

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN



TESIS DOCTORAL

---

# Optimización de la cobertura y la capacidad en redes LTE mediante procesamiento de eventos complejos

---

*Autor:*

VÍCTOR BUENESTADO GARCÍA

*Directores:*

DR. MATÍAS TORIL GENOVÉS

DR. SALVADOR LUNA RAMÍREZ

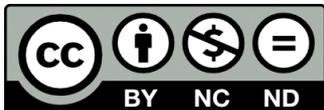


UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

AUTOR: Víctor Buenestado García

 <http://orcid.org/0000-0001-7562-1977>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)





### Autorización para lectura de la Tesis Doctoral

Por la presente, el Dr. D. Matías Toril Genovés y el Dr. D. Salvador Luna Ramírez, profesores doctores del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Málaga, certifican que el doctorando Víctor Buenestado García, Ingeniero de Telecomunicación, ha realizado en el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Málaga, bajo su dirección, el trabajo de investigación correspondiente a su TESIS DOCTORAL titulada

#### “Optimización de la cobertura y la capacidad de redes LTE mediante procesado de eventos complejos”

En dicho trabajo se han propuesto aportaciones originales dentro de la optimización de la cobertura y la capacidad de redes móviles mediante el ajuste automático de diversos parámetros de las estaciones base, a partir del procesado de eventos complejos. Los resultados expuestos han dado lugar a las siguientes publicaciones en revistas, solicitud de patente y aportaciones a congresos que no han sido utilizadas en tesis anteriores.

1. V. Buenestado, J. M. Ruiz, M. Toril, S. Luna, A. Mendo, “Analysis of Throughput Performance Statistics for Benchmarking LTE Networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1607-1010, Septiembre 2014.
2. V. Buenestado, M. Toril, S. Luna, J. M. Ruiz, A. Mendo, “Self-tuning of remote electrical tilts based on call traces for coverage and capacity optimization in LTE,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 5, pp. 4315-4326, Mayo 2017.
3. V. Buenestado, M. Toril, J. M. Ruiz, I. de la Bandera, M. Regueira, “Received signal strength based interferer classification of cellular network cells,” European Patent Application PCT/EP2014/067819, Solicitante: Ericsson, Febrero 2016.
4. J. M. Ruiz, I. de la Bandera, A. B. Vallejo, V. Buenestado, M. Toril, M. Regueira, “Construcción de Contadores Sintéticos mediante Procesado de Eventos Complejo en redes LTE,” *XXVIII Simposium de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI)*, Santiago de Compostela (España), Septiembre 2013.
5. V. Buenestado, J. M. Ruiz, M. Toril, S. Luna, A. Mendo, “Análisis Geométrico de la Inclinación de Antenas Direccionales en una red LTE,” *XXIX Simposium de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI)*, Valencia (España), Septiembre 2014.
6. V. Buenestado, J. M. Ruiz, M. Toril, S. Luna, A. Mendo, “Optimization of remote electrical tilts for improving LTE network coverage and capacity based on cell traces,” TD(15)13014, *13<sup>th</sup> COST IC1004 Workshop and MC Meeting*, Valencia (España), Mayo 2015.

Por todo ello, consideran que esta Tesis es apta para su presentación al Tribunal que ha de juzgarla. Y para que conste a efectos de lo establecido, AUTORIZAN la presentación de esta Tesis en la Universidad de Málaga.

Málaga a 16 de JUNIO de 2017

Fdo: Dr. D. Matías Toril Genovés

Fdo: Dr. D. Salvador Luna Ramírez



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

**UNIVERSIDAD DE MÁLAGA**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE**  
**TELECOMUNICACIÓN**

Reunido el tribunal examinador en el día de la fecha, constituido por:

Presidente: Dr. D. \_\_\_\_\_

Secretario: Dr. D. \_\_\_\_\_

Vocal: Dr. D. \_\_\_\_\_

para juzgar la Tesis Doctoral titulada “*Optimización de la cobertura y la capacidad en redes LTE mediante procesado de eventos complejos*” realizada por D. Víctor Buenestado García y dirigida por el Dr. D. Matías Toril Genovés y el Dr. D. Salvador Luna Ramírez, acordó por

\_\_\_\_\_ otorgar la calificación de  
\_\_\_\_\_ y para que conste, se extiende firmada por los componentes del tribunal la presente diligencia.

Málaga a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ del \_\_\_\_\_

El Presidente:

Fdo.: \_\_\_\_\_

El Secretario:

El Vocal:

Fdo.: \_\_\_\_\_

Fdo.: \_\_\_\_\_



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

A mi padre.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

# *Agradecimientos*

En primer lugar, quiero agradecer a toda mi familia el apoyo, cariño y confianza que siempre me han demostrado, desde mi madre y mis hermanos, pasando por mis cuñados, y terminando por mis sobrinos, que son la alegría de mi vida. Y, en especial, a Farah. Ella ha sido lo más importante que he encontrado en Teleco, y ella también tiene culpa de que hoy sea la persona que soy.

También quiero dar las gracias a todos aquellos compañeros que han estado conmigo durante esta etapa de mi vida y, especialmente, a Chema, Ale, José Ángel, Pablo y Antonio, ya que a vosotros os puedo considerar amigos, que es mucho más importante. Y entre todos ellos, quiero agradecer a Chema haberme enseñado todo lo que él iba aprendiendo y haberme guiado durante estos años, no sólo en este trabajo, si no en los años previos, cuando estaba realizando el PFC. Muchas gracias “Lisen”.

Tengo que reconocer que esta Tesis no podría haberse llevado a cabo si no es por mis directores, Matías y Salva. Muchas gracias por todo, por lo que me habéis enseñado durante estos años, desde que comencé el PFC hasta que hoy termino la Tesis, por el tiempo que habéis dedicado en mi y por compartir conmigo ese entusiasmo que demostráis día a día en esta profesión. Muchas gracias, de corazón.

También debo dar las gracias a las entidades encargadas de los diversos proyectos de investigación que han permitido financiar este trabajo: el Ministerio de Economía y Competitividad (TIN2012-36455 y TEC2015-69982-R), la empresa Optimi-Ericsson y la Agencia IDEA de la Consejería de Ciencia, Innovación y Empresa de la Junta de Andalucía (ref. 59288) y los fondos FEDER, junto con el grupo de investigación TIC-102 Ingeniería de Comunicaciones y la Universidad de Málaga, que hicieron posible este trabajo y me permitieron presentar resultados e intercambiar conocimientos y habilidades en conferencias y revistas.

Por último, gracias papá. Gracias por haberme querido tanto. Gracias por haber estado siempre ahí. Gracias por tus consejos. Gracias por haberme enseñado a ser una persona trabajadora. Gracias por haber estado siempre orgulloso de mí. Gracias porque siempre has sido lo más importante en mi vida, y siempre lo serás. Ojalá algún día pueda llegar a ser como tú. Sé que te hacía mucha ilusión que terminase esta Tesis y, por eso, este trabajo va dedicado a ti. Te echo mucho de menos. Te quiero.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

# Índice general

Agradecimientos	ix
Índice	xi
Resumen	xv
Acrónimos	xvii
Símbolos	xxi

Introducción	1
--------------	---

<b>1. Conceptos Básicos</b>	<b>11</b>
1.1. Arquitectura de red LTE . . . . .	11
1.2. Redes autoorganizadas . . . . .	14
1.2.1. Autoconfiguración . . . . .	15
1.2.2. Autooptimización . . . . .	17
1.2.3. Autocuración . . . . .	18
1.3. Optimización de cobertura y capacidad . . . . .	20
1.3.1. Ajuste del ángulo de inclinación de la antena . . . . .	21
1.3.2. Ajuste de la potencia de transmisión de la estación base . . . . .	23
1.4. Información disponible en una red de acceso radio . . . . .	24
1.4.1. Archivos de trazas de conexión . . . . .	27
1.5. Conclusiones . . . . .	31
<b>2. Procesado de información para la generación de contadores sintéticos</b>	<b>33</b>
2.1. Introducción . . . . .	33
2.1.1. Trabajo relacionado y contribuciones . . . . .	34
2.2. Procesado de eventos complejos . . . . .	37
2.2.1. Arquitectura de procesamiento de eventos . . . . .	37
2.2.2. Software CEP . . . . .	40
2.3. Estructura propuesta para la obtención de contadores sintéticos . . . . .	42
2.3.1. Decodificación de eventos . . . . .	42



2.3.2.	Sincronización de eventos . . . . .	44
2.3.3.	Correlación de eventos . . . . .	44
2.4.	Caso de uso para la obtención de contadores sintéticos . . . . .	49
2.4.1.	Diseño del contador sintético . . . . .	49
2.4.2.	Resultados . . . . .	53
2.4.3.	Complejidad computacional . . . . .	55
2.5.	Conclusiones . . . . .	55
<b>3.</b>	<b>Evaluación de capacidad en redes LTE en explotación</b>	<b>57</b>
3.1.	Introducción . . . . .	58
3.2.	Indicadores de capacidad en redes LTE . . . . .	59
3.3.	Metodología experimental . . . . .	61
3.4.	Resultados del análisis . . . . .	62
3.4.1.	Resultados basados en contadores de rendimiento . . . . .	63
3.4.2.	Resultados basados en trazas de conexión . . . . .	65
3.5.	Conclusiones . . . . .	67
<b>4.</b>	<b>Optimización del ángulo de inclinación de antenas</b>	<b>71</b>
4.1.	Introducción . . . . .	71
4.1.1.	Trabajo relacionado y contribuciones . . . . .	72
4.2.	Formulación del problema y análisis teórico preliminar . . . . .	76
4.2.1.	Formulación del problema . . . . .	76
4.2.2.	Modelo analítico del impacto de la inclinación de las antenas . . . . .	78
4.3.	Diseño del algoritmo de optimización . . . . .	88
4.3.1.	Indicadores de entrada . . . . .	88
4.3.2.	Estructura del algoritmo . . . . .	92
4.4.	Análisis del rendimiento del algoritmo . . . . .	95
4.4.1.	Metodología experimental . . . . .	96
4.4.2.	Resultados . . . . .	105
4.5.	Conclusiones . . . . .	117
<b>5.</b>	<b>Optimización de la potencia de transmisión en el enlace descendente</b>	<b>119</b>
5.1.	Introducción . . . . .	120
5.1.1.	Trabajo relacionado y contribuciones . . . . .	121
5.2.	Formulación del problema y análisis teórico preliminar . . . . .	124
5.2.1.	Modelo analítico del impacto de los cambios de potencia en el enlace descendente . . . . .	124
5.3.	Diseño del algoritmo de optimización . . . . .	135
5.3.1.	Indicador de entrada . . . . .	135
5.3.2.	Estructura del algoritmo . . . . .	136
5.4.	Análisis del rendimiento del algoritmo . . . . .	137
5.4.1.	Metodología experimental . . . . .	137
5.4.2.	Resultados . . . . .	140
5.5.	Conclusiones . . . . .	144

<b>6. Conclusiones Finales</b>	<b>147</b>
6.1. Contribuciones . . . . .	147
6.1.1. Procesado de información para la generación de contadores sintéticos . . . . .	148
6.1.2. Evaluación de la capacidad en redes LTE en explotación . . .	149
6.1.3. Optimización del ángulo de inclinación de antenas . . . . .	150
6.1.4. Optimización de la potencia de transmisión en el enlace des- cendente . . . . .	151
6.2. Líneas Futuras . . . . .	152
6.3. Lista de Publicaciones . . . . .	154
<b>A. Herramienta de simulación para el canal descendente de LTE</b>	<b>159</b>
A.1. Funcionalidad básica del simulador . . . . .	159
A.1.1. Procedimientos de nivel físico . . . . .	161
A.1.2. Procedimientos de nivel de enlace . . . . .	166
A.1.3. Procedimientos de nivel de red . . . . .	167
A.1.4. Generación de archivos de trazas . . . . .	169
A.2. Ajuste del simulador . . . . .	169
A.2.1. Escenario de pruebas . . . . .	170
A.2.2. Ajuste del modelo de propagación . . . . .	171
A.2.3. Rendimiento del algoritmo de autoajuste del ángulo de in- clinación . . . . .	173
<b>Bibliografía</b>	<b>175</b>



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

# Resumen

El aumento del tamaño y la complejidad de las actuales redes de comunicaciones móviles dificulta enormemente las tareas de gestión de red. Para afrontar este problema, los operadores demandan herramientas automáticas capaces de recopilar y procesar las medidas de red con una mínima intervención humana. Con tales herramientas, es posible aprovechar la información proporcionada por los eventos de señalización, que hoy en día se descarta, para determinar la configuración óptima de la red.

En esta Tesis se proponen diversos algoritmos de optimización automática de parámetros de una red de acceso radio *Long Term Evolution* (LTE), cuya principal novedad es la utilización de indicadores obtenidos a partir de trazas de conexión de la interfaz radio.

Como punto de partida, se describe una metodología genérica para construir indicadores de rendimiento de red mediante el procesado de eventos complejos (*Complex Event Processing*, CEP). El objetivo de esta metodología es mostrar la posibilidad de crear nuevos indicadores de rendimiento, distintos de los proporcionados por los fabricantes, para obtener información más detallada del funcionamiento de la red a partir de las trazas de conexión.

A continuación, se presenta un análisis de diversos indicadores de capacidad utilizados por los operadores, basado en datos extraídos de una red LTE real. Este análisis preliminar permite entender cómo difieren los distintos indicadores de capacidad y confirma la correlación de estos indicadores con los indicadores de calidad de señal.

Posteriormente, se propone un algoritmo de ajuste automático del ángulo de inclinación de las antenas para la optimización de la cobertura y la capacidad de una red LTE. El objetivo del algoritmo es maximizar el área de cobertura

y mejorar la eficiencia espectral global de la red, eliminando situaciones de sobreapuntamiento (*overshooting*) o excesivo solapamiento entre celdas vecinas. A diferencia de propuestas anteriores, el algoritmo propuesto utiliza como entrada tres nuevos indicadores que reflejan los problemas de cobertura, sobreapuntamiento y solapamiento entre celdas, a partir de medidas extraídas de las trazas de conexión.

Como alternativa al ajuste de inclinación de antenas, se propone un algoritmo de optimización automática de la potencia máxima de transmisión de las estaciones base de una red LTE. El objetivo del algoritmo es mejorar la eficiencia espectral global del sistema en el enlace descendente mediante la reducción de la potencia de transmisión de celdas que generen problemas de interferencia. Como novedad, el algoritmo propuesto se basa en un nuevo indicador que predice el impacto causado por el cambio de la potencia de transmisión de cada celda en la calidad de señal global de la red en el enlace descendente.

Todos los métodos desarrollados en esta Tesis se conciben para ser integrados en una herramienta de optimización comercial centralizada en el sistema de gestión de red. Para formular el problema, se analizan estadísticas de rendimiento y trazas de conexión tomadas de redes reales. En su desarrollo, se consideran las restricciones impuestas por el operador y el fabricante, prestando especial atención a la eficiencia computacional de los algoritmos de resolución. Como prueba de concepto, se realizan pruebas de campo en un escenario real donde las estaciones base incorporan mecanismos para la inclinación remota de antenas (*Remote Electrical Tilt*, RET). Finalmente, para estimar el beneficio potencial, los algoritmos se validan en un simulador de nivel de sistema que implementa escenarios ajustados con estadísticas de una red real LTE.

# Acrónimos

<b>3GPP</b>	<b>3rd Generation Partnership Project</b>
<b>AC</b>	<b>Admission Control</b>
<b>AMC</b>	<b>Adaptive Modulation and Coding</b>
<b>AMiT</b>	<b>Active Middleware Technology</b>
<b>ANR</b>	<b>Automatic Neighbor Relation</b>
<b>ASN</b>	<b>Abstract Syntax Notation</b>
<b>BD</b>	<b>Billing Domain</b>
<b>BDA</b>	<b>Big Data Analytics</b>
<b>BS</b>	<b>Base Station</b>
<b>CCO</b>	<b>Coverage and Capacity Optimization</b>
<b>CDF</b>	<b>Cumulative Distribution Function</b>
<b>CDMA</b>	<b>Code Division Multiple Access</b>
<b>CDR</b>	<b>Charging Detail Record</b>
<b>CEP</b>	<b>Complex Event Processing</b>
<b>CM</b>	<b>Configuration Management</b>
<b>COC</b>	<b>Cell Outage Compensation</b>
<b>CQI</b>	<b>Channel Quality Indicator</b>
<b>CSV</b>	<b>Comma Separated Values</b>
<b>CTF</b>	<b>Configuration Trace File</b>
<b>CTR</b>	<b>Cell Traffic Recording</b>
<b>DL</b>	<b>DownLink</b>
<b>DSCP</b>	<b>Distributed Stream Computing Platform</b>
<b>DTF</b>	<b>Data Trace File</b>
<b>EDA</b>	<b>Event-Driven Architecture</b>



<b>eNB</b>	<b>evolved-NodeB</b>
<b>EPA</b>	<b>Event Processing Agent</b>
<b>EPC</b>	<b>Evolved Packet Core</b>
<b>EPE</b>	<b>Event Processing Engine</b>
<b>EPL</b>	<b>Event Processing Language</b>
<b>EQL</b>	<b>Event Query Language</b>
<b>ES</b>	<b>Energy Saving</b>
<b>ESP</b>	<b>Event Stream Processing</b>
<b>EUTR</b>	<b>User Equipment Traffic Recording</b>
<b>E-UTRAN</b>	<b>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</b>
<b>FLC</b>	<b>Fuzzy Logic Controller</b>
<b>FM</b>	<b>Fault Management</b>
<b>G-RET</b>	<b>Geometric RET</b>
<b>GSM</b>	<b>Global System for Mobile</b>
<b>HARQ</b>	<b>Hybrid Automatic Repeat reQuest</b>
<b>HO</b>	<b>HandOver</b>
<b>HOR</b>	<b>HandOver failure Ratio</b>
<b>HPBW</b>	<b>Half-Power BeamWidth</b>
<b>HSS</b>	<b>Home Subscriber Server</b>
<b>IMSI</b>	<b>International Mobile Subscriber Identity</b>
<b>INV</b>	<b>INVENTORY</b>
<b>IoT</b>	<b>Internet of Things</b>
<b>IP</b>	<b>Internet Protocol</b>
<b>iRAT</b>	<b>inter-Radio Access Technology</b>
<b>ISD</b>	<b>Inter-Site Distance</b>
<b>KML</b>	<b>Keyhole Markup Language</b>
<b>KPI</b>	<b>Key Performance Indicator</b>
<b>KQI</b>	<b>Key Quality Indicator</b>
<b>LB</b>	<b>Load Balancing</b>
<b>LOS</b>	<b>Line Of Sight</b>
<b>LTE</b>	<b>Long Term Evolution</b>

<b>MAC</b>	<b>Medium Access Control</b>
<b>MDT</b>	<b>Minimization of Drive Test</b>
<b>MME</b>	<b>Mobility Management Entity</b>
<b>MOS</b>	<b>Mean Opinion Score</b>
<b>MRO</b>	<b>Mobility Robustness Optimization</b>
<b>NLOS</b>	<b>Non-Line Of Sight</b>
<b>NMS</b>	<b>Network Management System</b>
<b>NOC</b>	<b>Network Operations Center</b>
<b>OFDM</b>	<b>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</b>
<b>OLLA</b>	<b>Outer Loop Link Adaptation</b>
<b>OS</b>	<b>Operator Solution</b>
<b>OSS</b>	<b>Operations Support System</b>
<b>PC</b>	<b>Power Control</b>
<b>PCI</b>	<b>Physical Cell Identity</b>
<b>PCRF</b>	<b>Policy and Charging Rules Function</b>
<b>PDCP</b>	<b>Packet Data Convergence Protocol</b>
<b>PDU</b>	<b>Protocol Data Unit</b>
<b>P-GW</b>	<b>Packet data network GateWay</b>
<b>PID</b>	<b>Proportional Integrative and Derivative</b>
<b>PL</b>	<b>Propagation Losses</b>
<b>PLAN</b>	<b>network PLANning</b>
<b>PM</b>	<b>Performance Management</b>
<b>PRB</b>	<b>Physical Resource Block</b>
<b>QoE</b>	<b>Quality of Experience</b>
<b>QoS</b>	<b>Quality of Service</b>
<b>RAS</b>	<b>Remote Azimuth Steering</b>
<b>RET</b>	<b>Remote Electrical Tilt</b>
<b>RE</b>	<b>Resource Element</b>
<b>RFID</b>	<b>Radio-Frequency IDentification</b>
<b>R-KPI</b>	<b>Radio - Key Performance Indicator</b>
<b>RLE</b>	<b>Radio-Link Efficiency</b>

<b>RNC</b>	<b>R</b> adio <b>N</b> etwork <b>C</b> ontroller
<b>ROP</b>	<b>R</b> eporting <b>O</b> utput <b>P</b> eriod
<b>RRC</b>	<b>R</b> adio <b>R</b> esource <b>C</b> ontrol
<b>RRM</b>	<b>R</b> adio <b>R</b> esource <b>M</b> anagement
<b>RSRP</b>	<b>R</b> eference <b>S</b> ignal <b>R</b> eceived <b>P</b> ower
<b>RSRQ</b>	<b>R</b> eference <b>S</b> ignal <b>R</b> eceived <b>Q</b> uality
<b>SDU</b>	<b>S</b> ervice <b>D</b> ata <b>U</b> nit
<b>S-GW</b>	<b>S</b> erving <b>G</b> ate <b>W</b> ay
<b>SINR</b>	<b>S</b> ignal to <b>I</b> nterference plus <b>N</b> oise <b>R</b> atio
<b>SINR-PWR</b>	<b>SINR P</b> o <b>W</b> e <b>R</b>
<b>S-KPI</b>	<b>S</b> ervice <b>K</b> PI
<b>SLL</b>	<b>S</b> ide <b>L</b> obe <b>L</b> evel
<b>SM</b>	<b>S</b> ervice <b>M</b> anagement
<b>SON</b>	<b>S</b> elf- <b>O</b> rganizing <b>N</b> etwork
<b>SON-OM</b>	<b>SON-O</b> ptimization <b>M</b> anager
<b>SQL</b>	<b>S</b> tructured <b>Q</b> uery <b>L</b> anguage
<b>TA</b>	<b>T</b> iming <b>A</b> dvance
<b>TCP</b>	<b>T</b> ransmission <b>C</b> ontrol <b>P</b> rotocol
<b>TF-PWR</b>	<b>T</b> race-based <b>F</b> uzzy <b>P</b> o <b>W</b> e <b>R</b>
<b>TF-RET</b>	<b>T</b> race-based <b>F</b> uzzy <b>R</b> ET
<b>TPS</b>	<b>T</b> race <b>P</b> rocessing <b>S</b> erver
<b>TTI</b>	<b>T</b> ransmission <b>T</b> ime <b>I</b> nterval
<b>UE</b>	<b>U</b> ser <b>E</b> quipment
<b>UL</b>	<b>U</b> p <b>L</b> ink
<b>UMTS</b>	<b>U</b> niversal <b>M</b> obile <b>T</b> elecommunications <b>S</b> ystem
<b>WCDMA</b>	<b>W</b> ideband <b>C</b> ode <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
<b>XML</b>	<b>e</b> Xtensible <b>M</b> arkup <b>L</b> anguage

# Símbolos

$\alpha$	Ángulo de inclinación de la antena	°
$\overline{RSRP}_{HO}$	Nivel medio de RSRP antes de realizar un HO	dBm
$N_{con}$	Número de conexiones	-
$\bar{\Gamma}$	SINR medio de celda	dB
$\Gamma_{ce}$	SINR de borde de celda	dB
$\Gamma_{ce}$	Valor umbral de SINR de borde de celda	dB
$d_{apunt}$	Distancia de apuntamiento de la antena	m
$\Delta h$	Diferencia de altura entre la antena de la estación base y la estación móvil	m
$h_{BS}$	Altura de la estación base	m
$h_{MS}$	Altura de la estación móvil	m
$\alpha_{antena}$	Ángulo de inclinación de la antena	°
$\alpha_{mecanico}$	Ángulo de inclinación mecánico de la antena	°
$\alpha_{electrico}$	Ángulo de inclinación eléctrico de la antena	°
$\alpha_{XdB}$	Incremento de ángulo necesario para obtener una atenuación de $X$ dB respecto a la máxima ganancia	°
$\alpha_{3dB}$	Incremento de ángulo necesario para obtener una atenuación de 3 dB respecto a la máxima ganancia	°
$G_t$	Ganancia total de la antena	dB
$G_h$	Ganancia horizontal de la antena	dB
$G_v$	Ganancia vertical de la antena	dB
$d_{borde}$	Distancia del borde geométrico de la celda	m
$d_{int}$	Distancia del borde interno del área de servicio de una celda	m

$d_{ext}$	Distancia del borde externo del área de servicio de una celda	m
$G_{v,max}$	Ganancia vertical máxima de la antena	dB
$HPBW_v$	Ancho de haz vertical de 3 dB	°
$d_{apmin}$	Distancia de apuntamiento mínima permitida a la antena	m
$d_{apmax}$	Distancia de apuntamiento máxima permitida a la antena	m
$\Delta G_{vmin}$	Pérdida de ganancia vertical que define $d_{apmin}$	dB
$\Delta G_{vmax}$	Pérdida de ganancia vertical que define $d_{apmax}$	dB
$\alpha_{borde}$	Ángulo de inclinación que define $d_{borde}$	°
$\Delta G_v$	Pérdida de ganancia vertical	dB
$At_v$	Atenuación vertical	dB
$SLL_v$	Máxima atenuación posible en eje vertical para una antena	dB
$\alpha_{\Delta G_v}^{0^\circ}$	Ángulo respecto a la horizontal que provoca las pérdidas de ganancia deseadas	°
$N_{os}$	Indicador de sobreapuntamiento	-
$N(i)$	Conjunto de celdas vecinas de la celda $i$	-
$X_{rn}$	Indicador de vecina relevante	-
$N_s$	Número total de muestras RSRP reportadas por los usuarios	-
$N_{suon}$	Número de muestras RSRP interferentes	-
$\Delta RSRP_{thos}$	Diferencia de RSRP para considerar una muestra como interferente	dB
$R_{uon}$	Porcentaje de muestras para considerar una celda como interferente	%
$N_{srn}$	Número de muestras RSRP de celda vecina relevante	-
$R_{rn}$	Porcentaje de muestras para considerar una celda como vecina relevante	%
$N_{ol}$	Indicador de excesivo solapamiento	-
$N_{suo}$	Número de muestras RSRP excesivamente solapadas	-

$\Delta RSRP_{th_{ol}}$	Diferencia de RSRP para considerar una muestra como excesivamente solapada	dB
$RSRP_{high_{th}}$	Valor umbral de la celda servidora para considerar una muestra como excesivamente solapada	dBm
$R_{uo}$	Porcentaje de muestras para considerar una celda como excesivamente solapada	%
$R_{bc}$	Indicador de mala cobertura en el borde de celda	%
$N_{bcce}$	Número de muestras RSRP en borde de celda con cobertura insuficiente	-
$N_{ce}$	Número total de muestras RSRP en borde de celda	-
$RSRP_{low_{th}}$	Valor umbral de RSRP para considerar una muestra con cobertura insuficiente	dBm
$UI$	Indicador de interferencia innecesaria	-
$\Delta\alpha$	Incremento del ángulo de inclinación de la antena	°
$\mu(N_{os})$	Función de pertenencia de $N_{os}$	-
$\mu(N_{ol})$	Función de pertenencia de $N_{ol}$	-
$\mu(UI)$	Función de pertenencia de $UI$	-
$\mu(R_{bc})$	Función de pertenencia de $R_{bc}$	-
$\mu(\Delta\alpha)$	Función de pertenencia de $\Delta\alpha$	-
$N_{os_{mín}}$	Valor mínimo de $N_{os}$	-
$N_{os_{máx}}$	Valor máximo de $N_{os}$	-
$N_{ol_{mín}}$	Valor mínimo de $N_{ol}$	-
$N_{ol_{máx}}$	Valor máximo de $N_{ol}$	-
$UI_{mín}$	Valor mínimo de $UI$	-
$UI_{máx}$	Valor máximo de $UI$	-
$R_{bc_{mín}}$	Valor mínimo de $R_{bc}$	-
$R_{bc_{máx}}$	Valor máximo de $R_{bc}$	-
$\alpha_{mín}$	Valor mínimo de $\alpha$	°
$\alpha_{máx}$	Valor máximo de $\alpha$	°
$PL$	Pérdidas de propagación	dB
$d$	Distancia entre la antena y el terminal	km

$X$	Término para ajustar WINNER II C2 a partir de estadísticos de red	dB
$\Delta P_{tx}$	Incremento de la potencia de transmisión de la estación base	dB
$\alpha_{geo}$	Ángulo de inclinación basado en consideraciones geométricas	°
$\alpha_{3dB}^{0^\circ}(i)$	Ángulo respecto a la horizontal que provoca pérdidas de ganancia de 3 dB	°
$\overline{SINR}_{avg}$	Valor global medio del SINR en DL	dB
$\overline{SINR}_{ce}$	Valor global del SINR en el borde de celda en DL	dB
$\overline{N}_{os}$	Valor global medio del indicador de sobreapuntamiento	-
$\overline{N}_{ol}$	Valor global medio del indicador de excesivo solapamiento	-
$\overline{R}_{bc}$	Valor global medio del indicador de mala cobertura en el borde de celda	%
$\overline{UeTHP}_{avg}$	Valor global medio del <i>throughput</i> de usuario en DL	Mbps
$\overline{UeTHP}_{ce}$	Valor global del <i>throughput</i> de usuario en el borde de celda en DL	Mbps
$\overline{RSRP}$	Valor medio global de RSRP	dBm
$\overline{I}_{DL}$	Interferencia media global en DL	dBm
$\bar{\alpha}$	Valor medio del ángulo de inclinación	°
$\overline{\alpha}_{OS}$	Valor medio del ángulo de inclinación de la configuración OS	°
$\overline{P}_{tx}$	Valor medio de la potencia de transmisión	dBm
$\overline{P}_{txOS}$	Valor medio de la potencia de transmisión de la configuración OS	dBm
$N_c$	Número de celdas	-
$\Gamma_t$	SINR DL total del sistema	dB
$P_{TX}(i)$	Potencia de transmisión DL de celda	dBm
$\beta$	Indicador de estimación de ganancia en el SINR DL total del sistema	dB
$\Gamma_c$	SINR DL total en la vecindad de una celda	dB

$\bar{S}$	Nivel medio de señal deseada	dBm
$\bar{I}(i)$	Nivel medio de interferencia	dBm
$A(i)$	Área de servicio de celda	-
$p_u$	Probabilidad de tráfico de un usuario	-
$(x, y)$	Ubicación de usuario dentro del área de servicio	-
$S(x, y)$	Nivel de señal recibida en $(x, y)$	dBm
$I(x, y)$	Nivel de interferencia recibida en $(x, y)$	dBm
$F_1$	Sensibilidad de la señal deseada en la celda origen	dB
$F_2$	Sensibilidad de la interferencia en la celda origen	dB
$F_3$	Sensibilidad de la señal deseada en las celdas vecinas	dB
$F_4$	Sensibilidad de la interferencia en las celdas vecinas	dB
$P_{RX}$	Nivel de señal recibida	dBm
$p_{rx}$	Nivel de señal recibida	mW
$l$	Carga de celda	-
$n_0$	Ruido térmico	mW
$t$	Tráfico medio	bps
$se$	Eficiencia espectral	$\frac{\text{bps}}{\text{PRB}}$
$N_{prb}$	Número de PRB	-
$se_{\text{máx}}$	Valor máximo de eficiencia espectral	$\frac{\text{bps}}{\text{PRB}}$
$\gamma$	SINR DL	-
$\gamma_{\text{mín}}$	Valor mínimo de SINR DL	-
$\gamma_{\text{máx}}$	Valor máximo de SINR DL	-
$\alpha_{imp}$	Factor de corrección de pérdidas de implementación	PRB <sup>-1</sup>
$\bar{\gamma}$	SINR medio de celda	-
$\bar{ic}(j, i)$	Ratio de interferencia medio en la celda $i$ debido a la celda vecina $j$	-
$\Delta\Gamma_t$	Diferencia de SINR total del sistema	dB
$\beta_{\text{mín}}$	Valor mínimo de $\beta$	dB
$\beta_{\text{máx}}$	Valor máximo de $\beta$	dB
$\Delta P_{TX}^{(l)}$	Incremento de potencia en el lazo $l$	dB
$P_{TX}^{(l+1)}$	Potencia de transmisión en el lazo $l+1$	dBm

$P_{TX}^{(l)}$	Potencia de transmisión en el lazo $l$	dBm
$P_{TX_{\min}}$	Valor mínimo de $P_{TX}$	dBm
$P_{TX_{\max}}$	Valor máximo de $P_{TX}$	dBm
$\overline{\Delta P_{TX}}$	Incremento medio de la potencia de transmisión	dB
$\overline{\Delta \alpha}$	Incremento medio del ángulo de inclinación	°
$f_c$	Frecuencia de portadora	MHz
$a(h_{MS})$	Factor de corrección de la altura de la antena del terminal móvil	dB
$d_{BP}$	Distancia de ruptura para usuarios LOS	m
$\sigma_{SF}$	Desviación estándar para desvanecimiento lento	dB
$RLE_{\min}$	Valor mínimo de RLE	$\frac{\text{kbps}}{\text{PRB}}$
$RLE_{\max}$	Valor máximo de RLE	$\frac{\text{kbps}}{\text{PRB}}$
$B_{PRB}$	Ancho de banda por PRB	$\frac{\text{kHz}}{\text{PRB}}$
$RSRP_{iRAT}$	Valor umbral de iRAT	dBm
$\overline{P_{RX}}$	Nivel medio de potencia recibida	dBm
$N_{vec}$	Número de celdas vecinas	-

# Introducción

En este capítulo inicial se introduce el trabajo realizado en esta Tesis. En primer lugar, se expone la motivación que da lugar al estudio de los métodos de optimización automática aquí desarrollados. A continuación, se plantean los objetivos de investigación y la metodología de trabajo seguida a lo largo de la Tesis. Por último, se presenta la estructura del presente documento.

## Motivación

En los últimos años, el incremento del número de usuarios y servicios en redes móviles ha llevado a los operadores y fabricantes a desarrollar sistemas de comunicaciones móviles con mayor capacidad. Esta evolución de los sistemas de comunicaciones móviles ha culminado con la especificación de la tecnología *Long Term Evolution* (LTE), que hoy en día está implantada a nivel mundial. Descrita por primera vez en [1], LTE mejora el rendimiento de los sistemas de comunicaciones móviles predecesores con mayores tasas de transmisión de datos, menor latencia y consumo de potencia, mayor flexibilidad en el uso del espectro radioeléctrico y una arquitectura de red simplificada [2].

Al mismo tiempo, la complejidad de estos sistemas se ha incrementado exponencialmente, lo que complica enormemente las tareas de gestión de red. Por esta razón, los operadores demandan herramientas para configurar y optimizar los parámetros de red de forma automática, como una solución flexible y económica para mejorar la capacidad de la red sin incrementar los costes de inversión. Estas herramientas permiten la construcción de redes autoorganizadas (*Self-Organizing Network*, SON) [3, 4], con las que se pretende reducir los costes de despliegue, al mismo tiempo que se mejora el rendimiento y la capacidad de la red.

Por eficiencia, las herramientas SON cubren sólo aquellos problemas que tienen una mayor repercusión sobre el rendimiento de la red. Uno de los casos de uso más importantes es la optimización de la cobertura y la capacidad (*Coverage and Capacity Optimization*, CCO), al tener incidencia sobre la automatización del proceso de planificación y/o configuración (*self-planning* o *self-configuration*), optimización (*self-optimization*) y curación (*self-healing*) de las redes móviles [5]. En toda red móvil, existe un compromiso entre la cobertura y la capacidad. Así, el objetivo de la CCO es proporcionar cobertura y capacidad óptima de forma conjunta, de modo que se maximice la capacidad de red mientras se garantiza un nivel mínimo de calidad del servicio.

El problema de la CCO en LTE puede afrontarse con el ajuste de multitud de parámetros de red que impactan sobre los indicadores de cobertura y capacidad. Uno de los métodos más utilizados es el ajuste del ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base, al ser una técnica eficaz para mejorar el aislamiento entre celdas y/o extender la cobertura en redes celulares [6]. Una configuración óptima del ángulo de inclinación minimiza la interferencia entre celdas vecinas (problemas de solapamiento u *overlapping*), evita conexiones con usuarios demasiado lejos de la celda (problemas de sobreapuntamiento u *overshooting*) y, al mismo tiempo, mejora la cobertura en el área que debe ser servida por la estación base. Este ajuste puede realizarse de manera mecánica, lo cual requiere visitar el emplazamiento de la antena para hacer los cambios físicamente, o puede realizarse eléctricamente y ser controlado de manera remota mediante la técnica conocida como *Remote Electrical Tilt* (RET). Así, cambiar el ángulo de inclinación con RET es tan costoso como cambiar cualquier otro parámetro de la red de acceso radio. No obstante, encontrar cuál es la configuración óptima del ángulo de inclinación es complicado, lo que impide que los operadores saquen el máximo partido de esta técnica.

En la práctica, no siempre es posible modificar el ángulo de inclinación de las antenas, debido a que, o bien las antenas son compartidas por distintas tecnologías de acceso radio [7], o bien el emplazamiento carece de la funcionalidad RET. En estos casos, una alternativa para solventar el problema de la CCO es ajustar la potencia de transmisión de las estaciones base mediante la regulación de potencia (*Power Control*, PC). El objetivo del control de potencia es reducir la cantidad de interferencia entre celdas vecinas, al mismo tiempo que se transmite a los equipos de usuario (*User Equipment*, UE) con suficiente potencia para garantizar una

calidad del enlace aceptable [8, 9]. De la misma forma que con RET, cambiar la potencia de transmisión de las estaciones base es tan costoso como modificar cualquier otro parámetro de la red de acceso radio. Aun así, queda el problema de encontrar la configuración óptima de la potencia de transmisión de cada estación base del sistema. En dicha búsqueda, existe compromiso entre asegurar una buena calidad de conexión para los usuarios servidos por una celda y la interferencia generada (y, por lo tanto, la calidad de señal recibida) en las celdas vecinas. Este compromiso dificulta la tarea de encontrar la configuración óptima de potencia de transmisión.

Independientemente del parámetro modificado en CCO (ángulo de inclinación de antena o potencia de transmisión), es importante disponer de indicadores de red que permitan un análisis fiable y pormenorizado del estado de la red móvil. Sólo así se consigue que la acción de reconfiguración tenga el mejor impacto posible en su rendimiento. Por ello, el uso de indicadores construidos con medidas de la red real es una herramienta indispensable para la CCO. Las medidas de la red se clasifican normalmente en contadores de rendimiento (*Performance Management counters*, *PM counters*) y eventos de rendimiento (*Performance Management events*, *PM events*) [4]. Los contadores de rendimiento reflejan estadísticos del comportamiento de un elemento de red (p. ej., una estación base) agregados durante un periodo de tiempo. Ejemplos de contadores son el número de usuarios activos, el número de portadoras activas o el número de trasposos realizados con éxito en una celda durante una hora. Adicionalmente, los elementos de red generan constantemente eventos de señalización, con información muy detallada, que quedan recogidos en trazas de conexión que contienen los mensajes de control intercambiados por los elementos de la red. Ejemplos de estos eventos son el inicio o fin de una llamada o conexión, el cambio de celda de un usuario con conexión activa o la asignación de recursos radio a una determinada conexión. En la práctica, la gran cantidad de información suministrada por los eventos impide que los operadores puedan aprovecharlos para las tareas de optimización de red, por lo que estos procesos se basan actualmente sólo en contadores. Desafortunadamente, la especificación e implementación de contadores por parte de los fabricantes es un proceso largo y tedioso, y, como consecuencia, el conjunto de contadores es todavía muy limitado en tecnologías recientes, como LTE. Esta falta de contadores dificulta el análisis del estado de la red de estas tecnologías aún inmaduras.

Los últimos avances en tecnologías de la información hacen posible procesar

enormes volúmenes de datos en tiempo real [10]. Este proceso, conocido como análisis masivo de datos (*Big Data Analytics*, BDA), tiene como objetivo descubrir patrones ocultos, correlaciones desconocidas o tendencias del mercado. En las redes móviles, el concepto de *big data* hace referencia al conjunto de parámetros de configuración, contadores de rendimiento, alarmas, eventos, registros de datos de carga o etiquetas de problemas [11] que pueden usarse para extraer conclusiones acerca del rendimiento de la red.

Para procesar los datos de la red, han aparecido varias herramientas en el mercado basadas en el procesado de eventos complejos (*Complex Event Processing*, CEP) [12]. CEP es un sistema de gestión de flujos de datos diseñado para operar con datos que se recopilan continuamente, que permite crear aplicaciones para el filtrado, la correlación y el procesado de eventos en tiempo real (o casi real). Este sistema permite a los operadores trabajar con grandes cantidades de información heterogénea, enlazando datos almacenados en diferentes localizaciones, generados por diferentes fuentes y en distintos momentos (de ahí el término de evento complejo).

Por su flexibilidad, se intuye que el análisis masivo de los datos recogidos por el sistema de gestión de red puede servir para desarrollar de forma ágil nuevos indicadores de rendimiento, distintos a los ofrecidos por los fabricantes. Estos nuevos indicadores, denominados contadores *sintéticos*, enriquecen la información suministrada por los contadores tradicionales. Siguiendo esta línea, en esta Tesis se aborda el estudio de métodos de CCO basados en contadores sintéticos construidos con técnicas CEP.

## Objetivos de la Tesis

El objetivo fundamental de esta Tesis es el desarrollo de algoritmos automáticos de optimización de la cobertura y la capacidad de redes LTE a partir del análisis masivo de información disponible en los eventos recopilados en la red. En concreto, los objetivos específicos de este trabajo son:

- a) desarrollar una herramienta CEP que procese la información disponible en los eventos recopilados en la red, y que permita generar contadores sintéticos para la optimización de la cobertura y la capacidad de una red LTE,

- b) diseñar algoritmos heurísticos de optimización que permitan ajustar el ángulo de inclinación de las antenas o, en su defecto, la potencia de transmisión de las estaciones base, basados en los indicadores obtenidos del análisis de información masiva en la red,
- c) validar los algoritmos propuestos en un simulador estático de nivel de sistema que implemente escenarios de red construidos a partir de datos de redes LTE reales, y
- d) validar los algoritmos propuestos mediante pruebas de campo en la red de un operador.

Las principales contribuciones de esta Tesis son:

- a) una metodología CEP para generar nuevos indicadores que midan el rendimiento de una red LTE a partir del análisis de información masiva disponible en la red,
- b) la definición de cuatro nuevos indicadores sintéticos que permiten caracterizar los problemas de solapamiento, sobreapuntamiento, cobertura y eficiencia espectral en redes LTE,
- c) dos algoritmos heurísticos de optimización automática de la cobertura y la capacidad de redes LTE que ajustan el ángulo de inclinación de las antenas o la potencia de transmisión de las estaciones base en el enlace descendente, a partir de los cuatro indicadores anteriores, y
- d) la integración del algoritmo de optimización del ángulo de inclinación de las antenas en la herramienta de optimización de parámetros de Ericsson *Self-Organizing Network-Optimization Manager* (SON-OM), y su validación en redes reales.

Es habitual que, en el contexto académico, la mayoría de los trabajos se centren en los aspectos más teóricos de la investigación, relegando a un segundo plano la aplicación práctica de sus propuestas. Una característica distintiva de esta Tesis es su aplicabilidad práctica, que viene impuesta por el marco de financiación a través de la empresa Ericsson en el que se ha desarrollado. Cada uno de los problemas analizados en este trabajo ha sido planteado desde una perspectiva eminentemente

práctica, tal como lo harían el operador y el proveedor de herramientas. Por este marco, como restricción de partida, se impone que todos los métodos propuestos deben de ser lo suficientemente sencillos como para ser incluidos en una herramienta de optimización comercial sin comprometer su eficiencia computacional. Además, todos los métodos deben diseñarse y validarse a partir de datos de redes LTE reales. En este sentido, la colaboración con Ericsson ha facilitado el acceso a los datos disponibles en redes comerciales. Esta información, sin la cual no habría sido posible realizar esta Tesis, es otra de las principales fortalezas de este trabajo.

## Metodología de trabajo

En vista de los objetivos expuestos, se establece el siguiente plan de trabajo:

1. El trabajo se inicia con un estudio del estado de la técnica y la tecnología disponible para la optimización de la cobertura y la capacidad en las redes autoorganizadas LTE. Dicho estudio permite identificar las técnicas de optimización descritas en la bibliografía, entre las que se analizarán especialmente las que ajustan el ángulo de inclinación de las antenas y la potencia de transmisión de las estaciones base en el enlace descendente. Al mismo tiempo, se identifican las técnicas más avanzadas de control de sistemas de grandes dimensiones (control difuso) y el procesado de eventos complejos (CEP). Además, se realiza un estudio en profundidad de la documentación del fabricante que explica los parámetros de configuración y los indicadores de rendimiento existentes.
2. Un análisis teórico preliminar permite identificar las limitaciones de los algoritmos de optimización existentes de cobertura y capacidad en redes LTE. Se analiza especialmente cómo las técnicas estudiadas utilizan sólo parcialmente la información disponible en las redes y qué limitaciones tienen los contadores de rendimiento tradicionales a la hora de describir el funcionamiento de la red.
3. Con el objetivo de manejar el gran volumen de información disponible en los eventos de red, almacenados en distintos archivos según la celda o usuario implicados, se desarrolla una herramienta de procesado de trazas de conexión para generar los nuevos indicadores sintéticos, que aportan una información

más detallada y útil para los algoritmos de optimización diseñados. Para posteriores experimentos, la herramienta de procesado se integra en una herramienta de simulación de red y en una herramienta de optimización de red comercial.

4. Un análisis de los diversos indicadores de capacidad empleados por los operadores móviles permite seleccionar el indicador de capacidad a utilizar en la formulación del problema de CCO. Este análisis se basa en la comparación de distintos indicadores obtenidos a partir de datos extraídos de una red LTE real y permite conocer las diferencias entre los distintos indicadores de capacidad, así como la correlación de éstos con los indicadores de calidad de señal.
5. Una vez definidos los indicadores sintéticos, se diseña el algoritmo de optimización del ángulo de inclinación de las antenas que emplea dichos indicadores calculados a partir de trazas. Este algoritmo se integra tanto en la herramienta de simulación de red como en una herramienta de optimización de red real. Para la evaluación del algoritmo, se realizan simulaciones y pruebas de campo en una red real, que son analizadas posteriormente.
6. Como alternativa al algoritmo de optimización del ángulo de inclinación de las antenas, cuando éste no se pueda utilizar, se diseña un algoritmo de optimización de la potencia de transmisión de las estaciones base para el enlace descendente. Este algoritmo se integra en (y se valida con) la herramienta de simulación de red.

## Estructura del documento

Esta memoria describe la optimización de la cobertura y capacidad de redes LTE con algoritmos que utilizan como entrada nuevos indicadores de rendimiento obtenidos a partir de la información disponible en las trazas de conexión.

En el Capítulo 1 se presentan los conceptos necesarios para contextualizar este trabajo. En una primera sección se introducen los principios básicos de funcionamiento de la tecnología LTE, describiendo su arquitectura de red. A continuación, se define el concepto de red autoorganizada y sus principales funcionalidades. Posteriormente, se profundiza en el caso de uso de la optimización de la cobertura

y la capacidad donde se enmarca este trabajo, concluyendo este capítulo con un análisis de las distintas fuentes de información existentes en una red LTE.

En el Capítulo 2 se detalla una metodología de procesado de trazas para obtener nuevos indicadores de rendimiento de la red que puedan ser utilizados por algoritmos avanzados de optimización. Se parte de un análisis preliminar del estado de la técnica sobre el procesado de eventos y trazas en las redes móviles, destacando las principales contribuciones de esta Tesis. A continuación, se describe la herramienta construida para el procesado de trazas en este trabajo. Dicha descripción detalla las bases de la metodología empleada para poder desarrollar esta herramienta, así como los bloques funcionales que la forman. A continuación, se presenta un ejemplo práctico de uso de dicha herramienta en una red real LTE, para terminar con las conclusiones obtenidas de los resultados.

En el Capítulo 3 se presenta un análisis de los diferentes indicadores de capacidad empleados por los operadores móviles, que se obtienen a partir de datos extraídos de una red real. El capítulo comienza con un análisis preliminar del estado de la técnica sobre la utilización de indicadores de capacidad, mostrando la necesidad de realizar el estudio. A continuación, se presentan los indicadores de rendimiento de capacidad y el escenario utilizados, seguido de los resultados obtenidos en el análisis. Por último, se presentan las conclusiones del estudio.

En el Capítulo 4 se presenta el algoritmo de ajuste del ángulo de inclinación de las antenas para la optimización de la capacidad y la cobertura de una red celular LTE. Este algoritmo tiene, como entrada, indicadores de rendimiento novedosos, que se obtienen mediante el procesado de trazas. El capítulo comienza con un análisis preliminar del estado de la técnica, poniendo de manifiesto las limitaciones de los algoritmos existentes. A continuación, se presenta el algoritmo y los nuevos indicadores desarrollados, seguido de las pruebas realizadas tanto en simulaciones como en redes reales. Por último, se presentan las conclusiones obtenidas de los resultados.

En el Capítulo 5 se presenta un algoritmo alternativo, que ajusta la potencia de transmisión de las estaciones base, indicado para aquellos casos en los que no es posible modificar el ángulo de inclinación de las antenas. El método propuesto se basa en un nuevo indicador que permite evaluar el rendimiento global del sistema cuando se modifica la potencia de alguna estación base. Como en los capítulos previos, se realiza primero un análisis preliminar del estado de la técnica, subrayando

la novedad de este estudio. A continuación, se presenta el algoritmo alternativo de optimización, definiendo el nuevo indicador utilizado como entrada del algoritmo, y las pruebas del indicador y del algoritmo llevadas a cabo en la herramienta de simulación. Por último, se presentan las conclusiones de los resultados.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones generales del trabajo y las posibles líneas futuras de continuación del trabajo. Además, se presentan las publicaciones generadas, que describen las principales aportaciones de la Tesis.

En el Apéndice A se describe la herramienta de simulación utilizada para la evaluación de los algoritmos propuestos en los Capítulos 4 y 5.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

# Capítulo 1

## Conceptos Básicos

Este capítulo introduce los conocimientos básicos necesarios para comprender el resto del trabajo. Para ello, la Sección 1.1 describe la arquitectura de referencia de una red LTE. Posteriormente, en la Sección 1.2 se presenta una de las funcionalidades más importantes de las redes LTE, como es su capacidad de organización automática (SON). En la Sección 1.3, se aborda el problema de la optimización de la cobertura y la capacidad (CCO), como uno de los principales casos de uso de SON. A continuación, en la Sección 1.4, se explican las diferentes fuentes de datos disponibles en una red celular para la optimización de la red. Por último, en la Sección 1.5 se presentan las conclusiones de este capítulo.

### 1.1. Arquitectura de red LTE

El estándar LTE aparece en el año 2007 [1] como un nuevo sistema de comunicaciones móviles con el objetivo de mejorar las prestaciones de los sistemas previos, además de simplificar la arquitectura de red. En una red LTE, la red de acceso radio, denominada *Evolved Universal Mobile Telecommunications System-UMTS- Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN), es la encargada de proporcionar la conexión entre los equipos de usuario (UEs) y los equipos de la red troncal, mediante las estaciones base (*Base Station*, BS), conocidas como nodos-B evolucionados (*evolved-Node B*, eNB), así como de gestionar de manera eficiente los recursos radio disponibles. Por otro lado, la red troncal, conocida como *Evolved Packet Core* (EPC), es la encargada de la gestión de la movilidad, el control de

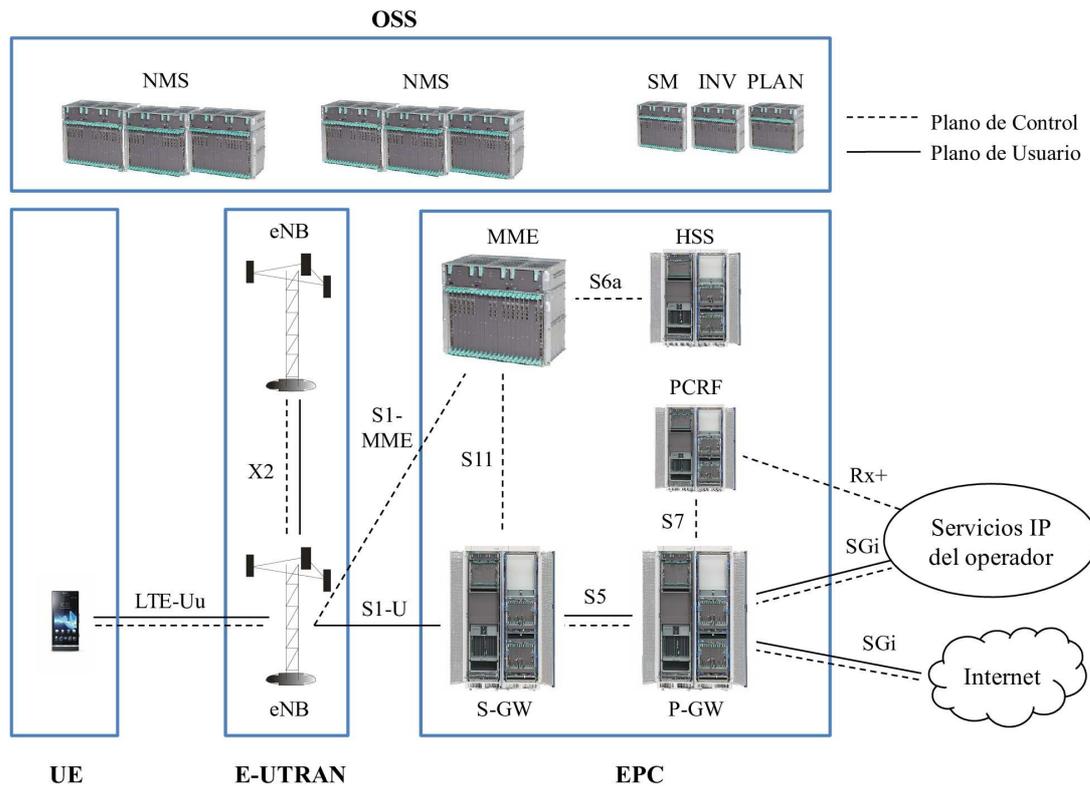


FIGURA 1.1: Arquitectura de red LTE.

acceso, la gestión de las conexiones de los usuarios y la interconexión con otras redes.

La Figura 1.1 muestra los elementos de ambos segmentos de red E-UTRAN y EPC, así como las interfaces existentes entre ellos. En la figura, se aprecia cómo el único elemento de la red de acceso radio es el eNB. En este elemento se integra toda la funcionalidad de la red de acceso, tras la desaparición del controlador de estaciones base (*Radio Network Controller*, RNC) necesario en tecnologías anteriores. El eNB es el elemento encargado de la transmisión de los datos de usuario hacia y desde los UE, además de la transmisión de los mensajes de señalización necesarios, mediante la interfaz aire LTE-Uu. Además, el eNB es la entidad que gestiona los recursos radio y, por tanto, el encargado de todas las funciones de control de admisión, control de movilidad, asignación dinámica de recursos y control de interferencia.

Los eNB se comunican entre sí mediante la interfaz X2, que permite que la gestión de los trasposos de llamadas y la coordinación entre eNB se lleve a cabo por el propio eNB, sin necesidad, en la mayoría de los casos, de niveles superiores

de la jerarquía de red. La comunicación entre la E-UTRAN y la EPC se realiza mediante la interfaz S1, de forma que los eNB se comunican en los planos de control y datos con los elementos de la EPC a través de las interfaces S1-MME (de entidad de gestión de movilidad, *Mobility Management Entity*, MME) y S1-U (de usuario), respectivamente.

Por otro lado, en la EPC aparecen diferentes elementos:

- Entidad de gestión de movilidad (MME), que es la entidad principal del plano de control de la red LTE, encargada de procesar la información de señalización entre los usuarios y la red troncal;
- Pasarela de servicio (*Serving GateWay*, S-GW), que actúa como enlace entre la E-UTRAN y la EPC en el plano de usuario;
- Pasarela de datos (*Packet data network GateWay*, P-GW), encargada de proporcionar conectividad entre la red LTE y las redes externas, comunicando a los diferentes servicios de conmutación de paquetes la dirección de protocolo de Internet (*Internet Protocol*, IP) que ofrece el operador;
- Servidor de suscripción local (*Home Subscriber Server*, HSS), encargado de las funciones de registro y autenticación de usuarios por parte del operador y de la función de control de las reglas y políticas de calidad de servicio (*Policy and Charging Rules Function*, PCRF).

Estos elementos se comunican entre ellos a través de las siguientes interfaces:

- S11: Interfaz del plano de control usado entre el MME y el S-GW para la gestión de paquetes;
- S6a: Interfaz utilizado entre el MME y el HSS para transferir información de registro y autenticación de los usuarios;
- S5: Interfaz que permite conectar el S-GW a múltiples P-GW con el objetivo de proporcionar diferentes servicios IP al UE, o reasignar el S-GW según la movilidad del UE;
- SGi: Interfaz entre el P-GW y las redes externas;
- S7: Interfaz entre el P-GW y el PCRF;

- Rx+: Interfaz entre el PCRF y los servicios IP del operador, permitiendo el transporte de información de sesión a nivel de aplicación.

En un nivel superior, asociado a la gestión de red, se encuentra el sistema de soporte a las operaciones (*Operations Support System, OSS*), cuyo elemento fundamental es el sistema de gestión de red (*Network Management System, NMS*). La NMS se encarga de monitorizar los elementos de la red de un fabricante, recopilando estados de configuración y medidas de rendimiento de los mismos. Además, la NMS actúa de interfaz entre el operador y los equipos que componen la red LTE. La OSS integra varios NMS que gestionan equipos de diferentes fabricantes, así como otros elementos necesarios para la gestión de servicio (*Service Management, SM*), para inventario (*INVENTORY, INV*) o para la planificación de la red (*network PLANning, PLAN*).

El objetivo de la arquitectura de red mostrada en la figura es facilitar la introducción de servicios basados en IP de alta tasa de transferencia de datos y baja latencia. Para ello, se dota a la red LTE de una estructura plana (es decir, no jerárquica), que reduce el número de elementos involucrados en la conexión. Por la misma razón, todas las interfaces descritas utilizan el protocolo IP.

## 1.2. Redes autoorganizadas

El aumento de tamaño y complejidad de las redes móviles en los últimos años ha dificultado enormemente las tareas de planificación, operación y mantenimiento de la red por parte del operador. Para afrontar este problema, los operadores necesitan automatizar las tareas de gestión de la red. Con esta finalidad, surgen las denominadas redes autoorganizadas (SON) [3, 4].

Los principales beneficios que justifican el uso de las redes SON son:

- a) una reducción de los costes de despliegue y operación de la red, al disminuir la intervención humana y liberar al personal de tareas rutinarias que se repiten en el tiempo y/o el espacio,
- b) una disminución de los fallos de la red producidos por errores humanos, y

- c) una mejora del rendimiento y la capacidad de la red al utilizar algoritmos avanzados de gestión de red, lo que permite retrasar las inversiones asociadas a la introducción de nuevo equipamiento.

Aunque el concepto de autoorganización puede aplicarse a cualquier tipo de sistema de comunicaciones, es en el estándar LTE donde se ha generalizado el uso de las técnicas SON [3]. En estas redes móviles, SON permite realizar de forma autónoma tareas de planificación (*self-planning*), configuración (*self-configuration*), optimización (*self-optimization*) y resolución de problemas (*self-healing*) [5, 7, 13]. A continuación, se detalla cada una de estas funcionalidades por separado.

### 1.2.1. Autoconfiguración

Debido al aumento de la complejidad de las redes móviles y del número de elementos que las componen, la introducción de nuevos elementos es una tarea cada vez más complicada. Además, debido a la continua evolución de la red y sus condiciones de funcionamiento, y al constante incremento de la demanda de sus usuarios, la integración de nuevos elementos es cada vez más frecuente. Por ello, es fundamental automatizar esta tarea para reducir costes y errores [4].

La autoconfiguración hace referencia a la capacidad de la red de poner en marcha de forma automática un nuevo elemento en la red, típicamente una nueva celda. Se trata, por tanto, de automatizar las tareas de despliegue de una red, estableciendo la conexión con otros elementos y su configuración inicial de parámetros de forma automática, sin intervención del operador [7]. De esta forma, se reducen los costes de instalación al mismo tiempo que se asegura una correcta integración de los nuevos elementos en el sistema.

Algunos de los casos de uso más importantes definidos en el ámbito de la autoconfiguración de celda para LTE son [5, 7, 13]:

- *Configuración de la conexión de la celda dentro de la red.* Esta funcionalidad permite configurar de forma automática todos los enlaces hacia otros elementos y, de esta forma, el nuevo elemento queda correctamente integrado dentro de la red. Dentro de este proceso, se incluyen acciones como configurar las interfaces X2 y S1, o la obtención de una dirección IP para la celda y la configuración del enlace IP de la red de retorno (*backhaul*).

- *Configuración del identificador de celda.* El identificador de celda (*Physical Cell Identity*, PCI) es un código empleado en procesos tan importantes como la sincronización, la ubicación de señales piloto o el traspaso entre celdas. Sólo existen 504 valores de PCI disponibles, que deben reutilizarse a lo largo de toda la red [7]. A la hora de seleccionar el PCI de una celda, deben cumplirse ciertos requerimientos, como, por ejemplo, evitar que celdas vecinas utilicen el mismo PCI. En este contexto, el proceso de autoconfiguración permite seleccionar el mejor PCI para una celda basándose en información del entorno obtenida tras activar la celda.
- *Configuración de parámetros de radio.* Antes de conectar una nueva celda, se suele establecer una configuración inicial de los parámetros de la interfaz radio. Sin embargo, una vez el elemento se ha conectado a la red, es normal que los datos usados en la configuración anterior no se ajusten a las condiciones reales experimentadas. Por tanto, el elemento de red puede hacer uso de nueva información actualizada una vez se activa la celda, y realizar así un ajuste más adecuado a las condiciones del enlace radio o del tráfico del entorno.
- *Configuración de lista de vecinas.* Una tarea muy importante a la hora de introducir nuevas celdas o nodos en una red es la actualización de la lista de celdas vecinas [7]. Una mala configuración de la lista se traduce en problemas de rendimiento, tales como una mala ejecución en los traspasos o caída de llamadas. Aunque es posible generar una lista de vecinas inicial durante el proceso de planificación, la actualización de esta lista puede refinarse cuando la nueva celda entra en funcionamiento y los terminales móviles que se conectan a ella comienzan a reportar información de las otras celdas. Esta funcionalidad de autoconfiguración permite crear una lista de vecinas fiable en tiempo real, basándose en información obtenida durante la fase de operación. De esta forma, se mejora la robustez de la movilidad de los usuarios que se desplazan entre celdas adyacentes.
- *Testeo automático.* Una vez realizada la configuración inicial, se llevan a cabo las pruebas necesarias para verificar el correcto funcionamiento de la celda y detectar posibles errores en la configuración.

### 1.2.2. Autooptimización

Una vez se han configurado los elementos de la red, puede ser necesario adaptar la configuración de dichos elementos a los cambios que se producen en el entorno a lo largo del tiempo. El objetivo principal de la autooptimización es mantener el máximo rendimiento de la red en todo momento, asegurando que los elementos de la misma operen de la forma más eficaz posible en cualquier situación. Para ello, las técnicas de optimización analizan el comportamiento de la red y realizan cambios en los parámetros de los distintos elementos, adaptándolos continuamente a las necesidades de los usuarios y el operador [5, 13]. El origen de los cambios que hacen necesaria la autooptimización puede tener varias causas [7]:

- a) condiciones de propagación variable, debidas a cambios en el entorno de propagación, como son nuevos edificios o calles, o cambios en los medios de propagación por variaciones estacionales;
- b) comportamiento del tráfico cambiante, producido por cambios espaciales/temporales de los usuarios y sus demandas, que pueden deberse a razones tales como apariciones de nuevas infraestructuras (p. ej., centros comerciales, colegios, ...), periodos vacacionales u organización de eventos masivos (p. ej., partidos de fútbol, conciertos, ...); y
- c) cambios en la estructura de la red, como consecuencia de la integración de nuevos elementos (p. ej., activación de celda pequeña en el área de servicio de una macrocelda).

Otra razón importante para realizar cambios de parámetros es la necesidad de mejorar la configuración inicial de parámetros fijada durante el despliegue de la red. En el mejor de los casos, dicha configuración inicial se establece tras un proceso de planificación cuidadoso, basado en estimaciones de las condiciones de propagación y la demanda de tráfico [7]. Si no se dispone de dicha información, los parámetros suelen fijarse a valores por defecto, recomendados por el fabricante, que garantizan un funcionamiento correcto del equipo, pero en ningún caso óptimo. En estas condiciones, se hace necesario un proceso de reajuste de los parámetros a partir de medidas tomadas durante la fase de operación de red.

Algunos de los casos de uso de autooptimización más importantes en redes LTE son [5, 7, 13]:

- *Optimización de la movilidad (Mobility Robustness Optimization, MRO)*. Su misión es garantizar una adecuada movilidad de los usuarios que se desplazan por la red, sin interrumpir su conexión, modificando los parámetros relacionados con los traspasos entre celdas de la misma frecuencia, celdas de distinta frecuencia e, incluso, celdas de distinta tecnología. Los problemas que se intenta minimizar con ello son la caída de llamadas, las interrupciones del enlace radio, los traspasos innecesarios y los problemas de acampada en celdas inadecuadas.
- *Optimización de cobertura y capacidad (Coverage and Capacity Optimization, CCO)*. Su misión es adaptar continuamente los parámetros de las antenas para minimizar la interferencia entre celdas (es decir, mejorar la eficiencia espectral, y, con ello, la capacidad del sistema) y solventar posibles huecos de cobertura (es decir, maximizar la cobertura). Para ello, se ajustan parámetros de las antenas, como el ángulo de inclinación o la potencia de transmisión.
- *Balance de carga (Load Balancing, LB)*. Esta técnica permite que las estaciones base de la red se repartan la demanda de tráfico existente, desplazando usuarios desde celdas con problemas de congestión hacia celdas vecinas con recursos disponibles. De esta forma, se mejora la accesibilidad de la red a la vez que se aumenta la capacidad de la misma, haciendo un mejor uso de los recursos.
- *Ahorro de energía (Energy Saving, ES)*. El objetivo principal es disminuir el consumo eléctrico para reducir los costes de operación y respetar el medio ambiente. Con este fin, se desactivan de forma selectiva portadoras, celdas o emplazamientos completos durante las horas de poco tráfico, al mismo tiempo que se extiende la cobertura de las celdas vecinas.

### 1.2.3. Autocuración

Debido al aumento del tamaño de las redes LTE, el número de averías en los elementos de la red también se ha incrementado. En una red compleja, como es la red móvil, los fallos pueden aparecer en cualquiera de sus segmentos. Sin embargo, el dominio más crítico desde el punto de vista de la gestión de fallos es la red de acceso radio. Esto se debe a que cada estación base es responsable de servir un

área de cobertura específica con poca o ninguna redundancia, por lo que es difícil que, en caso de falle una estación base, otra entidad similar ofrezca el servicio hasta que se solucione el problema. Por tanto, cualquier degradación del servicio provocada por la avería de una celda se traduce directamente en una degradación de la calidad de servicio percibida por los usuarios servidos por la misma.

Para detectar rápidamente averías, y minimizar el impacto sobre los usuarios, la funcionalidad de autocuración permite detectar, notificar, compensar, diagnosticar y resolver los problemas de funcionamiento de la red, de forma que la degradación del servicio sea la menor posible hasta que se repare definitivamente la avería. Para poder llevar a cabo todas estas funciones, los elementos de la red deben monitorizar el rendimiento de la red, realizar pruebas de funcionamiento y recopilar los datos necesarios para realizar un análisis exhaustivo de los mismos [7]. Los principales casos de uso considerados en la autocuración son [5, 7, 13]:

- *Degradación de una celda.* Uno de los casos más habituales en el ámbito de la autocuración es la detección de la degradación de una celda y la definición de las acciones para solucionarlo. Para ello, en primer lugar, se debe detectar correctamente dicha degradación, lo que puede realizarse monitorizando indicadores de la red tales como el porcentaje de llamadas caídas o la potencia de transmisión de la celda. La principal dificultad en esta tarea es definir los límites aceptables para cada indicador que permitan detectar si se produce una degradación en el funcionamiento de la celda.
- *Compensación de celda caída (Cell Outage Compensation, COC).* Desde el punto de vista del operador, una de las acciones más importantes es la de detectar y compensar la caída de una celda, entendiendo por caída la interrupción total o parcial del servicio de la misma, debida a una avería *hardware* o *software*. Es, además, habitual que la celda no sea capaz de detectar su mal funcionamiento por sí sola, y, por tanto, no informe del problema a la OSS. Si éste es el caso, son los otros elementos de la red los que deben ser capaces de detectar rápidamente la caída de la celda, cuantificando el impacto potencial en el rendimiento de la red y realizando los ajustes necesarios en la configuración de red para compensarla. Debido a que la actuación debe ser inmediata, es necesario que dicha actuación se haga de forma automática.

Entre todos los casos de uso descritos, destaca la optimización automática de la cobertura y la capacidad, por el gran impacto potencial sobre el rendimiento de

la red. La siguiente sección profundiza en este caso de uso, dada su importancia en este trabajo.

### 1.3. Optimización de cobertura y capacidad

Como se ha expuesto anteriormente, la necesidad de optimizar la configuración de la red surge por la ausencia de un proceso de planificación cuidadoso, o por el cambio de las tendencias de propagación, tráfico y movilidad en la red. En este contexto, los operadores han identificado la optimización de la cobertura y la capacidad de la red como uno de los casos de uso más importantes [5]. Tradicionalmente, en los sistemas de segunda generación, los conceptos de cobertura y capacidad podían tratarse de manera relativamente independiente, ya que la planificación de frecuencias permitía que celdas adyacentes tuviesen asignadas diferentes frecuencias con el fin de evitar la interferencia cocanal [14]. Sin embargo, con la aparición de las redes UMTS, los indicadores de cobertura, capacidad y calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) quedan estrechamente ligados [15]. UMTS utiliza la misma banda de frecuencias en todas las celdas, lo que significa que celdas colindantes se interfieren entre sí. Para paliar este problema, la tecnología WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) incluyó técnicas de diversidad macrocelular (*soft-handover*), que sacan partido de ese solape entre celdas. En LTE, al igual que en UMTS, todas las celdas del sistema usan la misma banda de frecuencias. Sin embargo, en sus primeras versiones (Release 8-10), no existe ninguna funcionalidad que aproveche la diversidad macrocelular, por lo que no es deseable un solape excesivo entre celdas. Por ello, debe asegurarse un cierto solapamiento entre celdas adyacentes, que evite huecos de cobertura, sin crear problemas de interferencia (y, con ello, de eficiencia espectral y capacidad). Este compromiso entre cobertura y capacidad a la hora de definir el solapamiento entre celdas debe quedar bajo el control del operador.

Los objetivos de CCO pueden cumplirse modificando diversos parámetros, entre los que se encuentran parámetros de la antena como el diagrama de radiación de la antena [16], el ángulo de acimut [17] o el ángulo de inclinación [18]. El ajuste automático de estos dos últimos parámetros de antenas requiere disponer de antenas con control remoto (*Remote Azimuth Steering*, RAS y *Remote Electrical Tilt*, RET, respectivamente). Otras formas alternativas incluyen el ajuste de otros parámetros de las estaciones base como, por ejemplo, la potencia de transmisión de

la estación base, la potencia de las señales de referencia en el enlace descendente o los parámetros del control de potencia en el enlace descendente [7]. Por su importancia en esta Tesis, se detalla a continuación el proceso de ajuste del ángulo de inclinación de antena.

### 1.3.1. Ajuste del ángulo de inclinación de la antena

El ajuste del ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base es una de las técnicas más usadas para mejorar el aislamiento entre celdas o extender la cobertura de las mismas en redes celulares [6, 7]. Una configuración óptima del ángulo de inclinación minimiza la interferencia entre celdas vecinas (*overlapping*), evita conexiones con usuarios situados muy alejados de la celda (*overshooting*) y mejora la cobertura en el área que debe ser servida por la estación base. Aun así, la selección del ángulo óptimo depende de múltiples factores, no siempre fáciles de analizar y medir, lo que en muchos casos impide a los operadores sacar el máximo partido a esta técnica, agravándose dicha dificultad al introducir nuevos emplazamientos, que obliga a reconfigurar los ángulos de inclinación periódicamente.

La configuración correcta del ángulo de inclinación de las antenas de una celda y el de sus vecinas es importante para asegurar que el nivel de señal es máximo dentro del área de servicio de las mismas y mínimo fuera de ellas [18]. De esta manera, la relación señal a ruido e interferencia dentro del área de servicio es mayor, y, con ello, la eficiencia espectral del sistema. Estudios previos han demostrado que agachar la antena de las estaciones base reduce el grado de solapamiento entre celdas, con lo que se reduce el nivel de interferencia en otras celdas debido a un apuntamiento más preciso del patrón de radiación de la antena sobre el área de servicio prevista para cada una de ellas [19]. Sin embargo, agachar excesivamente la antena puede provocar problemas de cobertura en los bordes de las celdas. Por ello, es importante elegir adecuadamente el ángulo de inclinación, para evitar problemas de huecos de cobertura y reducir la interferencia entre celdas [19].

El ángulo de inclinación de una antena se define como el ángulo que forma el lóbulo de radiación principal de la antena con el horizonte. Este ángulo es a su vez la suma de dos ángulos de inclinación: el conseguido por medios mecánicos y el conseguido por medios eléctricos. Así, el ajuste del ángulo de inclinación puede realizarse de manera mecánica y/o eléctrica. La primera requiere visitar el emplazamiento de la antena y hacer los cambios físicamente, por lo que forma parte

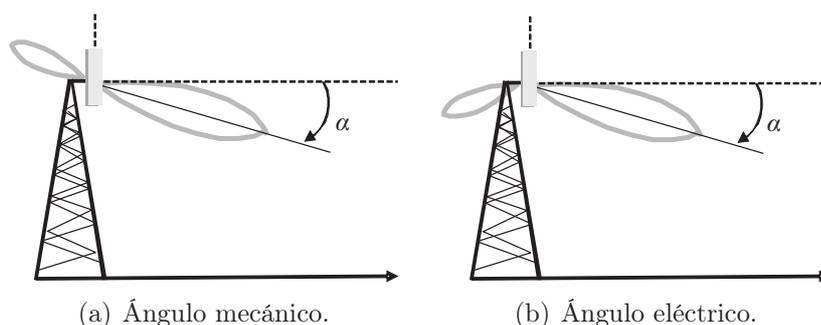


FIGURA 1.2: Esquemas de inclinación de antena.

del proceso de replanificación de la red. Dado que el coste que supone trasladar al emplazamiento un equipo de trabajo en altura es elevado, el número de reajustes que se programan es muy reducido, limitándose a casos muy claros de mal funcionamiento [18]. Alternativamente, la inclinación de antena puede realizarse eléctricamente mediante el ajuste de la fase de los elementos radiantes de la antena, lo que puede controlarse remotamente mediante RET. Así, el cambio del ángulo de inclinación es tan simple como modificar cualquier otro parámetro lógico de red. Además, el ajuste eléctrico no modifica la forma del diagrama de antena en el plano horizontal [19]. Ambas ventajas hacen del RET una de las técnicas más potentes en la optimización de redes móviles, siendo utilizado en diversos casos de uso de SON (p. ej., CCO, LB o COC).

Las Figuras 1.2 (a)-(b) muestran un diagrama conceptual de ambos tipos de inclinación, mecánica y eléctrica, respectivamente, siendo  $\alpha$  el ángulo de inclinación de la antena. Por su parte, las Figuras 1.3 (a)-(b) muestran con mayor detalle los diagramas de radiación en el plano horizontal que generan diferentes ángulos de inclinación para una antena de panel trisectorial, cuando el ajuste se realiza por medios mecánicos o eléctricos. En la Figura 1.3 (b), se aprecia que, al agachar (es decir, incrementar el ángulo de inclinación,  $\alpha$ ) eléctricamente la antena, el lóbulo principal, el trasero y los laterales reducen su ganancia uniformemente [20], manteniendo la forma del diagrama de radiación. Como consecuencia, la energía radiada en el plano horizontal se reduce por igual en todas direcciones. Por el contrario, en la Figura 1.3 (a), se aprecia que, al agachar la antena por medios mecánicos, dado que la antena se inclina físicamente por el lado del lóbulo principal, los lóbulos laterales no se agachan, por lo que la energía radiada se reduce sobre todo en la dirección de máxima radiación del panel. Como consecuencia, la reducción en la interferencia entre celdas no es tan significativa como con el ajuste del ángulo eléctrico.

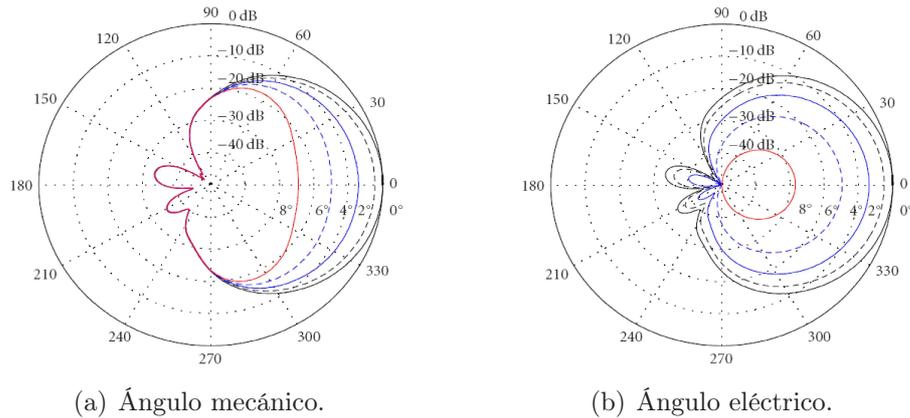


FIGURA 1.3: Diagrama de radiación horizontal en una antena de panel [19].

### 1.3.2. Ajuste de la potencia de transmisión de la estación base

En la práctica, no siempre se puede modificar el ángulo de inclinación de las antenas para solventar el problema de CCO. El motivo puede ser que: a) la antena tenga un patrón de radiación omnidireccional, y sólo sea posible el ajuste por medios mecánicos, b) la antena esté compartida entre distintas tecnologías de acceso radio [7], que requieran distintos ángulos de inclinación, o c) la antena no pueda controlarse remotamente al carecer de RET. Para estas situaciones, es necesario encontrar mecanismos alternativos a la modificación del ángulo de inclinación de antena para solventar los problemas de CCO.

Una posible técnica alternativa es la optimización de la cobertura y la capacidad de celda mediante la regulación de la potencia de transmisión de las estaciones base en el enlace descendente (*DownLink*, DL) [7]. Dicho ajuste se realiza con el objetivo de evitar excesivas interferencias entre celdas vecinas en redes densas.

La optimización de la potencia de transmisión DL conlleva ciertos desafíos, tales como los cambios en el comportamiento a largo plazo del amplificador o cambios drásticos en la región de traspaso. Este proceso de optimización podría ser problemático para los traspasos, debido a que la potencia recibida no cambia sólo en una determinada área de la celda, sino que modifica la potencia recibida en toda el área de servicio.

Es práctica habitual que los operadores de redes LTE configuren la potencia del enlace descendente al máximo. Así, la optimización se limita a reducir la potencia de determinadas estaciones base cuando la pérdida de calidad de señal en ellas

quede compensada con la mejora de calidad de señal en las celdas vecinas. De esta manera, el proceso de optimización persigue mejorar la capacidad global del sistema a costa de empeorar la cobertura. Sólo en el caso de que la potencia de transmisión esté configurada a un valor inferior al máximo, su incremento puede utilizarse también para optimizar la cobertura.

Como técnica de CCO, la regulación de potencia puede ejecutarse en paralelo con la optimización del ángulo de inclinación de las antenas [7], ya que ambos mecanismos comparten los mismos objetivos. Cuando ambos mecanismos se ejecutan simultáneamente, éstos deben coordinarse, ya que de lo contrario podrían competir entre sí, causando efectos indeseados en el rendimiento de la red.

## 1.4. Información disponible en una red de acceso radio

El uso de datos o indicadores provenientes de una red real es una herramienta clave para la definición y mejora de los algoritmos de optimización en redes celulares. Según el nivel de detalle, los datos recopilados de forma automática por la red de acceso radio pueden clasificarse en:

- a) Archivos de trazas de conexión (*Data Trace File*, DTF), que contienen múltiples registros (eventos) con medidas radio de un único equipo de usuario o de una única estación base cuando ocurre algún evento (p. ej., el nivel de señal recibida de distintas celdas cuando comienza una conexión). Los DTF pueden a su vez clasificarse en registros de tráfico de equipo de usuario (*User Equipment Traffic Recording*, UETR) o registros de tráfico de celda (*Cell Traffic Recording*, CTR) [21]. Los UETR se utilizan para monitorizar a un usuario concreto, identificado por su identidad internacional de abonado (*International Mobile Subscriber Identity*, IMSI), mientras que los CTR se emplean para monitorizar el rendimiento de una celda concreta mediante el almacenamiento de la información de múltiples conexiones anónimas servidas en la celda a monitorizar. Mientras que los UETR suelen utilizarse principalmente para tareas de monitorización con corta duración, los CTR se utilizan como fuente de entrada de los algoritmos SON, para mejorar su rendimiento y reducir así los costes de gestión [11]. Tanto los UETR como los CTR consisten en trazas de conexiones

individuales, que se agrupan por periodo de reporte (*Reporting Output Period*, ROP) y se almacenan en el sistema de gestión de red (NMS). Otra diferencia entre las trazas de UETR y de CTR es que, en los UETR, el operador es quien decide qué UE se monitoriza, mientras que, en las CTR, se monitorizan de forma anónima todos (o una fracción de) los UE de una celda. Los eventos recogidos en los DTF pueden ser estándares (definidos mediante normas del 3<sup>rd</sup> *Generation Partnership Project* o 3GPP) o propietarios (dependientes de cada fabricante).

- b) Datos de configuración de elementos de red (*Configuration Management*, CM), que almacenan los valores actuales de la configuración de parámetros de la red (p. ej., máxima potencia de transmisión de un eNB o ángulo de orientación horizontal de una antena). Esta información suele ser dependiente de cada fabricante, y se almacena en la NMS para su posterior utilización.
- c) Contadores de rendimiento (*Performance Management*, PM counters), que consisten en contadores que almacenan el número de veces que ha ocurrido algún evento en un elemento de la red (p. ej., número de conexiones establecidas por celda) durante un ROP. Estos contadores son dependientes de cada fabricante, se actualizan en los elementos de red y se envían periódicamente a la NMS.
- d) Alarmas (*Fault Management*, FM), que muestran avisos de mal funcionamiento ocurrido en los distintos elementos de la red. Suelen clasificarse por severidad (p. ej., alarma informativa o crítica, advertencia, error, . . .), son dependientes del fabricante y se asocian a cada elemento de la red. Estas alarmas se almacenan en la NMS, bien de manera periódica o bajo demanda [22].

La información disponible en la NMS puede enriquecerse con datos recogidos por otros medios, como:

- a) Registros de tarificación (*Charging Detail Records*, CDR), que incluyen información de autenticación, autorización y facturación (p. ej., tiempo de conexión, duración de la llamada, cantidad de datos transferidos, . . .). Estos registros son almacenados por los elementos de la red y reportados al dominio de facturación (*Billing Domain*, BD) [23].
- b) Medidas de nivel de red y transporte (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol metrics*, TCP/IP metrics), que incluyen indicadores de rendimiento

de la red, tales como la tasa de transmisión de datos, la tasa de pérdidas de paquetes o el retardo de paquetes, obtenidos a partir de las capas superiores a nivel de red en el P-GW, mediante sondas [24].

- c) Registros de incidentes (*Trouble ticket*), generados a partir de alarmas, bien de manera automática en algunos elementos de la red o de manera manual por los operarios del centro de operaciones de la red (*Network Operations Center*, NOC). También pueden generarse a petición del cliente. Estos registros incluyen información referente a la incidencia que los generan (p. ej., fecha de la incidencia, estación base donde ha ocurrido, prioridad, estado de la incidencia, ...) y se utilizan para las actividades de mantenimiento y de solución de problemas de la red [25].
- d) Medidas de rendimiento del servicio a través de programas agente de usuario (*terminal agent*), que incluyen indicadores de rendimiento de la red extremo-a-extremo obtenidos a partir de aplicaciones instaladas en terminales móviles [26].

A partir de toda esta información, los operadores suelen construir indicadores más elaborados, para facilitar el análisis del rendimiento de la red. Ordenados de mayor a menor detalle de la información que contienen, estos indicadores son:

- a) Indicadores de rendimiento radio principales (*Radio - Key Performance Indicator*, R-KPI). Se construyen mediante fórmulas y a partir de la combinación de distintos contadores (p. ej., porcentaje de llamadas caídas del servicio). Se calculan en el sistema de gestión de red. Son dependientes de cada fabricante y van asociados a cada segmento de red (p. ej., radio, transporte, núcleo de red, ...). Por simplicidad, en adelante a estos indicadores se les nombrará como KPI.
- b) Indicadores de calidad de servicio principales (*Key Quality Indicator*, KQI, o *Service - KPI*, S-KPI). Muestran la calidad de servicio percibida por el usuario final (p. ej., tiempo de descarga medio de una página web, número medio de interrupciones del vídeo, ...). Con ellos, se caracteriza el rendimiento del servicio extremo a extremo, y no por segmentos de red. Se calculan a partir de KPI en la OSS, y se clasifican en indicadores de accesibilidad (p. ej., disponibilidad, cobertura, bloqueo, ...), integridad (p. ej., tasa de transmisión) y retenibilidad (p. ej., pérdida de conexión) [27].

- c) Indicadores de calidad de experiencia (*Quality of Experience*, QoE). Muestran el grado de satisfacción del usuario (p. ej., en términos de *Mean Opinion Score*, MOS), y se calculan en la OSS a partir de los S-KPI mediante funciones de utilidad [28].

En el caso de los KPI de la red radio, cada fabricante propone su propio juego de contadores e indicadores, que se encuentran integrados en sus equipos, a disposición de los operadores. En esta Tesis, se utilizan los DTF para generar nuevos indicadores, denominados contadores sintéticos, que aportan información distinta y novedosa, con el objetivo de analizar problemas que no se pueden analizar con los contadores actualmente disponibles.

El diseño y construcción de indicadores sintéticos requiere un conocimiento detallado de la información contenida en los DTF. Por ello, el siguiente apartado proporciona una descripción detallada de los eventos contenidos en los DTF y que, por tanto, pueden usarse para el diseño de nuevos contadores.

#### 1.4.1. Archivos de trazas de conexión

Los eventos almacenados en los archivos de trazas pueden clasificarse en dos grupos dependiendo de la entidad de la red involucrada:

- a) Eventos externos, que recogen mensajes de señalización que intercambian los eNB con otros elementos de la red. Estos mensajes pueden ser mensajes de control de recursos radio (*Radio Resource Control*, RRC) recibidos de los UE a través de la interfaz aire (LTE-Uu), o mensajes intercambiados con otros eNB a través de las interfaces X2 o S1. Así, según su origen, los eventos externos pueden dividirse en tres categorías dependiendo del tipo de mensaje:
- i) Eventos RRC (p. ej., *Rrc\_rrc\_connection\_request*),
  - ii) Eventos S1 (p. ej., *S1\_initial\_context\_release*), y
  - iii) Eventos X2 (p. ej., *X2\_handover\_request*).

El contenido y formato de los eventos RRC, S1 y X2 está estandarizado por el 3GPP en [29–31], respectivamente.

b) Eventos internos, con información sobre el rendimiento de algún eNB. Estos eventos son específicos de cada fabricante de eNB. Algunos ejemplos de eventos internos son:

- i) Eventos periódicos, que incluyen información del rendimiento de los eNB o los usuarios (p. ej., medida periódica del nivel de señal piloto recibida o medidas periódicas de calidad del canal).
- ii) Eventos no periódicos, activados por alguna razón esporádica (p. ej., comienzo/final de una conexión o un traspaso).

Tanto los eventos periódicos como los no periódicos pueden clasificarse en eventos de UE o de eNB.

La estructura de los eventos almacenados en los DTF está normalmente compuesta por una cabecera y un cuerpo de mensaje que incluyen diferentes atributos, denominados parámetros del evento. La cabecera contiene atributos generales asociados con la descripción del evento, tales como el instante de generación, eNB, usuario, tipo de mensaje o longitud del evento, mientras que el mensaje incluye atributos específicos asociados con el tipo de mensaje (p. ej., valor de nivel de señal recibido en caso de un evento que reporta dicha señal). El número de atributos en un mensaje depende del tipo del mensaje. Las Figuras 1.4 (a)-(b) muestran unas tablas de ejemplo de trazas de conexión CTR en bruto y procesadas, respectivamente, generadas a partir de la información almacenada en un DTF con la herramienta *Trace Processing Server* (TPS) del fabricante Ericsson. En la Figura 1.4 (a) se observan los diferentes eventos almacenados en la traza (identificados de forma unívoca por el campo *EVENTID*), así como los atributos/parámetros incluidos en la cabecera (*ARRAY\_PARAMS\_VALUE*) y el cuerpo del mensaje (*MESSAGE*). Además, en la figura también se presentan la versión de la herramienta (*TRACE\_RELEASE*) y el tipo de evento del que se trata (*TRACE\_EVENTID*), donde se pueden identificar dos grupos de eventos: el primero, definido por valores bajos del campo *TRACE\_EVENTID*, corresponde a eventos externos definidos por 3GPP (p. ej., *TRACE\_RELEASE* = 8 y 11, referidos a eventos de traspaso y medidas de potencia, respectivamente), mientras que valores altos corresponden a eventos internos, específicos del fabricante (p. ej., *TRACE\_RELEASE* = 3076, referido a eventos de tráfico). Por otro lado, la Figura 1.4 (b) muestra el resultado obtenido tras procesar las trazas en bruto, agrupándolas por llamadas (identificadas por el campo *CALLID*). En la figura se observan algunos campos

generales relacionados con la llamada, tales como los instantes de tiempo de inicio y fin de la llamada (*START\_TIME* y *END\_TIME*, respectivamente), la duración de la misma (*DURAT*), las celdas donde se inició y donde se terminó la llamada (*ORIG\_GCELLID* y *TERM\_GCELLID*, respectivamente) o el número de eventos considerados en cada llamada (*N\_EVENTS*), así como diferentes estadísticos que se obtienen tras el procesado de los eventos generados durante la llamada, como el valor medio del indicador de calidad del canal (*Channel Quality Indicator, CQI*) o el nivel medio de señal piloto recibido por la celda servidora (*SERving-Reference Signals Received Power, SERV\_RSRP*).

La Figura 1.5 representa un esquema del proceso de recopilación de trazas en LTE [32]. El proceso de colección de trazas comienza cuando el operador carga un archivo de configuración de traza (*Configuration Trace File, CTF*) en la NMS. Un CTF incluye:

- a) los eventos a monitorizar,
- b) en caso de UETR, los UE concretos a monitorizar; y en caso de CTR, las celdas y el porcentaje de conexiones que se monitorizan de forma anónima en la celda,
- c) el ROP (típicamente 15 minutos),
- d) el número máximo de trazas activas simultáneamente en la NMS, y
- e) el periodo de tiempo durante el cual la recopilación de trazas está activa.

Una vez configurado el proceso de recolección de trazas mediante un archivo CTF, el periodo de monitorización comienza en el momento que así estuviera configurado. En dicho periodo, los UE transfieren sus registros de eventos a sus eNB servidores. Cuando el ROP finaliza, el eNB genera los archivos CTR y UETR, que se almacenan localmente, y comienza un nuevo ROP en el que se generan nuevos archivos de trazas, hasta que concluya el periodo de monitorización establecido. Más tarde, los archivos de traza se envían periódicamente a la OSS u otra entidad de recopilación de trazas propiedad del operador. Los parámetros del CTF deben configurarse adecuadamente para evitar sobrecargar los elementos de la red, especialmente cuando se registran eventos generados con mucha frecuencia, como, por ejemplo, medidas periódicas a nivel de conexión. Nótese que los DTF tienen un tamaño limitado. Por tanto, un CTF que activa demasiados registros en una celda

EVENTID	TRACE_EVENTID	TRACE_RELEASE	ARRAY_PARAMS_VALUE	MESSAGE
00000000	3075	2074	0,0,84000810,0,0,2,0,0,1,3,2,0,3994,...	(NULL)
00000001	3076	2074	0,2,432,0,0,2,84000810,0,2,0,0,3994,...	(NULL)
00000002	3108	2074	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,84000810,,1417478...	(NULL)
00000003	8	2074	419860,86024773,262144,10,261005,...	261005000084b8e020080
00000004	11	2074	419860,36,36,35,168554573,,0,,,45,,5...	081224483061a4593768d...
00000005	4097	2074	419860,,,0,168550728,262144,14175...	(NULL)
00000006	8	2074	419860,15765308,0,168550728,2621...	2012158800000c4e04200...
00000007	4106	2074	,,,,,,168550728,,,,,,8,,,4002,14...	(NULL)
00000008	4097	2074	419860,,,0,168554518,262144,14175...	(NULL)
00000009	8	2074	419860,17832917,0,168554518,2621...	2012158800000c4e04200...
00000010	8	2074	419860,15765308,0,168550728,2621...	22100500064b8e018060
00000011	4106	2074	,,,,,,168554518,,,,,,8,,,4003,14...	(NULL)
00000012	11	2074	419860,47,46,35,168550728,,0,,,,,4,,3...	0811af582065ae55d468c...
00000013	2058	2074	419860,66111731,66111731,0,32f451...	000000814e000006000a0...
00000014	2059	2074	419860,637,66111731,0,168554562,2...	2000006*000004000a400...
00000015	4113	2074	419860,0,,168554562,141752340318...	(NULL)

(a) Trazas en bruto.

CALLID	START_TIME	END_TIME	DURAT	ORIG_GCELLID	TERM_GCELLID	N_EVENTS	IMSI	IMEI	CQI	SERV_RSHP
0	1417524194344	1417524212501	18.157	8468	8468	27	(NULL)	(NULL)	9.51	(NULL)
1	1417524260853	1417524289501	28.648	8468	8468	12	(NULL)	(NULL)	12.61	(NULL)
2	1417524236649	1417524252500	17.851	8468	8468	12	(NULL)	(NULL)	12.75	(NULL)
3	1417524238460	1417524241500	3.04	8468	8468	5	(NULL)	(NULL)	15	(NULL)
4	1417524238857	1417524297500	58.643	8468	8468	12	(NULL)	(NULL)	13.81	(NULL)
6	1417524291085	1417524300603	9.518	8468	8468	26	(NULL)	(NULL)	10.64	(NULL)
7	1417524205718	1417524221500	15.782	8468	8468	12	(NULL)	(NULL)	12.24	-81
8	1417524191283	1417524211500	20.217	8468	8468	12	(NULL)	(NULL)	11.47	(NULL)
10	1417524248509	1417524262502	13.993	8468	8468	25	(NULL)	(NULL)	8.38	(NULL)
11	1417524135107	1417524150500	15.393	8468	8468	12	(NULL)	(NULL)	11.07	-71
12	1417524205460	1417524208500	3.04	8468	8468	8	(NULL)	(NULL)	12.33	(NULL)
13	1417524159627	1417524197500	37.873	8468	8468	12	(NULL)	(NULL)	10.35	(NULL)
17	1417524159309	1417524161499	2.19	8468	8468	5	(NULL)	(NULL)	13	(NULL)
18	1417524145188	1417524159500	12.966	8468	8468	12	(NULL)	(NULL)	7.25	-109
19	1417524164809	1417524167500	37.315	8468	8468	5	(NULL)	(NULL)	9.375	(NULL)
20	1417524199534	1417524212500	18.264	8468	8468	8	(NULL)	(NULL)	14.65	(NULL)

(b) Trazas procesadas.

FIGURA 1.4: Ejemplo de trazas de conexión CTR.

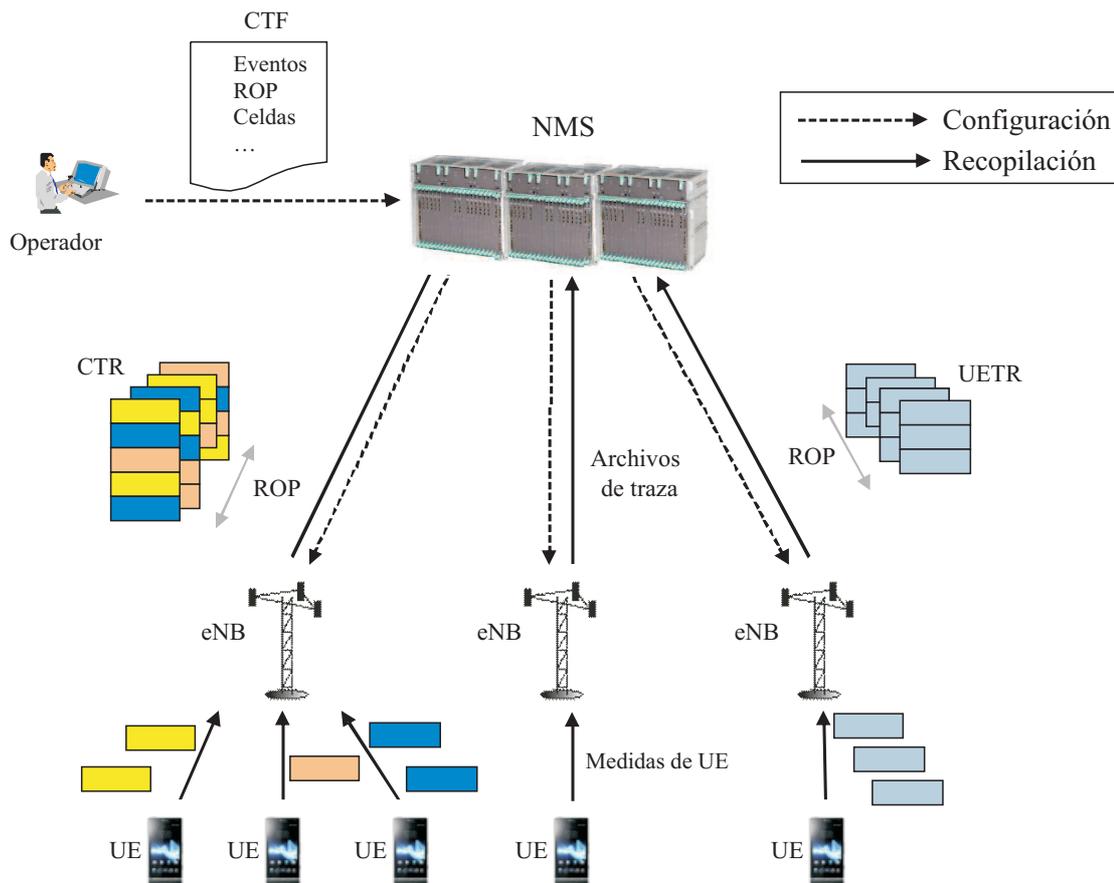


FIGURA 1.5: Esquema conceptual de la recopilación de trazas.

podría causar que el tamaño máximo del DTF se alcance antes de que termine el ROP, provocando que algunas conexiones no se almacenen y llevando a un análisis del rendimiento de la celda incorrecto. Para evitarlo, en el CTF suele configurarse que la recopilación de trazas se lleve a cabo sólo para una fracción de las conexiones cursadas (p. ej., 20 %). Las pruebas realizadas en el marco de esta Tesis han demostrado que rara vez se alcanza el tamaño máximo de archivo si se activa un número razonable de eventos, incluso cuando se registran todas las conexiones de la celda durante la hora cargada. De igual forma, se ha comprobado que en ningún caso la activación de trazas compromete el rendimiento del procesador del eNB.

## 1.5. Conclusiones

En esta Tesis Doctoral se presentan distintos métodos de optimización de la cobertura y la capacidad de redes móviles LTE. En este primer capítulo se han introducido los conceptos básicos necesarios para entender el resto del trabajo. Para

ello, primero se ha presentado la arquitectura básica de una red LTE, describiendo las entidades principales en esta tecnología. A continuación, se han descrito las principales características de las redes autoorganizadas, profundizando en el caso de uso estudiado en este trabajo, como es la optimización de la cobertura y la capacidad. Por último, se han mostrado las diferentes fuentes de información que pueden obtenerse de los elementos de la red, y que pueden ser útiles para mejorar la eficacia de los métodos de optimización. En el análisis, se ha prestado especial atención a las trazas de conexión, como principal fuente de información utilizada por los algoritmos propuestos en este trabajo.

Como la optimización de la cobertura y la capacidad puede llevarse a cabo ajustando diferentes parámetros, en capítulos posteriores se presentan dos algoritmos que modifican sendos parámetros a partir de indicadores sintéticos, propuestos y diseñados en esta Tesis, y obtenidos con información de los eventos. Estos algoritmos modifican, respectivamente, el ángulo de inclinación de las antenas y la potencia de transmisión en el enlace descendente.

Una vez expuestos los conceptos necesarios, el Capítulo 2 presenta una metodología genérica para construir nuevos indicadores a partir de la información extraída de los eventos en los archivos de trazas. En el Capítulo 3 se muestra un estudio de los diversos indicadores de capacidad utilizados por los operadores móviles, obtenidos a partir de contadores y trazas de una red real. En el Capítulo 4 se presenta un método de optimización automática de la cobertura y la capacidad que ajusta el ángulo de inclinación de las antenas a partir de contadores sintéticos obtenidos de la información almacenada en archivos de trazas, mientras que en el Capítulo 5 se explica un método alternativo de optimización automática de la cobertura y la capacidad que ajusta la potencia de transmisión en el enlace descendente con una metodología similar.

## Capítulo 2

# Procesado de información para la generación de contadores sintéticos

Los mensajes de control intercambiados entre los elementos de una red móvil son una información extremadamente valiosa para mejorar la eficacia de los procesos de optimización de red. En este capítulo se presenta una metodología genérica para procesar trazas de conexión de una red móvil, con el fin de generar nuevos indicadores de rendimiento diferentes a los suministrados por los fabricantes.

El capítulo se divide en cinco secciones. La Sección 2.1 introduce el estado de la investigación y la tecnología actual, precisando las contribuciones de este capítulo. A continuación, en la Sección 2.2, se presenta la arquitectura típica de una herramienta para el procesado de eventos complejos, junto con una descripción somera del conjunto de aplicaciones para tal fin existentes en el mercado. En la Sección 2.3, se describe la herramienta desarrollada en esta Tesis para el procesado de trazas, mientras que en la Sección 2.4, se muestra un caso de uso de la herramienta en el que se genera un nuevo indicador para la interfaz radio. Por último, la Sección 2.5 presenta las conclusiones de este capítulo.

### 2.1. Introducción

Las redes móviles generan una gran cantidad de información en forma de mediciones e interacciones de control. Parte de esa información se incluye en registros de eventos, que contienen información muy detallada de los mensajes de control

intercambiados por los elementos de la red, y que se almacenan en archivos de trazas. Desafortunadamente, la ingente cantidad de información suministrada por los eventos ha impedido que los operadores puedan sacar el máximo partido de esta fuente de información para tareas de optimización de red. Así, la práctica habitual es usar los eventos de forma aislada para la diagnosis de problemas detectados en la red [11]. En ausencia de información más detallada, la optimización de la red se basa actualmente en los contadores (PM), a partir de los cuales se calculan los indicadores de rendimiento principales (KPI). Estos contadores son el resultado de un largo proceso de especificación e implementación realizado por los fabricantes, lo que justifica que el conjunto de contadores sea todavía muy limitado en tecnologías recientes como LTE.

Se espera que esta situación cambie con los últimos avances en tecnologías de la información, que hoy permiten procesar grandes volúmenes de información en tiempo real [10]. El análisis masivo de datos (*Big Data Analytics*, BDA) permite descubrir patrones ocultos, correlaciones desconocidas o tendencias del mercado. En redes móviles, el concepto *big data* hace referencia al conjunto de datos formado por los parámetros de configuración, los contadores de rendimiento, las alarmas, los registros de eventos, los registros de tarificación o los registros de incidentes [11].

Para procesar el gran volumen de datos generado por sistemas de información, han aparecido en el mercado varias herramientas basadas en el concepto de procesado de eventos complejos (*Complex Event Processing*, CEP). Una herramienta CEP es un sistema de gestión de flujos de datos diseñado para operar con la información de eventos recopilados de forma continua, con el que desarrollar aplicaciones para el filtrado, la correlación y el procesado de los eventos en tiempo real [12]. Este tipo de sistemas permite a los operadores trabajar con grandes cantidades de información heterogénea, enlazando datos almacenados en diferentes localizaciones, generados por diferentes fuentes y en distintos momentos. Desde su concepción, los sistemas CEP se han aplicado en ámbitos tan diversos, como el mundo financiero o las telecomunicaciones.

### 2.1.1. Trabajo relacionado y contribuciones

La metodología CEP se concibió como herramienta para la gestión automática de sistemas [12, 33, 34]. En [35], se presenta un estudio de la tecnología de procesamiento de eventos, desgranando sus capacidades, las aplicaciones CEP comerciales y los

ámbitos de aplicación donde se ha implantado el procesado de eventos. En [36, 37] se presentan estudios similares de las herramientas de procesado de eventos disponibles en el mercado. Otras referencias más específicas analizan herramientas de procesado de eventos concretas, tales como Borealis [38] (la versión evolucionada de las aplicaciones Aurora [39] y Medusa [40]), Cayuga [41] o Eucalyptus [42].

La metodología CEP se ha extendido a numerosas áreas de aplicación. El primer ámbito donde se introdujo CEP fue el mundo financiero. En [43], se repasa la aplicación de la metodología CEP en la gestión de negocios, presentando la herramienta CEP llamada AMiT (*Active Middleware Technology*). Del mismo modo, en [44, 45] se muestra cómo la metodología CEP puede usarse para monitorizar y automatizar actividades financieras. Otra aplicación asociada al ámbito financiero es la seguridad. En [46], se presenta el diseño, la implementación y la evaluación de un sistema CEP para detectar fraudes en las tarjetas de créditos. En [47], se propone una solución CEP para proteger organizaciones dispersas geográficamente de ataques cibernéticos coordinados. Otro dominio donde se aplica CEP es la prestación de servicios, tales como los servicios médicos o industriales. En [48], se presenta un sistema CEP aplicado al cuidado de la salud en tiempo real, mientras que en [49] propone el uso de la metodología CEP con fines industriales.

Mientras los conceptos de BDA y CEP han atraído la atención de la comunidad académica de ciencias de la computación [50], estos términos son relativamente nuevos en el campo de las telecomunicaciones. Las primeras áreas que han hecho uso de la metodología CEP son la identificación por radiofrecuencia (*Radio Frequency IDentification*, RFID) y las redes de sensores. Por ejemplo, en [51] se presenta un mecanismo de procesado de eventos basado en RFID para una empresa de sistemas de información, mientras que en [52] se describe un prototipo RFID que también utiliza la metodología CEP para el procesado de información. Por otro lado, en [53] se propone una arquitectura de referencia para redes de sensores que procesa cadenas de eventos complejos en tiempo real, mientras que [54] presenta una aplicación basada en CEP para detectar objetos e intrusos en una red de sensores inalámbricos. Del mismo modo, la metodología CEP puede utilizarse también para procesar flujos de datos dentro del ámbito del Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT) [55] o enlazar mensajes de diferentes servicios web [56].

En el ámbito de la telefonía móvil, aún no se ha generalizado el uso de la metodología CEP, a pesar de la enorme cantidad de datos generada en las redes móviles. En [57] se describe una arquitectura para aprovechar los estadísticos

basados en eventos para monitorizar y optimizar el rendimiento en tiempo real de redes GSM (*Global System for Mobile*). Más recientemente, en [58] se presenta un análisis de nuevas oportunidades de negocio que pueden surgir del uso de BDA en redes celulares. BDA también se ha identificado como una herramienta clave para el desarrollo de SON en las futuras redes 5G [11, 59]. En [11], los autores muestran cómo los operadores de red pueden aprovechar la ingente cantidad de datos generados en las redes 5G para mejorar el rendimiento de los algoritmos SON. En [59], se identifican los desafíos actuales en SON, proponiendo el uso de BDA para mejorar la eficacia de los algoritmos SON, y así cumplir con los exigentes requisitos de 5G. Con el uso de BDA, se persigue que los algoritmos SON adquieran: a) plena inteligencia del estado actual de la red, b) capacidad de predicción del comportamiento de usuarios, y c) capacidad de asociar dinámicamente la respuesta de la red a los parámetros de la red. Estas capacidades se consiguen mediante técnicas de aprendizaje automático y minería datos [60], que transforman grandes cantidades de datos en una base de conocimientos. En [61], se presenta un sistema de análisis de datos en tiempo real para detectar y predecir la evolución espacial y temporal de puntos críticos de tráfico y secuencias habituales de traspaso en una red celular, mediante la representación de los datos de la red con grafos geolocalizados que evolucionan en el tiempo. Con un alcance más limitado, [62] revisa los datos de red útiles para la resolución automática de problemas en redes móviles, y [63] propone la generación de nuevos KPI para la autocuración de redes móviles a partir de trazas de conexión.

Hasta donde se conoce, ningún trabajo anterior ha propuesto el uso de CEP para generar nuevos contadores de rendimiento a partir de los datos de una red móvil, con el objetivo de mejorar los procesos de optimización de red. Por ello, en este capítulo se presenta una metodología genérica de CEP que puede utilizarse para generar nuevos contadores de rendimiento que permitan potenciar los algoritmos SON existentes. Estos nuevos contadores, referidos como contadores sintéticos, se construyen combinando eventos y contadores generados por diferentes elementos de la red en distintos momentos. Estos contadores sintéticos permiten extender, de forma flexible, el conjunto de contadores que actualmente proporcionan los fabricantes, y pueden usarse para implementar contadores temporales que puedan probarse rápidamente en la red real, antes de integrarlos en los equipos reales. Del mismo modo, los contadores sintéticos pueden ser usados por las compañías que ofrecen servicios de optimización de red, para obtener nuevos KPI adaptados a las necesidades específicas de cada operador.

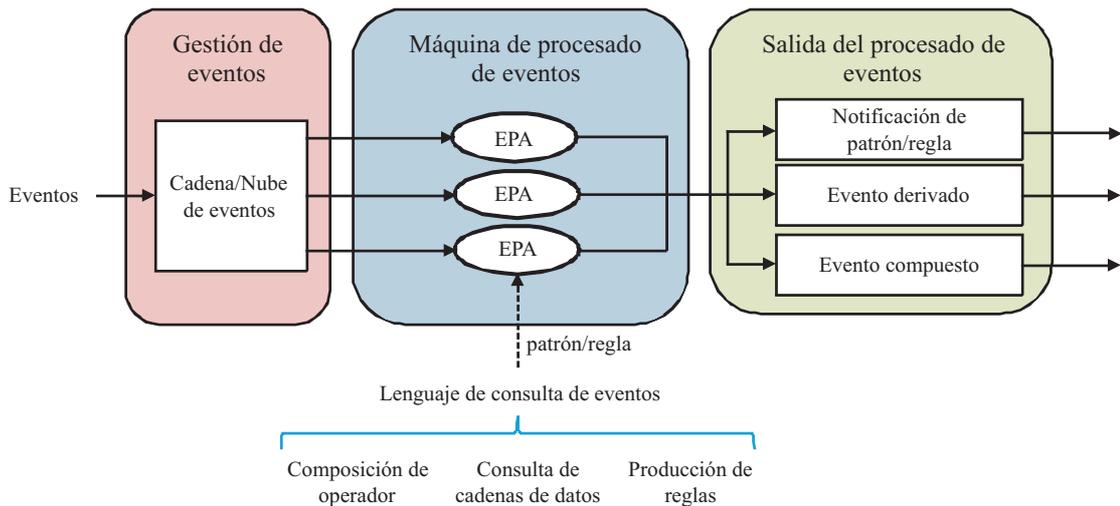


FIGURA 2.1: Arquitectura de procesamiento de eventos.

## 2.2. Procesado de eventos complejos

En esta sección se introduce la arquitectura general de un sistema CEP. A continuación, se ofrece un breve resumen de las herramientas CEP disponibles en el mercado, para concluir con la descripción de la herramienta utilizada en este trabajo.

### 2.2.1. Arquitectura de procesamiento de eventos

El procesado de eventos complejos forma parte de una arquitectura orientada a eventos (*Event-Driven Architecture*, EDA) específicamente diseñada para la producción, detección, consumo y reacción a eventos ordenados temporalmente y obtenidos de múltiples fuentes. Para este propósito, la metodología CEP permite el filtrado, la combinación y la agregación de la información de los eventos en tiempo real.

Como se muestra en la Figura 2.1, un sistema de procesamiento de eventos puede separarse en tres bloques funcionales: gestión de eventos, máquina de procesamiento y salida.

#### Gestión de eventos

El procesado de eventos se aplica generalmente a un sistema de información ya existente que proporciona eventos a su salida. Un evento es cualquier cosa que

sucede, o se considera que sucede. Estos eventos pueden proceder del exterior (p. ej., desde una base de datos externa) o del interior (p. ej., un sistema interno de información de la empresa), y estar generado en el mundo real (p. ej., un sensor) o virtual (p. ej., por un servicio).

Los eventos en sistemas de información incluyen normalmente datos y mensajes que registran las actividades. Estos eventos pueden ser simples o complejos. Un evento complejo es un evento que resume un conjunto de eventos simples. Para facilitar su tratamiento, los eventos pueden organizarse en una cadena de eventos o en una nube de eventos. Una cadena de eventos es una secuencia de eventos ordenados linealmente por registros de tiempo (*timestamps*), que indican el momento en el que el evento tuvo lugar. Por otro lado, una nube de eventos es un conjunto de cadenas de eventos obtenidos de múltiples fuentes. Mientras que las cadenas de eventos se gestionan con las herramientas tradicionales de procesamiento de cadenas de eventos (*Event Stream Processing*, ESP), las herramientas CEP permiten además gestionar las nubes de eventos, aprovechando su capacidad para combinar datos de múltiples fuentes (de ahí el término “complejo”).

En las redes móviles, los eventos son recopilados por diversas fuentes. Cada fuente queda definida por una combinación de tipo de evento (p. ej., medida radio, establecimiento de sesión, traspaso, ...), elemento de red (p. ej., estación base, emplazamiento, interfaz, ...) o capa de protocolo (p. ej., capa física, capa de control de acceso al medio, capa de red, ...). De esta forma, la metodología CEP permite combinar datos de múltiples fuentes.

## Máquina de procesado de eventos

Tanto para el caso de cadenas como de nubes de eventos, una máquina de procesado de eventos (*Event Processing Engine*, EPE) es la encargada de procesar los eventos. Los agentes de procesado de eventos (*Event Processing Agent*, EPA) son los responsables de recopilar los eventos a la entrada. Un EPA puede filtrar eventos duplicados, rectificar errores o enlazar formatos [51]. De esta forma, la máquina procesa los eventos y notifica si ciertos patrones o reglas predefinidos se cumplen.

Los patrones o reglas se definen en un lenguaje de consulta de eventos (*Event Query Language*, EQL), también conocido como lenguaje de procesamiento de

eventos (*Event Processing Language*, EPL). El EQL es un lenguaje de programación a alto nivel que permite reducir el esfuerzo para desarrollar aplicaciones CEP que gestionan complicados patrones de eventos estructurados en múltiples cadenas, cuyo procesado da lugar al evento complejo. Existen tres estilos de lenguaje para la implementación de EQL [64]:

- a) *Lenguaje de composición de operador* (también conocido como lenguaje de patrones de eventos), que define eventos complejos a partir de la unión de eventos simples, mediante el uso de diferentes operadores lógicos y anidando expresiones (p. ej., un evento complejo es igual a la unión de dos eventos simples, 1 y 2).
- b) *Lenguaje de consulta de cadenas de datos* (también conocido como lenguaje de análisis de cadenas de eventos), que define eventos complejos a partir de cadenas de eventos, utilizando expresiones basadas en un lenguaje de consulta de bases de datos estándar (*Structured Query Language*, SQL) con sentencias del tipo “*select* (lista de campos deseados) *from* (lista de eventos) *where* (condiciones) ...”. Las relaciones resultantes se convierten en nuevas cadenas de datos.
- c) *Lenguaje de producción de reglas*, que define eventos complejos mediante la especificación de acciones que se ejecutan cuando se alcanzan ciertos estados. Estos estados se definen mediante reglas del tipo “CUANDO (condición), ENTONCES (acción)” (p. ej., CUANDO evento simple 1 Y evento simple 2, ENTONCES evento complejo).

Hoy en día, los lenguajes de consulta de cadenas de datos basados en SQL son el método más utilizado para la definición de eventos complejos, debido a que pueden integrarse fácilmente con las bases de datos, compartiendo las funciones comunes de SQL. Sin embargo, algunas herramientas combinan los tres estilos de programación para beneficiarse de sus ventajas.

## Salida del procesado de eventos

La salida de la máquina de procesado de eventos puede ser dos acciones. Por un lado, la máquina puede simplemente notificar que se ha detectado un patrón o regla definido, y quizás actualizar algún contador. Alternativamente, puede generarse

un nuevo evento. Este nuevo evento puede ser un evento compuesto o un evento derivado, dependiendo de la información incluida en el nuevo evento. Un evento compuesto se crea cuando la información se extrae de campos de los eventos simples (p. ej., el evento compuesto X selecciona la información CAMPO A, CAMPO B y CAMPO C del evento simple 1, y CAMPO A, CAMPO D Y CAMPO E del evento simple 2 que lo generaron). Por el contrario, un evento derivado incluye nueva información no existente en los eventos simples previos, que se proporciona específicamente cuando se activa el nuevo evento (p. ej., el evento derivado X genera la nueva información CAMPO A, CAMPO B y CAMPO C cuando los eventos simples 1 y 2 cumplen ciertas condiciones).

### 2.2.2. Software CEP

En el mercado existen plataformas CEP con habilidades muy diferentes. La Figura 2.2 muestra un esquema que resume las distintas herramientas CEP disponibles en el mercado a lo largo de los últimos años [65]. Se aprecia cómo en la última década han aparecido un gran número de plataformas, coincidiendo con la generalización del análisis masivo de datos en el ámbito de las tecnologías de la información. Otra observación importante es que, a pesar de que existen distintas opciones en las que basar el diseño de las herramientas (p. ej., en reglas, en estados, en redes neuronales, . . .), la mayoría de las herramientas desarrolladas están basadas en consultas (*query-based tools*).

Dentro de las herramientas que actualmente existen en el mercado, algunos productos comerciales son simplemente programas con adaptadores para herramientas de control, alerta y administración, tales como IBM Operational Decision Manager, IBM InfoSphere Streams, SAP Event Stream Processor, Tibco BusinessEvents o StreamBase. Otras plataformas de procesado de eventos, como, por ejemplo, FeedZai Pulse y SQLStream s-Server, tienen funcionalidades adicionales, tales como la consulta, el reporte, los análisis interactivos o de indicadores de rendimiento principales, con el objetivo de crear aplicaciones inteligentes para el soporte de operaciones. Por último, los sistemas distribuidos emergentes denominados como plataformas de computación de cadenas distribuidas (*Distributed Stream Computing Platform*, DSCP), tales como Apache Samza, Spark y Storm, son entornos de uso general sin funciones nativas de CEP, pero que ofrecen una alta escalabilidad y capacidad de extensión.

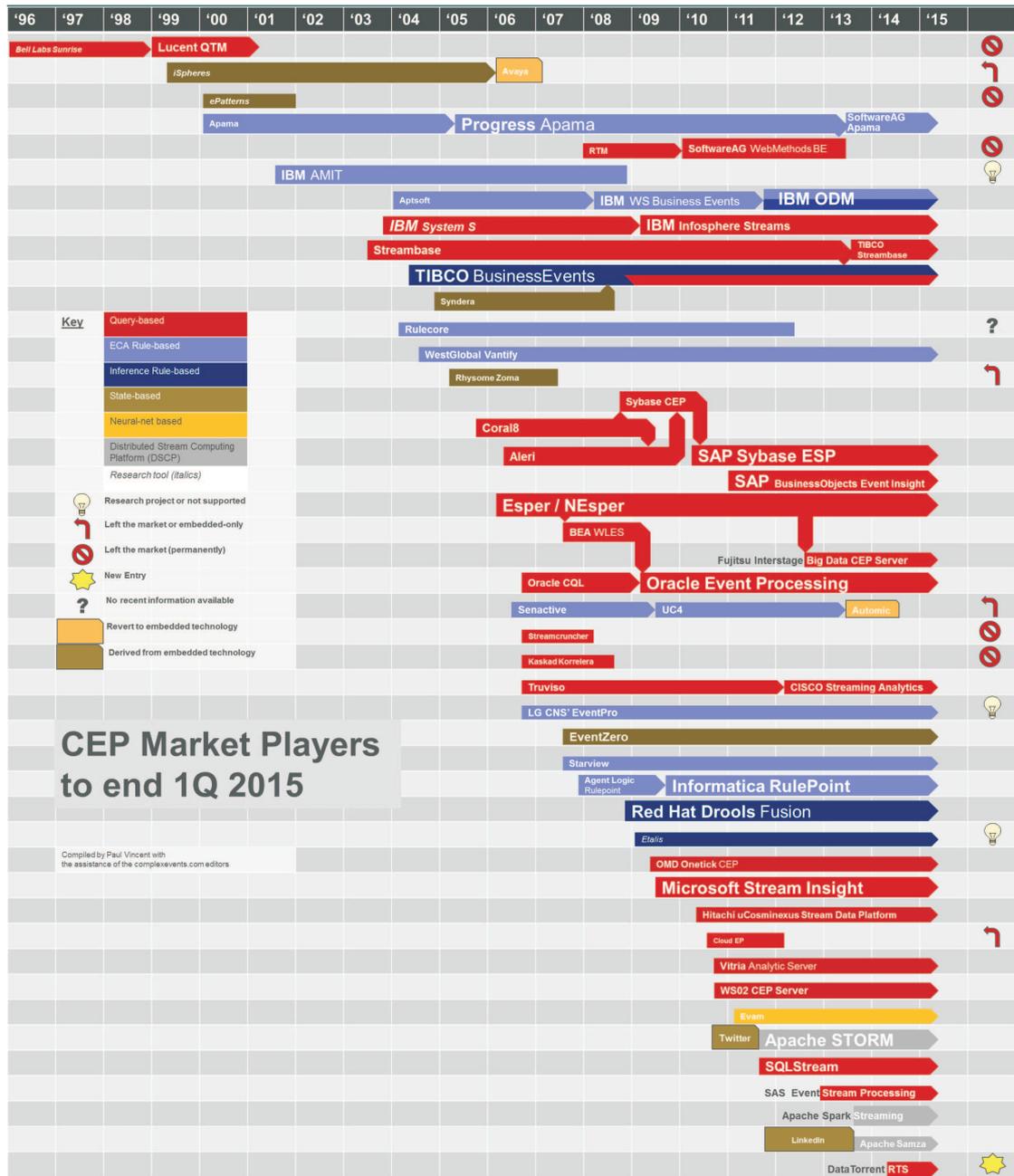


FIGURA 2.2: Herramientas CEP disponibles en el mercado [65].

En esta Tesis, se ha seleccionado el paquete Esper [66]. Esper es uno de los pocos programas de código abierto en el mercado que permite hacer uso de la metodología CEP de manera gratuita. Desarrollado en JAVA, Esper puede integrarse en distintas plataformas o ser usado de manera independiente. Esper combina el procesamiento de eventos tradicionales y complejos (es decir, ESP y CEP) y ofrece un lenguaje de consulta de cadenas de datos basado en SQL, que facilita la integración con base de datos.

## 2.3. Estructura propuesta para la obtención de contadores sintéticos

En esta sección se presenta una estructura de procesado de trazas de conexión basada en CEP diseñada específicamente para construir nuevos indicadores de rendimiento que permitan enriquecer la información proporcionada por los contadores tradicionales de los fabricantes de redes móviles. La estructura propuesta consta de tres procesos: decodificación, sincronización y correlación de eventos. Estos procesos se detallan a continuación.

### 2.3.1. Decodificación de eventos

Como se describió en la Sección 1.4, los archivos de trazas de conexión (DTF) incluyen todos los eventos reportados por un eNB, que han sido previamente activados mediante el archivo de configuración (CTF).

La Figura 2.3 muestra la tabla de ejemplo de trazas de conexión CTR en bruto presentada en la Sección 1.4. En la figura se observa cómo eventos de distinto tipo (p. ej., *TRACE\_RELEASE* = 8 y 11, referidos a eventos de traspaso y medidas de potencia definidos por 3GPP, respectivamente) se almacenan en orden secuencial. Por ello, este primer bloque de decodificación tiene como principal tarea obtener únicamente los eventos incluidos en los DTF que serán utilizados posteriormente. Con este objetivo, el decodificador de eventos primero separa la información de los DTF de cada eNB en diferentes archivos que agrupan los eventos del mismo tipo.

Posteriormente, la decodificación se realiza mediante una herramienta de análisis sintáctico (*parser*), que extrae la información contenida en los archivos de trazas. Para desarrollar esta herramienta de decodificación de eventos, deben considerarse las siguientes características:

- a) Cada proveedor de equipos de red (p. ej., Ericsson, Nokia, Huawei, ...) define el formato de sus propios eventos (eventos internos).
- b) La cabecera de los eventos debe estar totalmente detallada, así como los parámetros (atributos) de cada tipo de mensaje.

EVENTID	TRACE_EVENTID	TRACE_RELEASE	ARRAY_PARAMS_VALUE	MESSAGE
00000000	3075	2074	0,0,84000810,0,0,2,0,0,1,3,2,0,3994,...	(NULL)
00000001	3076	2074	0,2,432,0,0,2,84000810,0,2,0,0,3994,...	(NULL)
00000002	3108	2074	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,84000810,,1417478...	(NULL)
00000003	8	2074	419860,86024773,262144,10,261005,...	261005000084b8e020080
00000004	11	2074	419860,36,36,35,168554573,,0,,45,,5...	081224483061a4593768d...
00000005	4097	2074	419860,,,0,168550728,262144,14175...	(NULL)
00000006	8	2074	419860,15765308,0,168550728,2621...	201215880000c4e04200...
00000007	4106	2074	,,,,,,168550728,,,,,,,,,,,,,8,,,4002,14...	(NULL)
00000008	4097	2074	419860,,,0,168554518,262144,14175...	(NULL)
00000009	8	2074	419860,17832917,0,168554518,2621...	201215880000c4e04200...
00000010	8	2074	419860,15765308,0,168550728,2621...	22100500064b8e018060
00000011	4106	2074	,,,,,,168554518,,,,,,,,,,,,,8,,,4003,14...	(NULL)
00000012	11	2074	419860,47,46,35,168550728,,0,,,,,4,,3...	0811af582065ae55d468c...
00000013	2058	2074	419860,66111731,66111731,0,32f451...	000000814e000006000a0...
00000014	2059	2074	419860,637,66111731,0,168554562,2...	2000006*000004000a400...
00000015	4113	2074	419860,0,,168554562,141752340318...	(NULL)

FIGURA 2.3: Ejemplo de trazas de conexión CTR en bruto.

- c) La cabecera del evento tiene un tamaño fijo, pero el tamaño del contenedor del mensaje puede variar; es decir, el número de atributos depende del tipo de mensaje, y algunos eventos podrían no incluir ningún atributo en el contenedor del mensaje.
- d) La cabecera del evento debe incluir un atributo que indique la longitud del mensaje del evento, así como otro que indique el tipo de evento. A partir del atributo de longitud del evento, se pueden separar los distintos eventos almacenados en un mismo DTF.
- e) Los eventos existentes pueden ser modificados en versiones posteriores del estándar o de los proveedores. Por ejemplo, se pueden incluir nuevos atributos en un tipo de evento, o, por el contrario, eliminar alguno ya existente. Por tanto, la herramienta debe actualizarse regularmente a fin de poder soportar todas las versiones de interfaces y equipamiento (esto es, de eventos) existentes. En este sentido, conviene resaltar que en una red real pueden convivir en la misma área geográfica distintas versiones del mismo equipo de red, cada uno con su correspondiente juego de eventos.

Un ejemplo de herramienta de análisis sintáctico gratuita y accesible por internet es Marben [67], un decodificador de mensajes ASN.1 (*Abstract Syntax Notation 1*) para eventos estandarizados por el 3GPP (eventos externos) [21]. Así, esta herramienta sólo decodifica los eventos externos (es decir, eventos RRC, S1, X2, ...), debido a que estos eventos son los únicos cuyas características son de dominio público. Los archivos de entrada ASN.1 soportados por esta herramienta deben estar en formato crudo (binario) o hexadecimal [21], mientras que los archivos de salida son en formato XML (*eXtensible Markup Language*).

En este trabajo, se utiliza una herramienta de análisis sintáctico privada, desarrollada por el fabricante de los equipos de red (en este caso, Ericsson), para la decodificación de mensajes ASN.1 de eventos LTE. Para facilitar su manejo, los eventos decodificados se almacenan en archivos de formato CSV (*Comma Separated Values*). Así, la salida de la etapa de decodificación consiste en una serie de archivos, que separan cada tipo de evento, eNB y ROP, y que constituyen la entrada del bloque siguiente de sincronización.

### 2.3.2. Sincronización de eventos

La entrada de este bloque son los archivos de trazas procesados, separados por tipo de evento, eNB y ROP, obtenidos a la salida del decodificador de eventos. La siguiente acción es ordenar cronológicamente todas las trazas de un mismo tipo de evento, para obtener un único fichero por tipo de evento, incluyendo todos los eNB y todos los ROP en los que se divide el periodo de monitorización. Esta acción se realiza por un módulo de sincronización, que une los archivos de entrada por tipo de evento y ordena los eventos por el atributo temporal *timestamp*. Como resultado, se obtiene un archivo que incluye todos los eventos de un mismo tipo, reportados por todos los usuarios de todos los eNB durante el tiempo de activación de trazas, ordenados linealmente por tiempo.

### 2.3.3. Correlación de eventos

El proceso de correlación de eventos es el núcleo de la herramienta de procesado de eventos complejos. En el esquema propuesto, la máquina de correlación se implementa con el programa de código abierto Esper [66]. La entrada a Esper es el conjunto de trazas decodificadas y sincronizadas en las etapas previas, donde

cada archivo contiene los eventos de un tipo ordenados temporalmente. Cada uno de estos archivos representa una cadena de eventos, que se procesan de manera continua. A partir de ellos, Esper genera y agrega información mediante la definición de sentencias EPL similares a las sentencias SQL. Una vez se registran (es decir, se dan de alta) las sentencias EPL, los archivos de entrada se procesan como cadenas de datos. La salida de las sentencias EPL puede utilizarse como entradas de otras sentencias EPL.

La estructura típica de una sentencia EPL es la siguiente:

```
select lista_ atributos

from definición_cadena [as nombre] [, definición_cadena [as nombre]] [, ...]

[where condiciones_búsqueda]

[group by lista_expresiones_agrupamiento]

[having condiciones_búsqueda_agrupamiento]

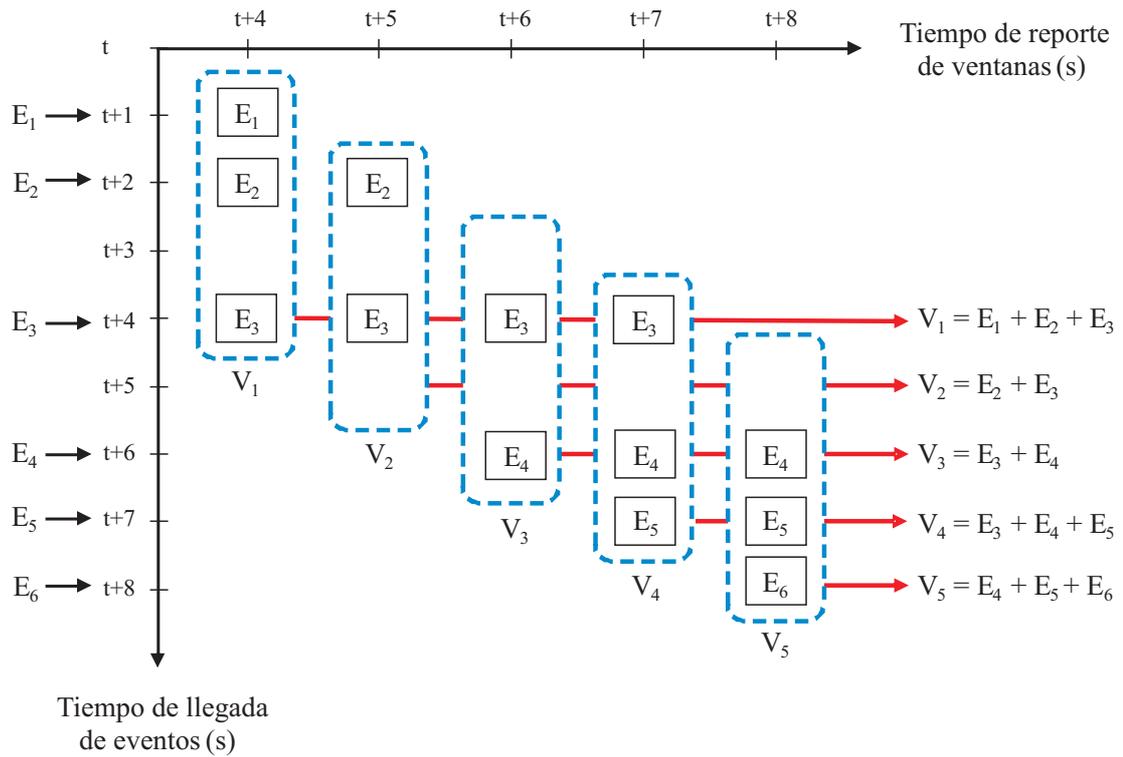
[output especificaciones_salida]

[order by lista_expresiones_ordenación]

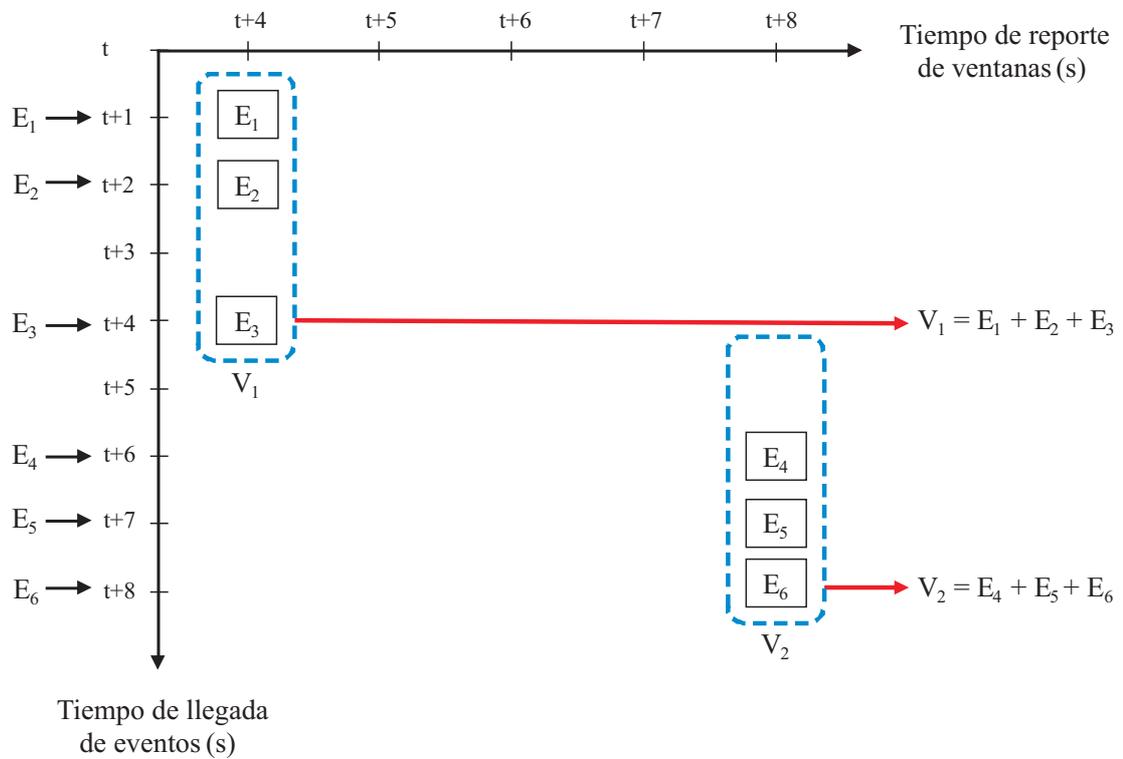
[limit numero_filas]
```

La palabra clave *select* indica los atributos de los eventos seleccionados, mientras que *from* indica las cadenas de eventos analizadas. Para simplificar su uso, puede asignarse un nombre corto a las cadenas de eventos o los atributos con el operador *as*. El término *where* se utiliza para definir las condiciones de filtrado de los eventos. La expresión *group by* se emplea para organizar datos idénticos en grupos. El término *having* se utiliza para añadir condiciones de filtrado a la expresión de agrupación. La palabra clave *output* se usa para controlar la velocidad a la cual los eventos son suministrados por la máquina de correlación de eventos. La expresión *order by* ordena los datos en orden ascendente o descendente. Finalmente, el término *limit* se usa, junto a las expresiones *order by* y *output*, para limitar los resultados de la consulta dentro de un rango específico. Las palabras claves *select* y *from* son obligatorias, mientras que el resto de términos son opcionales (y, por eso, se expresan entre corchetes). Del mismo modo, el orden de los términos debe mantenerse como se representan.

Una funcionalidad importante proporcionada por las sentencias EPL es la definición de ventanas. Una ventana puede estar definida por un periodo de duración (ventana lógica) o por un número de veces que ocurre un evento (ventana física). Una ventana también puede configurarse como deslizante o de saltos. Una ventana deslizante extiende el intervalo especificado en el pasado desde el momento presente, reportando un evento cuando termina. Por el contrario, una ventana de saltos agrupa eventos y los reporta sólo cuando la ventana de tiempo se cierra. Como consecuencia, una ventana deslizante informa de forma más o menos continua conforme se avanza en el tiempo (deslizante lógica) o los eventos van ocurriendo (deslizante física). Por el contrario, una ventana lógica de saltos informa sólo al final del periodo de tiempo especificado (es decir, una vez cada periodo de tiempo) y una ventana física de saltos sólo después de que algunos eventos ocurran un determinado número de veces (es decir, una vez cada cierto número de ocurrencias de un evento) [66]. Las Figuras 2.4 y 2.5 muestran ejemplos de ventanas lógicas y físicas, respectivamente, configuradas, a su vez, en modo deslizante y de saltos (Figuras (a) y (b), respectivamente). Las figuras representan en el eje y el tiempo de llegada de los distintos eventos ( $E_i$ ), mientras que en el eje x se muestra el instante de reporte de las ventanas ( $V_i$ ). Se observa que, en todos los ejemplos, los eventos llegan siempre en el mismo instante de tiempo  $t+i$ , por lo que la diferencia entre las figuras (a) y (b) reside en el instante de tiempo en el que se reporta cada ventana, dependiendo de la configuración de la misma. En las Figuras 2.4 (a)-(b), se presentan dos ejemplos de ventanas lógicas configuradas para un intervalo de 4 segundos (desde  $t+i$  hasta  $t+i+3$ ). La diferencia principal entre ambas figuras es que, en el caso de la Figura 2.4 (a), el reporte de las ventanas es cada segundo (ventana deslizante), mientras que en la Figura 2.4 (b), es cada 4 segundos (ventana de salto). Algo similar ocurre con las Figuras 2.5 (a)-(b). En este caso, las ventanas físicas están definidas para reportar 3 eventos. La diferencia principal entre las Figuras 2.5 (a) y (b) es que, en el caso de la Figura 2.5 (a), la diferencia entre una ventana  $V_i$  y la siguiente  $V_{i+1}$  es que se descarta el primer elemento que se almacenó en la ventana  $V_i$ , manteniendo la ventana  $V_{i+1}$  los otros 2 eventos (ventana deslizante), mientras que, en la Figura 2.5 (b), cada vez que se reporta una ventana  $V_i$ , los eventos que se reportan son diferentes (ventana de salto).

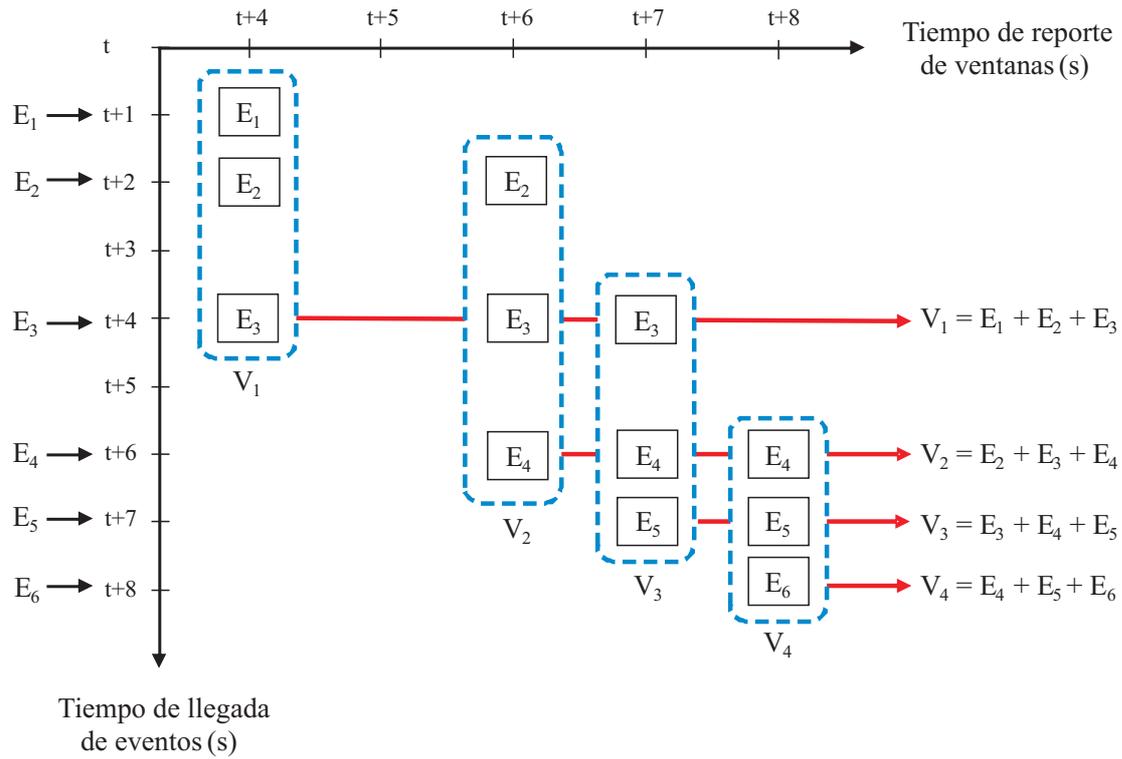


(a) Deslizante.

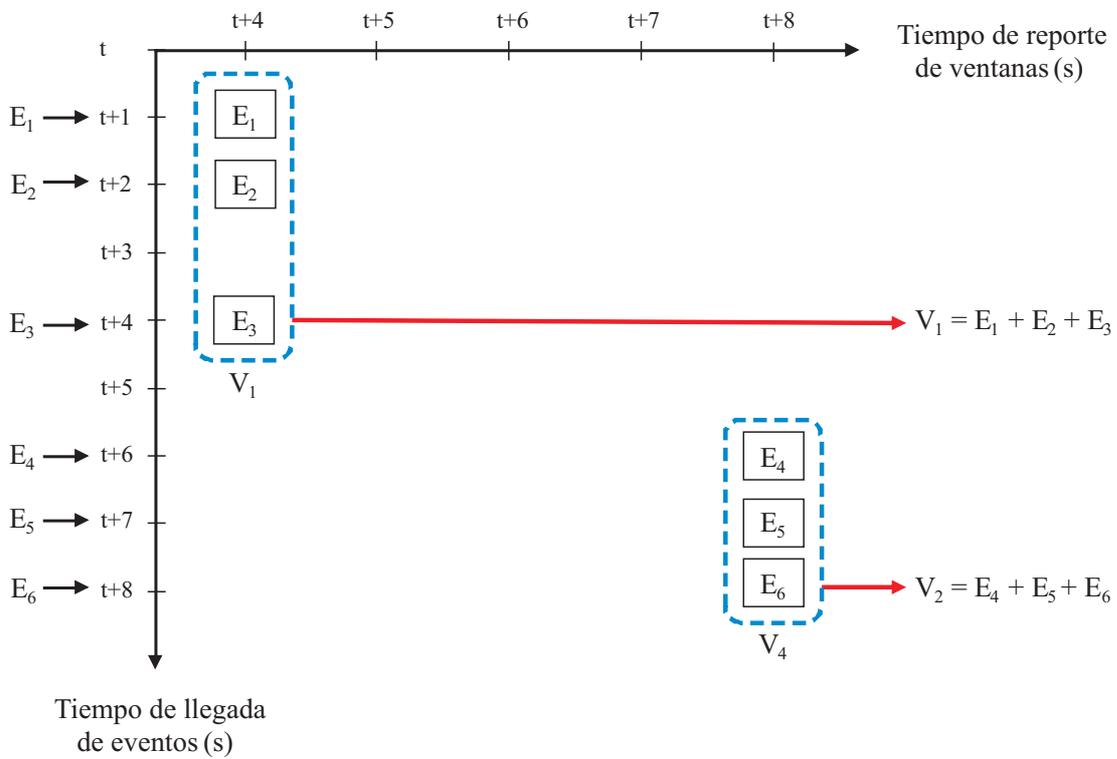


(b) De salto.

FIGURA 2.4: Ejemplo de ventanas lógicas.



(a) Deslizante.



(b) De salto.

FIGURA 2.5: Ejemplo de ventanas físicas.

## 2.4. Caso de uso para la obtención de contadores sintéticos

En esta sección se presenta un ejemplo de implementación de un contador sintético mediante la herramienta de procesado de eventos. El objetivo es mostrar la capacidad del procesado de trazas para generar indicadores sofisticados orientados a la optimización de redes móviles. Por claridad, primero se explica el diseño del contador sintético y luego se presentan los resultados obtenidos a partir de trazas recopiladas de una red real.

### 2.4.1. Diseño del contador sintético

El contador sintético a diseñar pretende calcular el nivel medio de señal piloto (RSRP) recibido por los UE justo antes de un traspaso (*HandOver*, HO). Esta información, que no se recopila en las redes actuales, puede usarse para detectar adyacencias donde los trasposos se realizan demasiado pronto o demasiado tarde. Un HO se realiza demasiado tarde cuando el UE recibe un nivel de RSRP excesivamente bajo de la nueva celda destino antes de realizar el HO, lo que podría causar llamadas caídas en la celda origen. Por el contrario, un HO se realiza demasiado pronto cuando un UE realiza un traspaso, a pesar de que el nivel RSRP de la celda origen es alto, realizándose un HO innecesario. Como consecuencia, este tipo de traspaso temprano incrementa la carga de señalización de la red innecesariamente. Para poder generar este nuevo indicador, se combina información de nivel de celda, de usuario y de conexión.

La implementación de un contador sintético incluye tres componentes: a) las cadenas de eventos y atributos requeridos como entrada, b) las reglas de correlación entre diferentes cadenas de eventos, y c) las acciones a ejecutar cuando las reglas se cumplen. La Figura 2.6 muestra el código utilizado en Esper para implementar el contador sintético propuesto, incluyendo la definición de la sentencia EPL con sus cadenas de eventos, atributos y reglas (líneas 1-19), la creación de la sentencia EPL (línea 20), la definición de las acciones de salida (línea 21) y la activación/registro de la sentencia EPL (línea 22). A continuación, se detallan algunos de los componentes.

```

1  expresión = "select hs.TIMESTAMP as hsTime, hs.CELL_ID as hsCellId, hs.UE_ID as hsUeId,
2              hs.TARGET_CELL_PCI as hsSelectedTargetPCI, hs.NEW_UE_ID as hsNewUeId,
3              ht.TIMESTAMP as htTime, ht.CELL_ID as htCellId, ht.NEW_UE_ID as htUeId,
4              ht.OLD_UE_ID as htOldUeId, ht.CELL_PCI as htPCI,
5              ueMeas.TIMESTAMP as ueMeasTime, ueMeas.CELL_ID as ueMeasCellId,
6              ueMeas.UE_ID as ueMeasUeId, ueMeas.SERVING_RSRP as ueMeasRsrpValue
7  from X2_HANDOVER_REQUEST_ACKNOWLEDGE(MESSAGE_DIRECTION=0)
8       .win:ext_timed(TIMESTAMP, 500 msec) as hs,
9       X2_HANDOVER_REQUEST_ACKNOWLEDGE(MESSAGE_DIRECTION=1)
10      .win:ext_timed(TIMESTAMP, 500 msec) as ht,
11      INTERNAL_EVENT_UE_MOBILITY.std:groupwin(UE_ID).win:length(1) as ueMeas
12  where hsCellId != htCellId
13        and hsUeId = htOldUeId
14        and hsNewUeId = htUeId
15        and hsSelectedTargetPCI = htPCI
16        and hsCellId = ueMeasCellId
17        and hsUeId = ueMeasUeId
18        and Math.abs(hsTime - htTime) ≤ 500 msec
19        and Math.abs(hsTime - ueMeasTime) ≤ 500 msec";
20  sentenciaEPL = epService.getEPAdministrator().createEPL(expresión);
21  RsrpWhenHoListener rsrpWhenHoListener = new RsrpWhenHoListener();
22  sentenciaEPL.addListener(rsrpWhenHoListener);

```

FIGURA 2.6: Código Esper para el contador sintético *RSRP antes de HO*.

## Cadenas de eventos

En **expresión**, se definen las cadenas de eventos requeridas con el término **from** (líneas 7-11). Se solicitan dos cadenas de eventos: la cadena de eventos externos (estándares) `X2_HANDOVER_REQUEST_ACKNOWLEDGE` y la cadena de eventos internos (propios de la fabricante) `INTERNAL_EVENT_UE_MOBILITY`. Ambas cadenas de entrada consisten en una serie de registros procedentes del eNB. El eNB almacena un nuevo registro en la cadena de eventos `X2_HANDOVER_REQUEST_ACKNOWLEDGE` cuando existe una petición de HO saliente o entrante. Del mismo modo, el eNB almacena un registro nuevo en la cadena de eventos `INTERNAL_EVENT_UE_MOBILITY` cuando finaliza una conexión. En el ejemplo, el término **from** consta de tres componentes. Los dos primeros (líneas 7-10) se refieren a la cadena de eventos `X2_HANDOVER_REQUEST_ACKNOWLEDGE`. El primero de ellos (líneas 7-8) corresponde a una petición de HO saliente en la celda origen (indicada por `MESSAGE_DIRECTION`

= 0), mientras que el segundo (líneas 9-10) corresponde a la petición de HO entrante en la celda destino (MESSAGE\_DIRECTION = 1). Estas dos componentes se renombran como *hs* y *ht* (por ser eventos de HO en las celdas origen - *source* - y destino - *target* -, respectivamente). En ambos casos, se configura una ventana lógica deslizante de 500 milisegundos por medio del método “win:ext\_timed(TIMESTAMP, 500 msec)”. Así, el término **from** se activa cuando se detecta un HO desde una celda origen a una celda destino en los últimos 500 milisegundos. La tercera componente (línea 11) hace referencia a la cadena INTERNAL\_EVENT\_UE\_MOBILITY, referida a las medidas reportadas por los UE, que se renombra como *ueMeas*. En esta cadena, los métodos “std:groupwin(UE\_ID)” y “win:length(1)” se usan para diferenciar eventos de un usuario en particular.

### Atributos de los eventos

Los atributos seleccionados en cada registro de las cadenas de eventos se enumeran en el bloque **expresión** de la Figura 2.6 mediante el término **select** (líneas 1-6). La Tabla 2.1 presenta una descripción detallada de estos atributos. Como se observa en la Tabla, algunos atributos son necesarios en todos los registros a fin de poder relacionar los eventos mediante las reglas de correlación. Ejemplos de estos atributos son el tiempo (TIMESTAMP), el indicador de celda (CELL\_ID) y el identificador de usuario (UE\_ID). Además, otros atributos propios de cada registro también son necesarios para relacionar los eventos, como, por ejemplo, el PCI de la celda destino del traspaso (hs.TARGET\_CELL\_PCI y ht.CELL\_PCI) o el nuevo identificador del usuario en la celda destino (NEW\_UE\_ID) para relacionar correctamente los eventos de traspaso.

### Condiciones

El conjunto de condiciones que han de cumplir los atributos de los eventos seleccionados para ejecutar las acciones posteriores se define mediante el término **where** en **expresión** (líneas 12-19). La Tabla 2.2 presenta una descripción detallada de estas condiciones, donde se observan condiciones que relacionan los eventos tanto de manera física (p. ej., hsSelectedTargetPCI = htPCI) como temporal (p. ej., Math.abs(hsTime - htTime) ≤ 500 msec).

Atributo	Renombrado como	Información
hs.TIMESTAMP	hsTime	Tiempo cuando se almacenó el registro en la cadena de eventos de la celda origen
hs.CELL_ID	hsCellId	Identificador lógico de celda de la celda origen en la cadena de eventos de la celda origen
hs.UE_ID	hsUeId	Identificador del usuario en la celda origen en la cadena de eventos de la celda origen
hs.TARGET_CELL_PCI	hsSelectedTargetPCI	Identificador físico de celda de la celda destino en la cadena de eventos de la celda origen
hs.NEW_UE_ID	hsNewUeId	Identificador del usuario en la celda destino en la cadena de eventos de la celda origen
ht.TIMESTAMP	htTime	Tiempo cuando se almacenó el registro en la cadena de eventos de la celda destino
ht.CELL_ID	htCellId	Identificador lógico de celda de la celda destino en la cadena de eventos de la celda destino
ht.NEW_UE_ID	htUeId	Identificador del usuario en la celda destino en la cadena de eventos de la celda destino
ht.OLD_UE_ID	htOldUeId	Identificador del usuario en la celda origen en la cadena de eventos de la celda destino
ht.CELL_PCI	htPCI	Identificador físico de celda de la celda destino en la cadena de eventos de la celda destino
ueMeas.TIMESTAMP	ueMeasTime	Tiempo cuando se almacenó el registro en la cadena de eventos de medidas de usuario
ueMeas.CELL_ID	ueMeasCellId	Identificador lógico de celda de la celda origen en la cadena de eventos de medidas de usuario
ueMeas.UE_ID	ueMeasUeId	Identificador de usuario que reporta la medida en la cadena de eventos de medidas de usuario
ueMeas.SERVING_RSRP	ueMeasRsrpValue	Nivel de potencia de la señal de referencia recibida de la celda servidora reportada por el usuario en la cadena de eventos de medidas de usuario

TABLA 2.1: Atributos de los eventos *hs*, *ht* y *ue*.

Condición	Descripción
$hsCellId \neq htCellId$	Celdas origen y destino no son la misma
$hsUeId = htOldUeId$ y $hsNewUeId = htUeId$	El usuario que realiza la petición de HO saliente en la celda origen es el mismo que realiza la petición de HO entrante en la celda destino
$hsSelectedTargetPCI = htPCI$	El identificador físico de celda de la celda destino en el HO saliente es el mismo que en el HO entrante
$hsCellId = ueMeasCellId$	La celda donde se realiza la petición de HO saliente es la misma que de donde se remiten las medidas del usuario cuando finaliza la conexión
$hsUeId = ueMeasUeId$	El usuario que realiza la petición de HO saliente de la celda origen es el mismo que informa de las medidas al final de la conexión
$Math.abs(hsTime - htTime) \leq 500$ msec y $Math.abs(hsTime - ueMeasTime) \leq 500$ msec	El intervalo de tiempo absoluto entre los eventos <i>hs</i> y <i>ht</i> y entre <i>hs</i> y <i>ueMeas</i> debe ser menor que 500 ms

TABLA 2.2: Condiciones de los eventos.

## Acciones

Una vez se registra la sentencia EPL (línea 22), se comprueba constantemente las coincidencias. Tras cada coincidencia, se ejecutan objetos simples JAVA o .Net/C# con acciones personalizadas. En el ejemplo, se definen las siguientes acciones dentro la clase **RsrpWhenHoListener** (línea 21):

- a) agregar el nivel de RSRP proporcionado por el usuario en un contador, que representa la suma total de valores de RSRP, e
- b) incrementar en una unidad otro contador que acumula el número de veces que se han cumplido las condiciones.

Ambos contadores intermedios se definen por adyacencia. De esta forma, una vez procesados todos los eventos, es posible calcular el contador sintético final con el nivel de RSRP medio recibido por los usuarios justo antes de realizarse los HO para cada adyacencia, denominado como  $\overline{RSRP}_{HO}$ .

### 2.4.2. Resultados

El código de la Figura 2.6 se ejecuta sobre un conjunto de trazas de conexión obtenidas en una red real LTE. El área geográfica abarcada por el conjunto de datos consiste en 145 eNB y 3220 adyacencias, que cubren 835 km<sup>2</sup> de una zona urbana y residencial. El conjunto de datos incluye 580 archivos CTR recolectados de los emplazamientos cada 15 minutos durante la hora cargada de un día laboral (es decir, 4 ROP de 15 minutos por celda, dando lugar a  $145 \cdot 4 = 580$  archivos CTR). Para no sobrecargar los procesadores de los eNB, se monitoriza tan sólo un porcentaje limitado de conexiones por celda. En este estudio, el CTF se configura para monitorizar el 20% de las conexiones por celda. A posteriori, se demuestra que este porcentaje es suficiente para obtener resultados estadísticos robustos. El número total de conexiones registradas en los archivos es 2332961. Por simplicidad, la herramienta de procesado de eventos no se ejecuta en tiempo real, sino después de que todos los archivos CTR se almacenen en la OSS.

Como resultado de ejecutar la herramienta CEP, se obtienen 3220 valores del contador sintético  $\overline{RSRP}_{HO}$  (1 por adyacencia). Concretamente, el número total de

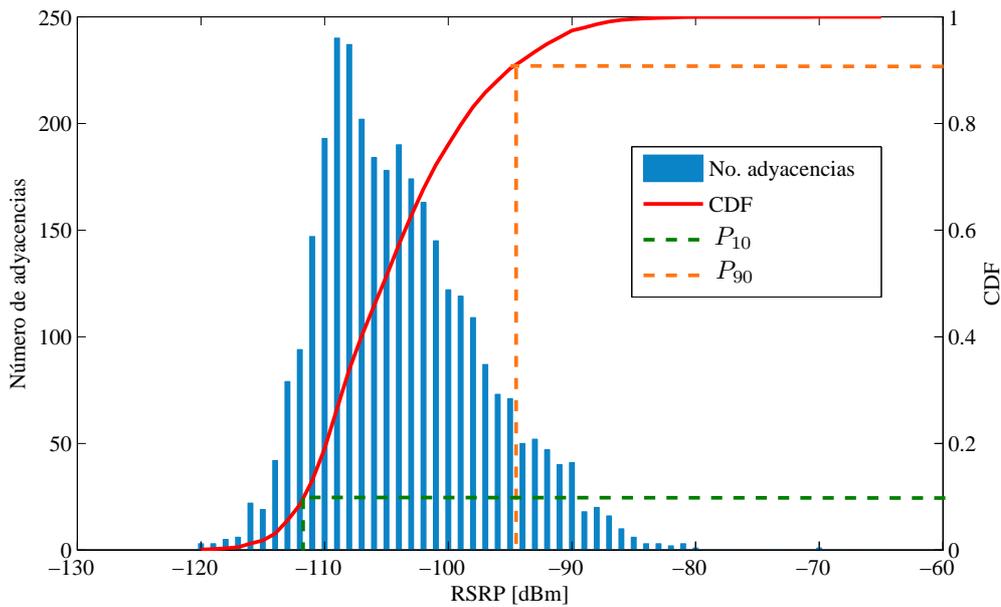


FIGURA 2.7: Distribución de probabilidad del contador sintético  $\overline{RSRP}_{HO}$ .

veces que la sentencia se cumple es 100338 (31 veces, de media, por adyacencia). La Figura 2.7 presenta el histograma y la función de distribución (*Cumulative Distribution Function*, CDF) del indicador  $\overline{RSRP}_{HO}$ . Para una mayor claridad, en la figura se marcan los percentiles del 10% y del 90%,  $P_{10}$  y  $P_{90}$  (-112 y -95 dBm, respectivamente).

De la figura, se pueden extraer algunos hallazgos interesantes. El primero de ellos tiene que ver con el umbral de nivel para el traspaso entre tecnologías. En la red considerada, el operador configuró el umbral de RSRP para que se corte la llamada a -116 dBm en todas las adyacencias de la red. Observando la figura, se aprecia que, en el 10% de las adyacencias, los traspasos se ejecutan demasiado tarde (es decir, los usuarios experimentan un valor de RSRP antes del HO muy cercano al umbral de caída de llamada, -112 frente a -116 dBm, respectivamente). En segundo lugar, en la figura se identifican los valores altos de  $\overline{RSRP}_{HO}$ , que indican aquellas adyacencias en las que se producen HO cuando los usuarios experimentan un valor alto de RSRP en la celda origen. De esta manera, el indicador construido refleja el grado de solapamiento entre celdas vecinas.

El contador sintético propuesto también puede utilizarse conjuntamente con otros indicadores para realizar un diagnóstico más preciso de los problemas de la red. Un ejemplo podría ser el uso conjunto del indicador  $\overline{RSRP}_{HO}$  y la tasa de fallos de traspasos (*HandOver failure Ratio*, HOR), que suele utilizarse por los

operadores como un KPI de la calidad global de las conexiones [68]. La información adicional proporcionada por el contador  $\overline{RSRP}_{HO}$  permite identificar el origen de un bajo rendimiento de HOR. Por ejemplo, si la HOR es alta y el nivel de  $\overline{RSRP}_{HO}$  es bajo, la causa más probable de los trasposos fallidos es un problema de cobertura en la celda origen. Por el contrario, si la HOR es alta y el nivel de  $\overline{RSRP}_{HO}$  es alto, se descarta el problema de cobertura, y, por tanto, obliga a buscar otro origen a la alta tasa de trasposos fallidos (p. ej., falta de recursos en celda destino).

### 2.4.3. Complejidad computacional

Tanto la etapa de decodificación como de sincronización de eventos se desarrollaron en C++, mientras que el bloque de correlación de eventos se desarrolló en JAVA con Esper. En teoría, la complejidad computacional de la etapa de procesamiento de eventos es  $\mathcal{O}(N_{con})$ , donde  $N_{con}$  es el número de conexiones recolectadas en un ROP. En la práctica, la decodificación, sincronización y correlación de todos los eventos para 1 hora de trazas se realiza en 240, 10 y 50 segundos, respectivamente, resultando un tiempo total de ejecución de 5 minutos en un ordenador portátil con una frecuencia de reloj de 2.6 GHz y 4 GB de RAM.

## 2.5. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado un esquema genérico de procesamiento de eventos complejos, que permite obtener nuevos contadores a partir de la información disponible en las trazas de conexión de redes LTE, y así extender el juego de indicadores suministrados por los fabricantes. Con este fin, se ha presentado primero un esquema básico de las herramientas que procesan eventos complejos, enumerando después las herramientas comerciales existentes en el mercado. A continuación, se han detallado los diferentes bloques funcionales de la herramienta de procesamiento de eventos complejos propuesta para procesar los archivos de trazas recopilados por los eNB. Dentro de esta sección, se ha prestado especial atención al bloque encargado de la correlación de eventos, donde se utiliza el código Esper. Por último, para demostrar el funcionamiento de la herramienta de procesamiento, se ha presentado un ejemplo de construcción de un nuevo indicador a partir de trazas, que muestra el nivel de potencia medido por los usuarios justo antes de realizar un trasposo en una determinada adyacencia. Este ejemplo ha permitido demostrar que, con la

herramienta de procesado de eventos, pueden construirse contadores que aportan información mucho más detallada que la que proporcionan los indicadores utilizados hoy en día por los operadores. El mayor detalle proviene de: a) la combinación de información obtenida de diferentes elementos de la red, en instantes distintos, y recopilados con diferente granularidad temporal y espacial, y b) la correlación de eventos a nivel de celda, de usuario y de conexión. La metodología propuesta puede aplicarse en otras tecnologías de acceso radio, y puede extenderse a otros segmentos de la red, como, por ejemplo, la red de transmisión o el núcleo de red.

## Capítulo 3

# Evaluación de capacidad en redes LTE en explotación

La evaluación del desempeño de la red es una de las tareas fundamentales en el quehacer diario de los operadores de redes móviles. Tradicionalmente, este desempeño se ha venido midiendo en términos de cobertura, calidad de señal y capacidad. En este capítulo, se presenta un estudio de diversos indicadores de capacidad empleados hoy en día por los operadores móviles, sobre datos extraídos de una red LTE real. Con este estudio, se pretende entender cómo difieren los distintos indicadores de capacidad, y comprobar su correlación con los indicadores de calidad de señal. Los resultados que aquí se presentan justifican la selección de la relación señal a ruido más interferencia (*Signal to Interference plus Noise Ratio*, SINR) como indicador de capacidad en la formulación del problema de CCO a plantear en capítulos posteriores.

El capítulo se divide en cinco secciones. La Sección 3.1 introduce la necesidad del estudio. A continuación, la Sección 3.2 describe los indicadores de rendimiento de capacidad considerados. Posteriormente, la Sección 3.3 describe el escenario real donde se recopilan los datos. En la Sección 3.4 se analizan los resultados obtenidos en la comparación de los indicadores. Por último, la Sección 3.5 presenta las conclusiones de este capítulo.

### 3.1. Introducción

Cada vez que se introduce una nueva funcionalidad en una red celular, debe evaluarse el impacto que ésta tiene sobre el rendimiento de la red. Para ello, es preciso seleccionar métricas que reflejen adecuadamente la experiencia del usuario. Una métrica mal escogida puede ser difícil de interpretar y, además, el cumplimiento de determinados umbrales objetivos puede tener un impacto nulo en la experiencia de usuario. Para evitar esto, los operadores están cambiando la forma de monitorizar sus redes, sustituyendo los indicadores de rendimiento tradicionales, centrados en el rendimiento de la red, por indicadores de rendimiento centrados en la experiencia de usuario [69]. En la misma dirección, el 3GPP ha definido cinco clases de indicadores de rendimiento de servicio, que son la disponibilidad del servicio, la accesibilidad, la retenibilidad, la movilidad y la integridad [70].

La capacidad de usuario media (*average user throughput*) es hoy en día el principal indicador utilizado para medir la integridad en todas las tecnologías de acceso radio, a la espera de indicadores más fiables de la experiencia de usuario [70]. Al mismo tiempo, la capacidad de celda media (*average cell throughput*) se utiliza para medir la capacidad de celda en procesos de redimensionado basados en medidas [71]. Diversos estudios teóricos han establecido cotas de estos indicadores de capacidad a partir de la fórmula truncada de Shannon [72]. De igual forma, otras fuentes han presentado resultados de la capacidad de usuario y celda obtenida en LTE mediante herramientas de simulación [73] y pruebas de campo [74]. Sin embargo, diversas pruebas de campo realizadas por el autor en el marco de esta Tesis han puesto de manifiesto que estos indicadores de capacidad se ven afectados menos de lo esperado tras la realización de cambios en la red orientados a su mejora, incluso cuando otros indicadores de bajo nivel, como la relación señal a interferencia o el indicador de calidad del canal, sí varían notablemente. En LTE, una mejora grande de las estadísticas de calidad de conexión debería producir una utilización de esquemas de modulación y codificación más eficaces, con más símbolos en la constelación y menos redundancia. Esto debería traducirse en mejores cifras de capacidad de usuario celda, lo que se ha constatado que no siempre ocurre. Tras esta observación, se hace necesario un estudio profundo de los estadísticos de capacidad en redes LTE reales. En las siguientes secciones, se presenta un análisis exhaustivo de varios indicadores de capacidad comúnmente utilizados por los operadores de redes LTE, a partir de contadores de rendimiento

del sistema de gestión y trazas de conexión procesadas con la herramienta CEP desarrollada en esta Tesis.

### 3.2. Indicadores de capacidad en redes LTE

A continuación, se presentan los indicadores utilizados actualmente por los operadores para evaluar la capacidad de transmisión ofrecida al usuario. Todos ellos pueden obtenerse a partir de contadores de rendimiento (PM) del sistema de gestión de red y son ofrecidos por la mayoría de fabricantes. Estos indicadores se definen en [70], y sus definiciones son válidas tanto para el canal descendente (DL) como el ascendente (*UpLink*, UL).

El *throughput* medio de usuario, *AvgUeThp* (del inglés *Average User Throughput*), se utiliza normalmente para comprobar la integridad de los servicios de datos en todas las tecnologías de acceso radio, calculándose como

$$AvgUeThp = \frac{TotPDCPVolDataExclLastTTIs}{TotEffectiveTimeExclLastTTIs} \text{ [kbps]}, \quad (3.1)$$

donde *TotPDCPVolDataExclLastTTIs* es el volumen total de unidades de datos de servicio (*Service Data Unit*, SDU) a nivel del protocolo de convergencia de datos de paquete (*Packet Data Convergence Protocol*, PDCP) transferidos por celda y periodo de reporte (ROP), excluyendo los datos transferidos en el intervalo de tiempo de transmisión (*Transmission Time Interval*, TTI) en el que se vacía el *buffer* de transmisión (denominado “último TTI”), y *TotEffectiveTimeExclLastTTIs* es el tiempo empleado para enviar la información excluyendo el último TTI [70]. Tanto *TotPDCPVolDataExclLastTTIs* como *TotEffectiveTimeExclLastTTIs* son medidas agregadas de todos los usuarios en una celda durante el ROP. Los últimos TTI se excluyen para eliminar TTI que no se utilizan completamente, donde la tasa de transmisión puede ser inferior únicamente porque no hay suficientes datos que transmitir. De esta manera, se obtiene una medida de capacidad del enlace independiente del tamaño del segmento de datos a transmitir [70].

El *throughput* medio de celda, *AvgCellThp* (*Average Cell Throughput*), se utiliza para estimar la capacidad máxima de celda [71], y se define como

$$AvgCellThp = \frac{TotPDCPVolData}{ActiveSchedTime} \text{ [kbps]}, \quad (3.2)$$

donde  $TotPDCPVolData$  es el volumen total de datos en las SDU de nivel PDCP transferido en una celda y ROP considerando todos los TTI, y  $ActiveSchedTime$  es el tiempo de actividad del planificador. Dicho tiempo se incrementa en 1 ms por cada TTI con datos en el planificador dinámico de recursos de la estación base. Por tanto,  $AvgCellThp$  es el *throughput* de usuario agregado en una celda cuando se asignan recursos radio.

El *throughput* medio del enlace radio,  $AvgRadioThp$  (*Average Radio-link Throughput*) indica la eficiencia espectral media en una celda, calculándose como

$$AvgRadioThp = \frac{TotSuccVolData}{TotResourcesForTr} \left[ \frac{\text{bit}}{\text{RE}} \right], \quad (3.3)$$

donde  $TotSuccVolData$  es el volumen total de unidades de datos de protocolo (*Protocol Data Unit*, PDU) del control de acceso al medio (*Medium Access Control*, MAC), y  $TotResourcesForTr$  es el número de elementos de recurso (*Resource Element*, RE) usados para la transmisión. RE es la unidad de recursos mínima asignable, que consiste en una subportadora (15 kHz) para una duración de un símbolo multiplexado por división de frecuencias ortogonales (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM) [73].  $TotSuccVolData$  se incrementa cuando una transmisión se reconoce a nivel de Petición de Repetición Automática Híbrida (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*, HARQ) y  $TotResourcesForTr$  se incrementa cuando se recibe retroalimentación HARQ para una transmisión, sin importar si es positiva o negativa. Por tanto,  $AvgRadioThp$  indica el volumen medio de datos transmitido por RE como una medida de la eficiencia espectral.

El indicador *Traffic* (tráfico) mide el volumen total de datos de usuario en un periodo de tiempo, definido como

$$Traffic = \frac{TotPDCPVolData}{PeriodDuration} \text{ [kbps]}, \quad (3.4)$$

donde  $TotPDCPVolData$  es el volumen de datos SDU PDCP transferidos y  $PeriodDuration$  es el periodo de medición.  $TotPDCPVolData$  es el mismo estadístico usado en  $AvgCellThp$ , y  $PeriodDuration$  es el ROP. Por tanto, *Traffic* indica el

*throughput* medio de celda incluyendo también los periodos donde el planificador está inactivo.

Por último, se definen dos indicadores para medir el número medio de usuarios en una celda,

$$AvgNoUeperTTIinROP = \frac{TotNoActiveUsers}{PeriodDuration} \quad (3.5)$$

y

$$AvgNoUeperTTIinSchedAct = \frac{TotNoActiveUsers}{ActiveSchedTime} , \quad (3.6)$$

donde *TotNoActiveUsers* es la suma del número de usuarios activos por TTI durante todo el periodo de tiempo *PeriodDuration*, y *ActiveSchedTime* es el tiempo de actividad del planificador durante el periodo considerado. La principal diferencia entre ambos indicadores es que el primero tiene en cuenta los periodos de inactividad, mientras que el segundo sólo tiene en cuenta los TTI con usuarios activos.

### 3.3. Metodología experimental

En el periodo de medida, se recogen valores de todos los indicadores definidos anteriormente. El área urbana considerada abarca 234 celdas LTE, de las que 129 usan una portadora a 734 MHz con 10 MHz de ancho de banda y las otras 105 usan una portadora a 2.132 GHz con un ancho de banda de 5 MHz (de aquí en adelante, referidas como primera y segunda portadora, respectivamente). El periodo de medida comprende 2 días, durante los que se toman medidas a nivel de celda y hora, obteniendo un total de 11232 muestras. El periodo de reporte (ROP) es, por tanto, de una hora. Para completar el análisis, se procesan también los eventos de medida de 60000 conexiones (correspondientes a 10 minutos de red) para un análisis más detallado de alguno de los indicadores basado en trazas de conexión. Ambos juegos de datos comprenden medidas de DL y UL.

Como análisis preliminar, la Tabla 3.1 presenta estadísticos de rendimiento de tráfico relevantes para UL y DL. Se observa que casi la mitad de los datos transmitidos en UL se envían en últimos TTI (es decir, TTI en los que se vacía el buffer de transmisión). Del mismo modo, cerca del 90% de los TTI en UL son

	DL	UL
Datos transmitidos en los últimos TTI [%]	13.80	47.26
Porcentaje de últimos TTI [%]	38.10	89.06
Volumen medio de datos en los últimos TTI [kb]	2.05	0.11
Volumen medio de datos en otros TTI [kb]	7.91	1.02
Actividad media del planificador [%]	15.14	14.68
Número medio de usuarios activos por TTI durante el ROP	0.20	0.32
Número medio de usuarios activos por TTI durante el periodo activo del planificador	1.35	2.16
Número medio de TTI activos por conexión	239	932

TABLA 3.1: Estadísticos de tráfico.

últimos TTI. A partir de estos datos se puede deducir que el tráfico UL consiste, principalmente, en ráfagas de datos muy pequeñas. Comparando el volumen medio de datos transmitido en últimos TTI frente al volumen transmitido en el resto de TTI, se observa que el primero es significativamente inferior (2.05 kb frente a 7.91 kb para DL, y 0.11 kb frente a 1.02 kb para UL). Esto es una clara evidencia de que en el último TTI se suelen transmitir menos datos. También se observa que los planificadores dinámicos de recursos del UL y DL tienen el mismo porcentaje de actividad (es decir, tiempo de actividad por ROP). Sin embargo, el número medio de usuarios por TTI en UL es un 60 % mayor que en DL, tanto considerando el ROP completo como considerando sólo el periodo de actividad del planificador.

Debido a que la mayoría de las transmisiones de datos en UL tienen lugar en últimos TTI (cerca del 90 % del total), y éstos se descartan en algunos de los indicadores de *throughput*, el análisis de estos indicadores se centra únicamente en el DL, que es donde el porcentaje de últimos TTI es menor. Por brevedad, el subíndice DL se omite en los resultados presentados a continuación.

### 3.4. Resultados del análisis

Los siguientes párrafos comparan los diferentes indicadores de rendimiento de *throughput* en DL a partir de las medidas recopiladas. Primero se analizan los

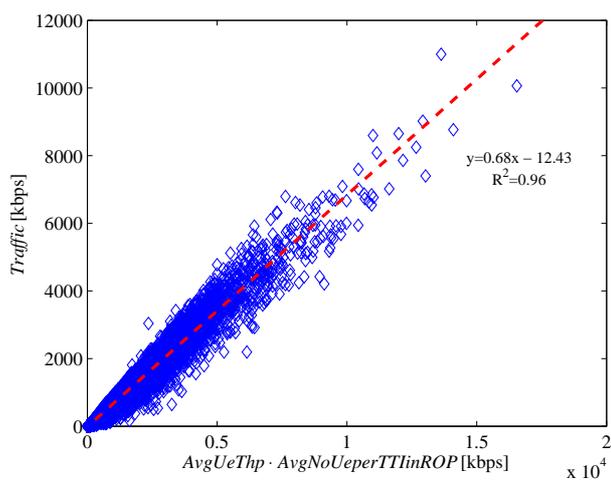
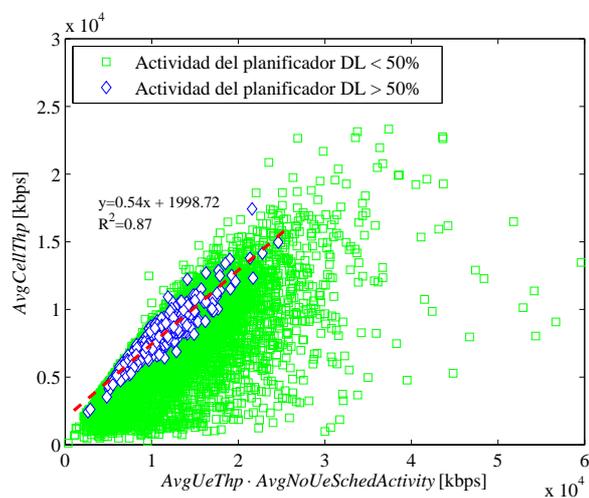
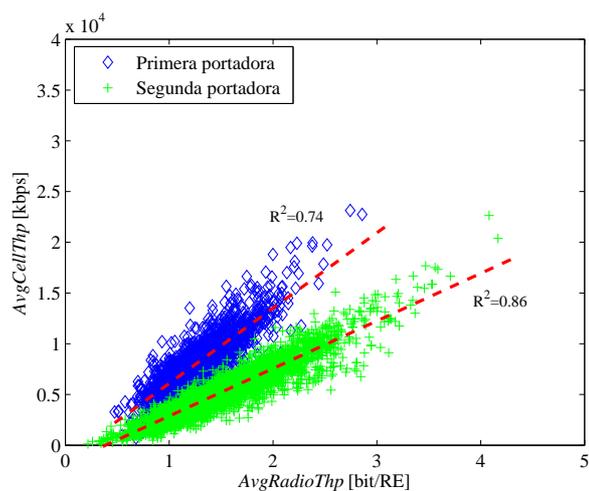
indicadores basados en contadores y, posteriormente, se extiende el análisis a los mismos indicadores construidos con trazas de conexión.

### 3.4.1. Resultados basados en contadores de rendimiento

Las Figuras 3.1 (a)-(c) muestran la relación entre los diferentes indicadores de *throughput* basados en contadores agregados por celda y hora. En particular, la Figura 3.1 (a) muestra la correlación entre *AvgUeThp* y *Traffic*. En el eje de abscisas, *AvgUeThp* se multiplica por *AvgNoUeperTTIinROP* para tener una estima del tráfico total (sin últimos TTI) por ROP. Se observa que ambos indicadores están altamente correlacionados, resultando un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.96$ . Sin embargo, la pendiente de la recta de regresión no es 1, sino 0.68. Un análisis teórico muestra que dicha pendiente es la proporción entre el porcentaje de tiempo y el porcentaje de datos que no corresponden a últimos TTI, cuyos valores se muestran en la Tabla 3.1 (es decir,  $\frac{1-0.381}{1-0.138} = 0.71$ ). De este resultado, se puede concluir que *AvgUeThp* y *Traffic* proporcionan información similar.

La Figura 3.1 (b) compara *AvgUeThp* y *AvgCellThp* (ejes x e y, respectivamente). En este caso, *AvgUeThp* se multiplica por *AvgNoUeperTTIinSchedAct* para tener una estimación del tráfico total (incluyendo últimos TTI) dividido entre el periodo de actividad del planificador. Se observa que la correlación entre ambos indicadores no es tan fuerte. Un análisis más exhaustivo muestra que la falta de correlación es debida a las muestras con bajo porcentaje de actividad del planificador, donde el volumen de tráfico total considerando los últimos TTI podría no estar correlacionado con el volumen de tráfico sin los últimos TTI. Para confirmar esto, se ha dibujado una línea de regresión para aquellas horas que muestran un periodo de actividad del planificador mayor del 50 % (es decir, 30 minutos por hora, representado por diamantes en la figura), dando como resultado un coeficiente de determinación muy alto ( $R^2 = 0.87$ ). Esta observación muestra que el indicador *AvgCellThp* debe ser gestionado con cuidado cuando la actividad del planificador es baja.

La Figura 3.1 (c) muestra la correlación entre *AvgRadioThp* y *AvgCellThp* (ejes x e y, respectivamente), diferenciando por frecuencia de portadora. Se observa que ambos indicadores tienen una buena correlación en ambas portadoras ( $R^2 = 0.74$  y  $R^2 = 0.86$ , respectivamente). Las distintas pendientes son debidas a los diferentes

(a)  $AvgUeThp$  vs  $Traffic$ (b)  $AvgUeThp$  vs  $AvgCellThp$ (c)  $AvgRadioThp$  vs  $AvgCellThp$ FIGURA 3.1: Correlación entre indicadores de rendimiento de *throughput* construidos con contadores.

anchos de banda en cada portadora (es decir, 10 MHz frente a 5 MHz), que hacen que, para un mismo valor de  $AvgRadioThp$ ,  $AvgCellThp$  en la segunda portadora sea la mitad que en la primera. A partir de la figura, se deduce que  $AvgRadioThp$  y  $AvgCellThp$  proporcionan información similar cuando se evalúan por portadora.

Una vez analizadas las diferencias entre los indicadores de rendimiento de *throughput*, se enfoca el análisis en la relación con los indicadores de calidad de conexión. Las Figuras 3.2 (a)-(c) representan la correlación del CQI medio (referido como  $AvgCQI$ ) con  $AvgUeThp$ ,  $AvgCellThp$  y  $AvgRadioThp$ , respectivamente. En las Figuras 3.2 (a)-(b), los puntos se han agrupado por portadora, debido a que el mismo valor de  $AvgCQI$ , correspondiente a un esquema específico de modulación y codificación adaptativo (*Adaptive Modulation and Coding*, AMC), logra diferentes valores de  $AvgUeThp$  y  $AvgCellThp$  para diferentes anchos de banda de sistema. Este no es el caso para  $AvgRadioThp$ , que, como indicador de eficiencia espectral, está normalizado por el ancho de banda ocupado. Las figuras muestran que la correlación entre  $AvgCQI$  y cualquiera de los indicadores de rendimiento *throughput* no es tan fuerte como se esperaba. En concreto,  $R^2 = 0.48$ ,  $0.19$  y  $0.39$  para  $AvgUeThp$ ,  $AvgCellThp$  y  $AvgRadioThp$ , respectivamente. A partir de estos resultados, se podría concluir erróneamente que una buena calidad de señal radio no tiene un impacto directo en el porcentaje de datos usados, en la capacidad de celda o en la eficiencia espectral de la red. Esta débil correlación no se debe a las transmisiones en los últimos TTI, ya que afecta a todos los indicadores. Esta observación es la razón del análisis basado en trazas de llamadas descrito a continuación.

### 3.4.2. Resultados basados en trazas de conexión

Para comprobar la relación entre el *throughput* y el CQI a nivel de conexión, se definen tres indicadores de rendimiento de *throughput*, equivalentes a los presentados en las ecuaciones (3.1)-(3.3), pero desglosados por conexión (esto es, el indicador refleja el valor alcanzado en cada conexión). Para ello, se aprovecha que todas las variables de las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) pueden definirse por conexión, excepto el tiempo de actividad del planificador,  $ActiveSchedTime$  en (3.2), que es un indicador definido a nivel de celda. Si  $ActiveSchedTime$  se sustituye por el tiempo efectivo total por conexión, incluyendo los últimos TTI, la ecuación (3.2) se convierte en el *throughput* medio de usuario incluyendo los últimos TTI

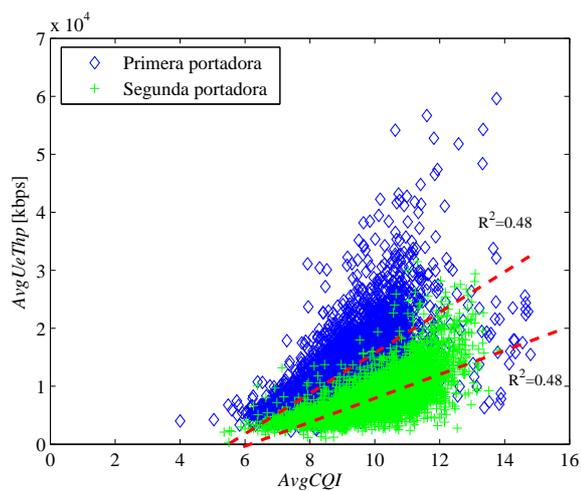
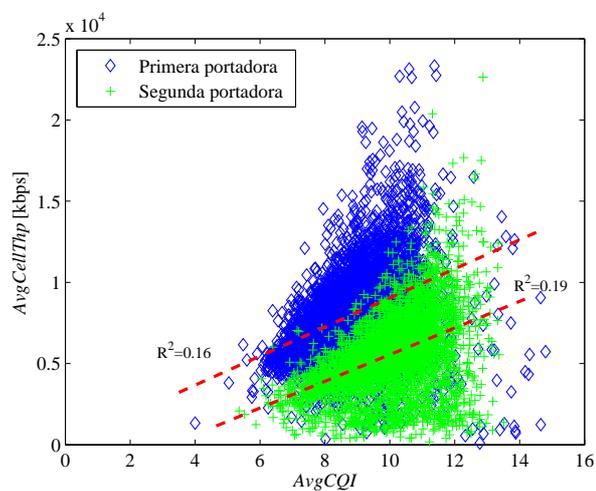
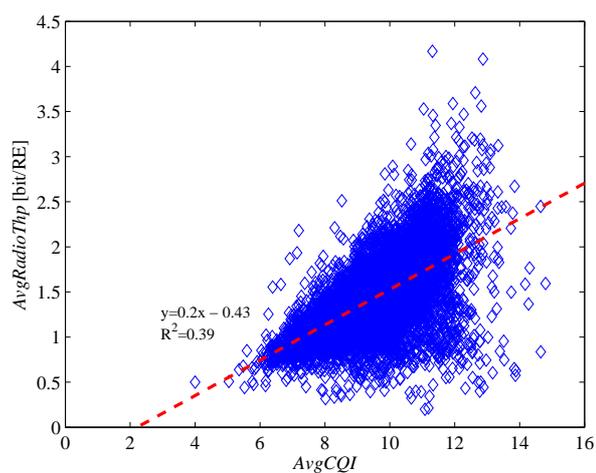
(a) *AvgUeThp*(b) *AvgCellThp*(c) *AvgRadioThp*

FIGURA 3.2: Correlación entre indicadores de capacidad y calidad de señal a partir de contadores.

por conexión, que es la aproximación más cercana al *throughput* de celda a nivel de conexión.

Con las consideraciones anteriores, las Figuras 3.3 (a)-(c) muestran la correlación entre los indicadores de rendimiento de *throughput* y *AvgCQI* experimentados por conexión, donde cada punto en las figuras representa una conexión. Por conveniencia, las muestras se clasifican en conexiones cortas y largas. En este estudio, se consideran conexiones largas aquéllas con más de 1000 TTI planificados (es decir, 1 segundo de tiempo efectivo de conexión). El objetivo de esta clasificación es separar las llamadas largas, para aislar las conexiones donde el impacto del régimen transitorio causado por el lazo externo del proceso de adaptación del enlace (*Outer Loop Link Adaptation*, OLLA) y el control de congestión del protocolo TCP es mínimo [75]. En las figuras, se observa que, para conexiones cortas, la correlación entre los tres estadísticos de *throughput* y *AvgCQI* es muy baja. Esto es debido al hecho de que las conexiones cortas no alcanzan el régimen permanente del OLLA, lo que causa que la conexión no sea lo suficientemente larga como para compensar la configuración inicial conservadora del *offset* del OLLA definida por los operadores [76]. Al mismo tiempo, el incremento lento de la ventana de transmisión en TCP (conocido como *slow start* de TCP) hace que al principio de la conexión la transmisión se realice a ráfagas, lo que causa que no siempre se tengan suficientes datos que transmitir para agotar la capacidad del canal. Aunque la correlación se incrementa para todos los indicadores de *throughput* en conexiones largas, en el caso del *throughput* medio de usuario, tanto con o sin los últimos TTI, es todavía baja ( $R^2 = 0.44$  y  $0.45$ , respectivamente). Tan sólo se observa una fuerte correlación para el indicador de eficiencia espectral *AvgRadioThp* ( $R^2 = 0.85$ ). Se confirma, por tanto, que mejorar el CQI medio tiene un impacto positivo en todos los indicadores de *throughput*. Al mismo tiempo, queda claramente reflejado cómo el mecanismo del OLLA tiene un fuerte impacto en todos los estadísticos de rendimiento de *throughput*.

### 3.5. Conclusiones

En este capítulo, se ha presentado un estudio de diversos indicadores de capacidad empleados hoy en día por los operadores de redes LTE. El estudio se basa en contadores de rendimiento y trazas de conexión tomadas del sistema de gestión de una red real.

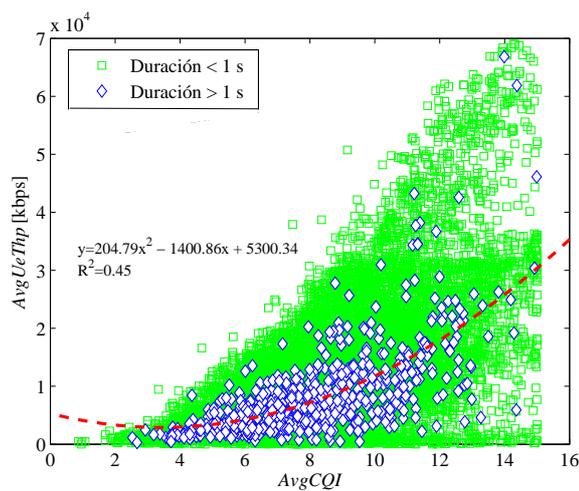
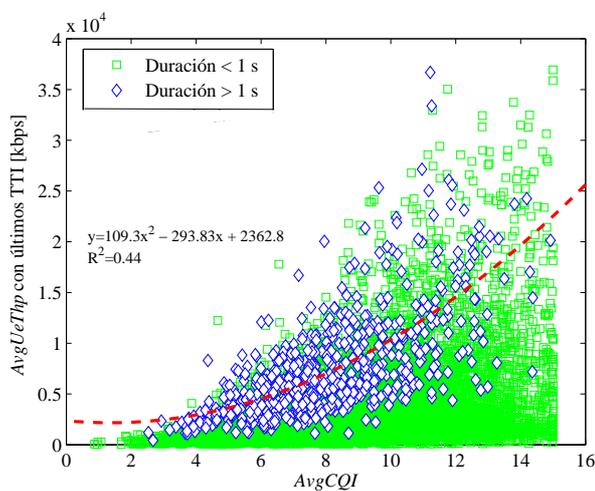
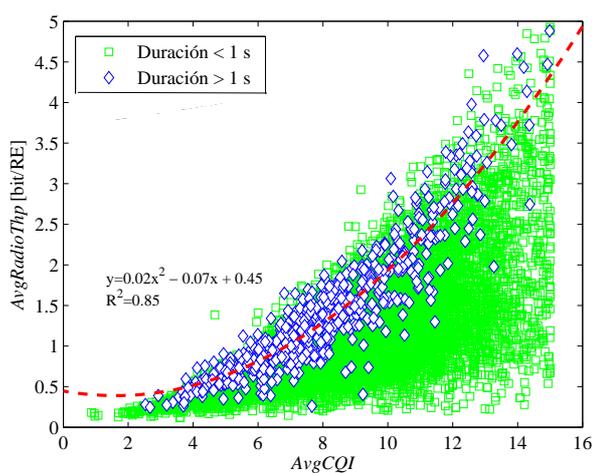
(a) *AvgUeThp* (sin últimos TTI)(b) *AvgUeThp* (con últimos TTI)(c) *AvgRadioThp*

FIGURA 3.3: Correlación entre indicadores de capacidad y calidad de señal en trazas de conexión.

Los resultados han confirmado primero la importancia de los TTI en los que se vacía el buffer de transmisión de la estación base o el usuario, donde tiende a no aprovecharse la capacidad máxima del canal. Este fenómeno es más importante en el enlace ascendente, donde el volumen de tráfico es muy inferior.

También se ha puesto de manifiesto por primera vez el impacto de la duración de la conexión en los indicadores de capacidad del enlace en redes, debido al lento proceso de convergencia del OLLA y al incremento progresivo de la ventana de transmisión de TCP. De esta forma, se reduce la eficiencia espectral y, con ello, la capacidad de transmisión de usuario y de celda en redes LTE.

Aun así, se ha confirmado que la calidad del enlace influye positivamente en todos los indicadores de capacidad. Este hecho justifica su inclusión como principal cifra de mérito en el problema de la optimización de la cobertura y la capacidad de redes LTE tratado en capítulos posteriores. Seleccionando como principal indicador de rendimiento la calidad de señal, en lugar de la capacidad de usuario, se evitan los anteriores efectos indeseados.

Como principal resultado, por tanto, queda justificada la inclusión de indicadores de calidad de enlace como principal cifra de mérito en el problema de la optimización de la cobertura y la capacidad de redes LTE a tratar en capítulos posteriores. Dicha inclusión queda justificada por, a) la constancia de que la calidad del enlace influye positivamente en todos los indicadores de capacidad, y b) la selección de la calidad de señal como principal indicador de rendimiento, en lugar de seleccionar directamente algún indicador de capacidad de usuario, evita los efectos indeseados de convergencia del OLLA y la ventana de transmisión de TCP.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

# Capítulo 4

## Optimización del ángulo de inclinación de antenas

Ajustar la inclinación de las antenas es una de las técnicas más utilizadas para resolver los problemas de cobertura y capacidad en las redes celulares. En este capítulo se presenta un algoritmo de ajuste automático de la inclinación de las antenas de las estaciones base de un sistema LTE basado en nuevos indicadores, obtenidos a partir de archivos de trazas con técnicas de procesamiento de eventos complejos.

El capítulo se divide en cinco secciones. La Sección 4.1 revisa el estado de la técnica, resaltando las principales contribuciones de este trabajo. A continuación, la Sección 4.2 plantea la formulación del problema, justificando la importancia de realizar un buen ajuste del ángulo de inclinación de las antenas. Posteriormente, en la Sección 4.3 se presenta el algoritmo automático de ajuste diseñado, junto con los nuevos indicadores desarrollados a partir del procesamiento de eventos complejos. En la Sección 4.4 se describen las pruebas realizadas para validar los indicadores y el algoritmo propuestos. Por último, la Sección 4.5 resume las conclusiones obtenidas en este capítulo.

### 4.1. Introducción

El ajuste del ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base es una técnica ampliamente utilizada para mejorar el aislamiento entre celdas y extender

la cobertura de las redes celulares [6]. Una configuración óptima de la inclinación minimiza la interferencia procedente de celdas vecinas (es decir, problemas de solapamiento), evita conexiones con usuarios excesivamente lejanos (es decir, problemas de sobreapuntamiento) y mejora los niveles de señal en el área que debe ser servida por la estación base (problemas de cobertura).

Tal como se ha explicado anteriormente, el ajuste de la inclinación de una antena puede realizarse de manera mecánica o eléctrica. Mientras que la primera requiere visitar la antena y realizar los cambios físicamente, la segunda se puede realizar de forma remota, lo que permite su inclusión como parte de algoritmos SON. Aun así, encontrar la configuración óptima del ángulo de inclinación no es tarea fácil, al depender de múltiples factores, difíciles de prever con exactitud durante la planificación de la red y difíciles de medir durante la fase de operación.

Para mejorar la capacidad de análisis de las herramientas de gestión de red, en este trabajo se plantea la utilización de la información almacenada en las trazas de conexión recopiladas por los eNB de la red. A partir de estas trazas, pueden generarse nuevos indicadores, que permiten obtener información más detallada que la proporcionada por los indicadores básicos propuestos por los operadores para detectar problemas de sobreapuntamiento, de excesivo solapamiento y huecos de cobertura.

#### 4.1.1. Trabajo relacionado y contribuciones

La influencia de la inclinación de las antenas en el rendimiento de las redes móviles ha sido analizada en múltiples estudios. Los estudios iniciales cubren los aspectos radio más básicos que se ven afectados por la modificación del ángulo de inclinación (p. ej., diagrama de radiación del emplazamiento) [77, 78]. Estudios posteriores evalúan, de forma cuantitativa mediante simulaciones, el impacto de esta técnica sobre el rendimiento global de redes de diferentes tecnologías (p. ej., GSM [79], UMTS [15, 80, 81], LTE [14, 82]). Dicho análisis se extiende también a escenarios microcelulares en [83, 84]. Estos estudios basados en simulaciones se completan con los resultados obtenidos en pruebas de campo en redes reales GSM [18, 85]. Todos estos estudios muestran el compromiso entre cobertura, calidad de señal y capacidad de la red cuando se selecciona el valor del ángulo de inclinación de la antena.

Antiguamente, la inclinación de la antena se ajustaba de manera manual, lo que requería varias horas de trabajo del personal de mantenimiento. Durante este periodo, la estación base debía apagarse por seguridad, por lo que los operadores de red intentaban minimizar el número de estaciones base ajustadas. Por ello, los primeros métodos de optimización de la inclinación de las antenas se diseñaron como procesos de replanificación basados en medidas, entre cuyos objetivos estaba reducir el número de emplazamientos afectados por los ajustes. En esta línea, en [18] se propone un método heurístico para detectar celdas GSM con grandes distancias de sobreapuntamiento (*overshooting*) a partir de estadísticas de avance temporal (*Timing Advance*, TA). La introducción reciente del ajuste remoto (RET) ha hecho posible que se pueda reajustar la configuración de antenas en grandes áreas geográficas de manera periódica. Por ello, RET se ha propuesto por organismos de estandarización y fabricantes como la técnica principal para diferentes casos de uso de SON, como la optimización de la cobertura y la capacidad (CCO), el balance de carga (LB) y la compensación de celda caída (COC) [5].

En la literatura se han propuesto muchos algoritmos para CCO basados en RET, que pueden clasificarse como procesos de planificación u optimización. Los métodos de autoplanificación mediante RET se basan en un modelo de rendimiento del sistema, analítico o de simulación, para encontrar la mejor configuración de antena en términos de cobertura, tasa de transmisión de datos (*throughput*) y capacidad de la red [17, 19, 86–88]. Sobre este modelo del sistema, se aplica un algoritmo clásico de optimización para encontrar la configuración óptima (p. ej., mediante consideraciones geométricas [19, 86], recocido simulado [87], fuerza bruta [88] o Taguchi [17]). Estos métodos de autoplanificación han sido usados para solventar problemas de CCO en diferentes tecnologías de acceso radio, como WCDMA [87] y LTE [17, 88]. Algunos de ellos sólo hacen uso de consideraciones geométricas en el modelo de sistema [19, 86], o consideran criterios de cobertura, tales como el porcentaje de usuarios con nivel de señal piloto inferior a un cierto umbral [88]. Otros métodos tienen en cuenta criterios de capacidad estimando el máximo *throughput* de usuario alcanzable a partir de la eficiencia espectral media del enlace radio [17].

Al contrario que los métodos de planificación, los métodos de autooptimización (o autoajuste) de RET no necesitan un modelo de sistema, ya que usan medidas reales tomadas de la red para ajustar la inclinación siguiendo reglas simples de control. La principal limitación de estas soluciones basadas en reglas heurísticas

es que no garantizan que la configuración final de la inclinación sea la óptima, puesto que no se apoyan en ningún modelo del sistema a optimizar. Debido a la dificultad de considerar simultáneamente todos los criterios de rendimiento de la red, la mayoría de los métodos de optimización con RET se diseñan con un único objetivo, que suele ser el balance de carga o el alivio de la congestión, y, por lo tanto, las acciones sólo se guían por criterios de capacidad. Así, los algoritmos de balance de carga basados en RET descritos en [89] y [90] no consideran problemas de cobertura. En [91] y [92], se añade un mecanismo al algoritmo de balance de tráfico para asegurar una cobertura de la red adecuada. Sólo recientemente se han propuesto algunos métodos de autooptimización para RET que consideran también la calidad de las conexiones de red como un indicador. Algunos de ellos tienen como objetivo maximizar un criterio simple de rendimiento relacionado con la calidad de conexión, tales como el indicador de calidad del canal (CQI) medio [93], el *throughput* de celda medio [94], la relación señal a ruido más interferencia (SINR) media de los usuarios [95] o el grado de solapamiento entre celdas [96]. Otros métodos consideran el balance entre cobertura y calidad de la conexión a partir de medidas, comparando el rendimiento de los usuarios de borde y de centro de celda en términos de eficiencia espectral [97, 98], SINR [99, 100] o *throughput* [101]. Como alternativa, algunos métodos mantienen un equilibrio entre solapamiento entre celdas y huecos de cobertura [102–104]. En concreto, el método propuesto en [102] presenta un algoritmo de autoajuste basado en reglas para RET que mejora el rendimiento de los usuarios de borde de celda mediante la detección de huecos de cobertura, y evita excesivo solapamiento entre celdas a partir de medidas de RSRP y SINR. Alternativamente, en [103] se describe un algoritmo de aprendizaje por refuerzo para RET que controla la cobertura y la calidad de conexión, donde los problemas de cobertura se detectan a partir de medidas de RSRP y estadísticos de conexiones caídas y traspasos fallidos, mientras que los problemas de calidad de conexión se detectan con medidas del indicador RSRQ (*Reference Signal Received Quality*). Por otro lado, [104] presenta una arquitectura de control que combina una entidad central, que asegura una cobertura global de la red a partir de la optimización de la inclinación de las antenas de manera centralizada, con entidades individuales situadas en las estaciones base que optimizan la capacidad y la cobertura específica de cada celda mediante el ajuste de la potencia piloto de manera distribuida. En [105], se plantea el uso de RET para modificar el balance entre cobertura y *throughput* de usuario. Este último trabajo se extiende en [106] teniendo en cuenta la optimización tanto del enlace

ascendente (UL) como del descendente (DL) en un sistema donde la información disponible es incompleta. En [107] se presenta una comparación entre algoritmos de autooptimización de RET basados en un modelo del sistema (clasificados como algoritmos de tiempo diferido) y algoritmos basados en reglas (clasificados como algoritmos de tiempo real). De la comparación, se concluye que son preferibles métodos con reglas simples cuando falta información.

Desde un punto de vista más amplio, algunos proveedores ofrecen herramientas automáticas para la detección de problemas de cobertura, sobreapuntamiento y solapamiento entre celdas a partir de medidas de campo (*drive tests*). En estas herramientas, la detección de problemas se realiza comparando el valor de algunos indicadores de rendimiento principales frente a un umbral predefinido. Por ejemplo, en [108] se presenta un método para la detección automática de huecos de cobertura, excesivo solapamiento entre celdas y sobreapuntamiento en UMTS a partir de medidas de campo. Aunque estas herramientas están diseñadas inicialmente para solucionar problemas en la red, las salidas de dichas herramientas pueden usarse también para la optimización basada en RET. Sin embargo, la recopilación de las medidas de campo requiere de equipamiento especializado que sólo puede cubrir un área geográfica muy limitada. Más recientemente, la especificación de la funcionalidad de minimización de las pruebas de campo (*Minimization of Drive Test*, MDT) [109] por parte del 3GPP permite recoger medidas automáticas y así extender tanto el periodo de tiempo como el área geográfica cubierta por las medidas. Con los MDT, cada UE genera automáticamente registros de medidas en algunos eventos de activación, que van desde las mediciones periódicas de la potencia piloto a las mediciones radio detalladas después de un fallo del enlace radio. En LTE, esa misma información puede extraerse a partir de las trazas de llamadas generadas por las estaciones base y almacenadas en el sistema de gestión de red.

Sin embargo, ningún estudio ha considerado el uso de trazas de llamadas para mejorar los algoritmos de optimización basados en RET. Las principales contribuciones de este capítulo son: a) tres nuevos indicadores para detectar el sobreapuntamiento, el excesivo solapamiento entre celdas y la pobre cobertura de la celda, construidos a partir de archivos de trazas de llamada del sistema de gestión de red, b) un conjunto de reglas heurísticas para el ajuste del ángulo de inclinación de las antenas en una red celular cuyo fin es aumentar el área de cobertura e incrementar la eficiencia espectral global, mientras se eliminan los problemas

de sobreapuntamiento, y c) una comparación exhaustiva del algoritmo propuesto frente a otros algoritmos de CCO clásicos en escenarios reales.

## 4.2. Formulación del problema y análisis teórico preliminar

En esta sección se formula el problema de la optimización de la capacidad y la cobertura en redes LTE, estableciendo las variables de decisión, la función objetivo y las restricciones del problema. Posteriormente, como justificación de la variable de decisión usada en el problema, se realiza un análisis preliminar del impacto del ángulo de inclinación en las prestaciones de cobertura y capacidad de una celda LTE. Como principal novedad, el análisis presentado incluye una formulación geométrica del problema, así como una valoración de la configuración de inclinaciones de antena de una red real LTE.

### 4.2.1. Formulación del problema

El problema abordado en este capítulo es la optimización de la cobertura y la capacidad de una red LTE mediante la reconfiguración de los ángulos de inclinación de las antenas. Por ello, las variables de decisión son los ángulos de inclinación de las antenas del sistema.

Para definir la función objetivo, en este trabajo se adopta la relación señal a ruido más interferencia, SINR, experimentada por los usuarios como indicador de rendimiento de la cobertura y la capacidad. Para un nivel de interferencia dado, un usuario ubicado en una zona de mala cobertura (p. ej., borde de celda) experimentará bajos niveles de SINR. Inversamente, un usuario en zonas de buena cobertura (p. ej., cerca de la estación base) experimentará valores altos de SINR. De igual forma, la SINR determina la capacidad del canal, dado que la SINR incide directamente en la eficiencia espectral experimentada en los bloques de recursos radio (*Physical Resource Block*, PRB) asignados, y, por tanto, en el *throughput* obtenido por el usuario. Así, un usuario muy interferido, aun cuando reciba un nivel de señal deseada apropiado, experimenta una SINR baja y, por tanto, un *throughput* bajo, esto es, una baja capacidad de usuario.

Es habitual que, dentro de una celda, se definan los indicadores SINR medio,  $\bar{\Gamma}$ , y SINR de borde de celda,  $\Gamma_{ce}$ , como indicadores de capacidad y cobertura, respectivamente [20, 95, 99]. La SINR media considera el promedio de SINR de todos los usuarios servidos por una celda, y, por tanto, puede servir como estima de la eficiencia espectral media, que determina la capacidad de una celda. En cambio, la SINR de borde de celda tiene en cuenta el valor medio de los peores usuarios en términos de SINR en una celda, convirtiéndose así en un estimador de la cobertura de celda.

Como ya se ha comentado, la optimización de cobertura y capacidad debe tratarse como un problema de optimización multiobjetivo, debido al compromiso entre ambos objetivos en LTE. Una configuración de antena que consiga mayor cobertura en una celda suele favorecer el solapamiento entre celdas, provocando así una mayor interferencia en celdas vecinas. Análogamente, puede conseguirse una menor interferencia en celdas vecinas a costa de reducir el solapamiento entre celda, con el riesgo de experimentar una mala cobertura en la propia celda. Sin embargo, si bien es deseable obtener el máximo de cobertura y capacidad posible, es habitual definir cierta prioridad en caso de conflicto entre ambas prestaciones. En estos casos, suele darse preferencia a la mejora de capacidad, siempre que se asegure cierto valor mínimo de cobertura [110]. Por ello, en la formulación clásica del problema de CCO, se trata de encontrar la configuración de antena que obtenga la mejor  $\bar{\Gamma}$ , siempre que la  $\Gamma_{ce}$  esté por encima de cierto umbral. De esta forma, se asegura una calidad mínima para los peores usuarios, al tiempo que se maximiza la capacidad de la celda (y, con ello, del sistema).

De lo anterior, se deduce que el problema de CCO se formula en este trabajo como

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar} && \sum_{i=1}^{N_c} \bar{\Gamma}(i) \\ & \text{Sujeto a} && \Gamma_{ce}(i) > \Gamma_{ce_{min}}(i), \end{aligned} \tag{4.1}$$

donde  $\bar{\Gamma}(i)$  y  $\Gamma_{ce}(i)$  son la SINR media y de borde de celda de la celda  $i$ , cuyos valores dependerán del plan de ángulos de inclinación de la red  $A = \{\alpha(1), \dots, \alpha(N_c)\}$ , y  $N_c$  es el número de celdas del sistema. Nótese que el plan de ángulos,  $A$ , es la variable de decisión del problema. En (4.1), el umbral de SINR de borde de celda,  $\Gamma_{ce_{min}}$ , se define a nivel de celda, para poder considerar diferentes entornos de despliegue (p. ej., urbano denso, residencial, rural, ...).

### 4.2.2. Modelo analítico del impacto de la inclinación de las antenas

En esta subsección se analiza la influencia del ángulo de inclinación en las prestaciones de cobertura y capacidad de una red real LTE. Primero se enumeran algunos de los principales problemas que pueden aparecer por un mal apuntamiento de las antenas. A continuación, se presenta un análisis teórico basado en consideraciones geométricas, que muestra cómo la cobertura de la celda y el área de servicio dependen del ángulo de inclinación de la antena. Sobre la base de este análisis, se construye un modelo geométrico del proceso de ajuste del ángulo de inclinación de la antena que sirve para detectar problemas de cobertura e interferencia. Posteriormente, se presentan los resultados de una prueba de campo donde se analiza la configuración llevada a cabo por el operador en una red LTE real.

#### Consideraciones de partida

La inclinación de una antena tiene un gran impacto en el rendimiento de una red celular. De manera intuitiva, se puede adelantar que:

- a) una inclinación excesiva de la antena puede reducir demasiado el solapamiento entre celdas vecinas, lo que podría generar huecos de cobertura; por otro lado, una inclinación excesivamente pequeña de la antena puede dar lugar a un excesivo solapamiento entre celdas, causando grandes interferencias en las celdas colindantes;
- b) del mismo modo, una escasa inclinación puede causar que la celda capture usuarios a mucha distancia, que deberían ser servidos por otras celdas, debido a condiciones de propagación inesperadas (p. ej., efecto de cañón en entornos urbanos). Este último fenómeno, conocido como *overshooting*, produce áreas de servicio fragmentadas, propensas a fenómenos de obstrucción, que suelen ser el origen de muchos trasposos cuando el usuario se desplaza, y, por ello, debe evitarse;
- c) además, una escasa inclinación de la antena puede aumentar el área de servicio de la celda excesivamente, lo que incrementa la demanda de tráfico, causando que la celda tenga problemas de capacidad;

d) al mismo tiempo, la inclinación de la antena de una estación base define la huella de la celda, lo que define qué usuarios son servidos por cada celda, determinando la eficiencia espectral media del enlace radio, y, con ello, la capacidad de celda.

Por todo ello, al ajustar la inclinación de la antena de una celda, es necesario alcanzar un compromiso adecuado entre la cobertura y la capacidad global del sistema, que evite, o atenúe lo máximo posible, todos esos problemas de manera conjunta.

### Planteamiento geométrico

A continuación se presenta el análisis geométrico del área de cobertura y de servicio de una estación base, inspirado en el que utilizan la mayoría de herramientas de planificación automática para determinar la mejor configuración de despliegue de la red [6, 14, 15]. A partir de dicho análisis, se derivan diversos indicadores geométricos con los que comprobar si cierta configuración de los ángulos de las antenas en una red es adecuada para obtener un buen rendimiento. Finalmente, los indicadores definidos se utilizan para analizar la configuración actual de una red real, detectando posibles defectos en el plan de inclinaciones desplegado por el operador.

Como punto de partida, a partir de la altura de la estación base y del ángulo de inclinación de la antena, se puede calcular la distancia de apuntamiento,  $d_{ap}$ , a la que incide el lóbulo principal de la antena medida en el plano horizontal donde se sitúa el usuario, como

$$d_{ap} = \frac{\Delta h}{\tan(\alpha_{antena})}, \quad (4.2)$$

donde  $\Delta h$  es la diferencia de altura en metros entre la antena de la estación base,  $h_{BS}$ , y la estación móvil,  $h_{MS}$ , y  $\alpha_{antena}$  es el ángulo de inclinación de la antena con respecto al eje horizontal, que está formado por la suma de los ángulos mecánico y eléctrico,  $\alpha_{antena} = \alpha_{mecanico} + \alpha_{electrico}$ . Por convención, el ángulo de apuntamiento se define en el semiplano inferior a la horizontal, de forma que un valor positivo de  $\alpha_{antena}$  indica un apuntamiento inferior a la horizontal.

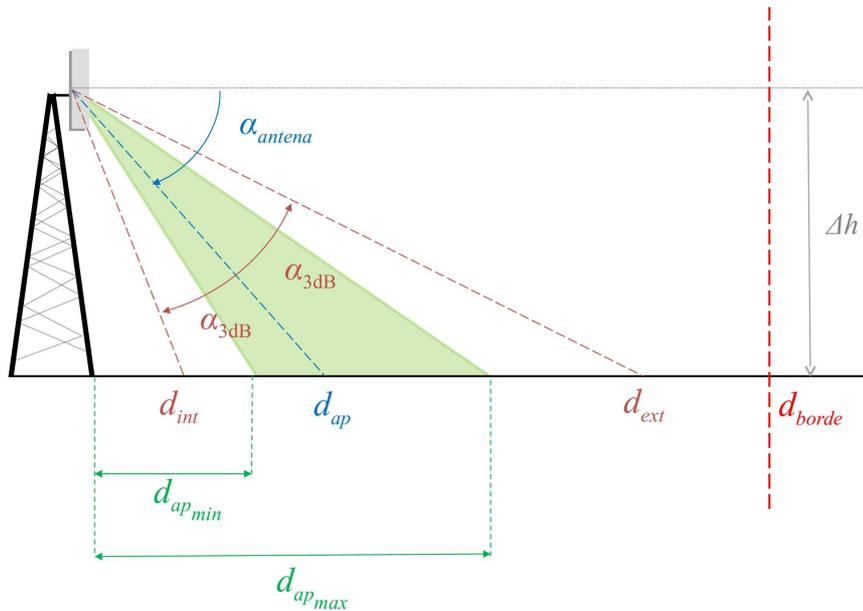


FIGURA 4.1: Indicadores geométricos.

### Nuevos indicadores geométricos

A partir de la ecuación (4.2), pueden obtenerse diversos indicadores que caracterizan de forma precisa cómo la antena incide en los usuarios situados en su zona de cobertura. Estos indicadores se muestran de forma gráfica en la Figura 4.1.

Conocido el diagrama de radiación de la antena, se pueden identificar las distancias a las que la antena presenta una pérdida de ganancia determinada respecto a su valor máximo. Para averiguar estas distancias, sólo hay que sustituir  $\alpha_{antena}$  de la ecuación (4.2) por  $\alpha_{antena} \pm \alpha_{XdB}$ , donde  $\alpha_{antena}$  es el ángulo de inclinación de la antena, que define la dirección de máxima ganancia de la antena, y  $\alpha_{XdB}$  indica el incremento (o decremento) de ángulo de inclinación necesario para obtener una pérdida de  $X$  dB respecto a la ganancia máxima (p. ej.,  $\alpha_{3dB}$ ). Se debe precisar que, a pesar de que la ganancia total de la antena es la combinación de la ganancia horizontal y vertical de la misma,  $G_t = G_h + G_v$ , para la construcción de estos indicadores sólo se hace referencia a la ganancia vertical,  $G_v$ , puesto que únicamente se utiliza el ángulo de inclinación vertical de la antena.

La observación anterior se utiliza en este trabajo para estimar el área principal de servicio de una celda, que viene delimitada por las distancias en las que la ganancia de antena se reduce en 3 dB respecto a la máxima. En la Figura 4.1, se muestra un ejemplo de cálculo de estas distancias. La figura muestra el límite geométrico

de la celda,  $d_{borde}$ , calculado como la mitad de la distancia entre celdas vecinas (*Inter-Site Distance*, ISD). Además, se muestra el rango principal de distancias de servicio de la celda, delimitado por las distancias  $d_{int}$  y  $d_{ext}$ . Ambas distancias se calculan a partir de los ángulos en los que la ganancia vertical de la antena cae 3 dB respecto a la ganancia en la dirección de máxima radiación,  $G_{v,max}$  (esto es,  $G_v(\alpha_{antena} \pm \alpha_{3dB}) = G_v(\alpha_{antena}) - 3$  dB). Nótese que  $G_{v,max} = G_v(\alpha_{antena})$ . La condición de caída de 3 dB define dos ángulos simétricos en el eje vertical,  $\alpha_{antena} \pm \alpha_{3dB}$ , que determinan  $d_{int}$  y  $d_{ext}$ . La diferencia entre los dos ángulos que experimentan dicha caída de 3 dB se conoce como ancho de haz de 3 dB (*Half-Power BeamWidth*, HPBW), que es un parámetro de la antena suministrado por el fabricante. De esta manera, se cumple que  $HPBW_v = 2 \alpha_{3dB}$ , donde  $HPBW_v$  es el ancho de haz a potencia mitad en el eje vertical.

Una vez consultado el ancho de haz, las distancias  $d_{int}$  y  $d_{ext}$  se calculan como

$$d_{int} = \frac{\Delta h}{\tan(\alpha_{antena} + \alpha_{3dB})} \quad (4.3)$$

y

$$d_{ext} = \frac{\Delta h}{\tan(\alpha_{antena} - \alpha_{3dB})}. \quad (4.4)$$

El intervalo de distancias comprendido entre ambos bordes de haz,  $[d_{int}, d_{ext}]$ , constituye el conjunto de distancias radiadas por la antena de manera más eficaz. Así, los algoritmos de planificación basados en consideraciones geométricas [19, 86] procuran hacer coincidir el borde de celda con el borde externo del rango principal de distancias, de forma que  $d_{ext} \approx d_{borde}$ . De esta manera, se reducen los problemas de cobertura en el borde de celda, a la vez que se reducen los problemas de interferencia en celdas vecinas y se garantiza una cobertura aceptable del centro de celda.

Siguiendo una estrategia similar, se definen dos nuevos indicadores que reflejan las distancias mínima y máxima entre las que puede ajustarse la distancia apuntamiento para que las pérdidas en el borde de celda actual no sean ni muy grandes (lo que causaría problemas de cobertura) ni muy pequeñas (lo que causaría problemas de interferencia en celdas vecinas). Estos indicadores, nombrados en la Figura 4.1 como  $d_{apmin}$  y  $d_{apmax}$ , limitan, a través de la ecuación (4.2), el rango de

valores del ángulo de inclinación de la antena,  $\alpha_{antena}$ . Así, los valores umbrales  $d_{ap_{min}}$  y  $d_{ap_{max}}$  se calculan configurando el ángulo de apuntamiento que provoca cierta pérdida de ganancia de antena respecto al máximo,  $\Delta G_{v_{min}}$  o  $\Delta G_{v_{max}}$ , en el borde teórico de celda,  $d_{borde}$ . En otras palabras, si  $d_{ap} = d_{ap_{min}}$  (o  $d_{ap} = d_{ap_{max}}$ ), la ganancia de antena en el ángulo que apunta a  $d_{borde}$  es de  $G_{v,max} - \Delta G_{v_{min}}$  (o  $G_{v,max} - \Delta G_{v_{max}}$ ). Imponiendo una cota inferior a la distancia de apuntamiento,  $d_{ap_{min}}$ , se pretende asegurar que no se produzcan huecos de cobertura por estar la antena demasiado agachada. Al mismo tiempo, la cota superior,  $d_{ap_{max}}$ , evita que se levante excesivamente la antena, lo que elevaría el nivel de interferencia en las celdas adyacentes.

El método para calcular  $d_{ap_{min}}$  y  $d_{ap_{max}}$  es similar para ambas distancias. Como primer paso, debe estimarse el ángulo de inclinación respecto a la horizontal que haría apuntar directamente la antena al borde de celda,  $\alpha_{borde}$ . Dicho cálculo se realiza mediante la expresión

$$\alpha_{borde} = \text{atan}\left(\frac{\Delta h}{d_{borde}}\right). \quad (4.5)$$

Si  $\alpha_{antena} = \alpha_{borde}$ , la antena apunta al borde de celda, y entonces la ganancia de antena al borde de celda es la máxima (es decir,  $G_v(\alpha_{borde}) = G_{v,max}$ ). Resta, por tanto, calcular el ángulo de inclinación suplementario a añadir a  $\alpha_{borde}$  para provocar una pérdida de ganancia  $\Delta G_v$  en el borde de celda. Para ello, se utiliza el modelo de radiación vertical propuesto en [14], definido como

$$At_v(\alpha) = \min\left(12\left(\frac{\alpha}{HPBW_v}\right)^2, SLL_v\right), \quad (4.6)$$

donde  $At_v$  es la atenuación vertical (en dB) que se obtiene para el ángulo  $\alpha$  asumiendo que la fórmula está normalizada a 0 grados (es decir,  $At_v(0) = 0$  dB),  $HPBW_v$  es el ancho de haz de la antena, y  $SLL_v$  (*Side Lobe Level*) es la máxima atenuación que se puede conseguir de la antena en el eje vertical. Despejando de (4.6) el valor de  $\alpha$ , y sustituyendo  $At_v(\alpha)$  por  $\Delta G_v$ , se obtiene el valor de ángulo  $\alpha$  respecto a la horizontal que provoca las pérdidas de ganancia deseadas,  $\alpha_{\Delta G_v}^0$ , en el caso que la antena apuntara en el eje horizontal. A partir de este parámetro, el ángulo de apuntamiento de la antena respecto a la horizontal que provoca las pérdidas de ganancia preestablecidas en el borde de celda se calcula como

$$\alpha_{\Delta G_v} = \alpha_{borde} + \alpha_{\Delta G_v}^{0^\circ}. \quad (4.7)$$

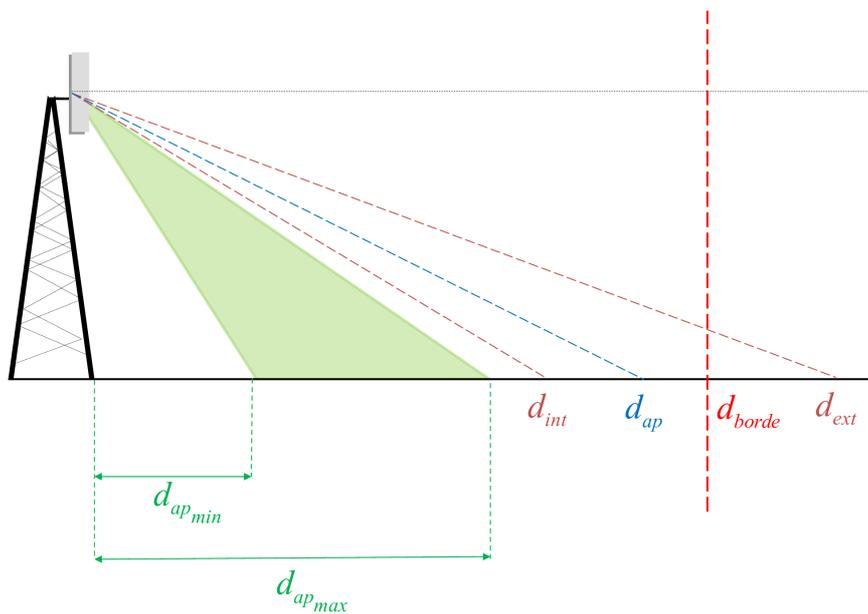
Una vez conocido el ángulo de apuntamiento de antena que produce cierta atenuación en el borde de celda, la distancia horizontal a la que se encuentra el usuario apuntado con ese ángulo se calcula usando el valor del ángulo  $\alpha_{\Delta G_v}^{0^\circ}$  en la ecuación (4.2).

La única diferencia en el cálculo de las distancias  $d_{ap_{min}}$  y  $d_{ap_{max}}$  es el valor de las pérdidas seleccionadas en el borde de celda,  $\Delta G_v$ . Por un lado, el cálculo de  $d_{ap_{min}}$  pretende evitar un hueco de cobertura en el borde de celda, es decir, una excesiva inclinación de la antena que se traduciría en una excesiva atenuación en el borde de celda (hueco de cobertura). Por tanto, para calcular  $d_{ap_{min}}$ , se define un valor máximo de pérdidas,  $\Delta G_{v_{min}}$ . Por el contrario, el cálculo de  $d_{ap_{max}}$  pretende evitar una interferencia excesiva en la celda vecina debido a una insuficiente inclinación de la antena. Por ello, en el cálculo de  $d_{ap_{max}}$ , se utiliza un mínimo de pérdidas,  $\Delta G_{v_{max}}$ . Nótese que los superíndices en los parámetros de pérdida de ganancia,  $\Delta G_{v_{min}}$  y  $\Delta G_{v_{max}}$ , hacen referencia al cálculo de la distancia para la que están configurados ( $d_{ap_{min}}$  y  $d_{ap_{max}}$ , respectivamente), y no a su valor en sí. De hecho, es necesario que  $\Delta G_{v_{min}} > \Delta G_{v_{max}}$ . En este trabajo, se fija que  $\Delta G_{v_{min}} = 10$  dB y  $\Delta G_{v_{max}} = 6$  dB. Los indicadores anteriores pueden servir para detectar situaciones en las que el ángulo de inclinación de antena está mal configurado. Para ello, debe comprobarse si la distancia actual de apuntamiento,  $d_{ap}$ , queda comprendida en el rango distancias que aseguran una ganancia en el borde de celda ni muy grande ni muy pequeña,  $[d_{ap_{min}}, d_{ap_{max}}]$ .

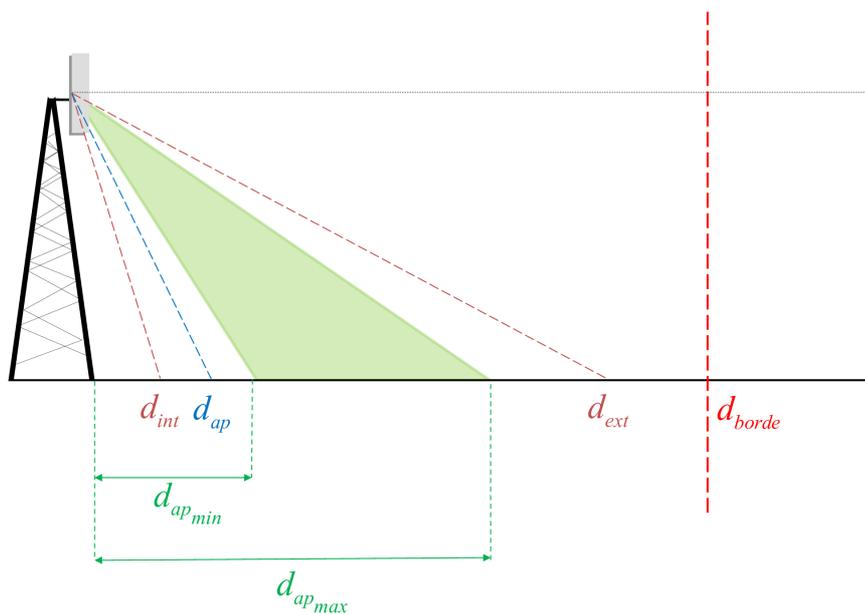
Las Figuras 4.2 (a)-(b) muestran sendos ejemplos de celdas excesivamente levantada y agachada, donde el valor de  $d_{ap}$  es demasiado alto y bajo, respectivamente (esto es,  $d_{ap} > d_{ap_{max}}$  y  $d_{ap} < d_{ap_{min}}$ ). En el caso de la Figura 4.2 (a), las celdas adyacentes experimentarían una interferencia elevada, mientras que en la Figura 4.2 (b) habría un hueco de cobertura en el borde de la celda bajo estudio.

### Prueba de concepto

En esta sección se muestra la aplicación del análisis geométrico anteriormente descrito a una red LTE real. El objetivo es demostrar cómo el análisis geométrico



(a) Celda excesivamente levantada



(b) Celda excesivamente agachada

FIGURA 4.2: Ejemplos de detección de celdas incorrectamente configuradas.

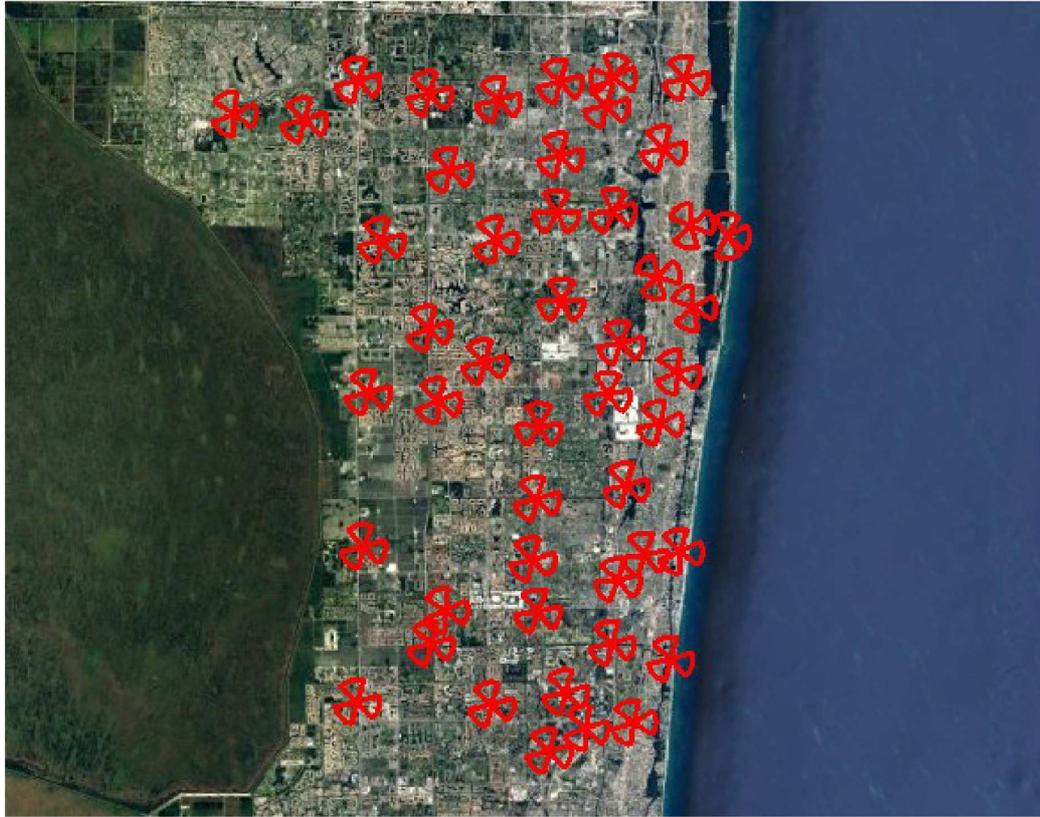


FIGURA 4.3: Vista aérea del escenario suburbano.

de la configuración del parámetro  $\alpha_{antena}$ , en una red permite detectar posibles errores de configuración.

El escenario considerado incluye 144 celdas que cubren un área geográfica de  $875 \text{ km}^2$  en un entorno suburbano de terreno llano. La Figura 4.3 muestra una vista aérea del escenario. En ella se representa la ubicación de cada emplazamiento y la orientación de las celdas. La distancia media entre emplazamientos es de 1.8 km, acorde con una zona levemente poblada. En esta área se utilizan diversos tipos de antenas direccionales, con un  $HPBW_v$  que puede ser  $9.5^\circ$ ,  $11.8^\circ$  ó  $15^\circ$ . Este ancho de haz viene determinado en gran medida por la banda de frecuencias utilizada, que es la de 734 MHz. El ángulo máximo de inclinación que se puede configurar es de  $16^\circ$ .

El análisis geométrico se lleva a cabo en tres pasos. Primero se identifican las celdas que apuntan al horizonte, comparando el ángulo de inclinación y el ancho de haz a potencia mitad de cada antena. Después, se identifican las celdas que apuntan hacia celdas vecinas, comparando la distancia del borde exterior del haz de 3dB con el radio previsto de celda. Finalmente, se identifican las celdas

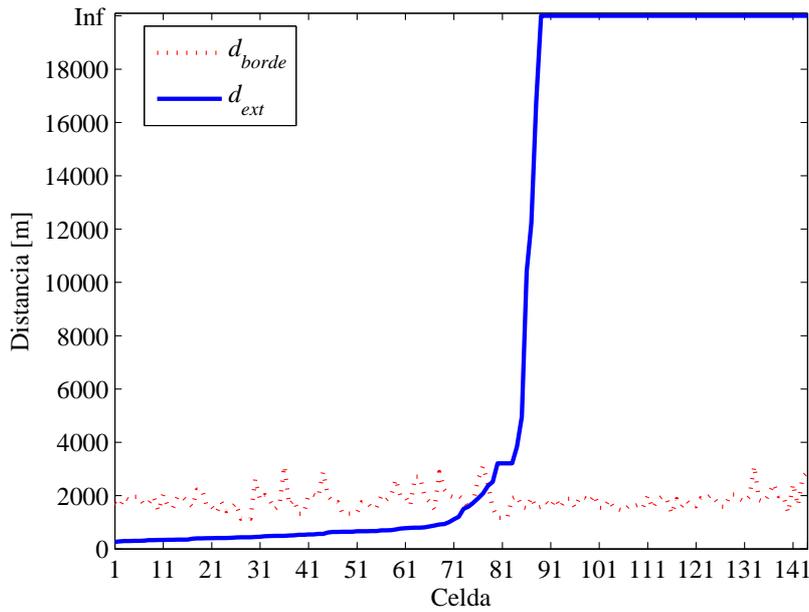


FIGURA 4.4: Comparación del borde previsto y borde externo de las celdas.

demasiado levantadas o agachadas comprobando si la distancia de apuntamiento excede los límites recomendados, calculados con las ecuaciones (4.2), (4.5), (4.6) y (4.7), asumiendo  $\Delta G_{v_{min}} = 10$  dB y  $\Delta G_{v_{max}} = 6$  dB.

Al analizar los ángulos de inclinación de las antenas configurados por el operador, se aprecia que el valor medio del ángulo de inclinación de las celdas es  $\overline{\alpha_{antena}} = 6.75^\circ$ , de los cuales  $0.44^\circ$  corresponden al ángulo mecánico y  $6.31^\circ$  al ángulo eléctrico. Comparando este valor con el obtenido para otros escenarios analizados (no incluidos aquí), se puede concluir que, en términos generales, las celdas del escenario analizado están en valores habituales. A pesar de este dato, el 30 % de las celdas (50 de 144) tienen un valor de  $\alpha_{antena} < HPBW_v/2$ , por lo que  $d_{ext} = \infty$  en esas celdas, siendo éste un indicio claro de que la celda está excesivamente levantada. Este resultado puede deberse a que la red considerada estaba aún en su fase de despliegue cuando se obtuvieron los datos de configuración.

Para comprobar qué celdas se introducen demasiado en celdas vecinas, la Figura 4.4 muestra los valores del radio de celda previsto,  $d_{borde}$  ( $= ISD/2$ ), y la distancia definida por el borde exterior del haz de 3 dB,  $d_{ext}$ , para las 144 celdas del escenario, ordenadas por el valor de  $d_{ext}$  de forma creciente. En la figura, se aprecia de nuevo las 50 celdas con  $d_{ext} = \infty$ , que radian hacia el horizonte. Además, se observa que más de la mitad de las celdas (77 de 144 celdas) tienen un valor de  $d_{ext} > d_{borde}$ , indicando que dichas celdas están apuntando al área de servicio

	Celda 1 (excesivamente levantada)	Celda 2 (excesivamente agachada)
$h_{BS}$ [m]	52.13	45.42
$\alpha_{antena}$ [°]	2	10
$d_{apmin}$ [m]	305	271
$d_{apmax}$ [m]	383	343
$d_{ap}$ [m]	1493	258
$d_{int}$ [m]	440	173
$d_{ext}$ [m]	$\infty$	494
$d_{borde}$ [m]	2890	3113

TABLA 4.1: Parámetros geométricos de dos celdas.

de sus celdas adyacentes. Este resultado se debe, en gran medida, al hecho de que la configuración inicial del ángulo de inclinación seleccionada en las primeras fases del despliegue, cuando el número de emplazamientos es aún pequeño, no suele reconfigurarse cuando más tarde se introducen nuevos emplazamientos. Como consecuencia, la mayoría de redes presentan un exceso de solapamiento entre celdas.

Si bien el análisis anterior permite detectar rápidamente celdas excesivamente levantadas comprobando si  $d_{ext} > d_{borde}$ , puede realizarse un análisis más preciso utilizando los límites de la distancia de apuntamiento. Como ejemplo, la Tabla 4.1 muestra los datos geométricos de dos celdas que incumplen los límites recomendados. La celda 1 (excesivamente levantada) muestra un ángulo de inclinación  $\alpha_{antena} = 2^\circ$ , incumpliendo claramente la condición de que  $d_{ap} \leq d_{apmax}$  ( $d_{ap} = 1493$  m y  $d_{apmax} = 383$  m). Este problema también se aprecia a través del valor  $d_{ext} = \infty$ , síntoma inequívoco de un exceso de solapamiento con celdas adyacentes. Por su parte, la celda 2 (excesivamente agachada) muestra un ángulo de inclinación  $\alpha_{antena} = 10^\circ$ , incumpliendo claramente la condición de  $d_{ap} \geq d_{apmin}$  ( $d_{ap} = 258$  m y  $d_{apmin} = 343$  m).

### 4.3. Diseño del algoritmo de optimización

En la sección anterior se ha descrito un método geométrico para detectar configuraciones inapropiadas del ángulo de inclinación de antena. Dicho método se basa en previsiones del radio de celda, que se realizan durante la fase de planificación. En esta sección se describe el diseño y la implementación de un algoritmo de autoajuste del ángulo de inclinación de antenas para la fase de operación. A diferencia del método geométrico, el algoritmo presentado a continuación utiliza trazas de conexión para detectar problemas de sobreapuntamiento, excesivo solapamiento y huecos de cobertura. En los siguientes apartados, se definen primero los indicadores sintéticos que constituyen la entrada del algoritmo, para después presentar la estructura del algoritmo de optimización.

#### 4.3.1. Indicadores de entrada

Los indicadores descritos en esta sección se diseñan para monitorizar los efectos de una inclinación errónea en una antena, a través de indicadores de cobertura, calidad de señal y capacidad en una red real LTE. Como ya se ha mencionado, en los escenarios limitados por interferencia, la cobertura y la calidad de señal están acoplados. Así, grandes solapamientos entre celdas conllevan, a menudo, una mejor cobertura, pero empeoran la calidad de las conexiones y pueden producir problemas de sobreapuntamiento. Sin embargo, el grado de acoplamiento entre celdas requerido puede variar mucho entre escenarios, de forma que no siempre un excesivo solapamiento entre celdas da lugar a un gran sobreapuntamiento. Por esta razón, es preciso monitorizar de forma separada estos fenómenos, construyendo distintos indicadores que reflejen el rendimiento en términos de cobertura, calidad y capacidad en la red. Los indicadores descritos a continuación se obtienen a partir de archivos de trazas de celda (CTR) almacenados en el sistema de gestión de red. Su obtención hace uso de la herramienta de procesamiento de eventos complejos presentada en el Capítulo 2.

#### Indicador de sobreapuntamiento

Una celda que realiza sobreapuntamiento (u *overshooting*) puede detectarse a partir de medidas periódicas de RSRP reportadas por las celdas vecinas. Una

celda  $i$  produce sobreapuntamiento cuando un porcentaje significativo de medidas hechas por los usuarios en celdas muy lejanas reportan un nivel de señal procedente de la celda  $i$  cercano al valor de la celda vecina con mayor potencia. Estos niveles de señal en celdas distantes pueden considerarse como un solapamiento inútil entre celdas. No mejoran la cobertura de la celda, puesto que ya existe una celda vecina que presenta un nivel de potencia mayor, y tan sólo incrementan el nivel de interferencia en las celdas lejanas. Aun así, no todo solapamiento entre celdas es indeseado. En una red móvil, es común que, en el borde de una celda, dos o más celdas vecinas proporcionen niveles de señal cercanos a los de la celda servidora. Esta situación es necesaria para evitar huecos de cobertura en áreas de transición entre celdas, y no debe ser considerada como un problema a solventar.

Para saber diferenciar entre ambas situaciones, en el algoritmo propuesto, las celdas vecinas de cada celda se clasifican como vecinas relevantes o no relevantes. Una celda vecina se considera como relevante cuando presenta un área de solapamiento grande con la celda servidora. Por el contrario, una celda vecina es irrelevante cuando dicha área de solapamiento es pequeña. Con esta clasificación, sólo las medidas de las celdas vecinas no relevantes son usadas para detectar el sobreapuntamiento, evitando así clasificar como tal el solapamiento normal entre celdas vecinas relevantes.

Más concretamente, el indicador propuesto para medir el sobreapuntamiento de una celda  $i$  es el número de celdas vecinas no relevantes altamente interferidas por la celda  $i$ ,  $N_{os}(i)$  (*os* de *OverShooting*), definido como

$$N_{os}(i) = \sum_{j \in N(i)} (1 - X_{rn}(j, i)) \min \left( 1, \frac{N_{s_{uon}}(j, i)}{N_s(j) R_{uon}} \right), \quad (4.8)$$

donde  $N(i)$  es el conjunto de vecinas de la celda  $i$ ,  $X_{rn}(j, i)$  es un indicador a nivel de adyacencia que muestra el grado de relevancia de una celda  $i$  para la celda  $j$  (0 significa que es no relevante, 1 que tiene una relevancia máxima),  $N_s(j)$  es el número total de muestras de RSRP reportadas por los usuarios de la celda  $j$ ,  $N_{s_{uon}}(j, i)$  (*uon* de solapamiento innecesario de una celda no relevante, en inglés, *Useless Overlapping from Non-relevant cell*) es el número de muestras donde la diferencia entre niveles de RSRP entre la celda servidora  $j$  (para esa medida) y la celda vecina  $i$  es menor que un umbral predefinido,  $\Delta RSRP_{thos}$ , y la celda  $i$  no es la vecina más fuerte, y  $R_{uon}$  es un escalar entre 0 y 1 que define el porcentaje de

muestras necesarias para considerar a la celda  $i$  como una interferente fuerte de la celda adyacente  $j$ . En la ecuación (4.8), el factor  $1 - X_{rn}(j, i)$  cuantifica el grado de irrelevancia de la celda vecina, de forma que sólo las celdas no relevantes (es decir, lejanas) incrementan el valor del indicador de sobreapuntamiento, mientras que el factor  $\min\left(1, \frac{N_{suon}(j, i)}{N_s(j) R_{uon}}\right)$  asegura que una celda vecina  $j$  altamente interferida por la celda  $i$  sólo sume 1 a  $N_{os}(i)$ .

El grado de relevancia entre vecinas se mide con el parámetro  $X_{rn}(j, i)$ , definido como

$$X_{rn}(j, i) = \min\left(1, \frac{N_{s_{rn}}(j, i)}{N_s(j) R_{rn}}\right), \quad (4.9)$$

donde  $N_{s_{rn}}(j, i)$  ( $rn$  de vecina relevante, *Relevant Neighbor*) es el número de muestras con valores de RSRP de la celda vecina  $i$  mayores que el resto de vecinas, y  $R_{rn}$  define el ratio de muestras relevantes frente al total de muestras necesarias para considerar a la celda  $i$  como vecina totalmente relevante de la celda adyacente  $j$ . Así,  $X_{rn} = 1$  cuando  $N_{s_{rn}}(j, i)/N_s(j) \geq R_{rn}$ .

### Indicador de solapamiento innecesario

En este trabajo, se considera solapamiento innecesario aquél que se produce en zonas donde la celda servidora aporta un gran nivel de señal. Dicho solapamiento innecesario también puede detectarse a partir de medidas de RSRP reportadas en las celdas vecinas. Así, este problema ocurre cuando la señal de una celda vecina se recibe con un nivel de RSRP cercano al de la celda servidora cuando el nivel de señal de esta última es muy alto (es decir, muestras de baja dominancia cerca de la estación base servidora).

Concretamente, el indicador propuesto para medir el solapamiento innecesario generado por una celda  $i$  es el número de celdas vecinas  $j$  donde existe un porcentaje significativo de muestras de baja dominancia en regiones con un alto nivel de RSRP de la celda servidora  $j$  debido a la celda  $i$ ,  $N_{ol}(i)$  ( $ol$  de *OverLapping*), calculado como

$$N_{ol}(i) = \sum_{j \in N(i)} \min\left(1, \frac{N_{s_{uo}}(j, i)}{N_s(j) R_{uo}}\right), \quad (4.10)$$

donde  $N_{suo}(j, i)$  (*uo* de solapamiento innecesario, *Useless Overlapping*) es el número de muestras donde la diferencia de RSRP entre la celda servidora  $j$  y la celda vecina  $i$  es menor que un umbral predefinido,  $\Delta RSRP_{th_{ol}}$ , y el nivel de señal de la celda servidora  $j$  es mayor que un umbral,  $RSRP_{high_{th}}$ , y  $R_{uo}$  es un escalar entre 0 y 1 que define el ratio de muestras de baja dominancia que consideran a la celda  $i$  como una interferente fuerte de la celda adyacente  $j$ . De nuevo, el operador  $\min()$  asegura que una celda vecina  $j$  sólo sume 1 a  $N_{ol}(i)$  cuando tenga un área grande de solapamiento innecesario con la celda  $i$ .

### Indicador de mala cobertura

El indicador propuesto se diseña para detectar situaciones de falta de cobertura en el borde de celda, que pueden solventarse levantando la antena. Para ello, se combinan medidas de RSRP y de avance temporal (TA) de la celda servidora. Concretamente, para medir el grado de mala cobertura en una celda  $i$ , se define el ratio de muestras con cobertura insuficiente en el borde de la celda,  $R_{bc}(i)$  (*bc* de *Bad Coverage*), como

$$R_{bc}(i) = \frac{N_{bcce}(i)}{N_{ce}(i)}, \quad (4.11)$$

donde  $N_{bcce}(i)$  es el número de muestras de RSRP inferiores a un cierto umbral,  $RSRP_{low_{th}}$ , reportadas por los usuarios del borde de la celda  $i$  (*bcce* de *Bad Coverage in Cell-Edge*), y  $N_{ce}(i)$  es el número total de muestras reportadas por los usuarios del borde de la celda  $i$ . A fin de utilizar sólo datos estadísticos de la red, en lugar de utilizar el radio de celda previsto durante la fase de planificación, el borde de celda se calcula como la región que comprende todas las distancias donde el valor de TA es mayor que el percentil del 95 % de la distribución de TA de la celda.

Se debe considerar las medidas de TA y RSRP están asociadas a eventos diferentes, que pueden recogerse con distinta frecuencia. Por esta razón, durante el procesamiento de la información, primero se sincronizan ambas medidas y después se comprueba si el valor de TA es mayor que el borde de celda y si el valor de RSRP es inferior al umbral predefinido.

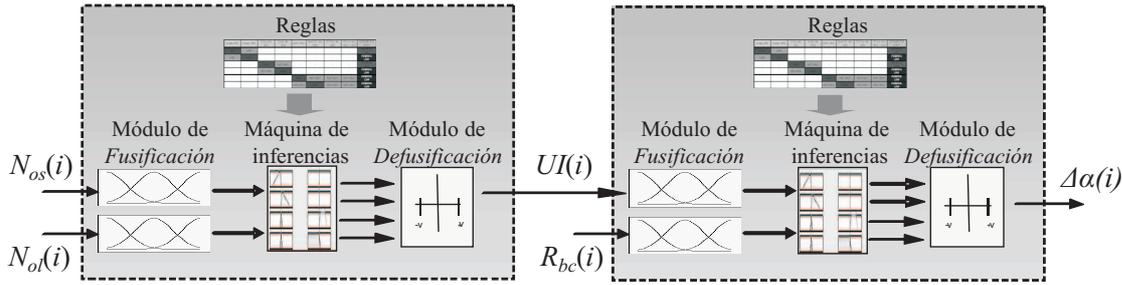


FIGURA 4.5: Diagrama del controlador lógico difuso.

### 4.3.2. Estructura del algoritmo

El algoritmo propuesto está diseñado como un controlador incremental que computa cambios (o incrementos) en el ángulo de inclinación de las antenas de forma iterativa a partir de trazas de celda. Por simplicidad, el controlador se implementa mediante controladores de lógica difusa (*Fuzzy Logic Controller, FLC*) [111]. La principal ventaja de los FLC, comparados con los controladores tradicionales (*Proportional Integrative and Derivative, PID*), reside en la simplicidad para definir el comportamiento del controlador a partir de reglas lingüísticas tomadas del conocimiento previo del operador.

Como se muestra en la Figura 4.5, el algoritmo consiste en dos FLC que funcionan de manera secuencial a nivel de celda. Cada celda ejecuta sus dos FLC al final de cada periodo de reporte (ROP) sin coordinarse con las celdas vecinas. Las entradas del primer FLC son el indicador de sobreapuntamiento,  $N_{os}(i)$ , y el indicador de solapamiento innecesario,  $N_{ol}(i)$ , descritos anteriormente. La salida de este primer FLC es una nueva variable que indica problemas potenciales de solapamiento y sobreapuntamiento,  $UI(i)$  (de interferencia innecesaria, *Useless Interference*), que pueden solucionarse agachando la antena. El valor de esta salida cuantifica la interferencia innecesaria generada por la celda  $i$ , que varía entre 0 (sin interferencia) y 1 (con interferencia alta). A continuación,  $UI(i)$  se usa como entrada del segundo FLC, junto con el indicador de mala cobertura,  $R_{bc}(i)$ . La salida del segundo FLC es el incremento sugerido para el ángulo de inclinación de la antena,  $\Delta\alpha(i)$ , que puede ser positivo (agachar) o negativo (levantar).

Ambos FLC están compuestos por tres etapas: fusificación, inferencia y defusificación. En la etapa de *fusificación*, se califican las entradas del FLC con valores entre 0 y 1 según el grado de pertenencia de las entradas a una clasificación cualitativa (p. ej., “alto” o “bajo”). Dicha asignación se realiza mediante las

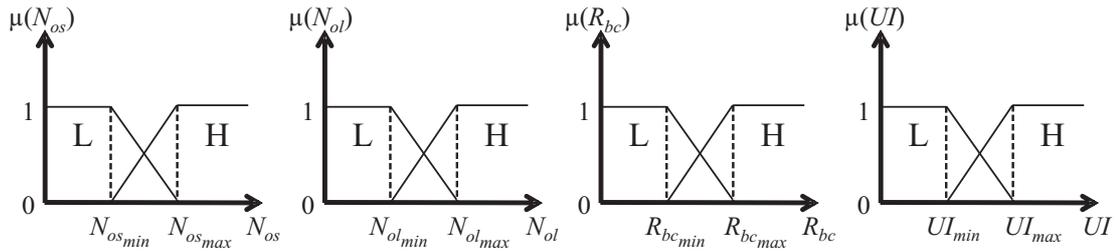


FIGURA 4.6: Funciones de pertenencia de las entradas.

funciones de pertenencia  $\mu(N_{os})$  y  $\mu(N_{ol})$  en el primer FLC, y  $\mu(UI)$  y  $\mu(R_{bc})$  en el segundo FLC. La Figura 4.6 muestra las funciones de pertenencia consideradas para cada entrada, indicando el grado de pertenencia de cada valor a cada clase. Los términos L y H describen los calificativos bajo (*Low*) y alto (*High*), respectivamente. Las variables  $N_{os_{min}}$ ,  $N_{os_{max}}$ ,  $N_{ol_{min}}$ ,  $N_{ol_{max}}$ ,  $R_{bc_{min}}$ ,  $R_{bc_{max}}$ ,  $UI_{min}$  y  $UI_{max}$  son parámetros internos del algoritmo. En la figura se aprecia cómo, en un FLC, un valor de entrada concreto puede ser calificado simultáneamente con diferentes clases, debido al solapamiento de las funciones de pertenencia (de ahí, el término de controlador difuso).

La máquina de *inferencia* define el comportamiento del controlador en términos lingüísticos por medio de un conjunto de reglas del tipo “SI (antecedente) ENTONCES (consecuente)”. A diferencia de los sistemas expertos clásicos, donde se activa una sola regla en cada momento, se pueden ejecutar varias reglas simultáneamente en un mismo FLC. Cada regla tiene su propia fuerza de acción dependiendo del grado de satisfacción de sus antecedentes. Esta propiedad confiere al controlador un funcionamiento más gradual. Las Tablas 4.2 y 4.3 muestran las reglas del primer y segundo FLC, respectivamente. Por ejemplo, la regla 1 de la Tabla 4.2 se lee como “SI  $N_{os}(i)$  (sobreapuntamiento) es bajo y  $N_{ol}(i)$  (solapamiento innecesario) es bajo, ENTONCES  $UI(i)$  (interferencia innecesaria) es bajo”. A partir de las reglas, se puede deducir que el primer FLC detecta interferencia innecesaria cuando ocurre sobreapuntamiento o solapamiento innecesario, mientras que el segundo FLC propone agachar la antena cuando la celda genera interferencia innecesaria, o levantarla cuando existe mala cobertura en el borde de la celda.

Finalmente, en la etapa de *defusificación* se traducen las consecuencias de las reglas ejecutadas en la máquina de inferencia a valores numéricos ( $UI(i)$  para el primer FLC, y  $\Delta\alpha(i)$  para el segundo FLC). Para esta etapa, se utiliza el método del centro de gravedad [111]. Por simplicidad, el controlador se diseña según la

Nº	$N_{os}(i)$	$N_{ol}(i)$	$UI(i)$
1	Bajo	Bajo	Bajo
2	Alto	Bajo	Alto
3	Bajo	Alto	Alto
4	Alto	Alto	Alto

TABLA 4.2: Reglas del primer controlador de lógica difusa

Nº	$UI(i)$	$R_{bc}(i)$	$\Delta\alpha(i)$
1	Bajo	Bajo	Igual
2	Alto	Bajo	Positivo
3	Bajo	Alto	Negativo
4	Alto	Alto	Igual

TABLA 4.3: Reglas del segundo controlador de lógica difusa

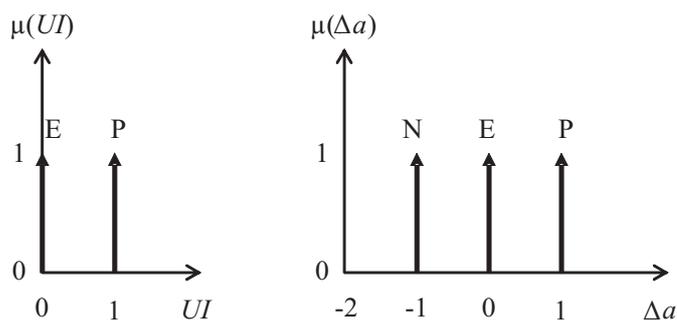


FIGURA 4.7: Funciones de pertenencia de las salidas.

estructura de Takagi-Sugeno, donde las funciones de pertenencia a la salida son constantes, como se muestran en la Figura 4.7. Los términos L y H vuelven a describir los calificativos bajo (*Low*) y alto (*High*), mientras que los términos N, E y P hacen referencia a negativo (*Negative*), igual (*Equal*) y positivo (*Positive*). Los cambios de inclinación se realizan en pasos de 1 grado, por lo que el valor final de la salida,  $\Delta\alpha(i)$ , se redondea al valor entero más cercano, de forma que  $\Delta\alpha(i) \in \{-1, 0, 1\}$ .

Las funciones de pertenencia de las entradas y las salidas de los FLC han sido diseñadas para asegurar la estabilidad del sistema. Gracias a que varias reglas pueden dispararse simultáneamente con diferentes grados, los FLC consiguen un comportamiento del sistema más estable en los instantes en los que las entradas

cruzan los umbrales. Del mismo modo, el cambio máximo de la inclinación se limita a  $1^\circ$ , evitando así grandes cambios en el rendimiento de la red.

El método propuesto funciona de forma iterativa, comenzando a partir de una configuración inicial del ángulo de inclinación, que se modifica progresivamente. Para un cierto periodo de tiempo, referido como lazo de optimización, las estaciones base recogen las trazas CTR, a partir de las que se calculan los indicadores de sobreapuntamiento, solapamiento y cobertura. Estos indicadores se usan para evaluar el rendimiento de la red con la configuración actual de inclinación de cada antena. Si los indicadores muestran problemas de rendimiento en una celda, el FLC sugiere un nuevo valor para la inclinación de la antena de dicha celda, y, a continuación, comienza un nuevo lazo de optimización.

El nuevo valor de inclinación se calcula añadiendo el cambio en la inclinación sugerido por el algoritmo  $\Delta\alpha(i)$ , al valor actual,  $\alpha(i)$ . Por razones de seguridad, el valor final de la inclinación de la antena de la celda  $i$  está limitado al rango  $[\alpha_{\min}(i), \alpha_{\max}(i)]$ . El parámetro  $\alpha_{\max}(i)$  se configura al máximo valor del ángulo de inclinación soportado por el equipo del fabricante, mientras que  $\alpha_{\min}$  se usa como un freno que tiene en cuenta consideraciones geométricas incluyendo la dirección de apuntamiento y el ancho de haz de la antena. Se considera que una antena con un valor de inclinación menor que la mitad de su ancho de haz de mitad de potencia,  $HPBW_v$ , radia una gran parte de su energía por encima del horizonte. Para evitar esta situación,  $\alpha_{\min}(i) = HPBW_v/2$ . Se debe tener en cuenta que los valores de  $\alpha_{\min}$ ,  $\alpha_{\max}$  y  $HPBW_v$  no tienen por qué mantenerse constantes en todas las celdas, debido a que los modelos de antena pueden ser diferentes.

#### 4.4. Análisis del rendimiento del algoritmo

En esta sección se presentan las pruebas realizadas para validar el algoritmo de autoajuste del ángulo de inclinación de antenas propuesto, que utiliza indicadores obtenidos a partir de trazas de conexión. Las pruebas incluyen tanto pruebas de campo como simulaciones. Las pruebas de campo sirven como prueba de concepto de los indicadores, mientras que las simulaciones permiten cuantificar el beneficio obtenido por el algoritmo en diferentes condiciones de red. Por claridad, se describe primero la metodología experimental y, posteriormente, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los experimentos realizados.

### 4.4.1. Metodología experimental

En este apartado se describen los escenarios, la herramienta de simulación, los experimentos realizados y los principales indicadores de rendimiento utilizados en cada experimento.

#### Escenarios

La evaluación del algoritmo se realiza en dos escenarios reales macrocelulares:

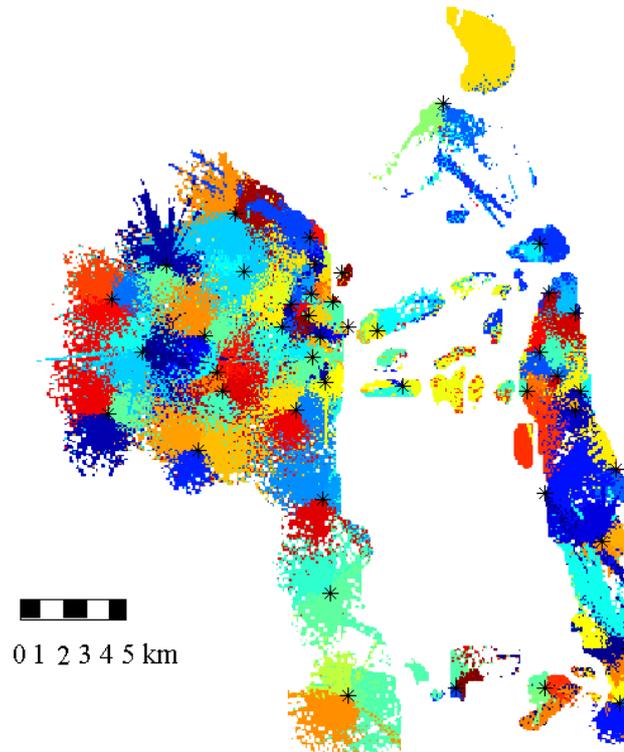
- 1) Escenario limitado por interferencia, consistente en un área urbana densa donde las distancias entre emplazamientos, ISD, presentan valores bajos.
- 2) Escenario limitado por cobertura, formado por un área residencial con edificios bajos, donde los ISD presentan valores altos.

La Figura 4.8 muestra un esquema de ambos escenarios, donde las estrellas negras representan la ubicación de los emplazamientos, las áreas coloreadas indican las diferentes áreas de servicio de las celdas obtenidas con la configuración inicial de los ángulos de inclinación de las antenas, y las áreas blancas son las áreas prohibidas (en este caso, mar). En la figura, se aprecia que el escenario limitado por interferencia consiste en 129 celdas distribuidas en 44 emplazamientos con un ISD medio de 0.8 km, mientras que el escenario limitado por cobertura está formado por 163 celdas distribuidas en 55 emplazamientos con un ISD medio de 1.1 km.

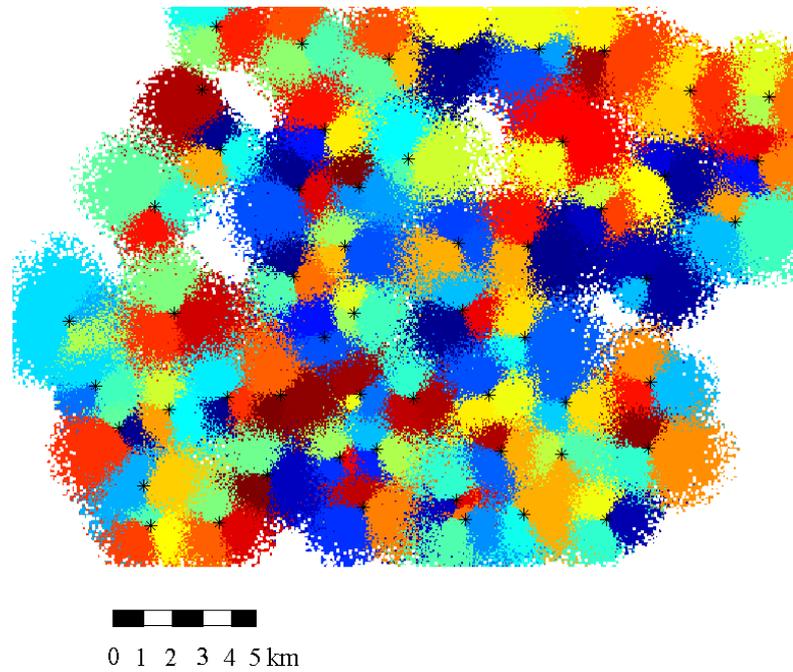
Las pruebas de campo se realizan en el escenario limitado por interferencia (urbano denso), mientras que las simulaciones se realizan en ambos escenarios.

#### Herramienta de simulación

Para los experimentos, se dispone de un simulador estático LTE de nivel de sistema desarrollado en Matlab<sup>©</sup>. A continuación, se describen algunas de sus características más importantes. En el Apéndice A, se incluye una descripción más detallada del simulador.



(a) Escenario limitado por interferencia



(b) Escenario limitado por cobertura

FIGURA 4.8: Esquema de los escenarios.

El proceso de simulación sigue varios pasos. En primer lugar, el simulador divide el área analizada en una rejilla de puntos regular, donde cada punto representa una ubicación potencial de usuario. Para cada configuración de parámetros de red (en este caso, para cada plan de ángulos de inclinación de las antenas), se calcula el nivel de señal recibido en cada punto de cada estación base mediante un modelo de propagación macrocelular que incluye desvanecimiento lento *log-normal*. Por simplicidad, no se considera desvanecimiento rápido. Para este cálculo, se considera, como celda servidora de cada punto, la celda que proporciona el máximo nivel de señal. El nivel de interferencia se estima a partir de la distribución espacial de usuarios y la carga de celda, que pueden ser no uniformes, siguiendo patrones reales obtenidos a partir de los estadísticos de una red real LTE. Relacionando los niveles de señal deseada e interferencia, se calcula la calidad de conexión y la eficiencia espectral del enlace radio en cada punto del escenario. Finalmente, los indicadores empleados por el algoritmo de optimización se calculan agregando (o promediando) las medidas obtenidas en todos los puntos del escenario. En este trabajo, se considera únicamente el enlace descendente, que es el principal cuello de botella de las redes actuales.

A pesar de su simplicidad, la herramienta de simulación está diseñada para obtener la mayoría de los estadísticos disponibles en la red real. Para conseguirlo, el simulador incluye las siguientes funcionalidades:

1. Delimitación de áreas prohibidas, estableciendo puntos donde los usuarios no pueden situarse debido a recursos hidrológicos (p. ej., mar), obtenidos a partir de archivos en formato KML (*Keyhole Markup Language*) que limitan las zonas costeras [112].
2. Parametrización del modelo de la antena por celda (p. ej., ganancia máxima, ancho de haz a potencia mitad horizontal y vertical, ...) dependiendo del proveedor del equipo.
3. Inicialización de la distribución de carga de celda a lo largo de todo el escenario a partir del porcentaje de utilización de PRB obtenidos de contadores del sistema de gestión de red de la red real.
4. Ajuste de la distribución espacial de los usuarios dentro de una celda basada en coronas circulares, a partir de la distribución de TA de cada celda de la red real [113].

5. Ajuste de los parámetros del modelo de propagación en el simulador basado en el histograma de medidas de RSRP de la red real.
6. Actualización de los porcentajes de utilización de PRB por celda mediante la estimación del impacto del algoritmo de ajuste automático en la eficiencia espectral del enlace radio de cada posición de usuario.
7. Generación de los archivos de trazas CTR requeridos por el algoritmo de ajuste automático, emulando el proceso de recogida de trazas de una red real.

La Tabla 4.4 resume los principales parámetros de simulación. En cada escenario, se usa un modelo de propagación distinto. En el escenario limitado por interferencia (área urbana densa), se usa el modelo WINNER II C2 [114]. En este modelo, los usuarios se clasifican en usuarios con visión directa (*Line Of Sight*, LOS) o sin visión directa (*Non-Line Of Sight*, NLOS) basándose en la posición de las antenas y datos de geolocalización de los edificios obtenidos de un mapa del escenario. En el modelo de propagación, la variable  $X$  representada en la Tabla 4.4 es un término que permite ajustar las pérdidas de propagación de los usuarios NLOS a partir de los estadísticos de la red [114]. En el escenario limitado por cobertura (área residencial), donde no existen edificios altos, se usa el modelo COST-231 [115]. Las constantes del modelo COST-231 se ajustan con estadísticas de RSRP obtenidas en dicha área.

En el simulador, el impacto de la inclinación de las antenas se modela cambiando la ganancia de las antenas en los planos horizontal y vertical. Aunque los modelos considerados no tienen en cuenta fenómenos locales, como reflexiones en edificios o curvatura de rayos, se ha comprobado que el efecto global de la inclinación de las antenas se modela correctamente en ambos escenarios, a partir de la comparación entre los niveles de RSRP obtenidos en el escenario real y en el escenario simulado, tras el ajuste de los modelos de propagación. El resto de parámetros en la Tabla 4.4 están tomados de la configuración real de la red simulada. Ambos escenarios incluyen una única portadora a 734 MHz con un ancho de banda de 10 MHz (es decir, 50 PRB). La resolución espacial de la rejilla que resulta de las medidas de TA es de 40 metros. La altura, la configuración inicial de la inclinación y la potencia de transmisión de las antenas se toman de la red real, siendo diferentes para cada celda y estando dentro de los rangos indicados

Parámetros de simulación		
Modelo de propagación [dB]	Escenario interferencia	Winner II C2 [114] con $X=14$ para usuarios NLOS
	Escenario cobertura	$PL = 152.7 - 13.82 \log_{10}(h_{BS}[\text{m}]) +$ $+ (64.37 - 6.55 \log_{10}(h_{BS}[\text{m}]))$ $\log_{10}(d[\text{km}])$
Distribución espacial del tráfico	Basado en medidas de TA	
Resolución de la rejilla [m]	40	
Características de la red		
Frecuencia de portadora [MHz]	734	
Ancho de banda [MHz]	10	
Número de PRB	50	
Máxima inclinación permitida [°]	16	
Altura de UE [m]	1.5	
Potencia de transmisión de eNB [dBm]	[46.5, 47.4]	
Ganancia máxima de antena [dB]	15	
Ancho de haz de 3 dB [°]	9.5, 11.8, 15	
	Escenario interferencia	Escenario cobertura
Número de emplazamientos	44	55
Número de celdas	129	163
Tasa de utilización de PRB [%]	[5-70]	[5-60]
Tasa media de utilización de PRB [%]	24	29
Ángulo de inclinación de antena inicial [°]	[0-13]	[1-14]
Altura de antena [m]	[3-54]	[10-45]
Distancia media entre emplazamientos [m]	815	1110

TABLA 4.4: Parámetros de simulación

en la Tabla 4.4. Los datos de tráfico y de utilización de PRB están tomados del tráfico real en la hora cargada.

## Descripción de los experimentos

Para evaluar el algoritmo propuesto, se definen cuatro experimentos. El primer experimento (experimento A1) valida los nuevos indicadores diseñados mediante una prueba de campo. Los otros tres experimentos (experimentos A2, A3 y A4) evalúan el rendimiento del algoritmo en distintos escenarios con el simulador.

En el experimento A1, se comprueba la sensibilidad de los indicadores de sobreapuntamiento, solapamiento innecesario y mala cobertura (es decir,  $N_{os}$ ,  $N_{ol}$  y  $R_{bc}$ ) a los cambios de inclinación de las antenas. Para ello, se reduce en 1° el ángulo de inclinación de 42 de las 129 celdas del escenario real limitado por interferencia. Las 42 celdas seleccionadas son aquéllas que generan mayores problemas

de interferencia en sus celdas vecinas. Las 42 celdas quedan repartidas de forma dispersa a lo largo del escenario. Este escenario urbano denso se considera el más desfavorable, por sus características de propagación especiales, como, por ejemplo, la reflexión y la difracción en los edificios, que podrían provocar un comportamiento anómalo de los indicadores. Si los indicadores funcionan bien en este entorno urbano denso, es previsible que también lo hagan en entornos más simples, como el residencial o el rural.

Por su parte, los experimentos A2 y A3 cuantifican, con el simulador, el impacto del algoritmo de autoajuste del ángulo de inclinación de las antenas en los dos escenarios. En estos experimentos A2 y A3, se comparan cuatro métodos de ajuste:

1. El primer método es el plan de inclinaciones real implementado actualmente por el operador, referenciado como OS (*Operator Solution*). OS se considera la solución de referencia con la que se comparan el resto de métodos. Incluyendo esta solución, se espera demostrar que los ángulos de inclinación propuestos por el operador son inadecuados, debido a que las inclinaciones de antena se suelen configurar cuando el emplazamiento se activa por primera vez, manteniéndose su valor, aunque se desplieguen nuevos emplazamientos alrededor, generando solapamiento innecesario entre celdas.
2. El segundo método es el algoritmo de ajuste automático iterativo para RET basado en archivos de trazas CTR, descrito en la Sección 4.3 y referenciado como TF-RET (*Trace-based Fuzzy RET*). Este método se inicializa con la configuración de inclinación OS y se simulan 20 iteraciones (lazos de optimización). A posteriori, se comprueba que este número de iteraciones es suficiente para alcanzar el régimen permanente. Por simplicidad, el análisis de este algoritmo se restringe a la solución obtenida en la última iteración, que sería la propuesta por el algoritmo TF-RET. La Tabla 4.5 presenta la configuración de parámetros internos del algoritmo. De la tabla, se deduce que la configuración de los parámetros está definida de forma que:
  - a) las celdas candidatas para agachar su ángulo de inclinación son aquellas que interfieren a más de una celda vecina no relevante o presentan un solapamiento innecesario con más de dos celdas vecinas, y
  - b) las celdas candidatas para levantar su ángulo de inclinación son aquellas que presentan más del 20 % de muestras de RSRP en el borde de la celda inferiores a -105 dBm.

La configuración mostrada en la Tabla 4.5, que se mantiene para ambos escenarios, se ha ajustado a partir de pruebas de campo llevadas a cabo en áreas geográficas muy extensas que cubrían diferentes topologías de la red. Por tanto, estos ajustes deben ser válidos para redes de distinta topología.

3. El tercer método es una variación del método TF-RET, donde se usan las mismas reglas, pero ajustando la potencia de transmisión de la estación base,  $P_{tx}$ , en vez de la inclinación de la antena. Este método, referenciado como TF-PWR (*Trace-based Fuzzy PoWeR*) es una solución pensada para aquellos emplazamientos que no dispongan de RET o donde no sea recomendable modificar el ángulo de inclinación porque la antena se comparta entre diferentes tecnologías. La salida de TF-PWR es el cambio de la potencia de transmisión sugerido,  $\Delta P_{tx}$ . Este método se inicializa con la potencia de transmisión máxima, por lo que la potencia se reduce progresivamente para eliminar solapamiento innecesario entre celdas, usando las reglas de TF-RET. Al igual que para TF-RET, se simulan 20 lazos de optimización para obtener la solución final del algoritmo TF-PWR.
4. El cuarto método es un método de planificación basado en consideraciones geométricas que utiliza en una simple fórmula para el ajuste del ángulo de inclinación de las antenas [19, 86], nombrado aquí como G-RET (*Geometric RET*). En G-RET, el ángulo de inclinación óptimo para una celda  $i$ ,  $\alpha_{geo}(i)$ , es aquél que asegura que la ganancia vertical de la antena en la dirección del borde de celda es 3 dB inferior al valor máximo. Para su cálculo, se utiliza la misma expresión que en la ecuación (4.7), sustituyendo  $\Delta G_v$  por 3 dB, de forma que

$$\alpha_{geo}(i) = \alpha_{borde}(i) + \alpha_{3dB}^{0^\circ}(i), \quad (4.12)$$

donde  $\alpha_{borde}(i)$  es el ángulo definido por la antena y el borde real de la celda  $i$ , descrito en la ecuación (4.5), y  $\alpha_{3dB}^{0^\circ}(i)$  es el ángulo de la antena con el que la ganancia vertical cae 3 dB respecto a la máxima para la celda  $i$ , calculado como la mitad del ancho de haz vertical a 3 dB (es decir,  $\alpha_{3dB}^{0^\circ}(i) = HPBW_v(i)/2$ ). El radio de celda,  $d_{borde}$ , se estima a partir de los puntos del borde de celda. En el método geométrico, los puntos del borde de celda se obtienen construyendo las áreas de dominancia de cada celda por medio del teselado de Voronoi [116]. A partir del polígono que define el área de

FLC 1		
$N_{os}$	$\Delta RSRP_{th_{os}}$ [dB]	6
	$R_{uon}$ [%]	5
	$R_{rn}$ [%]	10
	$N_{os_{mín}}$	0.9
	$N_{os_{máx}}$	1
-----		
$N_{ol}$	$\Delta RSRP_{th_{ol}}$ [dB]	6
	$R_{uo}$ [%]	5
	$RSRP_{high_{th}}$ [dBm]	-80
	$N_{ol_{mín}}$	1.95
	$N_{ol_{máx}}$	2.05
FLC 2		
$R_{bc}$	$RSRP_{low_{th}}$ [dBm]	-105
	$R_{bc_{mín}}$	15
	$R_{bc_{máx}}$	20
-----		
$UI$	$UI_{mín}$	0
	$UI_{máx}$	1

TABLA 4.5: Configuración de parámetros de TF-RET

dominancia, el radio de celda se calcula como la distancia media entre los puntos del borde de celda y la posición de la antena. Para extender el análisis, el método G-RET se prueba con distintos valores de pérdidas de ganancia en el borde de celda, sustituyendo en (4.12) el término  $\alpha_{3dB}^{0^\circ}(i)$  por el incremento de ángulo vertical necesario para alcanzar cierto valor de pérdida de ganancia vertical en el borde de celda (distinto a 3 dB),  $\alpha_{\Delta G_v}^{0^\circ}$ , de forma que

$$\alpha_{geo}(i) = \alpha_{borde}(i) + \alpha_{\Delta G_v}^{0^\circ}. \quad (4.13)$$

Pese a esta generalización en la formulación, si no se dice lo contrario, se adopta por defecto el valor de  $\Delta G_v = 3$  dB para G-RET cuando se compara con el resto de métodos.

Tanto TF-RET como TF-PWR necesitan las estadísticas de RSRP y TA por celda para su funcionamiento. Dichas distribuciones de RSRP y TA se generan en el propio simulador a partir de las matrices de propagación e información de distancias.

A diferencia de los experimentos A2 y A3, donde se hace uso de las estadísticas de rendimiento recopiladas de la red real, el experimento A4 pretende validar el algoritmo propuesto en un escenario con alta tasa de utilización PRB (es decir,

una red muy cargada). Para ello, los métodos OS y TF-RET se evalúan en el escenario limitado por interferencia, pero configurando una tasa de utilización de PRB uniforme del 75 % en todas las celdas. Dicho valor es tres veces mayor que la tasa media de utilización de PRB del escenario en la realidad, que es de un 24 %, tal como se muestra en la Tabla 4.4. Con ello, se pretende verificar la robustez del método frente a variaciones de la distribución de carga en la red.

### Indicadores de rendimiento

Para evaluar la bondad de los algoritmos en los experimentos A2, A3 y A4, se utilizan los siguientes indicadores de rendimiento:

- a) como medida de la calidad de conexión de la red y de la eficiencia espectral, se utiliza el valor medio global de SINR en el enlace descendente,  $\overline{SINR}_{avg}$ , calculado como la media aritmética del SINR medio en el enlace descendente de cada celda del escenario, y
- b) como medida de la cobertura de la red, se usa el valor global de SINR en el enlace descendente en el borde de celda,  $\overline{SINR}_{ce}$ , calculado como la media aritmética del percentil del 5 % de SINR en el enlace descendente de cada celda del escenario.

Ambos indicadores de SINR se calculan en el mismo conjunto de puntos del escenario (esto es, potenciales usuarios). Estos puntos se definen en la primera iteración, con la configuración inicial de los ángulos de inclinación de antena (plan OS), identificando el conjunto de puntos con un nivel de señal suficiente de alguna celda. Dicho conjunto de puntos permanece inalterable en las siguientes iteraciones de optimización, sin considerar sus nuevos valores de calidad o cobertura de señal conforme cambian los ángulos de antena. Con esta decisión, se facilita la comparación de las distintas configuraciones de antenas conforme se suceden las iteraciones, asegurando que el área geográfica donde se comparan los métodos sea exactamente la misma.

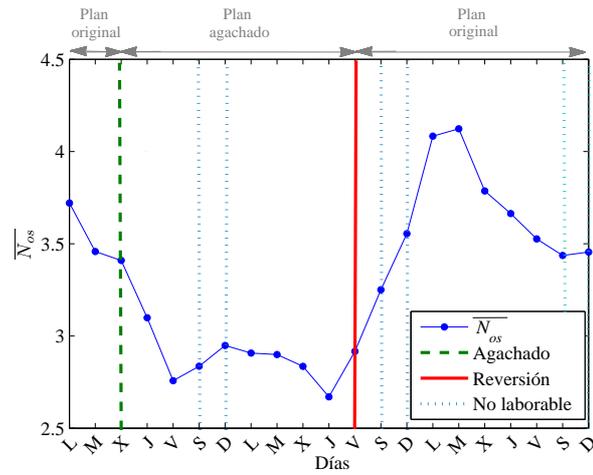
#### 4.4.2. Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en los sucesivos experimentos (A1 a A4). Posteriormente, se analiza la complejidad computacional del algoritmo.

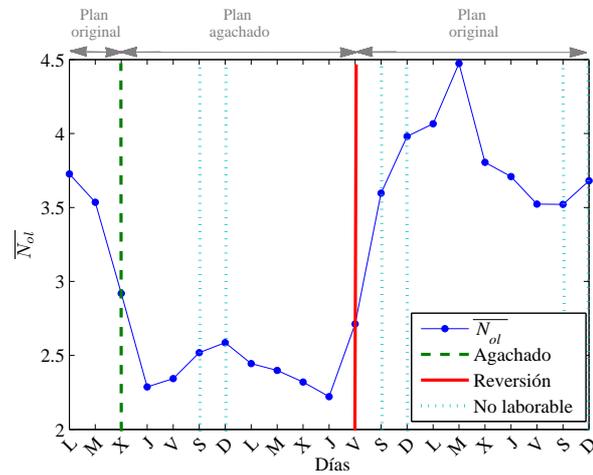
##### Experimento A1: Validación de los nuevos indicadores

En primer lugar, se evalúan los nuevos indicadores propuestos en este capítulo a partir de los resultados de la prueba de campo. Se presenta primero la evolución temporal de los indicadores tras los cambios de inclinación efectuados en la red real y, posteriormente, se comparan los valores de cada indicador con las distintas configuraciones de antena.

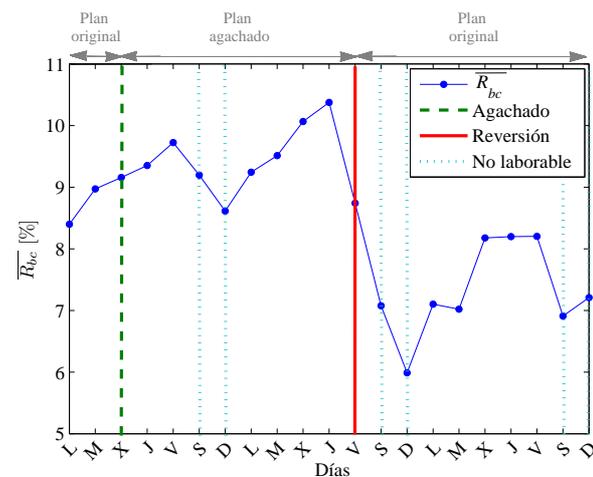
La Figura 4.9 muestra la evolución temporal de los indicadores medios de sobreapuntamiento ( $\overline{N_{os}}$ ), solapamiento innecesario ( $\overline{N_{ol}}$ ) y mala cobertura ( $\overline{R_{bc}}$ ), respectivamente, durante las tres semanas que dura el experimento. Cada punto en las figuras representa la media de la agregación diaria del indicador correspondiente en las 42 celdas. En la figura, se distinguen tres periodos: a) antes de los cambios, con el plan de inclinaciones original, b) tras los cambios, donde las 42 antenas se agachan  $1^\circ$ , y c) después de revertir los cambios, cuando se restaura de nuevo el plan original. A la izquierda, los 2 primeros días muestran el período inicial, sin cambios de inclinación, que se utiliza como referencia. El miércoles de la primera semana se realiza el primer cambio en la red, representado mediante una línea discontinua verde, que consiste en incrementar el ángulo de inclinación de las antenas de 42 celdas en  $1^\circ$ . En los días en los que se introducen los cambios, se debe tener en cuenta que los cambios de inclinación se implementan en algún momento del día, de forma que el valor en la figura para ese día (X) refleja el promedio del rendimiento de la red obtenido por 2 valores distintos del ángulo de inclinación de la antena (el antiguo y el nuevo). La segunda acción se realiza el viernes de la segunda semana (V), reflejada por la línea roja, cuando se revierten los cambios, disminuyendo el ángulo de inclinación de las antenas de las mismas celdas (levantándolas) en  $1^\circ$ , para recuperar la configuración original de inclinaciones. Cada configuración se mantiene una semana, para aumentar la robustez estocástica de las medidas. Las líneas punteadas azules en la figura representan



(a) Indicador  $\overline{N_{os}}$



(b) Indicador  $\overline{N_{ol}}$



(c) Indicador  $\overline{R_{bc}}$

FIGURA 4.9: Evolución temporal de los indicadores.



los fines de semana. Durante los fines de semana, el volumen de tráfico y las tendencias de movilidad son diferentes respecto a los días laborables, por lo que los valores obtenidos en esos días no se consideran a la hora de analizar los resultados.

Como apreciación general, se observa que, después de agachar las antenas, las medias de los indicadores de sobreapuntamiento ( $\overline{N_{os}}$ ) y solapamiento innecesario ( $\overline{N_{ol}}$ ) disminuyen, mientras que la media del indicador de mala cobertura ( $R_{bc}$ ) aumenta. Tras levantar las antenas para restaurar la configuración inicial de las inclinaciones, se observa la tendencia opuesta, como era de esperar.

La Figura 4.10 presenta un análisis de los indicadores desglosados por celda, comparando los valores obtenidos antes y después de revertir los cambios (ejes x e y, respectivamente). Para facilitar la comparación, se incluye una línea de tendencia correspondiente al caso  $y=x$ , que correspondería al caso en el que no cambia el indicador con la reversión del ángulo de la antena. Para una comparación justa, los indicadores en cada periodo se calculan agregando los valores de 3 días laborales (martes, miércoles y jueves). En la figura, se observa que el valor del indicador de sobreapuntamiento ( $N_{os}$ ) se incrementa en la mayoría de celdas (concretamente, 33 de 42) cuando se restaura la configuración original (es decir, cuando se levanta la antena). De la misma manera, el indicador de solapamiento ( $N_{ol}$ ) aumenta en la mayoría de las celdas (en 40 de 42 celdas) cuando se levantan las celdas. Por último, para el caso del indicador de mala cobertura ( $\overline{R_{bc}}$ ), se observa que la mayoría de las celdas disminuyen su valor (31 de 42) cuando se levantan.

Todos estos resultados confirman que, como se esperaba, agachar las antenas tiende a disminuir tanto el sobreapuntamiento como el solapamiento entre celdas, incluso en escenarios urbanos densos, mientras que la mala cobertura en el borde de celda se soluciona levantando las antenas. Más importante aún, los resultados confirman la validez de los indicadores diseñados como estimadores de sobreapuntamiento, solapamiento innecesario y mala cobertura.

### **Experimento A2: Rendimiento del algoritmo en un escenario limitado por interferencia**

En este apartado se presentan los resultados de la evaluación del algoritmo de autoajuste del ángulo de inclinación de las antenas en un escenario limitado por interferencia.

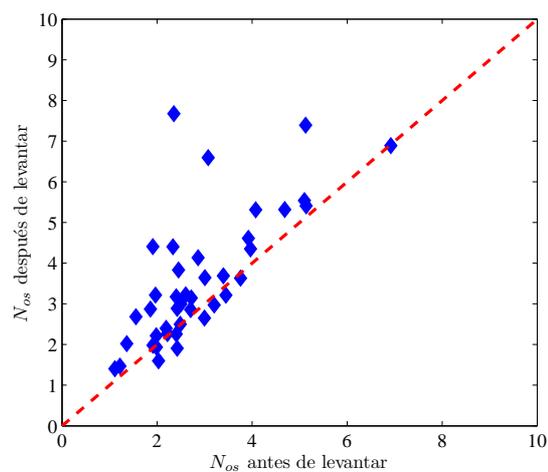
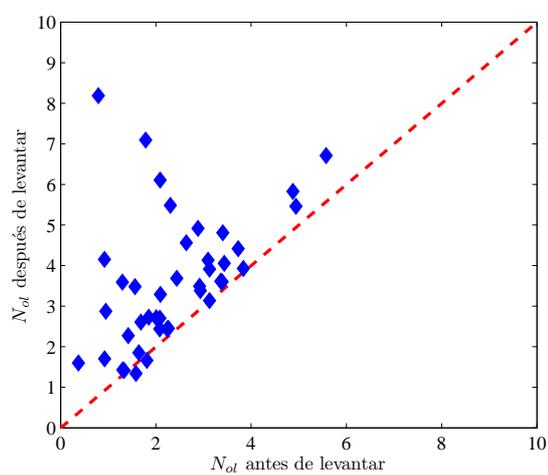
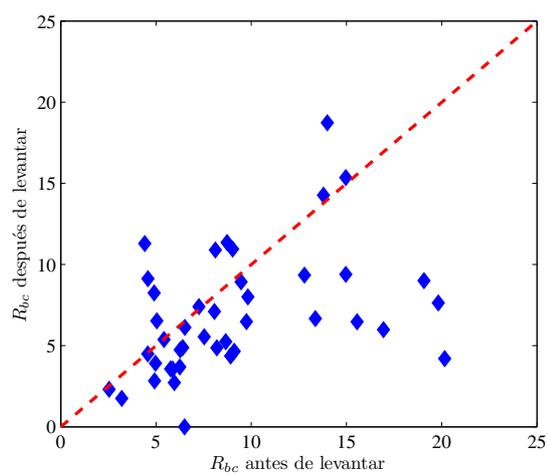
(a) Indicador  $N_{os}$ (b) Indicador  $N_{ol}$ (c) Indicador  $R_{bc}$ 

FIGURA 4.10: Comparación de indicadores para distintos ángulos.

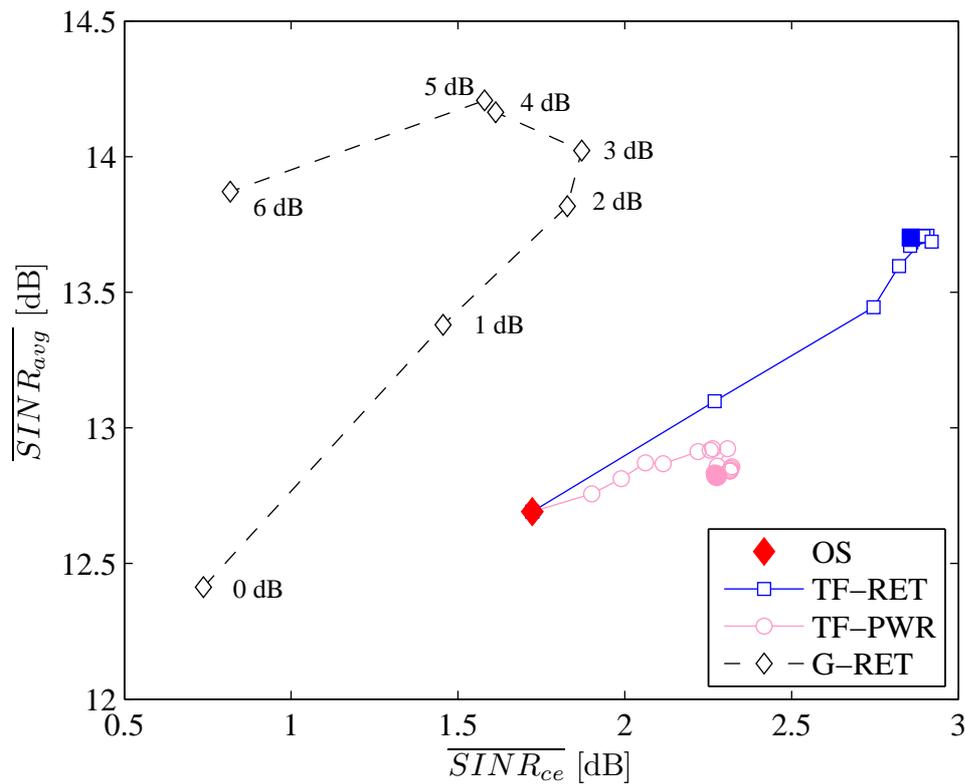


FIGURA 4.11: Comparación de métodos en escenario limitado por interferencia.

La Figura 4.11 presenta los resultados obtenidos en el experimento, mostrando los valores de SINR de borde de celda y de SINR medio globales del escenario en los ejes x e y, respectivamente. Los mejores resultados de ambos indicadores de rendimiento se obtienen en la parte superior derecha de la figura. El método de planificación OS, usado como referencia, se presenta con un simple punto (rombo). Los métodos iterativos (es decir, TF-RET y TF-PWR) se representan mediante una curva de múltiples puntos, que muestran el rendimiento intermedio de la configuración de parámetros de la red obtenidos durante las iteraciones. Para mayor claridad, el último valor de los métodos iterativos se resalta con un marcador relleno. Se debe tener en cuenta que tanto las curvas de TF-RET como la de TF-PWR comienzan con la configuración de red de OS y, por eso, ambos métodos presentan el mismo rendimiento en la primera iteración. Por su parte, los puntos de la curva del método de planificación G-RET corresponden a los diferentes valores de pérdidas de ganancia vertical en el borde de celda,  $\Delta G_v$ , de 0 a 6 dB en pasos de 1 dB. Recuérdese que el valor de 3 dB corresponde al método clásico G-RET.

En la Figura 4.11 se observa que el algoritmo propuesto TF-RET es el que

mejor rendimiento obtiene para el SINR de borde de celda. En concreto,  $\overline{SINR}_{avg}$  se mejora en 1.01 dB y  $\overline{SINR}_{ce}$  en 1.14 dB, comparado con el método OS. La Tabla 4.6 compara el rendimiento de los métodos iterativos TF-RET y TF-PWR al final del proceso de optimización frente al rendimiento de la solución del operador OS y el método geométrico clásico G-RET. Además de los indicadores  $\overline{SINR}_{avg}$  y  $\overline{SINR}_{ce}$ , en la Tabla 4.6 se presentan el valor global del *throughput* de usuario medio,  $\overline{UeTHP}_{avg}$ , y el valor global del *throughput* de usuario de borde de celda,  $\overline{UeTHP}_{ce}$ , para el enlace descendente. Ambos indicadores se calculan como la media aritmética de los valores individuales de *throughput* del usuario medio y de borde de celda, respectivamente, de cada celda del escenario. El *throughput* de usuario en DL para cada ubicación del escenario se obtiene a partir de los valores de SINR, mediante la fórmula de Shannon truncada [72], para un factor corrección de pérdidas de implementación,  $\alpha_{imp}$ , igual a 0.6, asumiendo que el ancho de banda total del sistema está disponible para el usuario (es decir,  $50 \text{ PRB} \cdot 180 \text{ kHz/PRB} = 9 \text{ MHz}$ ). En la figura, se aprecia primero que todos los métodos mejoran los resultados de la solución actual del operador (OS). También se observa que TF-RET consigue mejores resultados que las otras técnicas, ya que obtiene el mejor valor global de SINR de borde de celda para un elevado valor global de SINR media. La misma tendencia se obtiene para los indicadores  $\overline{UeTHP}_{avg}$  y  $\overline{UeTHP}_{ce}$ , para los que TF-RET alcanza los mejores resultados. En la figura, se muestra que algunas configuraciones de G-RET obtienen resultados ligeramente mejores que TF-RET para  $\overline{SINR}_{avg}$ , pero mucho peores para  $\overline{SINR}_{ce}$ . El indicador  $\overline{SINR}_{ce}$  está directamente relacionado con la experiencia que tienen los usuarios con peores condiciones en una celda y, por ello, en el problema de CCO los operadores suelen definir un valor mínimo de  $SINR_{ce}$  que no debe rebajarse en ningún caso. La diferencia de  $SINR_{ce}$  entre TF-RET y G-RET en su mejor configuración es de aproximadamente de 1 dB ( $\approx 2.9 - 1.9$ ) a favor de TF-RET. El beneficio de  $SINR_{avg}$ , sin embargo, obtenido por G-RET frente a TF-RET es de, aproximadamente 0.3 dB ( $\approx 14 - 13.7$ ), y para un rendimiento de  $SINR_{ce} \approx 1.9$  dB para G-RET. Este valor de  $SINR_{ce}$  puede considerarse inferior al mínimo requerido, y, por esta razón, se considera a TF-RET como el mejor algoritmo. Además, nótese que el método TF-RET no requiere disponer de ninguna información geográfica, a diferencia del método G-RET.

Para explicar la superioridad de TF-RET, se realiza un análisis más detallado de los indicadores de bajo nivel. La Tabla 4.7 presenta el valor medio al final del

	OS	TF-RET	TF-PWR	G-RET
$\overline{SINR}_{avg}$ [dB]	12.69	13.70	12.82	14.02
$\overline{SINR}_{ce}$ [dB]	1.72	2.86	2.28	1.87
$\overline{UeTHP}_{avg}$ [Mbps]	23.36	25.02	23.56	25.61
$\overline{UeTHP}_{ce}$ [Mbps]	7.44	8.70	8.02	7.95

TABLA 4.6: Rendimiento de métodos en escenario limitado por interferencia

proceso de optimización de varios indicadores usados por los algoritmos, incluyendo el valor medio global de RSRP,  $\overline{RSRP}$ , y la interferencia media global en el enlace descendente,  $\overline{I_{DL}}$ , calculados ambos como la media aritmética de los valores medios de cada celda del escenario. Conviene recordar de nuevo que la columna OS de la tabla es el punto de inicio de TF-RET y TF-PWR. También es necesario subrayar que TF-RET sólo agacha las antenas en las celdas que presentan sobreapuntamiento y/o solapamiento innecesario y que no experimentan problemas de cobertura en el borde de celda. El algoritmo agacha la antena para reducir los niveles de interferencia en celdas vecinas, a la vez que el nivel medio de señal recibida en la celda origen se incrementa porque la antena se redirecciona hacia el centro de la celda, asegurándose también de que el rendimiento en el borde de celda no se deteriora excesivamente. Al mismo tiempo, TF-RET sólo levanta las antenas en aquellas celdas con un pobre rendimiento en el borde de la celda y que no generan sobreapuntamiento y/o solapamiento innecesario. La combinación de ambas acciones conlleva una mejora de la cobertura de la red sin deteriorar la calidad de la conexión. Estas aseveraciones se confirman con los datos de la Tabla 4.7 observando cómo TF-RET es el único método que logra reducir el porcentaje de mala cobertura sin incrementar los niveles de interferencia. Concretamente,  $\overline{R_{bc}}$  disminuye 3.57% en términos absolutos (es decir, de 32.45% a 28.88%), mientras que  $\overline{I_{DL}}$  se disminuye en 0.75 dB (es decir, de -101.13 a -101.88 dBm). Nótese que G-RET disminuye el nivel medio de interferencia (de -101.13 a -102.26 dBm) a costa de incrementar el porcentaje de puntos con mala cobertura (de 32.45 a 33.74%).

Alternativamente, TF-PWR disminuye la potencia de transmisión en aquellas celdas que generan sobreapuntamiento y/o solapamiento innecesario y que no experimentan problemas de cobertura en el borde de celda. En la Tabla 4.7, se observa que la potencia de transmisión media en el escenario puede reducirse considerablemente con este método (en el caso analizado, 1.55 dB) sin afectar demasiado el

	OS	TF-RET	TF-PWR	G-RET ( $\Delta G_v = 3$ dB)
$\overline{N_{os}}$	1.18	0.81	0.93	0.91
$\overline{N_{ol}}$	1.00	0.95	1.02	0.98
$\overline{R_{bc}}$ [%]	32.45	28.88	34.77	33.74
$\overline{RSRP}$ [dBm]	-88.44	-88.17	-89.55	-88.24
$\overline{I_{DL}}$ [dBm]	-101.13	-101.88	-102.37	-102.26
$\overline{\alpha} - \overline{\alpha_{OS}}$ [°]	0	0.50	0	1.65
$\overline{P_{tx}} - \overline{P_{txOS}}$ [dB]	0	0	-1.55	0

TABLA 4.7: Indicadores de bajo nivel en escenario limitado por interferencia

rendimiento global de la red. Sin embargo, a diferencia de TF-RET, TF-PWR afecta negativamente tanto a los usuarios del centro como a los del borde de la celda en la celda origen debido a la reducción de potencia. Así, en TF-PWR, el compromiso entre el rendimiento en la celda origen y el de las celdas vecinas es más evidente. Este compromiso es causa de que el porcentaje de mala cobertura en la celda incrementa cuando se pretende disminuir el sobreapuntamiento y la interferencia en las celdas vecinas. Concretamente, con TF-PWR,  $\overline{I_{DL}}$  disminuye en 1.24 dB, pero  $\overline{R_{bc}}$  se incrementa en 2.32 % en términos absolutos, cuando se compara con OS. Como resultado, la mejora general de SINR para TF-PWR no es tan buena como para TF-RET, como se muestra en la Tabla 4.6.

Un aspecto importante es que, a diferencia de TF-RET y TF-PWR, G-RET realiza sus acciones en la inclinación de las antenas basándose en el borde de celda geométrico, sin tener en cuenta la distribución espacial irregular de usuarios. En la Figura 4.11 se aprecian tres regiones diferentes para G-RET:

1. Cuando la pérdida en la ganancia vertical en el borde de celda se configura a 0 dB, cada antena apunta directamente al radio de celda geométrico. En ese caso, los usuarios situados cerca de la estación base reciben niveles de potencia más bajos, lo que produce valores más bajos de  $\overline{SINR_{avg}}$ . Además, la interferencia generada en las celdas vecinas es mayor. Como resultado, tanto el indicador de la eficiencia espectral como el de cobertura son relativamente bajos.
2. Cuando la pérdida en la ganancia vertical en el borde de celda se incrementa ligeramente (1, 2 ó 3 dB), las antenas apuntan más cerca de las estaciones

base. En ese caso, los usuarios del centro de la celda reciben mejor nivel de señal y la interferencia generada en las celdas vecinas es menor. Como resultado, tanto  $\overline{SINR}_{avg}$  como  $\overline{SINR}_{ce}$  mejoran (suben).

3. Finalmente, en una tercera región, cuando la pérdida en la ganancia vertical en el borde de celda se configura a valores mayores (4, 5 ó 6 dB), las antenas están excesivamente agachadas, lo que causa que los usuarios situados lejos de las estaciones base no reciban suficiente potencia, aunque los usuarios localizados más cerca reciben mejor señal y la interferencia generada en las celdas vecinas es menor. Como resultado para estas configuraciones,  $\overline{SINR}_{avg}$  mejora, pero  $\overline{SINR}_{ce}$  disminuye.

En la práctica, G-RET tiende a agachar las antenas más que TF-RET, debido a que G-RET está basado sólo en consideraciones geométricas y no tiene en cuenta que un porcentaje considerable de usuarios están situados más allá del borde geométrico (p. ej., debido al desvanecimiento lento o a los márgenes de traspaso). En este escenario, la desviación media del ángulo de inclinación inicial en OS es  $1.65^\circ$  con respecto al G-RET clásico (esto es, G-RET con pérdida de ganancia vertical de 3 dB) y  $0.50^\circ$  con TF-RET. Como resultado,  $\overline{R}_{bc}$  con G-RET es significativamente mayor (33.74 %) en comparación a TF-RET ( $\overline{R}_{bc} = 28.88 \%$ ). Esta es la principal razón que hace a G-RET obtener los valores más bajos del rendimiento del SINR en el borde de la celda la Figura 4.11 y la Tabla 4.6.

### Experimento A3: Rendimiento del algoritmo en un escenario limitado por cobertura

En este apartado, la validación del algoritmo se realiza en un escenario limitado por cobertura. La Figura 4.12 y la Tabla 4.8 muestran el rendimiento de los diferentes algoritmos en el escenario residencial de forma similar a como se hizo en el experimento A2. De nuevo, TF-RET consigue los mejores valores de SINR medio. Sin embargo, la ganancia de rendimiento es menor en este escenario (limitado por cobertura) en comparación con el escenario urbano (limitado por interferencia). Concretamente, en este escenario,  $\overline{SINR}_{avg}$  y  $\overline{SINR}_{ce}$  se mejoran en 0.44 y 0.37 dB, respectivamente (frente a los valores 1.01 y 1.14 dB en el escenario urbano). Del mismo modo,  $\overline{UeTHP}_{avg}$  y  $\overline{UeTHP}_{ce}$  se mejoran en 0.75 y 0.44 Mbps, respectivamente, en este escenario (frente a 1.66 y 1.26 Mbps en el escenario limitado por interferencia).

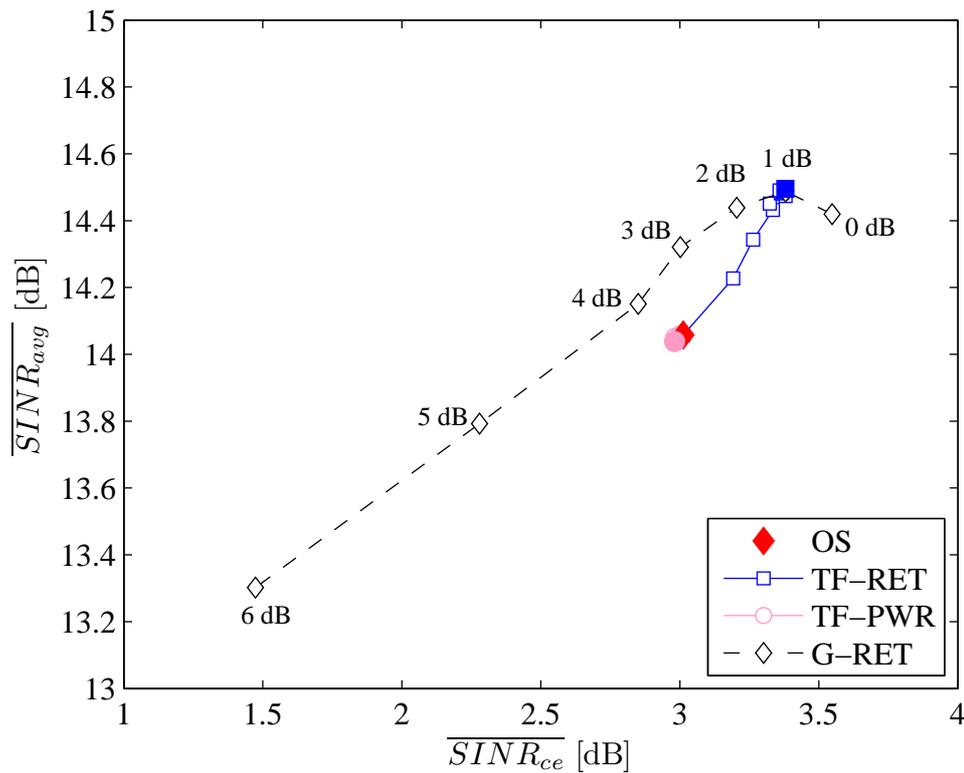


FIGURA 4.12: Comparación de rendimiento en escenario limitado por cobertura.

En este escenario, TF-PWR casi no realiza cambio alguno en la configuración de la red. Esto es debido a que la mayoría de celdas en este escenario sufren un bajo rendimiento en el borde de las celdas debido a que los radios de celda son grandes (1.1 km de media). Como consecuencia, TF-PWR mantiene los valores iniciales (esto es, valores máximos) de la potencia de transmisión en la mayoría de las celdas. Por tanto, las soluciones obtenidas para TF-PWR son casi las mismas en todas las iteraciones, siendo ésta la razón de que todos los puntos de la curva de TF-PWR en la Figura 4.12 aparezcan superpuestos.

TF-RET mejora los resultados de la versión clásica de G-RET en términos de  $\overline{SINR}_{avg}$  y  $\overline{SINR}_{ce}$  en 0.28 dB y 0.38 dB, respectivamente. Debe destacarse que, en este caso, los mejores resultados de G-RET se obtienen para unas pérdidas en la ganancia vertical de 1 dB, frente a la configuración clásica de 3 dB, debido al menor solapamiento entre celdas existente en este escenario residencial.

	OS	TF-RET	TF-PWR	G-RET
$\overline{SINR}_{avg}$ [dB]	14.06	14.50	14.04	14.32
$\overline{SINR}_{ce}$ [dB]	3.01	3.38	2.98	3.00
$\overline{UeTHP}_{avg}$ [Mbps]	25.61	26.36	25.58	26.10
$\overline{UeTHP}_{ce}$ [Mbps]	8.70	9.14	8.66	8.70

TABLA 4.8: Rendimiento de métodos en escenario limitado por cobertura

	OS	TF-RET
$\overline{SINR}_{avg}$ [dB]	8.08	8.87
$\overline{SINR}_{ce}$ [dB]	-2.13	-1.45
Porcentaje medio de utilización de PRB [%]	75	68.83

TABLA 4.9: Rendimiento de métodos en escenario con alta tasa de utilización de PRB (75 %)

#### Experimento A4: Rendimiento del algoritmo en un escenario con alta carga de tráfico

Por último, se presenta la validación del algoritmo propuesto en el escenario limitado por interferencia (usado en A2), pero con una configuración de alta carga de tráfico. La Figura 4.13 y la Tabla 4.9 muestran el resultado obtenido para el algoritmo de optimización cuando la red está muy cargada en todas las celdas. En la figura se observa que, como se esperaba, el rendimiento de la red con la configuración inicial de los ángulos de inclinación es mucho peor para el caso de alta carga (punto OS con tráfico alto uniforme) debido a los altos niveles de interferencia. Al igual que en el experimento A2, donde se utilizaron los datos reales de carga de la red, el algoritmo propuesto TF-RET también consigue ganancias en ambos indicadores de rendimiento para cargas de red altas. Esto demuestra la robustez del algoritmo propuesto frente a variaciones de la distribución de carga. La Tabla 4.9 compara el rendimiento de OS y la última iteración de TF-RET con las nuevas condiciones. De nuevo, TF-RET consigue mejores resultados que OS. Concretamente,  $\overline{SINR}_{avg}$  y  $\overline{SINR}_{ce}$  mejoran en 0.87 y 0.68 dB, respectivamente. Estas ganancias son menores que en el experimento A2 (1.01 y 1.14 dB, respectivamente). Como efecto secundario, el algoritmo TF-RET consigue disminuir el porcentaje medio de utilización de PRB del 75 % al 68.83 %, como consecuencia de la mejora de eficiencia espectral.

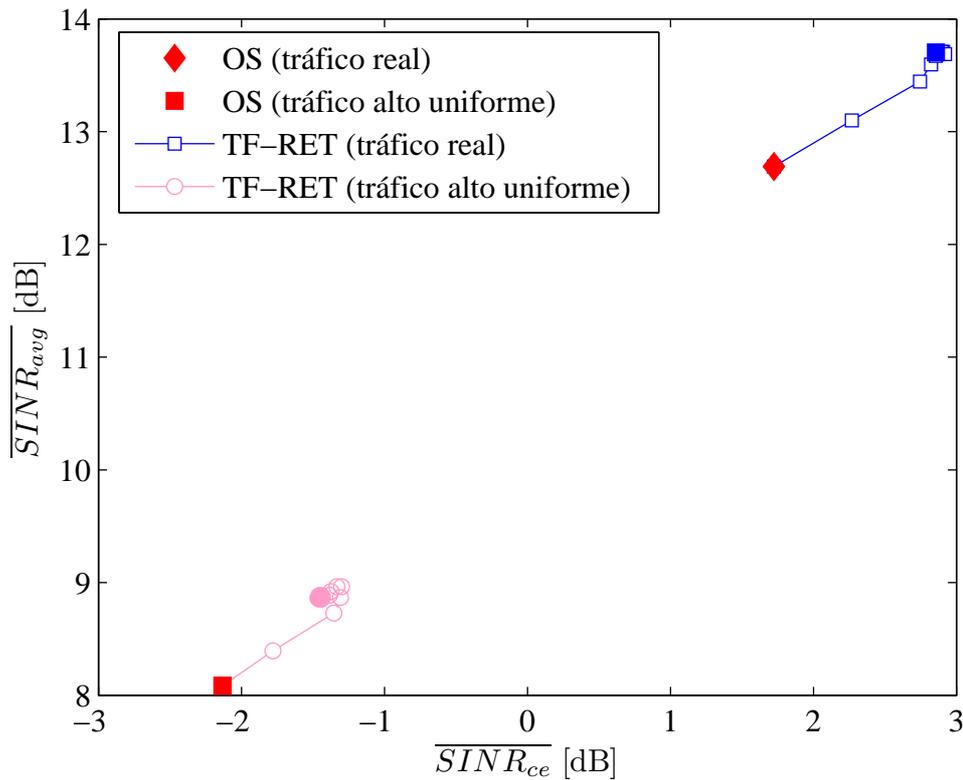


FIGURA 4.13: Comparación de rendimiento para diferentes cargas de la red.

### Complejidad computacional

Se concluye con el análisis de la complejidad computacional del método. La complejidad computacional teórica del algoritmo de ajuste iterativo es  $\mathcal{O}(N_c)$ , donde  $N_c$  es el número de celdas del área analizada. En la práctica, el tiempo de ejecución viene determinado por el procesamiento de trazas. Como se mencionó en el Capítulo 2, suele ser habitual que los operadores reduzcan el porcentaje de conexiones trazadas, para evitar la sobrecarga del procesador y los problemas de almacenamiento de trazas en los emplazamientos durante la hora cargada. Las pruebas de campo han demostrado que un seguimiento del 20% de las conexiones es suficiente para obtener estimaciones robustas de RSRP y TA sin provocar sobrecarga del nodo. Con esta configuración, el tiempo total de ejecución del algoritmo en un ordenador portátil con una frecuencia de reloj de 2.6 GHz y 4 GB de RAM es inferior a 1 segundo por celda y ROP de 15 minutos. La carga computacional puede reducirse aún más mediante la implementación de una versión distribuida del algoritmo, donde cada celda calcularía sus propios cambios del ángulo de inclinación, siempre que la información requerida sea intercambiada entre

los emplazamientos.

## 4.5. Conclusiones

En este capítulo se ha propuesto un algoritmo de ajuste remoto del ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base de una red LTE cuyo objetivo es solventar problemas de cobertura e interferencia.

En primer lugar, se ha presentado un modelo que permite analizar el impacto del ángulo de inclinación en una red LTE basado en consideraciones geométricas. A partir del modelo geométrico propuesto, se han construido diferentes indicadores que permiten comprobar, de forma sencilla, la configuración del ángulo de inclinación de las antenas de una red. Los resultados del método obtenidos con datos reales han demostrado que el ángulo de inclinación de las antenas configurado por los operadores no siempre es adecuado y que el modelo geométrico puede ser una herramienta de apoyo muy útil para el análisis y la optimización de la red. Este modelo puede utilizarse tanto en la planificación como en la optimización de redes celulares de diferentes tecnologías.

El algoritmo de ajuste heurístico desarrollado se implementa mediante dos controladores de lógica difusa. Las entradas del algoritmo propuesto son tres nuevos indicadores obtenidos a partir de las trazas de conexión suministradas por los elementos de la red. Los tres indicadores se han definido para detectar situaciones de cobertura insuficiente ( $R_{bc}$ ), sobreapuntamiento ( $N_{os}$ ) y solapamiento entre celdas innecesario ( $N_{ol}$ ). Para validar los nuevos indicadores, se ha realizado una prueba de campo en un escenario real urbano denso dentro de una red LTE. Los resultados de la prueba han demostrado que los indicadores son capaces de detectar correctamente los problemas para los que fueron diseñados, incluso en escenarios donde pueden existir características de propagación especiales, como son los escenarios urbanos complejos.

Una vez evaluados los nuevos indicadores, se ha validado el algoritmo propuesto en un simulador estático de nivel de sistema que modela escenarios reales. En el simulador se han usado dos escenarios LTE realistas, uno limitado por interferencia y otro limitado por cobertura, para evaluar el algoritmo en diferentes entornos de despliegue. También se ha evaluado el algoritmo en uno de los dos escenarios incrementado la carga de tráfico. Los resultados obtenidos en los experimentos

han demostrado que el algoritmo propuesto puede mejorar los valores globales de SINR media de celda y de borde de celda en más de 1 dB, incrementando la eficiencia espectral de la red, tanto en el escenario limitado por interferencia como el limitado por cobertura. Del mismo modo, se ha comprobado que el algoritmo sigue funcionando correctamente cuando la tasa de utilización de PRB es muy elevada.

El método propuesto, concebido para la etapa de operación de la red, mejora los resultados de los métodos de autoajuste basados en consideraciones geométricas. Así, el método propuesto también puede utilizarse como método de planificación si se dispone de un simulador de nivel de sistema. De igual manera, conviene destacar que, aunque existen métodos más sofisticados [17, 87, 88], éstos dependen de predicciones de tráfico y propagación. Estas predicciones no son necesarias en el método propuesto gracias a la utilización de trazas de conexión.

El algoritmo propuesto se puede implementar de forma centralizada o distribuida. En el esquema centralizado, todas las medidas necesarias para construir los indicadores  $N_{os}$ ,  $N_{ol}$  y  $R_{bc}$  se procesan en un nodo central, para después obtener los nuevos planes de ángulo de inclinación con las reglas de control descritas. Alternativamente, cada estación base puede intercambiar con sus vecinas las medidas de rendimiento necesarias para obtener los indicadores de forma distribuida a través de la interfaz X2. Además, la carga computacional puede reducirse aún más mediante la implementación de la versión distribuida del algoritmo, ya que celda calcularía sus propios cambios del ángulo de inclinación.

## Capítulo 5

# Optimización de la potencia de transmisión en el enlace descendente

Una opción para solventar los problemas de cobertura y capacidad de las redes celulares, como alternativa a los cambios de inclinación de antena, consiste en el ajuste de la potencia de transmisión de las estaciones base. En este capítulo se presenta un algoritmo de autoajuste que permite mejorar la eficiencia espectral global de un sistema LTE en el enlace descendente mediante la reducción de la potencia de transmisión de celdas específicas. El algoritmo utiliza como entrada un nuevo indicador que predice el impacto de los cambios en la potencia de transmisión de cada celda en la SINR total de la red del enlace descendente.

El capítulo se divide en cinco secciones. La Sección 5.1 revisa el estado de la técnica, resaltando las principales contribuciones de esta parte del trabajo. A continuación, la Sección 5.2 plantea de nuevo la formulación del problema de la optimización de la cobertura y la capacidad (CCO), presentando el nuevo indicador que predice el impacto de los cambios de potencia en el enlace descendente. Posteriormente, en la Sección 5.3 se describe el algoritmo de ajuste automático propuesto. En la Sección 5.4 se presenta la prueba realizada para validar el algoritmo, y, por último, la Sección 5.5 presenta las conclusiones de este capítulo.

## 5.1. Introducción

El control de potencia (PC) es una estrategia eficaz para resolver problemas de cobertura y capacidad. El objetivo del PC es reducir la cantidad de interferencia procedente de las celdas vecinas, asegurando al mismo tiempo un nivel de potencia transmitida suficiente para mantener una calidad del enlace aceptable [8, 9]. Esta técnica se emplea en el enlace ascendente (UL) de LTE, donde el terminal utiliza el algoritmo de control de potencia fraccional para ajustar dinámicamente su potencia de transmisión [9]. Como alternativa para el UL, existen diversos métodos de planificación automática que regulan parámetros del algoritmo de control de potencia en base a las condiciones locales de la red [17, 110, 117–119]. Estos métodos no son aplicables en el enlace descendente (DL) de LTE, porque las estaciones base ofertadas actualmente por los fabricantes no suelen incluir ningún tipo de control dinámico de potencia. Así, la planificación de la potencia de transmisión de las estaciones base es la única solución posible para el problema de CCO en los emplazamientos donde el RET no está disponible.

Cambiar la potencia de transmisión de una estación base es tan simple como cambiar cualquier otro parámetro de la red de acceso radio. La principal dificultad es encontrar la configuración óptima de la potencia de transmisión de cada estación base para conseguir el máximo rendimiento global de la red. Dicha configuración debe mantener un equilibrio entre asegurar una buena calidad de conexión de los usuarios servidos por la celda que cambia su potencia de transmisión, al mismo tiempo que se reduce la interferencia en celdas vecinas. Por ello, la planificación de potencia puede formularse como un problema de optimización multiobjetivo no separable a gran escala.

En la literatura, se han propuesto muchos algoritmos de búsqueda para encontrar la configuración de potencia óptima de un sistema celular durante la fase de planificación [120–125]. En dicha búsqueda, pueden utilizarse modelos de rendimiento de red analíticos para comprobar la calidad de un plan de potencias (p. ej., [123]). Sin embargo, los enfoques analíticos, con sus asunciones, no permiten incluir condiciones de la red tan relevantes como la distribución espacial de tráfico irregular, la configuración de parámetros propia de cada estación base, las condiciones de canal específicas de cada celda o la irregularidad local del terreno. Para solventar estas limitaciones, se suelen utilizar simuladores de nivel de sistema como herramientas de planificación de red [120–122, 124, 125]. Desgraciadamente,

las simulaciones a nivel de sistema consumen mucho tiempo. Por ello, es esencial disponer de un algoritmo de búsqueda que minimice el número de configuraciones de red que deben probarse en el simulador. Sólo así será posible aplicar los mismos métodos de búsqueda en la optimización de parámetros de potencia de una red operativa.

### 5.1.1. Trabajo relacionado y contribuciones

Como el resto de métodos SON, los métodos de regulación de parámetros del control de potencia pueden clasificarse en métodos de autoplanificación, autooptimización o autocuración. Los métodos de autoplanificación sirven para definir la configuración inicial de la red, cuando la red aún no se ha desplegado. En la búsqueda de la mejor configuración, se deben probar muchas configuraciones, habitualmente de forma iterativa, y por ello, se usan métodos de optimización clásicos para encontrar la mejor solución (p. ej., fuerza bruta [88], recocido simulado [122], Taguchi [17] o genético [104]). Para comprobar la calidad de un plan, estos métodos suelen utilizar modelos analíticos [123] o simuladores [9] de nivel de sistema.

A diferencia de los algoritmos de autoplanificación, los métodos de autooptimización no necesitan un modelo de sistema, sino que hacen uso de medidas de la red real para adaptar los parámetros de la red a las condiciones cambiantes de operación de la red. Estos algoritmos de autoajuste consisten normalmente en un controlador basado en reglas heurísticas, que modifica iterativamente los parámetros de la red basándose en ciertos indicadores de rendimiento. En [120], se presenta un algoritmo de control de potencia para ajustar los niveles de potencia en el DL en redes CDMA (*Code Division Multiple Access*) de acuerdo a la necesidad de los UE. El algoritmo ajusta dinámicamente la potencia de transmisión de la estación base basándose en las medidas de calidad de la señal proporcionadas por los UE, con el objetivo de asegurar que todos los UE experimenten una calidad de transmisión adecuada. El algoritmo también detecta cuándo los UE experimentan una calidad de transmisión mayor a la requerida, en cuyo caso se disminuye la potencia de transmisión de la estación base para minimizar interferencia en celdas vecinas. En [121], se extiende el algoritmo anterior a través de una configuración inicial con niveles máximos de potencia de celda para todos los transmisores, a fin de solventar problemas de convergencia. En [122], también se presenta un algoritmo descentralizado para ajustar la potencia de transmisión de las estaciones

base en una red LTE. En este caso, cada celda busca la configuración óptima de la potencia de transmisión, manteniendo la configuración de potencia del resto de celdas inalterada. El algoritmo se basa en el conocimiento de la interferencia producida por una estación base en sus celdas vecinas para diferentes niveles de potencia transmitida. En [124], se propone un algoritmo más sofisticado para ajustar conjuntamente la potencia de transmisión y la inclinación de la antena. En este algoritmo, las celdas se clasifican en tres grupos dependiendo del porcentaje de UE cubiertos y el tráfico demandado. Los cambios de parámetros se calculan basados en el rendimiento de la peor celda, y los cambios se ejecutan simultáneamente en todas las celdas del mismo grupo. De esta forma, el método no aprovecha el hecho de que los parámetros de red pueden configurarse de forma distinta en cada celda. En [125], se propone un algoritmo de autoajuste descentralizado que ajusta tanto la potencia de transmisión como la inclinación de antena a nivel de celda, con el fin de maximizar la tasa de transmisión de datos (es decir, el *throughput*) medio de celda y de borde de celda en toda la red. El algoritmo se implementa como un controlador difuso adaptable con técnicas de aprendizaje por refuerzo. Las entradas son las configuraciones actuales de la potencia de transmisión y la inclinación de la celda a optimizar, además de la diferencia relativa media en la carga y la eficiencia espectral con respecto las celdas vecinas. Un controlador central permite el aprendizaje conjunto gracias a que se comparte el resultado del proceso de adaptación entre celdas. Los parámetros del controlador se adaptan progresivamente como resultado de un cambio aleatorio de los valores de los parámetros. Estos cambios aleatorios, necesarios para el aprendizaje por refuerzo, incrementan el tiempo de convergencia del proceso de ajuste, y, sobre todo, degradan momentáneamente el rendimiento de la red durante el proceso de optimización.

Los algoritmos de autocuración se basan también en la replanificación de potencia para solventar problemas localizados causados por fallos en la red. A diferencia de las propuestas de autooptimización, los métodos de autocuración persiguen detectar, diagnosticar y compensar problemas causados por eventos anormales de la red, consiguiendo, tras su actuación, niveles de servicio aceptables en una celda defectuosa. La aplicación más común es la compensación de celdas caídas (*Cell Outage Compensation*, COC) [126–128]. La principal limitación de los métodos propuestos hasta la fecha es la asunción de que, en condiciones normales, las estaciones base no utilizan completamente la potencia de transmisión disponible. En las redes reales, sin embargo, las estaciones base están generalmente configuradas a la máxima potencia a fin de proporcionar una cobertura máxima. Además, estos

algoritmos están enfocados principalmente a mejorar la cobertura, dejando de lado la interferencia entre celdas o la calidad de señal recibida por los UE.

Una de las principales limitaciones de la mayoría de algoritmos SON es la falta de una prueba de idoneidad. La mayoría de métodos de autoplanificación están basados en métodos de búsqueda heurísticos que reducen el tamaño del espacio de soluciones a explorar, con el fin de reducir la carga de computación. Del mismo modo, la mayoría de algoritmos de autooptimización se basan en reglas de control heurísticas basadas en el conocimiento de un operador experimentado. Aunque algunos algoritmos de autoajuste avanzados incluyen métodos de aprendizaje sin supervisión (p. ej., *Q-Learning* [125]), esto no suele garantizar que se encuentre el rendimiento del sistema óptimo. La bondad del ajuste de estos algoritmos se evalúa normalmente basándose en consideraciones de estabilidad y velocidad de convergencia [129]. Sólo en muy pocos casos, se pueden reformular las condiciones de idoneidad como un problema de control. Uno de estos casos es el balance de tráfico entre celdas vecinas en GSM. En [130], se demuestra que la condición de optimalidad del problema de reparto de tráfico entre celdas vecinas GSM puede formularse como un problema de control cuyo objetivo es equilibrar un indicador de rendimiento construido con estadísticas de la red. De esta forma, se demuestra que equilibrando el indicador propuesto se alcanza el reparto de tráfico óptimo en el sistema.

Del análisis de la bibliografía, se concluye que ningún trabajo previo ha propuesto una regla simple que permita regular la potencia de transmisión de las estaciones base asegurando que la solución resultante sea realmente la mejor solución. En este capítulo, se plantea un método de autooptimización para CCO basado en la regulación de potencia de las estaciones base que, a diferencia de otros métodos, considera de forma explícita aspectos relacionados con la optimalidad de las soluciones. Para su desarrollo, el problema de CCO se reformula para considerar la potencia de transmisión de la estación como nueva variable de decisión. A partir del análisis de las condiciones de optimalidad del problema, se deriva la expresión analítica de un nuevo indicador que refleja la ganancia total de SINR que se obtendría con cada cambio de potencia en una celda del sistema. Con dicho indicador, se asegura que los cambios realizados por el algoritmo de control siempre mejoran el rendimiento total del sistema. Las principales contribuciones de este capítulo son: a) un nuevo indicador para detectar si, incrementando la potencia de transmisión de una estación base concreta, aumenta (o disminuye) la SINR total del sistema en

el enlace descendente, b) un conjunto de reglas sencillas, basadas en el indicador anterior, para ajustar la potencia de transmisión de una estación base en una red LTE, cuyo fin es incrementar el área de cobertura y la eficiencia espectral total; y c) una comparación exhaustiva del algoritmo propuesto con algoritmos clásicos de CCO en un escenario realista.

## 5.2. Formulación del problema y análisis teórico preliminar

En esta sección se reformula el problema de CCO considerando la potencia de transmisión de celda como nueva variable de decisión para mejorar la calidad de señal global del enlace descendente. A partir de dicha reformulación, se deriva un estimador analítico del impacto de los cambios de potencia de una estación base en la SINR media de la red. Dicho estimador constituye la principal entrada del algoritmo de ajuste de la potencia de transmisión de las estaciones base descrito en la siguiente sección.

### 5.2.1. Modelo analítico del impacto de los cambios de potencia en el enlace descendente

Por claridad, en esta sección, las variables en unidades logarítmicas se expresan con letra mayúscula, mientras que las variables en unidades naturales se expresan en minúscula. El término DL se omite por brevedad.

El problema de CCO puede formularse como un problema de optimización clásico, cuya función objetivo a maximizar es la SINR total del sistema en DL (expresada en dB),  $\Gamma_t$ , calculada como

$$\Gamma_t = \sum_{\forall i} \bar{\Gamma}(i), \quad (5.1)$$

donde  $\bar{\Gamma}(i)$  es la SINR media de los usuarios de la celda  $i$ . Las variables de decisión en el problema de optimización son las potencias de transmisión de cada celda,  $P_{TX}(i)$ , que determinan el valor de  $\bar{\Gamma}(i)$ .

En ausencia de restricciones, cualquier máximo local debe satisfacer la condición de estacionariedad, es decir,  $\frac{\partial \Gamma_t}{\partial P_{TX}(i)} = 0 \forall i$ . Si se asume que cambiar la potencia de transmisión de una celda sólo afecta a un número limitado de celdas vecinas, la condición de estacionariedad puede reescribirse como

$$\frac{\partial \Gamma_t}{\partial P_{TX}(i)} \approx \frac{\partial \left( \bar{\Gamma}(i) + \sum_{j \in N(i)} \bar{\Gamma}(j) \right)}{\partial P_{TX}(i)}, \quad (5.2)$$

donde  $N(i)$  es el conjunto de vecinas de la celda  $i$ . Los dos términos del numerador reflejan el compromiso existente entre el rendimiento de una celda y sus vecinas. Así, incrementar la potencia de transmisión de una celda incrementa la SINR de los usuarios servidos por dicha celda (es decir,  $\frac{\partial \bar{\Gamma}(i)}{\partial P_{TX}(i)} > 0$ ) a expensas de disminuir la SINR de los usuarios en las celdas vecinas (es decir,  $\frac{\partial \left( \sum_{j \in N(i)} \bar{\Gamma}(j) \right)}{\partial P_{TX}(i)} < 0$ ).

Por conveniencia, se define el SINR total en la vecindad de una celda  $i$  (en dB) como

$$\Gamma_c(i) = \bar{\Gamma}(i) + \sum_{j \in N(i)} \bar{\Gamma}(j) = \bar{S}(i) - \bar{I}(i) + \sum_{j \in N(i)} (\bar{S}(j) - \bar{I}(j)), \quad (5.3)$$

donde  $\bar{S}(i)$  y  $\bar{I}(i)$  son los niveles medio de señal deseada e interferencia (en unidades logarítmicas) recibidos en la celda  $i$ , respectivamente.

En (5.3), los valores medios corresponden a la agregación de todos los usuarios de una celda. En la mayoría de las herramientas de planificación, los usuarios potenciales se representan por ubicaciones, de forma que el indicador medio se refiere al valor medio que un usuario podría obtener en cualquier punto de la celda. En un escenario real, cada ubicación tiene una probabilidad diferente de que un usuario demande servicios desde ese lugar, dada por la distribución espacial de tráfico. Este hecho se considera en la formulación multiplicando el valor de cada indicador en una ubicación por una función de peso que representa la probabilidad de cursar tráfico en dicha ubicación, tal que

$$\begin{aligned} \Gamma_c(i) = & \sum_{(x,y) \in A(i)} p_u(x,y) (S(x,y) - I(x,y)) \\ & + \sum_{j \in N(i)} \sum_{(x,y) \in A(j)} p_u(x,y) (S(x,y) - I(x,y)), \end{aligned} \quad (5.4)$$

donde  $A(i)$  es el área de servicio de la celda  $i$  (es decir, los puntos servidos por la celda  $i$ ),  $p_u(x,y)$  es la probabilidad de que un usuario genere tráfico en la ubicación  $(x,y)$ , y  $S(x,y)$  y  $I(x,y)$  son los niveles de señal recibida desde la celda servidora y el nivel total de interferencia procedente de las celdas vecinas para un UE situado en  $(x,y)$ , respectivamente. Evidentemente,  $\sum_{(x,y) \in A(i)} p_u(x,y) = 1 \forall i$ .

A partir de las ecuaciones (5.2) y (5.4), se obtiene que la sensibilidad de la SINR total del sistema,  $\Gamma_t$ , a cambios en  $P_{TX}(i)$  es la misma que la sensibilidad de  $\Gamma_c$ , es decir,

$$\beta(i) = \frac{\partial \Gamma_t(i)}{\partial P_{TX}(i)} \approx \frac{\partial \Gamma_c(i)}{\partial P_{TX}(i)}. \quad (5.5)$$

Por claridad, la derivada parcial en la ecuación (5.5) se desglosa en cuatro sumandos como

$$\beta(i) \approx F_1 - F_2 + F_3 - F_4, \quad (5.6)$$

tal que

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{\partial \bar{S}(i)}{\partial P_{TX}(i)}, \quad F_2 = \frac{\partial \bar{I}(i)}{\partial P_{TX}(i)}, \\ F_3 &= \frac{\partial \left( \sum_{j \in N(i)} \bar{S}(j) \right)}{\partial P_{TX}(i)}, \quad \text{y} \quad F_4 = \frac{\partial \left( \sum_{j \in N(i)} \bar{I}(j) \right)}{\partial P_{TX}(i)}, \end{aligned} \quad (5.7)$$

donde  $F_1$  refleja el impacto de  $P_{TX}(i)$  en el nivel de señal deseada en la celda modificada (es decir, la señal recibida por los usuarios de la celda  $i$  desde la celda  $i$ ),  $F_2$  hace lo mismo para la interferencia total recibida por los usuarios en la celda  $i$  desde las celdas vecinas  $j$  ( $j \neq i$ ),  $F_3$  para la señal deseada recibida por los usuarios de las celdas vecinas  $j$ , y  $F_4$  para la interferencia recibida por los usuarios

en las celdas vecinas  $j$ . A continuación, se desarrolla cada uno de estos términos por separado.

### Sensibilidad de la señal deseada en la celda origen, $F_1$

El nivel de señal recibida desde una celda  $i$  en un punto  $(x, y)$  se calcula como

$$P_{RX}(i, x, y) = P_{TX}(i) - PL(i, x, y), \quad (5.8)$$

donde  $PL(i, x, y)$  son las pérdidas de propagación (incluyendo las ganancias de antena) entre la celda  $i$  y la ubicación  $(x, y)$ . En concreto, el nivel de señal deseada en una ubicación es

$$S(x, y) = P_{RX}(i, x, y), \quad (x, y) \in A(i). \quad (5.9)$$

Se debe tener en cuenta que la distribución espacial de tráfico,  $p_u(x, y)$ , no depende de la configuración de potencia. Así, a partir de las ecuaciones (5.4), (5.8) y (5.9), se deduce que el impacto de modificar  $P_{TX}(i)$  sobre el nivel de señal deseada recibida por los usuarios en la celda  $i$  es

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{\partial \left( \sum_{(x,y) \in A(i)} p_u(x,y) S(x,y) \right)}{\partial P_{TX}(i)} = \sum_{(x,y) \in A(i)} p_u(x,y) \frac{\partial P_{RX}(i)}{\partial P_{TX}(i)} \\ &= \sum_{(x,y) \in A(i)} p_u(x,y) = 1. \end{aligned} \quad (5.10)$$

### Sensibilidad de la interferencia en la celda origen, $F_2$

La interferencia recibida en un punto  $(x, y)$  en una celda  $i$  desde otras celdas  $j \neq i$  se calcula como

$$I(x, y) = 10 \log_{10} \left( \sum_{j \in N(i)} p_{rx}(j, x, y) l(j) + n_0 \right), \quad (5.11)$$

donde  $p_{rx}(j, x, y)$  es la potencia recibida en  $(x, y)$  desde la celda interferente  $j$  (en unidades naturales),  $l(j)$  es la carga de la celda  $j$  (adimensional) y  $n_0$  es la potencia de ruido térmico (en unidades naturales). La carga media de una celda  $i$  se estima a partir de la suma de la carga de tráfico generada en cada ubicación  $(x, y)$  servida por la celda  $i$ , como

$$l(i) = \sum_{(x,y) \in A(i)} l(x, y) = \frac{\sum_{(x,y) \in A(i)} \frac{t(x,y)}{se(x,y)}}{N_{prb}(i)}, \quad (5.12)$$

donde  $t(x, y)$  es el tráfico medio generado en la ubicación  $(x, y)$  en bps,  $se(x, y)$  es la eficiencia espectral obtenida por los usuarios en la ubicación  $(x, y)$  en bps por bloque de recursos físico (PRB), y  $N_{prb}(i)$  es el número de PRB en la celda  $i$ , dado por el ancho de banda del sistema. En esta Tesis, la eficiencia espectral se estima a partir del SINR mediante la fórmula de Shannon truncada como [72]

$$se(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{si } \gamma(x, y) < \gamma_{\text{mín}}, \\ \alpha_{imp} \log_2(1 + \gamma(x, y)) & \text{si } \gamma_{\text{mín}} \leq \gamma(x, y) \leq \gamma_{\text{máx}}, \\ se_{\text{máx}} & \text{si } \gamma_{\text{máx}} < \gamma(x, y), \end{cases} \quad (5.13)$$

donde  $se_{\text{máx}}$  son la eficiencia espectral mínima y máxima que pueden obtenerse en una ubicación,  $\gamma(x, y)$  es el SINR en una ubicación (en unidades lineales),  $\gamma_{\text{máx}}$  y  $\gamma_{\text{mín}}$  son los valores de SINR correspondientes a  $se_{\text{máx}}$  y la eficiencia espectral nula, respectivamente, y  $\alpha_{imp}$  es un factor de corrección de pérdidas de implementación.

De lo anterior, el impacto de cambiar la potencia de una celda en el nivel de interferencia total recibida por dicha celda es

$$\begin{aligned} F_2 &= \frac{\partial \bar{I}(i)}{\partial P_{TX}(i)} = \sum_{(x,y) \in A(i)} p_u(x, y) \frac{\partial I(x,y)}{\partial P_{TX}(i)} \\ &= \sum_{(x,y) \in A(i)} \left[ \frac{10}{\ln 10} \frac{p_u(x,y)}{\sum_{j \in N(i)} p_{rx}(j, x, y) l(j) + n_0} \sum_{j \in N(i)} p_{rx}(j, x, y) \frac{\partial l(j)}{\partial P_{TX}(i)} \right], \end{aligned} \quad (5.14)$$

donde se aprecia que cambiar la potencia de transmisión de una celda sólo afecta al nivel de interferencia recibida en la misma celda a través de los cambios de carga de las celdas vecinas.

Como la demanda de tráfico no depende de la calidad del enlace, se deduce a partir de la ecuación (5.12) que la sensibilidad de la carga vecina al cambio en  $P_{TX}(i)$  es

$$\frac{\partial l(j)}{\partial P_{TX}(i)} = \frac{\sum_{(x,y) \in A(j)} t(x,y) \frac{\partial(\frac{1}{se(x,y)})}{\partial P_{TX}(i)}}{N_{prb}(j)}. \quad (5.15)$$

A partir de (5.13), se deduce que la derivada de la eficiencia espectral con respecto a la potencia de transmisión es distinta de cero sólo en las ubicaciones donde  $\gamma_{\min} \leq \gamma(x,y) \leq \gamma_{\max}$ , por lo que

$$\begin{aligned} \frac{\partial l(j)}{\partial P_{TX}(i)} &= -\frac{1}{N_{prb}(j)} \sum_{\substack{(x,y) \in A(j), \\ \gamma(x,y) \in [\gamma_{\min}, \gamma_{\max}]}} \left( t(x,y) \frac{1}{\alpha [\log_2(1+\gamma(x,y))]^2} \frac{1}{1+\gamma(x,y)} \frac{1}{\ln 2} \frac{\partial \left[ 10^{\frac{\Gamma(x,y)}{10}} \right]}{\partial P_{TX}(i)} \right) \\ &= - \sum_{\substack{(x,y) \in A(j), \\ \gamma(x,y) \in [\gamma_{\min}, \gamma_{\max}]}} l(x,y) \frac{\gamma(x,y)}{(1+\gamma(x,y)) \ln(1+\gamma(x,y))} \frac{\ln 10}{10} \frac{\partial(-I(x,y))}{\partial P_{TX}(i)}. \end{aligned} \quad (5.16)$$

Para calcular la derivada de los valores de SINR,  $\Gamma(x,y)$ , de forma analítica, se ha considerado que la interferencia recibida,  $\bar{I}(x,y)$ , sólo depende de  $P_{TX}(i)$ . Para simplificar aún más la formulación, se confirmó empíricamente que la suma de la variación de carga de todas las ubicaciones en una celda puede aproximarse por

$$\frac{\partial l(j)}{\partial P_{TX}(i)} \approx l(j) \frac{\bar{\gamma}(j)}{(1+\bar{\gamma}(j)) \ln(1+\bar{\gamma}(j))} \frac{\ln 10}{10} \frac{\partial(\bar{I}(j))}{\partial P_{TX}(i)}, \quad (5.17)$$

donde  $\bar{\gamma}(j)$  e  $\bar{I}(j)$  son la SINR media (en unidades lineales) y el nivel de interferencia medio (en unidades logarítmicas), respectivamente. Teniendo en cuenta que el promedio de la interferencia se realiza pesando por la distribución de tráfico, se deduce que

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \bar{I}(j)}{\partial P_{TX}(i)} &= \sum_{(x,y) \in A(j)} p_u(x,y) \frac{\partial I(x,y)}{\partial P_{TX}(i)} \\
&= \sum_{(x,y) \in A(j)} \left[ \frac{10}{\ln 10} \frac{p_u(x,y)}{\sum_{m \in N(j)} p_{rx}(m,x,y) l(m) + n_0} \sum_{m \in N(j)} \frac{\partial (p_{rx}(m,x,y) l(m))}{\partial P_{TX}(i)} \right].
\end{aligned} \tag{5.18}$$

Se debe tener en cuenta que cualquier cambio de potencia de transmisión en una celda afecta a la calidad de la señal, la eficiencia espectral y a la carga de dicha celda y de sus vecinas. Tales cambios de carga de celda causan cambios en la interferencia de las celdas vecinas, que se traducen en nuevos cambios de carga. Por simplicidad, en este trabajo se asume que el único cambio de carga ocurre en la celda que cambia su potencia de transmisión (es decir,  $\frac{\partial l(m)}{\partial P_{TX}(i)} \approx 0$ ). Por tanto, la ecuación (5.18) puede reescribirse como

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \bar{I}(j)}{\partial P_{TX}(i)} &\approx \sum_{(x,y) \in A(j)} \left[ \frac{10}{\ln 10} \frac{p_u(x,y)}{\sum_{m \in N(j)} p_{rx}(m,x,y) l(m) + n_0} \right. \\
&\quad \left. \cdot \left( \frac{\partial p_{rx}(i,x,y)}{\partial P_{TX}(i)} l(i) + p_{rx}(i,x,y) \frac{\partial l(i)}{\partial P_{TX}(i)} \right) \right].
\end{aligned} \tag{5.19}$$

Las dos derivadas parciales de la ecuación (5.19) muestran cómo cambia la interferencia en las vecinas cuando cambia la potencia de transmisión y la carga de la celda que ajusta su potencia. Estos términos se calculan como

$$\frac{\partial p_{rx}(i,x,y)}{\partial P_{TX}(i)} = \frac{\ln 10}{10} p_{rx}(i,x,y), \tag{5.20}$$

y

$$\frac{\partial l(i)}{\partial P_{TX}(i)} = -\frac{\ln 10}{10} l(i) \frac{\bar{\gamma}(i)}{(1 + \bar{\gamma}(i)) \ln(1 + \bar{\gamma}(i))}. \tag{5.21}$$

A partir de (5.17), (5.19), (5.20) y (5.21), se obtiene que

$$\begin{aligned}
 F_2 \approx & \sum_{(x,y) \in A(i)} \left[ \frac{p_u(x,y)}{\sum_{j \in N(i)} p_{rx}(j,x,y) l(j) + n_0} \sum_{j \in N(i)} \left( p_{rx}(j,x,y) l(j) \frac{\bar{\gamma}(j)}{(1+\bar{\gamma}(j)) \ln(1+\bar{\gamma}(j))} \right. \right. \\
 & \cdot \sum_{(x,y) \in A(j)} \left[ \frac{p_u(x,y)}{\sum_{m \in N(j)} p_{rx}(m,x,y) l(m) + n_0} \right. \\
 & \left. \left. \cdot \left( p_{rx}(i,x,y) l(i) - p_{rx}(i,x,y) l(i) \frac{\bar{\gamma}(i)}{(1+\bar{\gamma}(i)) \ln(1+\bar{\gamma}(i))} \right) \right] \right] .
 \end{aligned} \tag{5.22}$$

Agrupando términos,  $F_2$  puede reescribirse como

$$F_2 \approx [1 - f(\bar{\gamma}(i))] \sum_{j \in N(i)} [\bar{ic}(j,i) f(\bar{\gamma}(j)) \bar{ic}(i,j)] , \tag{5.23}$$

donde

$$f(\bar{\gamma}(i)) = \frac{\bar{\gamma}(i)}{(1 + \bar{\gamma}(i)) \ln(1 + \bar{\gamma}(i))} , \tag{5.24}$$

e  $\bar{ic}(j,i)$  es el ratio de interferencia medio en la celda  $i$  debido a la celda vecina  $j$ , definido como

$$\bar{ic}(j,i) = \sum_{(x,y) \in A(i)} \frac{p_u(x,y) p_{rx}(j,x,y) l(j)}{\sum_{k \in N(i)} p_{rx}(k,x,y) l(k) + n_0} . \tag{5.25}$$

### Sensibilidad de la señal deseada en celdas vecinas, $F_3$

A partir de (5.4) y (5.7), se obtiene que

$$F_3 = \frac{\partial \left( \sum_{j \in N(i)} \bar{S}(j) \right)}{\partial P_{TX}(i)} = \frac{\partial \left( \sum_{j \in N(i)} \sum_{(x,y) \in A(j)} p_u(x,y) P_{RX}(j,x,y) \right)}{\partial P_{TX}(i)} . \tag{5.26}$$

Como ni  $p_u(x,y)$  ni  $P_{RX}(j,x,y)$  dependen de  $P_{TX}(i)$ ,  $F_3=0$ .

Sensibilidad de la interferencia en celdas vecinas,  $F_4$ 

Del mismo modo que para  $F_2$ , el cambio de la interferencia en las celdas vecinas puede expresarse como

$$F_4 = \frac{\partial \left( \sum_{j \in N(i)} \bar{I}(j) \right)}{\partial P_{TX}(i)} = \sum_{j \in N(i)} \sum_{(x,y) \in A(j)} p_u(x,y) \frac{\partial I(x,y)}{\partial P_{TX}(i)}. \quad (5.27)$$

Nótese que  $N(j)$  incluye a la celda que ajusta su potencia,  $i$ , como interferente de la celda  $j$ . Entonces, la derivada parcial en la ecuación (5.27) debe separarse en dos grupos de celdas: la celda interferente  $i$  y el resto de celdas interferentes  $m \neq i$ . De esta forma,

$$\frac{\partial I(x,y)}{\partial P_{TX}(i)} = \frac{10}{\ln 10} \frac{1}{\sum_{m \in N(j)} p_{rx}(m,x,y) l(m) + n_0} \cdot \left[ \frac{\partial \left( \sum_{m \in N(j), m \neq i} p_{rx}(m,x,y) l(m) \right)}{\partial P_{TX}(i)} + \frac{\partial (p_{rx}(i,x,y) l(i))}{\partial P_{TX}(i)} \right]. \quad (5.28)$$

Siguiendo los mismos pasos que para  $F_2$ , se obtiene que

$$F_4 \approx [1 - f(\bar{\gamma}(i))] \sum_{j \in N(i)} \left[ \bar{ic}(i,j) + \sum_{m \in N(j), m \neq i} \bar{ic}(m,j) f(\bar{\gamma}(m)) \bar{ic}(i,m) \right], \quad (5.29)$$

donde se identifican dos términos independientes. El primer término refleja el cambio de la interferencia en la celda  $j$  debido a la variación de carga de la celda  $i$  ocasionada por el cambio de la eficiencia espectral con la nueva potencia de transmisión de la celda  $i$ . El segundo término refleja el cambio de la interferencia recibida por la celda  $j$  causado por la variación de carga del resto de interferentes de la celda  $j$ , que también modifican su carga debido al cambio de interferencia procedente de la celda  $i$ .

## Prueba de concepto

A continuación, se presentan las simulaciones realizadas para validar la expresión analítica del estimador del impacto del cambio de potencia de transmisión en el enlace descendente. El experimento se realiza en el simulador estático de nivel de sistema que implementa el escenario limitado por interferencia del capítulo anterior. Dicho escenario comprende 129 celdas distribuidas en 44 emplazamientos en un entorno urbano denso. En este escenario, se lleva a cabo una prueba de sensibilidad para comprobar la exactitud del indicador  $\beta$ , que refleja el impacto del cambio de potencia de cada celda en la SINR total del sistema del enlace descendente. Para ello, se modifica el valor de potencia transmitida de una estación base incrementándolo en 1 dB. De esta forma, se construyen 129 nuevos planes de potencia que difieren en 1 sola celda respecto al plan original. Comparando el rendimiento del sistema obtenido con cada uno de estos 129 planes respecto al del plan original, se deduce el impacto real del cambio de potencia en cada celda. Concretamente, el cambio producido en la SINR total del sistema,  $\Delta\Gamma_t(i)$ , se calcula restando el valor de dicho indicador obtenido con el nuevo plan respecto al conseguido con el plan original. Dichas diferencias deberían coincidir con los valores teóricos de  $\beta$  para cada celda,  $\beta(i)$ , estimados a partir de las medidas obtenidas con el plan original mediante la ecuación (5.5).

Cabe señalar que la herramienta de simulación puede modelar con exactitud los efectos de acoplamiento de las celdas. Dicho acoplamiento causa que un cambio de la potencia de la celda  $i$  provoque cambios en la SINR de la celda vecina  $j$ . Como consecuencia, la eficiencia espectral en la celda  $j$  cambia, y eso hace que su carga (medida como porcentaje de utilización de PRB) lo haga también. Este cambio de carga en la celda  $j$  causa a su vez cambios de interferencia en las celdas vecinas a dicha celda  $j$  (entre las que se encuentra la celda  $i$ ). De esta forma, el cambio de potencia inicial en la celda  $i$  propaga sus efectos por todo el escenario. Estos efectos son tenidos en cuenta por el simulador. Del mismo modo, el simulador actualiza las áreas de servicio de las celdas a partir de la nueva configuración de potencias de celda.

Para una comparación justa con los valores proporcionados por el modelo teórico del que se obtiene el indicador  $\beta$ , los efectos anteriores no deben tenerse en cuenta en toda su extensión. La definición de  $\beta$  sólo considera los efectos de primer orden de los cambios en las configuraciones de potencia. Así,  $\beta$  sólo considera los

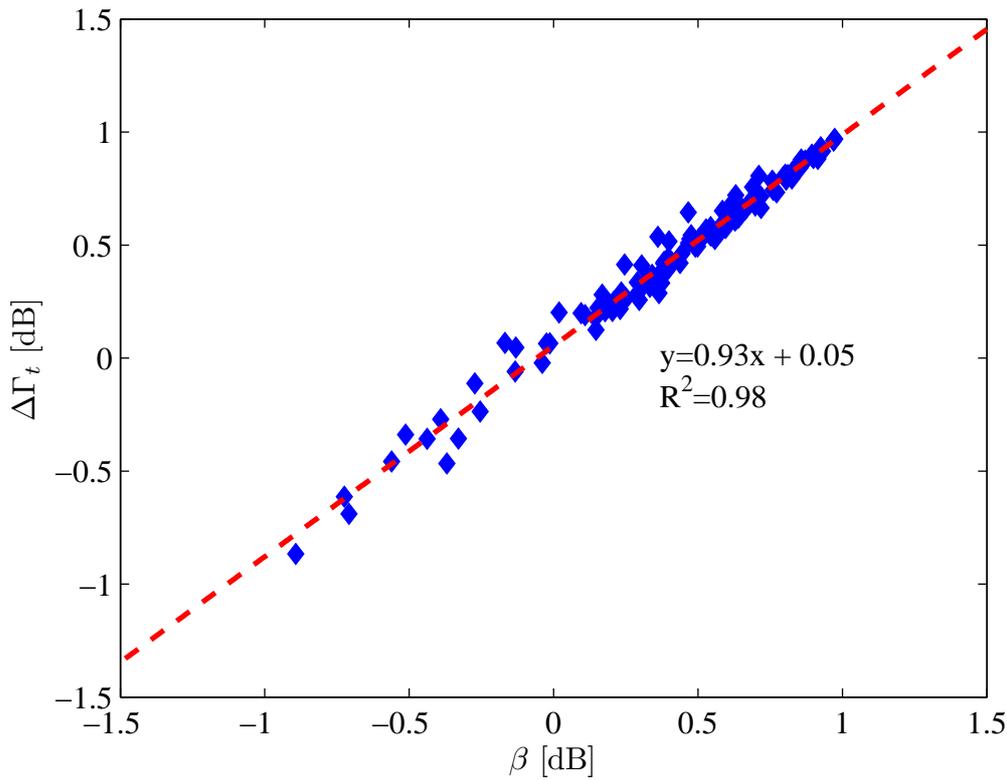


FIGURA 5.1: Cambios de la SINR DL total estimados de forma analítica o mediante simulación.

cambios que la modificación de  $P_{TX}(i)$  produce en celdas vecinas a la celda  $i$ , sin considerar los efectos que dichos cambios en las celdas vecinas producen en otras celdas. Por ello, en las simulaciones realizadas en este experimento, se fija la carga de las celdas vecinas  $j$ , y se modifica únicamente la carga de la celda que cambia su potencia,  $i$ . Del mismo modo, en el simulador no se recalculan las áreas de servicio de las celdas. Esta simplificación no debería ser un problema en la práctica si los cambios de potencia transmitida son pequeños.

La Figura 5.1 compara los valores del indicador teórico propuesto,  $\beta$ , con los cambios de SINR total medidos con el simulador,  $\Delta\Gamma_t$ . Cada punto de la figura corresponde a uno de los 129 planes de potencia construidos mediante el incremento de la potencia de transmisión de una celda en 1 dB. Se observa que ambos indicadores están altamente correlacionados, con un coeficiente de determinación de  $R^2=0.98$ , y con un valor de la pendiente de regresión cercano a 1. Esta similitud entre los valores simulados y analíticos prueban la validez del indicador  $\beta$ .

Además, se observa que el impacto de incrementar la potencia de transmisión de una celda varía significativamente de una celda a otra. En algunas celdas (puntos

situados en la parte superior derecha de la figura), el incremento de potencia de transmisión de 1 dB se traduce directamente en un incremento de 1 dB del SINR total del sistema. Esta situación corresponde a celdas aisladas, cuyo incremento de potencia no supone incremento de interferencia en celdas vecinas. Por el contrario, en otras celdas (puntos situados en la parte inferior izquierda de la figura), el mismo cambio de potencia de transmisión disminuye la SINR total del sistema (valores negativos en los ejes), lo que corresponde a celdas estrechamente acopladas con sus vecinas. Esta gran diversidad de situaciones justifica la necesidad de ajustar la potencia de transmisión celda a celda.

### 5.3. Diseño del algoritmo de optimización

En esta sección se describe el diseño y la implementación del algoritmo de autoajuste de la potencia de transmisión de las estaciones base para maximizar la SINR total de una red LTE.

El algoritmo utiliza como entrada el indicador  $\beta$  presentado anteriormente. A pesar de que el indicador  $\beta$  se calcula de manera analítica, éste puede obtenerse a partir de las trazas de conexión recopiladas en una red. Por ello, en esta sección primero se describen los eventos necesarios para obtener el indicador  $\beta$  a partir de medidas de una red. Después se presenta la estructura del algoritmo de optimización desarrollado, que hace uso de ese indicador.

#### 5.3.1. Indicador de entrada

El nuevo indicador  $\beta$  puede calcularse a partir de medidas de rendimiento disponibles en las trazas de conexión. Para ello, deben activarse las medidas periódicas de RSRP en todos los emplazamientos, así como las medidas periódicas de carga de celda. A partir de las medidas periódicas de RSRP, se obtienen los valores para los términos de potencia (es decir,  $p_{rx}$ ), mientras que los niveles de interferencia y SINR ( $\gamma$ ) se obtienen a partir de los valores de RSRP y de la carga de las celdas. Por último, los términos de probabilidad de tráfico de cada ubicación de una celda ( $p_u$ ), utilizados para obtener los indicadores por celda, están implícitos en el número de medidas obtenidas en cada ubicación de cada celda (es decir, a mayor número de medidas recopiladas, mayor  $p_u$ ).

### 5.3.2. Estructura del algoritmo

El método definido para encontrar la mejor configuración de potencia de transmisión de cada celda tiene como objetivo mejorar la calidad de señal global del sistema,  $\Gamma_t$ . El método hace uso de un algoritmo de gradiente ascendente clásico para encontrar el mejor equilibrio entre una celda y sus vecinas. Dicho algoritmo de gradiente incrementa la potencia de transmisión de una estación base concreta si la pendiente de la función objetivo respecto a este parámetro, reflejada por el estimador  $\beta(i)$ , es positiva.

El algoritmo de gradiente se diseña con un conjunto de controladores proporcionales simples (uno por celda) que calcula iterativamente los cambios de potencia de transmisión en el canal descendente basados en el valor del indicador  $\beta$ . En concreto, la salida de cada uno de estos controladores es el cambio de potencia de transmisión en DL (en dB),  $\Delta P_{TX}(i)$ , calculado como

$$\Delta P_{TX}(i) = \begin{cases} -1 & \text{si } \beta(i) \leq \beta_{\text{mín}} , \\ 0 & \text{si } \beta_{\text{mín}} < \beta(i) < \beta_{\text{máx}} , \\ 1 & \text{si } \beta(i) \geq \beta_{\text{máx}} , \end{cases} \quad (5.30)$$

donde  $\beta_{\text{mín}}$  y  $\beta_{\text{máx}}$  son umbrales de mejora potencial que deben superarse para cambiar  $P_{TX}(i)$ . Dichos umbrales se incluyen para reducir el número de cambios en la red. En esta Tesis, ambos umbrales son simétricos y están definidos a 0, de forma que  $\beta_{\text{máx}} = \beta_{\text{mín}} = 0$ . Esta configuración interna del algoritmo permite conseguir mejor valor de SINR total sin considerar el coste del cambio de los parámetros de red, ya que la plataforma de pruebas es una herramienta de simulación.

El algoritmo propuesto funciona como un proceso iterativo, partiendo de un valor inicial de potencia,  $P_{TX}^{(0)}(i)$ , que se modifica en cada iteración (o lazo de optimización). Cada lazo comienza con la recopilación de medidas de la red, con las que se calcula el estimador  $\beta$  para todas las celdas del escenario. Después se utiliza la ecuación (5.30) para calcular el cambio de potencia,  $\Delta P_{TX}^{(l)}(i)$ , donde  $l$  es el número del lazo. Finalmente, los nuevos valores de  $P_{TX}(i)$  para el siguiente lazo se calculan de forma incremental como  $P_{TX}^{(l+1)}(i) = P_{TX}^{(l)}(i) + \Delta P_{TX}^{(l)}(i)$ .

Para acotar los valores de salida, se define un rango de salida permitido  $[P_{TX_{\text{mín}}}(i), P_{TX_{\text{máx}}}(i)]$ . El límite máximo queda establecido por el valor máximo soportado por

el equipo, consiguiendo que la cobertura de la red sea máxima. Dicho valor máximo puede estar limitado por *hardware* (capacidad del amplificador de potencia) o *software* (la licencia concedida a la celda). Se debe resaltar que el valor  $P_{TX_{m\acute{a}x}}$  no es necesariamente el mismo en todas las celdas, debido a que el amplificador de potencia DL y/o la licencia de potencia puede ser diferente en cada celda. Por el contrario,  $P_{TX_{m\acute{i}n}}$  se define como un freno de seguridad en el proceso de ajuste para prevenir problemas de cobertura. En esta Tesis,  $P_{TX_{m\acute{i}n}}$  está configurado a 10 dB menos que  $P_{TX_{m\acute{a}x}}$  en cada celda, a fin de evitar una reducción excesiva de la potencia de transmisión.

## 5.4. Análisis del rendimiento del algoritmo

En esta sección se presentan el experimento realizado para validar el algoritmo de autoajuste de la potencia de transmisión del enlace descendente. El experimento se realiza en un simulador estático de nivel de sistema que implementa un escenario real LTE ajustado con estadísticos de la red real. En el Apéndice A, se presenta una descripción más detallada del simulador. Por claridad, se describe primero la metodología experimental y, posteriormente, se presentan los resultados de los experimentos.

### 5.4.1. Metodología experimental

A continuación, se describen el escenario de simulación, el experimento definido y los principales indicadores de rendimiento.

#### Herramienta de simulación

El escenario considerado es el escenario urbano limitado por interferencia de 129 celdas del Capítulo 4. La Tabla 5.1 recoge de nuevo los principales parámetros del escenario.

El área geográfica se divide en una rejilla regular de puntos, que representa ubicaciones potenciales de usuario. El nivel de señal recibida en cada punto desde cada estación base se calcula mediante un modelo de propagación macrocelular que incluye desvanecimiento lento *log-normal* (modelo Winner II C2 [114]). En dicho

Número de emplazamientos	44
Número de celdas	129
Distancia media entre emplazamientos [m]	815
Frecuencia de portadora [MHz]	734
Ancho de banda [MHz]	10
Número de PRB	50
Altura de UE [m]	1.5
Altura de antena [m]	[3-54]
Potencia de transmisión de eNB inicial [dBm]	[46.5-47.4]
Ganancia máxima de antena [dB]	15
Ángulo de inclinación de antena [°]	[0-13]
Modelo de propagación	Winner II C2 [114] con X=14 para usuarios NLOS
Resolución de la rejilla [m]	40
Distribución espacial del tráfico	Basada en medidas de TA
Tasa de utilización de PRB [%]	[5-70]

TABLA 5.1: Parámetros de simulación del escenario urbano

modelo, los puntos del escenario se clasifican según ofrezcan condiciones de visión directa (LOS) o no visión directa (NLOS) a partir de datos de geolocalización de los edificios y las posiciones de las antenas del escenario. La resolución de la rejilla de puntos es de 40 metros. Las áreas de servicio de las celdas se calculan a partir de las pérdidas de propagación y las ganancias de antena, de forma que la celda servidora es aquella que proporciona mayor nivel de señal piloto en cada punto. Del mismo modo, las celdas vecinas interferentes se definen como aquellas que proporcionan un mayor nivel de señal en el área de servicio de una celda. Así, el nivel de interferencia en cada punto se calcula mediante la suma de la interferencia procedente de todas las celdas vecinas.

A partir de las medidas del escenario generadas con el simulador, se calcula el indicador  $\beta$  celda por celda utilizando la expresión (5.5). A continuación, se ejecuta el algoritmo de ajuste para obtener los nuevos valores de  $P_{TX}$  empleados en el siguiente lazo de optimización. Los porcentajes de utilización de PRB se

actualizan en cada lazo estimando el impacto de los cambios de  $P_{TX}(i)$  en la eficiencia espectral del enlace radio establecido en cada punto del escenario.

## Descripción del experimento

Para evaluar el funcionamiento del algoritmo de autoajuste de la potencia de transmisión del enlace descendente, se comparan cuatro métodos de ajuste:

1. El primer método es el plan de potencia desplegado actualmente por el operador en la zona, nombrado como OS (de *Operator Solution*). OS es la solución de referencia con la que se comparan el resto de métodos. En la configuración OS, la potencia de transmisión DL se configura al máximo en todas las celdas. Esta configuración es la establecida por defecto por los operadores, ya que así se maximiza el área total de cobertura. Esta configuración se mantiene en la mayoría de los casos, aun cuando se desplieguen nuevos emplazamientos. Como consecuencia, se genera solapamiento entre celdas innecesario, causando niveles altos de interferencia entre celdas que degradan la capacidad del sistema.
2. El segundo método es el algoritmo de autoajuste iterativo para la potencia de transmisión DL basado en el indicador  $\beta$ , descrito en la Sección 5.3. Este método se denomina SINR-PWR (de *SINR PoWeR*). En este método, se parte de la configuración de potencias OS, y se simulan 30 iteraciones de ajuste (lazos de optimización). A posteriori, se comprueba que este número de lazos es suficiente para alcanzar el régimen permanente en el proceso de ajuste iterativo de potencias.
3. El tercer método es el algoritmo automático de ajuste del ángulo de inclinación de las antenas descrito en el Capítulo 4, nombrado TF-RET. El método TF-RET también se inicializa con la configuración OS y se simulan 20 lazos de optimización. Cabe recordar que, a diferencia del método SINR-PWR, este algoritmo ajusta los ángulos de inclinación de las antenas en vez de la potencia de transmisión de las estaciones base.
4. El cuarto método es una variación del método TF-RET anterior, nombrado como TF-PWR, descrito en el Capítulo 4. El método TF-PWR utiliza los mismos indicadores y reglas del controlador que TF-RET, pero aplicados

al ajuste de la potencia de transmisión de las estaciones base (en vez del ángulo de inclinación de la antena). El método TF-PWR también se inicializa con la configuración OS y, al igual que TF-RET, se simulan 20 lazos de optimización.

### Indicadores de rendimiento

Para evaluar la bondad de los algoritmos, se utilizan los mismos indicadores de rendimiento del Capítulo 4, que son:

- a) como una medida de la eficiencia espectral (y, por tanto, de la capacidad), el promedio global de SINR DL en el escenario,  $\overline{SINR}_{avg}$ , calculado como la media aritmética de SINR DL media de cada celda, y
- b) como una medida de la cobertura de la red, el promedio global de SINR DL de borde de celda,  $\overline{SINR}_{ce}$ , calculado como la media aritmética del percentil del 5% de la SINR DL de cada celda.

Al igual que ocurría con la evaluación de los algoritmos de RET llevados a cabo en el Capítulo 4, cada cambio de la configuración de potencia a lo largo de los lazos de optimización podría causar que algunos puntos del escenario dejen de recibir un nivel de señal suficiente para establecer una conexión o, por el contrario, que algunas ubicaciones que inicialmente no son servidas por ninguna celda obtengan un nivel de señal suficiente para iniciar una conexión en un lazo de optimización posterior. En la red real, estos cambios en el área de cobertura tendrían una influencia en la demanda de tráfico en la red. Para simplificar la comparación de métodos, ambos indicadores de SINR se calculan para el mismo conjunto de ubicaciones a lo largo de todas las iteraciones (es decir, el área geográfica evaluada es siempre la misma).

#### 5.4.2. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante la evaluación del algoritmo de autoajuste de potencia de transmisión DL. Se concluye con un análisis de la complejidad computacional del algoritmo.

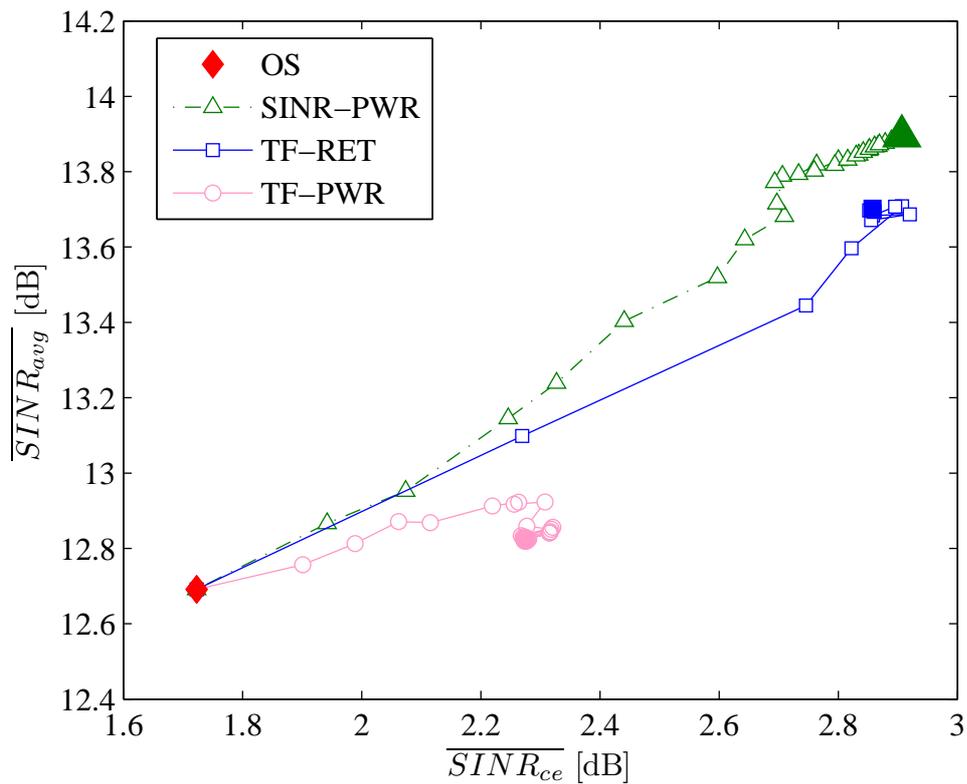


FIGURA 5.2: Comparación de métodos de ajuste.

### Rendimiento del algoritmo

La Figura 5.2 compara los resultados de los distintos algoritmos de autoajuste. Para reflejar el compromiso entre cobertura y capacidad en cada uno de los métodos, se muestran en los ejes x e y los promedios globales de SINR de borde de celda y de SINR media de celda, respectivamente. Los puntos situados en la parte superior derecha de la figura son aquéllos que muestran simultáneamente el mejor rendimiento de ambos indicadores. El método de planificación OS, usado como referencia, se representa con un simple punto (rombo), al corresponder a una única configuración de red. Por el contrario, los métodos iterativos (es decir, SINR-PWR, TF-RET y TF-PWR) se representan por una curva de múltiples puntos, que muestran el rendimiento intermedio de las configuraciones de parámetros de red durante las sucesivas iteraciones. Para una mayor claridad, el valor final de los métodos iterativos se resalta con un marcador relleno. Conviene recordar que las curvas SINR-PWR, TF-RET y TF-PWR comienzan con la configuración de red OS y, por eso, su rendimiento es el mismo en la primera iteración.

Observando detenidamente el rendimiento final alcanzado por cada algoritmo en la Figura 5.2, se puede ver cómo SINR-PWR, TF-RET y TF-PWR mejoran tanto el SINR medio como el de borde de celda una vez al final del proceso de ajuste. Se observa que el algoritmo SINR-PWR, que ajusta la potencia de transmisión de las estaciones base, obtiene resultados parecidos a los del algoritmo TF-RET, diseñado para ajustar el ángulo de inclinación de las antenas, y sensiblemente mejores que los del algoritmo TF-PWR, que también modifica los valores de potencia de transmisión de celda. En especial, llama la atención que, a pesar de que el ajuste de RET viene considerándose en la bibliografía como un mecanismo más potente, ya que permite mejorar tanto la celda ajustada como las adyacentes, el algoritmo de ajuste de potencia propuesto basado en el indicador  $\beta$  (SINR-PWR) consigue mejor  $\overline{SINR}_{avg}$  que TF-RET sin deteriorar  $\overline{SINR}_{ce}$ . La superioridad de SINR-PWR frente a TF-PWR confirma que los buenos resultados de SINR-PWR se obtienen gracias a la formulación analítica del problema de optimización, que no es posible con TF-RET.

La Tabla 5.2 compara el rendimiento de los métodos iterativos SINR-PWR y TF-RET al final del proceso de ajuste, frente a la solución inicial, OS. Además de los indicadores  $\overline{SINR}_{avg}$  y  $\overline{SINR}_{ce}$ , en la tabla se presentan el promedio global de *throughput* de usuario medio,  $\overline{UeTHP}_{avg}$ , y el promedio global de *throughput* de usuario de borde de celda,  $\overline{UeTHP}_{ce}$ , para el enlace descendente. Ambos indicadores se calculan como la media aritmética de los valores individuales de *throughput* de usuario medio y de borde de celda, respectivamente, de cada celda del escenario. El *throughput* de usuario en DL para cada ubicación del escenario se obtiene a partir de los valores de SINR, mediante la fórmula de Shannon truncada [72] para un factor de corrección de pérdidas de implementación,  $\alpha_{imp}$ , igual a 0.6, asumiendo que el ancho de banda total del sistema está disponible para el usuario (es decir,  $50 \text{ PRB} \cdot 180 \text{ kHz/PRB} = 9 \text{ MHz}$ ). Además, para una comparación más completa, en la tabla también se incluyen algunos indicadores, como el nivel medio de señal piloto recibida de la celda servidora,  $\overline{RSRP}$ , el nivel medio de interferencia en el enlace descendente,  $\overline{I}_{DL}$ , la desviación media de la potencia de transmisión y del ángulo de inclinación con respecto a la configuración inicial,  $\overline{\Delta P_{TX}}$  y  $\overline{\Delta \alpha}$ , y el número de celdas modificadas tras el proceso de ajuste.

En la tabla, se observa que ambos métodos de ajuste superan la solución actual del operador. Concretamente, SINR-PWR mejora  $\overline{SINR}_{avg}$  en 1.21 dB y  $\overline{SINR}_{ce}$  en 1.19 dB respecto a OS, superando también los resultados de TF-RET (por 0.2

	OS	SINR-PWR	TF-RET
$\overline{SINR}_{avg}$ [dB]	12.69	13.90	13.70
$\overline{SINR}_{ce}$ [dB]	1.72	2.91	2.86
$\overline{UeTHP}_{avg}$ [Mbps]	23.36	25.36	25.02
$\overline{UeTHP}_{ce}$ [Mbps]	7.44	8.74	8.70
$\overline{RSRP}$ [dBm]	-88.44	-89.90	-88.17
$\overline{I}_{DL}$ [dBm]	-101.13	-103.80	-101.88
$\overline{\Delta P}_{TX}$ [dB]	-	-1.80	-
$\overline{\Delta\alpha}$ [°]	-	-	0.50
Número de celdas modificadas	-	48	65

TABLA 5.2: Rendimiento de métodos al final del proceso de ajuste

y 0.05 dB, respectivamente). Del mismo modo, en la tabla se aprecia que los indicadores  $\overline{UeTHP}_{avg}$  y  $\overline{UeTHP}_{ce}$  presentan el mismo comportamiento, obteniendo mejores resultados con SINR-PWR. Conviene recordar que el objetivo principal del algoritmo SINR-PWR es mejorar la SINR media global sin degradar en exceso la SINR de borde de celda, siguiendo la definición clásica del problema CCO. Por lo tanto, el hecho de que SINR-PWR también mejore  $\overline{SINR}_{ce}$ , y que lo haga en mayor medida que TF-RET, demuestra la robustez del método propuesto.

Un análisis más detallado de la Tabla 5.2 muestra que SINR-PWR obtiene sus resultados disminuyendo los valores tanto de  $\overline{RSRP}$  como de  $\overline{I}_{DL}$  (-1.46 y -2.67 dB, respectivamente). Dicha reducción, típica en un escenario limitado por interferencia, se hace sin deteriorar el rendimiento de la SINR de borde de celda, que también mejora. Sin embargo, TF-RET mantiene los valores de  $\overline{RSRP}$  y  $\overline{I}_{DL}$ . Como ventaja adicional, SINR-PWR modifica menos celdas que TF-RET. Concretamente, SINR-PWR realiza 48 cambios de potencia frente a TF-RET, que lleva a cabo 65 cambios de inclinación.

### Complejidad computacional

A pesar de que el método se basa en un análisis teórico complejo, el método se diseña como un algoritmo de control basado en reglas y, por tanto, tiene una complejidad computacional baja. Concretamente, la complejidad computacional del algoritmo SINR-PWR es  $\mathcal{O}(N_c)$ , donde  $N_c$  es el número de celdas del área

analizada. En el experimento realizado, el tiempo total de ejecución de 30 lazos de optimización en el escenario considerado, de 129 celdas, en un ordenador con frecuencia de reloj de 3.47 GHz y 12 GB de RAM, es de 1980 segundos (66 segundos por lazo de optimización de media). La mayoría de este tiempo se utiliza en simular el escenario para obtener los indicadores de rendimiento de la red, mientras que sólo se utilizan 0.085 segundos por lazo para el cálculo del indicador propuesto (es decir, menos del 0.13 % del tiempo de ejecución del lazo).

Es importante resaltar que, calculando el indicador  $\beta$  analíticamente, en vez de estimarlo por un análisis de perturbación, como el realizado para validar el indicador en la Sección 5.2, se reduce el número de configuraciones de parámetros simuladas en  $N_c$  veces. Nótese que el indicador  $\beta$  necesita generar las medidas asociadas sólo de la configuración de red de partida, mientras que un análisis de perturbación necesita generar las medidas de cada nueva configuración de red obtenida modificando la potencia de una única celda.

## 5.5. Conclusiones

En este capítulo se ha propuesto un algoritmo de ajuste de la potencia de transmisión en el enlace descendente de las estaciones base LTE a nivel de celda a fin de mejorar tanto la cobertura como la eficiencia espectral total de la red.

El algoritmo de ajuste se ha diseñado como un conjunto de controladores independientes que deciden incrementar o disminuir la potencia de transmisión de cada celda basándose en un nuevo indicador,  $\beta$ , que muestra el impacto esperado de dicho cambio en la SINR DL total del sistema. Para validar el nuevo indicador, se ha realizado una simulación en un escenario real en la que se compara el indicador y el incremento de SINR DL total obtenido en el sistema cuando se modifica la potencia de cada celda del escenario de manera independiente. Los resultados han demostrado que el nuevo indicador  $\beta$  estima correctamente la ganancia de SINR total del sistema cuando se modifica la potencia de una estación base en entornos con diferentes condiciones de acoplamiento entre celdas.

Tras validar el nuevo indicador, se ha evaluado el algoritmo propuesto en un simulador de nivel de sistema que implementa un escenario real LTE urbano denso limitado por interferencia. Los resultados obtenidos han demostrado que el método propuesto puede mejorar los niveles de SINR media de celda y de borde de celda

en más de 1 dB cuando se compara con la solución implementada actualmente en la red. El método propuesto consigue resultados ligeramente mejores que el algoritmo de autoajuste del ángulo de inclinación de antenas, siendo también válido para celdas con antenas omnidireccionales y multibanda, donde la inclinación de antenas no suele ser posible.

El algoritmo propuesto se puede implementar de forma centralizada o distribuida. En el esquema centralizado, todas las medidas necesarias para construir el indicador  $\beta$  se procesan en un nodo central, para después obtener los nuevos planes de potencia de transmisión con las reglas de control descritas. Alternativamente, cada estación base puede intercambiar con sus vecinas las medidas de rendimiento necesarias para obtener el indicador  $\beta$  de forma distribuida a través de la interfaz X2.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

# Capítulo 6

## Conclusiones Finales

En este último capítulo se resumen las principales conclusiones del trabajo. Primero se destacan las contribuciones originales de esta Tesis. Después se describen posibles líneas de continuación. Finalmente, se presenta la lista de publicaciones resultantes del trabajo realizado.

### 6.1. Contribuciones

En esta Tesis Doctoral se han presentado diversos algoritmos de optimización automática diseñados para redes LTE. Todos los métodos descritos son lo suficientemente eficientes como para ser integrados en herramientas comerciales de planificación y optimización de red sin comprometer su eficiencia computacional. Con ellos, se pretende mejorar el rendimiento de la red y reducir el esfuerzo que suponen estas tareas para los operadores.

La descripción de las principales contribuciones mantiene la misma división que el trabajo expuesto en este documento. En primer lugar, se presentan las contribuciones obtenidas en el procesado de la información de la red para generar nuevos indicadores de rendimiento. A continuación, se muestran las contribuciones relacionadas con el estudio de los indicadores de capacidad en redes LTE en explotación. Posteriormente, se describen las contribuciones en el ajuste del ángulo de inclinación de las antenas de una red LTE. Por último, se describen las conclusiones relacionadas con el ajuste de la potencia de transmisión de las estaciones base en el enlace descendente.

### 6.1.1. Procesado de información para la generación de contadores sintéticos

En esta Tesis se ha abordado el problema de la generación de nuevos indicadores de rendimiento a partir de la información disponible en las trazas de conexión recogidas por los elementos de una red celular. Esta fuente de información más detallada permite enriquecer el conjunto de indicadores que suelen proporcionar los fabricantes, mejorando así la eficacia de los procesos de replanificación basado en medidas y optimización de red. Las principales contribuciones en esta parte se describen a continuación:

- 1) Se ha realizado un estudio del uso de la metodología de análisis masivo de datos (BDA) y del procesado de eventos complejos (CEP) en diferentes ámbitos. De dicho estudio, se desprende que, si bien BDA y CEP se han extendido a campos como las finanzas o las telecomunicaciones, no se ha presentado hasta la fecha una herramienta genérica que permita utilizar la metodología CEP para generar nuevos contadores a partir de datos de la red.
- 2) Se ha descrito una herramienta de procesado de eventos complejos basada en el código Esper, con la que construir nuevos contadores (denominados contadores sintéticos) a partir de los eventos de las trazas de conexión generadas por las estaciones base de una red LTE. Esta herramienta incluye los procesos de análisis sintáctico, sincronización y correlación de eventos en las trazas de conexión.
- 3) Para mostrar el funcionamiento de la herramienta de procesado, se ha presentado un ejemplo de generación de un contador sintético a partir de las trazas de conexión de usuario. El indicador construido refleja el nivel medio de potencia que miden los usuarios justo antes de realizar un traspaso en una determinada adyacencia. Con dicho indicador, se pone de manifiesto que, en las redes actuales, existe una gran cantidad de celdas en las que se ejecutan traspasos demasiado tarde, ya que los usuarios experimentan niveles de potencia muy cercanos al umbral de caída de llamada cuando realizan el traspaso. Por otro lado, el indicador también identifica niveles altos de potencia, mostrando aquellas adyacencias en las que existe un grado de solapamiento alto entre celdas vecinas. Este ejemplo ha demostrado que, con la herramienta de procesado de eventos, se pueden obtener contadores que aportan información mucho más detallada

que la que proporcionan los indicadores ofrecidos por los fabricantes. Su principal ventaja reside en la capacidad para correlacionar eventos generados por diferentes elementos de la red, en distintos instantes de tiempos, y con diferente granularidad espacial y temporal. Con la herramienta propuesta, estos contadores pueden desarrollarse de forma flexible, lo que permitiría a los fabricantes adaptarse a las necesidades de cada operador. Aunque inicialmente ha sido concebida para redes LTE, la metodología propuesta puede aplicarse a otras tecnologías de acceso radio y extenderse a otros segmentos de la red móvil, como la red de transmisión y el núcleo de red.

### 6.1.2. Evaluación de la capacidad en redes LTE en explotación

En esta Tesis se ha presentado un análisis de distintos indicadores de capacidad de uso extendido por parte de los operadores como parte de la formulación del problema para la optimización de la cobertura y la capacidad de red. A diferencia de estudios anteriores, basados principalmente en simulaciones, el estudio se basa en contadores de rendimiento y trazas de conexión tomados de la red real. Las principales contribuciones en esta parte se describen a continuación:

- 1) Los resultados han puesto en evidencia las limitaciones del uso de la tasa de transmisión de usuario (*throughput*) como cifra de mérito de los procesos de optimización de red. Por un lado, el estudio ha confirmado que, en las redes LTE actuales, prevalecen las transmisiones cortas, en las que se suele vaciar el *buffer* de transmisión, y se tiende a no aprovechar la capacidad máxima del canal. Este fenómeno es más importante en el enlace ascendente, donde el volumen de tráfico es muy inferior en la actualidad.
- 2) Por otro lado, se ha puesto de manifiesto por primera vez el impacto negativo del OLLA y TCP en la eficiencia espectral y en la tasa de transmisión de usuario en redes LTE. Ambos problemas son la causa de que la introducción de nuevas funcionalidades de red no siempre se traduzca en una mejora sustancial de la tasa de transmisión de usuario. Por este motivo, en esta tesis se ha utilizado la calidad del enlace como principal cifra de mérito para validar los algoritmos propuestos, y no los indicadores de tasa de transmisión de usuario. Estos hallazgos han sido el punto de partida de sendos estudios [76, 131].

### 6.1.3. Optimización del ángulo de inclinación de antenas

En esta Tesis se ha planteado el ajuste automático de diferentes parámetros de las estaciones base para la optimización de la cobertura y la capacidad de redes LTE. El primer método propuesto se centra en el ajuste del ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base de manera remota, para solventar problemas de cobertura e interferencia entre celdas. Las contribuciones de esta parte se describen a continuación:

- 1) Se han revisado los diferentes métodos de ajuste del ángulo de inclinación de las antenas existentes en la bibliografía, constatando que ninguno ha considerado el uso de trazas de conexión para mejorar los algoritmos de optimización que modifican el ángulo de inclinación eléctrico de forma remota (RET).
- 2) Como punto de partida de la formulación del problema, se ha desarrollado un modelo analítico para predecir el impacto de la inclinación de la antena haciendo uso de consideraciones geométricas. A partir de este modelo geométrico, se han construido diferentes indicadores para detectar la necesidad de reajustar el ángulo de inclinación de las antenas como parte de los procesos optimización de red. El análisis de la configuración de una red real realizado con el modelo ha demostrado que el ángulo de inclinación de las antenas configurado por los operadores no siempre es adecuado. Con ello, el modelo geométrico puede ser una herramienta de apoyo para el análisis y mejora de la planificación de red.
- 3) Para la fase de operación de red, se han diseñado tres nuevos indicadores, obtenidos a partir de trazas de conexión, que permiten detectar problemas de cobertura en el borde de celda, de sobreapuntamiento y de solapamiento anormal entre celdas. Estos indicadores se han validado mediante una prueba de campo en un escenario urbano denso real en una red LTE. Los resultados han demostrado que los indicadores detectan correctamente los problemas que representan, incluso en escenarios con características de propagación especiales.
- 4) A partir de los indicadores descritos, se ha diseñado un algoritmo heurístico basado en reglas para ajustar el ángulo de inclinación de la antena de cada estación base. Para simplificar su desarrollo, el algoritmo ha sido implementado mediante controladores de lógica difusa. El algoritmo propuesto se ha validado en un simulador de nivel de sistema que modela escenarios reales ajustados con

información de la red. Los resultados han demostrado que el algoritmo propuesto puede mejorar la eficiencia espectral de la red tanto en escenarios limitados por interferencia como limitados por cobertura. El método propuesto, concebido para la etapa de operación de la red, mejora los resultados de los métodos de autoajuste basados en consideraciones geométricas. Si bien existen métodos más sofisticados, éstos dependen de predicciones de tráfico y propagación, a diferencia de la solución propuesta, que se basa únicamente en medidas tomadas de la red.

#### **6.1.4. Optimización de la potencia de transmisión en el enlace descendente**

En esta Tesis también se ha abordado la optimización de la cobertura y capacidad de redes LTE mediante el ajuste de la potencia de transmisión de las estaciones base para mejorar la eficiencia espectral global de la red. Las principales contribuciones en esta parte se describen a continuación:

- 1) Se han revisado los diferentes métodos de ajuste de potencia de estaciones base existentes en la bibliografía, constatando que ningún estudio ha planteado cómo verificar que el plan de potencias desplegado en una red en explotación es óptimo en sentido estricto.
- 2) Se ha reformulado el problema de la optimización de la cobertura y capacidad de una red LTE para obtener un indicador que refleje, de forma cuantitativa, el impacto del cambio de la potencia de transmisión de cada celda en la SINR total del sistema en el enlace descendente. Los resultados de la simulación han demostrado que el indicador propuesto estima correctamente la ganancia global de SINR cuando se incrementa la potencia de cada una de las estaciones base del sistema. Como el resto de indicadores desarrollados en esta tesis, el nuevo indicador puede obtenerse a partir de trazas de conexión, y puede utilizarse por tanto como parte de los procesos de optimización de red.
- 3) A partir del indicador descrito, se ha diseñado un algoritmo heurístico basado en reglas para ajustar la potencia de cada estación base del sistema, que, a diferencia de otros algoritmos en la bibliografía, garantiza que cada cambio realizado en el sistema mejora la SINR global del sistema. El algoritmo se ha

validado en un simulador de nivel de sistema que modela un escenario real urbano denso. Los resultados han demostrado que el método propuesto puede mejorar los niveles de SINR medio de celda y de borde de celda en más de 1 dB cuando se compara con la solución implementada actualmente en la red. El método propuesto consigue resultados similares a los conseguidos mediante la inclinación de las antenas, siendo una alternativa válida para celdas con antenas omnidireccionales o multibanda.

## 6.2. Líneas Futuras

En esta sección se esbozan las posibles líneas de investigación que se derivan del trabajo realizado en esta Tesis.

- 1) En este trabajo se han realizado diversas pruebas de campo para comprobar el funcionamiento de muchos de los indicadores de rendimiento propuestos y evaluar el impacto de los algoritmos desarrollados. Así se ha validado el algoritmo de ajuste del ángulo de inclinación y de sus indicadores de entrada. No obstante, el algoritmo de optimización de la potencia de transmisión de las estaciones base, y el nuevo indicador analítico que estima el impacto de los cambios de potencia en el enlace descendente, no han sido validados mediante pruebas de campo, sino sólo mediante la herramienta de simulación. Por tanto, una línea de continuación del trabajo es validar ambas propuestas en una red LTE comercial. De este modo, pueden depurarse tanto el algoritmo como el indicador a partir de la información de la red que no puede considerarse en un simulador.
- 2) Por eficiencia computacional, todos los algoritmos desarrollados en esta tesis se han validado en un simulador estático de nivel de sistema, similar al que incluyen las herramientas de planificación comercial. Una futura línea de trabajo consiste en validar los algoritmos en un simulador dinámico. De esta manera, se pueden tener en cuenta aspectos no incluidos en el simulador estático, como la movilidad de los usuarios y la correlación temporal entre los eventos. Ambos aspectos son importantes para evaluar el impacto de procesos de control en lazo cerrado, como la adaptación del enlace (OLLA).

- 3) En esta Tesis se han propuesto indicadores muy sofisticados que se construyen a partir de trazas de conexión. Sin embargo, algunos operadores son reacios a activar dichas trazas, por el riesgo de sobrecargar los procesadores de las estaciones base. Otra línea de ampliación interesante es diseñar aproximaciones de los indicadores propuestos a partir de contadores de rendimiento (PM) que ya estén definidos por los fabricantes. Con ello, se evita el proceso de recolección, procesado y manejo de trazas de conexión de usuario. Para trabajar en esta línea, es necesario identificar, dentro del conjunto de PM aportados por los fabricantes, aquéllos que aporten información equivalente a los indicadores contruidos con trazas.
- 4) En la bibliografía, se han encontrado algunos algoritmos que ajustan conjuntamente el ángulo de inclinación de las antenas y la potencia de transmisión de las estaciones base [17, 83, 87, 91, 93, 104, 124, 125]. Siguiendo estos ejemplos, una línea de investigación futura consiste en desarrollar un único algoritmo de optimización automática que modifique ambos parámetros, teniendo como entrada los mismos indicadores propuestos en esta Tesis. En su diseño, puede considerarse la asignación de prioridades a la optimización de un parámetro frente al otro. De los resultados presentados, se concluye que el algoritmo de ajuste del ángulo de inclinación alcanza su mejor valor en un número de iteraciones menor que el algoritmo de ajuste de potencia (20 iteraciones frente a 30). Por ello, como punto de partida, se propone modificar primero el ángulo de inclinación, dejando la modificación de potencia para un ajuste más preciso, cuando ya no se consiga mejorar los resultados con el ángulo de inclinación.
- 5) Los continuos avances en los terminales y servicios móviles están provocando que los operadores móviles tengan cada día más en cuenta indicadores relacionados con el grado de satisfacción de los usuarios en lugar del rendimiento de la interfaz radio. Estos indicadores, denominados indicadores de calidad de experiencia (QoE) se centran en la experiencia final del servicio, y, por tanto, cada servicio tiene su propio conjunto de indicadores (p. ej., para el servicio de *video streaming*, existen los indicadores de rendimiento del servicio, el retraso inicial, el número de paradas y la duración total de las paradas [132]). Otra posible línea futura de trabajo consiste en adaptar los algoritmos de optimización de cobertura y capacidad propuestos aquí para que tomen como entrada los indicadores de rendimiento del servicio.

- 6) Los algoritmos propuestos en esta Tesis han sido concebidos y validados en redes LTE Release 8/9, si bien sus principios son aplicables a versiones más modernas del estándar LTE. Una extensión lógica del trabajo es adaptar los algoritmos propuestos a los futuros sistemas de comunicaciones móviles 5G. Uno de los objetivos principales de la tecnología 5G es la conectividad de máquinas (p. ej., vehículos, maquinaria industrial, electrodomésticos, ...) a internet mediante redes móviles. Este concepto, denominado como Internet de las Cosas (IoT), dará lugar a un incremento de la carga de señalización y del volumen de datos enviado por el enlace ascendente. En este contexto, se plantea la adaptación de los algoritmos propuestos para optimizar el enlace ascendente, y no sólo el enlace descendente. Con la introducción de la 5G, la topología de red también se verá afectada, con la aparición de redes heterogéneas ultradensas, que combinan estaciones base tradicionales (macroceldas, micro celdas, picoceldas, ...) con otras de bajo coste (*small cells*) para mejorar la cobertura en interiores o zonas de sombra de la red macrocelular. Por tanto, otra tarea dentro de esta posible línea futura es adaptar los indicadores y algoritmos propuestos a las redes heterogéneas.

### 6.3. Lista de Publicaciones

A continuación, se enumera la lista de publicaciones resultantes del trabajo realizado en esta Tesis.

#### Artículos

- [I] V. Buenestado, J. M. Ruiz-Avilés, M. Toril, S. Luna-Ramírez, A. Mendo, "Analysis of Throughput Performance Statistics for Benchmarking LTE Networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1607-1610, Septiembre 2014.
- [II] V. Buenestado, M. Toril, S. Luna-Ramirez, J. M. Ruiz-Avilés, A. Mendo, "Self-tuning of remote electrical tilts based on call traces for coverage and capacity optimization in LTE," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 5, pp. 4315-4326, Mayo 2017.

- [III] V. Buenestado, M. Toril, S. Luna-Ramirez, J. M. Ruiz-Avilés, “Self-planning of base station transmit power for coverage and capacity optimization in LTE,” *Mobile Information System (Hindawi)*, vol. 2017, Agosto 2017.
- [IV] V. Buenestado, M. Toril, S. Luna-Ramirez, J. M. Ruiz-Avilés, I. de la Bandera, “Complex event processing for self-optimizing cellular networks,” *enviado a IEEE Communications Magazine*, Octubre 2016.

### Conferencias y reuniones científicas

- [V] J. M. Ruiz-Avilés, I. de la Bandera, A. B. Vallejo-Mora, V. Buenestado, M. Toril, M. Regueira, “Construcción de Contadores Sintéticos mediante Procesado de Eventos Complejo en redes LTE,” *XXVIII Simposium de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI)*, Santiago de Compostela (España), Septiembre 2013.
- [VI] V. Buenestado, J. M. Ruiz-Avilés, M. Toril, S. Luna-Ramírez, A. Mendo, “Análisis Geométrico de la Inclinación de Antenas Direccionales en una red LTE,” *XXIX Simposium de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI)*, Valencia (España), Septiembre 2014.
- [VII] V. Buenestado, J. M. Ruiz-Avilés, M. Toril, S. Luna-Ramírez, A. Mendo, “Optimization of remote electrical tilts for improving LTE network coverage and capacity based on cell traces,” *TD(15)13014 13th COST IC1004 Workshop and MC Meeting*, Valencia (España), Mayo 2015.

### Solicitud de Patente

- [VIII] V. Buenestado, M. Toril, J. M. Ruiz-Avilés, I. de la Bandera, M. Regueira, “Received signal strength based interferer classification of cellular network cells,” Solicitante: Ericsson. European Patent Application PCT/EP2014/067819, Febrero 2016.

Las publicaciones enumeradas se relacionan con el contenido de la memoria del siguiente modo. En [V], se plantea por primera vez el procesado de trazas para la generación de contadores destinados a la optimización de redes celulares, mientras que [IV] desarrolla la metodología CEP para el procesado de trazas, descrita en el Capítulo 2. En [I], se presenta el análisis de los indicadores de capacidad a partir de contadores y trazas de conexión de una red

real, recogido en el Capítulo 3. En [VI], se presenta el análisis de la configuración de ángulos de inclinación de una red real LTE realizado a partir de indicadores geométricos, expuesto en la Sección 4.2. En [VIII], se especifica el indicador de solapamiento excesivo descrito en la Sección 4.3. En [VII] y [II] se presenta el algoritmo de optimización del ángulo de inclinación de las antenas, descrito en la Sección 4.3. Finalmente, [III] recoge el método de ajuste de la potencia de las estaciones base descrito en el Capítulo 5.

Estas contribuciones se han desarrollado en el marco de los siguientes proyectos y contratos de investigación:

- Contrato de colaboración entre Optimi-Ericsson y la Universidad de Málaga (Desarrollo de funciones SON para la planificación y optimización de redes, ref. 59288), financiado a través de la agencia IDEA de la Consejería de Ciencia, Innovación y Empresa de la Junta de Andalucía y cofinanciado con fondos FEDER de la Unión Europea [I, II, IV, V, VI, VII, VIII].
- Proyecto TIN2012-36455 (Optimización de la calidad de experiencia del servicio de videostreaming 3D en redes 4G), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad [I, II, V, VII].
- Proyecto TEC2015-69982-R (Métodos de planificación y optimización de la calidad de experiencia en redes B4G), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad [II, IV, III].

Así mismo, se ha participado con [VII] en el proyecto europeo COST IC1004 (*Cooperative Radio Communications for Green Smart Environments*).

## Otras aportaciones

Otras publicaciones relacionadas con el tema central de esta Tesis en las que se ha colaborado como co-autor son:

- [IX] J. M. Ruiz-Avilés, S. Luna-Ramírez, M. Toril, V. Buenestado, M. A. Regueira, “Limitaciones del balance de carga basado en modificación de márgenes de traspaso en LTE,” *XXIX Simposium de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI)*, Valencia (España), Septiembre 2014.

- [X] J. M. Ruiz-Avilés, M. Toril, S. Luna-Ramírez, V. Buenestado, M. A. Regueira, “Analysis of Limitations of Mobility Load Balancing in a Live LTE System,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 417-420, Agosto 2015.
- [XI] J. M. Ruiz-Avilés, M. Toril, V. Buenestado, A. Mendo, S. Pedraza, M. Regueira, “HO performance indicators for tuning HO parameters which are based on radio channel quality before HO,” Solicitante: Ericsson. European Patent Application PCT/EP2014/074743, Mayo 2016.
- [XII] A. García, V. Buenestado, M. Toril, S. Luna, A. Mendo, “Cálculo del radio de celda basado en el diagrama de Voronoi para redes móviles LTE,” *XXX Symposium de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI)*, Pamplona (España), Septiembre 2015.
- [XIII] A. García, M. Toril, P. Oliver, V. Buenestado, S. Luna, “Estimación de umbrales de calidad de servicio para servicios móviles mediante trazas de conexión en LTE,” *XXXI Symposium de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI)*, Madrid (España), Septiembre 2016.

Los hallazgos de esta Tesis sobre los indicadores de capacidad de usuario en redes LTE han sido el punto de partida de los siguientes trabajos:

- [XIV] A. Durán, M. Toril, F. Ruiz, A. Mendo, “Self-Optimization Algorithm for Outer Loop Link Adaptation in LTE,” *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 11, pp. 2005-2008, Noviembre 2015.
- [XV] M. Toril, R. Acedo-Hernández, A. Sánchez, S. Luna, C. Úbeda, “Estimating Spectral Efficiency Curves from Connection Traces in a Live LTE Network,” *Mobile Information Systems (Hindawi), Special issue on Data-Driven Modeling and Optimization*, vol. 2017, Junio 2017.

La herramienta de procesamiento de trazas desarrollada en esta Tesis se ha utilizado con éxito en pruebas de campo con operadores de diferentes continentes. También se ha utilizado para la recopilación y el análisis de trazas en los siguientes trabajos:

- [XVI] A. Vallejo-Mora, M. Toril, A. Mendo, y S. Pedraza, “A network node and a method performed thereby for congestion control of a radio base station,” Solicitante: Ericsson. European Patent Application PCT/SE2014/051006, Marzo 2016.

- [XVII] A. Vallejo-Mora, M. Toril, S. Luna-Ramírez, A. Mendo, y S. Pedraza, “Congestion Relief in Subway Areas by tuning Uplink Power Control in LTE,” *aceptado en IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Noviembre 2016.

# Apéndice A

## Herramienta de simulación para el canal descendente de LTE

En este apéndice se presenta un simulador estático de red LTE de nivel de sistema para el canal descendente. Esta herramienta está concebida para la evaluación del rendimiento de algoritmos automáticos de planificación y optimización en redes macrocelulares LTE. En primer lugar, se presenta la funcionalidad del simulador y, a continuación, se describe el procedimiento de ajuste y validación de la herramienta.

### A.1. Funcionalidad básica del simulador

La Figura A.1 muestra el diagrama de flujo que describe la funcionalidad del simulador, que sigue la estructura clásica de simuladores de red móvil de nivel de sistema.

En un primer paso, se configuran los parámetros de simulación, que determinan el escenario a evaluar (ubicación de las estaciones base, ángulos de orientación de las antenas, ...), las características de la red (ancho de banda del sistema, intervalo de transmisión, ...) y los parámetros internos de los algoritmos de gestión de recursos. Tras la configuración inicial, los siguientes pasos buscan estimar el rendimiento de la red.

Es importante resaltar que el simulador está desarrollado para validar algoritmos de planificación y optimización. Por ello, en su diseño se trata de reducir al

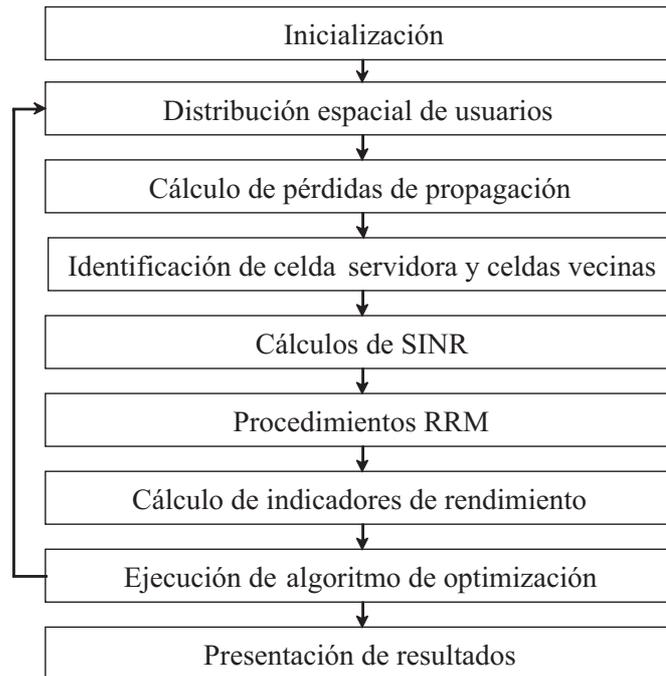


FIGURA A.1: Diagrama de flujo del simulador LTE del enlace descendente.

máximo la carga computacional de las simulaciones. En la mayoría de simuladores descritos en la bibliografía (p. ej., [133, 134]) se generan múltiples realizaciones del estado del sistema creando usuarios en posiciones aleatorias (distintas en cada realización) según una distribución espacial de tráfico. Posteriormente, el rendimiento de la red móvil se obtiene a partir de la agregación de medidas procedentes de cada realización. En el simulador desarrollado en esta Tesis, para conseguir estimas robustas del rendimiento de la red sin necesidad de aumentar el tiempo de simulación, se manejan todas las ubicaciones de manera simultánea por medio de una función de probabilidad. Se divide el escenario en una rejilla uniforme de puntos, que representan las posibles ubicaciones de los usuarios. Cada ubicación de usuario tiene una probabilidad de existir de acuerdo con una distribución espacial de tráfico. En estas ubicaciones, se calculan todos los parámetros de rendimiento del sistema una única vez, haciendo después un promediado espacial para obtener estadísticos de rendimiento globales. De esta forma, se evita la generación de múltiples realizaciones del sistema.

Para la estima del rendimiento, se calculan primero las pérdidas de propagación (*Propagation Losses*, PL) en el escenario. En dicho cálculo, se averigua el valor de PL entre cada posible ubicación de un usuario (UE) y cada estación base (eNB) del escenario. Esta información se organiza en una matriz tridimensional de valores

de PL, donde la dimensión  $z$  identifica al eNB y las dimensiones  $x$  e  $y$  establecen la posición del UE. A partir de esta información, se calcula el nivel de señal recibido en cada punto desde cada estación base incluyendo la información de potencia de transmisión de los eNB y las ganancias de antena en la dirección del UE. Conociendo la señal recibida por todas las eNB, es posible definir la celda servidora en cada punto del escenario, considerando como tal aquella que proporciona el máximo nivel. Conviene tener en cuenta que, por simplicidad, en las pérdidas de propagación, se incluye el desvanecimiento lento *log-normal* producido por los fenómenos de obstrucción de la línea de visión directa, pero no el desvanecimiento rápido causado por la propagación multicamino. Después, se realiza la identificación de celdas adyacentes ordenando las celdas vecinas de cada celda servidora por el valor medio de PL (es decir, distancia en términos eléctricos entre celdas).

Los siguientes pasos realizan los cálculos de SINR y la ejecución de funciones de gestión de recursos radio (*Radio Resource Management*, RRM), respectivamente. A continuación, se calculan los principales indicadores de rendimiento y se ejecuta el algoritmo de planificación u optimización evaluado. Finalmente, se presentan los resultados de simulación de forma ordenada.

Los siguientes apartados describen con mayor detalle estos procesos.

### A.1.1. Procedimientos de nivel físico

Para facilitar el tratamiento matemático del problema, se asume que:

- a) la reutilización de frecuencias en el sistema es 1 (es decir, todas las celdas usan todo el ancho de banda del sistema),
- b) la asignación de recursos (PRB) se hace a nivel de celda (es decir, no se aplican técnicas de coordinación de interferencia entre celdas), y
- c) a la hora de estimar la asignación de recursos, sólo hay un usuario activo por celda en cada momento, que tiene infinitos datos que transmitir (modelo de servicio *full buffer*).

La última asunción implica que todo el ancho de banda del enlace descendente (DL) puede asignarse por completo a ese único usuario y, por tanto, se puede alcanzar la tasa de transmisión de datos máxima del usuario.

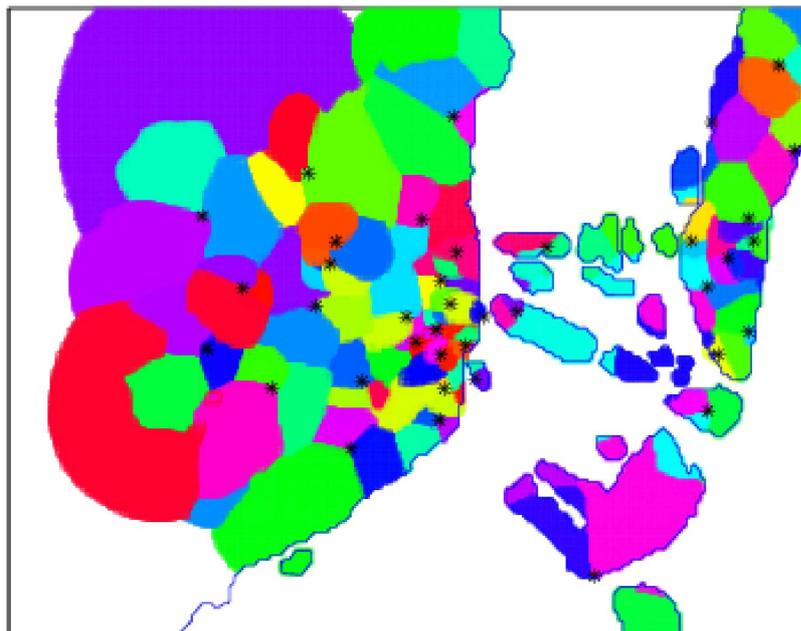


FIGURA A.2: Escenario real con límites costeros.

### Generación de tráfico

La generación de tráfico se configura a través de la definición del área global de servicio, la ocupación media de PRB por celda y la distribución espacial de usuarios dentro de cada celda.

El área global de servicio considera la topografía del terreno, excluyendo aquellas zonas que nunca van a ser ocupadas por ningún usuario (p. ej., mar, lago, ...). Para ello, se construye un polígono que define el área global de servicio a partir de datos geográficos del escenario importados al simulador mediante archivos en formato KML [112]. Dicho polígono limita con las zonas costeras. La Figura A.2 muestra un ejemplo de cómo las zonas de costa pueden delimitarse con esta funcionalidad. El simulador, en aras de buscar la máxima eficiencia de computación, excluye de los cálculos de propagación las zonas deshabitadas.

La probabilidad de que se genere tráfico de cada punto del escenario viene determinada por la ocupación media de PRB por celda y la distribución espacial de usuarios dentro de cada celda. Aunque el simulador permite realizar una distribución regular (uniforme) de los usuarios dentro de cada celda, en este trabajo se realiza una distribución espacial de los usuarios dentro de una celda no uniforme a partir de anillos de distancias, considerando la distribución de estadísticos temporales (TA) real de la red [113]. Del mismo modo, la tasa de ocupación media de

PRB puede fijarse como un parámetro o extraerse de medidas de la red real. A partir de la distribución espacial de los usuarios, se asigna a cada punto del área de servicio de la celda un porcentaje del tráfico total de la celda. Este porcentaje permite indicar la importancia de cada punto en el cálculo de los distintos indicadores de rendimiento de la celda. Cada punto tendrá un porcentaje del tráfico de su celda comprendido entre 0 (sin tráfico) y 1 (todo el tráfico de la celda se cursa en ese punto).

### Modelo de propagación

El simulador permite utilizar dos modelos de propagación distintos: la extensión COST-231 del modelo Okumura-Hata [115], como modelo más sencillo, y el modelo de propagación Winner II C2 [114], que obtiene resultados más realistas. Ambos modelos se utilizan para calcular la matriz de pérdidas de propagación.

- COST 231 - Okumura Hata

En la extensión COST-231 del modelo Okumura-Hata, las pérdidas de propagación (en dB) se calculan a partir de la ecuación

$$PL = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_{BS}) + a(h_{MS}) + [44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})] \log_{10}(d), \quad (\text{A.1})$$

donde  $f_c$  es la frecuencia central del ancho de banda de transmisión (o frecuencia de portadora) del enlace descendente en MHz,  $h_{BS}$  es la altura de la estación base en metros,  $a(h_{MS})$  es el factor de corrección de la altura de la antena del terminal móvil,  $h_{MS}$ , y  $d$  es la distancia entre la antena y el terminal en km. Como se observa en la ecuación, hay cuatro variables que modifican el modelo según su valor. De estas cuatro variables, la altura de la estación base y la distancia cambian en cada punto del escenario, mientras que la frecuencia y la altura del móvil se consideran constantes. Por tanto, el modelo de propagación en la ecuación (A.1) puede simplificarse como:

$$PL = cte_1 - 13.82 \log_{10}(h_{BS}) + [cte_2 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})] \log_{10}(d), \quad (\text{A.2})$$

siendo  $cte_2 = 44.9$  y  $cte_1 = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f_c) - a(h_{MS})$ .

El simulador incluye las funciones necesarias para ajustar las constantes del modelo  $cte_1$  y  $cte_2$  con medidas de nivel recibido de señales piloto (RSRP) recopiladas por los usuarios de una red real. A estas pérdidas de trayecto, se suman las pérdidas por desvanecimiento lento (o *slow fading*), que toman un valor aleatorio siguiendo una distribución *log-normal* de media nula y desviación estándar,  $\sigma_{SF} = 8$  dB.

A pesar de que este modelo es uno de los más utilizados en la bibliografía, principalmente por su sencillez a la hora de implementarlo y por su baja capacidad computacional, es un modelo que presenta varias limitaciones, tales como que la banda de frecuencia debe estar comprendida entre 1.5 GHz y 2 GHz o que las alturas de las estaciones base deben estar por encima de los edificios adyacentes a las estaciones base. Además, no presenta diferenciación entre usuarios en visión directa (LOS) o no (NLOS), ni condiciones de propagación especiales de la señal, como difracción o reflexión.

- Winner II C2

El modelo definido para escenarios macrocelulares urbanos (Winner II C2) diferencia las pérdidas según los usuarios estén en línea de visión directa con la estación base (LOS) o no (NLOS). De esta forma, se tienen en cuenta las pérdidas producidas por obstáculos, normalmente edificios, entre la estación base y el UE. A su vez, se diferencia entre los usuarios LOS cercanos y lejanos. En el simulador, la clasificación de las ubicaciones LOS/NLOS se lleva a cabo a partir de datos de geolocalización de los edificios en el escenario. Este modelo también tiene en cuenta la difracción de la señal.

Las pérdidas de propagación (en dB) se calculan con la expresión

$$PL = A \log_{10}(d) + B + C \log_{10}\left(\frac{f_c}{5}\right) + X, \quad (\text{A.3})$$

Tipo de usuario	Pérdidas de propagación [dB]	$\sigma_{SF}$ [dB]	Condiciones
LOS cercano	A=26, B=39, C=20	4	$10 < d < d_{BP}$
LOS lejano	$PL = 40 \log_{10}(d) + 13.47 - 14 \log_{10}(h_{BS}) - 14 \log_{10}(h_{MS}) + 6 \log_{10}(\frac{f_c}{5})$	6	$d_{BP} < d < 5 \text{ km}$
NLOS	$PL = (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d) + 34.46 + 5.83 \log_{10}(h_{BS}) + 23 \log_{10}(\frac{f_c}{5})$	8	

TABLA A.1: Parámetros del modelo de propagación Winner II C2

donde  $d$  es la distancia entre la estación base y el UE en metros,  $f_c$  es la frecuencia central del ancho de banda de transmisión (o frecuencia de portadora) del enlace descendente en GHz, y las constantes A, B, C y D dependen del entorno de propagación. La Tabla A.1 muestra los valores de esos parámetros para los distintos tipos de usuarios considerados en el modelo C2, donde  $d_{BP}$  es la distancia de ruptura que diferencia entre usuarios LOS cercanos y lejanos, que se obtiene a partir de la ecuación

$$d_{BP} = 4 h_{BS} h_{MS} \frac{f_c}{c}, \quad (\text{A.4})$$

donde  $c$  es la velocidad de propagación de la luz en espacio abierto ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )

La constante  $X$  en (A.3) es el término que permite ajustar en el simulador las pérdidas de propagación de los usuarios a partir de estadísticas de la red. Dicha constante puede definirse de forma distinta para cada tipo de usuario (LOS cercano/lejano y NLOS).

Al igual que en el modelo de propagación COST 231, a las pérdidas de trayecto calculadas con el modelo Winner II C2 se le suman las pérdidas por desvanecimiento lento, que toman un valor aleatorio siguiendo una distribución *log-normal* de media nula y desviación estándar  $\sigma_{SF}$  para cada tipo de usuario definida en la Tabla A.1.

- Parámetros de la antena

El modelo de antena incluye un diagrama de captación en el plano horizontal y vertical [135]. La ganancia relativa de la antena hacia cada ubicación de usuario en el escenario se calcula teniendo en cuenta las alturas de la estación base y estación móvil y la posición relativa entre ambas.

A partir de los términos anteriores, se calcula una matriz de propagación, que refleja las pérdidas de propagación desde cada eNB a cada punto del escenario, agregando la pérdida de trayecto, la directividad de antena y el desvanecimiento lento en cada punto del escenario.

### A.1.2. Procedimientos de nivel de enlace

En esta sección se describen los procesos de adaptación del enlace descendente y de asignación de PRB incluidos en el simulador.

#### Modulación y codificación adaptativa

El proceso de adaptación del enlace llevado a cabo por la estación base selecciona el esquema de modulación y codificación que mejor se adapta a las condiciones instantáneas del canal entre el usuario y el eNB. En el simulador, se modela el esquema de modulación adaptativa mediante la fórmula truncada de *Shannon* [72]. Así, la eficiencia del enlace radio (*Radio-Link Efficiency*, RLE), medida en kbps/PRB, se obtiene directamente a partir del valor de SINR en cada punto según la expresión

$$RLE(k) = \begin{cases} 0 & \text{si } \gamma(k) < \gamma_{\text{mín}} , \\ B_{PRB} \alpha_{imp} \log_2(1 + \gamma(k)) & \text{si } \gamma_{\text{mín}} \leq \gamma(k) \leq \gamma_{\text{máx}} , \\ RLE_{\text{máx}} & \text{si } \gamma_{\text{máx}} < \gamma(k) , \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

donde  $RLE_{\text{máx}}$  es la máxima eficiencia del enlace radio que se puede obtener,  $\gamma_{\text{máx}}$  y  $\gamma_{\text{mín}}$  son los valores de SINR (en unidades lineales) correspondientes a  $RLE_{\text{máx}}$  y la eficiencia del enlace radio nula, respectivamente,  $B_{PRB}$  es el ancho de banda por PRB y  $\alpha_{imp}$  es un factor de corrección de pérdidas de implementación. En esta Tesis se han ajustado de forma empírica los valores de la ecuación tal que  $RLE_{\text{máx}} = 792$  kbps/PRB,  $\gamma_{\text{máx}} = 22$  dB,  $\gamma_{\text{mín}} = -10$  dB,  $B_{PRB} = 180$  kHz/PRB y  $\alpha_{imp} = 0.6$ .

Para calcular la eficiencia espectral alcanzada por un usuario  $k$ , una vez calculado el SINR en su ubicación, basta multiplicar el RLE del usuario  $k$  por el

porcentaje de PRB asignados al usuario  $k$ . El procedimiento que decide el número de PRB que se asigna a cada usuario se explica a continuación.

### Asignación de PRB

El proceso de asignación de PRB se realiza mediante un planificador dinámico de recursos en el eNB, que asigna recursos a los usuarios de forma que se maximice el rendimiento del sistema en términos de QoS y tasa de datos. Cada fabricante diseña e implementa su propio planificador de recursos. En este simulador, el procedimiento seguido por el planificador diseñado tiene varios pasos.

Como punto inicial, se parte de la configuración de la carga de la celda, establecida mediante el porcentaje de PRB usados con respecto al total disponible. Este dato puede extraerse directamente de contadores del sistema de gestión de red de la red real.

El siguiente paso consiste en el reparto de la carga de la celda, previamente definida, entre los distintos puntos que pertenecen a su área de servicio. Para ello, a cada punto se le asigna un porcentaje de la carga de la celda en función de la distribución espacial del tráfico de la celda en la que se encuentra, también conocida, y la eficiencia espectral del enlace descendente. A partir de la distribución de carga y eficiencia espectral en cada punto, es posible estimar el volumen de tráfico cursado por hora en cada punto del escenario.

Cuando se modifican los parámetros de la red, como consecuencia de los procesos de replanificación y optimización, se recalcula el área de servicio de cada celda del escenario. Después se actualizan los valores de carga de celda, teniendo en cuenta el tráfico cursado de cada punto y los nuevos valores de eficiencia espectral.

#### A.1.3. Procedimientos de nivel de red

En una red real, la capa de nivel de red implementa diferentes procedimientos de gestión de recursos radio que garantizan la continuidad de la conexión cuando el usuario se desplaza, como son el traspaso, el control de admisión y el control de congestión. Dada la naturaleza estática del simulador, en él sólo se incluyen el control de admisión (*Admission Control*, AC) y la detección automática de vecinas (*Automatic Neighbor Relation*, ANR).

## Control de admisión

El primer paso para iniciar una conexión por parte de un UE es decidir cuál es su celda servidora. En la herramienta de simulación, esta decisión se realiza exclusivamente en función del nivel de RSRP. Para cada usuario, la conexión se realiza con aquella celda de la que recibe mayor nivel de RSRP. Los usuarios que reciben un valor de RSRP máximo por debajo del umbral establecido para el traspaso a otra tecnología (*inter-Radio Access Technology*, iRAT), no se conectan a ninguna celda LTE. La celda servidora seleccionada debe, por tanto, cumplir que

$$RSRP(i) \geq RSRP_{iRAT}, \quad (\text{A.6})$$

donde  $RSRP(i)$  es el nivel de RSRP de la celda  $i$  recibido por el UE y  $RSRP_{iRAT}$  es el umbral de iRAT. Aunque dicho umbral puede ser distinto para cada celda, en la práctica, los operadores fijan el mismo valor para todas las celdas por simplicidad.

El simulador permite identificar el conjunto de puntos con un nivel de señal suficiente de su celda servidora, y mantener este conjunto de puntos inalterado en las siguientes iteraciones de simulación. Esta funcionalidad es importante si se desea mantener el área geográfica en la que se evalúa el rendimiento de la red, de forma que no se incluyan/excluyan puntos cuando se modifiquen las condiciones de cobertura de la red como resultado de los algoritmos de optimización. Forzando que las diferentes configuraciones de red se evalúen sobre la misma área geográfica, se facilita la comparación entre configuraciones.

## Detección automática de vecinas interferentes

En una red LTE real, la función ANR [136] libera al operador de la costosa tarea de definir manualmente las relaciones de vecindad entre celdas. En el simulador, se ha incluido una función básica que define de forma automática la lista de celdas vecinas interferentes para cada celda del escenario. Esta funcionalidad permite reducir la carga computacional del cálculo de los niveles de interferencia.

La definición de celdas vecinas interferentes se basa en el cálculo del nivel medio de señal recibida de cualquier celda vecina  $j$  en los puntos del área de servicio de la celda bajo estudio  $i$ ,  $P_{RX}(j, i)$ , expresado como

$$\overline{P_{RX}}(j, i) = \sum_{(x,y) \in A(i)} p_u(x, y) P_{RX}(j, x, y) l(j), \quad (\text{A.7})$$

donde  $A(i)$  son los puntos servidos por la celda  $i$ ,  $p_u(x, y)$  es la probabilidad de tráfico del punto  $(x, y)$ ,  $P_{RX}(j, x, y)$  es el nivel de señal recibida por el punto  $(x, y)$  desde la celda vecina  $j$  (en unidades logarítmicas) y  $l(j)$  es el ratio de carga de la celda vecina  $j$  (adimensional). La tasa de ocupación de la celda vecina se utiliza en la expresión para reflejar el hecho de celdas más cargadas tienden a interferir más que celdas infrautilizadas para el mismo nivel de potencia piloto. Una vez calculado el valor de  $\overline{P_{RX}}(j, i)$  para todas las celdas  $j \neq i$ , se seleccionan como vecinas interferentes de  $i$  las  $N_{vec}$  primeras celdas adyacentes  $j$  con mayor valor de  $\overline{P_{RX}}(j, i)$ . En esta Tesis,  $N_{vec} = 20$ .

#### A.1.4. Generación de archivos de trazas

Los algoritmos presentados en esta Tesis utilizan como entrada indicadores basados en información existente de las trazas de conexión. Por ello, el simulador también incluye la generación y el procesado de las trazas. Con este fin, el simulador genera distribuciones de RSRP y TA para cada configuración de red mediante la creación de matrices que almacenan los niveles de potencia recibidos en cada punto desde cada estación base, así como la distancia existente entre cada punto y su estación base servidora.

A partir de la distribución de RSRP, el simulador genera histogramas de frecuencia relativa de RSRP y funciones de distribución (CDF), que sirven para mostrar las condiciones de propagación de cada una de las celdas. Con esta información, pueden ajustarse las constantes de los modelos de propagación hasta obtener resultados similares a los aportados en las medidas reales de RSRP.

## A.2. Ajuste del simulador

En esta sección se valida la herramienta de simulación para el canal descendente de datos de LTE. En primer lugar, se describen los parámetros de simulación del escenario de pruebas. A continuación, se realiza el ajuste de los dos modelos de

Parámetro	Valor
Número de emplazamientos	44
Número de celdas	129
Dirección de enlace	DL
Frecuencia de portadora [MHz]	734
Ancho de banda [MHz]	10
Número de PRB	50
Reutilización de frecuencias	1
Modelos de propagación	COST-231, Winner II C2
Potencia de transmisión DL del eNB [dBm]	[46.5-47.4]
Directividad	Trisectorial
Ángulo de inclinación de antena [°]	[0-13]
Ancho de haz a mitad de potencia de antena [°]	65
Ganancia de antena máxima [dB]	15
Generación de tráfico	Basado en medidas de TA
Tasa de utilización de PRB [%]	[5-70]

TABLA A.2: Parámetros de simulación en escenario urbano

propagación del simulador comparando los resultados de simulación con estadísticos de la red real, y, por último, se presenta una comparación de los resultados obtenidos con el algoritmo de ajuste del ángulo de inclinación de antenas propuesto en el Capítulo 4, para los dos modelos de propagación ajustados.

### A.2.1. Escenario de pruebas

El escenario utilizado para mostrar el ajuste de los modelos de propagación es el escenario urbano limitado por interferencia presentado en el Capítulo 4. Para poder realizar los ajustes de las constantes de propagación, se dispone de medidas reales de RSRP recopiladas por los usuarios en ese escenario, tomadas del sistema de gestión de red. La Tabla A.2 presenta la configuración de parámetros existente en la red real.

### A.2.2. Ajuste del modelo de propagación

En este apartado se describe el proceso de ajuste de los modelos de propagación incluidos en el simulador, que son la extensión COST 231 de Okumura-Hata y Winner II C2. En ambos casos, el ajuste se realiza comparando la distribución de RSRP global del escenario generada por el simulador con la tomada de la red real.

#### COST 231 - Okumura Hata

Según (A.2),  $cte_1$  y  $cte_2$  son las constantes que se modifican para ajustar el modelo. El proceso de ajuste busca minimizar el error cuadrático medio entre los valores del histograma de frecuencia relativa de RSRP del simulador y los obtenidos de la red real. Para ello, el histograma del simulador se configura con los mismos intervalos de valores de RSRP que en la red real. De esta forma, la cifra de mérito utilizada para medir la bondad del ajuste es

$$FoM = \sum_{\forall i} \left| D\widehat{F}R(i) - DFR(i) \right|, \quad (\text{A.8})$$

donde  $D\widehat{F}R(i)$  es el valor de la distribución de frecuencia relativa obtenida para el intervalo  $i$ , mientras que  $DFR(i)$  es el valor obtenido de la red real para el intervalo  $i$ . Una vez completado el proceso de ajuste, el valor de  $cte_1$  cambia de 154.3 a 157.5 dB (+3.2 dB) y  $cte_2$  pasa de 44.9 a 47.6 dB/m (+2.7 dB/m).

La Figura A.3 representa las CDF obtenidas antes y después del ajuste, comparadas con la proveniente de los estadísticos de RSRP reales. En la figura se observa cómo, tras el ajuste, las CDF del simulador y la red real son bastante similares. Concretamente, la  $FoM$  pasa de 0.15 a 0.13. Un análisis más exhaustivo de la gráfica muestra que el histograma sin ajuste contiene valores de RSRP mayores a los reales debido a que el modelo COST 231 no considera usuarios NLOS, que habitualmente experimentan menores niveles de RSRP que usuarios LOS. El ajuste del modelo, por tanto, tiende a compensar dicha carencia.

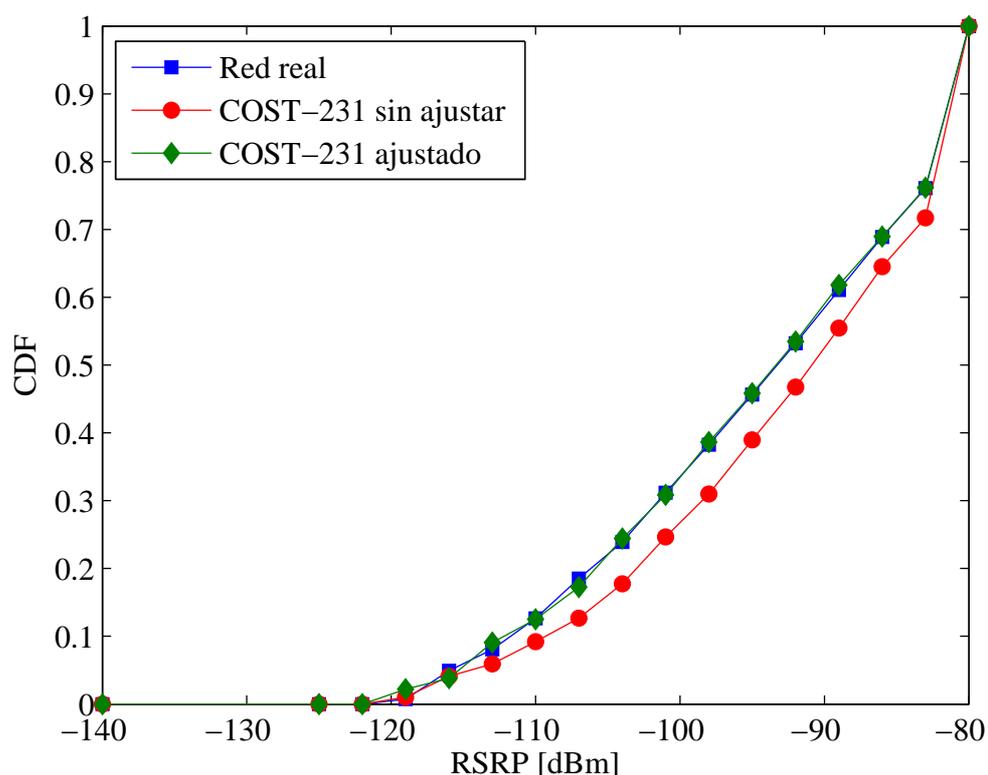


FIGURA A.3: Distribución de RSRP con modelo COST 231.

## Winner II C2

El proceso de ajuste del modelo Winner II C2 implementado en el simulador es análogo al del modelo COST 231. En este caso, sin embargo, el ajuste del modelo se realiza modificando el valor del término  $X$  presentado en la ecuación (A.3). De hecho, esta variable se introduce en el modelo para ajustar las pérdidas de propagación a partir de medidas reales, y su valor por defecto es  $X = 0$  dB. Puesto que el modelo Winner II C2 permite diferenciar entre usuarios LOS y NLOS, se realiza un ajuste de  $X$  para cada uno de ellos. Partiendo del valor  $X = 0$  dB para todos los usuarios, el proceso de ajuste concluye con el valor  $X = 0$  dB para los usuarios LOS y  $X = 14$  dB (+14 dB) para los usuarios NLOS.

La Figura A.4 compara la CDF de la red real con la del modelo antes y después del ajuste. Al igual que ocurría con el modelo COST 231, la CDF del modelo Winner II C2 hace una estimación inicial de niveles RSRP superiores a los reales, consiguiendo una  $FoM$  de 0.59. Tras el ajuste, dicho error baja a 0.22. Este término de compensación de pérdidas de 14 dB puede deberse a las pérdidas de penetración en edificios, que no se consideran en el modelo original.

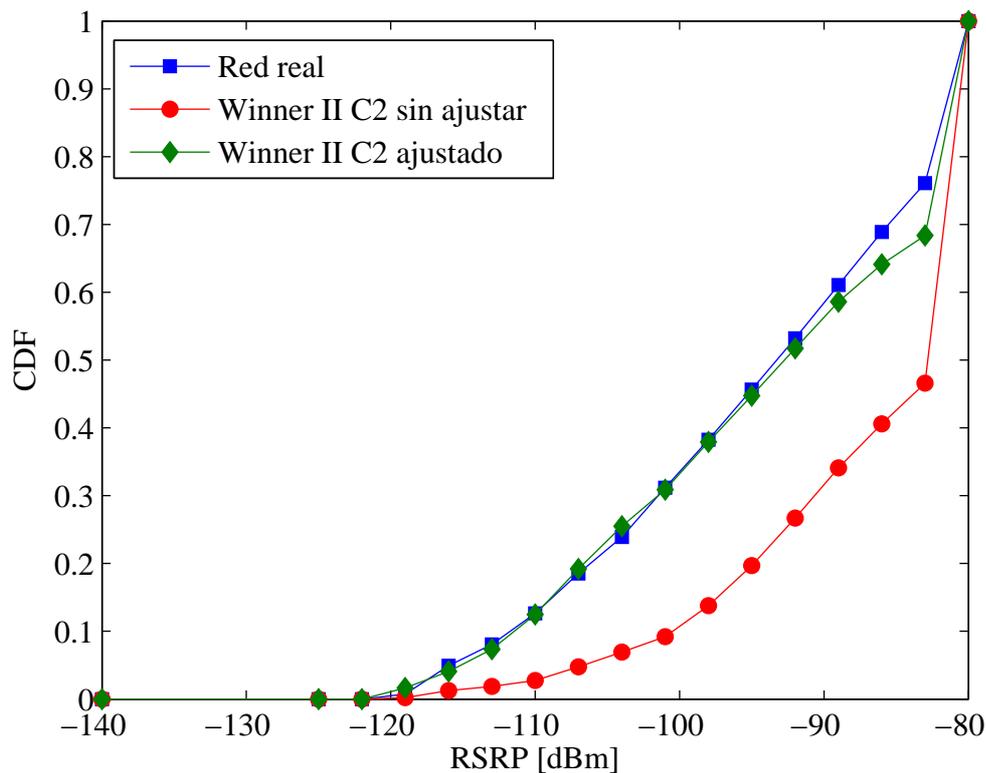


FIGURA A.4: Distribución de RSRP con modelo Winner II C2.

### A.2.3. Rendimiento del algoritmo de autoajuste del ángulo de inclinación

En esta sección se evalúa el impacto del modelo de propagación en el rendimiento del algoritmo de optimización del ángulo de inclinación de las antenas, propuesto en el Capítulo 4. Para ello, se compara el rendimiento de los planes de inclinación generados por el algoritmo con ambos modelos de propagación ajustados, en el escenario limitado por interferencia. Con este fin, se repite el experimento A2 presentado en la Sección 4.4. Por brevedad, en esta ocasión sólo se representan los resultados de la configuración inicial del operador (OS) y el algoritmo TF-RET.

La Figura A.5 representa los resultados obtenidos, mostrando los valores globales de SINR de borde de celda y de SINR medio en los ejes x e y, respectivamente. El método de planificación OS se presenta con un simple punto en ambos casos, mientras que el método TF-RET se representa en ambos casos mediante una curva de múltiples puntos que refleja el rendimiento intermedio durante las sucesivas iteraciones del algoritmo. Para mayor claridad, el último valor de los métodos TF-RET se resalta con un indicador relleno. Como complemento, la Tabla A.3 compara

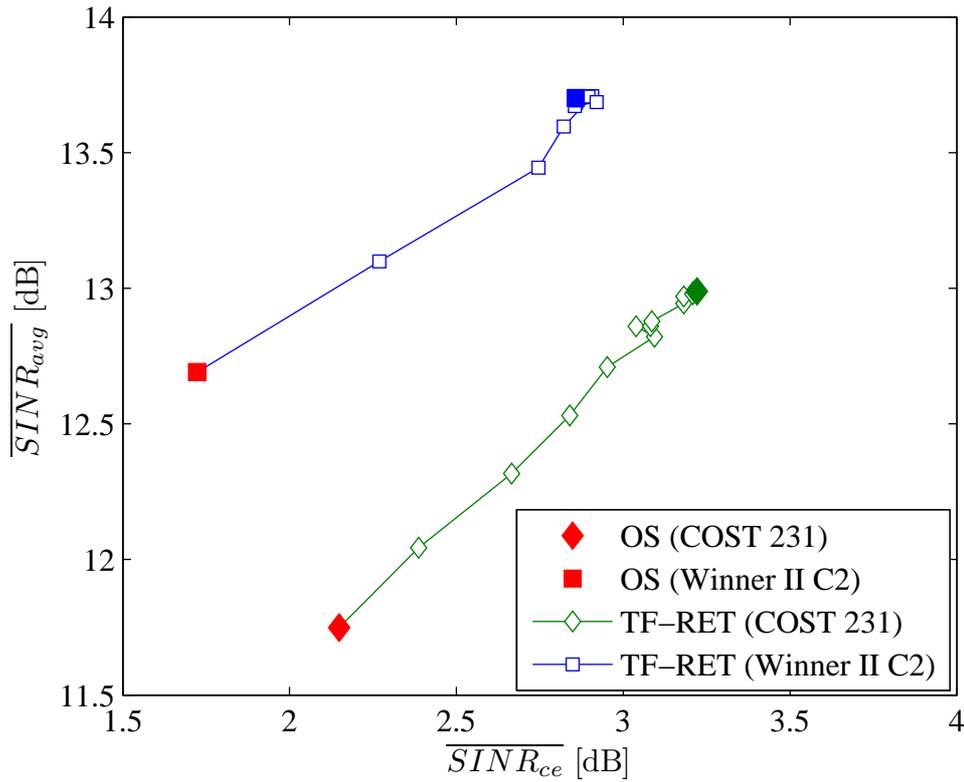


FIGURA A.5: Impacto del modelo de propagación en el algoritmo de inclinación de antenas.

	$\overline{SINR}_{ave}$ [dB]	$\overline{SINR}_{ce}$ [dB]
OS (COST 231)	11.75	2.15
TF-RET (COST 231)	12.99	3.22
OS (Winner II C2)	12.69	1.72
TF-RET (Winner II C2)	13.70	2.86

TABLA A.3: Rendimiento de los métodos con distintos modelos de propagación

el rendimiento del método TF-RET al final del proceso de optimización con ambos modelos de propagación frente al rendimiento de la solución del operador OS.

La Figura A.5 muestra cómo el algoritmo de autoajuste TF-RET mejora ambos indicadores  $\overline{SINR}_{ave}$  y  $\overline{SINR}_{ce}$ , respecto a la configuración inicial OS, con los dos modelos de propagación. Específicamente,  $\overline{SINR}_{ave}$  mejora en 1.24 y 1.01 dB con el modelo COST 231 y Winner II C2, respectivamente, y  $\overline{SINR}_{ce}$  mejora en 1.07 y 1.14 dB para esos mismos modelos. Estos resultados confirman la robustez del algoritmo TF-RET frente a cambios en las condiciones de propagación.

# Bibliografía

- [1] 3GPP TR 25.913, “Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN),” Abril 2013, Version 7.3.0.
- [2] S. Sesia, I. Toufik, y M. Baker, *LTE, the UMTS long term evolution: from theory to practice*. New York, NY, USA: Wiley, 2009.
- [3] 3GPP TS 32.500, “Telecommunication management; Self-Organizing Networks (SON); Concepts and requirements,” Diciembre 2009, Version 9.0.0.
- [4] J. Ramiro y K. Hamied, *Self-Organizing Networks: Self-Planning, Self-Optimization and Self-Healing for GSM, UMTS and LTE*. John Wiley and Sons, 2011.
- [5] NGMN, “Next Generation Mobile Networks Recommendation on SON and O&M Requirements,” *Req. Spec. v1*, vol. 23, Diciembre 2008.
- [6] F. Athley y M. Johansson, “Impact of Electrical and Mechanical Antenna Tilt on LTE Downlink System Performance,” en *IEEE 71st Vehicular Technology Conference (VTC)*, Mayo 2010, pp. 1–5.
- [7] S. Hämmäläinen, H. Sanneck, y C. Sartori, *LTE Self-Organising Networks (SON)*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- [8] J.F. Whitehead, “Signal-level-based dynamic power control for co-channel interference management,” en *IEEE 43rd Vehicular Technology Conference (VTC)*, Mayo 1993, pp. 499–502.
- [9] A. Simonsson y A. Furuskar, “Uplink Power Control in LTE - Overview and Performance, Subtitle: Principles and Benefits of Utilizing rather than Compensating for SINR Variations,” en *IEEE 68th Vehicular Technology Conference (VTC)*, Septiembre 2008, pp. 1–5.

- [10] P. Zikopoulos y C. Eaton, *Understanding Big Data: Analytics for Enterprise Class Hadoop and Streaming Data*. McGraw-Hill Osborne Media, 2011.
- [11] N. Baldo, L. Giupponi, y J. Mangues-Bafalluy, “Big Data Empowered Self Organized Networks,” en *20th European Wireless Conference*, Mayo 2014, pp. 1–8.
- [12] D. C. Luckham, *The Power of Events: An Introduction to Complex Event Processing in Distributed Enterprise System*. Addison-Wesley, 2002.
- [13] 3G Americas, “The benefits of SON in LTE: Self-optimizing and self-organizing networks,” Reporte técnico, Diciembre 2009.
- [14] F. Gunnarsson, M. Johansson, A. Furuskar, M. Lundevall, A. Simonsson, C. Tidestav, y M. Blomgren, “Downtilted base station antennas - A simulation model proposal and impact on HSPA and LTE performance,” en *IEEE 68th Vehicular Technology Conference (VTC)*, Septiembre 2008, pp. 1–5.
- [15] M. Garcia-Lozano y S. Ruiz, “Effects of downtilting on RRM parameters,” en *15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, vol. 3, Septiembre 2004, pp. 2166–2170.
- [16] C. U. Saraydar y A. Yener, “Adaptive cell sectorization for CDMA systems,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 19, no. 6, pp. 1041–1051, Junio 2001.
- [17] A. Awada, B. Wegmann, I. Viering, y A. Klein, “Optimizing the radio network parameters of the Long Term Evolution system using Taguchi’s method,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 8, pp. 3825–3839, Octubre 2011.
- [18] V. Wille, M. Toril, y R. Barco, “Impact of antenna downtilting on network performance in GERAN systems,” *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 7, pp. 598–600, Julio 2005.
- [19] J. Niemelä, T. Isotalo, y J. Lempiäinen, “Optimum Antenna Downtilt Angles for Macrocellular WCDMA Network,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, no. 5, pp. 816–827, Diciembre 2005.
- [20] O. Yilmaz, S. Hämmäläinen, y J. Hämmäläinen, “Comparison of Remote Electrical and Mechanical Antenna Downtilt Performance for 3GPP LTE,” en

- IEEE 70th Vehicular Technology Conference (VTC)*, Septiembre 2009, pp. 1–5.
- [21] 3GPP TS 32.423, “Subscriber and equipment trace: Trace data definition and management,” Marzo 2014, Version 11.7.0.
- [22] 3GPP TS 32.111-1, “Telecommunication management; Fault Management; Part 1: 3G fault management requirements,” Abril 2017, Version 14.0.0.
- [23] 3GPP TS 32.240, “Telecommunication management; Charging management; Charging architecture and principles,” Junio 2005, Version 6.2.0.
- [24] G. Gómez, J. Lorca, R. García, y Q. Pérez, “Towards a QoE-driven resource control in LTE and LTE-A networks,” *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2013, 2013.
- [25] D. Johnson, “NOC Internal Integrated Trouble Ticket System Functional Specification Wishlist (NOC TT REQUIREMENTS),” Reporte técnico RFC 1297, Enero 1992.
- [26] A. Díaz, P. Merino, y F. J. Rivas, “Customer-centric measurements on mobile phones,” en *IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE)*, Abril 2008, pp. 1–4.
- [27] G. Bain y J. Dia, “SLA Management Handbook - Volume 4: Enterprise Perspective,” en *TM Forum*, Octubre 2004.
- [28] S. Baraković y L. Skorin-Kapov, “Survey and challenges of QoE management issues in wireless networks,” *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2013, 2013.
- [29] 3GPP TS 25.331, “Radio Resource Control (RRC); Protocol specification,” Enero 2016, Version 13.2.0.
- [30] 3GPP TS 36.413, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 Application Protocol (S1AP),” Enero 2016, Version 13.1.0.
- [31] 3GPP TS 36.423, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 Application Protocol (X2AP),” Enero 2016, Version 13.2.0.
- [32] 3GPP TS 32.421, “Subscriber and equipment trace: Trace concepts and requirements,” Abril 2013, Version 11.6.0.

- [33] D. Zimmer y R. Unland, “On the Semantics of Complex Events in Active Database Management Systems,” en *15th International Conference on Data Engineering*, Marzo 1999, pp. 392–399.
- [34] D. Robins, “Complex Event Processing,” en *Second International Workshop on Education Technology and Computer Science*, Febrero 2010.
- [35] D. C. Luckham, *Event Processing for Business: Organizing the Real-Time Enterprise*. John Wiley & Sons, 2011.
- [36] L. J. Fülöp, G. Tóth, R. Rácz, J. Pánczél, T. Gergely, A. Beszédes, y L. Farkas, “Survey on Complex Event Processing and Predictive Analytics,” en *Fifth Balkan Conference in Informatics*, Julio 2010, pp. 26–31.
- [37] O. de Carvalho, E. Roloff, y P. Navaux, “A Survey of the State-of-the-art in Event Processing,” en *11th Workshop on Parallel and Distributed Processing (WSPPD)*, 2013.
- [38] D. J. Abadi y otros., “The Design of the Borealis Stream Processing Engine,” en *Conference on Innovative Data Systems Research (CIDR)*, vol. 5, Enero 2005, pp. 277–289.
- [39] D. J. Abadi y otros., “Aurora: a new model and architecture for data stream management,” en *The VLDB Journal - The International Journal on Very Large Data Bases*, vol. 12, no. 2, Agosto 2003, pp. 277–289.
- [40] S. Zdonik, M. Stonebraker, M. Cherniack, U. Cetintemel, M. Balazinska, y H. Balakrishnan, “The Aurora and Medusa Projects,” en *IEEE Data Engineering Bulletin*, vol. 26, no. 1, Marzo 2003, pp. 3–10.
- [41] L. Brenna, A. Demers, J. Gehrke, M. Hong, J. Ossher, B. Panda, M. Riedewald, M. Thatte, y W. White, “Cayuga: A High-Performance Event Processing Engine,” en *ACM International Conference on Management of Data (SIGMOD)*, Junio 2007, pp. 1100–1102.
- [42] I. Astrova, A. Koschel, y M. Schaaf, “Automatic Scaling of Complex-Event Processing Applications in Eucalyptus,” en *IEEE 15th International Conference on Computational Science and Engineering (CSE)*, Diciembre 2012, pp. 22–29.

- [43] A. Adi, D. Botzer, G. Nechushtai, y G. Sharon, “Complex Event Processing for Financial Services,” en *IEEE Services Computing Workshops (SCW)*, Septiembre 2006, pp. 7–12.
- [44] T. Greiner, W. Düster, F. Pouatcha, R. von Ammon, H. M. Brandl, y D. Guschakowski, “Business Activity Monitoring of norisbank Taking the Example of the Application easyCredit and the Future Adoption of Complex Event Processing (CEP),” en *4th ACM International Symposium on Principles and Practice of Programming in Java*, Agosto 2006, pp. 237–242.
- [45] C. Janiesch, M. Matzner, y O. Müller, “Beyond process monitoring: a proof-of-concept of event-driven business activity management,” *Business Process Management Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 625–643, 2012.
- [46] N. P. Schultz-Moller, M. Migliavacca, y P. Pietzuch, “Distributed Complex Event Processing with Query Rewriting,” en *Third ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems (DBS)*, no. 4, Julio 2009.
- [47] L. Aniello, G. A. Di Luna, G. Lodi, y R. Baldoni, “A Collaborative Event Processing System for Protection of Critical Infrastructures from Cyber Attacks,” en *International Conference on Computer Safety, Reliability and Security*, vol. 6894. Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 310–323.
- [48] D. Wang, E. A. Rundensteiner, H. Wang, y R. T. Ellison III, “Active Complex Event Processing: Applications in Real-Time Health Care,” *VLDB Endowment*, vol. 3, no. 1-2, pp. 1545–1548, Septiembre 2010.
- [49] I. Kellner y L. Fiege, “Viewpoints in Complex Event Processing: Industrial Experience Report,” en *Third ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems (DEBS)*, no. 9, Julio 2009.
- [50] Y. Chen, H. Chen, A. Gorkhali, Y. Lu, Y. Ma, y L. Li, “Big data analytics and big data science: a survey,” *Journal of Management Analytics*, vol. 3, no. 1, pp. 1–42, 2016.
- [51] C. Zang y Y. Fan, “Complex event processing in enterprise information systems based on RFID,” *Enterprise Information Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 3–23, Febrero 2007.

- [52] W. Hu, W. Ye, Y. Huang, y S. Zhang, “Complex Event Processing in RFID Middleware: A Three Layer Perspective,” en *IEEE Third International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology (ICCIT)*, vol. 1, Noviembre 2008, pp. 1121–1125.
- [53] J. Dunkel, “On Complex Event Processing for Sensor Networks,” en *International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS)*, Marzo 2009, pp. 1–6.
- [54] R. Bhargavi, V. Vaidehi, P. Bhuvaneshwari, P. Balamurali, y M. Chandra, “Complex Event Processing for Object Tracking and Intrusion Detection in Wireless Sensor Networks,” en *11th International Conference on Control Automation Robotics and Vision (ICARCV)*, Diciembre 2010, pp. 848–853.
- [55] L. Yuan, D. Xu, G. Ge, y M. Zhu, “Study on Distributed Complex Event Processing in Internet of Things based on Query Plan,” en *IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, Jun. 2015, pp. 666 – 670.
- [56] Y. Taher, M. Parkin, M. P. Papazoglou, y W. J. van den Heuvel, “Adaptation of Web Service Interactions using Complex Event Processing Patterns,” *Service-Oriented Computing*, vol. 7084, pp. 601–609, 2011.
- [57] P. Gustas, P. Magnusson, J. Oom, y N. Storm, “Real-time performance monitoring and optimization of cellular systems,” *Ericsson Review*, vol. 79, no. 1, pp. 4–13, 2002.
- [58] Ericsson, “Big Data Analytics,” en *White Paper*, Agosto 2013.
- [59] A. Imran, A. Zoha, y A. Abu-Dayya, “Challenges in 5G: how to empower SON with big data for enabling 5G,” *IEEE Network*, vol. 28, no. 6, pp. 27–33, 2014.
- [60] I. H. Witten, E. Frank, M. A. Hall, y C. J. Pal, *Data Mining: Practical machine learning tools and techniques*. Amsterdam: Morgan Kaufmann, 2011.
- [61] A. Iyer, L. Li, y I. Stoica, “CellIQ: real-time cellular network analytics at scale,” en *12th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI)*, Mayo 2015, pp. 309–322.

- [62] E. J. Khatib, R. Barco, P. Munoz, I. de la Bandera, y I. Serrano, “Self-healing in mobile networks with big data,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 1, pp. 114–120, 2016.
- [63] A. Gómez-Andrades, R. Barco, I. Serrano, P. Delgado, P. Caro-Oliver, y P. Muñoz, “Automatic Root Cause Analysis based on traces for LTE Self-Organizing Networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 3, pp. 20–28, Junio 2016.
- [64] M. Eckert, F. Bry, S. Brodt, O. Poppe, y S. Hausmann, “A CEP babelfish: languages for Complex Event Processing and querying surveyed,” en *Reasoning in Event-Based Distributed Systems*. Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 47–70.
- [65] <http://www.complexevents.com/2015/05/10/cep-tools-market-survey-1q-2015/>, último acceso en Junio 2017.
- [66] <http://www.espertech.com/esper/tutorial.php>, último acceso en Junio 2017.
- [67] <http://www.marben-products.com/asn.1/services/decoder-asn1.html>, último acceso en Junio 2017.
- [68] J. M. Ruiz-Avilés, M. Toril, S. Luna-Ramírez, V. Buenestado, y M. A. Regueira, “Analysis of Limitations of Mobility Load Balancing in a Live LTE System,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 417–420, Agosto 2015.
- [69] P. Brooks y B. Hestnes, “User measures of quality of experience: why being objective and quantitative is important,” *IEEE Network*, vol. 24, no. 2, pp. 8–13, Marzo 2010.
- [70] 3GPP TS 32.450, “Key Performance Indicators (KPI) for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN): Definitions,” Junio 2010, Version 9.1.0.
- [71] V. Wille, M. Toril, y S. Luna, “Estimating pole capacity in a live HSDPA network,” *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 16, pp. 1260–1263, Junio 2013.
- [72] 3GPP TR 36.942, “Radio Frequency (RF) System Scenarios,” Julio 2009, Version 8.2.0.

- [73] H. Holma y A. Toskala, *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced*. Wiley, 2011.
- [74] M. Wylie-Green y T. Svensson, "Throughput, capacity, handover and latency performance in a 3GPP LTE FDD field trial," *IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1–6, Diciembre 2010.
- [75] K. Aho, O. Alanen, y J. Kaikkonen, "CQI reporting imperfections and their consequences in LTE networks," en *10th Int. Conference on Networks (ICN)*, Enero 2011, pp. 241–245.
- [76] A. Durán, M. Toril, F. Ruiz, y A. Mendo, "Self-Optimization Algorithm for Outer Loop Link Adaptation in LTE," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 11, pp. 2005–2008, Noviembre 2015.
- [77] G. Wilson, "Electrical downtilt through beam-steering versus mechanical downtilt," en *IEEE 42nd Vehicular Technology Conference*, vol. 1, Mayo 1992, pp. 1–4.
- [78] D. Lee y C. Xu, "Mechanical antenna downtilt and its impact on system design," en *IEEE 47th Vehicular Technology Conference*, vol. 2, Mayo 1997, pp. 447–451.
- [79] J. Lempiäinen y M. Manninen, *Radio Interface System Planning for GSM/GPRS/UMTS*. New York, NY, USA: Springer, 2001.
- [80] I. Forkel, A. Kemper, R. Pabst, y R. Hermans, "The effect of electrical and mechanical antenna down-tilting in UMTS networks," en *3rd International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*, Mayo 2002, pp. 86–90.
- [81] J. Niemelä, T. Isotalo, y J. Lempiäinen, "Impact of mechanical antenna downtilt on performance of WCDMA cellular network," en *IEEE 59th Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 4, Mayo 2004, pp. 2091–2095.
- [82] H. Al Hakim, H. Eckhardt, y S. Valentin, "Decoupling antenna height and tilt adaptation in large cellular networks," en *8th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Noviembre 2011, pp. 11–15.
- [83] D. H. Kim, D. D. Lee, H. J. Kim, y K. C. Whang, "Capacity analysis of macro/microcellular CDMA with power ratio control and tilted antenna,"

- IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 1, pp. 34–42, Enero 2000.
- [84] H. Cho, J. K. Kwon, y D. K. Sung, “High reuse efficiency of radio resources in urban microcellular systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 5, pp. 1669–1677, Septiembre 2000.
- [85] E. Benner y A. Sesay, “Effects of antenna height, antenna gain, and pattern downtilting for cellular mobile radio,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 45, no. 2, pp. 217–224, Mayo 1996.
- [86] W. Jianhui y Y. Dongfeng, “Antenna downtilt performance in urban environments,” en *IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, vol. 3, Octubre 1996, pp. 739–744.
- [87] I. Siomina, P. Varbrand, y D. Yuan, “Automated optimization of service coverage and base station antenna configuration in UMTS networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 13, no. 6, pp. 16–25, Diciembre 2006.
- [88] I. Luketic, D. Simunic, y T. Blajic, “Optimization of coverage and capacity of Self-Organizing Network in LTE,” en *34th Int. Convention MIPRO*, Mayo 2011, pp. 612–617.
- [89] V. Bratu y C. Beckman, “Base station antenna tilt for load balancing,” en *7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Abril 2013, pp. 2039–2043.
- [90] Y. Khan, B. Sayrac, y E. Moulines, “Centralized self-optimization in LTE-A using active antenna systems,” en *IFIP Wireless Days*, Noviembre 2013, pp. 1–3.
- [91] G. Hampel, K. Clarkson, J. Hobby, y P. Polakos, “The tradeoff between coverage and capacity in dynamic optimization of 3G cellular networks,” en *IEEE 58th Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, Octubre 2003, pp. 927–932.
- [92] A. Fehske, H. Klessig, J. Voigt, y G. Fettweis, “Concurrent load-aware adjustment of user association and antenna tilts in Self-Organizing Radio Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 5, pp. 1974–1988, Junio 2013.

- [93] M. A. Ismail, X. Xu, y R. Mathar, “Autonomous antenna tilt and power configuration based on CQI for LTE cellular networks,” en *10th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Agosto 2013, pp. 1–5.
- [94] F. Kasem, A. Haskou, y Z. Dawy, “On antenna parameters self optimization in lte cellular networks,” en *3rd International Conference on Communications and Information Technology (ICCIT)*, Junio 2013, pp. 44–48.
- [95] B. Hagerman y K. Molnar, “Base station and method for vertical tilt antenna beam sweeping, US Patent 8.682.326,” <https://www.google.com.tr/patents/US8682326>, Marzo 25 2014, último acceso en Junio 2017.
- [96] I. Viering y M. Doettling, “Self-optimization of cell overlap, US Patent 8.594.660,” <https://www.google.es/patents/US8594660>, Noviembre 26 2013, último acceso en Junio 2017.
- [97] R. Razavi, S. Klein, y H. Claussen, “Self-optimization of capacity and coverage in LTE networks using a fuzzy reinforcement learning approach,” en *IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Septiembre 2010, pp. 1865–1870.
- [98] M. Naseer ul Islam y A. Mitschele-Thiel, “Cooperative fuzzy Q-learning for self-organized coverage and capacity optimization,” en *IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Septiembre 2012, pp. 1406–1411.
- [99] O. Yilmaz, J. Hämäläinen, y S. Hämäläinen, “Self-optimization of remote electrical tilt,” en *IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Septiembre 2010, pp. 1128–1132.
- [100] H. Eckhardt, S. Klein, y M. Gruber, “Vertical Antenna Tilt Optimization for LTE Base Stations,” en *IEEE 73rd Vehicular Technology Conference*, Mayo 2011, pp. 1–5.
- [101] W. Luo, J. Zeng, X. Su, J. Li, y L. Xiao, “A mathematical model for joint optimization of coverage and capacity in Self-Organizing Network in centralized manner,” en *7th International Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM)*, Agosto 2012, pp. 622–626.

- [102] J. Chen, H. Jiang, y M. Peng, “Adaptive configuration of antenna down tilt for optimizing coverages in IMT-Advanced systems,” en *International Conference on Communication Technology and Application (ICCTA)*, Octubre 2011, pp. 495–499.
- [103] A. Thampi, D. Kaleshi, P. Randall, W. Featherstone, y S. Armour, “A sparse sampling algorithm for self-optimisation of coverage in LTE networks,” en *International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Agosto 2012, pp. 909–913.
- [104] J. Zhang, C. Sun, Y. Yi, y H. Zhuang, “A hybrid framework for capacity and coverage optimization in Self-Organizing LTE Networks,” en *IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Septiembre 2013, pp. 2919–2923.
- [105] S. Berger, M. Soszka, A. Fehske, P. Zanier, I. Viering, y G. Fettweis, “Joint throughput and coverage optimization under sparse system knowledge in LTE-A networks,” en *International Conference on ICT Convergence (ICTC)*, Octubre 2013, pp. 105–111.
- [106] S. Berger, M. Simsek, A. Fehske, P. Zanier, I. Viering, y G. Fettweis, “Joint Downlink and Uplink Tilt-Based Self-Organization of Coverage and Capacity Under Sparse System Knowledge,” en *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, no. 99, Octubre 2015.
- [107] S. Berger, A. Fehske, P. Zanier, I. Viering, y G. Fettweis, “Comparing Online and Offline SON Solutions for Concurrent Capacity and Coverage Optimization,” en *IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC)*, Septiembre 2014, pp. 1–6.
- [108] O. Sallent, J. Perez-Romero, J. Sanchez-Gonzalez, R. Agusti, M. Diaz-Guerra, D. Henche, y D. Paul, “Automatic detection of sub-optimal performance in UMTS networks based on drive-test measurements,” en *7th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, Octubre 2011, pp. 1–4.
- [109] 3GPP TR 36.805, “Study on minimization of drive-tests in Next Generation Networks,” Diciembre 2009, Version 9.0.0.

- [110] J. Fernández-Segovia, S. Luna-Ramírez, M. Toril, A. Vallejo-Mora, y C. Úbeda, “A computationally efficient method for self-planning uplink power control parameters in LTE,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, no. 1, pp. 1–13, 2015.
- [111] T. Ross, *Fuzzy logic with engineering applications*. United Kingdom: Wiley, 1995.
- [112] <https://developers.google.com/kml/>, último acceso en Junio 2017.
- [113] M. Miernik, “Application of 2G Spatial Traffic Analysis in the Process of 2G and 3G Radio Network Optimization,” en *IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC)*, Abril 2007, pp. 909–913.
- [114] P. Kyosti y otros., “IST-WINNER D1.1.2 WINNER II channel models,” 2007.
- [115] COST Action 231, “Digital mobile radio. Towards future generation system final report,” European Communities, Reporte técnico EUR 18957, Ch. 4, 1999.
- [116] S. Fortune, “A sweepline algorithm for Voronoi diagrams,” en *2nd Annual Symposium on Computational Geometry (ACM)*, Junio 1986, pp. 313–322.
- [117] M. Dirani y Z. Altman, “Self-Organizing Networks in next generation radio access networks: Application to Fractional Power Control,” *Computer Networks*, vol. 55, no. 2, pp. 431–438, 2011.
- [118] J. Fernández-Segovia, S. Luna-Ramírez, M. Toril, y C. Úbeda, “A Fast Self-Planning Approach for Fractional Uplink Power Control Parameters in LTE Networks,” *Mobile Information System (Hindawi)*, pp. 1–11, 2016.
- [119] A. Vallejo-Mora, M. Toril, S. Luna-Ramírez, A. Mendo, y S. Pedraza, “Congestion Relief in Subway Areas by tuning Uplink Power Control in LTE,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, aceptado en Noviembre 2016.
- [120] D. Kim, “Downlink power allocation and adjustment for CDMA cellular systems,” *IEEE Communications Letters*, vol. 1, no. 4, pp. 96–98, Julio 1997.
- [121] D. Kim, “A simple algorithm for adjusting cell-site transmitter power in CDMA cellular systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 4, pp. 1092–1098, Jul. 1999.

- [122] T. Cai, G. Koudouridis, C. Qvarfordt, J. Johansson, y P. Legg, “Coverage and capacity optimization in E-UTRAN based on central coordination and distributed Gibbs sampling,” en *IEEE 71st Vehicular Technology Conference (VTC)*, Mayo 2010, pp. 1–5.
- [123] K. Majewski y M. Koonert, “Analytic uplink cell load approximation for planning Fractional Power Control in LTE networks,” *Telecommunication Systems*, vol. 52, no. 2, pp. 1081–1090, 2013.
- [124] A. Engels, M. Reyer, X. Xu, R. Mathar, J. Zhang, y H. Zhuang, “Autonomous self-optimization of coverage and capacity in LTE cellular networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 5, pp. 1989–2004, Junio 2013.
- [125] S. Fan, H. Tian, y C. Sengul, “Self-optimization of coverage and capacity based on a fuzzy neural network with cooperative reinforcement learning,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, no. 57, pp. 1–14, 2014.
- [126] A. Saeed, O. G. Aliu, y M. A. Imran, “Controlling self healing cellular networks using fuzzy logic,” en *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Abril 2012, pp. 3080–3084.
- [127] J. Moysen y L. Giupponi, “A Reinforcement Learning based solution for Self-Healing in LTE networks,” en *IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC)*, Septiembre 2014, pp. 1–6.
- [128] O. Onireti, A. Zoha, J. Moysen, A. Imran, L. Giupponi, M. A. Imran, y A. Abu-Dayya, “A cell outage management framework for dense heterogeneous networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 4, pp. 2097–2113, 2016.
- [129] M. Toril y V. Wille, “Optimization of handover parameters for traffic sharing in GERAN,” *Wireless Personal Communications*, vol. 47, no. 3, pp. 315–336, 2008.
- [130] S. Luna-Ramírez, M. Toril, M. Fernández, y V. Wille, “Optimal Traffic Sharing in GERAN,” *Wireless Personal Communications*, vol. 57, no. 4, pp. 553–574, 2011.

- [131] M. Toril, R. Acedo-Hernández, A. Sánchez, S. Luna-Ramírez, y C. Úbeda, “Estimating Spectral Efficiency Curves from Connection Traces in a Live LTE Network,” *Mobile Information System (Hindawi), Special issue on Data-Driven Modeling and Optimization*, vol. 2017, 2017.
- [132] P. Oliver-Balsalobre, M. Toril, S. Luna-Ramírez, y J. Ruiz-Avilés, “Self-tuning of scheduling parameters for balancing the quality of experience among services in LTE,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2016, no. 1, p. 7, 2016.
- [133] C. Mehlhruer, J. Colom Ikuno, M. Simko, S. Schwarz, M. Wrulich, y M. Rupp, “The Vienna LTE simulators - Enabling reproducibility in wireless communications research,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2011, no. 1, p. 29, 2011.
- [134] P. Muñoz, I. de la Bandera, F. Ruiz, S. Luna-Ramírez, R. Barco, M. Toril, P. Lázaro, y J. Rodríguez, “Computationally-Efficient Design of a Dynamic System-Level LTE Simulator,” *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 57, no. 3, pp. 347–358, 2011.
- [135] 3GPP TR 36.814, “Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects,” Marzo 2010, Version 9.0.0.
- [136] 3GPP TS 36.300, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (EUTRAN); Overall description,” Julio 2009, Version 9.4.0.