simulaciones indicarán como está el clúster actualmente y como debería quedar con los cambios

propuestos a los sitios; una de las ventajas es como hemos visto, la herramienta de planificación celular se integra perfectamente con esta herramienta, por lo que todo lo que haremos PCA se verá reflejado mediante las predicciones.

4.1.3. Herramienta de *drive test swissqual*

Es un software de posprocesamiento que recopila los datos obtenidos durante el DT; proporcionará los análisis de la optimización y la evaluación correspondiente de los servicios de voz y datos. Una de las ventajas que ofrece es que los datos pueden ser exportados a diversos formatos para su visualización como por ejemplo Excel, google earth, mapinfo, entre otros; lo que permite es tener un mejor panorama de donde se puede tener afectación de los diferentes KPIs a medir.

4.1.4. Herramienta de monitoreo U2000

Esta herramienta es un sistema de monitoreo estadístico de los diferentes KPIs a nivel de celda de tiempo continuo, se pueden sacar s con valores por horas, días y hasta 4 semanas continuas. Por medio de esta herramienta se podrá monitorear en tiempo real el efecto obtenido de los cambios; es decir que tanto aumento de usuarios se tiene, el throughput entregado, si se tienen fallas de diferentes causas, entre otras. Los valores recolectados servirán para evaluar el impacto final obtenido en la mejoras después de la optimización.

4.2. Preanálisis del clúster

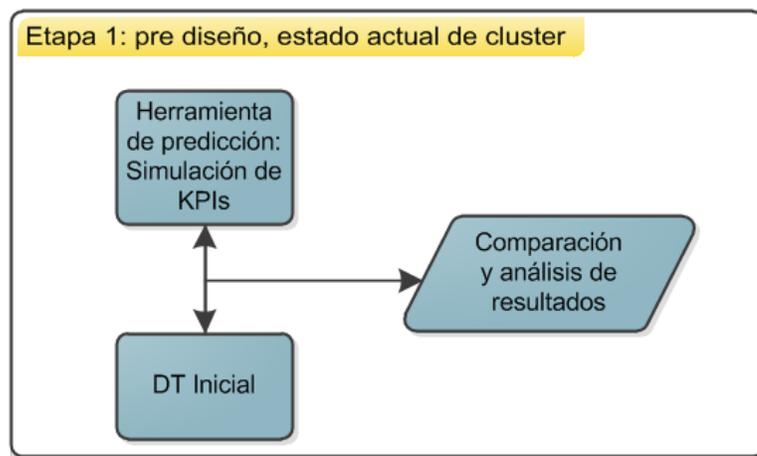
En el proceso de diseño de un clúster, es importante el preanálisis ya que es la etapa de cómo definir un clúster con base en objetivos o KPIs que por lo

general se presentan como por debajo de lo que se tiene planeado. Se verá cómo identificar a un clúster por mal E_c/N_0 , RSCP, *pilot pollution* o por alta carga de una celda que se denomina “*worst offender*” o el peor ofensor que perjudica a un clúster entero.

4.2.1. Descripción del diagrama de bloques del sistema

Un diagrama de bloques puede ayudar a entender cómo es el proceso de diseño de optimización de un clúster.

Figura 76. **Etapa 1: prediseño**

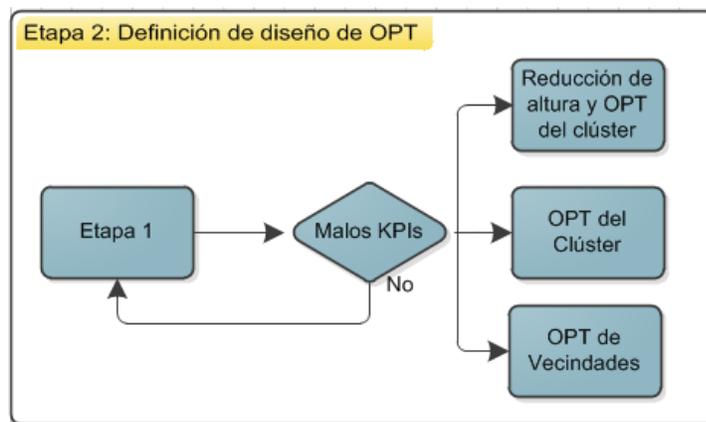


Fuente: elaboración propia.

En esta primera etapa, se realiza mediante la herramienta de predicción como se encuentra actualmente el clúster a nivel de KPIs: *pilot pollution*, RSCP, E_c/I_0 y *throughput*. De manera simultánea se realiza un DT para tener un vistazo real de estos KPIs, ya que en el paso de comparativa y análisis de resultado se genera la información para lo siguiente; además, se aprovecha para tunear la herramienta de predicción con el DT para obtener valores reales

si se decide optimizar. La herramienta de predicción será el punto de partida para realizar las pruebas necesarias posteriormente en caso se optimice el clúster por tal razón es sumamente importante que se aproxime lo mejor posible a la realidad, ya que no es recomendable realizar pruebas con las red en vivo porque al menos se debe tener una perspectiva de cómo podrían comportarse los sitios a los cambios efectuados y al tratarse de usuarios que utilicen algún servicio puede perjudicar sino se tiene conocimiento.

Figura 77. **Etapa 2: definición de diseño de OPT**



Fuente: elaboración propia.

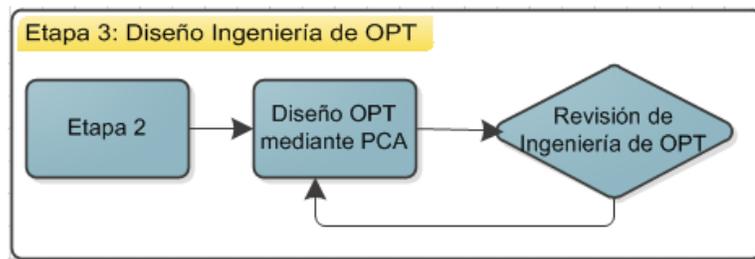
Con base en el análisis de KPIs obtenidos de la etapa 1, se realiza la decisión de optimizar cualquiera de las 3 posibilidades:

- Reducción de altura y OPT del clúster: con base en KPIs de la herramienta de predicción, *drive test* y estadísticos de carga y usuarios, se analiza reducir de altura a un sitio que está cubriendo más por lo alto y además por la alta carga de usuarios este presentando problemas de servicios, ocasionando que sitios más cercanos estén holgados de usuarios porque cubren menos y mal. Al reducir altura es

necesario realizar una optimización a los sitios vecinos para balancear el tráfico.

- OPT de clúster: con base en KPIs del *drive test* y de la herramienta de predicción, se puede establecer que es necesario una optimización del clúster, para mejorar los indicadores de RSCP, Ec/No o *throughput*.
- OPT de vecindades: con base en el análisis de drive test, regularmente cuando se pasa cerca de un sitio, se debe observar en el *detected set* las mejores servidoras por niveles de señal deberían ser los 3 o la cantidad de sectores que tiene la celda. Se le llama una “vecina no declarada inter frecuencia” cuando el móvil no se logra enganchar al sector vecino de un sitio, por lo tanto, se produce malos niveles de Ec/No y por consiguiente un *drop call* o mal *throughput*.

Figura 78. **Etapa 3: diseño ingeniería de OPT**

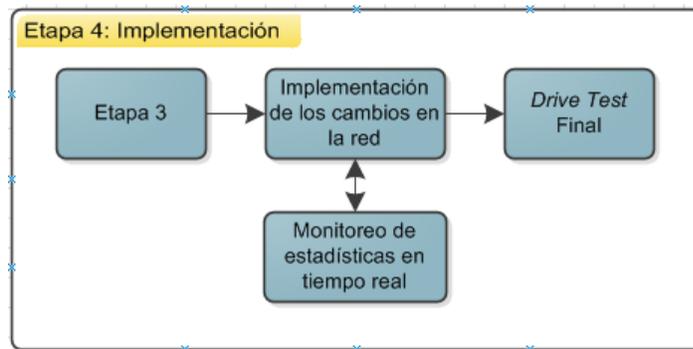


Fuente: elaboración propia.

En esta etapa ya establecida que procede con base en los análisis previos, se realiza el diseño de la ingeniería de optimización para su implementación mediante la PCA, posteriormente se realiza la revisión del plan de optimización mediante la herramienta de predicción cargando los

parámetros físicos en los sitios y analizando las mejoras que arroja mediante los KPIs.

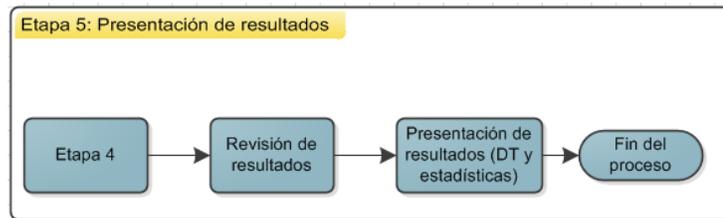
Figura 79. **Etapa 4: implementación**



Fuente: elaboración propia.

Esta etapa es la implementación de los cambios propuestos en la vida real: reducciones de altura, cambios físicos u optimización de vecinas. De manera simultánea a los cambios, se realiza un monitoreo de estadísticas a nivel de celdas de cada sitio ya que muchas veces, los cambios efectuados pueden producir un disparo de algún KPI debido a que por lo regular cuando se trabajan clúster de 30 sitios, es muy difícil trabajarlos en un día ya que estos cambios son complementarios entre cada sitio vecino y por esta razón es bueno mantener un monitoreo para evitar problemas.

Figura 80. **Etapa 5: presentación de resultados**



Fuente: elaboración propia.

Es la etapa final del proceso, aquí se revisan los resultados obtenidos tanto a nivel de *drive test* y estadísticas; las mejoras obtenidas de lo que se pensó en un principio. En la presentación de resultados se tabula la información y se generan las gráficas para presentar las mejoras a nivel de los KPIs del clúster entero.

4.3. Definición de un clúster por malos KPIs

Como se ha visto anteriormente un clúster se puede definir de dos formas: estadístico, *drive test*-herramienta de predicción. A nivel estadístico se puede decir cuando un sitio tiene gráficas con alta carga de celda, esto produce una alta congestión y una degradación del *throughput*. La causa de esto por lo general es la altura del sitio ofensor, esto no permite que se balancee mejor el tráfico y que los demás sitios aledaños de menor altura no tengan una carga acorde a su cobertura.

A nivel *drive test*-herramienta de predicción se puede verificar la cobertura de un sitio mediante su *scrambling code* que es como el móvil identifica a un celda; regularmente cuando un sitio cubre más de la cuenta siempre el móvil verá como mejor servidora porque la altura le permite ocasionar *pilot pollution* o

traslape de celdas en varias zonas de un clúster. También es factible reconocer cuando a nivel de los objetivos de RSCP, Ec/Io, *pilot pollution* o *throughput* está por debajo de lo que se tiene diseñado.

4.3.1. Descripción de las variables de estudio

Las variables de estudio serán con base en los objetivos de diseño por clúster: RSCP, Ec/Io, *throughput*, SC, CQI y *pilot pollution*. La idea es mejorar estas variables mediante la optimización de parámetros físicos de una celda. A nivel de estadísticas las variables de estudio serán: carga de la celda, usuarios, accesibilidad, retenibilidad, SHOO. Estas son las variables que se estudiarán en el impacto de todo el diseño que compone una optimización.

4.4. Proceso de diseño

Como se vio anteriormente, se describe las 5 etapas del proceso de diseño de optimización de un clúster 3G, ahora se describirán detalladamente paso a paso como es la evolución desde el análisis inicial hasta el final cuando se obtienen los resultados deseados con una mejora significativa de los objetivos de optimización y ver un *improvement* o mejora en las estadísticas.

4.4.1. Etapa 1: prediseño, estado actual del clúster

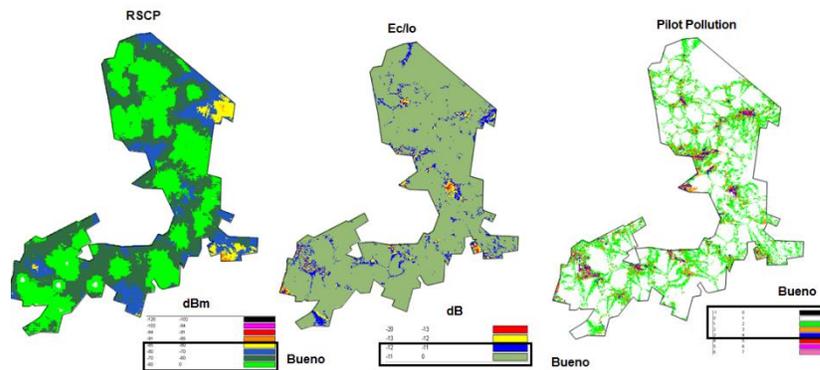
Esta etapa como se ha visto, es el estado actual de los KPIs a nivel de clúster, se verá el estado actual como una especie de fotografía de lo que se tiene y las oportunidades de mejora. Es muy importante analizar también las estadísticas dependiendo de que se requiera trabajar, porque al final es bueno comparar las mejoras obtenidas con el clúster que se optimizó aunque cabe

resaltar que se manejan a nivel de clúster, por lo tanto, si un sitio está con mal desempeño que podría afectar el global.

4.4.1.1. Simulación de los KPIs (Ec/No, PP, RSCP)

La simulación en la herramienta de predicción es muy importante, ya que si bien es cierto es “simulado” da un acercamiento real de lo que se necesita realizar. Como toda herramienta de planificación, los inputs son muy importantes como por ejemplo la carga de la celda, la potencia, etc. Por lo tanto, es muy importante mantener actualizada la base de datos de los sitios.

Figura 81. Ejemplo de simulación



Fuente: elaboración propia, empleado Teoco Enterprise.

¿Por qué estos KPIs? Pues RSCP al ser el objetivo de cobertura es muy importante; recuérdese que este mide la potencia con que la celda transmite al móvil, y se traduce con que al tener mala cobertura es muy probable que el móvil no pueda acceder a los servicios básicos que entrega UMTS como por ejemplo una calidad de voz mejorada, velocidades de datos altos, etc. Ec/Io es la medición de la interferencia a nivel de usuarios en el clúster, es decir, que

entre más interferencia es muy probable que se puede acceder algunos servicios pero con mala calidad. *Pilot pollution* porque es una medida de calidad, cuando tenemos áreas donde llegan más de 4 celdas el móvil no logra decodificar la celda servidora, por lo tanto, degrada el Ec/Io y se obtienen malos niveles de *throughput*.

Tabla XVIII. Ejemplo de objetivos de diseño

RSCP	Urbano	Suburbano	Rural
>= -60 dBm	51,4 %	54,0 %	39,0 %
>= -70 dBm	98,4 %	89,5 %	80,4 %
>= -80 dBm	98,5 %	98,1 %	96,3 %
>= -85 dBm	98,5 %	99,7 %	99,5 %
>= -91 dBm	98,5 %	99,7 %	99,8 %
>= -94 dBm	98,5 %	99,7 %	99,8 %
>= -102 dBm	98,5 %	99,7 %	99,8 %
>= -120 dBm	98,5 %	99,7 %	99,8 %

Ec/Io	Urbano	Suburbano	Rural	Total
>= -11 dB	84,7 %	93,1 %	89,3 %	90,0 %
>= -12 dB	94,9 %	98,4 %	96,6 %	97,0 %
>= -13 dB	99,4 %	99,9 %	99,4 %	99,5 %
>= -20 dB	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %

Pilot Pollution 5dB	Urbano	Suburbano	Rural	Total
Arriba de 1 Servidoras (>= 62.5%)	86,27 %	93,78 %	90,20 %	90,84 %
>= 2 Servidoras (< 30%)	13,73 %	6,22 %	8,31 %	9,20 %
>= 3 Servidoras (< 7.5%)	4,03 %	1,44 %	2,97 %	2,68 %
>= 4 Servidoras (< 1%)	0,91 %	0,32 %	1,03 %	0,89 %
>= 5 Servidoras	0,11 %	0,04 %	0,29 %	0,24 %
>= 6 Servidoras	0,00 %	0,01 %	0,10 %	0,08 %

Fuente: elaboración propia.

La idea es mantener el RSCP por debajo de -80 dBm en urbano, -91dBm en suburbano y -94 dBm en rural en un 95 % o más de clúster. El Ec/Io por

debajo a -12 dB arriba del 95 % para los 3 ambiente. El *pilot pollution* hasta 4 servidoras por debajo del 1 % de clúster, el objetivo de la optimización es mejorar cada KPI de acuerdo al porcentaje estimado que debería estar.

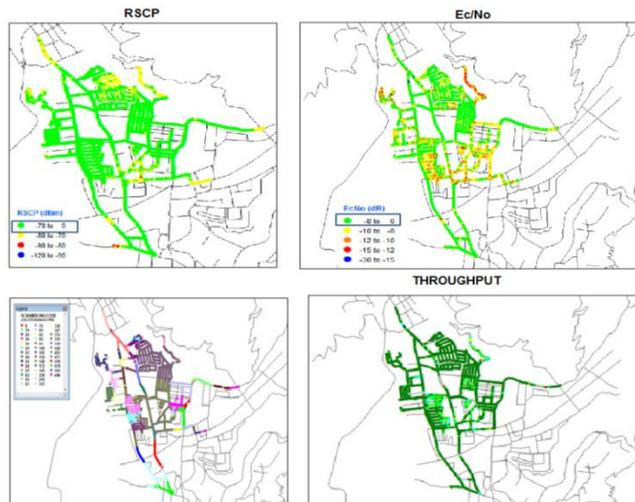
4.4.1.2. Drive test inicial

Cuando se trabaja una optimización, el DT debe cumplir los siguientes objetivos:

- Obtener la visión real del clúster antes de iniciar la OPT.
- Comparar con la herramienta y realizar una aproximación real de las áreas con problema.
- Será el punto de partida para la comparación posteriormente con los resultados finales de la optimización.

Un DT dará una mejor perspectiva de lo que se pretende mejorar, mostrará los puntos donde no se va con una herramienta de predicción; además que es lo que experimenta un usuario real cuando intenta realizar servicio con la red.

Figura 82. Ejemplo de DT

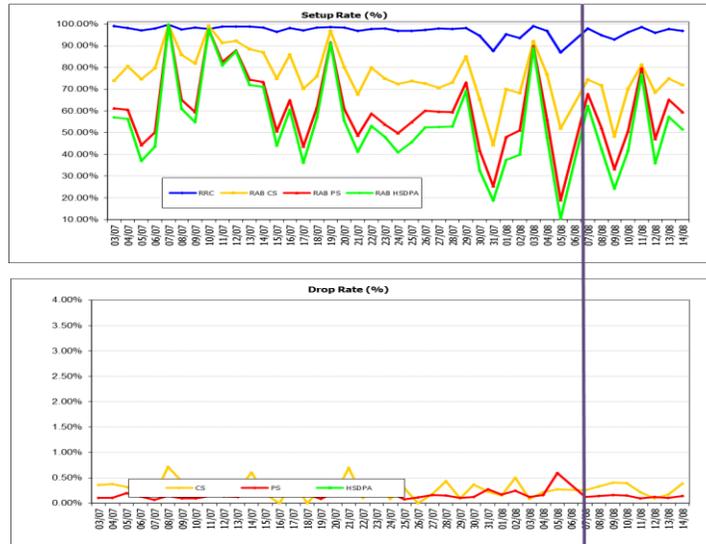


Fuente: elaboración propia, empleado Teoco Enterprise.

4.4.1.3. Estadísticas iniciales

Como se ha visto anteriormente, las estadísticas son un conjunto de números tabulados que ayudan a interpretar problemas a nivel lógico de una celda, es decir fallas de acceso, fallas de retención, congestión, etc. Regularmente estas fallas o problemas están asociados con capas inferiores como la RRC, RAB que es muy difícil notar con un DT por ejemplo, de hecho el DT es el punto de partida para realizar una investigación a fondo del porqué puedan existir problemas en el área.

Figura 83. Ejemplo de accesibilidad y retenibilidad



Fuente: elaboración propia.

Es muy importante también tener las gráficas de cómo se encuentra actualmente el clúster a trabajar, aunque es muy difícil poder observar una mejora después de una optimización ya que alguna celda top como ofensora pueda degradar las gráficas de manera global, ya que pueda mostrar KPIs muy malos.

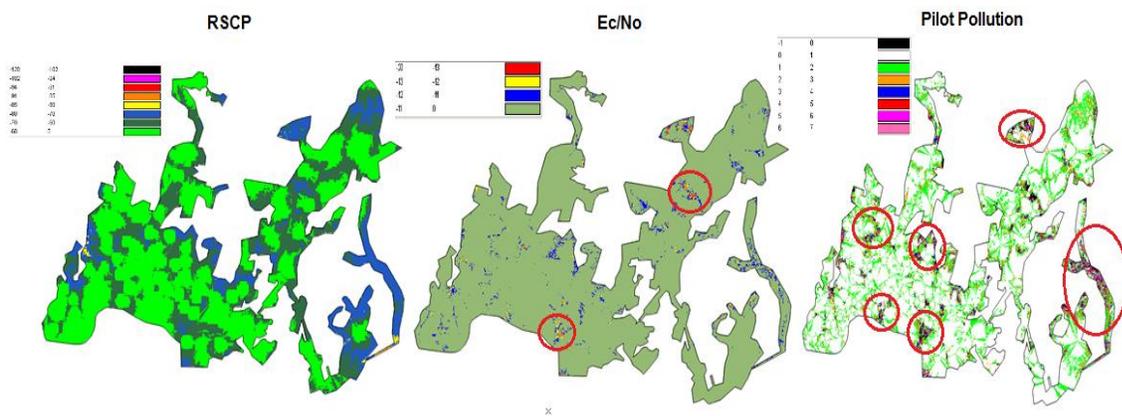
4.4.2. Etapa 2: definición de diseño de OPT

Como se ha visto, en esta etapa se define a cualquiera de los 3 escenarios que se evaluarán: OPT de un clúster, reducción de altura y OPT y corrección de vecinas. Se verá cómo identificar cada problema y como puede llegar a generar problemas, para el efecto se trabajará sobre clúster reales con sitios radiando.

4.4.2.1. OPT del clúster

Se trabajará sobre un clúster OC, que presenta problemas sobre sus objetivos mediante su predicción en la herramienta que será el primer paso y su DT inicial.

Figura 84. Predicción clúster OC de OPT



Fuente: elaboración propia, empleado Teoco Enterprise.

Como se puede observar en los círculos rojos, áreas de oportunidades de mejora. El *pilot pollution* se nota en varias áreas, por lo regular esto puede afectar degradando la calidad de la red como se ha visto.

Tabla XIX. **Objetivos clúster OC**

RSCP (All)	Urbano	Suburbano	Rural
Área (km ²)	5.02	2.65	22.80
>= -60 dBm	73.5 %	53.5 %	48.7 %
>= -70 dBm	96.3 %	89.9 %	84.4 %
>= -80 dBm	99.9 %	100.0 %	99.6 %
>= -85 dBm	100.0 %	100.0 %	99.9 %
>= -91 dBm	100.0 %	100.0 %	100.0 %
>= -94 dBm	100.0 %	100.0 %	100.0 %
>= -102 dBm	100.0 %	100.0 %	100.0 %
>= -120 dBm	100.0 %	100.0 %	100.0 %

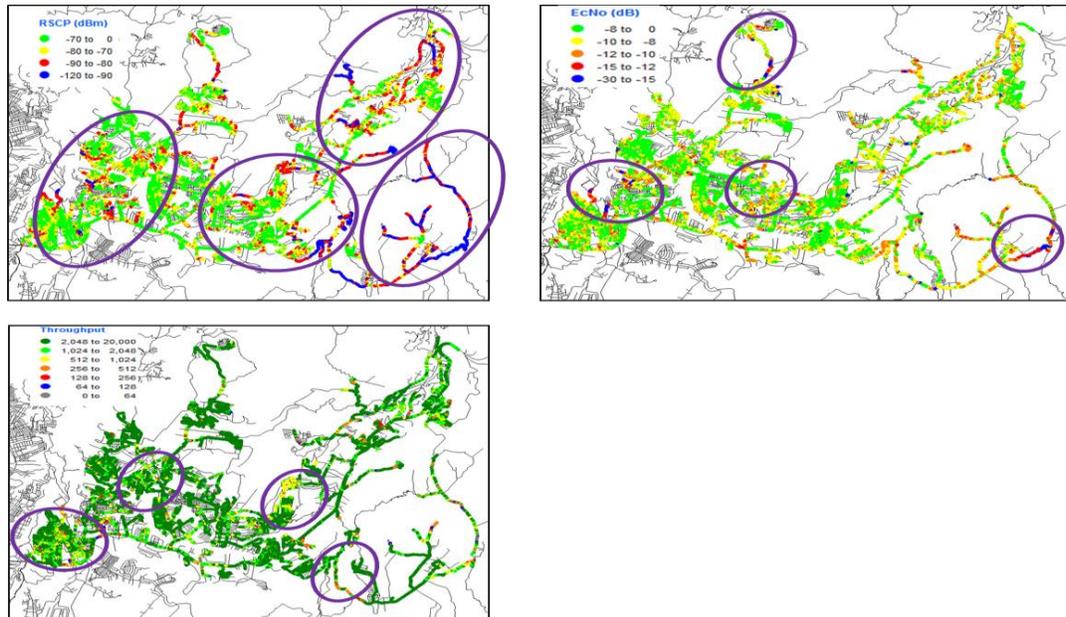
Eclo	Urbano	Suburbano	Rural	Total
Area (km ²)	5.02	2.65	22.80	30.48
>= -11 dB	96.6 %	96.9 %	95.4 %	95.7 %
>= -12 dB	98.9 %	99.2 %	98.6 %	98.7 %
>= -13 dB	99.9 %	99.9 %	99.8 %	99.8 %
>= -20 dB	100.0 %	100.0 %	100.0 %	100.0 %

Pilot Pollution 5dB	Urbano	Suburbano	Rural	Total
Arriba de 1 Servidora (>= 62.5%)	93.05 %	91.21 %	87.88 %	89.02 %
>= 2 Servidoras (< 30%)	6.99 %	8.93 %	10.55 %	11.10 %
>= 3 Servidoras (< 7.5%)	2.26 %	3.14 %	4.84 %	4.27 %
>= 4 Servidoras (< 1%)	0.69 %	1.46 %	2.08 %	1.80 %
>= 5 Servidoras	0.21 %	0.70 %	0.91 %	0.78 %
>= 6 Servidoras	0.08 %	0.30 %	0.40 %	0.34 %

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar a nivel predicción los objetivos están bien exceptuando el *pilot pollution* que indica que en los entornos suburbanos y rurales presentan problemas con una cantidad mayor o igual de 4 portadoras lo que implica la degradación de algunos servicios. El apoyo mediante el DT es fundamental para correlacionarlo con la predicción y encontrar un punto de comparación entre los 2.

Figura 85. DT clúster OC



Fuente: elaboración propia, empleado Teoco Enterprise.

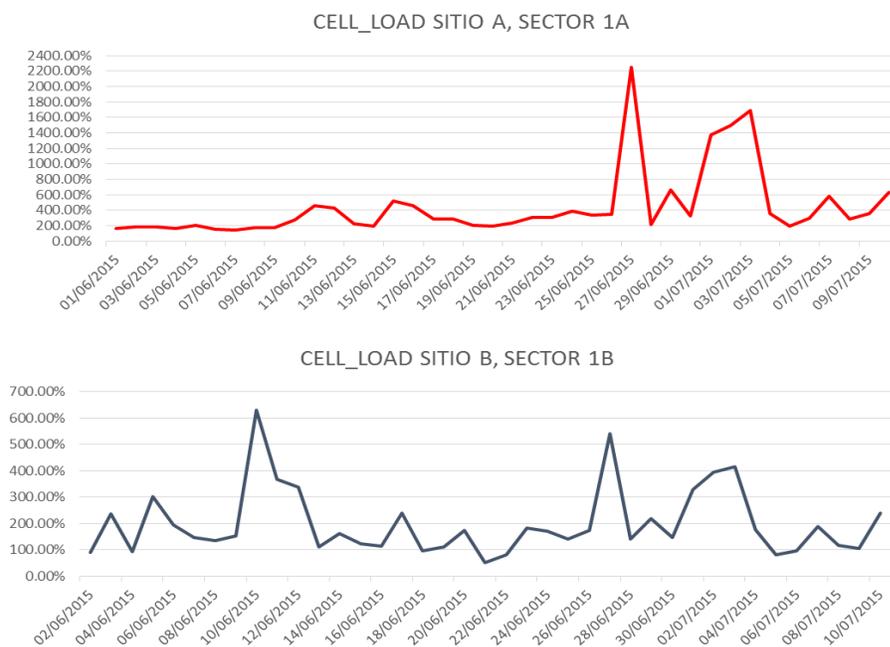
Como se puede observar en las imágenes del DT, en los cuadros existen las posibilidades reales de mejora y lo importante es llegar a un punto de acuerdo con la simulación. Claro está que es una simulación y, por lo tanto, es muy difícil realizar una aproximación real porque existen varios factores que es imposible ingresar a una herramienta como la cantidad de usuarios, las terminales usadas, topologías, crecimiento del área, etc. Se verá más adelante como se pueden mejorar las áreas descritas mediante la optimización.

4.4.2.2. OPT por reducción de altura

Un sitio alto con celdas vecinas de altura regular-baja (se podría asumir entre 11 y 21 mts), puede ocasionar problemas de degradación de algún KPI o objetivo y a su vez pueda afectar el desempeño de un clúster entero. Como ya

se ha visto, la etapa posterior a cobertura es la capacidad que es cuando ya alcanzado un objetivo de RSCP se entra a la etapa de mejorar la calidad de los usuarios y, por lo tanto, se instalan sitios por capacidad cuando el sector de un sitio que por lo regular es alto, presenta una alta carga de usuarios.

Figura 86. Alta carga de 2 sitios

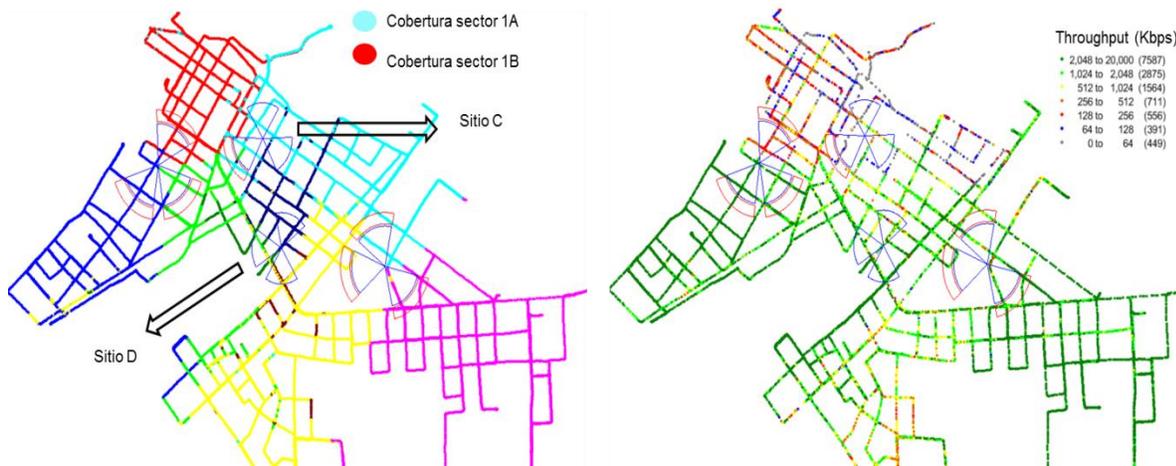


Fuente: elaboración propia.

La alta carga de estos sitios perjudica en gran medida el desempeño a nivel de accesibilidad de PS de los usuarios. La carga se calcula por la cantidad de usuarios activos que estén demandando cierto *throughput*, se tiene un objetivo máximo del 80 % y estos 2 sectores de diferentes sitios tienen cargas arriba del 100 % llegando hasta el 2000 % y es porque atienden usuarios que se logran conectar a varios kilómetros de la radiobase, perjudicando a los

usuarios que estén cerca y, por lo tanto, entregan una mala calidad de servicios.

Figura 87. Coberturas y *Throughput* de los sitios A y B, clúster ORA



Fuente: elaboración propia, empleado Teoco Enterprise.

Como se pueda ver con base en el DT que las coberturas de los sectores que presentan una alta carga pintados con color celeste y rojo, abarcan más allá de su cobertura ocasionando bajos niveles de *throughput* en la zona y por consiguiente un mal Ec/No. Los sitios C y D tienen poca o nula muestras de cobertura porque los sitios altos están pasándoles encima ya que los usuarios arrastran un servicio del sector más alto porque llega con mejores niveles de señal que un sitio bajo. Se verá más adelante que la solución es reducir altura y optimizar la zona para balancear mejor el tráfico.

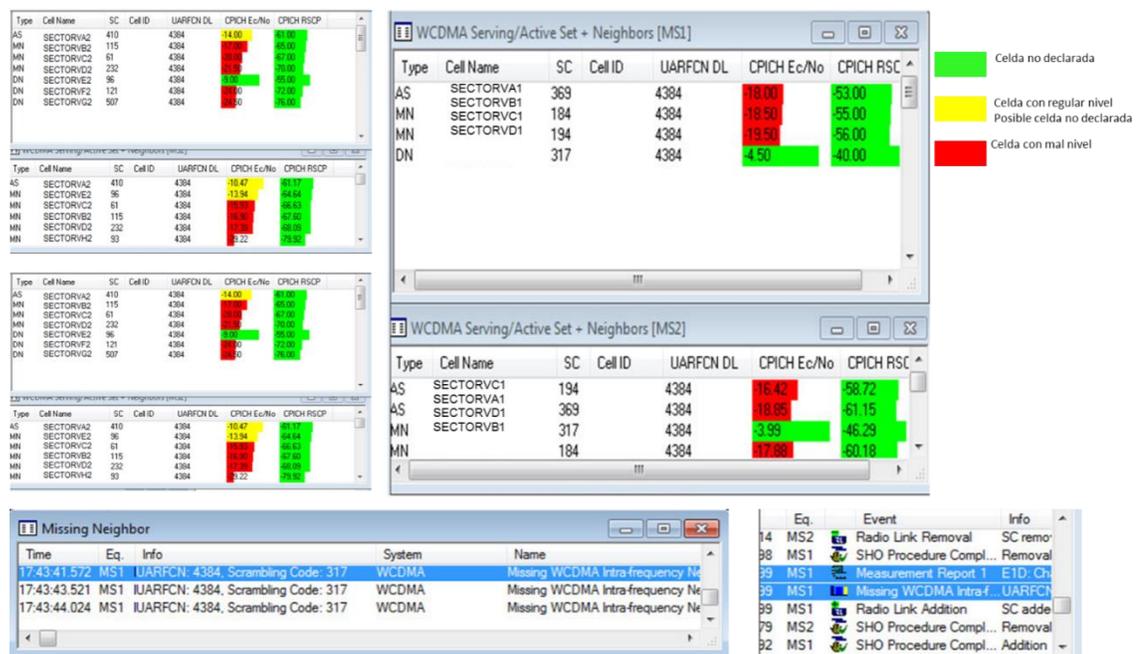
4.4.2.3. OPT de vecinas

El listado de vecindades es la definición de los sitios vecinos por sector para no afectar la movilidad de un usuario cuando se desplaza de una celda a

otra, como por ejemplo una llamada en el carro o cuando va caminando, entre otros. Como se ha visto, existen varios tipos de *handovers* entre sitios pero se enfocará en el HO inter frecuencia ya que se está trabajando sobre la tecnología 3G. Cuando un sector no tiene entre su listado otro sector vecino, ocasiona una degradación en el Ec/No porque regularmente arrastra la llamada obteniendo peores valores entre más se aleja del sector que ya no le debiera dar servicio.

Esto produce o ya sea un *drop call* o caída de la llamada u una distorsión robotizada de la voz por lo que ocasiona un mal servicio de voz.

Figura 88. Detección mediante DT

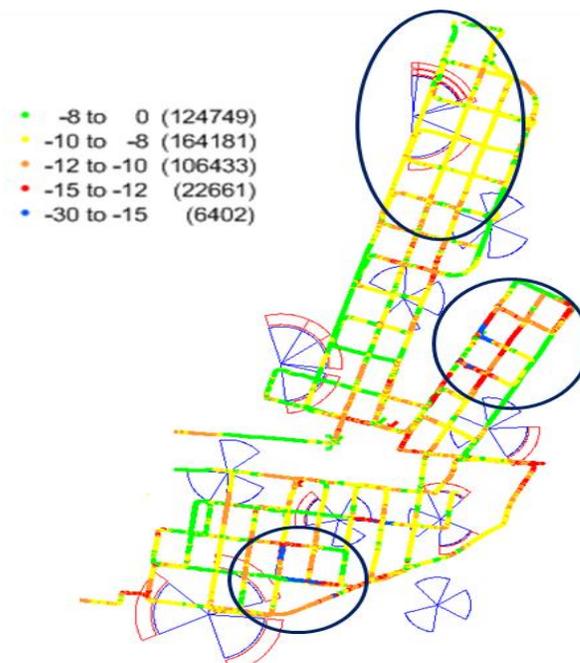


Fuente: elaboración propia.

Cuando se realiza un DT, se puede visualizar mediante la herramienta las vecinas que no están declaradas. En el clúster de trabajo, se pueden observar 4

celdas: SECTORVD1, SECTORVE2, SECTORVA2 y SECTORVD1. Durante el recorrido cuando el móvil se desplaza entre las celdas, en su *ACTIVE SET* están las celdas que le están dando servicio en el momento pero se puede observar que los niveles de Ec/No son malos como para lograr una buena calidad de llamada. El móvil pudo haberse enganchado a cualquiera de las 4 celdas en verde con mejores niveles, pero como los otros sectores no tienen dentro de su listado a esas 4 celdas; la móvil jamás logrará acampar con un sector que le ofrece mejores niveles y, por consiguiente, arrastrando esa mala calidad hasta producir un *drop call*.

Figura 89. **Degradación del Ec/No, clúster OV**



Fuente: elaboración propia.

4.4.3. Etapa 3: diseño de Ingeniería de OPT

Después de verificar en la anterior etapa a nivel estadístico o mediante una predicción el status actual de los clústeres a trabajar, se procede con la etapa de diseño de la ingeniería de OPT y se visualizarán las mejoras obtenidas a nivel de la herramienta de predicción. Se hará una simbiosis entre la herramienta de predicción y la herramienta de planificación celular automática para realizar lo que se requiere.

4.4.3.1. Diseño OPT clúster OC

Como se vio anteriormente los objetivos (*Ec/No*, *RSCP* y *pilot pollution*) de este clúster estaban relativamente bien a excepción del *pilot pollution* en la que se ve realizar una mejora en el performance de los sitios. A nivel de DT si se observan puntos en los que se puedan mejorar en los KPIs como por ejemplo una mejor distribución de cobertura por sector reduciendo el *overshooting* mejorando los niveles de *Ec/No* y, por consiguiente, la calidad de las llamadas o los niveles de *throughput*, también se ve la posibilidad de mejorar los niveles de cobertura.

Después de realizar la predicción, se debe cargar los parámetros de los sitios del clister, en el PCA para realizar el diseño de optimización pertinente. La valoración y peso de los parámetros es muy importante:

Figura 90. Objetivos en PCA

The figure displays three screenshots of the PCA optimization interface, each showing a different target configuration. Each screenshot includes a table on the left with columns for 'Weight' and 'Target name / Network', and a configuration panel on the right.

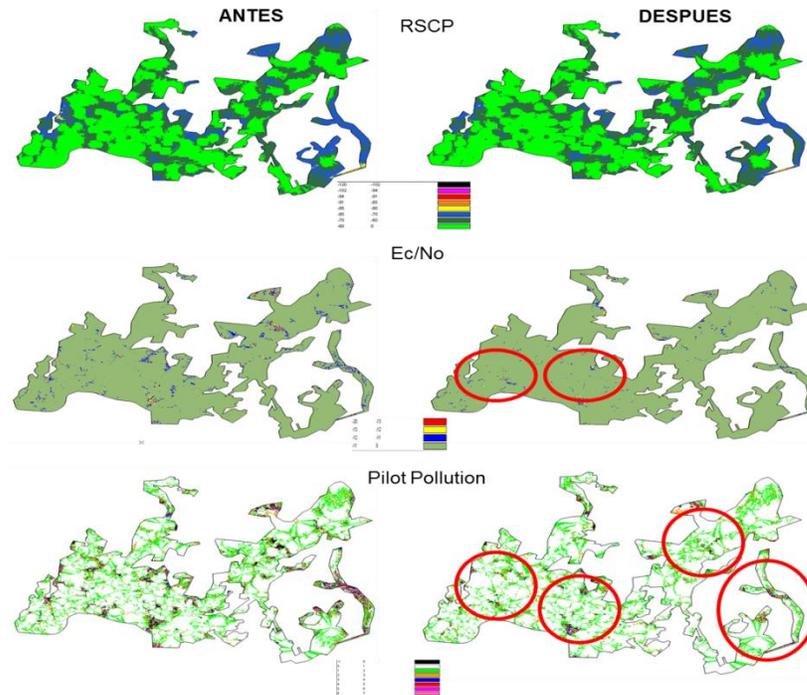
- Top Screenshot:** Target: Coverage. Requirement: Rx Pldr = -80 dBm. Weight = 15.
- Middle Screenshot:** Target: 1st-Nth Server. Requirement: 1st-Nth Server = 5 dB. Weight = 25.
- Bottom Screenshot:** Target: Echo. Requirement: Echo = -9 dB. Weight = 35.

Fuente: elaboración propia.

En la herramienta de optimización celular automática capesso, es muy importante setear estos valores de una manera eficiente y analítica. El pensamiento como ingeniero de optimización de RF es importante porque hay que tener en cuenta que estos 3 objetivos mantienen en buena forma el funcionamiento ideal de un clúster. Por ejemplo, un valor de -80 dBm de cobertura, asegura mantener ese valor lo mejor posible con los sitios que se tenga entregando la mejor configuración de parámetros de optimización de cada sitio. Querer cubrir más de la cuenta puede perjudicar ya que el PCA pueda entregar un sitio alto con alta carga con menos *tilt*.

Por esta razón es muy importante setear un valor mínimo de 5 dB de *pilot pollution* con un máximo de 4 sectores para evitar que sitios altos puedan cubrir más de la cuenta y no degradar el Ec/No que se verá mantener en -9 dB. Dependiendo del resultado que se quisiera, es muy importante jugar con estos valores pero con criterio. Luego se debe realizar un análisis mediante una predicción para evaluar los cambios entregados por sitio, ya que un PCA es una herramienta que no tiene inteligencia humana, por lo tanto, es fundamental revisar cada sitio.

Figura 91. Antes y después, simulación



Fuente: elaboración propia, empleado Teoco Enterprise.

Tabla XX. Estadísticas de predicción

ANTES					DESPUES				
RSCP	Urbano	Suburbano	Rural	Total	RSCP	Urbano	Suburbano	Rural	Total
Area (km ²)	5.02	2.65	22.80	30.48	Area (km ²)	5.02	2.65	22.80	30.48
>= -60 dBm	73.5%	53.5%	48.7%	58.9%	>= -60 dBm	74.2%	55.0%	49.3%	62.8%
>= -70 dBm	96.3%	89.9%	84.4%	88.9%	>= -70 dBm	97.4%	93.1%	88.4%	93.4%
>= -80 dBm	99.9%	100.0%	99.6%	99.8%	>= -80 dBm	100.0%	100.0%	99.8%	99.9%
>= -85 dBm	100.0%	100.0%	99.9%	100.0%	>= -85 dBm	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
>= -91 dBm	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	>= -91 dBm	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
>= -94 dBm	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	>= -94 dBm	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
>= -102 dBm	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	>= -102 dBm	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
>= -120 dBm	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	>= -120 dBm	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Ec/No	Urban	Suburban	Rural	Total	Ec/No	Urbano	Suburbano	Rural	Total
Area (km ²)	5.02	2.65	22.80	30.48	Area (km ²)	5.02	2.65	22.80	30.48
>= -11 dB	98.5%	98.7%	98.1%	98.2%	>= -11 dB	96.6%	96.9%	95.4%	96.3%
>= -12 dB	99.0%	99.7%	99.5%	99.5%	>= -12 dB	98.9%	99.2%	98.6%	99.2%
>= -13 dB	100.0%	100.0%	99.9%	99.9%	>= -13 dB	99.9%	99.9%	99.8%	99.8%
>= -20 dB	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	>= -20 dB	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Pilot Pollution 5dB	Urbano	Suburbano	Rural	Total	Pilot Pollution 5dB	Urbano	Suburbano	Rural	Total
arriba de 1 Servidora (>= 62.5%)	93.05%	91.21%	87.88%	89.02%	arriba de 1 Servidora (>= 62.5%)	95.12%	95.05%	92.93%	94.48%
>= 2 Servidoras (< 30%)	6.99%	8.93%	10.55%	11.10%	>= 2 Servidoras (< 30%)	4.89%	4.97%	6.35%	6.54%
>= 3 Servidoras (< 7.5%)	2.26%	3.14%	4.84%	4.27%	>= 3 Servidoras (< 7.5%)	1.09%	1.27%	2.00%	1.79%
>= 4 Servidoras (< 1%)	1.02%	1.40%	2.66%	1.82%	>= 4 Servidoras (< 1%)	0.20%	0.47%	0.75%	0.62%
>= 5 Servidoras	0.21%	0.70%	0.91%	0.78%	>= 5 Servidoras	0.06%	0.15%	0.25%	0.21%
>= 6 Servidoras	0.08%	0.30%	0.40%	0.34%	>= 6 Servidoras	0.02%	0.04%	0.09%	0.07%

Fuente: elaboración propia.

A nivel de simulación se ve una mejora en los 3 objetivos, después se verán mejor a nivel de DT como se mejora el clúster.

Tabla XXI. Ejemplo de Ingeniería de OPT

ID	NAME	ALTURA	CONFIGURACION ACTUAL				CONFIGURACION DE OPTIMIZACION			
			tilt m.	azimuth	tilt e.	pattern	tilt m.	azimuth	tilt e.	pattern
SECTOR_1A	SITIO A	16	0	15	10	C-BXA-80065-4-M	0	15	11	C-BXA-80065-4-M\C-BXA-80065-4-M-T11
SECTOR_2A	SITIO A	16	0	145	15	C-BXA-80065-4-M	0	145	15	C-BXA-80065-4-M\C-BXA-80065-4-M-T15
SECTOR_3A	SITIO A	16	0	275	3	C-BXA-80065-4-M	0	275	3	C-BXA-80065-4-M\C-BXA-80065-4-M-T03
SECTOR_1B	SITIO B	12	0	100	15	LBX-6513DS-VTM	0	100	15	LBX-6513DS-VTM\LBX-6513DS-VTM_T15
SECTOR_2B	SITIO B	12	0	195	12	LBX-6513DS-VTM	0	195	13	LBX-6513DS-VTM\LBX-6513DS-VTM_T13
SECTOR_3B	SITIO B	12	0	295	15	LBX-6513DS-VTM	0	325	6	LBX-6513DS-VTM\LBX-6513DS-VTM_T06
SECTOR_1C	SITIO C	12	0	30	2	LBX-6513DS-VTM	0	30	2	LBX-6513DS-VTM\LBX-6513DS-VTM_T02
SECTOR_2C	SITIO C	12	0	145	6	LBX-6513DS-VTM	0	130	3	LBX-6513DS-VTM\LBX-6513DS-VTM_T03
SECTOR_3C	SITIO C	12	0	240	15	LBX-6513DS-VTM	0	240	15	LBX-6513DS-VTM\LBX-6513DS-VTM_T15
SECTOR_1D	SITIO D	21	0	65	7	854DG70VTRSX	2	65	7	854DG70VTRSX\854DG70VTRSX_T07
SECTOR_2D	SITIO D	21	0	185	14	854DG70VTRSX	2	185	14	854DG70VTRSX\854DG70VTRSX_T14
SECTOR_3D	SITIO D	21	0	305	14	854DG70VTRSX	0	305	14	854DG70VTRSX\854DG70VTRSX_T14
SECTOR_1E	SITIO E	11	0	320	11	LBX-6513DS-VTM	0	335	13	LBX-6513DS-VTM\LBX-6513DS-VTM_T13
SECTOR_2E	SITIO E	11	0	185	7	LBX-6513DS-VTM	0	145	12	LBX-6513DS-VTM\LBX-6513DS-VTM_T12
SECTOR_3E	SITIO E	11	0	245	15	LBX-6513DS-VTM	0	230	6	LBX-6513DS-VTM\LBX-6513DS-VTM_T06

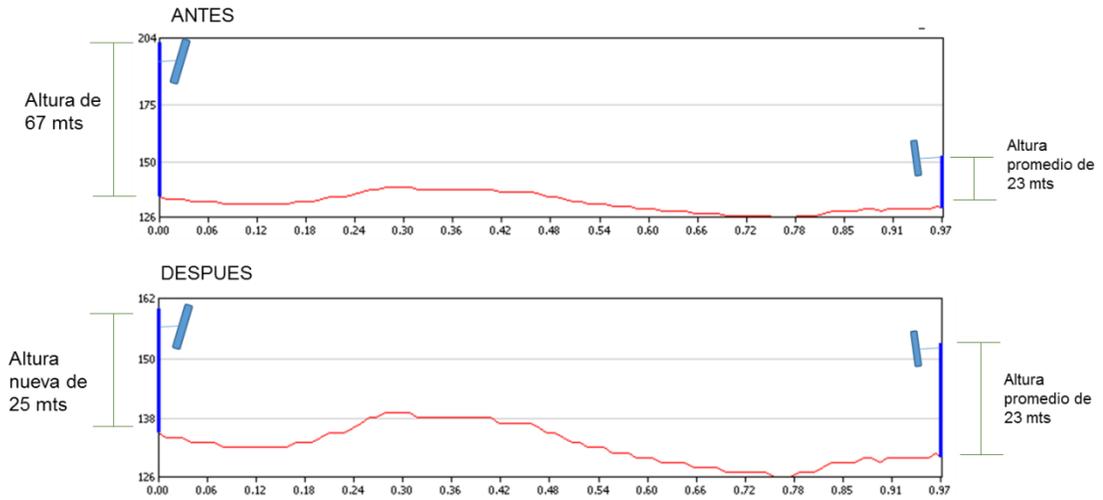
Fuente: elaboración propia.

El ejemplo de la ingeniería es parte de los sitios a optimizar que en este caso el clúster consta de 78 radiobases a optimizar.

4.4.3.2. Diseño de OPT por reducción de altura

En este caso es muy importante 2 cosas: reducir el sitio alto de tal manera que su altura quede balanceada con sus sitios vecinos y posteriormente realizar una ingeniería de optimización para balancear el tráfico entre todas las celdas con el fin de que la carga del sitio alto sea compartido entre los demás sitios; que se pudieron observar en el DT, existen poca o nulas muestras.

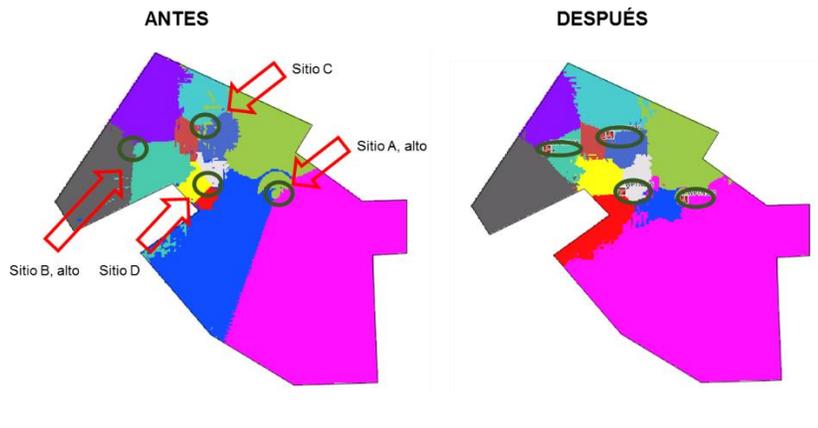
Figura 92. **Balanceo de alturas**



Fuente: elaboración propia.

Este clúster cuenta con 4 sitios, de los cuales 2 se presentan con problemas de alturas demasiadas y los demás tienen un promedio de 23 a 24 mts de altura. La decisión correcta de la nueva altura se realiza mediante el análisis de predicción tratando la manera como hemos dicho, de balancear la altura entre todos los sitios y controlando de mejor forma con *tilt* dependiendo el terreno.

Figura 93. **Análisis de predicción, coberturas**



Fuente: elaboración propia, empleado Teoco Enterprise.

Después de tomar la decisión de la altura correcta, se debe realizar una optimización mediante la herramienta PCA para balancear cada celda y obtener mejores valores de *throughput* y calidad de voz en la accesibilidad de las celdas. Es importante mantener o mejorar los objetivos de optimización en la herramienta a pesar de las reducciones, para evitar pérdidas de coberturas significativas, claramente se ve que es una razón más para optimizar los demás sitios.

Tabla XXII. **Objetivos de optimización**

ANTES					DESPUÉS				
RSCP (All)	Urban	Suburban	Rural		RSCP (All)	Urban	Suburban	Rural	
	u	s	r	c		u	s	r	c
Area (km ²)	0.08	0.62	4.72		Area (km ²)	0.08	0.62	4.72	
>= -60 dBm	47.2%	65.5%	39.2%		>= -60 dBm	44.1%	48.7%	31.6%	
>= -70 dBm	98.6%	88.6%	70.7%		>= -70 dBm	97.1%	85.2%	76.8%	
>= -80 dBm	100.0%	99.4%	99.0%		>= -80 dBm	100.0%	99.3%	99.2%	
>= -85 dBm	100.0%	100.0%	100.0%		>= -85 dBm	100.0%	100.0%	100.0%	
>= -91 dBm	100.0%	100.0%	100.0%		>= -91 dBm	100.0%	100.0%	100.0%	
>= -94 dBm	100.0%	100.0%	100.0%		>= -94 dBm	100.0%	100.0%	100.0%	
>= -102 dBm	100.0%	100.0%	100.0%		>= -102 dBm	100.0%	100.0%	100.0%	
>= -120 dBm	100.0%	100.0%	100.0%		>= -120 dBm	100.0%	100.0%	100.0%	
Eclo	Urban	Suburban	Rural	Total	Eclo	Urban	Suburban	Rural	Total
Area (km ²)	0.08	0.62	4.72	5.42	Area (km ²)	0.08	0.62	4.72	5.42
>= -11 dB	100.0%	98.8%	99.6%	99.5%	>= -11 dB	99.9%	99.4%	99.6%	99.6%
>= -12 dB	100.0%	99.6%	99.9%	99.8%	>= -12 dB	100.0%	99.8%	99.9%	99.9%
>= -13 dB	100.0%	99.9%	100.0%	100.0%	>= -13 dB	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
>= -20 dB	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	>= -20 dB	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Pilot Pollution 5dB	Urban	Suburban	Rural	Total	Pilot Pollution 5dB	Urban	Suburban	Rural	Total
up to 1 Servers (>= 62.5%)	99.61%	98.25%	98.54%	98.52%	up to 1 Servers (>= 62.5%)	#####	98.46%	99.07%	99.01%
>= 2 Servers (< 30%)	0.39%	1.75%	1.59%	1.48%	>= 2 Servers (< 30%)	0.00%	1.54%	0.90%	0.99%
>= 3 Servers (< 7.5%)	0.00%	0.26%	0.13%	0.14%	>= 3 Servers (< 7.5%)	0.00%	0.03%	0.07%	0.06%
>= 4 Servers (< 1%)	0.00%	0.05%	0.05%	0.05%	>= 4 Servers (< 1%)	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%
>= 5 Servers	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	>= 5 Servers	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
>= 6 Servers	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	>= 6 Servers	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Fuente: elaboración propia.

4.4.3.3. **Diseño de OPT de vecinas**

En el diseño de una Ingeniería de OPT por vecindades, conlleva analizar con base en resultados del *drive test* previo, los mensajes de vecinas no declaradas. Como hemos visto, el móvil puede detectar una celda con mejores niveles de señal pero no se logra conectar dado de que la celda que le está dando servicio en ese momento no contiene a la otra celda para realizar el *handover* entre vecinas. Esto perjudica a nivel de voz más que todo, porque el móvil arrastra la llamada con la celda servidora hasta que logra engancharse con otra celda que si está contenida en el listado de la celda servidora.

Regularmente presenta una degradación del Ec/No, esto ocasiona una caída de llamada o distorsión en la voz. Como primer paso es analizar que

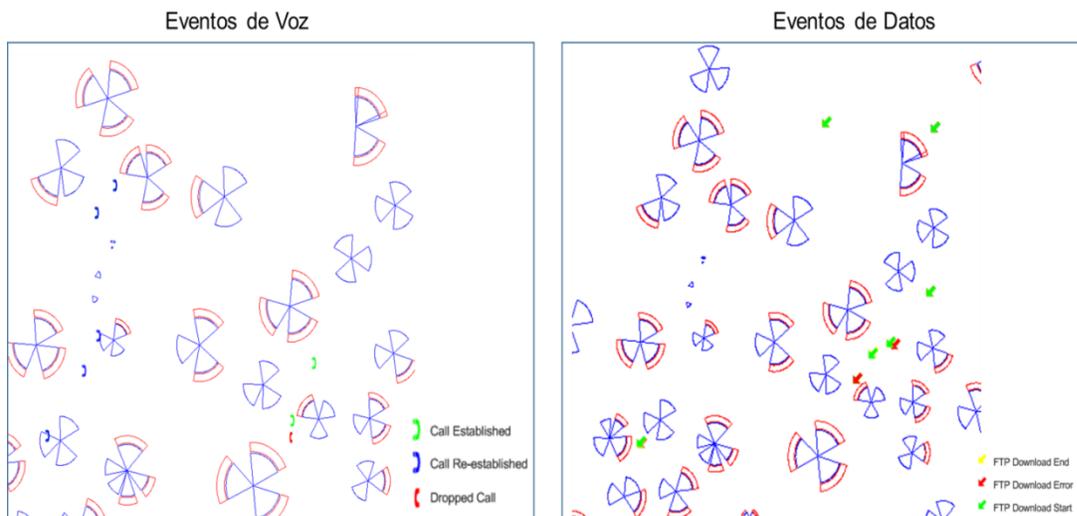
celdas no está contenida dentro del listado de la vecina, aunque ojo en las 2 celdas vecinas deben declararse ya que es bidireccional el análisis.

Tabla XXIII. **Declaración de vecinas faltantes**

ID	CELLID	NAME	CELLID
SECTOR_2F	0011	SECTOR3G	1122
SECTOR_2H	2233	SECTOR_2I	3344
SECTOR_2JX	5566	SECTOR_2KY	6677
SECTOR_3LZ	7788	SECTOR_3JZ	8899
SECTOR_3J	9910	SECTOR_3L	1011
SECTOR_3M	1112	SECTOR_1N	1213
SECTOR_2OY	1314	SECTOR_3P	1415

Fuente: elaboración propia.

Figura 94. **Eventos por servicio**



Fuente: elaboración propia, empleado Teoco Enterprise.

Como se puede observar en la gráfica anterior, se tiene eventos negativos como llamadas caídas o error de descargas de datos y esto lo ocasionan los malos niveles de Ec/No porque no existen las vecinas que debieran estar para no permitir esto. Analizando los resultados arrojados por el DT, existen ciertas relaciones no existentes que se agregarán para evitar este tipo de problemas ya que los sectores están dentro del primer anillo de vecinas una de la otra; por lo tanto, el móvil si detecta la celda con mejores niveles pero no se engancha ya que la celda que le sirve en ese rato no la suelta por no estar dentro del listado de la otra. A nivel lógico se debe correr la siguiente línea de comando para agregar las vecinas faltantes:

Figura 95. **Líneas para agregar vecinas**

ADD UINTRAFREQNCELL:CELLID=0011,NCELLID=1122,SIB11IND=TRUE,SIB12IND=FALSE,TPENALTYHCSRESELECT=D0,NPRIOFLAG=FALSE;
ADD UINTRAFREQNCELL:CELLID=2233,NCELLID=3344,SIB11IND=TRUE,SIB12IND=FALSE,TPENALTYHCSRESELECT=D0,NPRIOFLAG=FALSE;
ADD UINTRAFREQNCELL:CELLID=5566,NCELLID=6677,SIB11IND=TRUE,SIB12IND=FALSE,TPENALTYHCSRESELECT=D0,NPRIOFLAG=FALSE;
ADD UINTRAFREQNCELL:CELLID=7788,NCELLID=8899,SIB11IND=TRUE,SIB12IND=FALSE,TPENALTYHCSRESELECT=D0,NPRIOFLAG=FALSE;
ADD UINTRAFREQNCELL:CELLID=9910,NCELLID=1011,SIB11IND=TRUE,SIB12IND=FALSE,TPENALTYHCSRESELECT=D0,NPRIOFLAG=FALSE;
ADD UINTRAFREQNCELL:CELLID=1113,NCELLID=1213,SIB11IND=TRUE,SIB12IND=FALSE,TPENALTYHCSRESELECT=D0,NPRIOFLAG=FALSE;
ADD UINTRAFREQNCELL:CELLID=1314,NCELLID=1415,SIB11IND=TRUE,SIB12IND=FALSE,TPENALTYHCSRESELECT=D0,NPRIOFLAG=FALSE;

Fuente: elaboración propia.

Como recomendaciones finales hay que tener 2 cosas importantes: el listado de vecinas por sector no deberá exceder de 32 vecinas de lo contrario será necesario remover algunas que no sean necesarias ya que por distancia ya no debieran aplicar; la otra es que media vez se declare las 2 vecinas será bidireccional siempre.

4.4.4. Etapa 4: implementación

La implementación es la realización física de los cambios propuestos en la red a fin de aplicarlos. En la OPT de clúster es importante contar con equipos de campo que sepan de torres y como aplicar los cambios en la antenas físicamente. En la OPT de reducción de altura es importante también contar con equipos de obra civil y *rollout* para realizar los movimientos de cambio de altura, ya que esto implica desconectar las fibras y dejar fuera de servicio al sector el tiempo necesario para realizar los trabajos. En la OPT de vecindades no implica mayor trabajo ya que se pueden correr *scripts* mediante la herramienta de monitoreo U2000 y enviar los comandos remotamente a las celdas implicadas.

El tiempo es muy importante y crucial, ya que entre más rápido y eficiente sean los movimientos de los equipos mejores resultados a corto plazo se tendrán ya que se realizarán movimientos en vivo. Por esta razón es vital con un análisis de cuantos movimientos diarios podría realizar un equipo de campo, análisis del tiempo estimado de la realización de un DT y sacar un plan del tiempo estipulado a realizar y cumplir cada etapa.

Tabla XXIV. **Tiempo aproximado de movimientos**

Descripción	Cantidad sitios	Grupos de campo	Movimientos por día
Clúster OC (OPT clúster)	78	1	16
Clúster ORA (OPT reducción altura)	4	1	1
Clúster OV (OPT vecinas)	9	1	N/A

Fuente: elaboración propia.

Con estos datos ya se podría sacar un tiempo aproximado de trabajo por clúster, un *time plan*. Es muy importante que los DT previos y post sean los mismos equipos de medición para tener una comparación más aproximada de los resultados, dependiendo del recurso humano, se puede trabajar cada clúster con 3 grupos independientes; cada grupo deberá ser conformado por un torrero o piloto y un ingeniero de DT, la función del torrero es subirse a realizar las auditorías y cambios propuestos por cada sitio. El ingeniero de campo deberá tener las capacidades técnicas de optimización y de *drive test*.

Tabla XXV. **Timeplan de clústeres**

Clúster	W01	W02	W03	W04	W05	W06	W07	W08
OC	DT Inicial		Movimientos		DT Final		Análisis final	
ORA	DT inicial	Reducción y movimientos		DT final	Análisis final			
OV	DT inicial	OPT vecinas	DT final	Análisis final				

Fuente: elaboración propia.

Es muy importante durante la implementación de los movimientos, realizar monitoreos estadísticos en tiempo real por cada sector de cada sitio después de cada movimiento para observar el comportamiento del mismo ante los cambios propuestos. No es lo mismo realizar una optimización en la herramienta de predicción a realizarlo en condiciones reales, ya que el comportamiento del tráfico es tan impredecible que es mejor estar preparados ante cualquier eventualidad y prevenir algún tipo de falla.

4.4.5. **Etapas 5: presentación de resultados**

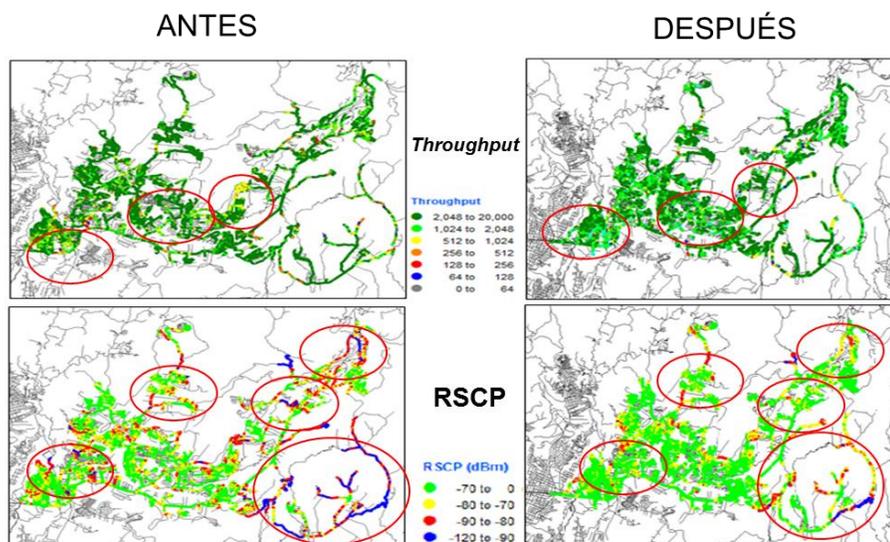
Es la etapa final de todo el proceso de desarrollo de los diferentes escenarios de optimización que se estudiaron. En esta etapa final, se estarán

presentando las mejoras obtenidas de los procesos de optimización desde los movimientos hasta las reducciones de altura y mejoras en las vecinas. Desde el nivel de DT, análisis estadístico toda la documentación pertinente que ayude a demostrar la mejora que se obtuvo de los planes de optimización que se genera en cada caso. A continuación se discutirá y analizara que se obtuvo.

4.4.5.1. Análisis resultados OPT clúster

Se evaluará a todos los niveles de los resultados entregados por la optimización del clúster. Después de realizar toda la logística que implica la generación de órdenes de ingreso para los sitios y su posterior optimización, es muy importante tener siempre a la mano un cuadro con una auditoría de cómo se encontró el sitio y cómo se dejó con los valores de optimización. Ahora se evaluarán los diferentes resultados obtenidos.

Figura 96. Resultados de DT clúster OC

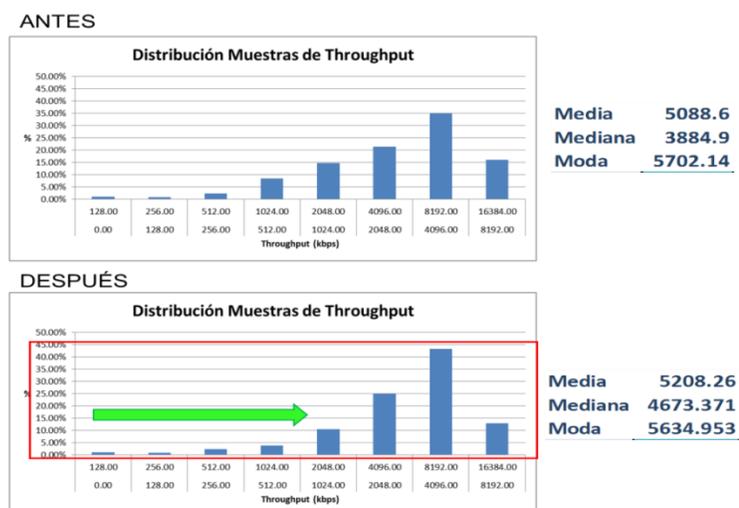


Fuente: elaboración propia, empleado Teoco Enterprise.

¿Qué se puede observar en estas 2 graficas? En el caso del RSCP se puede ver que existe una mejora considerable en los niveles de las muestras realizadas en el después, ya que es posible que los movimientos hayan permitido girar sectores o quitar *tilt* de tal manera que cubran esos lugares que antes no lograban cubrir. Otro punto importante es que hasta se puede evaluar la posibilidad de poder ahorrar sitios por cobertura, esa parte es muy importante en la optimización ya que se debe evaluar que se podría mejorar si necesidad de invertir más con lo que se tiene actualmente.

El *throughput* es otro factor importante porque se logra una mejora importante en este objetivo, esto se debe en gran medida porque los niveles de Ec/No mejoraron ya que se tiene una mejor distribución de las coberturas de cada sitio reduciendo en gran medida el *pilot pollution* en algunas zonas, permitiendo en gran medida hasta 4 portadoras para evitar que el móvil se mueva por muchas celdas en modo activo.

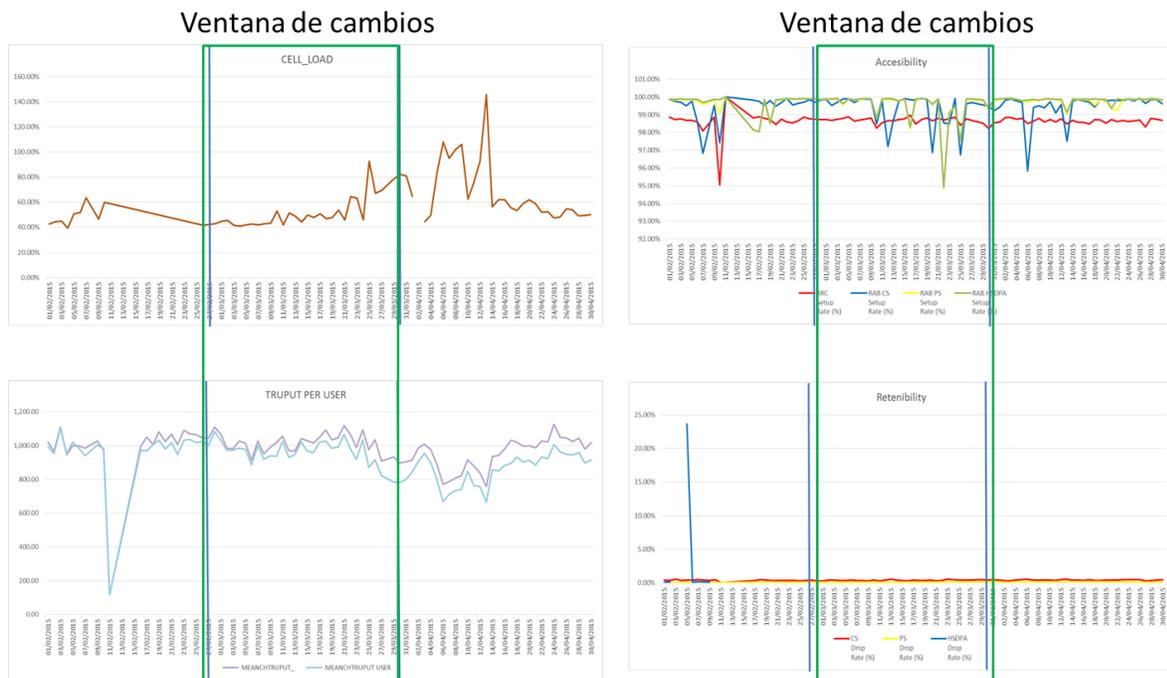
Figura 97. **Distribución estadística de las muestras**



Fuente: elaboración propia.

Es muy importante evaluar como las muestras se mueven estadísticamente para saber si van hacia la dirección correcta. Se ve que la media de *throughput* es de casi 200 kbps más que como estaba antes; es decir, que el usuario promedio logrará percibir este aumento y los nuevos usuarios experimentarán los 5.208 Mbps que antes no lograban ya que no tenían cobertura. La única diferencia es que este aumento de nuevos usuarios pueda impactar en la capacidad de los sitios, por lo que el siguiente paso es verificar los sitios para implementar acciones para soportar el nuevo tráfico con estos valores.

Figura 98. KPIs clúster OC



Fuente: elaboración propia.

El incremento del *cell load* se debe a que como se gana cobertura, regularmente se aumenta de manera global ya que los sitios que tenían poco tráfico tienden a aumentar su capacidad de usuarios. El *throughput* por usuario promedio reflejado en la estadística, es un poco más impredecible porque depende de la cantidad de usuarios que estén en el clúster, regularmente las ciudades o zonas de la capital son de paso para muchas personas por lo que a veces puede haber una baja ya sea porque ahora se tiene más cobertura y se le ofrece servicios a más usuarios.

Por esta razón, los recursos de radio los sitios (potencia, códigos, asignación de canales, etc.) tienden a bajar por lo que es fundamental después de un proceso de optimización tener un plan de acciones de capacidad tales como 4tos sectores, segundas o terceras portadores, sitios nuevos, etc. Lo que se está haciendo es estimular el tráfico de la red para ganar más usuarios y mejorar las deficiencias presentadas a nivel de: RSCP, Ec/No o *pilot pollution* para entregar una mejor experiencia de usuario.

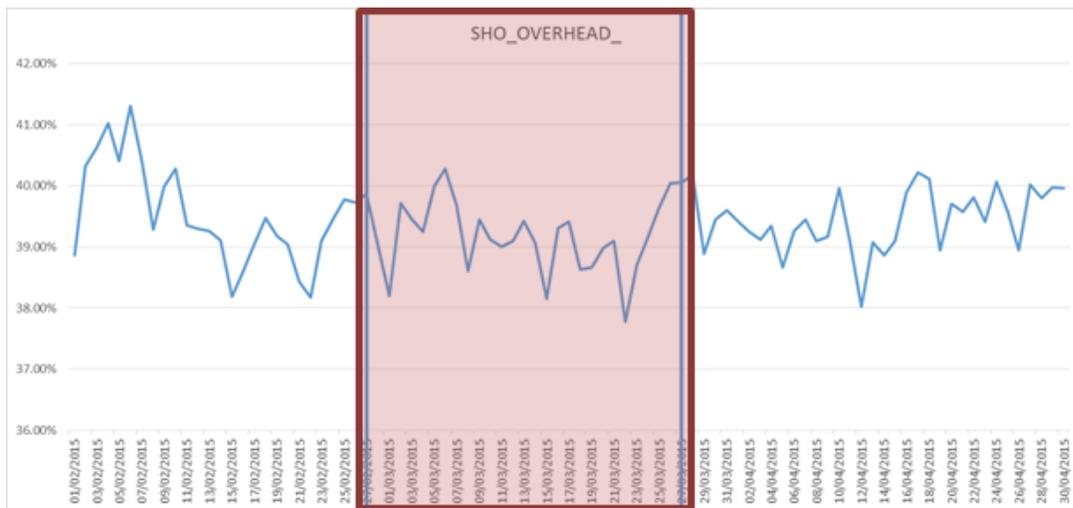
Como se ha visto la accesibilidad es la cantidad de establecimientos exitosos en la capa RAB o RRC, es la capacidad del UE de lograr acceder a una red UMTS. Este KPI es importante medirlo en la etapa de optimización porque indica si se tiene un buen control de congestión durante la optimización y se está balanceando bien las cargas de los sitios. Como se puede apreciar, la gráfica después de la ventana de movimientos se estabiliza la accesibilidad porque ya cada sitio tiene definida su cobertura y, por lo tanto, es de gran ayuda mantener o mejorar la accesibilidad.

La retenibilidad es otro KPI fundamental, recordarse que este mide cuando un usuario ya logra establecer el servicio deseado mantenerlo hasta que el decida córtalo. Se mide por la cantidad de eventos completados exitosamente,

como se puede observar en la gráfica en todo momento se logró mantener debajo del objetivo del 1 %.

Existe otro KPI fundamental en todo proceso de optimización es el *soft HO overhead*. Recuérdese que lo que mide es la cantidad de vecinas que detecta el UE durante el *active set*, el problema radica cuando se tienen más de 4 posibles servidoras en un punto y lo que provoca es que los recursos del móvil se vean reducidos ya que debe enviar la información correspondiente de solicitud de acceso a la red UMTS al menos en modo idle.

Figura 99. SHOO clúster OC



Fuente: elaboración propia.

Gráficamente se puede observar una mejora sustancial a nivel de *pilot pollution*, ya que redujo en al menos 1 % del total del SHO producido en la zona mejorando la experiencia del usuario y aumentando la vida de la batería del móvil utilizando de mejor manera los recursos.

Tabla XXVI. **Ganancias antes-después**

GANANCIA EN THROUGHPUT (%)	GANANCIA EN RSCP (%)	GANANCIA EN EcNo (%)	GANANCIA DE ACTIVE USERS (%)
● 2.30%	● 11.56%	● 2.74%	● 21.24%

Fuente: elaboración propia.

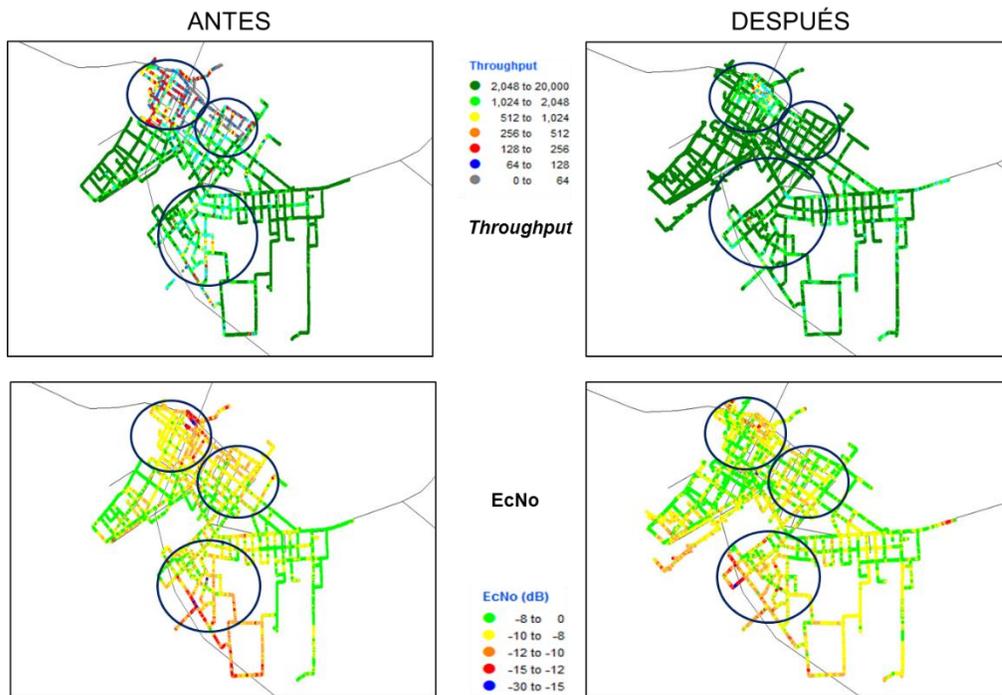
Como consideraciones finales se puede decir lo siguiente:

- Se tuvo una mejora sustancial en el *throughput*, es decir, por cada 1 Mbps se gana 230 kbps, aunque no sea mucho puede ayudar en los momentos de mayor capacidad para entregarle al usuario ese extra que antes no tenían.
- A nivel RSCP si se ve una mejora considerable, ya que ahora se cubre donde antes no se tenía cobertura o con malos niveles de señal, adicional a esto se ve una ganancia en usuarios activos; estos 2 parámetros vienen de la mano porque si se mejora la cobertura se gana más usuarios; otro punto importante es que al mejorar cobertura se ahorran más sitios y esto constituye un ahorro significativo económicamente.
- El Ec/No a pesar de ser un KPI muy impredecible ya que como se sabe es la medición de ruido en los canales de comunicación, se tiene una mejora sustancial ya que se logra mejorar el *pilot pollution* y de esta manera se mejora mucho el ruido que generan las propias celdas en una zona dada.

4.4.5.2. Análisis de resultados OPT reducción altura

Después de realizar la etapa de implementación que en este caso acarrea trabajos de obra civil por el tema de colocar nuevos soportes en las nuevas alturas para las antenas, así como también los cambios sugeridos en el diseño de la optimización para realizar el reajuste del clúster y que los sitios convivan entre ellos. Se va analizarán los resultados arrojados después de este proceso tanto a nivel de DT como a nivel estadístico.

Figura 100. DT resultados de clúster ORA



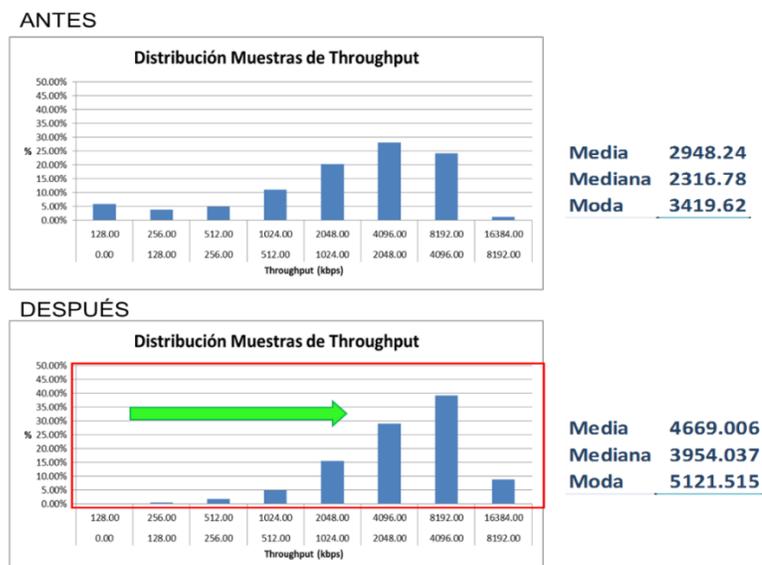
Fuente: elaboración propia, empleado Teoco Enterprise.

Se iniciará el análisis de la gráfica del *throughput*, se puede observar que se tiene una mejora en los niveles de descarga; el problema radicaba que los

sitios altos acaparaban hasta el centro del clúster sobrepasando los sitios pequeños que no tenían mucha cobertura y, por consiguiente, una baja de usuarios por sector; en cambio los sectores del sitio alto presentaba una alta congestión y entregaba un bajo *throughput* a los usuarios que a pesar de estar cerca de otros sitios se conectaban al sector porque llegaba con mejores niveles de señal.

En la gráfica del Ec/No la mejora es considerable y por la siguiente razón: al reducir altura y optimizar los sitios aledaños, se obtuvo una mejor distribución de *best server* por sector y, por lo tanto, se redujo el *pilot pollution* que ocasionaba los sitios altos ya que la potencia se redujo considerablemente con la reducción de altura y esto conlleva a que los usuarios perciban una mejor calidad de los servicios tanto de voz como de datos aumentando la velocidad de descarga mejorando las prestaciones de CQI y modulación por sector.

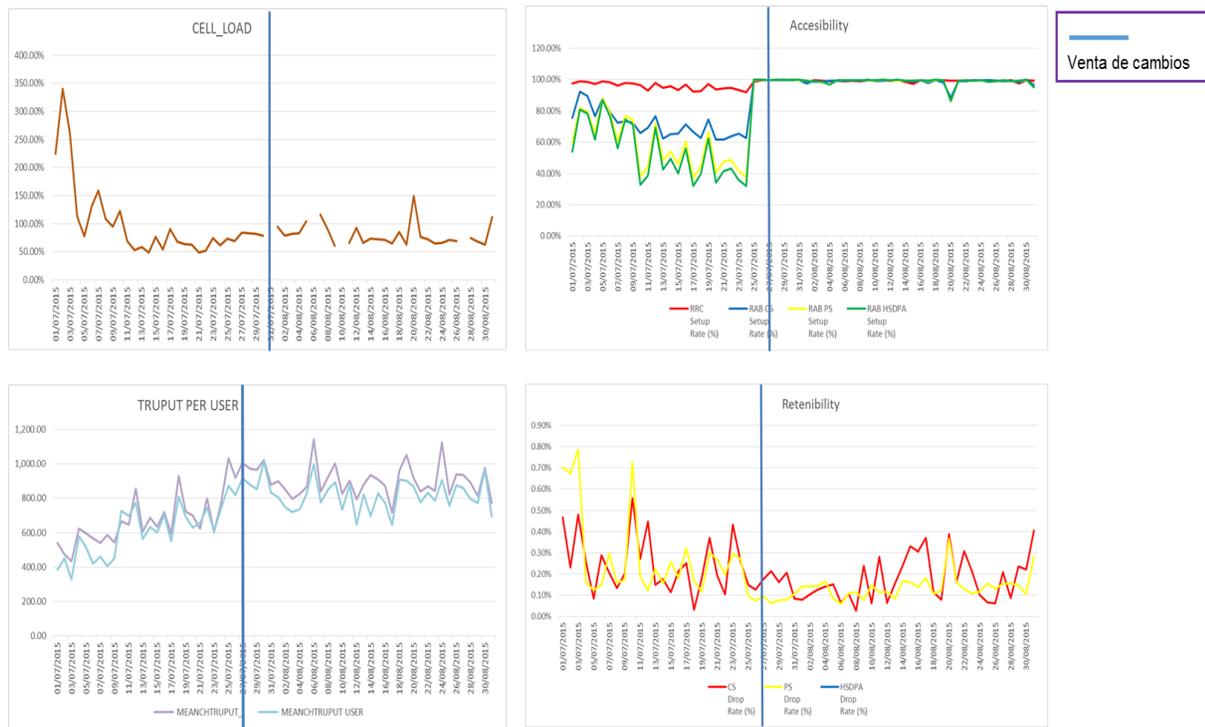
Figura 101. **Distribución de muestras *throughput* clúster ORA**



Fuente: elaboración propia.

Como se ve, las muestras que estaban entre 0-128kbps, 128-256kbps y 256-512kbps bajaron y se aumentaron las muestras después de 1024 kbps garantizando al usuario un promedio de 4.669 Mbps de *throughput* duplicando así el valor que se tenía antes de la optimización, navegando con una mejor calidad. A nivel estadístico con respecto a retenibilidad, accesibilidad, entre otros, se puede observar las siguientes mejoras:

Figura 102. KPIs clúster ORA



Fuente: elaboración propia.

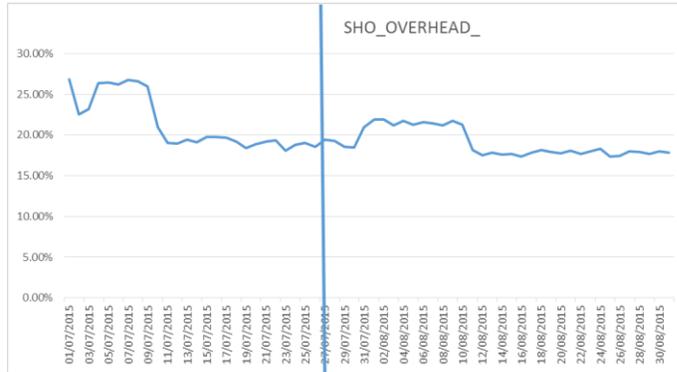
Como se puede observar como resultado antes y después de la optimización y reducción de altura, que la carga general del clúster bajó considerablemente de hasta una reducción del 70 %, claro está que las reducciones de altura se realizaron antes que los movimientos de optimización

para dejar de una mejor forma el *best server* de los sitios. Esto indica que hubo una mejor distribución de los usuarios aliviando la alta carga que tenían los sitios más altos, mejorando la experiencia del usuario como se puede observar en la gráfica de *throughput* por usuario que entrega una celda en promedio, de estar en 600 kbps hasta llegar arriba del 1 Mbps por sector.

Esto indica que al liberar usuarios y distribuirlos en otros sitios que tenían sectores ociosos, se podría decir que se estimuló la capacidad utilizando y distribuyendo mejor los recursos de la celda para entregarle una mejora en la navegación de internet o llamadas de voz. A nivel de accesibilidad se ve una mejora enorme, ya que la congestión bajo de los sitios; dando como resultado que los accesos ya sea por RAB y RRC fueran exitosos. A nivel de retenibilidad se ve un mejora leve pero es debido a que si bien es cierto la carga bajó, los servicios son los requeridos por los usuarios comunes del clúster que maneja una buena densidad.

Esto se debe a que como una celda debe atender a varios usuarios a la vez, retener un servicio es más difícil porque la celda debe utilizar recursos para saber cuándo otro usuario vaya soltar el servicio que está utilizando. Otro KPI importante es la medición del SHOO ya que de este depende bastante la mejora del EcNo.

Figura 103. SHOO clúster ORA



Fuente: elaboración propia.

Es muy importante evaluar este KPI, porque como bien se sabe indica el porcentaje del valor de las portadoras que puedan representarse en algún punto geográfico del clúster. Como valor normal se toma como el 30 %, y se ve una mejora de hasta una reducción del 20 %, se debe en parte a que como los sitios altos cubrían demasiado, producían *pilot pollution* y *overshooting* debido que su cobertura sobrepasaba en cierta medida a los sitios más pequeños vecinos. Esto ocasiona que el móvil tenga un efecto llamado ping pong, cuando en su *active set* detecta a más de 4 posibles servidoras ocasionando una degradación severa del EcNo produciendo malos niveles de *throughput* o *drop calls*.

Tabla XXVII. Ganancias antes-después, sitios altos

SITIO	BEFORE		AFTER		REDUCCION CELL LOAD %	GANANCIA MEANCH TRUPUT %
	CELL LOAD (%)	MEANCH TRUPUT (Kbps)	CELL LOAD (%)	MEANCH TRUPUT (Kbps)		
Sitio A	220	757	150	1125	46.67%	32.71%
Sitio B	69	2061	40	3000	72.50%	31.30%

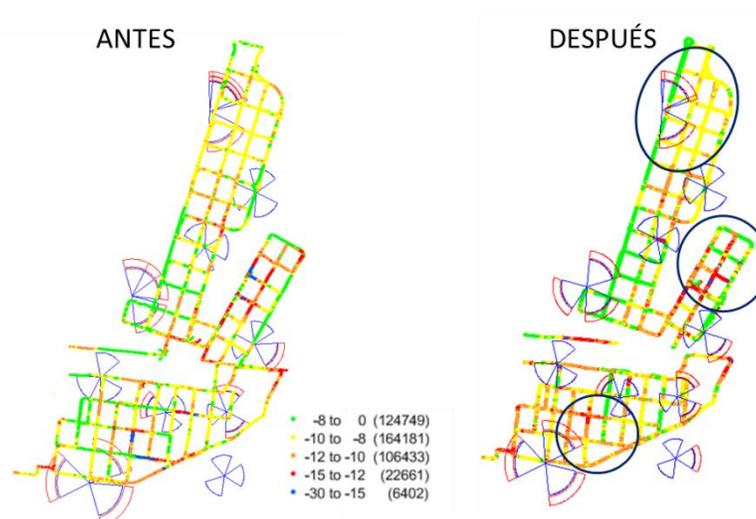
Fuente: elaboración propia.

Por último, haciendo un zoom a los sitios catalogados como *worst offender*, ya se puede dilucidar las mejoras por sitio.

4.4.5.3. Análisis de resultados OPT de vecinas

Como se vio en el diseño de las vecinas, existían ciertos sectores vecinos que no estaban contenidos mutuamente y esto resultaba en que los móviles que se conectaran a un sector, no hicieran el HO hacia un sector que debieran hacerlo; ocasionando un arrastre de llamada o sesión de datos desmejorando el Ec/No y provocando bajos niveles de *throughput* o un *drop call*.

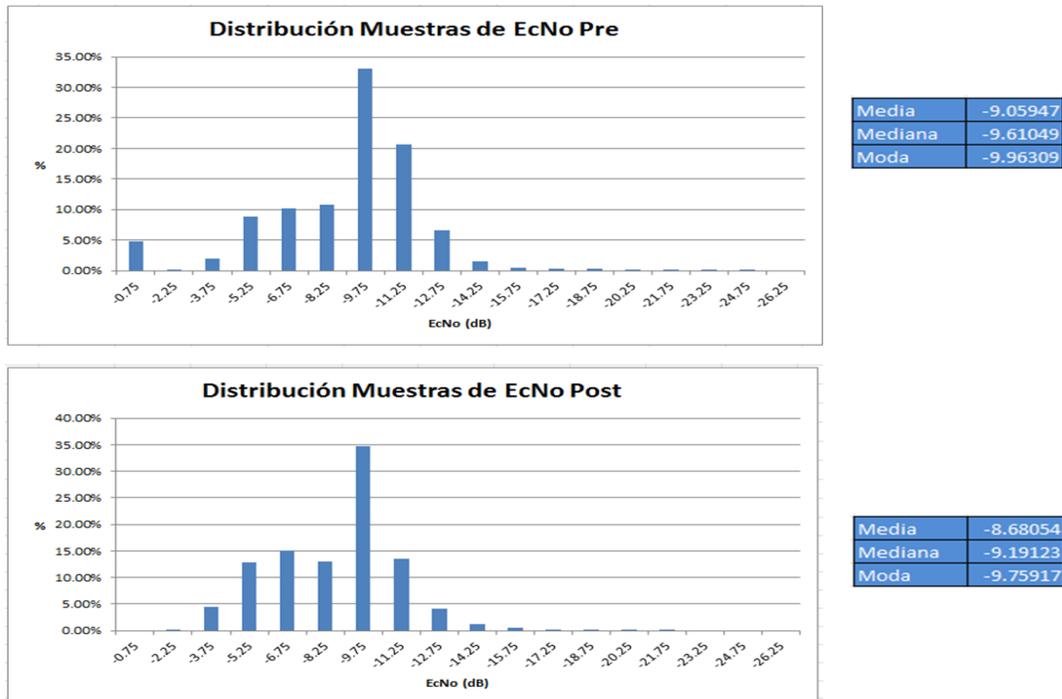
Figura 104. Mejoras del Ec/No



Fuente: elaboración propia, empleado Teoco Enterprise.

Como se ve, se observa una mejora en los niveles de Ec/No donde no había una buena optimización del listado de las vecinas. Los HO entre sectores se hacen de manera correcta mejorando los niveles de calidad, reduciendo los drops y mejorando la voz.

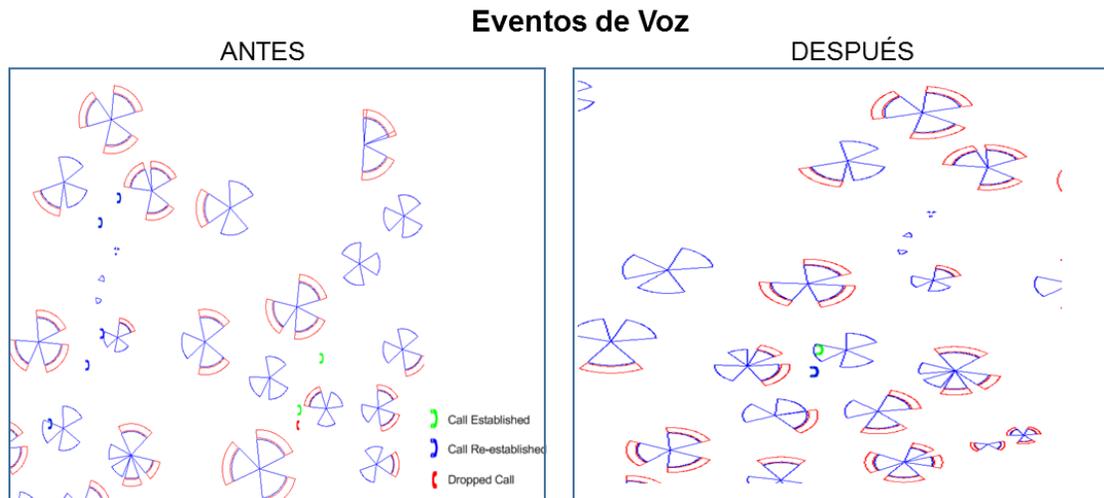
Figura 105. **Distribución de muestras de EcNo**



Fuente: elaboración propia.

Se ve como la distribución de las muestras se mueven hacia la izquierda que son los mejores valores de calidad ofrecidos. El hecho de reducir las muestras arriba de -14 dB es un hecho considerable porque se está en el umbral del objetivo necesario para ofrecer una mejor calidad de los servicios. A este nivel solo el hecho de optimizar el listado de vecinas de ciertas relaciones faltantes, nos impacta en la mejora del servicio deseado por el usuario; es decir, que los niveles de *drop calls* o una mala calidad en la voz se reducen significativamente mejorando el Ec/No que a nivel de RF es muy complicado mejorar porque como se ha visto, está amarrado a la carga de la red que es muy variante.

Figura 106. **Mejora de los eventos**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Ganancia en Ec/No**

Cluster	ANTES	DESPUES	GANANCIA EN EcNo (%)
	EcNo (dB)	EcNo (dB)	
OV	-9.05947	-8.68054	● 4.37%

Fuente: elaboración propia.

Esta ganancia es significativa a nivel de calidad porque como se ha visto se redujo los *drops* que hubo en el DT antes; es decir, que se gana un 4.37 % que representa alrededor de 0.4 dB de mejora por usuario conectado y eso ya representa una enorme ganancia, aunque se vea que fuera muy poco y es porque el móvil necesita 0.4 dB menos para poder escuchar con mejores niveles a una celda.

CONCLUSIONES

1. El estudio y análisis de las antenas en un sistema de telefonía móvil es de suma importancia ya que son estas las que transportan la energía de la onda para que las terminales móviles sepan a quien enviar o de quien recibir la información requerida para acceso a un red UMTS; las antenas también son las implicadas en la transformación de ondas eléctricas a ondas de aire y amplificarlas.
2. El paso evolutivo de un sistema de telefonía móvil, se va desarrollando conforme la demanda del usuario aumenta hacia el acceso a más tecnología. Empezando con las primeras generaciones de teléfonos, donde se podía tener acceso a llamadas solo de voz, luego se introdujo el SMS y por último con la tercera generación y su tecnología UMTS ya se podía llamar con mejor calidad y navegar a más velocidad. El comprender los conceptos entorno a esta tecnología es importante porque de aquí se desprenden los análisis técnicos necesarios para iniciar el diseño de una red UTRAN, cómo funcionan sus interfaces entre cada elemento.
3. El diseño de una red UMTS conlleva un proceso establecido que se compone de varias etapas como se ha visto. Iniciando con el *link budget* donde definimos los objetivos tanto de los servicios al usuario como los de RF (RSCP, E_c/N_o , etc.), la etapa de cobertura donde se diseña las ubicaciones ideales en base al *link Budget* para cubrir la mayor cantidad de área geográfica y por último la etapa de capacidad, donde se debe

desarrollar acciones para que la red pueda soportar el tráfico que haya adquirido una red.

4. Una de las etapas más cruciales, es cuando precisamente se alcanza ese grado de madurez y entran más sitios para cubrir la demanda de una carga de tráfico que va en aumento. Esto va amarrado con que también los problemas a nivel de RF aumentan: interferencias, congestión, problemas de capacidad, polución, mala calidad, entre otros. La etapa que ayuda en parte a minimizar estos problemas es la de optimización; es importante recalcar que el proceso de optimización es ajustar las configuraciones físicas o lógicas de los sitios (*tilt* eléctrico, mecánico, altura, potencia, vecindades o acimut) para mejorar algunos objetivos de diseño como E_c/N_0 , *throughput*, *pilot pollution*, RSCP.
5. Una herramienta de planificación celular automática es de gran utilidad porque ayuda a reducir tiempos y/o costos para implementar un diseño de optimización efectivo; claro sabiendo utilizar los objetivos de diseño y los parámetros de optimización de una celda.
6. La optimización se puede dividir en 3 grupos: optimización general de un clúster, reducción de altura acompañado de optimización y optimización de vecinas. En cualquiera de estos 3 se pueden obtener grandes resultados; en una optimización general se puede mejorar el RSCP que puede ahorrar un sitio, la reducción de altura es importante porque si bien ganar altura sirvió para la etapa de cobertura, para capacidad es contraproducente ya que ocasiona *pilot pollution* en alguna zona y *overshooting* pasando por encima de sitios más pequeños; se puede mejorar el E_c/N_0 y aliviar la carga “congestionando” controladamente a sitios más pequeños y ganar más tráfico mejorando el *throughput*. La

optimización de vecinas mejoró el Ec/No y reducción de eventos de *drop calls*.

RECOMENDACIONES

1. Dentro de la amplia gama de antenas es importante entender y analizar los parámetros que las rigen, para poder escoger un tipo de antena acorde a lo que se busque, es importante saber por ejemplo que entre más directiva es una antena menos ganancia tiene, etc.
2. El uso de los diferentes dispositivos como duplexores, acopladores o splitters deberá ser de uso controlado dependiendo las especificaciones que se necesiten. Por ejemplo, un acoplador servirá para conectar el sistema de radio con la antena, pero es importante tener en cuenta el acople de impedancias, ya que un mal ajuste puede provocar altos índices de VSWR, RTWP entre otros.
3. En la etapa de *link budget*, es importante conocer las especificaciones requeridas para entregar un servicio óptimo a los usuarios. Las posibles pérdidas que pueda sufrir la onda en el espacio, las especificaciones técnicas de la potencia de radiación, ganancias de los equipos radiantes y pérdidas del transmisor.
4. En cobertura, escoger un modelo de propagación es de suma importancia para realizar nuestros diseños de la red futura porque de este depende en gran medida de un buen desempeño de lo que se pretende cubrir a los usuarios. Es vital saber “tunear” un modelo para acercar la simulaciones realizadas lo más real posible; pérdidas o ganancias que sufrirá la onda cuando se desplace por el espacio.

5. Cuando se trate de la etapa de capacidad ya viene un análisis más específico; es decir, se deberá realizar un *forecast* a futuro para saber la carga de usuarios que deberá soportar la red y estar preparados para llegar a ese punto. A tener muy en cuenta que entre más usuarios, mayor interferencia y muy seguramente mayor degradación del Ec/No.
6. Las rutas para realizar los DT deberán ser acorde al clúster establecido, regularmente en una misma medición se debe tener equipo para las sesiones de voz y datos (UL y DL) y evitar horarios donde el tráfico sea menor, por ejemplo, en horas de la noche. Las validaciones nocturnas pueden ser cuando se hará una configuración global a nivel de RNC o clúster de sitios donde se verán afectados varios.
7. Para una optimización de un clúster, se debe trabajar con un grupo de sitios no mayor a 10 y la razón es porque se tiene mejor control sobre los cambios a efectuar y evitar posibles fallas. Con la herramienta PCA se debe tener mucho cuidado con los *tilts* eléctricos muy bajos para evitar posible traslape de coberturas de sectores porque se tiende a cubrir más. Con el *tilt* mecánico es recomendable utilizarlo como último recurso, por ejemplo, sitios muy altos, ya que usar un valor muy alto puede ocasionar pérdidas de coberturas por tal razón es mejor evaluar una reducción de altura.
8. Para la optimización de reducción de altura, es muy importante tener identificado al sitio con alta carga o con alta congestión debido a conexiones fallidas ya sea por RAB o RRC. El análisis tendrá que ser en conjunto con los demás sitios porque lo que se pretende es balancear el tráfico, regularmente cuando un sitio alto está en el borde de un clúster se bajan los sectores que estén apuntando dentro del

clúster; si algún sector está hacia afuera se deberá tener más cuidado porque se puede dejar sin cobertura algún poblado o carretera.

9. Para una optimización de vecindades es importante evaluar no solo con la herramienta de DT las posibles vecinas faltantes, si no a nivel lógico es bueno correr un comando en U2000 para revisar si efectivamente hacen falta alguna. Se debe saber que el listado de vecinas tiene un máximo de 32 por sector, por lo que mucho ojo con el proceso de optimización y analizar si es necesario quitar algunas que ya no proceden por distancia o que ya no corresponda al primer anillo de vecinas.
10. Para cualquier caso de optimización, es muy importante realizar una verificación diaria de KPIs antes, durante y después. Se realiza antes para tener un histórico de cómo se encontrará el clúster y poder compararlo con el después para analizar las mejoras obtenidas, durante porque así podemos evaluar la evolución del comportamiento de los cambios efectuados no solo al sitio implicado sino a sus vecinas.

BIBLIOGRAFÍA

1. BAILEY, David. *Practical Radio engineering and telemetry for industry*. Gran Bretaña: Newnes, 2003. 273 p.
2. BALANIS, Constantine. *Antenna theory analysis and design*. 3ra ed. Estados Unidos: Wiley-Interscience, 2005. 1099 p.
3. CARR, Joseph. *Practical antenna handbook*. 4ta ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 2001. 583 p.
4. _____. *Practical radio frequency test and measurement: a technician's handbook*. Estados Unidos: Newnes, 2002. 343 p.
5. CHEVALLIER, Christopher. *WCDMA (UMTS) DEPLOYMENT HANDBOOK*. Gran Bretaña: John Wiley and Sons, 2006. 369 p.
6. DELORME, Bruno. *Antennas and site engineering for mobile radio networks*. Estados Unidos: Artech House, 2013. 267 p. ISBN: 978-1-60807-703-8.
7. EHEDURU IHEANYI, Marcellinus. *Indoor radio measurement and planning for UMTS/HSPDA with antennas*". [tesis]. Universidad de Wiscosin-Milwaukee, Electrical and Electronics Commons, Estados Unidos, 2013.

8. FUJIMOTO, Kyohei. *Mobile antenna system handbook*. 3ra ed. Estados Unidos: Artech House, 2008. 747 p.
9. HOLMA, Harri. *HSPA+ EVOLUTION TO RELEASE 12*. Gran Bretaña: John Wiley and Sons, 2014. 433 p.
10. HOLMA, Harry. *HSDPA/HSUPA FOR UMTS*. Gran Bretaña: John Wiley and Sons, 2006. 241 p.
11. HOLMA, Harry. *WCDMA for UMTS - HSPA EVOLUTION AND LTE*. 4ta ed. Gran Bretaña: John Wiley and Sons, 2007. 535 p.
12. JOHNSON, Chris. *RADIO ACCESS NETWORKS FOR UMTS*. Gran Bretaña: John Wiley and Sons, 2008. 599 p.
13. KAARANEN, Heikki. *UMTS networks architecture, mobility and services*. Gran Bretaña: John Wiley and Sons, 2001. 297 p.
14. KORHONEN, Juha. *Introduction to 3G mobile communications*. 2da ed. Estados Unidos: Artech House, 2003. 525 p.
15. KRAUS, John. *Antennas*. 2da ed. India: Tata McGraw-Hill, 1997. 873 p.
16. KREHER, Ralf. *UMTS Performance Measurement*. Gran Bretaña: John Wiley and Sons, 2006. 207 p.
17. LEMPIAINEN, Jukka. *Radio interface system planning for GSM/GPRS/UMTS*. Estados Unidos: Kluwer Academic Publishers, 2002. 275 p.

18. LESCUYER, Pierre. *UMTS: Origins, architecture and the standard*. Inglaterra: Springer-Verlag, 2004. 257 p.
19. MISHRA, Ajay. *Advanced cellular network planning and optimisation*. Gran Bretaña: John Wiley and Sons, 2007. 511 p.
20. MISHRA, Ajay. *Fundamentals of cellular network planning and optimisation*. Gran Bretaña: John Wiley and Sons, 2004. 277 p.
21. NOVOSAD, Tomas. *Radio network planning and optimisation for UMTS*. 2da ed. Gran Bretaña: John Wiley and Sons, 2006. 621 p.
22. Penton. *Electronic design*. [en línea]. <<http://electronicdesign.com/>>. [Consulta: marzo de 2016].
23. PIETTE, Bernard. *VHF/UHF filters and multicouplers*. Gran Bretaña: Wiley, 2007. 283 p.
24. POOLE, Ian. *Radio-Electronics*. [en línea]. <<http://www.radio-electronics.com/>>. [Consulta: marzo de 2016].
25. RAHNEMA, Moe. *UMTS NETWORK PLANNING, OPTIMIZATION, AND INTER-OPERATION WITH GSM*. Singapur: John Wiley and Sons, 2006. 323 p.
26. RICHARDSON, Andrew. *WCDMA design handbook*. Reino Unido: Cambridge, 2005. 553 p.

27. SAUNDERS, Simon. *Antennas and propagation for wireless communication systems*. 2da ed. Gran Bretaña: Wiley, 2007. 517 p.
28. SCHOLZ, Peter. *Basic antenna principles for mobile communications*. Alemania: Kathrein. 18 p.
29. Share Technote. [en línea]. <<http://www.sharetechnote.com/>>. [Consulta: marzo de 2016].
30. SONG, Lingyang. *Evolved cellular network planning and optimisation for UMTS and LTE*. Estados Unidos: CRC Press, 2011. 611 p.
31. STUTZMAN, Thiele. *Antenna theory and design*. Estados Unidos: Wiley, 1981. 595 p.
32. TelecomHall ES. [en línea]. <<http://www.telecomhall.com/es/Default.aspx>>. [Consulta: diciembre de 2015].
33. TelecomSource. [en línea]. <<http://www.telecomsource.net/forum.php>>. [Consulta: marzo de 2016].
34. *The antenna theory web*. [en línea]. <<http://www.antenna-theory.com/>>. [consulta: noviembre de 2015].
35. TURKE, Ulrich. *Effient methods for WCDMA radio network planning and optimisation*. Alemania: Mobile Research Center, 2007. 159 p.

36. WALKE, Bernhard. *UMTS the fundamentals*. Gran Bretaña: John Wiley and Sons, 2003. 303 p.
37. ZHANG, Zhijun. *Antenna design for mobile devices*. India: John Wiley & Sons, 2011. 279 p.

