



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES

**TESIS DOCTORAL**

**ANÁLISIS DE CAPACIDAD EN SISTEMAS CDMA Y  
WCDMA, USANDO HERRAMIENTAS DE  
PLANIFICACIÓN BASADAS EN GIS Y DINÁMICA  
POLIÉDRICA**

Por

Andrés Navarro Cadavid

Director

Narcís Cardona Marcet

Valencia, 2.003

## Resumen

# ANÁLISIS DE CAPACIDAD EN SISTEMAS CDMA Y WCDMA, USANDO HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN BASADAS EN GIS Y DINÁMICA POLIÉDRICA

Por Andrés Navarro Cadavid

Director: Narcís Cardona Marcet  
Departamento de Comunicaciones

En este momento están entrando en operación los primeros sistemas UMTS en Europa, y están operando en varios países del mundo sistemas CDMA-2000 1xRTT, y aunque existen muchos trabajos publicados sobre la capacidad de estos sistemas, prácticamente todo lo existente se basa en el comportamiento de sistemas ideales que consideran celdas hexagonales o circulares y propagación basada en exponente inverso de la distancia y poco es lo que hay sobre el comportamiento real de dichos sistemas en entornos reales.

Sobre el exponente de pérdidas de propagación, es bien conocido que este afecta la capacidad de los sistemas CDMA; sin embargo hasta ahora no se ha considerado el efecto de los modelos de propagación que tienen en cuenta la difracción y otros fenómenos más cercanos a la realidad, y por lo tanto no se ha considerado el efecto del entorno urbano y el terreno sobre la capacidad real de los sistemas basados en CDMA.

La presente tesis tiene como principal objetivo el estudio de sistemas CDMA sobre entornos urbanos reales, modelados mediante cartografía 3D. Para ello se utilizan herramientas como Cell-View, Matlab y algunos programas propios desarrollados para esta tesis, con las que se realizan simulaciones de los mecanismos de acceso radio, tanto los que tienen que ver con la propagación, como los que regulan la admisión de llamadas a cada celda en el sistema. Con base en esas simulaciones se analizan parámetros de calidad de los sistemas en términos de capacidad y calidad.

Con el fin de alcanzar el objetivo propuesto y al asociar el modelo de propagación con la capacidad, se propone en esta tesis la idea de utilizar dinámica poliédrica o q-análisis como herramienta para evaluar la capacidad, y por tanto el concepto de invariantes topológicos, ya que la diferencia entre un modelo de propagación ideal y un modelo de propagación más “real” está fundamentalmente en la “forma” que se obtiene de la cobertura y por

consiguiente la estructura de dicha cobertura. En los resultados obtenidos se muestra la relación entre los invariantes topológicos calculados por dinámica poliédrica y la capacidad obtenida mediante simulaciones.

Dado que tradicionalmente se ha considerado el up-link como el enlace que determina la capacidad en los sistemas CDMA, la mayor parte del análisis está centrado en este, aunque se modela también el down-link y se analiza el comportamiento de este en algunos escenarios, encontrando que puede llegar incluso a ser más restrictivo que el up-link incluso para servicios de voz, debido principalmente a las restricciones de potencia de las estaciones base y la forma como la estación base puede asignar porciones de potencia a cada usuario en el sistema.

De esta tesis se han publicado numerosos artículos en congresos y en algunas revistas, que se detallan en el ANEXO A.

## Resume

# ANÀL·LISI DE CAPACITAT EN SISTEMES CDMA I WCDMA, EMPRANT FERRAMENTES DE PLANIFICACIÓ BASEDES EN GIS I DINÀMICA POLIÉDRICA

Per Andrés Navarro i Cadavid

Director: Narcís Cardona i Marcet  
Departament de Comunicacions

En aquest moment estan entrant en operació els primers sistemes UMTS en Europa, i estan operant en alguns països del món sistemes CDMA-2000 1xRTT, i encara que existeixen molts treballs publicats sobre la capacitat d'aquests sistemes, pràcticament tot el que existeix es basa en el comportament de sistemes ideals que consideren cel·les hexagonals o circulars i propagació basada en l'exponent invers de la distància i poc és el que hi ha sobre el comportament real de dits sistemes en entorns reals.

Sobre l'exponent de pèrdues de propagació, és ben conegut que aquest afecta la capacitat dels sistemes CDMA; tanmateix fins ara no s'han considerat l'efecte dels models de propagació que prenen compte de la difracció i altres fenòmens més propers a la realitat, i per tant no s'han considerat l'efecte de l'entorn urbà i el terreny sobre la capacitat real dels sistemes basats en CDMA.

La present tesi té com objectiu principal l'estudi de sistemes CDMA sobre entorns urbans reals, modelats mitjançant cartografia 3D. Per això s'utilitzen eines com Cell-View, Matlab i alguns programes propis desenvolupats per aquesta tesi, amb les que es realitzen simulacions dels mecanismes d'accés radio, tant aquells que han a veure amb la propagació, com aquells que regulen l'admissió de cridades cada cel·la del sistema. Utilitzant eines simulacions s'analitzen paràmetres de qualitat dels sistemes en termes de capacitat i qualitat.

Amb la finalitat d'aconseguir l'objectiu proposat i en associar el model de propagació amb la capacitat, es proposa en aquesta tesi la idea d'utilitzar dinàmica polièdrica o q-anàlisi com eina per avaluar la capacitat, i per tant el concepte d'invariants topològics, puix que la diferència entre un model de propagació ideal i un model de propagació més "real" està fonamentalment en la "forma" que s'obté de la cobertura i, per consegüent l'estructura de la nomenada cobertura. Als resultats obtinguts es mostra la

relació entre els invariants topològics calculats per dinàmica polièdrica i la capacitat obtinguda mitjançant simulacions.

Donat que tradicionalment s'ha considerat el up-link com enllaç que determina la capacitat als sistemes CDMA, la major part de l'anàlisi està centrat en aquest, encara que es modela també el down-link i s'analitza el comportament d'aquest a alguns escenaris, trovant que pot arribar fins i tot a ser més restrictiu que l'up-link inclús per serveis de veu, degut principalment a les restriccions de potència de les estacions base i la forma com l'estació base pot assignar porcions de potència a cadascú dels usuaris del sistema.

D'aquesta tesi s'han publicat nombrosos articles a congressos i a algunes revistes, les quals es detallen a l'anexe A.

## **Abstract**

# **CDMA AND WCDMA CAPACITY ANALYSIS, USING GIS BASED PLANNING TOOLS AND POLYHEDRAL DYNAMICS**

By Andrés Navarro Cadavid

Advisor: Narcís Cardona Marcet  
Communications Department

This year (2003), the first UMTS systems are beginning commercial operation in Europe; and in many other countries around the world CDMA-2000 1xRTT are operating for at least a year now. One of the problems associated with these systems is yet the capacity, and it is more complex when pretend offer multiple services like internet and video conferencing. There is a lot of works in the literature regarding with the capacity problem, including analysis with multiple services, however almost all work have been done using ideal models with hexagonal cells and a propagation model based on the inverse exponential distance and there is so little or none work using more real propagation considerations.

About propagation losses based on the inverse of the distance, there is well known that the exponent value affects the capacity in CDMA systems; however, until now, the effect of such propagation models that includes diffraction effects and other phenomena closer to reality has not been considered and consequently, the effect of terrain and urban environment over CDMA systems has not been considered.

This dissertation have as main objective the study of capacity of CDMA systems over real urban environments modelled using 3D maps. To obtain such objective, we use some tools like CellView (A GIS based planning tool developed by Mobile Communications Group at Valencia Technical University), MatLab, and some software developed to achieve the objective, that we use to run extensive simulations of radio access mechanisms. Based on such simulations, we analyse quality and capacity parameters for CDMA systems.

In order to reach the above proposed objective, we propose the use of a tool derived from Combinatory Topology such is the Polyhedral Analysis (or Q-Connectivity) developed by Atkin, to relate CDMA capacity with some topological invariants like structural vector (or q-vector), betti number and coupling. We define an additional parameter that relates structural vector with sectorization in order to interpret some results for the structural vector when sectorized systems are used.

Most of the analysis and results obtained in this dissertation have been done in the up-link because traditionally it has been the more restrictive from capacity point of view. However, as the down-link capacity is equally important in third generation systems, especially for high bandwidth systems, we have considered and simulated downlink capacity, finding that in some scenarios, this could be more restrictive than uplink, not only for high bit rate systems as for voice systems also. This behaviour is caused by the way as the Base Station assigns power for different users in the system.

From the simulation results and q-analysis, a strong dependence of capacity with propagation model and sectorization has been found. Also, a relation between the system "form" and the inter-relations between cells has been found.

From the results obtained in this work, have been published many papers in conference proceedings and in some magazines. The list of papers are shown in ANNEX A.

## TABLA DE CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Capítulo 1 INTRODUCCION</b>  | <b>1</b>  |
| <b>Capítulo 2 HERRAMIENTAS</b>  | <b>6</b>  |
| 2.1 <i>CELLVIEW</i>   | 6         |
| 2.1.1    Módulo de Planificación UMTS en CellView                     | 7         |
| 2.2 <i>MATLAB</i>   | 10        |
| 2.3 <i>DINÁMICA POLIÉDRICA Ó Q-ANÁLISIS</i>                           | 10        |
| 2.3.1    Introducción   | 10        |
| 2.3.2    Limitaciones del modelo actual de estimación de capacidad    | 11        |
| 2.3.3    Modelos de propagación                                       | 11        |
| 2.3.4    Topología  | 12        |
| 2.3.5    Q-análisis o dinámica poliédrica en el análisis de capacidad | 12        |
| 2.3.6    Complejo simplicial  | 15        |
| 2.3.7    Cadenas, ciclos y fronteras                                  | 15        |
| 2.3.8    Matriz de incidencias o matriz Incidente                     | 16        |
| 2.3.9    q-conectividad:  | 18        |
| <b>Capítulo 3 ESCENARIOS DE SIMULACION</b>                            | <b>21</b> |
| 3.1 <i>MAPAS DISPONIBLES</i>  | 21        |
| 3.2 <i>DESCRIPCION DEL MODELO</i>                                     | 21        |
| 3.3 <i>PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN.</i>                               | 25        |
| 3.4 <i>MODELADO DEL CANAL RADIO</i>                                   | 26        |
| 3.4.1    Modelos de propagación                                       | 26        |
| 3.4.1.1    Okumura-Hata   | 26        |
| 3.4.1.1    Univalencia COST-231                                       | 28        |
| 3.4.1.1    Saunders-Bonar   | 30        |
| 3.4.1.1    Red Neuronal   | 34        |
| 3.4.2    Cobertura de las celdas                                      | 34        |
| 3.4.3    Interferencias   | 35        |
| 3.4.4    Efecto de respiración  | 36        |
| 3.5 <i>MODELADO DE TRÁFICO</i>  | 37        |
| 3.5.1    Generación de eventos  | 37        |
| 3.5.2    Distribución de usuarios                                     | 37        |
| 3.5.3    Admisión de llamadas   | 38        |
| 3.6 <i>MOVILIDAD DE USUARIOS</i>                                      | 39        |
| 3.7 <i>PARAMETROS A EVALUAR</i>                                       | 39        |
| 3.7.1    Capacidad en CDMA  | 39        |



|                   |  |           |
|-------------------|--|-----------|
| 3.7.2             | Energía de bit sobre interferencia (Eb/No)   | 41        |
| 3.8               | <i>OBJETIVOS Y UTILIDAD DEL MODELO EN LA PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS MOVILES</i>                 | 41        |
| 3.8.1             | Planificación en sistemas móviles  | 41        |
| 3.8.2             | Objetivos y utilidad del modelo de análisis de capacidad                                       | 42        |
| <b>Capítulo 4</b> | <b>CAPACIDAD EN EL UP-LINK</b>   | <b>44</b> |
| 4.1               | <i>ANTECEDENTES SOBRE CAPACIDAD EN CDMA</i>  | 44        |
| 4.2               | <i>CAPACIDAD DE UNA SOLA CELDA</i>   | 49        |
| 4.3               | <i>CAPACIDAD CON MULTIPLES CELDAS.</i>   | 50        |
| 4.4               | <i>CALCULO ANALÍTICO DE CAPACIDAD</i>  | 55        |
| 4.4.1             | Capacidad en una sola celda  | 55        |
| 4.4.2             | Capacidad para un sistema de 19 celdas   | 56        |
| <b>Capítulo 5</b> | <b>RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES</b>  | <b>57</b> |
| 5.1               | <i>PARÁMETROS DE ANÁLISIS Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN</i>                                       | 57        |
| 5.2               | <i>ESCENARIOS IDEALES</i>  | 59        |
| 5.2.1             | Modelo con 18 celdas circulares ideales  | 59        |
| 5.2.1.1           | Resultados de simulación en up-link  | 60        |
| 5.2.1.1           | Resultados en el down-link   | 66        |
| 5.3               | <i>ESCENARIOS SOBRE LA CIUDAD DE MADRID</i>  | 69        |
| 5.3.1             | Modelo de 18 celdas omnidireccionales en Madrid usando el modelo Okumura-Hata:                 | 69        |
| 5.3.1.1           | Topología del sistema (vecindad)   | 69        |
| 5.3.1.1           | Resultados de simulación   | 70        |
| 5.3.2             | Modelo de dieciocho celdas omnidireccionales usando el modelo Univalencia COST-231             | 74        |
| 5.3.2.1           | Topología del sistema (vecindad)   | 74        |
| 5.3.2.1           | Resultados de las simulaciones   | 74        |
| 5.3.2.1           | Resultados de simulación en el Down-Link   | 83        |
| 5.3.3             | Modelo de 14 celdas omnidireccionales usando el modelo Univalencia COST-231                    | 86        |
| 5.3.3.1           | Topología del sistema  | 86        |
| 5.3.3.1           | Resultados de simulaciones   | 86        |
| 5.3.4             | Modelo de 15 celdas regulares con tres sectores cada una usando el modelo Univalencia COST-231 | 93        |
| 5.3.4.1           | Topología del sistema  | 93        |
| 5.3.4.1           | Resultados de simulaciones   | 94        |
| 5.3.5             | Modelo de seis celdas omnidireccionales usando el modelo Univalencia COST-231                  | 100       |
| 5.3.5.1           | Topología del sistema (vecindad)   | 100       |

|  |     |
|--|-----|
| 5.3.5.1 Resultados de simulaciones   | 100 |
| 5.3.6 Modelo de seis celdas con sectores de 60 grados usando el modelo Univalencia COST-231                  | 108 |
| 5.3.6.1 Topología del sistema  | 108 |
| 5.3.6.1 Resultados de simulaciones   | 109 |
| 5.3.7 Modelo de 15 celdas irregulares con antena omnidireccional usando el modelo Univalencia COST-231       | 114 |
| 5.3.7.1 Topología del sistema (vecindad)   | 115 |
| 5.3.7.1 Resultados de simulaciones   | 116 |
| 5.3.8 Modelo de 15 celdas irregulares con antena sectorizada usando el modelo Univalencia COST-231           | 130 |
| 5.3.8.1 Topología del sistema (vecindad)   | 130 |
| 5.3.8.1 Resultados de simulaciones   | 132 |
| 5.4 <i>ESCENARIOS SOBRE LA CIUDAD DE MUNICH</i>  | 139 |
| 5.4.1 micro celdas: caso Munich con antenas omnidireccionales y modelo de propagación basado en red neuronal | 139 |
| 5.4.1.1 Topología del sistema (vecindad)   | 139 |
| 5.4.1.1 Resultados de simulación   | 139 |
| 5.4.2 Modelo con 15 celdas sectorizadas usando el modelo de propagación red neuronal                         | 148 |
| 5.4.2.1 Topología del sistema (vecindad)   | 148 |
| 5.4.2.1 Resultados de simulaciones   | 148 |
| 5.5 <i>COMPARATIVA</i>   | 159 |
| 5.5.1 Influencia del modelo de propagación   | 159 |
| 5.5.2 Influencia del número de celdas  | 161 |
| 5.5.3 Efecto de la sectorización   | 165 |
| 5.5.4 Influencia del patrón regular y el patrón irregular.   | 168 |
| 5.6 <i>ALGUNAS CONCLUSIONES SOBRE LAS SIMULACIONES</i>   | 169 |
| 5.7 <i>ANÁLISIS POR DINÁMICA POLIÉDRICA O Q-ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS SIMULADOS</i>                         | 171 |
| 5.7.1 Introducción   | 171 |
| 5.7.2 Resultado de cálculo de vector de estructura para los diferentes escenarios                            | 172 |
| 5.7.2.1 Sistema Munich con celdas omnidireccionales  | 172 |
| 5.7.2.1 Sistema Munich con celdas sectorizadas   | 172 |
| 5.7.2.1 Sistema Ideal con 18 celdas  | 172 |
| 5.7.2.1 Sistema Madrid con 18 celdas omnidireccionales y modelo Okumura-Hata                                 | 173 |
| 5.7.2.1 Sistema Madrid con 18 celdas omnidireccionales y modelo Univalencia                                  | 173 |
| 5.7.2.1 Sistema Madrid con 14 celdas omnidireccionales y modelo UniValencia                                  | 173 |

|  |            |
|--|------------|
| 5.7.2.1 Sistema Madrid con 15 celdas sectorizadas regulares y modelo UniValencia | 173        |
| 5.7.2.1 Sistema Madrid con 15 celdas omnidireccionales irregulares               | 173        |
| 5.7.2.1 Sistema Madrid con 15 celdas sectorizadas irregulares                    | 174        |
| 5.7.2.1 Sistema Madrid con 6 celdas omnidireccionales regulares                  | 174        |
| 5.7.2.1 Sistema Madrid con 6 celdas con sectores de 60 grados regulares          | 174        |
| 5.7.3 Relación entre q-conectividad y capacidad en CDMA                          | 174        |
| 5.7.4 Algunas conclusiones   | 178        |
| <b>Capítulo 6 CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS</b>                             | <b>180</b> |
| 6.1 <i>RESUMEN DE CONTRIBUCIONES.</i>  | <i>180</i> |
| 6.2 <i>DESARROLLOS FUTUROS:</i>  | <i>181</i> |

## LISTA DE ILUSTRACIONES

| <i>Número</i>  | <i>Página</i> |
|--|---------------|
| <b>Figura 1 Estructura de Cellview</b>   | <b>7</b>      |
| <b>Figura 2 Mapa de tráfico para el servicio de voz en el up-link</b>  | <b>8</b>      |
| <b>Figura 3 Mapa de tráfico para el servicio High Multimedia en el Down-Link</b>   | <b>9</b>      |
| <b>Figura 4 Grafos para los n-símplices desde n=2 hasta n=27</b>   | <b>14</b>     |
| <b>Figura 5 Ejemplo de complejos simpliciales y no complejo simplicial</b>   | <b>15</b>     |
| <b>Figura 6 Ejemplo de matrices de incidencia</b>  | <b>16</b>     |
| <b>Figura 7 Patrón celular ideal</b>   | <b>18</b>     |
| <b>Figura 8 Complejo simplicial del patrón celular ideal</b>   | <b>19</b>     |
| <b>Figura 9 Patrón celular con solapes de más de dos celdas</b>  | <b>19</b>     |
| <b>Figura 10 Complejo simplicial que representa el patrón celular de la Figura 9.</b>  | <b>20</b>     |
| <b>Figura 11 Esquema general del modelo</b>  | <b>24</b>     |
| <b>Figura 12 Esquema de los módulos que componen la simulación</b>   | <b>25</b>     |
| <b>Figura 13 Geometría del modelo de Saunders</b>  | <b>30</b>     |
| <b>Figura 14 Trayectoria típica de propagación en entorno suburbano. Escala horizontal en cientos de metros, escala vertical en metros. (adaptado de [80])</b> | <b>31</b>     |
| <b>Figura 15 Mapa de potencias de usuarios en up-link</b>  | <b>35</b>     |
| <b>Figura 16 Modelado de la Interferencia Inter-celda</b>  | <b>50</b>     |
| <b>Figura 17 Cálculo de interferencia en el <i>uplink</i></b>  | <b>52</b>     |
| <b>Figura 18 Mapa de mejor enlace del sistema ideal</b>  | <b>60</b>     |
| <b>Figura 19 Valores máximo, medio y mínimo durante la simulación para las llamadas, <math>E_b / N_0</math> y <math>F_m</math></b>                             | <b>61</b>     |
| <b>Figura 20 Evolución de llamadas y <math>E_b / N_0</math> para la celda No.1</b>   | <b>62</b>     |
| <b>Figura 21 Evolución de llamadas y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.9</b>   | <b>62</b>     |
| <b>Figura 22 Evolución de llamadas y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.7</b>   | <b>63</b>     |
| <b>Figura 23 Gráfico de ajuste de la distribución de <math>E_b / N_0</math> contra una distribución Normal</b>   | <b>64</b>     |
| <b>Figura 24 PDF de los resultados de simulación de la celda No.7 y PDF de una dist. Normal</b>  | <b>65</b>     |
| <b>Figura 25 Evolución en el tiempo de las llamadas totales y del <math>E_b / N_0</math> promedio</b>  | <b>65</b>     |
| <b>Figura 26 Evolución de <math>E_b/N_0</math>, potencia de estación base y llamadas en la celda No.7</b>  | <b>66</b>     |
| <b>Figura 27 PDF de la relación <math>E_b/N_0</math> para los usuarios en el DL al finalizar la simulación.</b>  | <b>67</b>     |
| <b>Figura 28 Estado del <math>E_b / N_0</math> para los usuarios de la celda No.7</b>  | <b>67</b>     |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figura 29 Evolución de Eb/No, potencia de la estación base y llamadas en la celda No.1</b>  | <b>68</b> |
| <b>Figura 30 Estado del Eb/No para los usuarios en la celda No.1</b>   | <b>69</b> |
| <b>Figura 31 Mapa de mejor enlace para el caso Madrid con Hata</b>   | <b>70</b> |
| <b>Figura 32 Llamadas, relación Eb/No y factor Fm del sistema al finalizar la simulación</b>   | <b>71</b> |
| <b>Figura 33 Evolución de la simulación en la celda No.2: Llamadas, <math>E_b / N_0</math> y factor Fm</b>                                 | <b>72</b> |
| <b>Figura 34 Evolución del tráfico en Kbps y del valor Eb/No para la celda No.7</b>  | <b>73</b> |
| <b>Figura 35 Evolución del tráfico total del sistema en Kbps y del valor medio de Eb/No</b>  | <b>73</b> |
| <b>Figura 36 Mapa de mejor enlace para el sistema</b>  | <b>74</b> |
| <b>Figura 37 Valores máximo, medio y mínimo de llamadas, <math>E_b / N_0</math> y <math>F_m</math> durante la simulación</b>               | <b>75</b> |
| <b>Figura 38 Evolución de la celda No.1</b>  | <b>76</b> |
| <b>Figura 39 Evolución de llamadas en curso y Eb/No de la celda No.7</b>   | <b>77</b> |
| <b>Figura 40 Evolución en el tiempo de las llamadas en curso y la <math>E_b / N_0</math> de la celda No.8</b>                              | <b>78</b> |
| <b>Figura 41 Evolución en el tiempo de las llamadas en curso, la <math>E_b / N_0</math> y el factor <math>F_m</math> de la celda No.10</b> | <b>79</b> |
| <b>Figura 42 Grafo de distribución normal contra resultados de simulación de la <math>E_b / N_0</math> en la celda No.10</b>               | <b>79</b> |
| <b>Figura 43 Evolución en el tiempo de las llamadas en curso y la Eb/No de la celda No.11</b>  | <b>80</b> |
| <b>Figura 44 Evolución en el tiempo del sistema</b>  | <b>81</b> |
| <b>Figura 45 Número de llamadas por kilómetro cuadrado en el sistema.</b>  | <b>82</b> |
| <b>Figura 46 Ajuste de distribución normal y resultados de simulación en llamadas por kilómetro cuadrado</b>                               | <b>82</b> |
| <b>Figura 47 <math>E_b / N_0</math> percibido por los usuarios en el <i>down-link</i> en la celda No.1</b>                                 | <b>83</b> |
| <b>Figura 48 Evolución de la potencia del nodo B y las llamadas en la celda No.1</b>   | <b>84</b> |
| <b>Figura 49 <math>E_b / N_0</math> percibido por los usuarios en la celda No.7</b>  | <b>85</b> |
| <b>Figura 50 Evolución de la potencia en el nodo B y llamadas para la celda No.7</b>   | <b>85</b> |
| <b>Figura 51 Mapa de mejor enlace del sistema</b>  | <b>86</b> |
| <b>Figura 52 Llamadas en curso y <math>E_b / N_0</math> al final de la simulación</b>  | <b>87</b> |
| <b>Figura 53 Estado del sistema al terminar la simulación</b>  | <b>88</b> |
| <b>Figura 54 Evolución de llamadas y Eb/No en la celda No.1</b>  | <b>89</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Figura 55 Gráfica de distribución normal y datos de simulación para el <math>E_b / N_0</math> de la celda No.1</b>              | <b>89</b>  |
| <b>Figura 56 Evolución de llamadas totales y <math>E_b / N_0</math> medio para el sistema</b>                                      | <b>90</b>  |
| <b>Figura 57 PDF de los resultados de simulación y distribución normal para las llamadas totales de voz</b>                        | <b>91</b>  |
| <b>Figura 58 llamadas de voz por kilómetro cuadrado en el sistema</b>  | <b>91</b>  |
| <b>Figura 59 Llamadas de datos del sistema y <math>E_b / N_0</math> media</b>  | <b>92</b>  |
| <b>Figura 60 Capacidad del sistema en Kbps por kilómetro cuadrado</b>  | <b>92</b>  |
| <b>Figura 61 Función densidad de probabilidad para la capacidad en Kbps/Km2</b>  | <b>93</b>  |
| <b>Figura 62 Mapa de mejor enlace del sistema con 15 celdas sectorizadas</b>   | <b>94</b>  |
| <b>Figura 63 Estado de llamadas, <math>E_b/N_0</math> y factor <math>F_m</math> al finalizar la simulación</b>                     | <b>95</b>  |
| <b>Figura 64 Evolución de llamadas y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.4</b>   | <b>96</b>  |
| <b>Figura 65 Evolución de llamadas y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.28</b>  | <b>96</b>  |
| <b>Figura 66 Evolución del factor <math>F_m</math> para la celda No.28</b>   | <b>97</b>  |
| <b>Figura 67 Evolución del total de llamadas del sistema y el <math>E_b / N_0</math> medio</b>                                     | <b>98</b>  |
| <b>Figura 68 Evolución de la capacidad en Kbps/Km2</b>   | <b>98</b>  |
| <b>Figura 69 PDF de los resultados de simulación para la capacidad en Kbps/Km2</b>   | <b>99</b>  |
| <b>Figura 70 Gráfica de distribución normal y resultados de simulación para la <math>E_b / N_0</math> media del sistema</b>        | <b>99</b>  |
| <b>Figura 71 Mapa de mejor enlace del sistema</b>  | <b>100</b> |
| <b>Figura 72 Llamadas en curso y <math>E_b / N_0</math> al final de la simulación</b>  | <b>101</b> |
| <b>Figura 73 Evolución de llamadas y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.1</b>   | <b>102</b> |
| <b>Figura 74 Evolución de llamadas y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.2</b>   | <b>103</b> |
| <b>Figura 75 Gráfica de resultados de simulación para la <math>E_b / N_0</math> en la celda No.3 contra la distribución normal</b> | <b>103</b> |
| <b>Figura 76 Evolución de las llamadas en la celda No.1 y el <math>E_b / N_0</math> en la celda No.5</b>                           | <b>104</b> |
| <b>Figura 77 Evolución de las llamadas en la celda No.2 y el <math>E_b / N_0</math> en la celda No.5</b>                           | <b>105</b> |
| <b>Figura 78 Evolución de llamadas totales y valor medio de <math>E_b / N_0</math> del sistema</b>                                 | <b>105</b> |
| <b>Figura 79 Evolución del sistema en Kbps/Km2</b>   | <b>106</b> |
| <b>Figura 80 PDF de los resultados de simulación en Kbps/Km2</b>   | <b>107</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Figura 81 Gráfica de distribución normal y resultados de simulación para la <math>E_b / N_0</math> media del sistema.</b> | <b>108</b> |
| <b>Figura 82 Mapa de mejor enlace del sistema con sectores de 60 grados</b>  | <b>109</b> |
| <b>Figura 83 Número de llamadas y valor de <math>E_b / N_0</math> al finalizar la simulación</b>                             | <b>110</b> |
| <b>Figura 84 Número de llamadas y factor Fm al finalizar la simulación</b>   | <b>110</b> |
| <b>Figura 85 Evolución de las llamadas y el <math>E_b / N_0</math> en la celda No.1</b>                                      | <b>111</b> |
| <b>Figura 86 Evolución de llamadas, <math>E_b / N_0</math> y factor Fm en la celda No.2</b>                                  | <b>111</b> |
| <b>Figura 87 Evolución de llamadas totales y <math>E_b / N_0</math> media para el sistema</b>                                | <b>112</b> |
| <b>Figura 88 Evolución de la capacidad del sistema en llamadas/Km2 y <math>E_b / N_0</math> en el tiempo</b>                 | <b>113</b> |
| <b>Figura 89 Evolución de la capacidad del sistema en Kbps/Km2 y del <math>E_b / N_0</math> en el tiempo</b>                 | <b>113</b> |
| <b>Figura 90 Gráfica de distribución normal y datos de simulación para el factor Fm medio del sistema.</b>                   | <b>114</b> |
| <b>Figura 91 Mapa de mejor enlace del sistema</b>  | <b>116</b> |
| <b>Figura 92 Estado del sistema al finalizar la simulación</b>   | <b>117</b> |
| <b>Figura 93 Llamadas en curso más intentos y factor Fm al final de la simulación</b>  | <b>118</b> |
| <b>Figura 94 Evolución de las llamadas en curso y el <math>E_b / N_0</math> para la celda No.4</b>                           | <b>119</b> |
| <b>Figura 95 Evolución de llamadas en curso y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.5</b>                                    | <b>120</b> |
| <b>Figura 96 Evolución de las llamadas en curso y el <math>E_b / N_0</math> para la celda No.8</b>                           | <b>121</b> |
| <b>Figura 97 Evolución de las llamadas en curso y el <math>E_b / N_0</math> para la celda No.10</b>                          | <b>121</b> |
| <b>Figura 98 Evolución de las llamadas en curso y el <math>E_b / N_0</math> para la celda No.13</b>                          | <b>122</b> |
| <b>Figura 99 Evolución de las llamadas de voz y el <math>E_b / N_0</math> en la celda No.14</b>                              | <b>123</b> |
| <b>Figura 100 Evolución de las llamadas de datos y el <math>E_b / N_0</math> en la celda No.14</b>                           | <b>123</b> |
| <b>Figura 101 Gráfica de ajuste de distribución normal y resultados de simulación en Kbps para la celda No.14</b>            | <b>124</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Figura 102 Gráfica de distribución normal ajustada y resultados de simulación para <math>E_b / N_0</math> en la celda No.14</b> | <b>124</b> |
| <b>Figura 103 Evolución de llamadas en la celda No.8 y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.1</b>                                 | <b>125</b> |
| <b>Figura 104 Evolución de llamadas en la celda No.10 y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.1</b>                                | <b>126</b> |
| <b>Figura 105 Evolución de llamadas en la celda No.13 y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.1</b>                                | <b>127</b> |
| <b>Figura 106 Evolución del total de llamadas en el sistema y el valor de <math>E_b / N_0</math></b>                               | <b>128</b> |
| <b>Figura 107 Evolución del tráfico total del sistema en llamadas de voz y datos por kilómetro cuadrado</b>                        | <b>128</b> |
| <b>Figura 108 Evolución en el tiempo de la capacidad del sistema en kilobits por segundo por kilómetro cuadrado</b>                | <b>129</b> |
| <b>Figura 109 Función densidad de probabilidad de los resultados de tráfico en Kbps/Km2 y curva normal</b>                         | <b>129</b> |
| <b>Figura 110 Gráfica de distribución normal ajustada a resultados de simulación para la <math>E_b / N_0</math> media</b>          | <b>130</b> |
| <b>Figura 111 Mapa de mejor enlace del sistema con 15 celdas de tres sectores</b>  | <b>132</b> |
| <b>Figura 112 Estado del sistema al finalizar la simulación</b>  | <b>133</b> |
| <b>Figura 113 Valores del factor Fm al final de la simulación</b>  | <b>133</b> |
| <b>Figura 114 Evolución de las llamadas y el <math>E_b / N_0</math> en la celda No.5</b>   | <b>134</b> |
| <b>Figura 115 Evolución de llamadas y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.6</b>  | <b>135</b> |
| <b>Figura 116 Evolución de las llamadas y el <math>E_b / N_0</math> en la celda No.31</b>  | <b>136</b> |
| <b>Figura 117 Evolución del total de llamadas y el valor <math>E_b / N_0</math> medio para el sistema</b>                          | <b>137</b> |
| <b>Figura 118 Evolución de las llamadas de datos a 384Kbps y el <math>E_b / N_0</math></b>   | <b>137</b> |
| <b>Figura 119 Evolución de la capacidad en Kbps por kilómetro cuadrado</b>   | <b>138</b> |
| <b>Figura 120 PDF de los resultados de simulación para el tráfico en Kbps/Km2 y la distribución normal.</b>                        | <b>138</b> |
| <b>Figura 121 Mapa de mejor enlace para el sistema Munich de 15 celdas</b>   | <b>139</b> |
| <b>Figura 122 Llamadas y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.1 y llamadas en las celdas vecinas</b>                              | <b>140</b> |
| <b>Figura 123 Evolución de llamadas y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.6</b>  | <b>141</b> |
| <b>Figura 124 Evolución de llamadas y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.7</b>  | <b>141</b> |
| <b>Figura 125 Evolución de llamadas y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.11</b>   | <b>142</b> |



|   |            |
|---|------------|
| <b>Figura 126 Resultados de <math>E_b / N_0</math> contra recta de distribución normal para la celda No.6</b>   | <b>143</b> |
| <b>Figura 127 Resultados de simulación contra curva normal en la celda No.6</b>   | <b>143</b> |
| <b>Figura 128 Valores mínimo, máximo y medio para las variables de llamadas, <math>E_b / N_0</math> y <math>F_m</math> durante la simulación</b>        | <b>144</b> |
| <b>Figura 129 Valores mínimo, máximo y medio para las variables de tráfico en Kbps, <math>E_b / N_0</math> y <math>F_m</math> durante la simulación</b> | <b>145</b> |
| <b>Figura 130 Evolución de las llamadas totales del sistema y el valor medio de <math>E_b / N_0</math></b>  | <b>146</b> |
| <b>Figura 131 Función densidad de probabilidad para las llamadas totales de datos</b>   | <b>147</b> |
| <b>Figura 132 Función densidad de probabilidad para los resultados de simulación en Kbps/Km2 y de la dist normal</b>                                    | <b>147</b> |
| <b>Figura 133 Mapa de mejor enlace del sistema</b>  | <b>148</b> |
| <b>Figura 134 Valores máximo, medio y mínimo de llamadas, <math>E_b / N_0</math> y factor <math>F_m</math></b>  | <b>149</b> |
| <b>Figura 135 Evolución de llamadas de voz y <math>E_b / N_0</math> para la celda No.6</b>  | <b>150</b> |
| <b>Figura 136 Evolución de llamadas de voz y datos en la celda No.16</b>  | <b>151</b> |
| <b>Figura 137 PDF del <math>E_b / N_0</math> en la celda No.16</b>  | <b>151</b> |
| <b>Figura 138 Evolución de llamadas en curso y <math>E_b / N_0</math> para la celda No.22</b>   | <b>152</b> |
| <b>Figura 139 Evolución del factor Fm para la celda No.22</b>   | <b>153</b> |
| <b>Figura 140 Evolución de las llamadas en curso y el <math>E_b / N_0</math> en la celda No.23</b>  | <b>154</b> |
| <b>Figura 141 Evolución de las llamadas en curso de la celda No.14 y la celda No.33 contra <math>E_b / N_0</math> de la celda No.23</b>                 | <b>154</b> |
| <b>Figura 142 Evolución en el tiempo de llamadas y <math>E_b / N_0</math> en la celda No.30</b>   | <b>155</b> |
| <b>Figura 143 Evolución del total de llamadas en el sistema y valor medio de <math>E_b / N_0</math></b>   | <b>156</b> |
| <b>Figura 144 Distribución normal y resultados de simulación para llamadas totales de voz</b>   | <b>157</b> |
| <b>Figura 145 PDF de la simulación y de la distribución normal</b>  | <b>157</b> |
| <b>Figura 146 Recta de distribución normal y resultados de simulación para datos totales</b>  | <b>158</b> |
| <b>Figura 147 PDF de la simulación y de la distribución normal para llamadas de datos</b>   | <b>158</b> |
| <b>Figura 148 Evolución de las llamadas totales para el sistema 1(Hata) y el sistema 2 (Univalencia)</b>  | <b>160</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Figura 149 Evolución en el tiempo del <math>E_b / N_0</math> promedio para los dos sistemas que se comparan</b>                       | <b>161</b> |
| <b>Figura 150 Evolución en el tiempo de las llamadas totales para los dos sistemas</b>   | <b>162</b> |
| <b>Figura 151 Evolución en el tiempo de la <math>E_b / N_0</math> promedio para los dos sistemas</b>                                     | <b>163</b> |
| <b>Figura 152 Evolución del total de llamadas para los sistemas de 6 y 14 celdas</b>   | <b>164</b> |
| <b>Figura 153 Evolución del <math>E_b / N_0</math> promedio para los sistemas de 6 y 14 celdas</b>                                       | <b>164</b> |
| <b>Figura 154 Evolución del total de llamadas para el sistema omnidireccional y el sistema con tres sectores</b>                         | <b>165</b> |
| <b>Figura 155 Evolución del <math>E_b / N_0</math> promedio para el sistema omnidireccional y el de tres sectores</b>                    | <b>166</b> |
| <b>Figura 156 Evolución de las llamadas totales para el sistema omnidireccional y el de seis sectores</b>                                | <b>167</b> |
| <b>Figura 157 Evolución del <math>E_b / N_0</math> promedio para el sistema omnidireccional y el de seis sectores</b>                    | <b>167</b> |
| <b>Figura 158 Evolución del total de llamadas para el sistema con patrón regular y el sistema con patrón irregular</b>                   | <b>168</b> |
| <b>Figura 159 Evolución en el tiempo del <math>E_b / N_0</math> para el sistema con patrón irregular y el sistema con patrón regular</b> | <b>169</b> |

## LISTA DE TABLAS

|   |            |
|---|------------|
| <b>Tabla 1 Matriz de incidencias para un sistema móvil</b>                                    | <b>17</b>  |
| <b>Tabla 2 Capas de información del modelo de simulación</b>                                  | <b>22</b>  |
| <b>Tabla 3 Resumen de resultados de simulaciones</b>  | <b>58</b>  |
| <b>Tabla 4 PIRE para las celdas en el sistema</b>   | <b>115</b> |
| <b>Tabla 5 Potencias de celdas en el sistema</b>  | <b>131</b> |
| <b>Tabla 6 Capacidad de los diferentes escenarios simulados y sus invariantes topológicos</b> | <b>177</b> |

## AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer a la Universidad Icesi por el tiempo para desarrollar esta tesis, al director de esta tesis, Catedrático Narcís Cardona Marcet por su paciencia y consejos a distancia, y a mi esposa Patricia por su apoyo incondicional durante los días dedicados a terminar este trabajo y por su valiosa ayuda en algunos aspectos gráficos del documento.

# Capítulo 1

## INTRODUCCION

El análisis de capacidad en los sistemas celulares, y en particular en los sistemas basados en CDMA, no es de ninguna forma algo nuevo, pues este tema ha preocupado a los diseñadores desde los primeros tiempos de la telefonía móvil, y exactamente fue el problema de capacidad y limitación del espectro radioeléctrico el que llevó al desarrollo de los sistemas móviles celulares.

En el caso de los sistemas CDMA, se dio un gran paso al tratar de maximizar el número de usuarios en un sistema utilizando la misma frecuencia radioeléctrica, pensando inicialmente que al desaparecer la idea de cluster como se maneja en los sistemas FDMA y TDMA se iban a obtener grandes beneficios en planificación y maximización de capacidad. Finalmente el objetivo de un sistema móvil es cubrir la mayor área posible con el menor número de estaciones base y obteniendo la máxima capacidad, cosa que de antemano se sabe no es fácil.

Al hacer una revisión de trabajos dedicados al análisis de capacidad, empezando por el de Gilhousen, Viterbi et al.[2], y siguiendo por otros tantos como Dahlman[11] y Sundelin[14], se encontró un punto común a todos estos trabajos, tal vez con la excepción de Hoppe [15], posterior al inicio de esta tesis. Dicho punto común era la simplificación de modelo de propagación y la forma geométrica de las celdas en el sistema, para tratar de simplificar los cálculos matemáticos, y sin embargo éstos eran lo suficientemente complejos para requerir ayudas numéricas en su solución.

Actualmente, es común la utilización de herramientas informáticas de planificación de sistemas móviles, aunque en el mercado estas herramientas varían en precio y posibilidades. En los sistemas que se encuentran actualmente en operación, basados en TDMA, como GSM y EIA/TIA-136, uno de los problemas que ayudan a resolver estas herramientas es el cálculo más o menos preciso de coberturas, y la asignación de canales teniendo como restricción la interferencia co-canal ó SIR (Signal to Interference Ratio), que es factor que limita a los sistemas de primera y segunda generación.

El desarrollo en los últimos años de las herramientas de planificación basadas en computadores, algunas de ellas también basadas en GIS como DC-Cell y

Cell-View, pone a nuestra disposición elementos adicionales para el análisis de capacidad y posible optimización de sistemas móviles en un entorno que puede ser más aproximado a la realidad de los sistemas móviles, y principalmente los sistemas que combinan macro celdas y micro celdas en entornos urbanos complejos.

Sobre el asunto de cálculos de coberturas, se ha trabajado intensamente para desarrollar modelos cada vez más precisos, que tengan en cuenta la información real de la topología del terreno, como son alturas de edificios, ancho de calles, entre otros factores, con resultados como los obtenidos en el marco del proyecto COST-231 [75]. Al contar con cálculos de coberturas más precisos, es más fácil también predecir adecuadamente la interferencia co-canal y por consiguiente hacer una planificación más ajustada a la realidad del sistema una vez entre en funcionamiento.

Sobre el asunto de la asignación de canales, también se ha trabajado intensamente en varios frentes, pensando especialmente en los sistemas de múltiples capas. Algunos resultados de estos trabajos han sido el resultado del proyecto COST-259 [77].

Para la tercera generación de sistemas móviles celulares, el mecanismo de acceso al canal que predomina en las normas es el CDMA, en alguna de sus variantes. En Europa se ha desarrollado el sistema UMTS, basado en WCDMA con un ancho de banda de 5MHz, y en América se ha propuesto el CDMA-2000, basado en CDMA multiportadora, que para la tercera generación tendrá un ancho de banda de 3.75 MHz. Cualquiera que sea la versión que se utilice en una red de radio, las restricciones de planificación son significativamente diferentes, puesto que aparecen restricciones propias de CDMA como el efecto de respiración, y factores como los múltiples servicios con diferentes requerimientos de carga sobre el sistema.

Para los sistemas de tercera generación, la cobertura está asociada con el tráfico del sistema por el mecanismo de respiración, y por consiguiente la capacidad y la cobertura están relacionadas. Esto hace que la planificación de sistemas de tercera generación basados en CDMA se convierta en un proceso dinámico que requiere mecanismos más elaborados que los que se emplean actualmente para TDMA.

Aunque el proceso de planificación en tercera generación sea bien diferente al empleado en la segunda generación, los requerimientos básicos de un sistema móvil - como son cobertura y capacidad - se mantienen, es decir, sigue siendo prioritario obtener la mayor área de cobertura, la mayor capacidad y con el menor número de estaciones base posible.

Sobre la cobertura, es posible emplear las herramientas y los modelos existentes con el fin de lograr una predicción inicial de cobertura adecuada, y a

esta predicción inicial incorporarle luego los efectos dinámicos relacionados con el límite de capacidad “suave” asociado a los sistemas CDMA.

Sobre la capacidad, esta está limitada por la interferencia generada por los usuarios activos en el sistema en un determinado instante, y que se cumplan los requerimientos de relación portadora a interferencia ó su equivalente en banda base, la relación  $E_b / N_0$  . El asunto entonces es lograr una estimación confiable de la capacidad media de un sistema CDMA en condiciones cercanas a la realidad de lo que será el sistema en operación.

Hasta ahora, los mecanismos de estimación de capacidad reportados en la literatura están basados en sistemas ideales con coberturas hexagonales o circulares y con condiciones fijas, lo que no se aproxima a la realidad en la mayoría de los sistemas urbanos, y especialmente en los sistemas micro celulares. Algunas técnicas de planificación sugeridas en la literatura [59] emplean simulación Montecarlo, pero con tiempos de cálculo demasiado largos y requerimientos de memoria muy altos, y adicionalmente empleando coberturas circulares o geoméricamente simplificadas. Se han propuesto otras alternativas, con el fin de reducir los tiempos de cálculo, como la reducción del tamaño de la red dividiéndola en sub-redes o la reducción de las ecuaciones de asignación de BS-MS, aproximaciones en las que se sacrifica precisión [77 pp.421-425].

Recientemente, el marco del proyecto COST-273, se ha propuesto un escenario de referencia para simulaciones de UMTS, basado en ambientes del mundo real [74] , que está acorde a lo propuesto en esta tesis en lo que respecta a la utilización de datos geográficos, distribuciones de tráfico y mapas de propagación basados en cartografía real.

Esta situación es la que ha motivado el desarrollo de esta tesis, pensando en herramientas adicionales a las existentes en la actualidad, que ayuden en la planificación de sistemas móviles de tercera generación, y en sistemas de generación 2.5 basados en CDMA. Para ello se emplea una herramienta de planificación basada en GIS, que permite manejar cartografía tridimensional muy precisa, y a su vez incorpora modelos de propagación que hacen uso de dicha información cartográfica.

La presente tesis tiene como principal objetivo el estudio de sistemas CDMA sobre entornos urbanos reales, modelados mediante cartografía 3D. Para ello se utilizan herramientas como Cell-View, Matlab y algunos programas propios desarrollados para esta tesis, con las que se realizan simulaciones de los mecanismos de acceso radio, tanto los que tienen que ver con la propagación, como los que regulan la admisión de llamadas a cada celda en el sistema. Con base en esas simulaciones se analizan parámetros de calidad de los sistemas en términos de capacidad y calidad.

Lo que se pretende entonces con esta tesis es analizar la capacidad de los sistemas CDMA y en particular los sistemas WCDMA, empleando un modelo de simulación bi-dimensional, que emplea coberturas calculadas con diferentes modelos de propagación y los mapas de mejor enlace para calcular interferencias y analizar los diferentes parámetros que van a afectar la capacidad en un sistema CDMA, o en general a cualquier sistema celular

La tesis tiene dos componentes principales, uno basado en simulaciones dinámicas empleando métodos Montecarlo, que permite analizar el comportamiento de un sistema CDMA en el tiempo, y otro basado en el uso de la dinámica poliédrica originada en los trabajos de Atkin, en la que usan invariantes topológicos del sistema para predecir cualitativamente la capacidad del sistema.

La herramienta de simulación dinámica, permite evaluar el comportamiento de un sistema UMTS ó un sistema CDMA bajo diferentes condiciones de tráfico y diferentes tipos de servicio, y evaluar el límite de capacidad para cada uno de ellos. El componente de dinámica poliédrica permite obtener una comparación de capacidad entre dos o más sistemas de una forma rápida, antes de iniciar un proceso de optimización o simulación.

El documento está organizado de la siguiente forma:

En el Capítulo 2 se hace una descripción de las herramientas utilizadas en la tesis, haciendo un mayor énfasis en el tema de la dinámica poliédrica.

En el Capítulo 3 se hace una descripción de los escenarios empleados para las diferentes simulaciones y se hace una descripción del modelo por capas desarrollado para esta tesis, y que permite evaluar el comportamiento de un sistema CDMA o WCDMA en forma dinámica y para diferentes condiciones de tráfico y servicios.

En el Capítulo 4 se hace una revisión a la literatura existente sobre capacidad en sistemas CDMA y se hace un repaso de los conceptos analíticos para estimación de capacidad en sistemas de una celda y múltiples celdas. Finalmente se hace un ejercicio de estimación de capacidad para dos sistemas ideales y se comparan estos resultados con los que arroja la simulación, con el fin de validar el modelo propuesto.

En el Capítulo 5 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes sistemas considerados sobre las ciudades de Munich y Madrid. Se hace una comparativa en el apartado 5.5 donde se revisan diversos factores que pueden afectar la capacidad y el comportamiento de CDMA, como son el modelo de propagación, el número de celdas, la sectorización y el patrón celular ajustado a tráfico. En el apartado 5.7 se hace un análisis cualitativo de los resultados de vector de estructura obtenido para los diferentes sistemas y su significado, y



en el apartado 5.7.3 se hace una comparativa de los invariantes topológicos de cada sistema simulado y su respectiva capacidad, con el fin de establecer una relación entre el análisis por dinámica poliédrica y la capacidad de sistemas CDMA y WCDMA.

## Capítulo 2

### HERRAMIENTAS

#### 2.1 CELLVIEW

Cellview es una herramienta desarrollada por el Grupo de Comunicaciones Móviles (MGC) del Departamento de Comunicaciones (DCOM) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

La herramienta CellView abarca numerosas facetas de las radiocomunicaciones relacionadas con las Comunicaciones Móviles, entre las que se pueden englobar el cálculo de coberturas de potencia, la obtención de algoritmos de propagación adecuados tanto para entorno urbanos como rurales, estudios para las diferentes generaciones de la telefonía móvil, entre otros

CellView se ha desarrollado sobre un Sistema de Información Geográfico (SIG), llamado ArcView de la compañía ESRI. Este hecho dota a la aplicación de una gran versatilidad, en cuanto a la gestión de mapas (tanto urbanos como rurales) que son uno de los puntos de partida más importantes para las funciones que componen el programa.

Así mismo, se dispone de la gran ventaja que suponen los distintos formatos de representación de los resultados, como son los grids de potencia o los grids de best-server. Un grid es un formato de datos matricial de ArcView, en el cual la información se relaciona con una imagen dividida por una cuadrícula. A cada elemento de la cuadrícula se le asocia un valor correspondiente a la información que represente el tema. Este tipo de datos, permite que se puedan obtener muchos resultados tratando cada grid (suponer una cobertura de potencia) como un elemento único, además de poder obtener el valor de cada uno de sus elementos por separado.

El conocimiento del SIG, que es base para CellView, hace que el aprendizaje necesario para poder manejar CellView sea mínimo.

El principal objetivo de CellView es que el software pueda ser utilizado como una herramienta de planificación de redes celulares, allá donde sea necesario. Por ahora, sólo se limita a realizar planificaciones sobre los sistemas desarrollados en España, pero se puede evidenciar la capacidad de

adaptabilidad que tiene la herramienta que se está desarrollando, como lo muestran algunas pruebas realizadas en Colombia.

Se ha añadido la información tridimensional (alturas de terreno y edificios) en los procesos de estimación de pérdidas, con lo cual la mejora producida sobre otras aplicaciones es bastante palpable. De hecho, se comprueba que la representación de los sistemas ya no se acerca tanto a la de los sistemas ideales, sino que es mucho más real. La Figura 1 muestra la estructura general de CellView y DC-Cell, la versión Unix de herramienta de planificación del MGC.

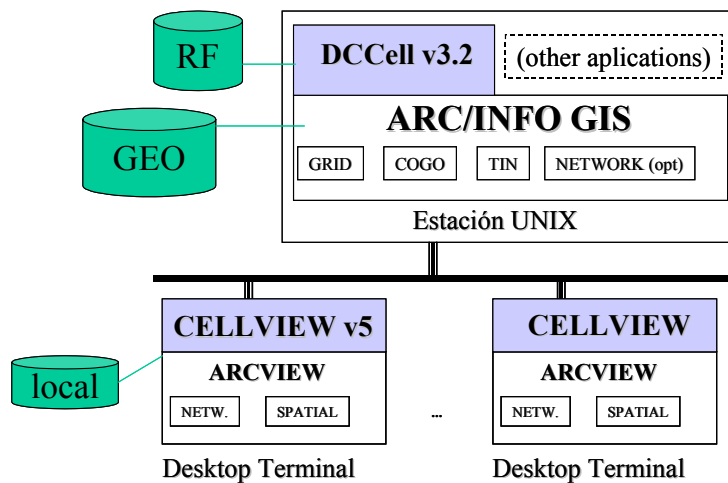


Figura 1 Estructura de Cellview

También se considera como objetivo propio de CellView, el intentar convencer a los usuarios de que montar una herramienta de planificación sobre un sistema de información geográfico, proporciona un cúmulo de ventajas que favorecen la realización de tareas y la claridad de los resultados.

CellView incorpora seis modelos de propagación para entornos macro celulares y dos modelos micro celulares desarrollados por el MGC de la Universidad politécnica de Valencia, lo que la hace una herramienta bastante versátil para los objetivos de esta tesis. También incorpora patrones de radiación de antenas, que permiten realizar estimaciones de propagación omnidireccionales o sectorizadas.

### 2.1.1 Módulo de Planificación UMTS en CellView

Los sistemas de 3ª generación pretenden prestar unos servicios que hasta ahora eran imposibles con los sistemas de 2ª generación. Entre estos servicios se encuentran aquellos de datos conmutados y MultiMedia a distintas

velocidades. Se intenta, por tanto, conseguir una red con una mayor versatilidad en cuanto al tipo de servicios que sea capaz de prestar.

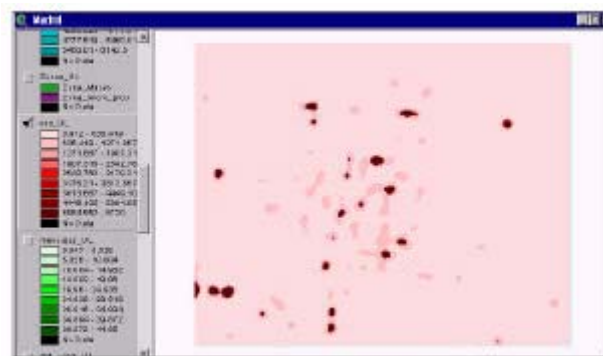
Este hecho provoca que la planificación para el sistema UMTS no sólo se base en cálculos radioeléctricos, sino que dependa en mucha mayor proporción de la distribución del tráfico en relación con los servicios que el operador desee proporcionar.

El módulo de planificación UMTS de CellView hace uso de estimaciones de tráfico bien facilitadas por el UMTS Forum o bien facilitadas por el usuario, para a crear los mapas de tráfico asociado a cada tipo de servicio.

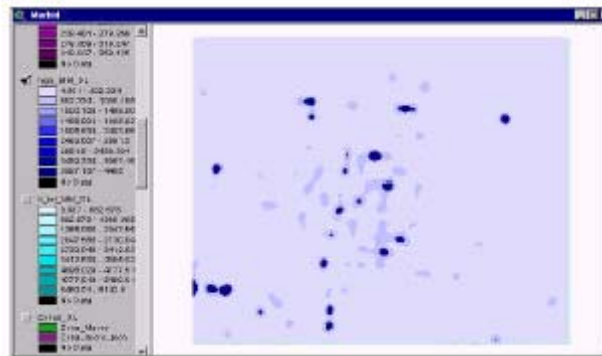
En la herramienta existe una clasificación zonal del entorno, y las estimaciones de tráfico dependen directamente de esta clasificación zonal.

Para obtener esta clasificación zonal, se ha hecho uso de unos mapas de densidad de población, de densidad de empresas y de alturas de los edificios.

Combinando la información geográfica de las zonas con la estimación de tráfico, se logra obtener unos mapas de tráfico asociado a cada tipo de servicio como los que se muestran a continuación:



**Figura 2 Mapa de tráfico para el servicio de voz en el up-link**



**Figura 3 Mapa de tráfico para el servicio High Multimedia en el Down-Link**

En total se obtienen tantos mapas de tráfico como tipos de servicio. Uno por cada tipo de servicio y tipo de enlace (UpLink o DownLink) se consideren.

Otro aspecto que se tiene en cuenta en el módulo de planificación UMTS es el concepto de la jerarquía asociada a dicho sistema. En estos sistemas, las distintas jerarquías de estaciones base (macros, micros y picos) pueden coexistir en las mismas zonas, pero a cada una de ellas se le asignará una determinada parte del tráfico. Se puede expresar esta "*parte del tráfico*" como un porcentaje el cual se podrá variar dependiendo de las necesidades del operador. El UMTS Forum también ha realizado una estimación de estos porcentajes [76].

Con todos estos datos se puede estimar la cantidad de tráfico que deben cubrir cada uno de los niveles jerárquicos o capas de la red celular y realizar una distribución de celdas. La distribución de celdas debe tener en cuenta las restricciones de cobertura y capacidad. Las restricciones de cobertura se podrán observar calculando las celdas y simulando los sistemas celulares con la herramienta.

Las restricciones en cuanto a capacidad vienen marcadas por unos datos que se encuentran disponibles en el UMTS Forum [76].

A partir de la capacidad, el porcentaje de carga con el que se planifique, y el tráfico estimado en la zona, se podrá obtener un radio para la distribución de las celdas.

Esta distribución de las celdas puede ser de dos maneras:

- Regular por zonas: se utilizan patrones celulares regulares que tendrán distinto radio en función de la densidad de tráfico.
- Irregular: las celdas tendrán un tamaño que (pudiendo variar entre los límites marcados por las restricciones antes indicadas) dependerá del tráfico local. Lo que se intenta conseguir es que todas las celdas cursen el mismo tráfico, es decir, tengan la misma carga.

Una vez obtenidos estos patrones, se deben calcular las coberturas de aquellos *sites* que han sido marcados por el patrón celular. Con estas coberturas se creará un sistema, en el cual se observarán las restricciones radioeléctricas.

Estas restricciones serán las causantes de que alguna de las celdas no sea significativa en el sistema o que sea demasiado significativa. Haciendo uso de una de las funciones de CellView, se podrá obtener el tráfico que va a cubrir cada una de las celdas del sistema a partir del mapa de Best-server del sistema y del mapa de tráfico que el usuario desee.

## **2.2 MATLAB**

MATLAB es una herramienta bien conocida en el medio académico por su versatilidad y su capacidad de visualización en computador. La principal característica de Matlab que se ha empleado en esta tesis es su alta capacidad y facilidad en la manipulación de matrices, pues los programas desarrollados para las simulaciones realizadas se simplifican notablemente al manipular matrices como si fueran variables escalares.

En las simulaciones se utiliza Matlab básico, es decir que no se requiere de ningún toolbox adicional para ejecutar las simulaciones.

## **2.3 DINÁMICA POLIÉDRICA Ó Q-ANÁLISIS**

### ***2.3.1 Introducción***

Como ya se ha mencionado en el Capítulo 1, los sistemas de tercera generación basados en WCDMA plantean nuevos retos en el proceso de planificación, al ser sistemas dinámicos limitados por interferencia, y cuya cobertura varía de acuerdo a la carga de tráfico. Esta situación implica desarrollar nuevas herramientas de planificación y mecanismos para estimar la capacidad media de un sistema CDMA o WCDMA.

Posiblemente uno de los aspectos que puede complicar la estimación de capacidad es la forma irregular de las coberturas, tanto en sistemas macro

celulares como micro celulares, pues las herramientas analíticas conocidas se basan en geometrías de celdas simplificadas.

La topología es una disciplina que intenta formalizar matemáticamente algunos conceptos geométricos, independiente de su forma física, a partir de lo que se llama invariantes topológicos. Dentro de la topología, la topología combinatoria y una parte de ella, la dinámica poliédrica, puede proporcionar herramientas de análisis poderosas que independicen el comportamiento de un sistema celular de la forma física de sus coberturas y lo exprese en términos de Inter.-relaciones. A continuación se hace una descripción de conceptos sobre dinámica poliédrica y su relación con el análisis de capacidad.

### ***2.3.2 Limitaciones del modelo actual de estimación de capacidad***

El modelo propuesto por Viterbi et al [2] supone un sistema celular ideal con coberturas circulares. Si se analiza este modelo desde el punto de vista topológico y se compara con lo que ocurre en un caso real, se encuentran varios aspectos a revisar como son:

1. La topología del sistema es fija, mientras que en un sistema real éste puede variar por efecto de la carga, provocando la variación del área de servicio de las celdas, es decir, la respiración celular.
2. El número máximo de vecinos es seis, mientras que en un sistema real no se cumple necesariamente esta restricción.
3. Supone una topología de terreno ideal para cualquier caso, mientras que en un caso real la topología del terreno varía para cada situación.
4. La estimación de capacidad es ideal y siempre se va a obtener un máximo de capacidad. Esto no es necesariamente cierto en un sistema real e irregular.

### ***2.3.3 Modelos de propagación***

La razón principal por la que se ha desarrollado el modelo que nos ocupa es analizar sistemas celulares bajo condiciones un poco más reales que las empleadas en la literatura hasta ahora, donde se asume un sistema ideal con coberturas circulares. En un entorno urbano lo normal es que las coberturas, ya sean macro celdas o micro celdas sean bastante irregulares dependiendo de la topología del terreno. A la hora de planificar un sistema de tercera generación, es importante no solamente maximizar el área de cobertura sino

también maximizar la capacidad, por lo que se presume que debe existir una relación entre el modelo de propagación a emplear y la capacidad del sistema.

Aunque existen muchos modelos de propagación, se ha limitado este análisis a unos pocos modelos que permitan analizar este supuesto con un buen grado de generalidad, es decir comparar sistemas con coberturas circulares (modelo de Hata) y sistemas con coberturas que tienen en cuenta la topología del terreno, en este caso el modelo de la Universidad Politécnica de Valencia, basado en el proyecto COST-231 e incluido en [75, cap.4].

### ***2.3.4 Topología***

Definición:

Topología física dedicada al estudio de la forma y constitución de los terrenos.

Topología: rama de las matemáticas que estudia las propiedades del espacio y de los conjuntos de funciones.

La topología define las nociones de: **vecindad, adherencia y filtro**, que permiten formalizar las nociones intuitivas de **margen, límite, frontera y continuidad**.

Tanto la **topología física** como la **topología del sistema** son de suma importancia en el análisis de capacidad de sistemas móviles de telecomunicación.

Uno de los objetivos de la topología es definir algunos criterios de semejanza diferentes a los que se manejan en geometría, y de esta forma separar la idea de forma que se maneja en geometría de la idea abstracta de forma a partir de características matemáticas e invariantes topológicos.

### ***2.3.5 Q-análisis o dinámica poliédrica en el análisis de capacidad***

Se puede definir la capacidad en un sistema CDMA o WCDMA como el número de usuarios (o el número de bits por segundo) que hacen que la relación de señal a interferencia llegue a un punto en el que la comunicación no tiene una calidad aceptable. Esto incluye tanto los usuarios que se encuentran dentro de la celda y su potencia es controlada por la estación base, como los usuarios fuera de la celda y cuya potencia es controlada por otras estaciones base.

Esto se suele expresar en la literatura en términos de la interferencia producida por los usuarios de la celda (Interferencia intracelda) y la



interferencia producida por los usuarios que están por fuera de la celda (Interferencia intercelda), relacionados mediante el factor llamado factor  $F_m$ .

De alguna forma, todos los parámetros que pueden influir sobre la capacidad en un sistema CDMA están asociados a cuanto interferencia se produce o deja de producir al modificar tal o cuál parámetro, ya sea por efecto del diseño del sistema o por el simple comportamiento aleatorio de los usuarios dentro del sistema y las variables que afectan la señal de radio. En su forma más simple, la capacidad de un sistema CDMA está dada por la Eq.30, que se describe a continuación.

$$N_{max} \approx \frac{1}{(1 + F_m)} + \frac{SG}{(1 + F_m) \cdot \left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{req}} \quad \text{Eq. 1}$$

Donde el valor de SG es fijo y está dado por el servicio (voz, datos, etc.) y  $E_b/N_0$  también es fijo y depende igualmente del servicio. El parámetro variable en esta ecuación es el  $F_m$ , que depende de la distribución de usuarios y de la relación entre las coberturas o celdas que conforman el sistema. Si se supone un control de potencia perfecto o casi perfecto, el valor de la interferencia intracelda es fácilmente predecible para un determinado número de llamadas en una celda. En cambio, el valor de la interferencia intercelda depende de factores asociados a la **estructura** del sistema, y es aquí donde el q-análisis o la dinámica poliédrica es una herramienta que permite estimar la capacidad y optimizar dicha capacidad.

El q-análisis permite formalizar un sistema en términos de las relaciones entre los elementos que lo conforman o símplices, que al relacionarse forman un *complejo simplicial*. Se puede decir entonces, desde este punto de vista descrito por Atkin, que la estructura de un sistema se representa en forma geométrica y algebraica como un complejo simplicial, formado por los símplices de dimensiones particulares, dependiendo esto último de la información inicial del sistema y el nivel de su descripción matemática. El análisis del modelo del sistema se hace en cada nivel dimensional a través de las *cadena de conectividad* las cuales conectan los símplices.

Símplice:

Sea  $\{a_0, \dots, a_n\}$  un conjunto geoméricamente independiente en  $R^N$ . Se define el n-símplice (o n-simplex)  $\sigma$  abarcado por  $a_0, \dots, a_n$  como el conjunto de todos los puntos  $x$  de  $R^N$  tal que:

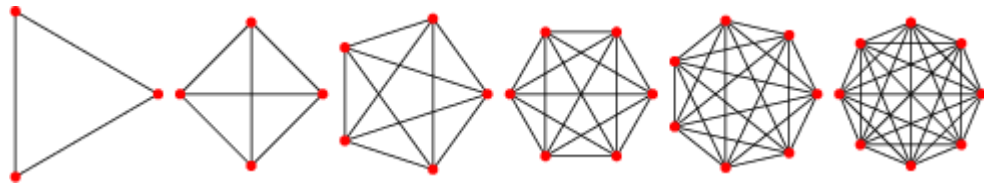
$$x = \sum_{i=0}^n t_i a_i, \text{ donde } \sum_{i=0}^n t_i = 1$$

y  $t_i \geq 0$  para todo  $i$ . Los números  $t_i$  están unívocamente determinados por  $x$ ; estos son llamados coordenadas baricéntricas del punto  $x$  de  $\sigma$  con respecto a  $a_0, \dots, a_n$ .

Se puede también definir un *símplice* en términos de la generalización de una región tetraédrica del espacio a  $n$  dimensiones. La frontera de un  $n$ -*simplex* tiene  $(n+1)$  0-caras (vértices),  $n(n+1)/2$  1-caras (bordes), y en general  $\binom{k+1}{i+1}$   $i$ -caras, donde  $\binom{n}{k}$  es el coeficiente binomial.

El *símplice* recibe dicho nombre por ser el polytopo más sencillo en un determinado espacio.

La definición de polytopo según Munkres [49], es el espacio subyacente de un complejo simplicial. En términos más generales, un polytopo se define como un número de objetos matemáticos relacionados, pero ligeramente diferentes.



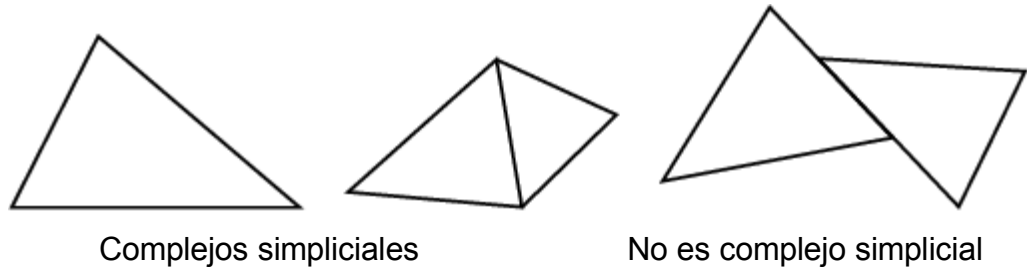
**Figura 4 Grafos para los  $n$ -símplices desde  $n=2$  hasta  $n=7$**

Se define un *complejo simplicial*  $K$  en un conjunto finito  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  de vértices como un sub-conjunto no vacío del súper conjunto de  $V$  con la propiedad de que  $K$  es cerrado bajo la formación de subconjuntos. O sea que si  $\sigma \in K$  y  $\tau \subseteq \sigma$  entonces  $\tau \in K$ . Los elementos de  $K$  se llaman *símplices* o *caras*. La dimensión de un *simplex*  $\sigma$  es igual al número de vértices que lo definen menos 1. La dimensión de  $K$  es la máxima dimensión de todos los *símplices* en  $K$  y se denota como  $\dim K$ . Un *simplex* formado por  $(d+1)$  vértices tiene dimensión  $d$  y se llama un  $d$ -*simplex* ( $\sigma_d$ ). Se puede decir que un *simplex* 0-dimensional es un punto, un *simplex* 1-dimensional es un segmento de línea recta, un *simplex* bi-dimensional es un triángulo, un *simplex* 4-dimensional es un tetraedro, etc.

### 2.3.6 Complejo simplicial

Un complejo simplicial  $K$  en  $\mathbf{R}^N$  es una colección de símplexes en  $\mathbf{R}^N$  tal que:

- (1) Cada cara de un símplex de  $K$  está en  $K$
- (2) La intersección de dos símplexes cualesquiera de  $K$  es una cara de cada uno de ellos.



**Figura 5 Ejemplo de complejos simpliciales y no complejo simplicial**

Lema: Una colección  $K$  de símplexes es un complejo simplicial si y sólo si se cumple lo siguiente:

- (1) Cada cara de un símplex de  $K$  está en  $K$
- (2) Cada par de símplexes diferentes de  $K$  tienen interiores disjuntos.

### 2.3.7 Cadenas, ciclos y fronteras

El Q-análisis se refiere a las relaciones entre elementos de un sistema. Esto lleva a definir el concepto de cadena ó n-cadena.

El grupo  $C_n(X)$  de **n-cadenas** de  $X$  es el grupo abeliano generado por los n-símplexes de  $X$ . O sea que cada elemento de  $C_n(X)$  es una suma finita de la forma  $\sum_i m_i \sigma_i$ , donde  $\sigma_i$  son n-símplexes de  $X$  y  $m_i \in \mathbf{Z}$ .

En un sistema celular, un complejo simplicial puede estar definido por un conjunto de usuarios  $U$  en el sistema, y un conjunto de celdas  $C$  que comparten esos usuarios, suponiendo que algunos de ellos se encuentren en las zonas de solapamiento. La forma más simple de representar esto es organizando los dos conjuntos como las filas y las columnas de una matriz llamada *matriz de incidencia* y ver como cada elemento de  $U$  está q-relacionado a

los elementos del conjunto  $C$ . La relación  $q$  es un subconjunto de pares ordenados sobre el producto cartesiano, o dicho de otra forma  $q \subseteq U \times C$ .

### 2.3.8 Matriz de incidencias o matriz Incidente

Un s3mplice se puede representar gr3aficamente, pero a medida que crece el n3mero de dimensiones involucradas, su representaci3n geom3trica se hace m3s compleja. El s3mplice se puede representar por una matriz de incidencias donde los v3rtices del s3mplice son las columnas de la matriz y los bordes o relaciones o cadenas son las filas de la matriz.

Formalmente se define como la matriz  $(0,1)$  que tiene una fila por cada v3rtice y una columna por cada borde, y  $(v, e = 1)$  si y s3lo si el v3rtice incide sobre el borde. Tambi3n se define como la transpuesta de la anterior, que es como se va a definir aqu3.

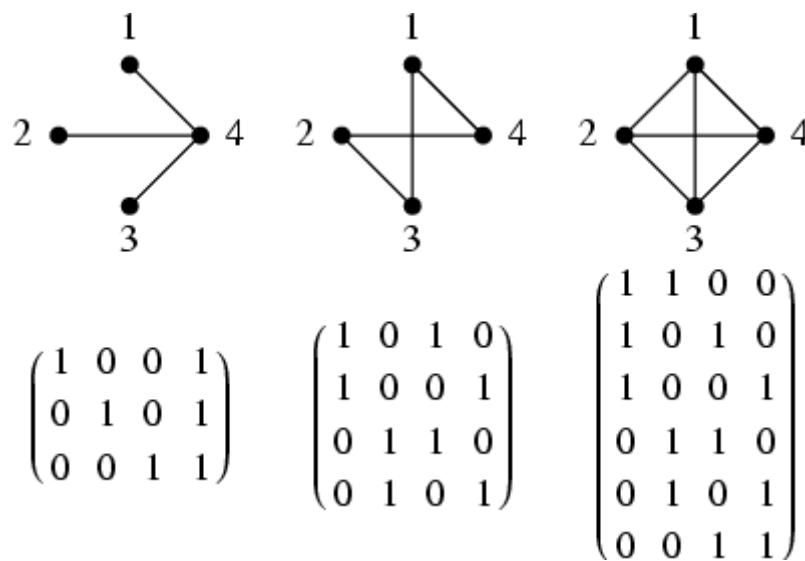


Figura 6 Ejemplo de matrices de incidencia

Si suponemos un ejemplo para un sistema celular, los usuarios se ubican en las filas de la matriz y las celdas que les prestan servicio se ubican en las columnas. Una matriz de incidencias para un sistema con seis coberturas est3 dada por:

| Usuarios | Celdas |   |   |   |   |   |
|----------|--------|---|---|---|---|---|
|          |        | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
|          | 1      | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
|          | 0      | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
|          | 1      | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
|          | 1      | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
|          | 1      | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
|          | 1      | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
|          | 1      | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
|          | 1      | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
|          | 1      | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
|          | 1      | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
|          | 1      | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
|          | 1      | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
|          | 1      | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
|          | 1      | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
|          | 1      | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
|          | 1      | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
|          | 0      | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |

**Tabla 1 Matriz de incidencias para un sistema móvil**

Sin embargo, aunque al definir los usuarios como símplices se puede representar el sistema celular como un complejo simplicial, esta estructura depende de una variable aleatoria en el sistema, que son los usuarios con llamadas activas.

Otra forma de definir el sistema celular puede ser usando una definición diferente para los vértices y los símplices, una que tenga en cuenta las interacciones entre celdas que afectarían la interferencia intercelda. Las representaciones que generalmente entregan las herramientas de planificación, tal como el mapa de mejor enlace y segundo mejor enlace, no muestran sino las interacciones de una y dos dimensiones. Las interacciones en tres y más dimensiones, como son las intersecciones de tres o más coberturas se deben modelar con otro tipo de herramientas. El análisis topológico, y específicamente el q-análisis permite modelar las interacciones en todas las dimensiones posibles.

Específicamente el Q-análisis se extiende hasta determinar el número de clases de equivalencia para la relación de q-conectividad definida en el conjunto de símplices del complejo K. Si dos símplices  $\sigma_p$  y  $\sigma_r$  est n conectados por una q-relación (o q-cadena), entonces están unidos en un componente de q-conectividad,  $q=0\dots\dim K$ .

### 2.3.9 *q*-conectividad:

1. Dos símlices  $\sigma$  y  $\tau$  están *q*-conectados, si existe una secuencia de símlices  $\sigma, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n, \tau$  tal que dos símlices consecutivos comparten una *q*-cara, o sea que tienen al menos  $q+1$  vértices en común. Esta cadena se llama una *q*-cadena.
2. El complejo  $K$  está *q*-conectado si dos símlices cualesquiera en  $K$  de dimensión igual o superior a *q* están *q*-conectados.
3. Un *q*-círculo en  $K$  basado en  $\sigma_0$  es una *q*-cadena que empieza y termina en  $\sigma_0$ . Un *q*-círculo  $\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_n, \sigma_0$  se denota como  $(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_n, \sigma_0) = (\sigma)$ . Su longitud es *n*.

La *q*-conectividad es una relación de equivalencia, y un invariante topológico. Se asocia  $K$  a su *Q*-vector, un vector entero de longitud  $\dim(K)+1$ , cuya *i*-ésima celda es igual al número de clases de *i*-conectividad.

Una vez se tiene el sistema celular modelado como un complejo simplicial, el vector de estructura o *Q*-vector proporciona información acerca de los bloqueos y los niveles de conexión del sistema. Un sistema ideal, como el que muestra en la Figura 7 tiene un *Q*-vector de la forma: [1]. Esto significa que hay una alta conectividad en la dimensión uno, y además la dimensión del complejo que lo representa es uno, pues la máxima dimensión de los símlices que lo forman es uno, como se mostrará a continuación.

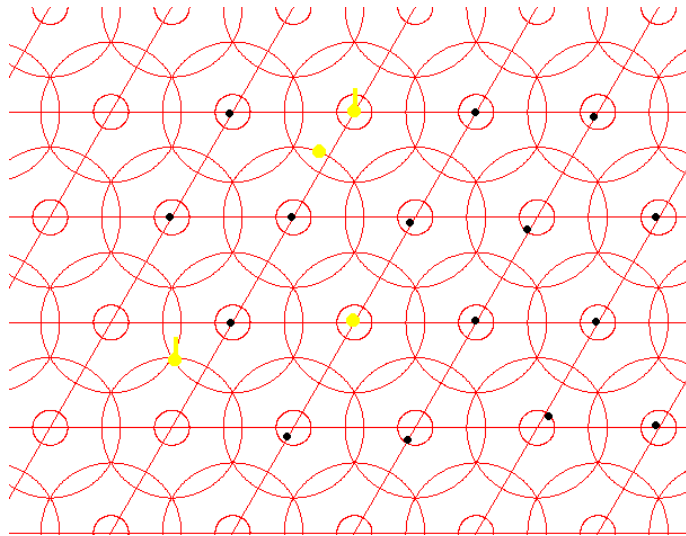
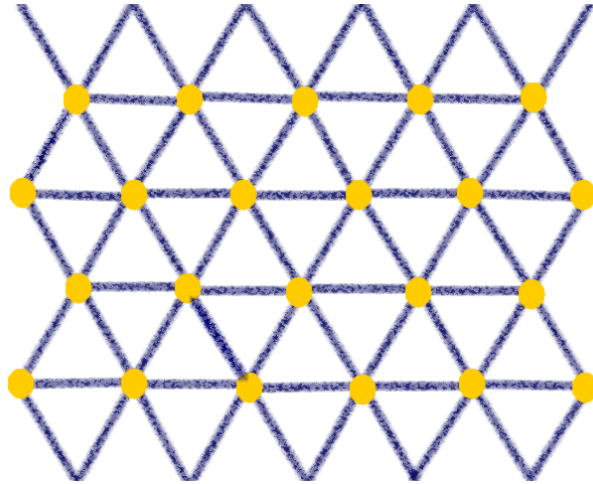


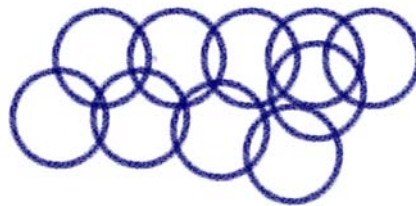
Figura 7 Patrón celular ideal

Para este patrón celular, con traslapes entre dos celdas únicamente, la representación gráfica de su complejo simplicial es la que se muestra en la Figura 8 . En este caso, los vértices son las celdas, que se muestran como círculos y los símlices son las relaciones de traslape entre las celdas. Para este caso sólo se tienen 1-símlices.

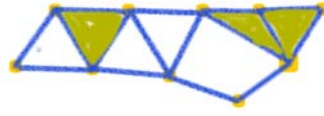


**Figura 8 Complejo simplicial del patrón celular ideal**

Para el siguiente patrón celular, que se muestra en la Figura 9, el cual presenta solapes entre más de dos celdas, el complejo simplicial se representa como muestra la Figura 10.



**Figura 9 Patrón celular con solapes de más de dos celdas**



**Figura 10** Complejo simplicial que representa el patrón celular de la Figura 9.



## Capítulo 3

### ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

#### 3.1 MAPAS DISPONIBLES

Los mapas digitales de terreno con información 3D son un ingrediente importante en el desarrollo de este trabajo. Para el desarrollo de las simulaciones se cuenta con los mapas que incluye la herramienta Cell-View. En dicha herramienta se encuentran los mapas de Munich, Valencia y Madrid.

Sobre cada uno de estos mapas se plantean modelos de sistemas celulares, para realizar simulaciones bajo diferentes condiciones de entorno y con diferentes modelos de propagación.

#### 3.2 DESCRIPCION DEL MODELO

Con el fin de realizar el análisis de capacidad propuesto, se planteará un escenario que modele un sistema celular empleando como materia prima los parámetros típicos encontrados en las herramientas de planificación, como son:

- emplazamientos
- Cobertura
- Patrón celular regular ó irregular
- Modelo de propagación
- Mapa de mejor enlace (best server)

Dados los parámetros de cálculo de una cobertura, como son ubicación del emplazamiento, PIRE, tipo de antena, altura de antena, altura de receptor y modelo de propagación, se obtiene una cobertura calculada en dBm o dBu.

Estas coberturas se almacenan en la base de datos de Cellview y pueden ser empleadas para calcular el mapa de mejor enlace de un sistema celular.

Para crear un sistema celular en Cellview, se seleccionan las coberturas que formarán el sistema, y Cellview calcula el mapa de mejor enlace, entregando una salida en formato raster o matricial.

A partir de esta información obtenida de Cellview, se define un modelo con los siguientes parámetros definidos en términos de “capas de información”. En la se muestra el modelo propuesto y se compara con la propuesta RSSUS del COST-273 [74].

| <b>Modelo Propuesto</b>                | <b>COST-273</b>     |
|--|---------------------|
| Mapa                                   | Geo-Data            |
| Usuarios                               | Tráfico y cobertura |
| Tráfico (Una capa por tipo de tráfico) |                     |
| Movilidad y Handover                   |                     |
| Mejor Enlace (dinámico)                |                     |
| Sitios                                 | Site Locations      |
| Antenas y parámetros                   | Antennas&Parameters |
| Interferencias                         |                     |
| Cobertura                              | Propagation Data    |
| Control de potencia                    |                     |

**Tabla 2 Capas de información del modelo de simulación**

El modelo propuesto se basa en un esquema de capas de información, similar al propuesto en COST-273[74], donde cada capa cumple una función dentro de la simulación, como se explica a continuación.

Mapa. En esta capa se almacena la información cartográfica de la zona de análisis. Esta información se maneja desde Cell-View.

Mejor enlace. Cell-View genera un mapa de mejor enlace, que se emplea para definir los límites de celdas. Este mapa de mejor enlace se dinamiza al incorporar las capas de tráfico e interferencia sobre el sistema, permitiendo visualizar el comportamiento dinámico del sistema.

Sitios. En esta capa se almacena la localización geográfica de los sitios donde se ubican las BS. Esta información forma parte de la estructura de Cell-View.

Antenas y parámetros. Esta capa almacena la información pertinente a tipos de antena, potencia, altura de BS, PIRE y modelo de propagación.

Usuarios. En esta capa se generan los usuarios potenciales del sistema. Para la generación de usuarios se pueden emplear métodos estadísticos basados en distribuciones de probabilidad-como la uniforme-o emplear información demográfica existente.

Tráfico. A partir de la capa de usuarios, se definen varias capas adicionales, una por cada tipo de servicio implementado, con el tráfico del sistema. Asociado al tráfico del sistema, está la duración de la “llamada” para cada tipo de tráfico. En cada capa de tipo de servicio se pueden emplear diferentes distribuciones estadísticas para generar el tráfico correspondiente. Para el caso de los servicios de voz se ha utilizado la distribución exponencial para modelar los tiempos entre llamadas y la duración de éstas. Para los servicios de conmutación de paquetes se utilizó distribución exponencial en algunos casos, y en otros caso se utilizó una distribución Pareto según la propuesta de Paxon y Floyd [18].

Movilidad y Handover. En esta capa se maneja el modelo de movilidad de usuarios y los eventos asociados al handover según la TS-25.331R4[34].

Interferencias. En esta capa se calculan las interferencias generadas por los usuarios en el up-link sobre cada celda del sistema, partiendo de la información suministrada por la capa de coberturas y la capa de usuarios. La interferencia se calcula a partir de la potencia estimada del usuario y las pérdidas asociadas a cada cobertura en el punto donde se localiza el usuario.

Cobertura. Esta capa almacena la información de señal calculada para cada escenario según el modelo de propagación empleado y los demás parámetros de la capa de antenas y parámetros.

Control de potencia. En esta capa se simulan los parámetros que permiten estimar la potencia de cada usuario en el sistema. Se parte de un control de potencia perfecto para estimar la potencia de cada usuario, y a este se le pueden habilitar mecanismos de variación de potencia debidos a imperfección del mecanismo de control y desvanecimientos.

En la Figura 11 se muestra un esquema que describe gráficamente el modelo empleado para la simulación. Se puede apreciar las diferentes capas que se pueden superponer con diferentes tipos de servicios.

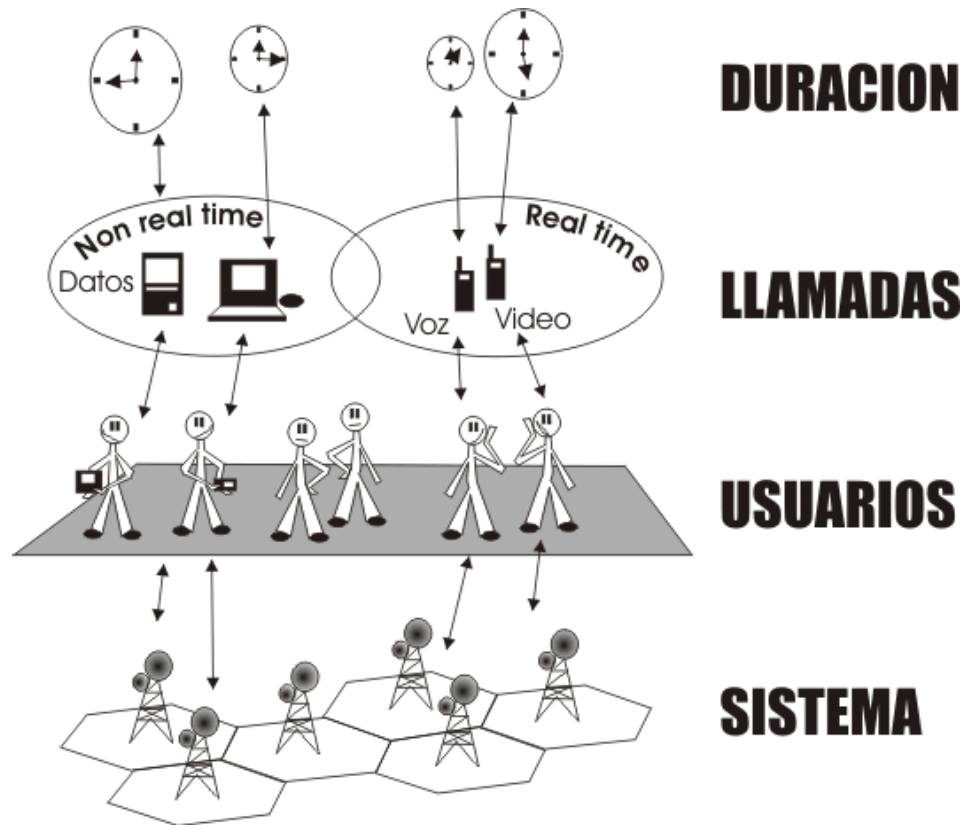
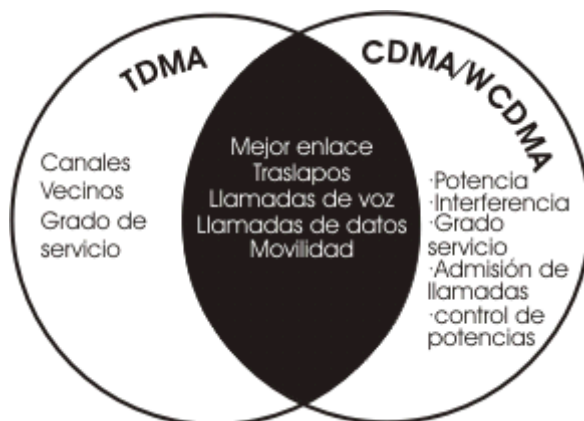


Figura 11 Esquema general del modelo

Se puede dividir el modelo en dos submodelos, y a su vez cada submodelo tiene módulos propios y módulos comunes. Los submodelos son, uno para TDMA y otro para CDMA / WCDMA, dentro de estos submodelos, los módulos comunes son: el de mejor enlace, el de traslapes, llamadas de voz, llamadas de datos a diferente velocidad y el de movilidad. Los módulos propios del submodelo TDMA son el de canales, vecinos y grado de servicio. Para CDMA, los módulos son: potencia, interferencia, grado de servicio, control de potencia, active\_set y soft handover-movilidad.



**Figura 12 Esquema de los módulos que componen la simulación**

Se calcula el estado del sistema en diferentes instantes de tiempo, o sea que se habla de una simulación por eventos discretos del tipo *time – slicing*, o de *unit-time*. La alternativa de emplear simulación orientada por eventos es factible, sin embargo se optó por el mecanismo de *time slicing*, con el fin de reducir la complejidad computacional del modelo, ya que para cada llamada en el sistema se revisa la interferencia que genera el usuario, lo que implica cargar las matrices de coberturas. Entonces, en lugar de generar eventos y revisar el estado del sistema ante cada llamada (evento), se revisa el número de llamadas existentes en un lapso de tiempo y se tratan como si fueran generadas en el mismo instante.

El empleo del time-slicing implica manejar el tiempo de simulación como variable de entorno del sistema, y la definición de esta variable dependerá de la resolución que se quiera en los resultados, especialmente los asociados a usuarios móviles y puede afectar la simulación de los procesos de recursos radio (RRM) y admisión de llamadas, por lo que si se toma un tiempo de simulación muy alto, se pueden bloquear llamadas falsamente. Con el manejo de la variable de tráfico y el tiempo de simulación se resuelve este posible problema.

### **3.3 PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN.**

El modelo toma, en primera instancia, la matriz de *Best Server* que entrega CellView, para obtener el área de cobertura del sistema. Sobre esta matriz, se genera un número aleatorio de usuarios, cualquiera de los cuales está en capacidad de cargar el sistema. Se asume, en primera instancia, que los usuarios no abandonarán la zona de cobertura, por lo cual no se generarán

procesos de *handover* en el sistema. Posteriormente se puede habilitar la capa de movilidad para mover un cierto porcentaje de usuarios en el sistema y simular el *handover* y sus efectos sobre la capacidad. De esta forma es posible analizar un mismo sistema con usuarios estáticos y con usuarios móviles o analizar separadamente el efecto de las llamadas y el efecto de la movilidad y el margen de *handover* sobre el sistema.

En cada instante de tiempo de la simulación se genera un número de llamadas y su duración asociada, de tal forma que se verifica también qué llamadas se liberan en el sistema, siguiendo la distribución que se defina. El mecanismo de admisión de llamadas empleado es por SIR, es decir, se calcula el valor de  $E_b/N_0$  en cada celda y de esta forma se determina si las llamadas generadas en cada instante de tiempo se aceptan o se bloquean: Con esta información de llamadas activas y llamadas bloqueadas, se calcula el grado de servicio (GOS). Con cada una de las zonas de cobertura, se calcula el bloqueo ( $E_b/N_0$ ), a partir de las llamadas generadas y de las liberadas. Se lleva una serie temporal de los datos de bloqueo, para analizar cómo evoluciona el sistema. Con los bloqueos de cada celda, se calcula el bloqueo del sistema, en condiciones “normales”.

Para obtener los demás parámetros requeridos por el sistema, se cargan las coberturas, acomodándolas a una matriz del mismo tamaño del sistema, de tal forma que todas las operaciones que se ejecuten en MatLab tengan la misma referencia. Con las matrices de cobertura en el modelo, se puede calcular solape entre celdas, nivel de señal en diferentes puntos del sistema, relación  $C/I$ ,  $E_b/N_0$ , interferencia intracelda, interferencia intercelda, factor  $F_m$ , pérdidas de propagación, potencia de usuarios y otros factores que se consideren pertinentes.

Para el cálculo del grado de servicio en CDMA se implementa un mecanismo de control de admisión que consiste en calcular la relación  $E_b/N_0$  incluyendo los intentos de llamada en un instante determinado y no aceptar las llamadas si el valor de  $E_b/N_0$  está debajo del mínimo requerido.

### **3.4 MODELADO DEL CANAL RADIO**

#### **3.4.1 Modelos de propagación**

CellView dispone de varios modelos de propagación incorporados, que permiten calcular las coberturas. De los modelos disponibles en CellView, los empleados en las simulaciones son: Okumura-Hata, Univalencia, Saunders-Bonar y el modelo de red neuronal de la UPV.

##### *3.4.1.1 Okumura-Hata*

El modelo de Okumura-Hata, o simplemente modelo de Hata es uno de los modelos mas conocidos para predicción de coberturas en sistemas móviles.

El método de Okumura se basa en medidas realizadas en Japón en servicios móviles en las bandas de VHF (200 MHz) y UHF (453, 922, 1310, 1430, 1920 MHz) en diversas condiciones de terreno y entorno de propagación. Mediante el análisis estadístico de estos datos se presentan curvas que dan la dependencia de la intensidad de campo medio según la distancia y la frecuencia, utilizando como parámetros la altura de las antenas y variables locales para los diversos tipos de ambiente local: urbano, suburbano y áreas abiertas en terrenos casi planos.

Trata también las correcciones para el terreno irregular consideradas terreno inclinado, montañas aisladas, terreno ondulado y mezcla de zona terrestre y marina.

El modelo de Hata está derivado del artículo de Okumura con el fin de que sus resultados puedan ser más fácilmente aplicables, mediante una expresión empírica, así como posibilitar el empleo de computadoras.

Es válido para:

100 – 1500 MHz ( $f_c$ ).

Distancia emisor-receptor: 1 – 20 Km ( $R$ ).

Altura efectiva antena estación base: 30 – 200 m ( $h_b$ ).

Altura efectiva antena estación móvil: 1 – 10 m ( $h_m$ ).

Considera:

- Pérdida de propagación entre antenas isotrópicas.
- Terreno moderadamente llano (casi-plano), no irregular.
- Fórmula estándar para las pérdidas en zona urbana (para otro tipo de terreno habrá que aplicar correcciones).

La expresión para las pérdidas en zona urbana es:

$$L_p(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log R.$$

$a(h_m)$  es el factor de corrección para la altura de la antena del móvil:

- Para ciudad medio - pequeña:

$$a(h_m) = (1.1 \log f_c - 0.7) h_m - (1.56 \log f_c - 0.8).$$

- Para ciudad grande:

$$a(h_m) = 8.29 (\log 1.54 h_m)^2 - 1.1 \quad \text{si } f_c \leq 200 \text{ MHz.}$$

$$a(h_m) = 3.2 (\log 11.75 h_m)^2 - 4.97 \quad \text{si } f_c \leq 400 \text{ MHz.}$$

Las correcciones para otros tipo de área son:

- área suburbana:

$$L_{ps} \text{ (dB)} = L_p \text{ (área urbana)} - 2 [\log (f_c/28)]^2 - 5.4.$$

- área abierta:

$$L_{po} \text{ (dB)} = L_p \text{ (área urbana)} - 4.78 (\log f_c)^2 + 18.33 \log f_c - 40.94$$

donde la altura efectiva de la antena de la estación base se calcula según Okumura

#### 3.4.1.2 Univalencia COST-231

El modelo propuesto por la Universidad Politécnica de Valencia en el proyecto europeo COST-231 es una modificación al modelo de Walfisch-Bertoni.

Este trabajo constituye uno de los muchos que dentro del grupo de trabajo europeo COST-231 se han ido desarrollando en el campo de la predicción de pérdidas de propagación en los últimos años, y que han dado lugar a diversos modelos de predicción para zonas urbanas.

El modelo de Valencia parte del de Walfisch-Bertoni y realiza sobre él ciertas modificaciones que mejoran sus predicciones. Posteriormente, añade cálculos tridimensionales para la aplicación del modelo a las micro células y a los sistemas de banda ancha. Hay que reseñar que el modelo Uni-Valencia presente en CellView considera las mejoras sobre Walfisch-Bertoni y no así los cálculos tridimensionales, por lo cual los resultados que obtendremos de él serán, al igual que para los anteriores, de potencia media recibida o pérdidas medias de propagación.

Este modelo es aplicable a sistemas de comunicaciones móviles en entornos urbanos para frecuencias entre 450 MHz y 1800 MHz y lo podríamos dividir



en dos submodelos, estos son, la mejora sobre Walfisch-Bertoni por un lado, y la aportación tridimensional por otro:

- **Modelo de Propagación sobre edificios.**

Similar al de Walfisch-Bertoni, y por tanto bidimensional y aplicable en condiciones similares a las de aquél. Con este modelo se obtiene una buena estimación del valor medio de la potencia recibida, añadiéndose en relación a Walfisch-Bertoni las siguientes mejoras:

- En cuanto a las pérdidas por difracción sobre edificios, se sugiere la siguiente mejora para  $Q(\alpha)$ :

$$Q(\alpha) = \begin{cases} 2.34 * v^{0.9} & v < 0.38 \\ 1.34 * v^{0.37} & 0.38 < v < 0.7 \\ v^{-0.57} & 0.7 \leq v < 1 \\ 1 & v \geq 1 \end{cases} \quad \text{Eq. 2}$$

donde  $v = \alpha * \sqrt{\frac{d}{\lambda}}$ . La expresión de  $Q(\alpha)$  dada por el modelo de Walfisch-Bertoni es válida para puntos en los que  $v$  sea menor que 0.4. Sin embargo, para medidas realizadas en la ciudad de Valencia se comprobó que más del 60 por ciento de los puntos superaban dicho valor, por lo cual se corrigió 4 como una función con cuatro tramos en la forma aquí expuesta, y que contempla valores mayores que 0.4 para el término mencionado.

Para las pérdidas por difracción final se propone la siguiente expresión alternativa:

$$L_D = \begin{cases} 0 & \text{si } \beta < -0.265 \\ -17 + 10 \log f + 10 \log r - 9e^{-4.7\beta} & \text{si } \beta \geq -0.265 \end{cases} \quad \text{Eq. 3}$$

Con estas modificaciones, la expresión final para las pérdidas de propagación queda así:

$$L = 12.4 + 20 \log Q(\alpha) + 10 \log r - 9 * e^{-4.7\beta} + 30 \log f + 20 \log R$$

Eq. 4

### 3.4.1.3 Saunders-Bonar

Saunders y Bonar publicaron sus modelos en 1994. Uno de los modelos, que en CellView figura como el Saunders-Bonar Uniforme, asume edificios de alturas uniformes y equiespaciados. El segundo modelo, implementado en Cell-View como Saunders-Bonar irregular, implementa el primer modelo con un método para calcular múltiples difracciones, de tal manera que permita hacer predicciones deterministas con alturas y espaciamentos arbitrarios de edificios.

El modelo uniforme se basa en la solución de la integral de campo para múltiples difracciones propuesta por Vogler, para el caso particular ilustrado en la Figura 13, empleando un método de aproximaciones sucesivas para la resolución de la integral.

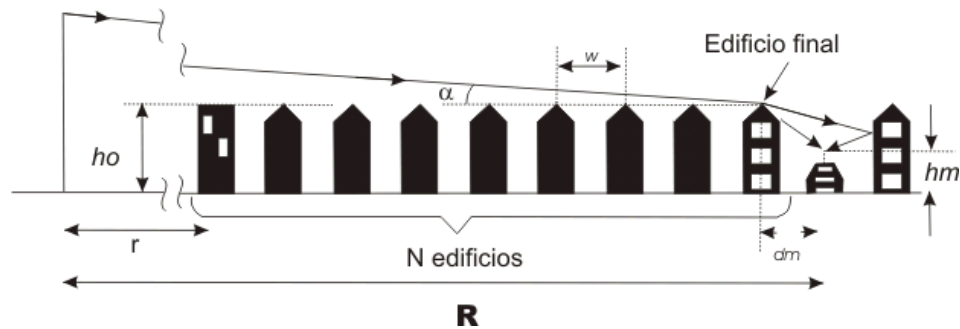
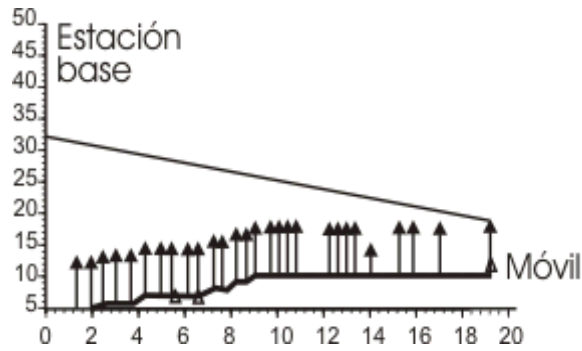


Figura 13 Geometría del modelo de Saunders



**Figura 14 Trayectoria típica de propagación en entorno suburbano. Escala horizontal en cientos de metros, escala vertical en metros. (adaptado de [80])**

El resultado final es que el campo en la azotea del  $n$ -ésimo edificio está dado relativa a las pérdidas de espacio libre por:

$$A_n(t) = S_n(t) \exp(jt^2) \quad \text{Eq. 5}$$

donde

$$t = \alpha \sqrt{\frac{k\omega}{2}} = \alpha \sqrt{\frac{\pi\omega}{\lambda}} \quad \text{Eq. 6}$$

Si se asume que  $r \gg n\omega$ . Entonces,  $S_n(t)$  está dado por un valor de inicio  $S_0(t) \equiv 1$  y por la relación

$$S_n(t) = \frac{1}{n} \sum_{m=0}^{n-1} S_m(t) F_S(jt) \sqrt{n-m}, \quad n \geq 1 \quad \text{Eq. 7}$$

Donde  $F_s(jt)$  es la integral compleja de Fresnel, que se puede expresar en términos de las integrales de seno y coseno, para simplificar su resolución numérica. El campo total en el móvil está dado por:

$$A_{flat} = A_{n-1}D_{fb} \quad \mathbf{Eq. 8}$$

Donde  $D_{fb}$  es la difracción en el último edificio y  $A_{n-1}$  se obtiene de la Eq.4. Por la geometría de la Figura 13 se puede asumir que los dos rayos se combinan con fase aleatoria, lo que implica que la intensidad media de campo se puede calcular sumando la potencia de los dos rayos, y se obtiene:

$$D_{fb} = \sqrt{A_d^2 + (\rho A_r)^2} \quad \mathbf{Eq. 9}$$

donde

$$A_{d,r} = \frac{1}{2}F(\omega_{d,r})\exp\left(\frac{-j\pi}{4}\right) + \frac{1}{2} \quad \mathbf{Eq. 10}$$

Para la ecuación anterior,  $A_d$  corresponde al rayo directo-difractado y  $\rho A_r$  corresponde al rayo reflejado por el edificio situado al frente del último edificio.  $F$  es también una integral compleja de Fresnel de la forma  $F(\omega) = C(\omega) + jS(\omega)$ .

Los parámetros de difracción de Fresnel para el rayo directo  $\omega_d$  y para el rayo reflejado  $\omega_r$  están dados por:

$$\omega_d = -\left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{d_m}{h_0 - h_m}\right) - \alpha\right] \sqrt{\frac{2d_m}{\lambda}} \quad \mathbf{Eq. 11}$$

$$\omega_r = -\left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{2\omega_s - d_m}{h_0 - h_m}\right) - \alpha\right] \sqrt{\frac{2(2\omega_s - d_m)}{\lambda}} \quad \mathbf{Eq. 12}$$

donde  $\omega_s$  es el ancho de la calle, y los demás parámetros están definidos en la Figura 13. Cuando el número de bordes es muy grande, este modelo se comporta en forma similar al de Walfisch, pero muestra un mejor comportamiento cuando el número de bordes es pequeño, dando una predicción mejor en cercanías del transmisor. Igualmente, este modelo es válido cuando la antena de la estación base se sitúa por debajo de las azoteas de los edificios.

Las integrales que resultan al aplicar el método, se resuelven empleando métodos de integración numérica del tipo Montecarlo.

El método irregular propone los siguientes pasos: En primer lugar, se eliminan los bordes que son considerablemente más bajos que sus vecinos inmediatos y que no afectarán notablemente la señal recibida; esto se puede hacer empleando los parámetros de difracción  $b_m$  descritos antes. Cualquier borde con un valor de  $b_m$  por debajo de un umbral se elimina totalmente. Las características del perfil se calculan empleando el método uniforme, y se obtiene un valor de intensidad de señal  $E_1$ .

Luego se calculan las desviaciones de este caso usando la integral de difracción aplicada a los bordes más significativos. El número de bordes resultante dependerán de la aplicación, ya que existirá un compromiso entre el número de bordes empleado y la precisión del cálculo. Por ejemplo, si se usaran 5 bordes, los bordes con los parámetros  $b_m$  más significativos se calcularían de la siguiente forma:

1. Localizar el borde con el valor más negativo de  $b_m$  y retirarlo del arreglo
2. Recalcular los parámetros  $b_m$  para los bordes restantes
3. Si quedan más de 5 bordes, repetir los pasos 1 y 2.

Los edificios restantes suelen ser los más cercanos al móvil, sin embargo este método permite considerar el caso en el que aparezca un edificio muy alto en la mitad de la trayectoria y manejarlo adecuadamente. Con la configuración de bordes obtenida, se aplica nuevamente el método uniforme y se obtiene un valor de intensidad de campo  $E_2$ .

El siguiente paso es calcular un tercer valor de intensidad de campo  $E_3$  usando el método uniforme para los cinco bordes con el mismo

espaciamiento medio y elevación media empleado para calcular  $E_1$ . Este valor se emplea para normalizar  $E_2$ , donde el cociente resultante representa la desviación del comportamiento uniforme. Finalmente, se calcula el valor total de campo  $E_d$  como el producto del campo normalizado y el campo total obtenido con el método uniforme, y está dado por

$$E_d = E_1 E_2 / E_3 \quad \text{Eq. 13}$$

#### 3.4.1.4 Red Neuronal

El modelo de red neuronal ha sido desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia para cálculo de coberturas en entornos microcelulares y macrocelulares. Este modelo implementa una red del tipo Multilayer Perceptron (MLP) y la regla de aprendizaje Backpropagation, muy popular por su simplicidad.

Para la función de activación se emplea la tangente hiperbólica, ya que se considera que las funciones de activación asimétricas tienden a hacer que el proceso de aprendizaje sea más rápido. La MLP empleada en el modelo tiene una capa oculta y dos nodos ocultos.

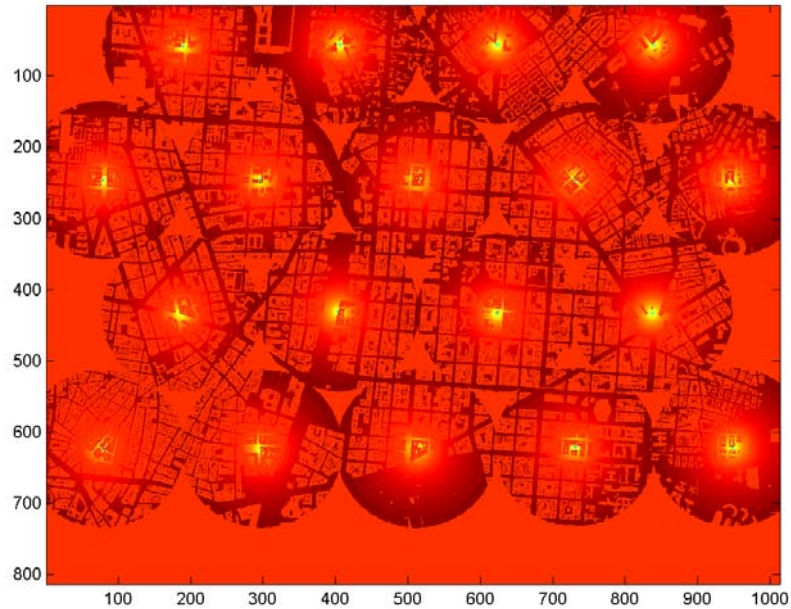
Esta red ha sido entrenada con campañas de medidas intensivas en Munich y Valencia, por lo que es sobre los mapas de estas ciudades donde sus resultados son más confiables.

#### 3.4.2 Cobertura de las celdas

Empleando alguno de los modelos descritos en el apartado anterior, se obtienen las coberturas que formarán parte del sistema. CellView permite calcular las coberturas con un radio específico, por ejemplo 300m, en una zona rectangular definida, o en todo el mapa donde se está calculando el sistema celular.

Para el caso del escenario de simulación empleado, se calculan las coberturas en todo el mapa, con el fin de poder estimar la interferencia que genera cada usuario dentro del sistema sobre una determinada celda, a partir del modelo de propagación empleado.

A partir de las coberturas obtenidas de CellView, se estiman las pérdidas de propagación, la respiración y las potencias de los usuarios. En la Figura 15 se muestra el mapa de potencias de usuarios en el *down-link* obtenido en una simulación sobre el sistema ideal.



**Figura 15 Mapa de potencias de usuarios en up-link**

### ***3.4.3 Interferencias***

Para cada instante de cálculo del sistema, se verifica que canales de RF están activos, con el fin de saber que celdas pueden generar interferencias co-canal o simplemente interferencia si se habla de CDMA. Se calcula el nivel de C/I y se verifica qué usuarios se encuentran en una zona donde el C/I no es aceptable. En CDMA se calcula el valor de  $E_b/N_0$  para cada celda del sistema.

En el caso de TDMA, los usuarios que estén en una zona donde la relación C/I no es adecuada, transcurrido un tiempo, perderán la conexión y se considerará llamada perdida; esta llamada se agrega al cálculo del GOS. Se pueden asumir diferentes tamaños de “cluster”, y a partir de esta información, se identifican en el sistema las celdas co-canal, haciendo la asignación de canales manualmente. Por otra parte, se utiliza el algoritmo de asignación de canales de DC-Cell. DC-Cell se basa en la identificación de vecinos y la generación de una tabla de vecinos a partir de la cual asigna los canales.

Para el caso de CDMA, se modelan las interferencias en forma diferente, ya que la interferencia co-canal la generan los mismos usuarios dentro del sistema, e incluso el concepto de co-canal pierde relevancia, pues todas las celdas son co-canal. En el caso de CDMA, se calcula la interferencia de cada usuario con llamada activa en el sistema sobre cada celda del sistema, y de esta forma se obtiene un valor de  $E_b / N_0$  para cada celda en cada instante de tiempo de simulación, según el número de llamadas activas y la distribución de usuarios sobre el sistema.

El modelo empleado para CDMA, consiste en calcular las pérdidas de señal que tiene cada usuario del sistema, a partir de las matrices de cobertura, ya que se conoce la señal recibida (A partir de la cobertura) y la potencia de transmisión (En el CellView). Conociendo las pérdidas de cada usuario, se estima la potencia con que transmite cada usuario según la celda donde está ubicado y asumiendo control de potencia perfecto. Con esta información se puede calcular la interferencia de todos los usuarios sobre cada EB del sistema, sumando la contribución de cada uno sobre la EB, según la potencia de transmisión y las pérdidas para esa cobertura. Una vez obtenido el nivel de interferencia para cada EB, se puede calcular fácilmente la relación Señal - Interferencia y el bloqueo del sistema, entendiendo como bloqueo una situación donde la calidad de la señal no es aceptable para el usuario, la cual se puede obtener de la norma IS-95, de la norma UMTS o de la norma CDMA-2000, según el caso que se esté analizando.

#### **3.4.4 Efecto de respiración**

Diversos autores entran a analizar también lo que se conoce como el *breath factor* de la celda en UMTS (véase por ejemplo, Holma [13], Hernando [79], Hanly [28] entre otros). Este comportamiento se presenta cuando se quiere mantener una calidad determinada en el sistema, que obliga a los terminales móviles a aumentar su potencia de transmisión para mantener dicha calidad. Evidentemente, los terminales tienen un límite en su potencia de transmisión, por lo que llega un punto en el que el terminal no puede aumentar más su potencia y la calidad empieza a decrecer. Este comportamiento está asociado a la carga de la estación base y se puede asemejar a una especie de “encogimiento” de la celda cuando la carga aumenta. Es decir, si se quiere mantener la calidad del enlace para una potencia máxima de los terminales y un cierto número de usuarios, éstos deberían acercarse a la estación base, con el fin de mantener la relación de portadora a interferencia requerida para la calidad deseada.

El modelo desarrollado simula este efecto en forma dinámica, mostrando el encogimiento del mapa de mejor enlace así como la “expansión” de las celdas



vecinas con menor carga, que buscan compensar la capacidad perdida por la celda “encogida”, y así mantener el sistema celular en equilibrio de capacidad.

Para simular dicho efecto se emplean dos *scripts* de Matlab, uno que se encarga de simular el control de potencia y el encogimiento, así como el control de admisión de llamadas. El otro *script* se encarga de simular el efecto de expansión del sistema.

### **3.5 MODELADO DE TRÁFICO**

#### **3.5.1 Generación de eventos**

Como se explicó anteriormente, el modelo de simulación empleado es del tipo *time slicing* por lo que en cada instante de tiempo se analizan los eventos generados en el sistema. Para el análisis de capacidad, se consideran los siguientes eventos:

- Llamadas, de voz o de datos
- Movimiento
- Eventos 1A, 1B, 1C y 1D, asociados al handover.

#### **3.5.2 Distribución de usuarios**

Antes de iniciar la generación de llamadas, se genera una distribución de usuarios sobre el sistema. Esta distribución se genera empleando un modelo estadístico, como la distribución uniforme, o también se puede emplear una distribución de usuarios basada en información demográfica.

Para la generación de llamadas se asocia a cada usuario un tiempo entre llamadas de acuerdo al patrón de tráfico requerido. Para el caso de llamadas de voz, se emplea la distribución exponencial. Para el caso de llamadas de datos, se utiliza una distribución exponencial y una distribución pareto.

La combinación entre el tiempo entre llamadas y el tiempo de slice de la simulación, es la que determina el tráfico del sistema para una determinada ejecución de la simulación. Dicho de otra forma, dado un tráfico y un tiempo de slice fijos, se obtiene el parámetro de tiempo entre llamadas que se utiliza para generar las variables aleatorias, que corresponde al parámetro lambda de la distribución exponencial.

Una vez se generan las llamadas, a cada llamada activa en el sistema se le asocia una duración, que también se ajusta a la distribución estadística deseada. Nuevamente, para el tráfico de voz se utiliza una distribución exponencial.

El tráfico de datos se modela ya sea empleando distribuciones exponenciales, siguiendo un esquema de conmutación de circuitos, o empleando una distribución de Pareto, según el modelo planteado por Floyd en [18]. La distribución Pareto es útil para ajustar una distribución a datos observados. Dado un número de observaciones del tipo  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , el ajuste del parámetro de forma  $a$  está dada por:

$$a = \frac{1}{(1/n) \sum_{i=1}^n \ln x_i} \quad \text{Eq. 14}$$

La pdf de esta distribución está dada de la forma:

$$f(x) = ax^{-(a+1)} \quad \text{Eq. 15}$$

### 3.5.3 Admisión de llamadas

El mecanismo de admisión de llamadas permite llevar la cuenta del número de llamadas en curso en el sistema en cada instante de simulación así como el número de llamadas bloqueadas. En TDMA, el control de admisión se efectúa por el número de canales disponibles en una celda, por lo tanto, nos referimos a la combinación de frecuencias y *slots* temporales. Se tienen en cuenta las frecuencias con el fin de estimar la interferencia en las celdas del sistema, y hacer la planificación más adecuada.

En CDMA, se asume que hay un número de “canales” limitado por el número de códigos disponibles. Este número teórico de canales está limitado por la interferencia entre los usuarios y por el problema del “*near-far*”. Con este supuesto, se puede analizar el CDMA con modelos muy similares al TDMA, en cuanto a llegada de llamadas, duración de éstas, número de servidores en la cola, etc.

Para el caso de CDMA, se asume que el limitante lo impone la relación  $E_b / N_0$ , por lo que el mecanismo de control de admisión de llamadas se basa en el valor de  $E_b / N_0$  en cada instante de simulación. Si el valor de  $E_b / N_0$  para las llamadas en curso más los intentos de llamadas en el instante de análisis es inferior al mínimo permitido por la norma, se bloquean los intentos de llamadas en esa celda.

### 3.6 MOVILIDAD DE USUARIOS

El siguiente paso del modelo consiste en estimar el número de usuarios que abandonan la zona de cobertura de una celda y generan procesos de Handover, de tal forma que el sistema tenga que asignarle un nuevo “canal”.

Para esta etapa, se genera una matriz de movilidad, que equivale a un porcentaje del total de llamadas activas del sistema, ya sean de voz o de datos, y se cuenta el número de usuarios que abandona la cobertura, y hacia que cobertura se cambian, con el fin de estimar la probabilidad de bloqueo del sistema con los procesos de handover generados.

Se estima también, el número de llamadas perdidas por el hecho de que un usuario se mueva hacia una zona donde la cobertura no es buena, o la interferencia obliga a cortar la llamada.

En el caso de los sistemas UMTS europeos, se modelan los cuatro eventos asociados al *soft handover*, es decir los eventos 1A, ingreso de una cobertura al active set; 1B, retirar cobertura del active set; 1C, reemplazar una celda por otra en el active set y 1D, cambio de mejor enlace según lo especifica la norma TS-25.331 *release 5*. Los eventos se modelan empleando como medida las pérdidas de propagación. El tamaño del *active set* se puede fijar a un valor o se puede dejar ilimitado, con el fin de observar el efecto del tamaño del *active set* sobre la capacidad del sistema.

Al hacer el análisis de las normas UMTS, con el fin de modelar los handovers, se encontraron algunas inconsistencias entre lo especificado en la norma TS-25.922 y la TS-25.331. Se escogió lo especificado en la TS-25.331, pues era consistente con los conceptos generales sobre soft handover y la gráfica que aparece en la norma TS-25.922.

### 3.7 PARAMETROS A EVALUAR

#### 3.7.1 Capacidad en CDMA

Como se mencionó en la introducción, el principal parámetro a evaluar en esta tesis es la capacidad en el *up-link* de los sistemas CDMA. Se asume, inicialmente, que el factor limitante de capacidad en el up-link va a ser el valor de la interferencia generada por los usuarios en el sistema, dicha interferencia se divide, para efectos de mantener las convenciones empleadas por la mayoría de los autores, en interferencia inter-celda e interferencia intra-celda. Como es bien sabido que en el sistema UMTS, con la existencia de múltiples servicios, el *down-link* se convierte en otro factor limitante de capacidad, se incluye en el modelo la posibilidad de estimar capacidad en *down-link*, como se explicará más adelante.

La interferencia intercelda es generada por los usuarios que están siendo atendidos por celdas diferentes a la que se analiza, y que no están controlados por dicha celda. La interferencia intra-celda la producen los usuarios que están bajo la cobertura de la celda que se analiza y cuya potencia se encuentra controlada por dicha celda.

Para calcular la interferencia en la simulación, se hace una estimación de la potencia de cada usuario, asumiendo un control de potencia perfecto y con base en dicha potencia se hace un cálculo de pérdidas de propagación de cada usuario del sistema sobre la celda que se analiza. Conocidas las pérdidas de propagación y la potencia del usuario, se hace una sumatoria de la interferencia de los usuarios sobre cada celda en el sistema.

El resultado obtenido en la simulación es el número de llamadas activas en cada instante de tiempo para cada servicio configurado al inicio de la simulación. Para los efectos de resultados discutidos mas adelante, se utilizaron principalmente servicios de voz y se presentan algunos resultados con servicios combinados.

Para estimar la capacidad en el Down Link, se utilizan los archivos de cobertura y se estima la pérdida de propagación para cada llamada en el sistema, generando una matriz de pérdidas para cada cobertura con la pérdida hacia cada usuario referenciada espacialmente y para cada cobertura. De esta forma se obtiene la información de señal útil y señal interferente para cada usuario en su cobertura útil.

Esta información es almacenada y actualizada en cada ciclo de generación de llamadas. Luego se hace una estimación de la relación señal a interferencia ( $E_b/N_0$ ) para cada llamada en el sistema a partir de las potencias de las EB y de las matrices de pérdidas de propagación asociada a cada cobertura. En el primer paso se hace con la potencia usada para calcular las coberturas y el mapa de mejor enlace.

Se implementa un algoritmo de control de potencia que intenta mantener la relación  $E_b/N_0$  de cada usuario en 7dB, limitando la potencia máxima de la EB a 20 vatios, en pasos de 1dB hacia arriba o hacia abajo. Al inicializar el sistema, se asocia a cada usuario una potencia de transmisión que garantice un nivel de señal por encima del umbral del receptor (admisión por señal). El control de potencia no limita la admisión de nuevas llamadas en el sistema, es decir, el sistema no implementa control de admisión en el Down Link.

El cálculo de  $E_b/N_0$  se basa principalmente en el planteamiento hecho en [78]. El factor de ortogonalidad se puede variar, con el fin de analizar su influencia en la capacidad.

Con este modelo se pretende determinar si la capacidad está restringida por el DL o por el UL, y bajo que condiciones. Se asume que el sistema está restringido fundamentalmente por el Uplink, excepto cuando hay servicios de datos de alta velocidad activos en el sistema.

En el capítulo siguiente se hace una exposición de antecedentes y conceptos de capacidad en el *Up-Link*.

### **3.7.2 Energía de bit sobre interferencia ( $E_b/N_0$ )**

El parámetro que se suele utilizar para determinar la capacidad de un sistema CDMA es la relación entre la energía de bit de la señal útil y la interferencia de los demás usuarios del sistema, más conocida como  $E_b/N_0$ . Con la información de coberturas y el cálculo de la interferencia, se obtiene la relación  $E_b/N_0$ , que sirve para determinar la admisión de nuevas llamadas y el bloqueo del sistema en un instante de la simulación.

Durante la simulación se manejan dos variables con el cálculo de  $E_b/N_0$ , una que tiene la información para permitir la admisión de nuevas llamadas, y otra que se calcula solo con las llamadas en curso en cada instante de la simulación.

## **3.8 OBJETIVOS Y UTILIDAD DEL MODELO EN LA PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS MOVILES**

### **3.8.1 Planificación en sistemas móviles**

Los mecanismos usuales de planificación de sistemas móviles buscan un punto intermedio entre diferentes factores a optimizar, desde el punto de vista del operador. Estos factores son: máxima cobertura del área de servicio, menor número posible de celdas para atender la demanda estimada, grado de servicio o probabilidad de bloqueo.

El objetivo ideal de obtener la mayor área de cobertura con el menor número de celdas depende a su vez de diferentes variables difíciles de controlar, y de factores estadísticos incontrolables como el desvanecimiento.

Trabajos como el de Calégari [69], Chamaret [70], Wright [71], Tutschku [68], Lee [72] y Huang [73] plantean soluciones al problema de cobertura y localización de estaciones base, empleando algunas restricciones y simplificando otros parámetros. Calégari y Chamaret emplean algoritmos genéticos para obtener un número óptimo de estaciones base y maximizar la cobertura, mientras Tutschku emplea redes neuronales, Wright emplea una variante de método simples de Nelder-Mead y Lee emplea un mecanismo llamado Tabu Search. En el trabajo de Huang se plantea el problema de

ubicación de estaciones base como un MOP (Multi Objective Problem) y se propone un mecanismo basado en algoritmos genéticos de múltiples objetivos (MOGA). En general estos algoritmos de planificación emplean como parámetro local el número de canales por celda para cumplir con la demanda estimada de tráfico. Para la planificación de sistemas CDMA, aplican restricciones diferentes que para TDMA ó FDMA.

El problema de cobertura depende de factores como: modelo de propagación empleado, altura de antena, patrón de radiación de antena, inclinación de antena, potencia, altura del receptor y topología del terreno que circunda la estación base. Las herramientas comerciales no disponen de algoritmos para localización automática de estaciones base, por lo que la planificación tiene una alta dependencia de heurísticas desarrolladas por el planificador.

Ninguno de los algoritmos conocidos para ubicación de estaciones base tiene en cuenta los factores que afectan la capacidad en sistemas CDMA y WCDMA. En el caso de los sistemas TDMA/FDMA, el problema de capacidad se resuelve logrando una separación adecuada entre las celdas co-canal mientras se maximiza la cobertura; esto se suele hacer con la ayuda de una matriz de vecinos, que permite identificar celdas adyacentes o vecinas y asignarles un grupo de canales diferente.

En el caso de CDMA, al no existir el concepto de reuso de frecuencias, se podría pensar que el problema de ubicación de estaciones base se reduce a maximizar la cobertura para unos estimados de capacidad por celda que cumplan con los requerimientos de diseño.

### ***3.8.2 Objetivos y utilidad del modelo de análisis de capacidad***

El modelo descrito en los apartados anteriores plantea la utilización de elementos más cercanos al comportamiento real de los sistemas móviles, como es la utilización de coberturas obtenidas de una herramienta de planificación, y el cálculo de la interferencia a partir de estas coberturas, que se adaptan a la topología del terreno. También permite emplear diferentes modelos de tráfico y de distribución espacial de usuarios, basados por ejemplo en información demográfica o de mercadeo.

En ese sentido, el modelo planteado permite predecir con mayor precisión la capacidad de un sistema móvil, particularmente aquellos basados en CDMA ó WCDMA. Sin embargo, en la planificación de sistemas móviles, se requiere cumplir con ciertos parámetros de cobertura, calidad de servicio y capacidad. En el proceso de planificación, se prefiere conocer, al menos en forma aproximada, la capacidad que tendrá el sistema, para que el proceso de optimización sea más corto.

El modelo planteado, permite planificar y optimizar sistemas móviles en un proceso parcialmente manual, analizando la capacidad de diferentes

distribuciones de coberturas hasta obtener una capacidad alta para una zona de servicio deseada. Sin embargo, este es un proceso largo y dispendioso, pues la simulación es computacionalmente costosa y requiere de mecanismos heurísticos basados en la experiencia del planificador.

De los diferentes escenarios que se analizan, se obtendrán algunas heurísticas que permitan conocer cuáles son los parámetros que afectan la capacidad y cómo la afectan. De esta forma, el modelo planteado ayudaría a optimizar un sistema CDMA o WCDMA.

Sin embargo, es importante contar con herramientas adicionales que faciliten el proceso de planificación y permitan conocer a priori, por la estructura del sistema, si la capacidad será la máxima posible para la topología del terreno.

Aquí entonces entran en consideración factores de la topología combinatoria que permitirán emplear herramientas formales para optimizar la capacidad de un sistema CDMA.

## Capítulo 4

### CAPACIDAD EN EL UP-LINK

#### 4.1 ANTECEDENTES SOBRE CAPACIDAD EN CDMA

La referencia obligada cuando se habla de capacidad en sistemas CDMA es el artículo de Gilhousen, Viterbi et al. [2], donde se deducen las ecuaciones de capacidad para sistemas CDMA en forma analítica. Aunque se han desarrollado trabajos posteriores, las variaciones no son demasiado grandes respecto a este trabajo.

Viterbi y Viterbi [7] examinan el efecto de la interferencia intercelda en términos de la influencia de las celdas más cercanas, empleando un exponente de pérdidas de propagación  $\mu=4$  y diferentes valores de desviación estándar para el desvanecimiento log-normal. Se deduce en este artículo el parámetro  $f = (I_{S_0} + I_{S_0}) / N_u$ , que es la interferencia relativa proveniente de otras celdas en términos del total de usuarios del sistema  $N_u$ . En el artículo, se define una región  $S_0$ , donde se calcula la interferencia generada por las celdas incluidas en esta región y la región  $\bar{S}_0$ , que es la región por fuera del hexágono  $S_0$ . De tal forma que  $I_{S_0}$  es la interferencia generada por los usuarios ubicados en la región  $\bar{S}_0$  distribuidos uniformemente e  $I_{S_0}$  es la interferencia generada por los usuarios en la región  $S_0$ .  $N_u$  es el número de usuarios en una celda.

Viterbi y Viterbi [7] analizan la capacidad de CDMA en términos de erlang, a partir de una probabilidad de bloqueo, basado en el análisis de Gilhousen y de Viterbi.

Jalali [9], por ejemplo, analiza los efectos de la diversidad, el control de potencia y el ancho de banda (asociado a la ganancia de ensanche ó SF) teniendo en cuenta el desvanecimiento y algunas imperfecciones en el control de potencia para sistemas microcelulares; sin embargo, se asumen pérdidas de propagación asociadas a un exponente de pérdidas, o lo que es lo mismo, se asumen celdas regulares. En este caso se encuentra una relación entre el exponente de pérdidas y el número de usuarios por celda tanto en el *uplink* como en el *downlink*.



Tonguz y Wang [65] analizan el problema de capacidad tomando en cuenta los efectos del control de potencia en un entorno con desvanecimiento Rayleigh y diferentes distribuciones espaciales de usuarios. En este caso se asumen celdas hexagonales ideales y se llega a un resultado para la SIR (Signal to Interference Radio) en forma cerrada, con el fin de evitar la utilización de simulaciones en el análisis de capacidad. Se llega en este caso a que la capacidad en el *uplink* la distribución de los usuarios no tiene un efecto apreciable sobre la capacidad.

Liberti y Rappaport[50] analizan los efectos de la utilización de antenas inteligentes con haces muy directivos sobre la capacidad de sistema CDMA, asumiendo una relación de pérdidas de propagación basada en un exponente de pérdidas.

Newson y Heath [52] analizan el problema de capacidad en CDMA en forma analítica complementado con simulaciones, teniendo en cuenta los efectos de imperfecciones del sistema como errores en el control de potencia. En este caso se introduce un término similar al  $F_m$  que se describe adelante, que llaman  $F_u$  y lo describen en términos de la interferencia intercelda y la potencia total recibida por la BS de todos los móviles dentro de una celda. Se asume también un modelo de pérdidas de propagación basado en exponente, y se consideran dentro de las imperfecciones analizadas el comportamiento de la sectorización con patrones de antena reales. En este caso se llega también a determinar que no existe una mayor diferencia en capacidad entre un sistema FDMA y un sistema CDMA.

Prasad y Jansen [51] analizan la capacidad de un sistema CDMA bajo las condiciones de control de potencia imperfecto y sectorización imperfecta en forma analítica; se asume un traslape entre sectores y se modelan las pérdidas de propagación con un exponente de pérdidas  $\beta=4$ , por lo tanto asumiendo celdas regulares. En este artículo se define la capacidad del sistema en términos del factor  $F_m$  y se modela la interferencia intercelda como una fracción de la interferencia intracelda. Se encuentra, al igual que en el artículo de Jalali, una relación entre el exponente de pérdidas y la capacidad, por una mayor interferencia intercelda. También se encuentra una fuerte relación entre errores en el control de potencia y la capacidad, encontrando que un error de 1dB en el control de potencia puede implicar una reducción de capacidad del 60%. Para el caso de control de potencia perfecto, encuentran una reducción del 25% en la capacidad al considerar un sistema con múltiples celdas y un valor fijo de  $F_m$  de 0.326 basado en un sistema de 10 capas de celdas.

Chen [63] propone un mecanismo para incrementar la capacidad de un sistema CDMA aprovechando el efecto de respiración para forzar handovers de móviles en una celda muy cargada a celdas vecinas con menos carga. Este esquema se propone en lugar de obligar a los móviles a aumentar potencia cuando la carga en la celda aumenta. Se verifica la propuesta empleando varios escenarios de simulación con diferentes condiciones de carga para la celda de interés y las vecinas.

Trabelsi y YongaÇoglu [61] analizan el rendimiento de un sistema CDMA en condiciones de desvanecimiento multicamino Rayleigh y Rice.

Fantacci y Nannicini [60] analizan el comportamiento de un protocolo del tipo acceso múltiple y su rendimiento en términos de retardo medio de paquete a partir de las primeras propuestas para el nivel de enlace de UTRA.

En Kim et al.,[64] se hace un análisis de capacidad para un sistema de dos niveles con una microcelda y se analiza el efecto de la inclinación de la antena de la microcelda sobre la capacidad, a partir del cálculo de un factor de compromiso entre interferencias de la micro a la macrocelda.

En [12], Ewerbring et al. exponen resultados de rendimiento de una plataforma de prueba basada en WCDMA, con canales de alta velocidad. Se analiza principalmente el comportamiento del canal y la tasa de errores para diferentes valores de  $E_b/N_0$  para los diferentes comportamientos del canal.

En [16], Sampath et al. hacen un análisis de capacidad de CDMA para un sistema de voz y datos como una extensión al trabajo de Viterbi y Viterbi.

Kawahara y Matsumoto en [66] proponen un esquema de detección multiusuario (multiuser detection) y estimación de canal en sistemas CDMA asíncronos. Así mismo, analizan el efecto de la detección multiusuario sobre el número de usuarios que puede manejar un sistema CDMA.

En [62] Wang analiza el comportamiento de CDMA con interferencia de un sistema de banda angosta sobre un canal con desvanecimiento Rice. Este artículo examina principalmente el rendimiento en términos de tasa de errores (BER) contra  $E_b / N_0$  con la presencia de un filtro supresor de banda angosta y sin este.

Alenkar y Blake [67] analizan el problema de capacidad desde la teoría de información de Shannon y obtienen una relación entre la capacidad  $C$  (en bits por uso de canal) y la relación  $E_b / N_0$ .

Por otra parte, Zorzi [17] propone un mecanismo para calcular la interferencia sobre un sistema celular, que en principio es aplicable a sistemas TDMA y CDMA, asumiendo pérdidas de propagación deterministas, desvanecimiento log-normal, selección de mejor celda o más cercana, ausencia o presencia de control de potencia y de diversidad. Se muestran resultados para sistemas TDMA y para CDMA. En el caso de CDMA se muestra el factor de interferencia intercelda dividido por el número de usuarios de cada celda, para distintos valores de la desviación estándar en el desvanecimiento log-normal y asumiendo un total de 60 celdas. Todo el análisis supone una distribución de celdas hexagonales, aunque se plantea la posibilidad de extenderlo a casos más generales.

Das y Morgera [19] realizan un estudio sobre el efecto de servicios integrados de voz y paquetes sobre el SIR de un sistema CDMA, empleando simulaciones. En este estudio se modela el sistema con celdas hexagonales, asumiendo control de potencia perfecto, un número fijo de móviles distribuidos aleatoriamente, modelo de propagación dependiente de la distancia con factor 3. Para la simulación se emplean celdas regulares de 500m de radio y un sistema con 37 celdas.

En el artículo de Adachi et al., [20] se hace una revisión de diferentes técnicas que llevarían a un incremento en la capacidad de los sistemas WCDMA de tercera generación. Específicamente se revisan: técnicas de reducción de interferencia y agrupaciones de antenas inteligentes, técnicas para reducir el  $E_b / N_0$  requerido como codificación de canal y control de potencia adaptativo. Se muestran algunos resultados experimentales de algunas de estas técnicas descritas.

Zhou, Onozato y Yamamoto [21] analizan la capacidad de los sistemas CDMA de múltiples capas basándose en diferentes coeficientes de pérdidas de propagación para el componente micro celular y el macro celular. Se analiza la influencia de parámetros como sectorización perfecta e imperfecta y control de potencia imperfecto con comportamiento log-normal. Encuentran una mejora cercana a 2.3 veces la capacidad de un sistema multicapa con respecto a los resultados para un sistema de una capa empleando el análisis de Gilhousen et al.. Para el análisis de capacidad, utilizan diferentes factores de ensanche en la macro y en la micro celda.

En Koo et al. [22] , se encuentra un análisis de capacidad para sistemas con múltiples servicios y diferentes tasas de transmisión. Los usuarios se modelan como una cadena de Markov k-dimensional, y se llega a un modelo de sistema de la forma M/M/m k-dimensional. Se muestra con algunos ejemplos numéricos la incidencia de los usuarios de datos sobre el tráfico del sistema.

Hashem y Elvino [23] analizan el efecto del control de potencia sobre la capacidad de un sistema CDMA suponiendo un control con variación fija, pero de alta velocidad en el envío de comandos de control, de tal forma que los comandos tengan una velocidad mayor que el desvanecimiento. En el análisis se suponen usuarios de baja movilidad y una estructura celular hexagonal. Se analiza el efecto del soft handover y el número de caminos resolubles sobre la capacidad en número de usuarios por sector.

Glisic y Pirinen en [24] desarrollan un método analítico para estimar la capacidad de un sistema WCDMA teniendo en cuenta diferentes factores que afectan la capacidad, como la detección multiusuario (MUD), el número de dedos del rake y el comportamiento del canal. Se muestran algunos resultados numéricos para un sistema específico.

Stellakis et al.[26], hacen un análisis de capacidad para un sistema CDMA tipo WLL, y por tanto tienen en cuenta la reducción en la interferencia que se presenta por la utilización e antenas directivas por parte de los usuarios. El análisis se hace en forma analítica y se compara con simulaciones.

En [27], Lyu, Suda y Adachi hacen un análisis de capacidad empleando simulaciones y comparan el efecto del control de potencia basado en nivel de señal (SS) y el control de potencia basado en SIR, así como el efecto de la diversidad en recepción. Para la simulación se emplea un modelo hexagonal de 19 celdas.

En [25], Boche y Jugl hacen una revisión del modelo de capacidad de Gilhousen, Viterbi et al., utilizando una metodología diferente en el desarrollo de las ecuaciones, para llegar a resultados similares.

Luego de revisar los antecedentes existentes obre capacidad en CDMA, se puede decir que todos los autores mencionados basan sus análisis en modelos ideales con celdas hexagonales o circulares, y empleando modelos de propagación basados en el inverso de la distancia, con diferentes valores de n, de acuerdo al entorno analizado. Igualmente se consideran diversos factores como control de potencia imperfecto y desvanecimiento y se encuentran soluciones tanto analíticas como numéricas, pero manteniendo como factor común la simplificación en el modelo de propagación.

## 4.2 CAPACIDAD DE UNA SOLA CELDA

Si se asume una celda aislada con control de potencia perfecto (es decir, que a la estación base llega el mismo nivel de señal no importa donde esté el usuario), y el mismo tipo de servicio (en tercera generación puede haber varios servicios simultáneamente), la capacidad de un sistema CDMA está dada en términos de la ganancia de ensanche, la interferencia y la relación  $E_b/N_0$  requerida para el funcionamiento adecuado del sistema. Si llamamos  $N$  al número de usuarios con llamadas activas,  $S$  a la densidad espectral de potencia recibida en la estación base por cada usuario, entonces la relación energía de bit sobre interferencia (o relación  $E_b/N_0$ ) está dada por:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = \frac{S \cdot SG}{I + N_0} = \frac{S \cdot SG}{(N-1) \cdot S + N_0} \quad (\text{Eq. 16})$$

Donde  $N_0$  es la densidad espectral de ruido,  $I$  es la interferencia,  $SG$  es la ganancia de ensanche. En el límite, cuando  $N$  alcanza la máxima cantidad de usuarios posibles,  $E_b/N_0$  es el mínimo requerido para que el sistema funcione (es decir que la tasa de errores esté por encima de un valor aceptable), la interferencia es lo suficientemente grande para despreciar  $N_0$ , por lo que la ecuación queda:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req} = \frac{S \cdot SG}{(N_{max} - 1) \cdot S + N_0} \approx \frac{S \cdot SG}{(N_{max} - 1) \cdot S} = \frac{SG}{N_{max} - 1}$$

Eq. 17

$$N_{max} \approx 1 + \frac{SG}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req}} \quad (\text{Eq. 19})$$

Donde  $N_{max}$  es el máximo número de usuarios atendidos por la celda. Si el servicio suministrado por la celda es un servicio de voz, la interferencia se ve modificada por el factor de actividad de voz, mejorando la capacidad. El

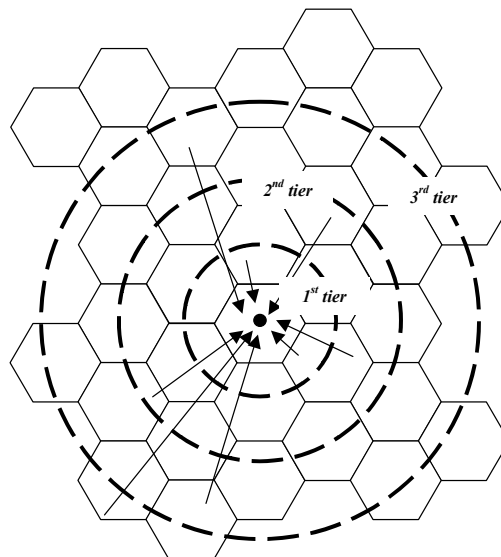
factor de actividad de voz  $\alpha$  está definido entre cero y uno ( $0 < \alpha \leq 1$ ), y las ecuaciones anteriores se replantean como:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req} = \frac{S \cdot SG}{\alpha \cdot (N_{max} - 1) \cdot S + N_0} \approx \frac{S \cdot SG}{\alpha \cdot (N_{max} - 1) \cdot S} = \frac{SG}{\alpha \cdot (N_{max} - 1)} \quad \text{Eq. 20}$$

$$N_{max} \approx 1 + \frac{SG}{\alpha \cdot \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req}} \quad \text{Eq. 21}$$

### 4.3 CAPACIDAD CON MULTIPLES CELDAS.

Cuando se analiza un sistema con varias celdas, hay que tener en cuenta también la interferencia producida por los usuarios activos en las otras celdas del sistema. En el modelo teórico se asume un sistema celular con celdas hexagonales, como se muestra en la siguiente figura,



**Figura 16 Modelado de la Interferencia Inter-celda**

Al considerar la interferencia intercelda, la ecuación para calcular la relación Eb/No queda así.

$$\left( \frac{E_b}{N_0} \right) = \frac{S \cdot SG}{I_{inter} + I_{intra} + N_0} \quad (\text{Eq. 22})$$

Como la interferencia intercelda proviene de otras celdas en el sistema, si se asume que hay  $N_c$  celdas en el sistema, la interferencia intercelda está dada por:

$$I_{inter} = \sum_{i=1}^{N_c-1} I_i(D_i, \gamma) \quad \text{Eq. 23}$$

Donde  $D_i$  es la distancia entre las estaciones base interferentes y la estación base interferida y  $\gamma$  es el exponente de pérdidas que se asume para el análisis. Sin embargo, a este factor de pérdidas se le debe agregar el desvanecimiento log-normal, por lo que la interferencia queda dada, según [2] por:

$$I_{ij} = \frac{S_i \cdot r_j^\gamma \cdot 10^{\xi_i/10}}{R_{ij}^\gamma \cdot 10^{\xi_0/10}} \quad \text{Eq. 24}$$

Donde  $S_i$  es la densidad espectral de potencia de cualquier usuario en la celda  $i$ , las distancias  $R_{ij}$  y  $r_j$  están definidas en la siguiente figura y  $\xi_i$  es una variable aleatoria gaussiana que modela el efecto del desvanecimiento log-normal en la celda  $j$ . Si se asume que todas las celdas del sistema son iguales, entonces  $S_i = S \forall i=1 \dots N_c$  y  $S$  es la misma que en la eq 6. Además, si se asume que los usuarios están distribuidos uniformemente sobre el sistema, se obtiene la ecuación:

$$dI_i = S \cdot \frac{r^\gamma \cdot 10^{\xi_i/10}}{R^\gamma \cdot 10^{\xi_0/10}} \cdot \rho \cdot dA \quad \text{Eq. 25}$$

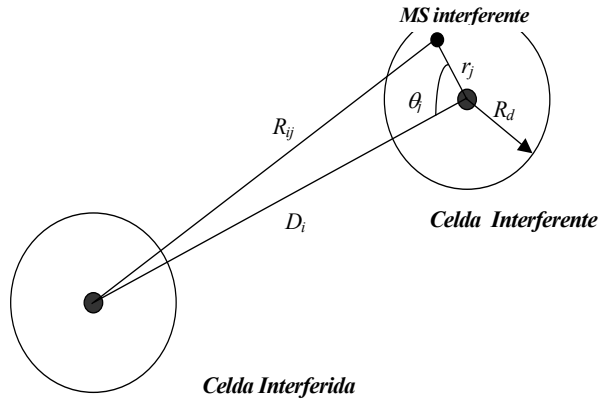


Figura 17 Cálculo de interferencia en el *uplink*

Donde  $\rho$  es la densidad espacial de usuarios, que es proporcional al número de usuarios en una celda,  $N$ . Según esto, la interferencia total estará dada por:

$$I_i = \iint_A dI_i = \iint_A S \cdot \frac{r^\gamma \cdot 10^{\xi_i/10}}{R^\gamma \cdot 10^{\xi_0/10}} \cdot \Phi \left( \frac{r^\gamma \cdot 10^{\xi_i/10}}{R^\gamma \cdot 10^{\xi_0/10}} \right) \rho \cdot dA \quad \text{Eq. 26}$$

donde  $\Phi(x)=1$  si  $x < 1$  y  $\Phi(x)=0$  de otra forma. Como la integral se debe evaluar sobre toda el área de servicio y no es posible establecer a priori sus límites, debido a la aleatoriedad de las fronteras de la celda, la función  $\Phi(x)$  intenta eliminar de la integral los puntos atendidos por la celda interferida. Ya que  $I_i$  es proporcional a  $S$  y  $\rho$  es proporcional a  $N$ , se puede escribir:

$$I_i \propto S \cdot N = I'_{\text{int ra}} \Rightarrow I_i = F_m \cdot I'_{\text{int ra}}$$

Eq. 27

donde:



$$F_m = \iint_A \frac{r^\gamma \cdot 10^{\xi_i/10}}{R^\gamma \cdot 10^{\xi_0/10}} \cdot \Phi \left( \frac{r^\gamma \cdot 10^{\xi_i/10}}{R^\gamma \cdot 10^{\xi_0/10}} \right) \frac{\rho}{N} \cdot dA \quad \text{Eq. 28}$$

Es decir, la interferencia intercelda se puede expresar en términos de la interferencia intracelda multiplicada por un factor de corrección  $F_m$ . El valor de este factor depende del exponente de pérdidas y de la desviación estándar del desvanecimiento log-normal. Ya que las fronteras del sistema no se conocen a priori, no existe una solución analítica para esta integral y se requiere una solución numérica.

Al incluir el factor  $F_m$  en el cálculo de capacidad para un sistema CDMA, las ecuaciones de  $E_b/N_0$  y capacidad quedan:

$$\left( \frac{E_b}{N_0} \right) = \frac{S \cdot SG}{F_m \cdot I'_{intra} + I'_{intra} - S + N_0} = \frac{S \cdot SG}{(F_m + 1) \cdot N \cdot S - S + N_0} \quad \text{Eq. 29}$$

$$N_{max} \approx \frac{1}{(1 + F_m)} + \frac{SG}{(1 + F_m) \cdot \left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{req}} \quad \text{Eq. 30}$$

Al ser un sistema basado en CDMA, el UMTS es un sistema limitado por la interferencia generada por los usuarios del sistema. Adicionalmente, los múltiples servicios que manejarán los sistemas de tercera generación hacen que el *spreading factor* varíe según el servicio, y por ende la carga relativa de un usuario sobre el sistema.

Diversos autores entran a analizar también lo que se conoce como el *breath factor* de la celda en UMTS (véase por ejemplo, Holma [13], Hernando [79], Hanly [28] entre otros). Este comportamiento se presenta cuando se quiere mantener una calidad determinada en el sistema, que obliga a los terminales móviles a aumentar su potencia de transmisión para mantener dicha calidad.

Evidentemente, los terminales tienen un límite en su potencia de transmisión, por lo que llega un punto en el que el terminal no puede aumentar más su potencia y la calidad empieza a decrecer. Este comportamiento está asociado a la carga de la estación base y se puede asemejar a una especie de “encogimiento” de la celda cuando la carga aumenta. Es decir, si se quiere mantener la calidad del enlace para una potencia máxima de los terminales y un cierto número de usuarios, éstos deberían acercarse a la estación base, con el fin de mantener la relación de portadora a interferencia requerida para la calidad deseada.

Esto lleva entonces a mirar la capacidad en UMTS desde dos ángulos; uno la capacidad dada en kbps/celda ó kbps/MHz si se desprecia el *noise rise*, y el otro es el alcance o radio de la celda según la carga del sistema respecto a una carga máxima teórica o *pole capacity*. Si se considera este segundo caso, la planificación de un sistema UMTS se convierte en un proceso dinámico, donde se debe considerar el encogimiento de la celda y la compensación de este efecto por parte de las celdas vecinas.

En el *Up Link*, la relación portadora a interferencia para un único tipo de servicio, que limita la capacidad, viene dada por la ecuación:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{P_r / R}{(N + I_{intra} + I_{inter}) / W}$$

**Eq. 31**

Dónde:

$P_r$  Es la potencia de recepción del sistema

$I_{intra}$  Es la interferencia intracelular provocada por los usuarios activos

$I_{inter}$  Es la interferencia externa o inter celular

$N$  Es la potencia de ruido térmico

$W$  Es la tasa de chips del sistema

$R$  Es la tasa de bits del servicio (bits/seg)

Tanto en los servicios de voz como de datos, la transmisión no es continua, por lo que se incluye en la ecuación anterior un factor de actividad  $\alpha$  que afecta la interferencia inter celda e intra celda, que se suele modelar como una distribución normal. Si se supone un control de potencia ideal y K usuarios en la celda, la interferencia intra celda percibida por un usuario cualquiera, producida por los K-1 usuarios restantes, vendrá dada de la forma:

$$I_{\text{int } ra} = P_r (K - 1) \alpha \quad \text{Eq. 32}$$

La interferencia inter celda se puede calcular de varias formas, según el grado de aproximación que se requiera. Una forma simple, que se basa en el factor de reutilización de la frecuencia, viene dado por:

$$I_{\text{int } er} = (f - 1) I_{\text{int } ra} = F_m I_{\text{int } ra} \quad \text{Eq. 33}$$

#### 4.4 CALCULO ANALÍTICO DE CAPACIDAD

A continuación se calcularán los valores de capacidad para una sola celda, empleando los parámetros de ganancia de ensanche y tasa de transmisión empleados en las simulaciones, para una celda y para un sistema de 18 celdas. En el caso del sistema de múltiples celdas, el factor  $F_m$  afecta la capacidad, como ya se ha visto, pero a su vez este factor depende del exponente de pérdidas de propagación y del número de capas del sistema, como se ha reportado en [51], [52] y [53]. Si se asume un sistema con línea de vista y sin edificios, se puede emplear un exponente  $\gamma = 3$  o  $\gamma = 3.5$ .

##### 4.4.1 Capacidad en una sola celda

Si se asume un sistema de una sola celda, la capacidad del sistema está dada por la Eq. 19. Para el caso que se analiza, se tienen los siguientes valores:

$$\begin{aligned} W &= 5 \times 10^6 \\ R &= 9600 \\ SG &= W / R = 520,833 \\ (E_b / N_0)_{req} &= 5 \end{aligned}$$

Con estos valores, y aplicando la Eq. 19, el número máximo de usuarios será  $N_{\text{max}} \approx 105$ .

#### 4.4.2 Capacidad para un sistema de 19 celdas

En [51] se analiza el comportamiento del factor  $F_m$  para sistemas con múltiples celdas y se presentan resultados para sistemas con una, dos y tres capas de celdas, es decir sistemas con 7, 19 y 37 celdas, para diferentes valores del exponente de pérdidas de propagación.

A partir de los resultados obtenidos en [51] y la Eq. 30, se puede

$$30 N_{max} \approx \frac{1}{(1 + F_m)} + \frac{SG}{(1 + F_m) \cdot \left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{req}} \quad \text{Eq. 30, se puede}$$

estimar la capacidad para un sistema ideal con 19 celdas en forma analítica, como sigue. Los parámetros para el cálculo son los siguientes:

$$W = 5 \times 10^6$$

$$R = 9600$$

$$SG = W / R = 520,833$$

$$\left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{req} = 5$$

$$\gamma = 3$$

$$F_m = 0.579 \quad (\text{tomado de [50]})$$

De la Eq. 30 se obtiene un valor de  $N_{max} \approx 66,7 \approx 67$  usuarios de voz en el sistema.

Si se asume un valor de  $\gamma = 4$ , entonces la relación de interferencia intercelda sobre intracelda, según [51] sería  $F_m = 0.312$ , y aplicando nuevamente la Eq. 30, el número de usuarios de voz sería  $N_{max} \approx 80$ .

## Capítulo 5

### RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

#### 5.1 PARÁMETROS DE ANÁLISIS Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

La capacidad en los sistemas CDMA se ve afectada por diferentes factores, tales como el factor de actividad de voz, sectorización, margen de handover, control de potencia imperfecto, desvanecimiento, solapamiento entre coberturas. Se han planteado diferentes escenarios de simulación que permitan revisar en forma independiente algunos de estos factores y compararlos entre sí, tales como sectorización, modelo de propagación, número de celdas y margen de handover.

Los análisis de capacidad encontrados en la literatura, parten en general de modelos ideales, donde se analiza la influencia de diferentes parámetros como control de potencia, coeficiente de pérdidas de propagación, sectorización imperfecta, entre otros, sobre la capacidad. En este análisis se parte de la estructura de un sistema asociada a la consideración de la propagación en un entorno real y su influencia sobre la capacidad de los sistemas CDMA. Para esto, se plantean diferentes escenarios en los que se ejecutan simulaciones dinámicas y se comparan los resultados contra un sistema ideal.

Con la ciudad de Munich se plantean otros dos escenarios, uno empleando antenas omnidireccionales y el otro usando antenas sectorizadas a 120 grados. En ambos escenarios se emplea el mismo valor de PIRE, de tal forma que el área efectiva de servicio es similar, lo que permite observar el efecto de la sectorización.

Con la ciudad de Madrid se han planteado más escenarios con diferentes combinaciones de patrones celulares, modelos de propagación, sectorización y número de coberturas. Estos escenarios permiten analizar factores como la influencia del modelo de propagación en los resultados obtenidos de la simulación, influencia del número de celdas en el sistema para las mismas condiciones de potencia, influencia del número de celdas para patrones irregulares, con potencias diferentes, efectos de la sectorización a 120 grados y a 60 grados y finalmente la influencia del margen de handover en la capacidad teniendo en cuenta el efecto de macrodiversidad y sin la influencia directa de este.

A continuación se muestra un resumen de los resultados obtenidos en términos de capacidad en  $Kbps/Km^2$  y capacidad en  $Kbps/Celda$ , así

como el valor de la relación  $E_b / N_0$  promedio para cada sistema analizado en los apartados siguientes. Se puede observar en la Tabla 3 las diferencias encontradas en la capacidad de cada sistema en términos de  $Kbps / Km^2$ , resultados que van desde los 7Mbps hasta los 188Kbps. Es apenas obvio que el objetivo buscado en cualquier planificación de un sistema CDMA es acercarse al rango de los  $7Mbps / Km^2$ , aunque no es claro cómo lograr este objetivo.

| Sistema                                       | Capacidad<br>( $Kbps / Km^2$ ) | Capacidad<br>( $Kbps / celda$ ) | $E_b / N_0$ medio |
|---|--------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Ideal   | 3.4e3                          | 623.14                          | 5.8               |
| Hata 18 celdas                                | 4.15e3                         | 759.7                           | 13.46             |
| Univalencia 18                                | 1.57e3                         | 287.18                          | 7.4               |
| Univalencia 14                                | 1.07e3                         | 251.83                          | 6.2               |
| Univalencia 15<br>sectorizadas                | 3.738e3                        | 303.15                          |                   |
| Univalencia 15<br>irregulares<br>sectorizadas | 4.005e3                        | 293.22                          | 20.6              |
| Univalencia 15<br>irregulares                 | 482.45                         | 105.7                           | 14.6              |
| Univalencia 6<br>celdas                       | 188.3                          | 103.38                          | 4.3               |
| Univalencia 6<br>celdas 6 sectores            | 3.01e3                         | 103.89                          | 8.9               |
| Munich omni                                   | 4.07e3                         | 116.3                           | 7.9               |
| <b>Munich sect</b>                            | 7.26e3                         | 412.13                          | 7.8               |

**Tabla 3 Resumen de resultados de simulaciones**

Los resultados presentados en los apartados siguientes se muestran de tres formas diferentes, en primer lugar se muestran resultados obtenidos al finalizar cada simulación, con fin de mostrar una fotografía del estado del sistema en un instante cualquiera. En segundo lugar se muestran gráficas de la evolución del tráfico, la relación  $E_b/N_0$  y el factor  $F_m$  para algunas celdas seleccionadas por su comportamiento particular, y para el total del sistema, en forma del total de llamadas o el tráfico total en  $Kbps/Km^2$  y la evolución del  $E_b/N_0$  promedio del sistema en el tiempo. Finalmente, se presentan resultados de la función densidad de probabilidad de los parámetros como el  $E_b/N_0$  y el tráfico del sistema comparados con una distribución normal, puesto que en los sistemas ideales se ha encontrado que el valor de  $E_b/N_0$  está normalmente distribuido.

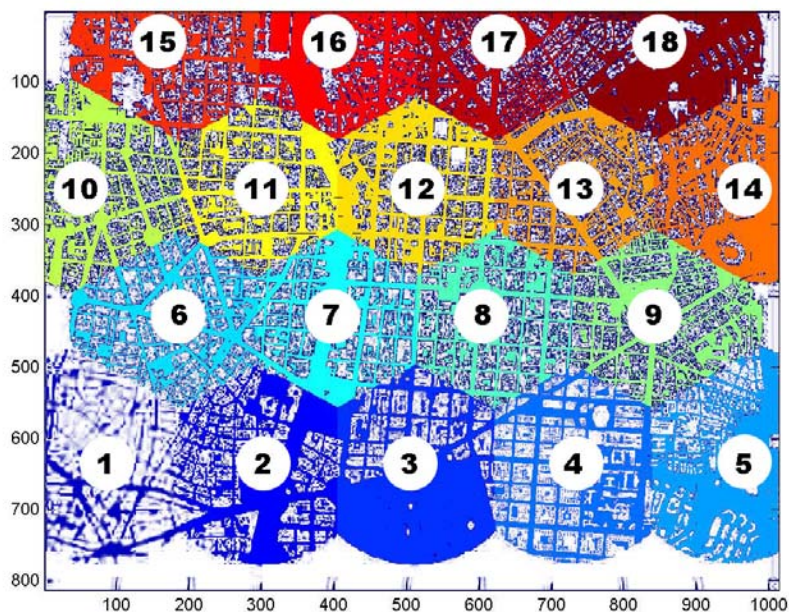
En la comparativa hecha en la sección 5.5 se muestran resultados con diferentes factores tenidos en cuenta, que llevan a asociar la capacidad del sistema con su estructura, es decir número de celdas, modelo de propagación y sectorización.

En la sección 5.7 se hace un análisis de los resultados obtenidos a la luz de la dinámica poliédrica, y se presenta una relación entre los parámetros estructurales de un sistema y su capacidad, herramienta que permite predecir el comportamiento en cuanto a capacidad de un sistema CDMA a partir de su mapa de mejor enlace y de información de las coberturas que lo componen.

## **5.2 ESCENARIOS IDEALES**

### ***5.2.1 Modelo con 18 celdas circulares ideales***

En la Figura 18 se muestra el mapa de mejor enlace para un sistema con coberturas ideales, independientes del terreno. Se aprecia que en las celdas centrales se dibujan hexágonos. El sistema fue calculado con una PIRE de 30dBm con antenas a la misma altura y considerando un modelo de propagación con pérdidas dependientes del inverso de la distancia únicamente.



**Figura 18** Mapa de mejor enlace del sistema ideal

#### 5.2.1.1 Resultados de simulación en up-link

La simulación se ejecutó para un tiempo de simulación de 700 segundos, y a continuación se muestran algunos resultados. La Figura 19 muestra los valores que recorren el  $E_b / N_0$ , las llamadas y el factor  $F_m$  a lo largo de toda la simulación. El valor medio de  $E_b / N_0$  para todas las celdas oscila entre 6 y 7, y el número medio de llamadas oscila entre 50 y 70. Se aprecia en la figura una relación directa entre el número de llamadas y el valor de  $E_b / N_0$  para todas las celdas, es decir, a mayor número de llamadas menor valor de  $E_b / N_0$ , consistentemente con lo que predicen los modelos teóricos. Se puede apreciar también en la gráfica que los valores más bajos de  $F_m$  corresponden a las celdas de los extremos del sistema, y los valores más altos corresponden a las celdas centrales, que tienen al menos un anillo de celdas interferentes alrededor, como son las celdas No.7, No.8 y No.10 por ejemplo.



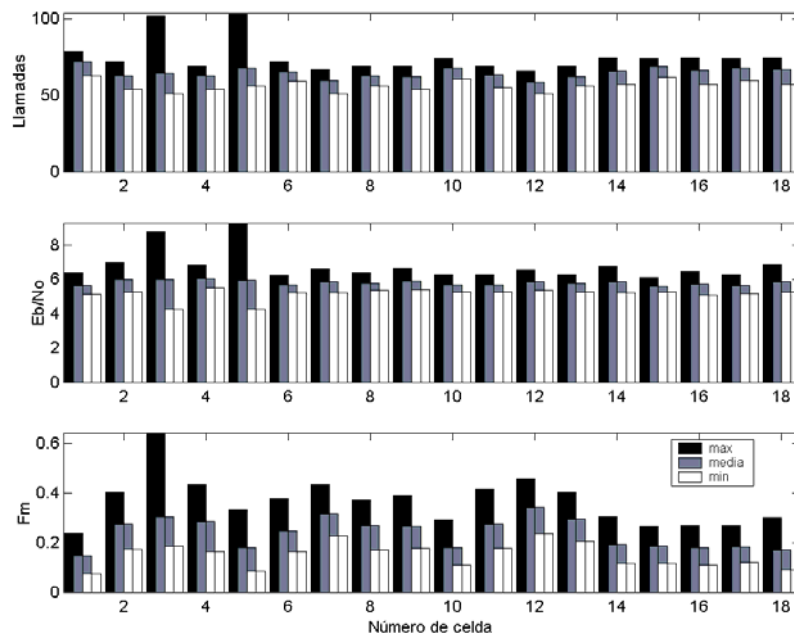
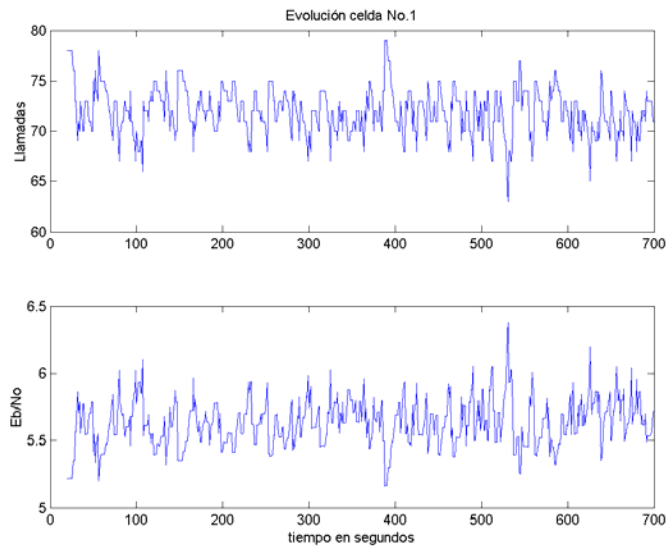


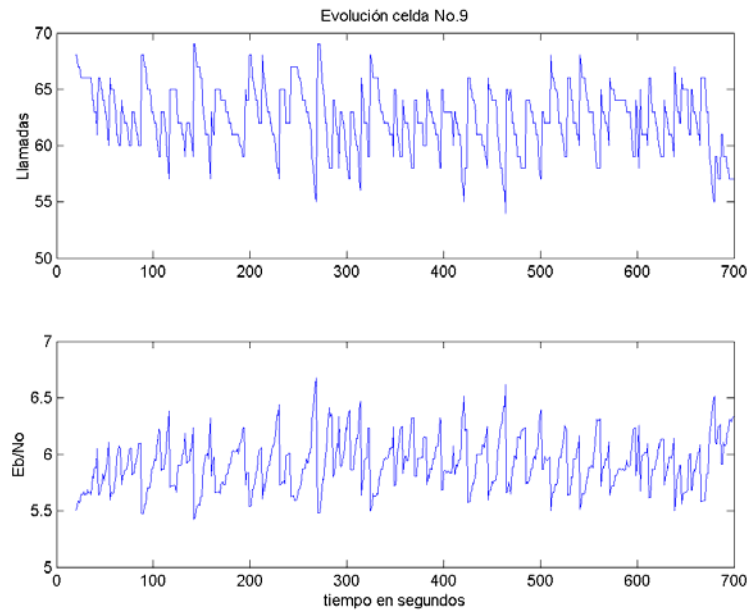
Figura 19 Valores máximo, medio y mínimo durante la simulación para las llamadas,  $E_b / N_0$  y  $F_m$

En la Figura 20 se muestra la evolución del número de llamadas y el valor de  $E_b / N_0$  en el tiempo para la celda No.1, que se encuentra en el extremo inferior izquierdo del sistema. Hay una correlación de 0.993 entre la variable “llamadas” y la variable de  $E_b / N_0$ , lo que indica que la celda se ve poco afectada por la interferencia intercelda, lo cual es de esperarse dado su ubicación en el sistema. El número medio de llamadas para esta celda es de 72.



**Figura 20 Evolución de llamadas y  $E_b / N_0$  para la celda No.1**

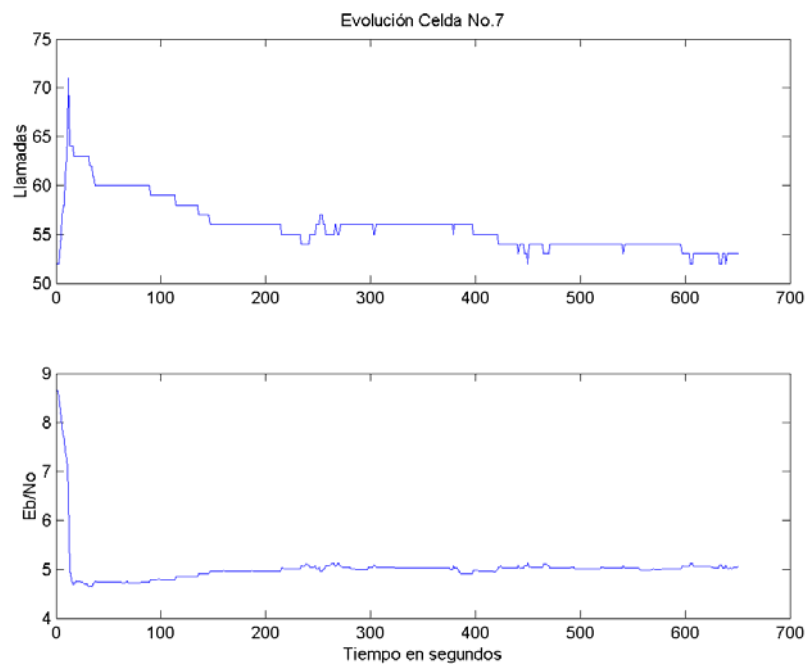
En la Figura 21 se muestra la evolución del número de llamadas y el valor de  $E_b / N_0$  para la celda No.9. El valor medio de llamadas en esta celda es de 62.3, y el valor medio para  $E_b / N_0$  es de 5.9.



**Figura 21 Evolución de llamadas y  $E_b / N_0$  en la celda No.9**

En la Figura 22 se muestra la evolución del número de llamadas y el valor de  $E_b / N_0$  para la celda No.7, que se encuentra justo en el centro del sistema. La correlación entre el número de llamadas y el valor de  $E_b / N_0$  es de 0.17, menor que para la celda No.1, en concordancia con la ubicación de la celda en el sistema e indicando que hay alta influencia de interferencia intercelda. El valor medio de llamadas es de 55.8, y el valor promedio para  $E_b / N_0$  es de 5.01.

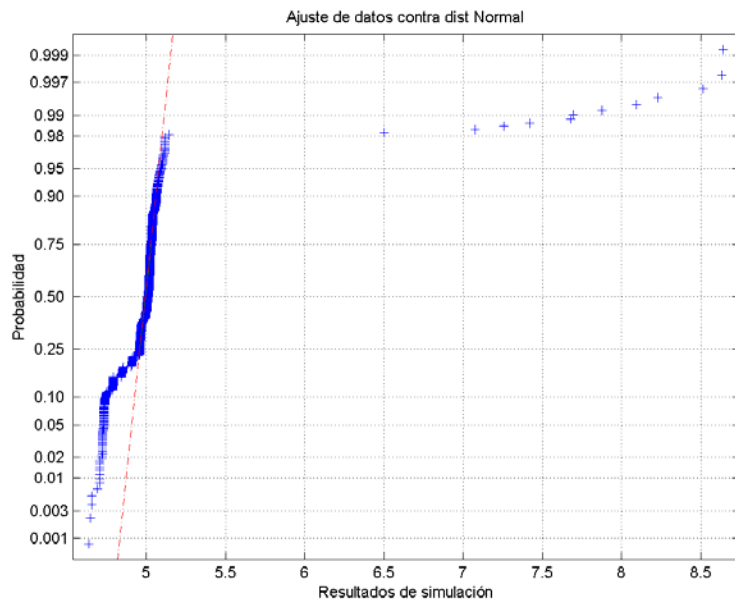
De los resultados anteriores se pueden sacar algunas conclusiones inmediatas, como que para todas las celdas existe una correlación alta entre el número de llamadas y el valor de  $E_b / N_0$ ; igualmente existe una relación directa entre el número de llamadas y el valor de  $E_b / N_0$ , es decir, a mayor número de llamadas, menor  $E_b / N_0$ , y en general los valores de cantidad de llamadas y  $E_b / N_0$  son similares para todas las celdas del sistema.



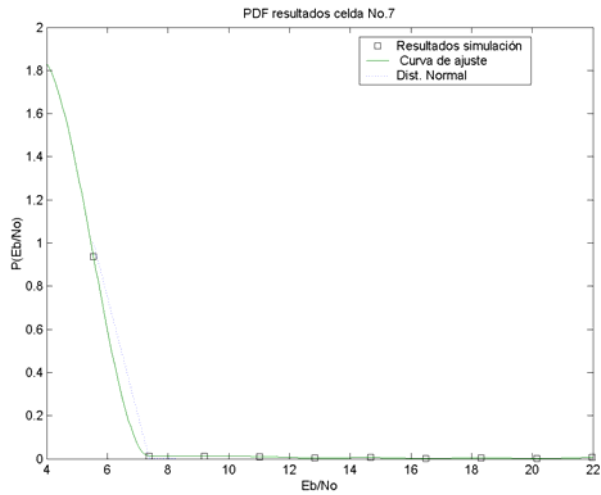
**Figura 22 Evolución de llamadas y  $E_b / N_0$  en la celda No.7**

En la Figura 23 se muestra una curva de ajuste de la función de distribución de probabilidad de los resultados de simulación de  $E_b / N_0$  contra la distribución normal. La curva indica un ajuste bastante bueno, con algunos puntos por fuera de la recta normal, debidos a la porción de transitorio del

inicio de la simulación. Este resultado se ajusta a los resultados obtenidos por diferentes autores sobre el análisis de capacidad de sistemas ideales. En la Figura 24 se muestra de función densidad de probabilidad (PDF) de los resultados de la simulación y la PDF de una distribución normal con media 5.4 y desviación estándar  $\sigma = 0.4$ . El ajuste de las dos curvas es alto, por lo que se puede suponer que la  $E_b / N_0$  se ajusta a una distribución normal en el sistema, de acuerdo con los resultados obtenidos por la mayoría de los autores.

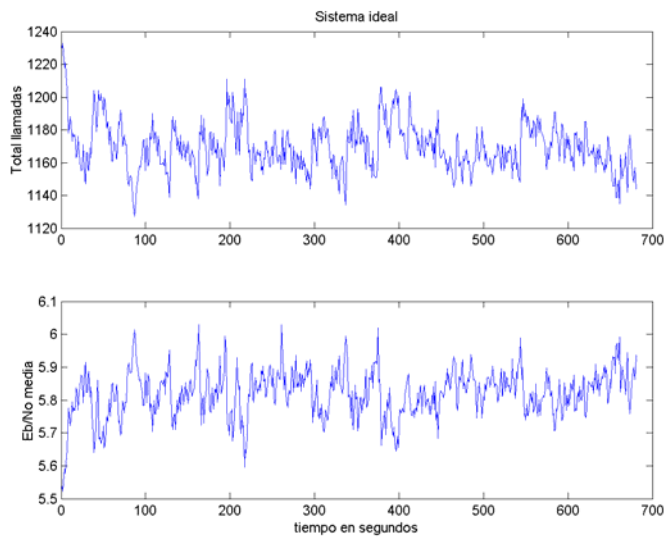


**Figura 23 Gráfico de ajuste de la distribución de  $E_b / N_0$  contra una distribución Normal**



**Figura 24 PDF de los resultados de simulación de la celda No.7 y PDF de una dist. Normal**

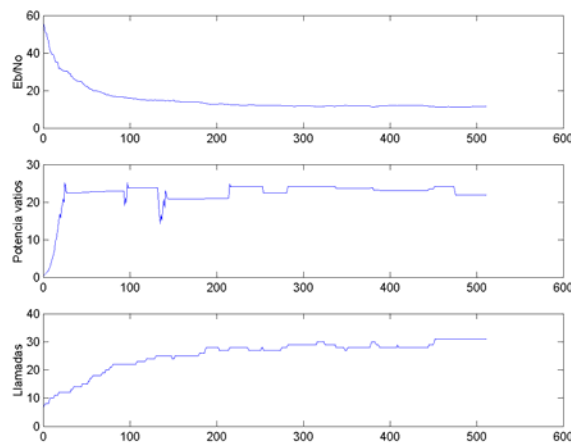
En la Figura 25 se muestra la evolución en el tiempo del total de llamadas en el sistema y el valor de  $E_b / N_0$  promedio. El valor medio del total de llamadas es de 1.169 y el promedio del valor medio de  $E_b / N_0$  es de 5,8.



**Figura 25 Evolución en el tiempo de las llamadas totales y del  $E_b / N_0$  promedio**

### 5.2.1.2 Resultados en el down-link

La Figura 26 muestra la evolución de llamadas,  $E_b / N_0$  y potencia de la EB en la celda No.7. En este caso, la simulación se ejecutó empleando el control de potencia, para una potencia máxima de 20 vatios en la EB. Sin embargo, como no se limitan las llamadas nuevas por parte del *down-link*, se aprecian valores superiores de potencia en la EB y valores de  $E_b / N_0$  muy bajos para algunos usuarios. El factor de ortogonalidad empleado en esta simulación es de  $\varphi = 0.1$ , es decir hay una alta ortogonalidad y por lo tanto una baja interferencia de la EB local sobre sus usuarios, por lo que el factor que afecta principalmente la capacidad es la interferencia inter-celda.

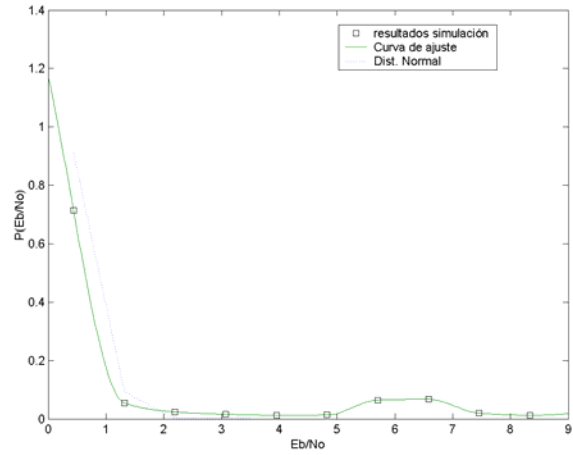


**Figura 26 Evolución de  $E_b/N_0$ , potencia de estación base y llamadas en la celda No.7**

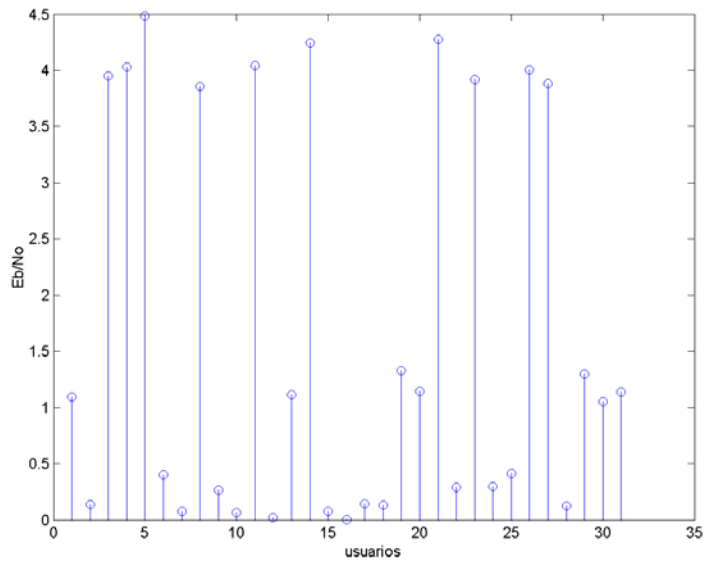
En la Figura 27 se muestra la PDF de la relación  $E_b / N_0$  de todos los usuarios activos en el último segundo de simulación y la curva de la distribución normal con media 0.46 y desviación estándar 0.4. Este resultado relaciona la posición del usuario en la celda con la potencia que recibe de su EB y la interferencia que recibe de las otras EB en el sistema.

En este sentido se podría pensar que el *down-link* va a ser el factor limitante de capacidad, inclusive en servicios de voz. Si se observa la Figura 28, se aprecia que un número alto de usuarios se encuentra con valores de  $E_b / N_0$  por debajo de 5 (7dB). Si se tuvieran restricciones de admisión de llamadas basado en SIR en el *down-link* habría muchas menos llamadas que las que hay, y se podría decir que esta celda está limitada por el *down-link*. En este caso el valor

del  $E_b / N_0$  medio en el *down-link* es de 1.6, mientras que en el up-link es de 5.1.

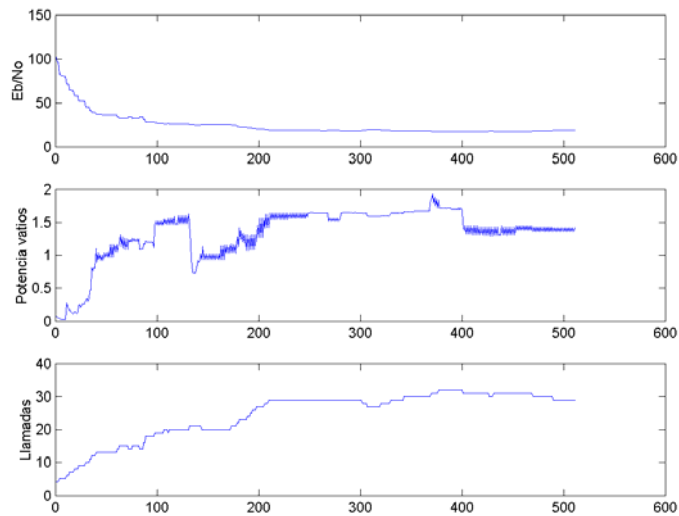


**Figura 27 PDF de la relación  $E_b/N_0$  para los usuarios en el DL al finalizar la simulación.**



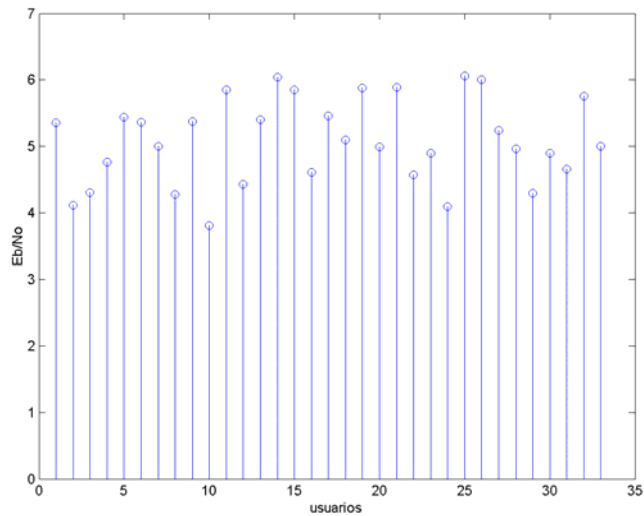
**Figura 28 Estado del  $E_b / N_0$  para los usuarios de la celda No.7**

La Figura 29 muestra la evolución del  $E_b / N_0$  en el *up-link*, la potencia de la estación base y el número de llamadas en la celda No.1 y la Figura 30 muestra el estado del  $E_b / N_0$  en el *down-link* para los usuarios de esta celda. Aunque el número de llamadas es similar en ambas celdas, en la celda No.1 el enlace restrictivo será el *up-link* pues como se observa la potencia de la estación base está por debajo de los 2 vatios, el *down-link* tiene un valor medio de  $E_b / N_0$  de 5.08, mientras que el  $E_b / N_0$  en el *up-link* tiene un valor de 17.98.



**Figura 29 Evolución de  $E_b/N_0$ , potencia de la estación base y llamadas en la celda No.1**





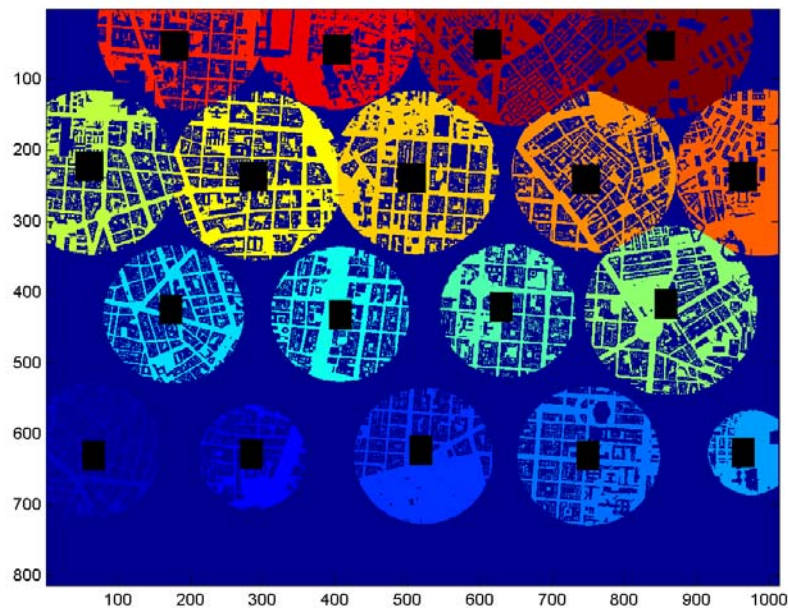
**Figura 30 Estado del Eb/No para los usuarios en la celda No.1**

### 5.3 ESCENARIOS SOBRE LA CIUDAD DE MADRID

#### 5.3.1 *Modelo de 18 celdas omnidireccionales en Madrid usando el modelo Okumura-Hata:*

##### 5.3.1.1 *Topología del sistema (vecindad)*

El sistema planteado en este escenario está conformado por 18 celdas, con los transmisores ubicados a una altura de 5 metros sobre el edificio y el receptor a una altura de 1.7 metros, un patrón de radiación omnidireccional y una PIRE de 21 dBm para todos los sitios de transmisión. De esta forma se presume que se obtendrá un patrón celular regular. El mapa de mejor enlace del sistema se muestra en la Figura 31. Se observa a simple vista, que este sistema difiere en su estructura del escenario anterior, y también se aprecia que la relación de vecindad para algunas coberturas es inexistente, es decir son coberturas aisladas dentro del sistema. La numeración de celdas es igual a la del sistema ideal.



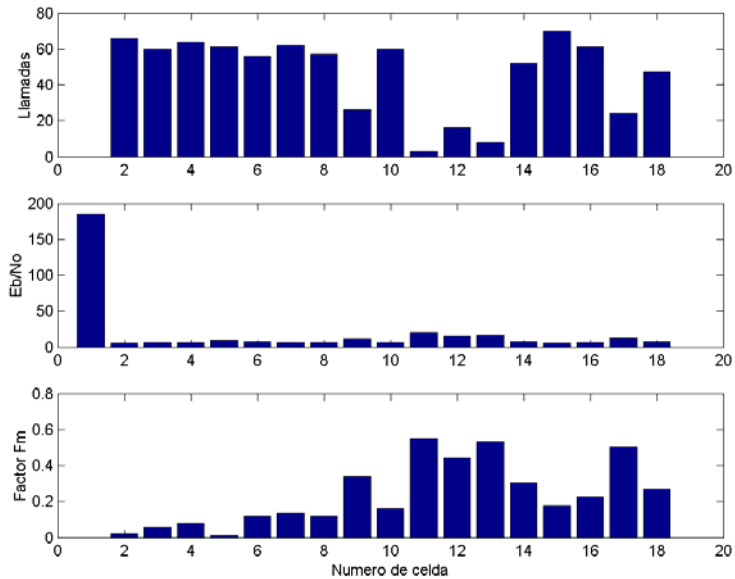
**Figura 31 Mapa de mejor enlace para el caso Madrid con Hata**

### 5.3.1.2 Resultados de simulación

La Figura 32 muestra el estado del sistema al finalizar la simulación. Se muestra el número de llamadas activas, el valor de la relación  $E_b / N_0$  y el factor  $F_m$  para cada celda del sistema. El factor  $F_m$  indica la relación entre la interferencia inter celda y la interferencia intracelda, tal como lo indica la Eq. 27. En la figura se observa que existe una relación entre los tres valores: llamadas,  $E_b / N_0$  y factor  $F_m$ . Por ejemplo, la celda No.2 tiene un numero alto de llamadas (66), con un valor de  $E_b / N_0$  de 5.58 y un valor bajo del factor  $F_m$  (0.02), lo que indica que la interferencia es producida casi en su totalidad por las llamadas propias de la celda. En cambio para la celda No.11 el número de llamadas es bajo (3), el valor de  $E_b / N_0$  es alto (20) y el valor del factor  $F_m$  es relativamente alto (0.5), lo que indica que hay alguna interferencia producida por llamadas externas a la celda.

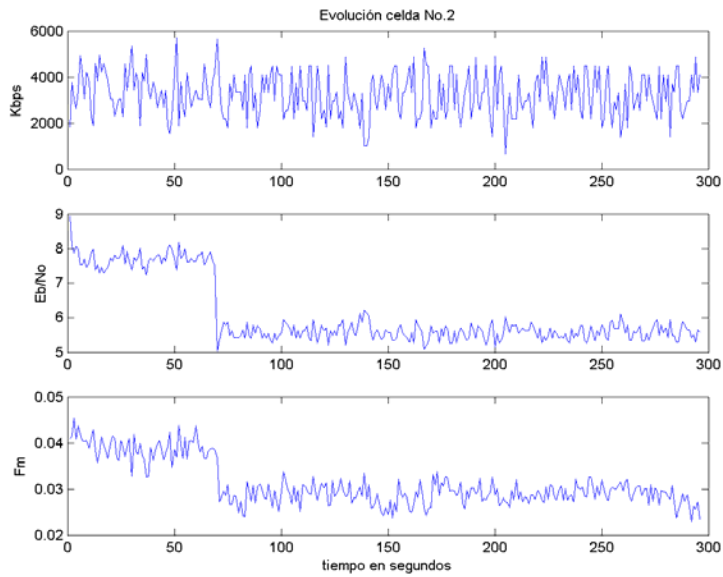
En la celda No.16 hay 61 llamadas, con un valor de  $E_b / N_0$  de 6 y un valor del factor  $F_m$  de 0.2. Al comparar esto con la situación de la celda No.2 se puede apreciar que la celda No.16 tiene como celdas vecinas a las celdas

No.11, No.12, No.15 y No.17, que tienen un numero relativamente bajo de llamadas activas, pero influyen sobre su vecina, aunque prevalece la interferencia intracelda, mientras la celda No.2 no tiene vecinas y por lo tanto la interferencia intercelda es prácticamente despreciable.



**Figura 32 Llamadas, relación Eb/No y factor Fm del sistema al finalizar la simulación**

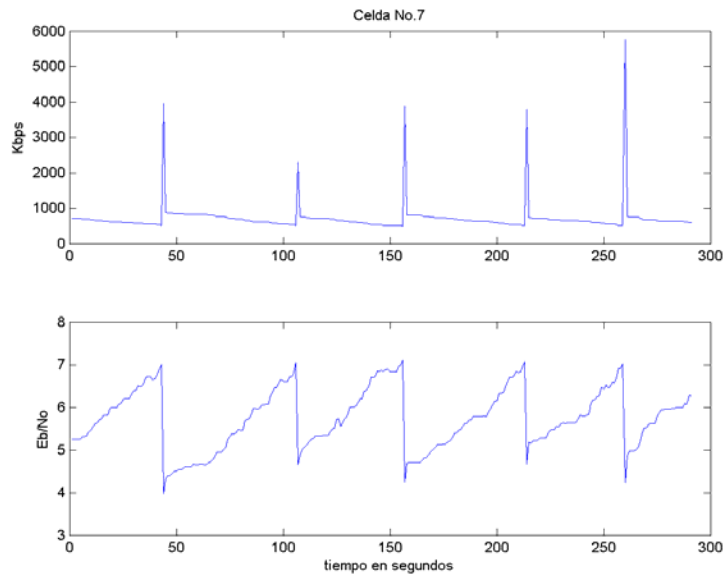
Las figuras siguientes muestran la evolución en el tiempo de la simulación para varias celdas.



**Figura 33 Evolución de la simulación en la celda No.2:  
Llamadas,  $E_b / N_0$  y factor  $F_m$**

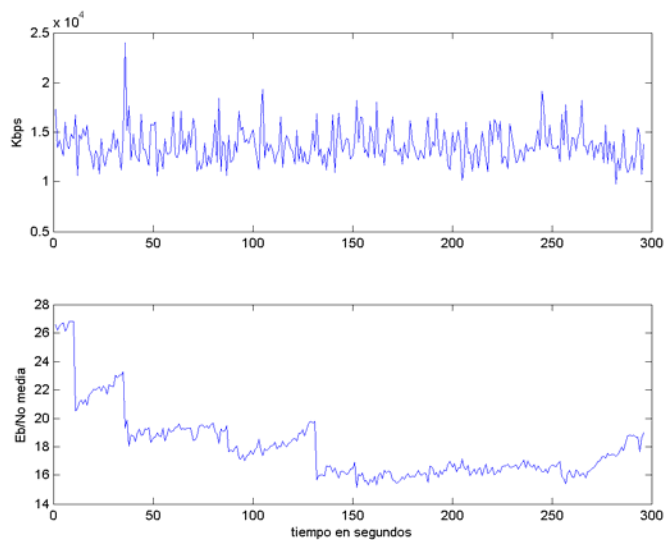
La Figura 33 muestra la evolución del sistema en el tiempo, para las variables de llamadas,  $E_b / N_0$  y factor  $F_m$ . Se puede observar que cerca del segundo 75 el valor de  $E_b / N_0$  disminuye; esta reducción del  $E_b / N_0$  indica que hay un aumento de la interferencia intercelda, pues empeora el  $E_b / N_0$  para un número de llamadas que no ha sufrido mayor variación.

En la Figura 34 se muestra la evolución del tráfico y el valor de  $E_b / N_0$  en la celda No.7, donde se observa el efecto de los picos de tráfico de datos sobre el valor de  $E_b / N_0$ . Igualmente se puede apreciar un efecto del mecanismo de admisión de llamadas sobre el valor de  $E_b / N_0$  en las caídas abruptas que presenta éste.



**Figura 34 Evolución del tráfico en Kbps y del valor Eb/No para la celda No.7**

En la Figura 35 se muestra la evolución en el tiempo del tráfico total en el sistema expresado en kilobits por segundo, y se muestra también la evolución del valor medio de  $E_b / N_0$  para el sistema.



**Figura 35 Evolución del tráfico total del sistema en Kbps y del valor medio de Eb/No**

### 5.3.2 Modelo de dieciocho celdas omnidireccionales usando el modelo Univalencia COST-231

#### 5.3.2.1 Topología del sistema (vecindad)

La Figura 36 muestra el mapa de mejor enlace del sistema. Este sistema está formado por 18 celdas uniformes, con una altura de antena transmisora 5 metros por encima de los edificios circundantes, una altura de usuario de 1.7 metros, antena omnidireccional y una PIRE de 21 dBm para todas las coberturas calculadas. El modelo de propagación empleado para calcular las coberturas es el modelo de la Universidad Politécnica de Valencia descrito en el proyecto COST-231, y que se encuentra implementado en la herramienta Cell-View.

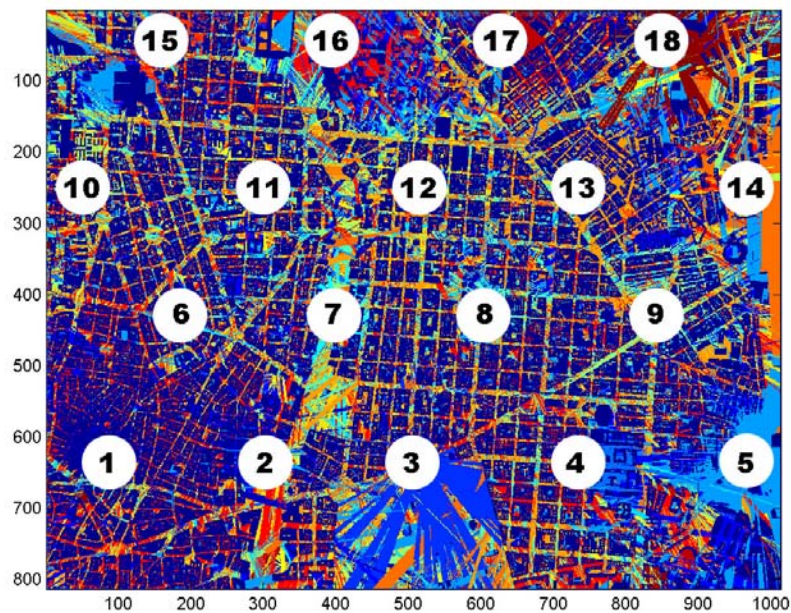


Figura 36 Mapa de mejor enlace para el sistema

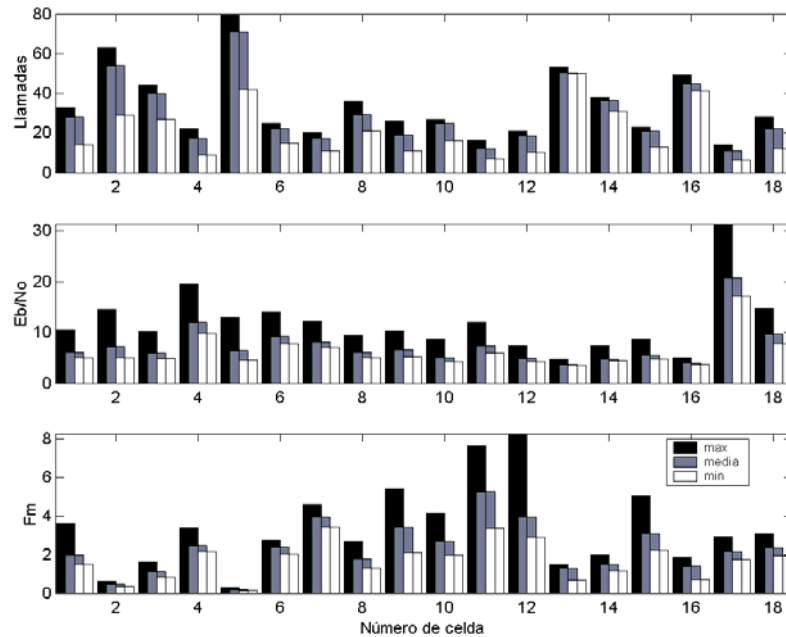
#### 5.3.2.2 Resultados de las simulaciones

La Figura 37 muestra los valores mínimo, máximo y medio de las llamadas,  $E_b / N_0$  y factor  $F_m$  durante toda la simulación. De la figura se observa el comportamiento y la relación entre estas variables. Por ejemplo, la celda No.1

tiene un promedio de 30 llamadas, un  $E_b / N_0$  cercano a 5 y un valor de  $F_m$  bajo, que indica que el valor de  $E_b / N_0$  depende en mayor grado de las llamadas dentro de la celda que de las llamadas externas a ellas.

Las celdas 11 y 12, que corresponden a las celdas centrales del sistema, tienen los valores más altos de  $F_m$  así como los valores más bajos de llamadas y de  $E_b / N_0$ , indicando claramente una fuerte influencia de las celdas externas.

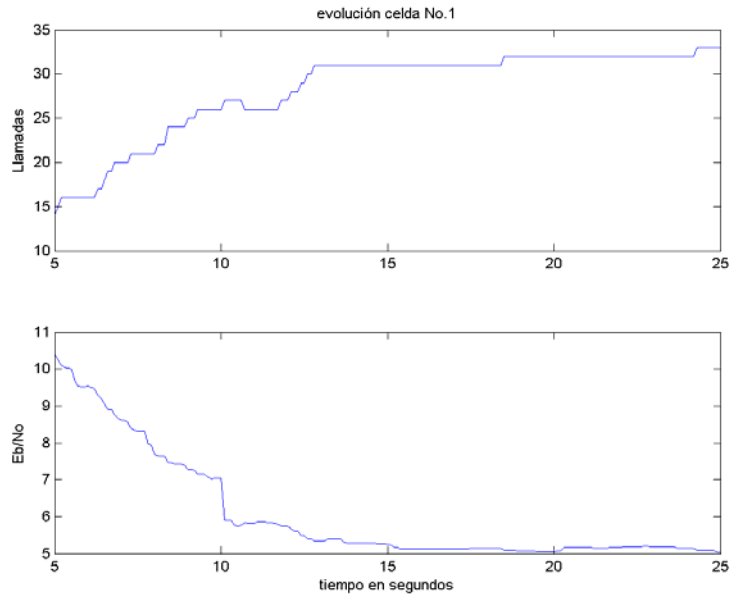
La figura indica que la celda No.7 tiene también un valor de  $F_m$  relativamente alto, acorde con su posición en el sistema. El caso de las celdas No.9 y No.10 es interesante, pues aunque están localizadas en un extremo del sistema, el valor medio de  $F_m$  es comparable al de la celda No.7 con pocas llamadas activas y un  $E_b / N_0$  medio cercano o inferior al valor de bloqueo.



**Figura 37 Valores máximo, medio y mínimo de llamadas,  $E_b / N_0$  y  $F_m$  durante la simulación**

La Figura 38 muestra la evolución de la celda No.1 en el tiempo de simulación. Se muestra en la figura el número de llamadas de voz en curso en el sistema y el valor de la relación  $E_b / N_0$ . Se alcanza a apreciar que hacia el segundo 13 las llamadas se estabilizan y sin embargo el valor de  $E_b / N_0$  continúa decreciendo. Este comportamiento es interesante, puesto que la

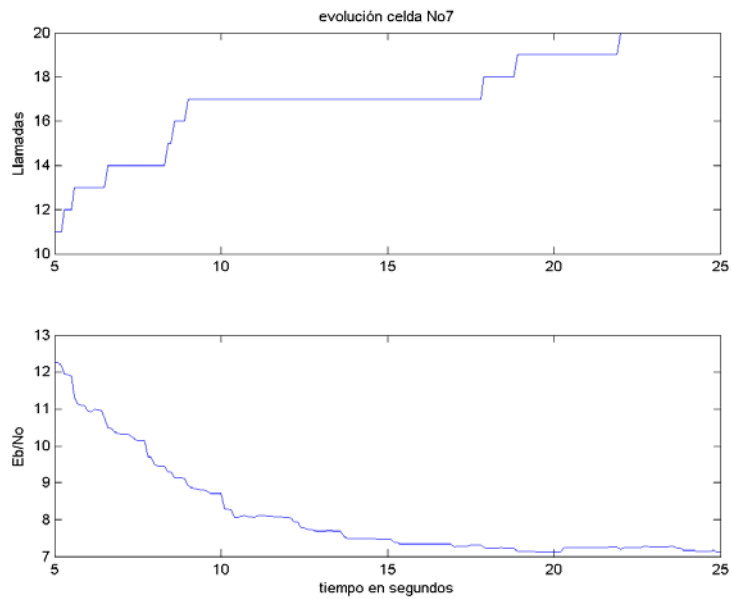
celda se encuentra en un extremo del sistema y debería tener muy poca influencia de las celdas externas, sin embargo se explica por la forma irregular del sistema y la alta interacción que hay entre todas las celdas, y que finalmente termina castigando la capacidad.



**Figura 38 Evolución de la celda No.1**

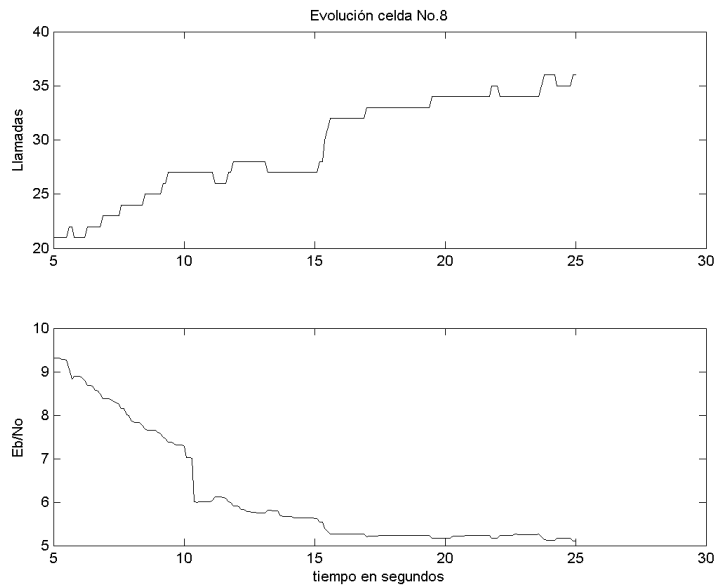
La Figura 39 muestra la evolución de llamadas en curso y valor de  $E_b / N_0$  en la celda No. 7. Se puede apreciar que aunque las llamadas se estabilizan en 17, el valor de  $E_b / N_0$  continúa decreciendo debido a la fuerte interacción que hay con las celdas vecinas en este sistema. A pesar de que esta celda está en el centro del sistema, y debe tener una mayor influencia de las celdas externas, se aprecia un comportamiento cualitativamente similar al de la celda No.1, que se podría explicar a partir de la estructura topológica del sistema.





**Figura 39 Evolución de llamadas en curso y  $E_b/N_0$  de la celda No.7**

La Figura 40 muestra la evolución en el tiempo de las llamadas en curso y la relación  $E_b / N_0$  para la celda no.8. Se puede apreciar un descenso brusco del valor de  $E_b / N_0$  hacia el segundo 10, aunque el número de llamadas permanece estable, y se alcanza el valor de bloqueo de  $E_b / N_0$  al llegar a 35 llamadas activas.



**Figura 40 Evolución en el tiempo de las llamadas en curso y la  $E_b / N_0$  de la celda No.8**

En la Figura 41 se muestra la evolución de las llamadas, el valor de  $E_b / N_0$  y del factor  $F_m$  para la celda No.10. En este caso, se observa que entre el segundo 10 y el 20, el número de llamadas permanece constante pero el valor de  $F_m$  va aumentando en este intervalo y el valor de  $E_b / N_0$  va decreciendo hasta situarse debajo del mínimo requerido y por consiguiente generar un bloqueo de esta celda. Al ser esta una celda situada en el extremo del sistema, este comportamiento puede parecer extraño, mas cuando se compara con un sistema ideal donde los resultados obtenidos para esta celda no serían significativos desde el punto de vista de una simulación, pero nuevamente este comportamiento puede ser explicado en términos de la estructura topológica de este sistema.

En la Figura 42 se muestran los resultados de  $E_b / N_0$  obtenidos en la simulación y la distribución normal más ajustada a estos resultados, para la celda No.10. Es claro que los resultados difieren mucho de una distribución normal, debido a la forma más “real” de las coberturas, lo que va a modificar las interacciones entre celdas y tráfico.

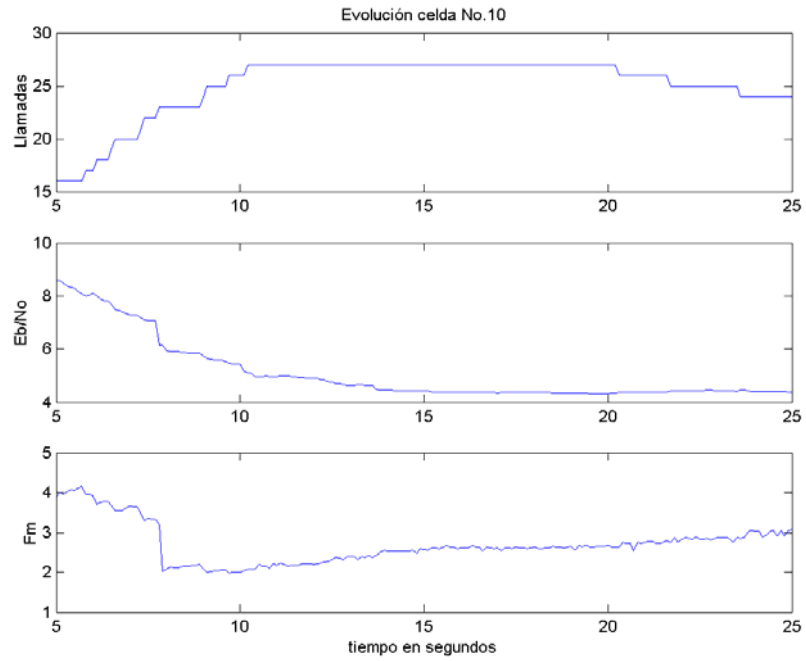


Figura 41 Evolución en el tiempo de las llamadas en curso, la  $E_b / N_0$  y el factor  $F_m$  de la celda No.10

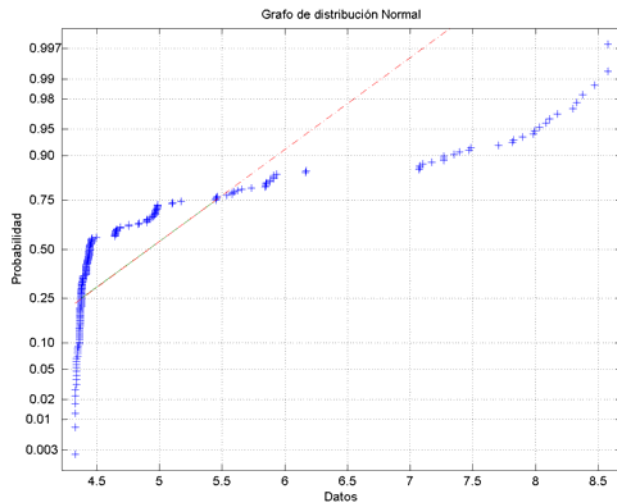
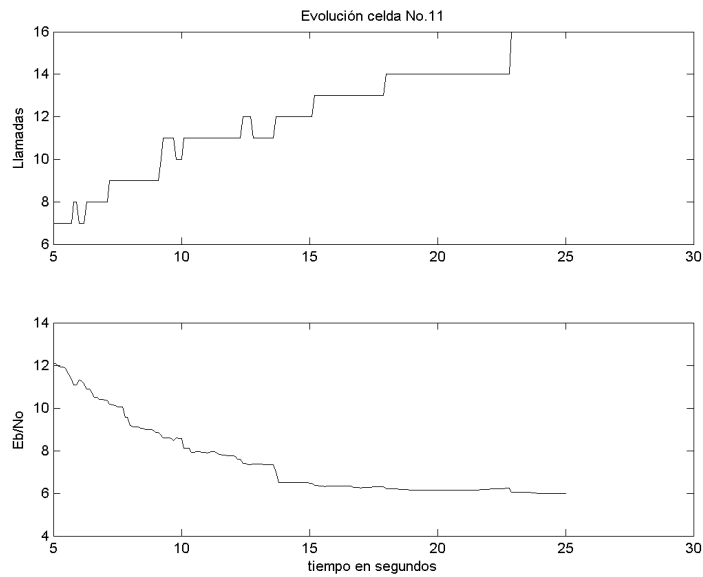


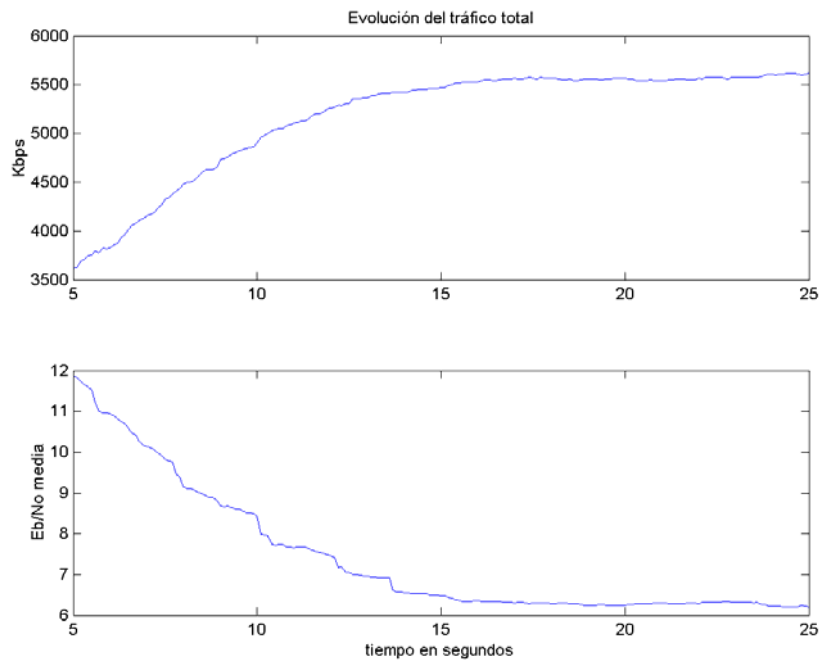
Figura 42 Grafo de distribución normal contra resultados de simulación de la  $E_b / N_0$  en la celda No.10

La Figura 43 muestra la evolución de las llamadas en curso así como la evolución de la relación  $E_b / N_0$  para la celda No.11. Se puede apreciar que la celda empieza a cercarse a su valor de bloqueo con 16 llamadas, que es algo menos de la mitad que para la celda No.8 y menor también que la celda No.7. Tanto la celda No7 como la No.8 están en condiciones similares a la celda No.11 por su posición en el sistema, sin embargo es claro que la celda No.11 se ve más afectada por la interferencia externa.



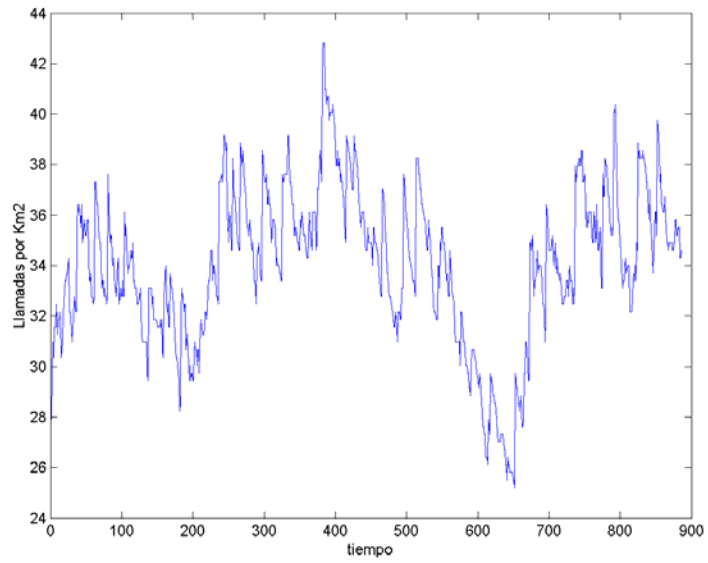
**Figura 43 Evolución en el tiempo de las llamadas en curso y la  $E_b/N_0$  de la celda No.11**

La Figura 44 muestra la evolución en el tiempo del tráfico total del sistema en Kbps y el valor medio de la relación  $E_b / N_0$ . Se aprecia el comportamiento del sistema hasta que empieza a estabilizar. El valor medio de llamadas que atiende el sistema en esta simulación es de 538.44 ó 5.17 Mbps, valor que está por debajo del obtenido para el sistema de 18 celdas y simulado con el modelo de Hata. El valor de la  $E_b / N_0$  media es de 7.4, lo que permite al sistema aceptar tráfico, aunque haya algunas celdas bloqueadas, como se ha mostrado antes.

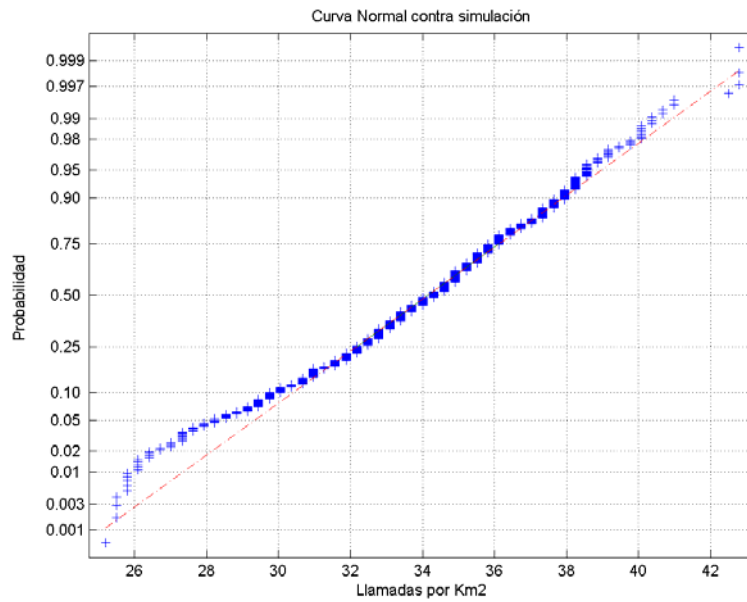


**Figura 44 Evolución en el tiempo del sistema**

La Figura 45 muestra la evolución de las llamadas por kilómetro cuadrado en el sistema, la media es 34.05 y la desviación estándar es 3.05. En la Figura 46 se muestra la gráfica de ajuste de la distribución normal contra los resultados de simulación para la densidad de llamadas por kilómetro cuadrado y se encuentra un ajuste bastante alto respecto a la distribución normal.



**Figura 45** Número de llamadas por kilómetro cuadrado en el sistema.

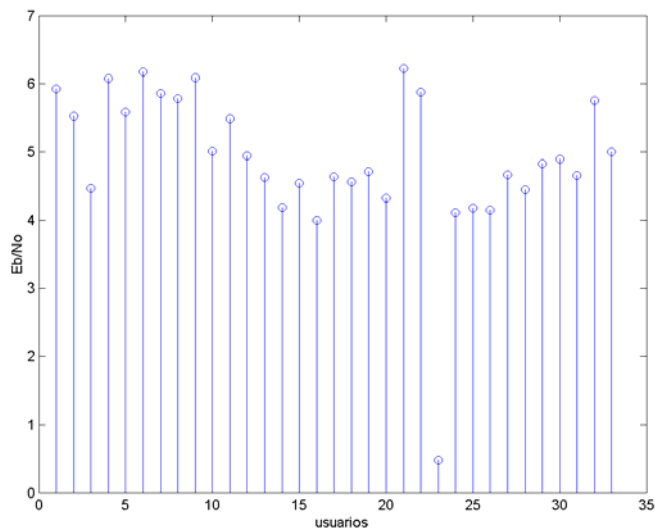


**Figura 46** Ajuste de distribución normal y resultados de simulación en llamadas por kilómetro cuadrado

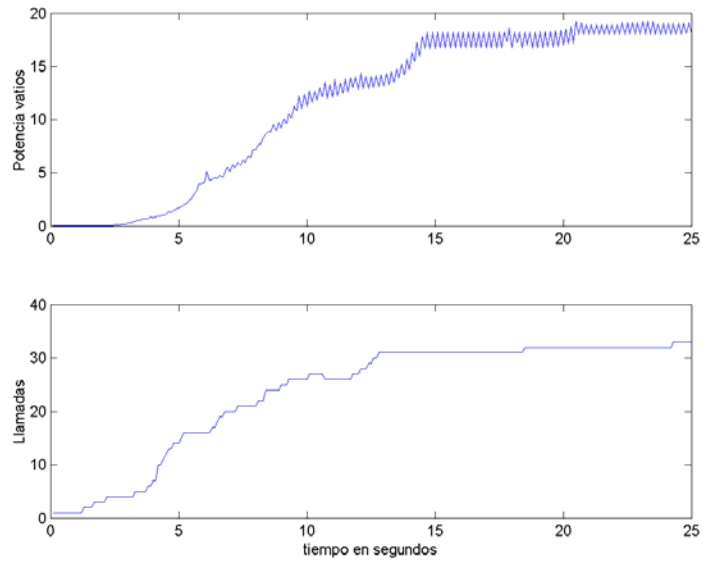
### 5.3.2.3 Resultados de simulación en el Down-Link

Para analizar el comportamiento de la capacidad en el DL, se ejecutó una simulación corta, con un intervalo de tiempo de 0.1 segundos, un factor de ortogonalidad de 0.1 y con tráfico de voz únicamente. Es claro que el tráfico más restrictivo en el *down-link* es el tráfico de datos, sin embargo se pretende evaluar el efecto de la interferencia intercelda. Se muestran a continuación resultados de la evolución de la potencia en nodos B y de las llamadas en el sistema, así como el  $E_b / N_0$  que perciben los usuarios en el *down-link* y el  $E_b / N_0$  para el up-link, con el fin de evaluar el balance de los enlaces desde el punto de vista de capacidad. El control de potencia se ajustó para un  $E_b / N_0$  requerido de 5, igual al utilizado en el *up-link*.

La Figura 47 muestra el valor del  $E_b / N_0$  percibido por los usuarios de la celda No.1, mientras que la Figura 48 muestra la evolución de la potencia de la estación base y las llamadas en dicha celda. Se observa que el valor medio de  $E_b / N_0$  percibido por los usuarios es de 5, mientras que la potencia de la EB está llegando al límite de los 20 vatios y el valor de  $E_b / N_0$  en el *up-link* es de 5.03. En este caso se puede decir que hay un perfecto balance entre el *up-link* y el *down-link*.



**Figura 47  $E_b / N_0$  percibido por los usuarios en el *down-link* en la celda No.1**



**Figura 48 Evolución de la potencia del nodo B y las llamadas en la celda No.1**

La Figura 49 muestra el valor de  $E_b / N_0$  percibido por los usuarios de la celda No.7 en el *down-link* y la Figura 50 muestra la evolución de la potencia de la estación base y las llamadas en la misma celda. En este caso, la potencia está cerca de los 20 vatios y el  $E_b / N_0$  percibido por los usuarios está muy por debajo de 5 (el valor medio es de 1.08), que es el mínimo requerido. El valor de  $E_b / N_0$  en el *up-link* es de 7.1, por lo que la capacidad de esta celda está restringida por el *down-link*.



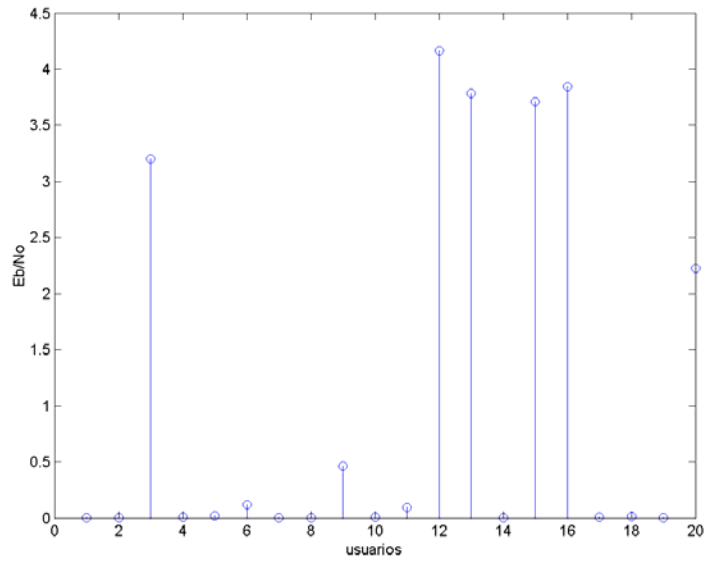


Figura 49  $E_b / N_0$  percibido por los usuarios en la celda No.7

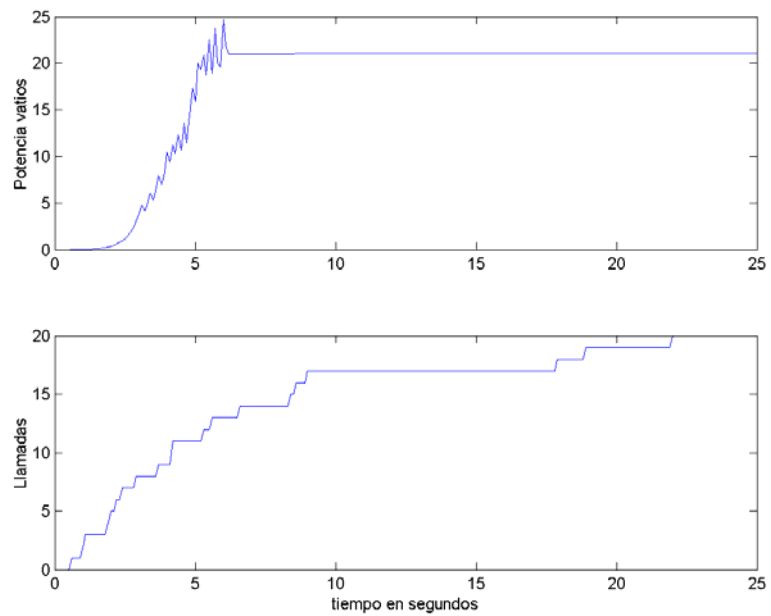


Figura 50 Evolución de la potencia en el nodo B y llamadas para la celda No.7

### 5.3.3 Modelo de 14 celdas omnidireccionales usando el modelo Univalencia COST-231

#### 5.3.3.1 Topología del sistema

La Figura 51 muestra el mapa de mejor enlace del sistema. Las celdas en este sistema tienen las mismas características que las celdas del escenario anterior, pero hay un mayor espaciamiento entre celdas. En este caso, aunque hay menos celdas, la zona de servicio está completamente cubierta.

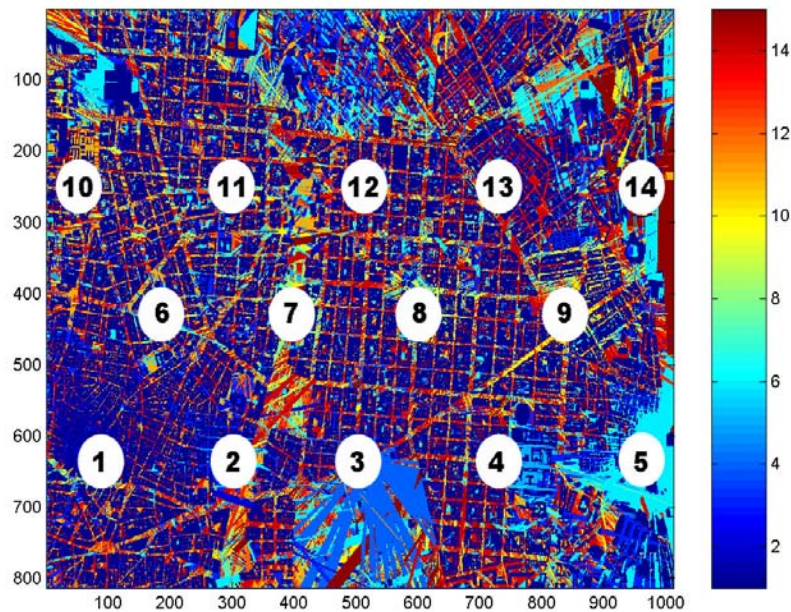
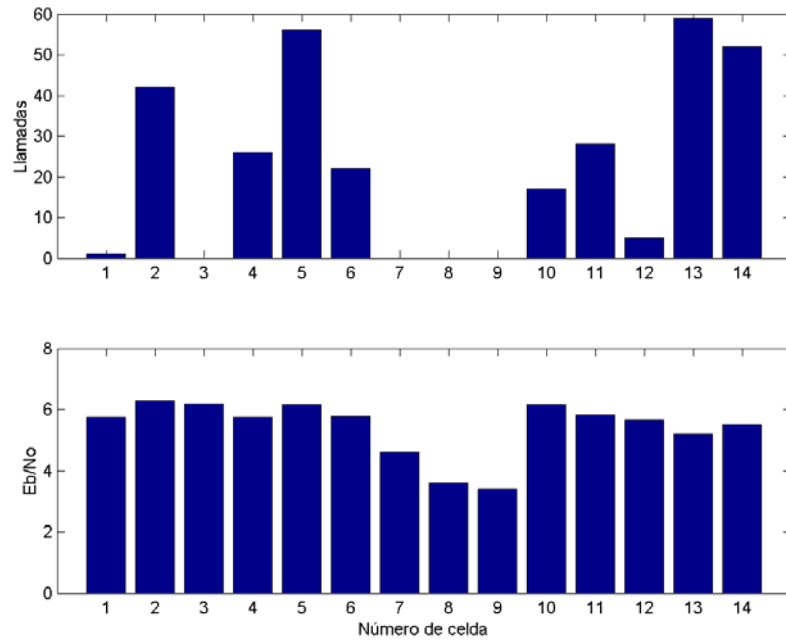


Figura 51 Mapa de mejor enlace del sistema

#### 5.3.3.2 Resultados de simulaciones

La Figura 52 muestra las llamadas en curso por celda al finalizar la simulación y el valor de  $E_b / N_0$ . Se observa que las celdas No.1, No.3, No.7, No.8 y No.9 no tienen llamadas en ese instante o tienen muy pocas llamadas, y su

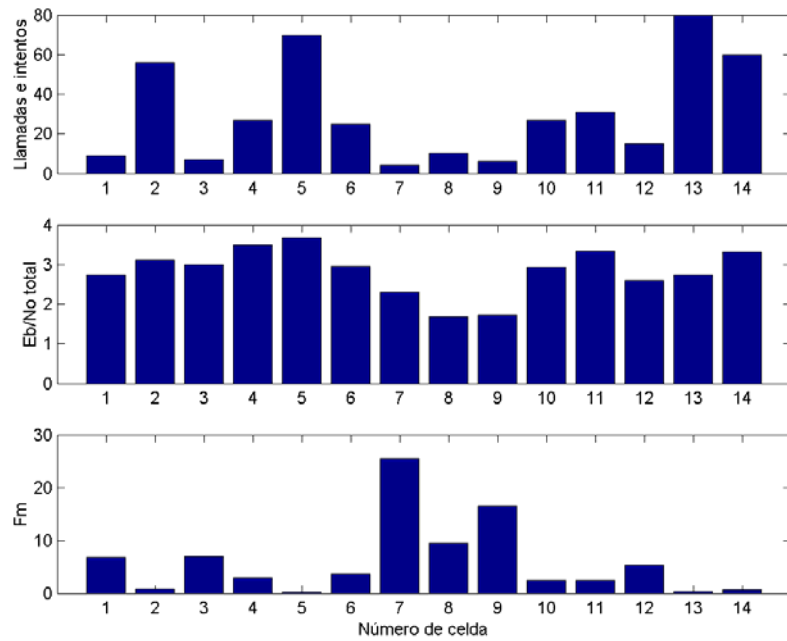
valor de  $E_b / N_0$  está cerca del valor mínimo establecido en la simulación, por lo que no están en capacidad de aceptar llamadas.



**Figura 52 Llamadas en curso y  $E_b / N_0$  al final de la simulación**

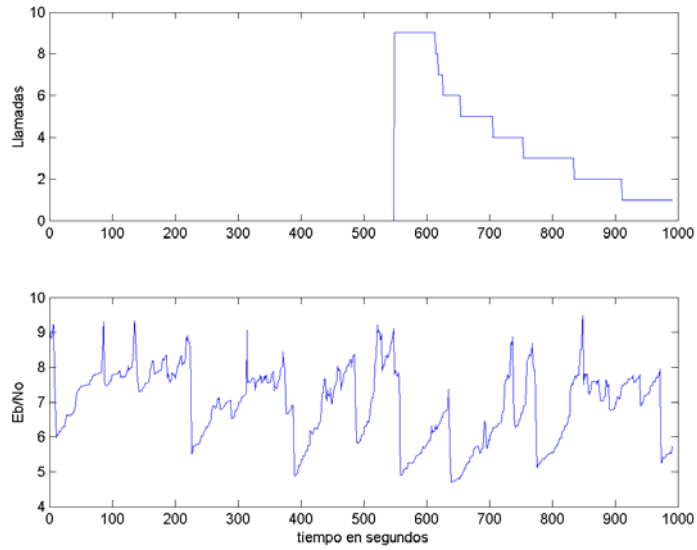
La Figura 53 muestra el estado de llamadas cursadas y bloqueadas,  $E_b / N_0$  total y factor  $F_m$  del sistema al finalizar la simulación. Las llamadas que se muestran en las celdas No.2, No.3, No.7, No.8 y No.9 corresponden a llamadas bloqueadas pues el valor de  $E_b / N_0$  queda por debajo del mínimo establecido.

Igualmente, estas celdas tienen valores del factor  $F_m$  relativamente altos, indicando que la interferencia de la celda es provocada principalmente por usuarios externos a ella.

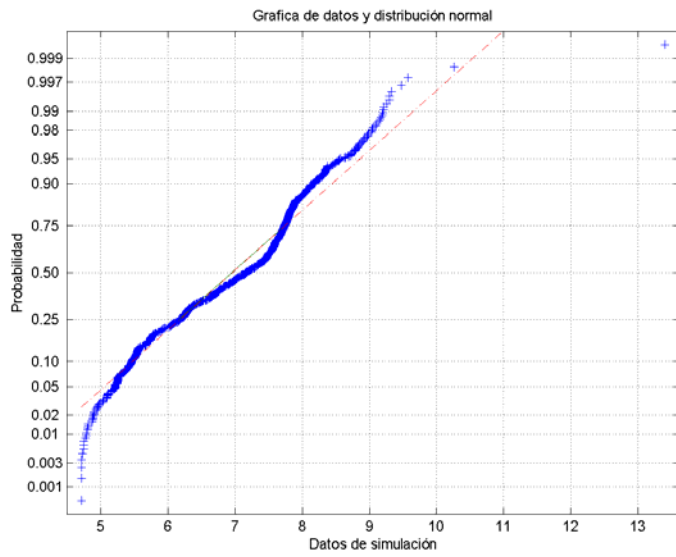


**Figura 53 Estado del sistema al terminar la simulación**

La Figura 54 muestra la evolución de las llamadas y el  $E_b/N_0$  para la celda No.1. Se observa claramente que no hay una relación entre el valor de  $E_b/N_0$  y el número de llamadas, pues la interferencia sobre esta celda proviene de usuarios externos a ella. En la Figura 55 se muestra una gráfica de la distribución normal y los datos de  $E_b/N_0$  para la celda No.1, con un ajuste de datos cercano a la normal. Al ser una celda situada en el extremo inferior del sistema, la interacción con celdas vecinas es baja y este resultado concuerda con dicha situación.



**Figura 54 Evolución de llamadas y Eb/No en la celda No.1**



**Figura 55 Gráfica de distribución normal y datos de simulación para el  $E_b / N_0$  de la celda No.1**

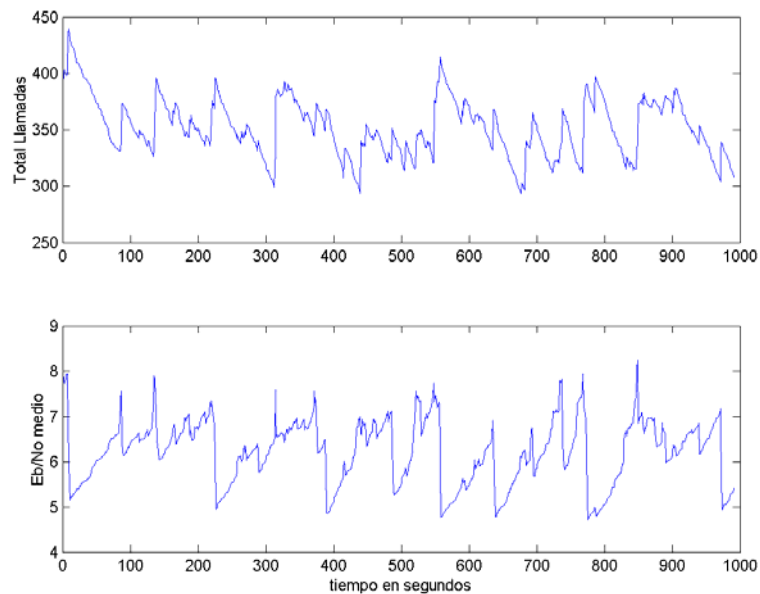
La Figura 56 muestra la evolución de llamadas totales y el valor medio de la  $E_b / N_0$  para el sistema durante toda la simulación. El promedio de llamadas

totales en el sistema es de 352 y la  $E_b / N_0$  media es de 6, por lo que el sistema está operando en el límite de la capacidad establecida para la simulación.

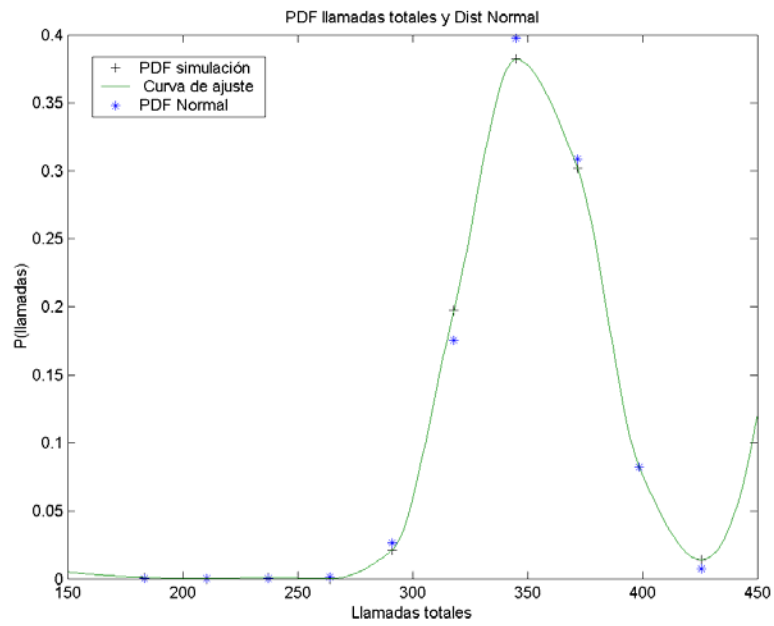
La Figura 57 muestra la función densidad de probabilidad (PDF) para las llamadas totales de voz en el sistema y una distribución normal con media 351.94 y desviación estándar 26.56. Del ajuste obtenido, se puede decir que la distribución de llamadas en el sistema es normal.

En la Figura 58 se muestran las llamadas por kilómetro cuadrado en el sistema contra el tiempo de simulación. El valor en el tiempo es mayor que el observado para el sistema anterior, con un promedio de 106 llamadas de voz por kilómetro cuadrado.

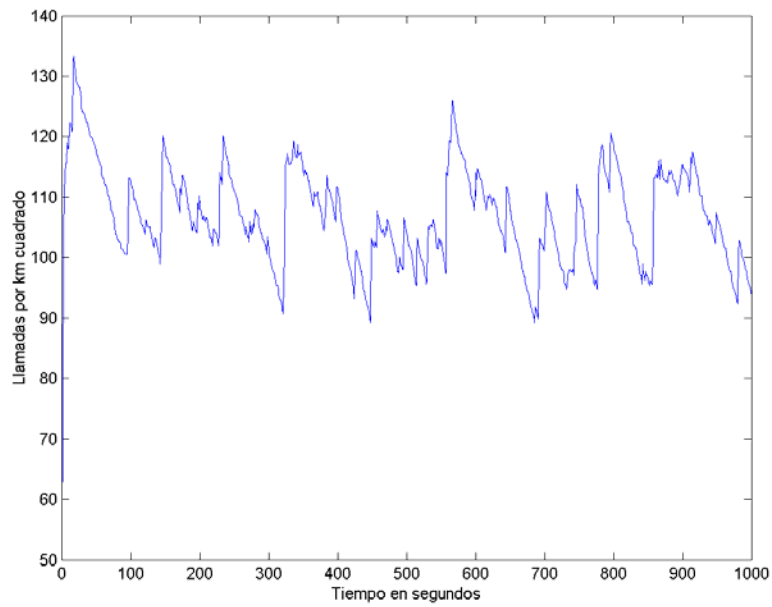
La Figura 59 muestra las llamadas totales de datos en el sistema y la evolución de la  $E_b / N_0$  media. Finalmente, la Figura 60 muestra la capacidad del sistema en kilobits por segundo por kilómetro cuadrado, obteniendo un promedio de 1.07Mbps por kilómetro cuadrado y una desviación estándar de 167.1.



**Figura 56 Evolución de llamadas totales y  $E_b / N_0$  medio para el sistema**



**Figura 57 PDF de los resultados de simulación y distribución normal para las llamadas totales de voz**



**Figura 58 llamadas de voz por kilómetro cuadrado en el sistema**

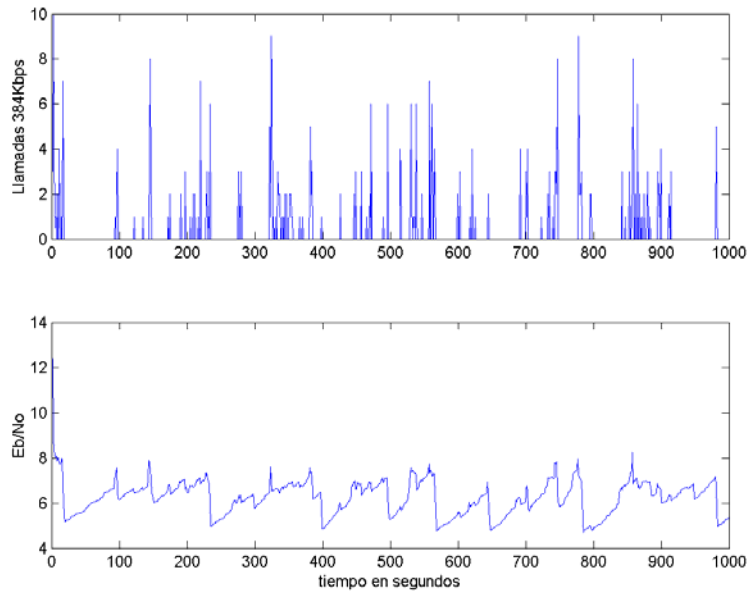


Figura 59 Llamadas de datos del sistema y  $E_b / N_0$  media

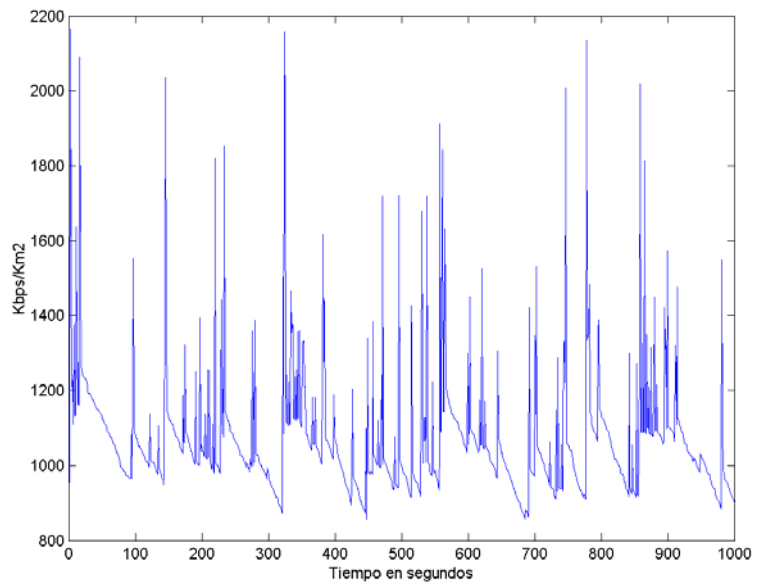
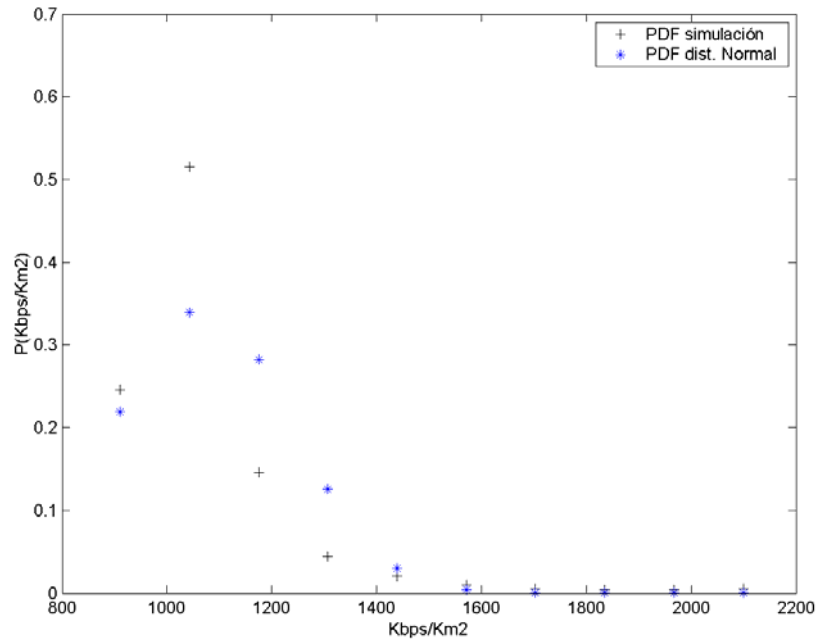


Figura 60 Capacidad del sistema en Kbps por kilómetro cuadrado



Finalmente, de la Figura 61 se observa que la función densidad de probabilidad para la capacidad del sistema en kilobits por segundo por kilómetro cuadrado se ajusta a una distribución normal con media 1.07Mbps y una desviación estándar de 167.1. Este sistema entonces tiene un comportamiento similar a un sistema ideal en cuanto a la estadística de su capacidad. Para este sistema, la capacidad por celda es de 76.44Kbps.

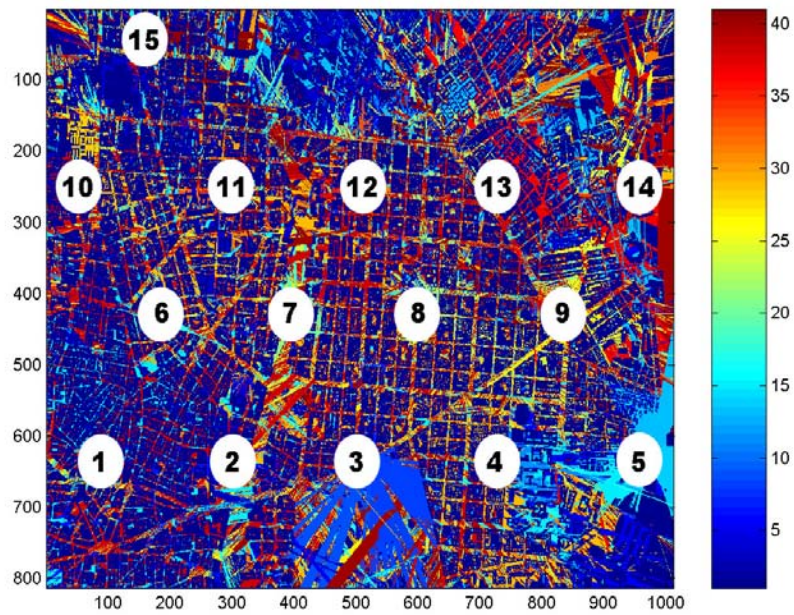


**Figura 61 Función densidad de probabilidad para la capacidad en Kbps/Km<sup>2</sup>**

### **5.3.4 Modelo de 15 celdas regulares con tres sectores cada una usando el modelo Univalencia COST-231**

#### **5.3.4.1 Topología del sistema**

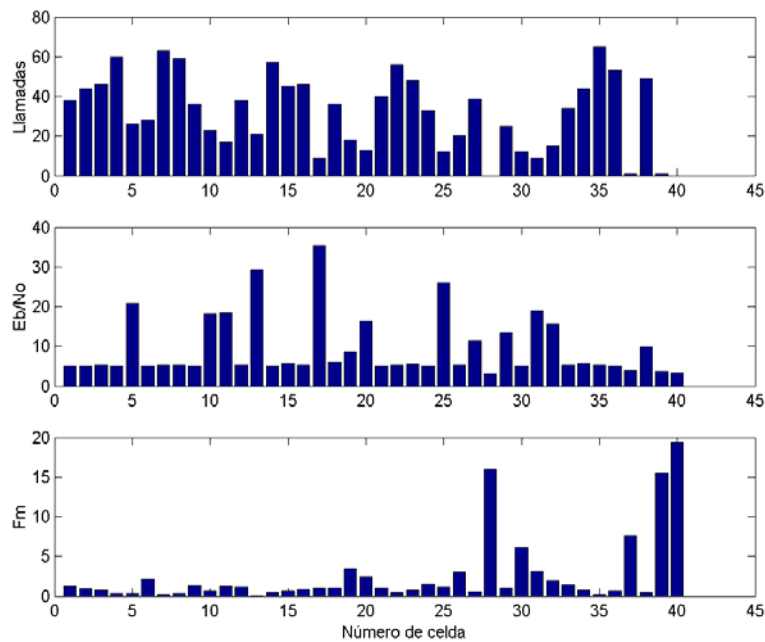
Este escenario está formado por 15 celdas, cada una con tres sectores de 120 grados. El total de sectores utilizado es de 40, ya que las celdas que están en posiciones extremas del área de servicio no emplean los tres sectores. La PIRE de cada sector es de 21 dBm, el patrón de radiación de la antena es real, por lo la sectorización es imperfecta. La altura de las antenas es de 5 metros por encima de los edificios circundantes y el receptor se sitúa a 1.7 metros. En la Figura 62 se muestra el mapa de mejor enlace del sistema.



**Figura 62 Mapa de mejor enlace del sistema con 15 celdas sectorizadas**

#### 5.3.4.2 Resultados de simulaciones

La Figura 63 muestra los valores de llamadas,  $E_b / N_0$  y factor  $F_m$  al finalizar una simulación. Se observa que algunas coberturas no tienen llamadas o tienen muy pocas, pero su valor de  $E_b / N_0$  es muy bajo, como son las celdas No.28, No.37, No.39 y No.40. Todas estas celdas tienen valores altos de  $F_m$ , indicando que la interferencia proviene de celdas externas.



**Figura 63 Estado de llamadas,  $E_b/N_0$  y factor  $F_m$  al finalizar la simulación**

En la Figura 64 se muestra la evolución en el tiempo de las llamadas y el  $E_b/N_0$  de la celda No.4. El valor medio de las llamadas está alrededor de las 60 y el  $E_b/N_0$  se mantiene cercano a 5, que es el valor mínimo requerido. La correlación entre llamadas y  $E_b/N_0$  es de 0.37, por lo que se concluye que existe una influencia alta de la interferencia intercelda.

En la Figura 65 se muestra la evolución en el tiempo de las llamadas y el  $E_b/N_0$  para la celda No.28. Se observa que la celda no acepta más llamadas durante la simulación y estas se van reduciendo a medida que la duración asignada termina, ya que el valor de  $E_b/N_0$  está por debajo del mínimo requerido.

En la Figura 66 se muestra la evolución del factor  $F_m$  para la celda No.28. Se puede observar que a medida que disminuye el número de llamadas, el factor  $F_m$  va aumentando, pues el  $E_b/N_0$  permanece constante, lo que indica que la interferencia intercelda aumenta progresivamente con relación a la interferencia intracelda.

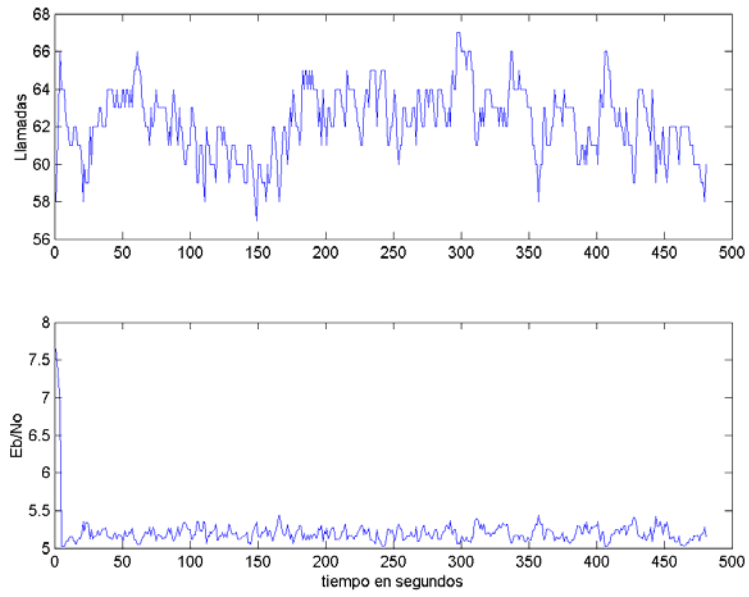


Figura 64 Evolución de llamadas y  $E_b / N_0$  en la celda No.4

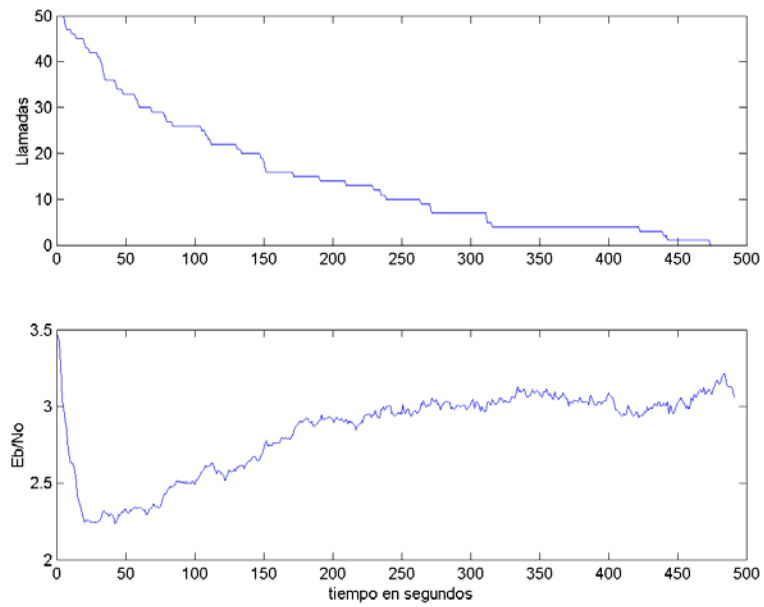
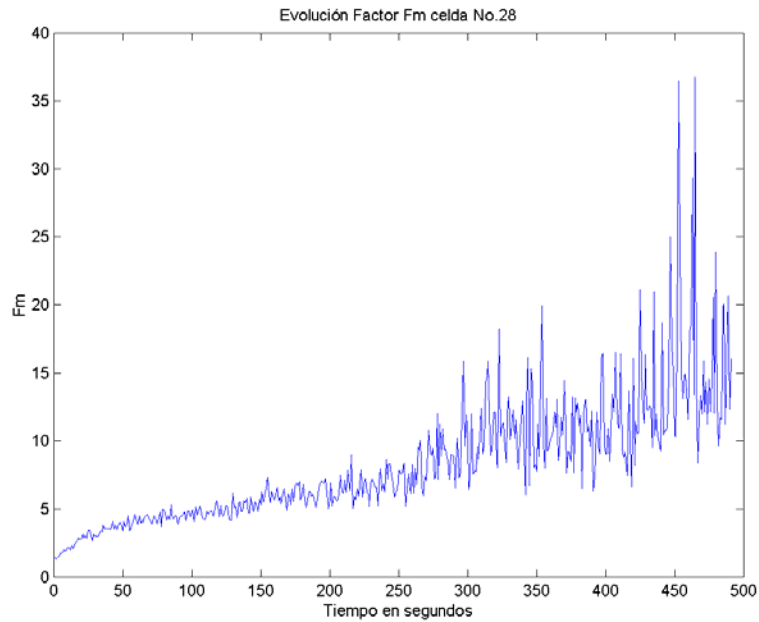


Figura 65 Evolución de llamadas y  $E_b / N_0$  en la celda No.28



**Figura 66 Evolución del factor Fm para la celda No.28**

En la Figura 67 se muestra la evolución en el tiempo del total de llamadas en el sistema y el  $E_b / N_0$  medio. El valor medio del total de llamadas es de 1.277, el máximo número de llamadas en el sistema es de 1.365, el valor medio de  $E_b / N_0$  es de 10.1 y el valor mínimo es de 9.3. Esto implica que el sistema tiene todavía capacidad para procesar llamadas. En la Figura 68 se muestra la evolución de la capacidad del sistema en kilobits por segundo por kilómetro cuadrado, obteniendo una media de  $3.738Mbps / Km^2$  y un promedio de  $303.15Kbps$  por celda.

El valor de llamadas que se obtiene para este sistema es 3.8 veces mayor que el obtenido para el sistema anterior, lo que da una relación mayor que lo previsto en sistemas ideales entre un sistema con celdas omnidireccionales y un sistema con celdas sectorizadas.

Finalmente, en la Figura 69 se muestra la PDF obtenida de la simulación para la capacidad en kilobits por segundo por kilómetro cuadrado y en la Figura 70 se muestra un gráfico de los resultados de simulación contra la PDF de la distribución normal más ajustada a dichos resultados. En ambos casos se observa que los resultados no se ajustan a la distribución normal. Para el caso de la capacidad en kilobits por segundo y por kilómetro cuadrado, pareciera que se dieran dos distribuciones normales inter-relacionadas.

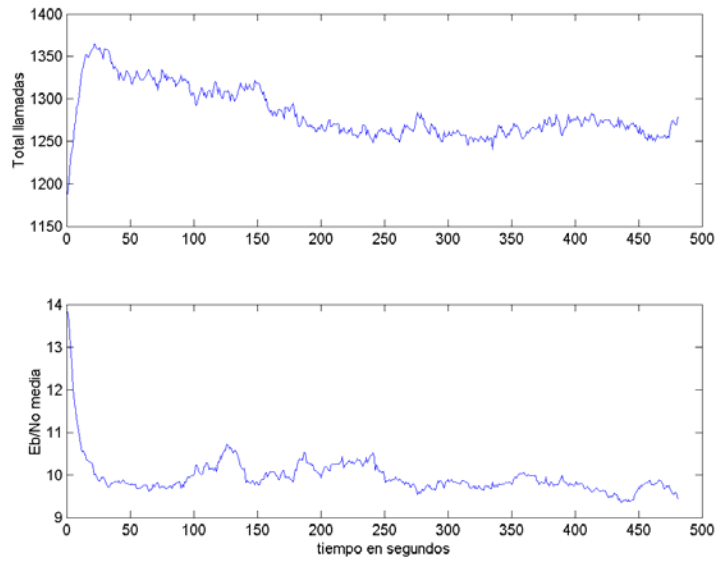


Figura 67 Evolución del total de llamadas del sistema y el  $E_b / N_0$  medio

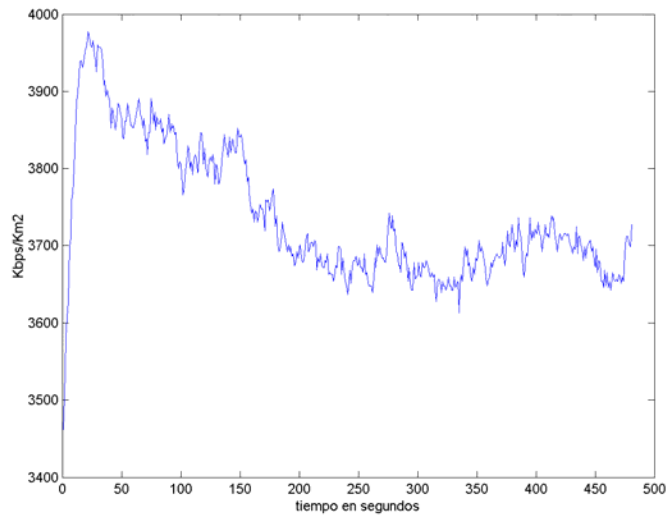


Figura 68 Evolución de la capacidad en Kbps/Km2

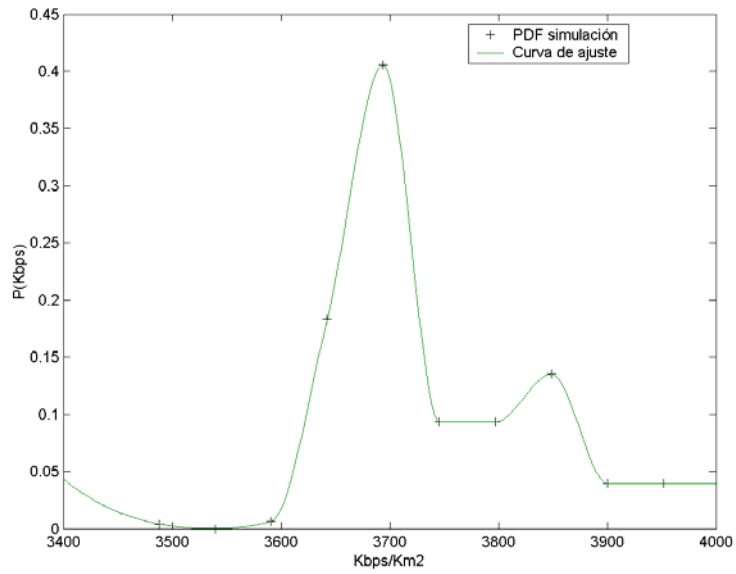


Figura 69 PDF de los resultados de simulación para la capacidad en Kbps/Km2

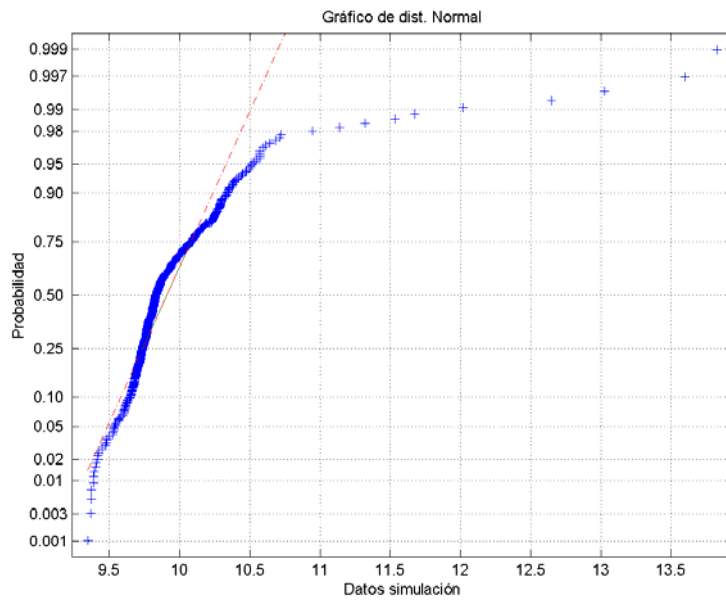


Figura 70 Gráfica de distribución normal y resultados de simulación para la  $E_b / N_0$  media del sistema

### 5.3.5 Modelo de seis celdas omnidireccionales usando el modelo Univalencia COST-231

#### 5.3.5.1 Topología del sistema (vecindad)

La Figura 71 muestra el mapa de mejor enlace del sistema. Este sistema está formado por seis celdas con altura de antena transmisora igual al sistema de dieciocho celdas y receptores a 1.7 metros. La PIRE es de 21 dBm y se emplea un patrón de radiación omnidireccional, así como el modelo de propagación de la Universidad Politécnica de Valencia, descrito en el reporte final del proyecto COST-231 y que se incluye en la herramienta Cell-View. La numeración de las celdas que se muestra se corresponde a la localización de sus equivalentes en el sistema de dieciocho celdas y para efectos de los resultados se numeran en forma ascendente de 1 a 6, es decir, la celda 1 de la figura corresponde a la celda 1 del sistema y la celda 15 de la figura corresponde a la celda 6 del sistema.

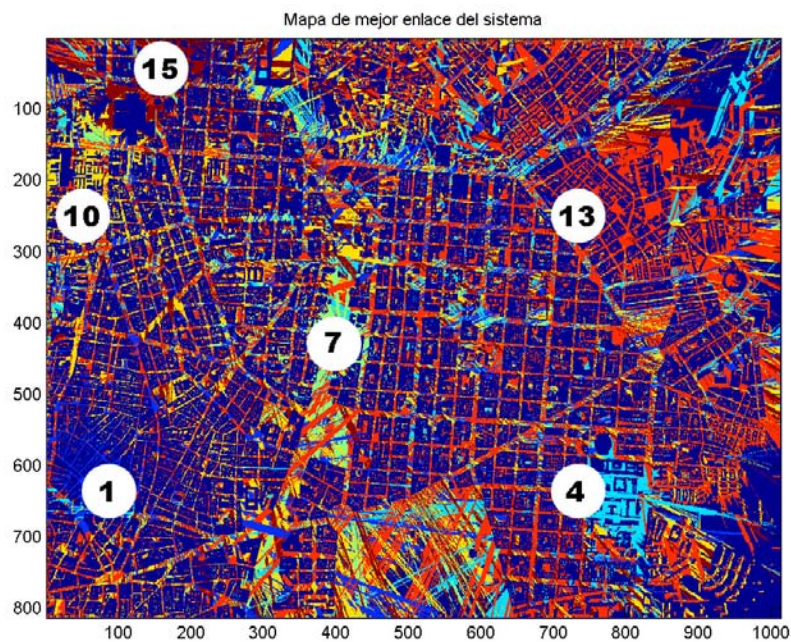


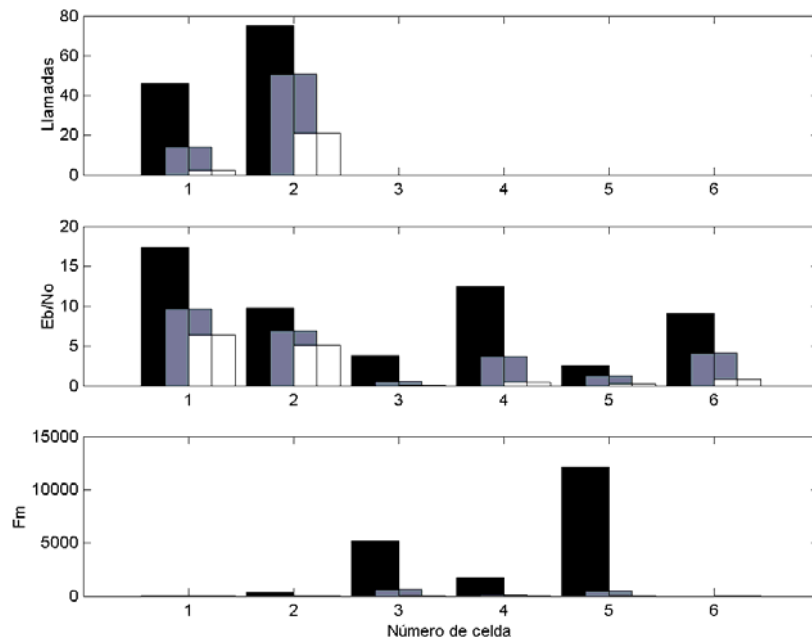
Figura 71 Mapa de mejor enlace del sistema

#### 5.3.5.2 Resultados de simulaciones

La Figura 72 muestra los valores máximo, medio y mínimo para las variables de llamadas,  $E_b / N_0$  y  $F_m$  durante toda la simulación. Se muestra en la



parte superior el comportamiento de las llamadas en curso, en la parte intermedia de la gráfica se muestra el comportamiento del valor de la relación  $E_b / N_0$  y en la parte de abajo se muestra el comportamiento del factor  $F_m$ . De esta figura se puede apreciar la relación entre el factor  $F_m$  y la interferencia en el sistema; por ejemplo, en la celda No.5 el valor del factor  $F_m$  es bastante alto (hasta 1000), y el número de llamadas es bajo (cero), aunque la relación  $E_b / N_0$  es muy mala. Esto significa que la mayor parte de la interferencia viene de las celdas externas. En este caso, si se revisa el número de llamadas en curso (0) y el valor de  $E_b / N_0$  medio (0.22) que se obtiene por estas llamadas en curso, se encuentra que la celda está bloqueada por las llamadas activas por fuera de la celda.

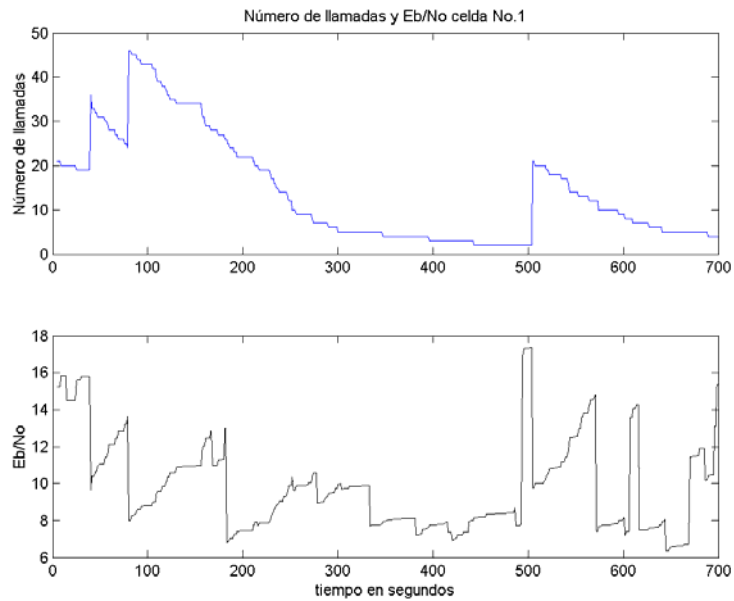


**Figura 72 Llamadas en curso y  $E_b / N_0$  al final de la simulación**

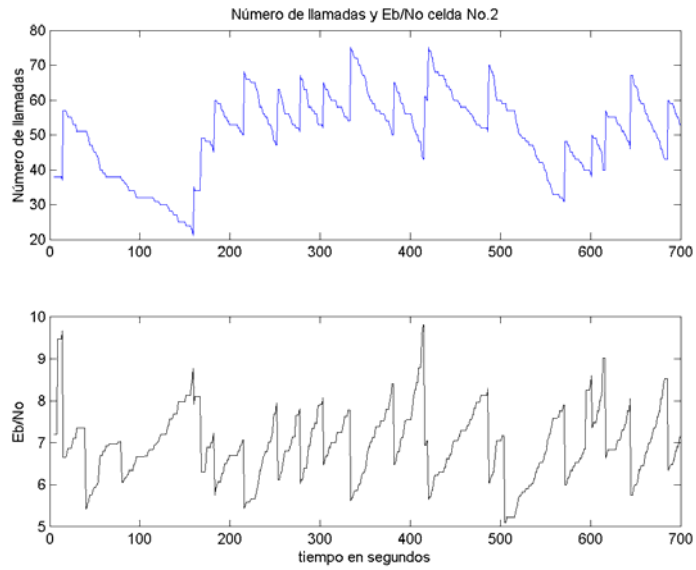
Como se aprecia en la Figura 72, en esta simulación sólo se cursan llamadas en la celda No.1 y en la celda No.2. La Figura 73 muestra la evolución de la simulación para la celda No.1, y se muestran las llamadas en curso y la relación  $E_b / N_0$  para estas llamadas en curso en el sistema. Se puede observar que no hay una relación directamente proporcional entre el número de llamadas y la relación  $E_b / N_0$ .

La Figura 74 muestra la evolución de las llamadas en curso y la relación  $E_b / N_0$  para la celda No.2. Al igual que para la celda No.1, no hay una relación directamente proporcional entre las llamadas y la relación  $E_b / N_0$ , aunque la gráfica parece mostrar una relación un poco más directa que para la celda No.1.

Efectivamente, el coeficiente de correlación entre el  $E_b / N_0$  y las llamadas en curso para la celda No.2 es ligeramente mejor que para la celda No.1.

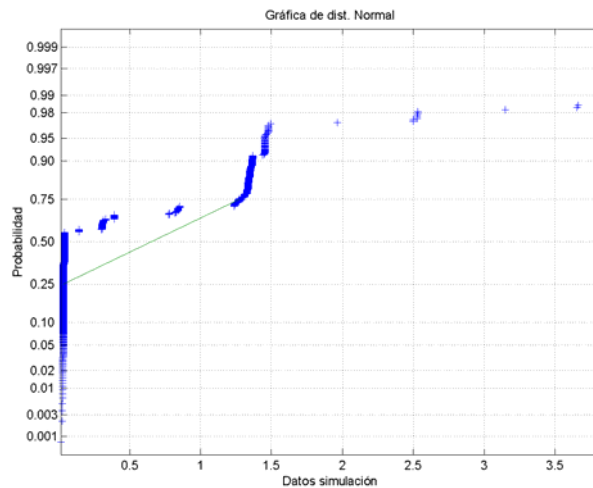


**Figura 73 Evolución de llamadas y  $E_b / N_0$  en la celda No.1**



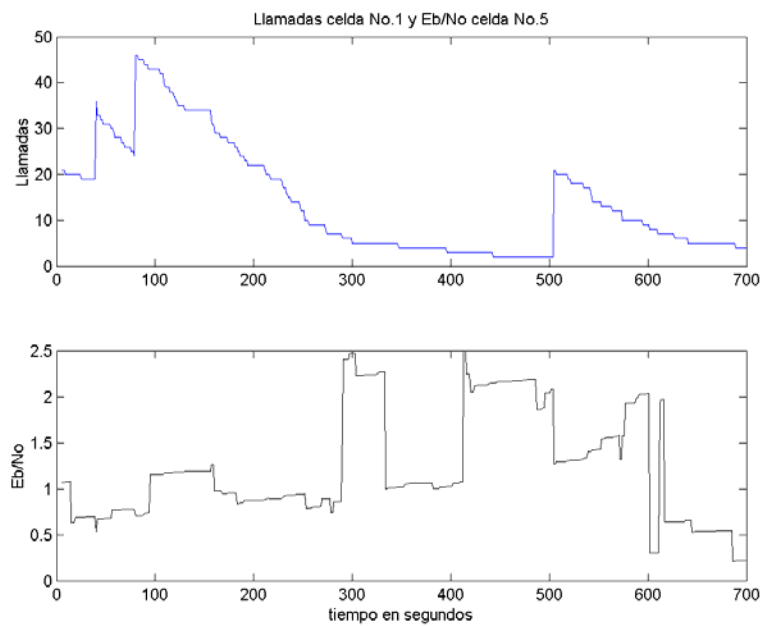
**Figura 74 Evolución de llamadas y  $E_b / N_0$  en la celda No.2**

En la Figura 75 se muestra la gráfica de resultados de  $E_b / N_0$  y distribución normal para la celda número 3, de donde se aprecia que no existe ajuste de los datos con la recta de la distribución normal, por lo tanto la evolución de la  $E_b / N_0$  no corresponde a una distribución normal, a diferencia de los sistemas ideales.

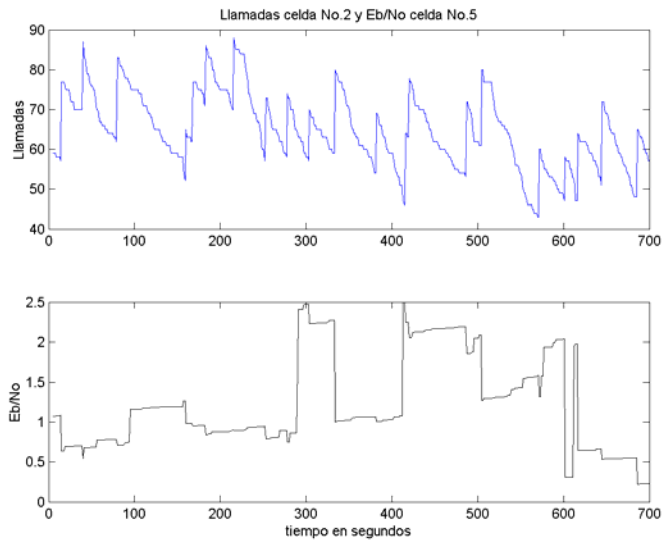


**Figura 75 Gráfica de resultados de simulación para la  $E_b / N_0$  en la celda No.3 contra la distribución normal**

La Figura 76 y la Figura 77 muestran las llamadas en la celda No.1 y la celda No.2 y la relación  $E_b / N_0$  de la celda No.5. Los coeficientes de correlación entre las llamadas en curso de cada celda y el factor  $E_b / N_0$  de la celda 5 son similares a los coeficientes de correlación entre las llamadas en curso de cada celda y sus respectivos valores de  $E_b / N_0$ , lo que de alguna forma muestra la estrecha correlación entre las diferentes coberturas del sistema, que se puede verificar al mirar la relación de vecindad existente. Para este sistema, las vecinas de la celda No.5 son la celda No.1, la celda No.2, la celda No.3, la celda No.4 y la celda No.6. Las vecinas de la celda No.1 son la celda No.2, la celda No.3, la celda No.4 y la celda No.5 y la celda No.6.

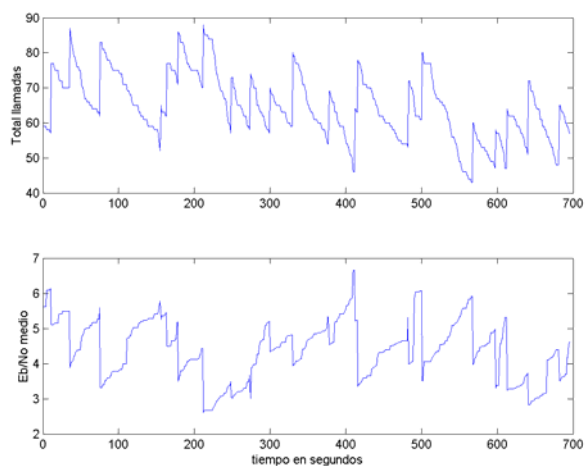


**Figura 76 Evolución de las llamadas en la celda No.1 y el  $E_b / N_0$  en la celda No.5**



**Figura 77 Evolución de las llamadas en la celda No.2 y el  $E_b / N_0$  en la celda No.5**

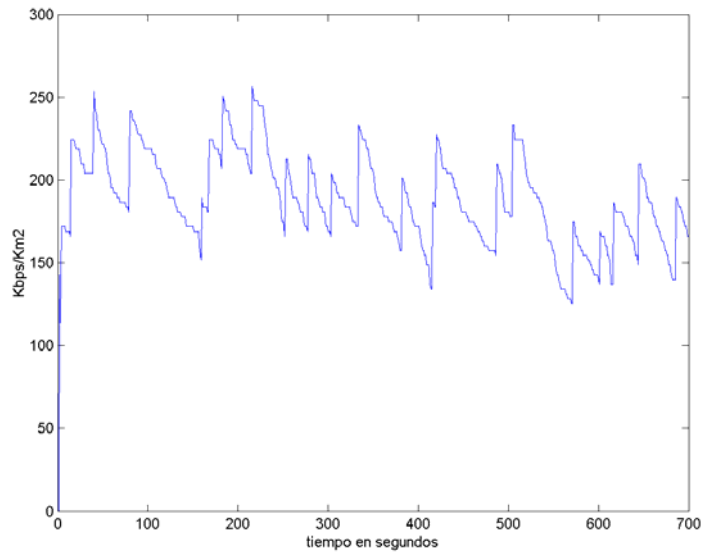
La Figura 78 muestra la evolución en el tiempo del total de llamadas en el sistema y el valor medio de la relación  $E_b / N_0$ . Se puede observar que el sistema se encuentra casi todo el tiempo por debajo del valor mínimo requerido para  $E_b / N_0$ . El valor medio de llamadas en el sistema es de 64.8, casi la mitad del promedio para el sistema anterior.



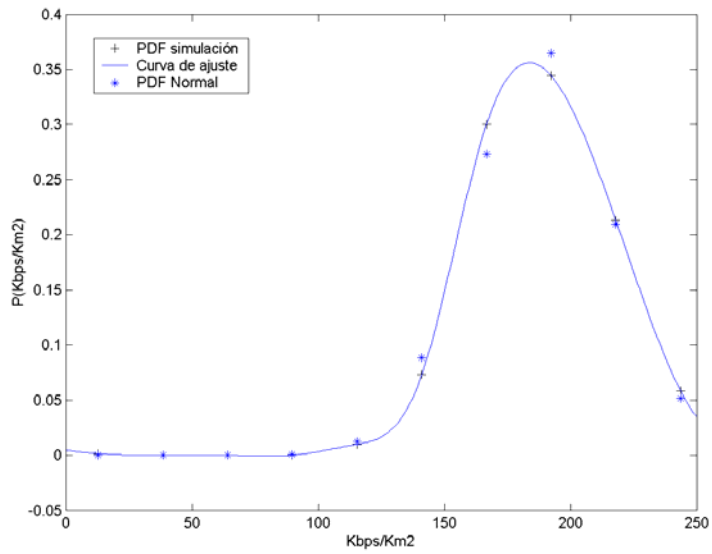
**Figura 78 Evolución de llamadas totales y valor medio de  $E_b / N_0$  del sistema**

La Figura 79 muestra la capacidad del sistema contra el tiempo en términos de  $Kbps/Km^2$ ; al no haber tráfico de datos en este sistema, la gráfica tiene el mismo comportamiento que la gráfica de voz, y lleva a una media de  $188.3Kbps/Km^2$ , con una desviación estándar de 27.94. En este caso, la capacidad por celda es de 103.38Kbps.

En la Figura 80 se muestra la función densidad de probabilidad para los resultados de capacidad en  $Kbps/Km^2$  al lado de la PDF de una distribución normal con media 188.3 y desviación estándar 27.94, gráfica que indica que los resultados se ajustan a una distribución normal con los parámetros mencionados.

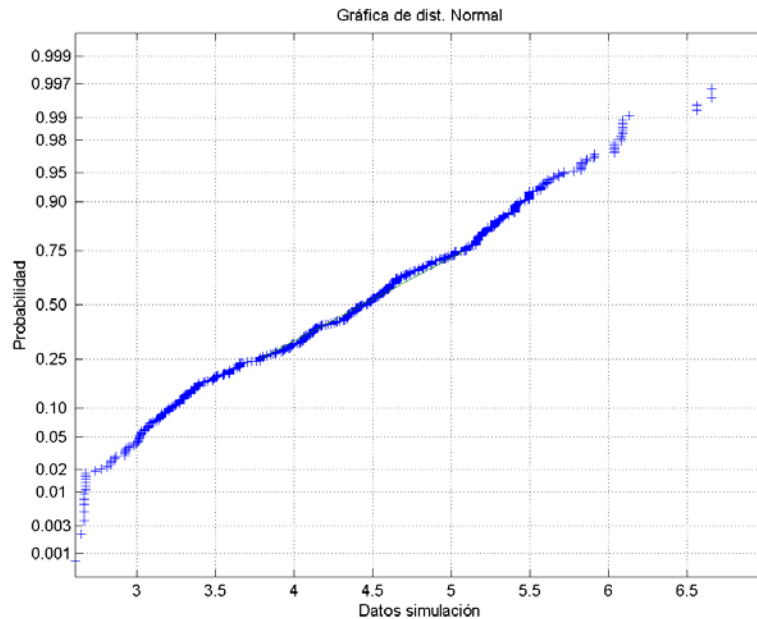


**Figura 79 Evolución del sistema en Kbps/Km2**



**Figura 80 PDF de los resultados de simulación en Kbps/Km2**

Finalmente, en la Figura 81 se muestra la gráfica de la distribución normal que mejor se ajusta a los resultados de simulación y los resultados de la simulación, de la que se puede observar que hay un buen ajuste y es posible concluir que la relación  $E_b / N_0$  se ajusta a una distribución normal en forma similar a un sistema ideal.



**Figura 81 Gráfica de distribución normal y resultados de simulación para la  $E_b / N_0$  media del sistema.**

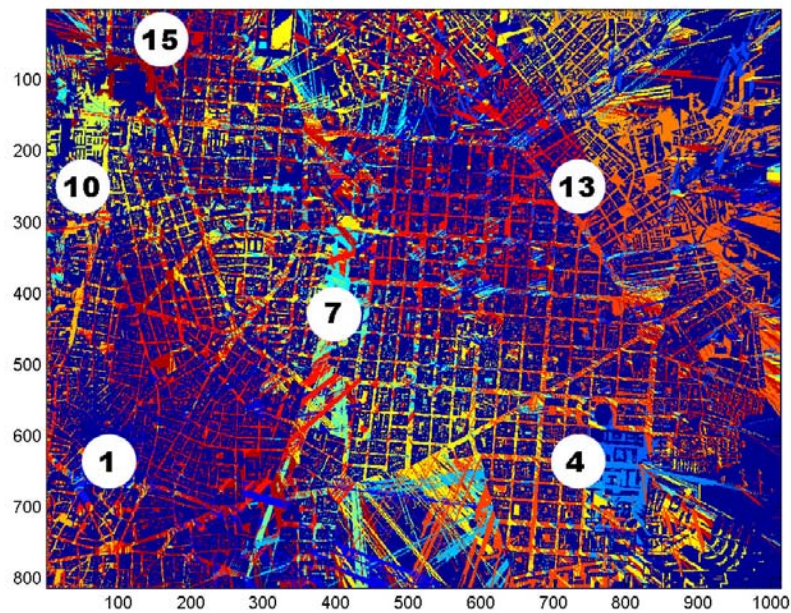
### ***5.3.6 Modelo de seis celdas con sectores de 60 grados usando el modelo Univalencia COST-231***

#### ***5.3.6.1 Topología del sistema***

El sistema utiliza las mismas estaciones base que el sistema anterior, así como las mismas especificaciones de PIRE, altura de transmisor y receptor, frecuencia y modelo de propagación. En este caso, se utilizaron antenas sectorizadas a 60 grados, para obtener un total de 29 coberturas en el sistema.

La Figura 82 muestra el mapa de mejor enlace del sistema tal como lo calcula cell-view. En la figura se muestra la localización de las estaciones base, de tal forma que las celdas se encuentran numeradas consecutivamente. Los sectores en cada celda se numeran en el sentido de las manecillas del reloj empezando con el azimut cero. Hay que tener en cuenta que la celda No.1 tiene sólo cinco sectores, pues se omite el sector que apunta hacia fuera del mapa. Igualmente, la celda marcada con el número 10 sólo tiene tres sectores, a 0, 60, 120 y 180 grados respectivamente, y la celda marcada con el número 15 también tiene tres sectores, que corresponden a 120, 180 y 240 grados de azimut.





**Figura 82 Mapa de mejor enlace del sistema con sectores de 60 grados**

### 5.3.6.2 Resultados de simulaciones

La Figura 83 muestra el estado de llamadas y  $E_b / N_0$  en el sistema al finalizar la simulación. Se observa que la celda No.2 tiene un valor de  $E_b / N_0$  bajo y no tiene ninguna llamada en curso. En la Figura 84 se muestra el número de llamadas y el valor del factor  $F_m$ , se aprecia para la celda No.2 que el  $F_m$  es bastante alto, lo que indica que la interferencia intercelda es mucho mayor que la intracelda.

Las celdas No.19, No.25, No.27 y No.28 están en una situación similar a la encontrada en la celda No.2. Al igual que para la celda No.2, el valor del factor  $F_m$  es relativamente alto, lo que indica una interferencia intercelda mucho mayor que la intracelda.

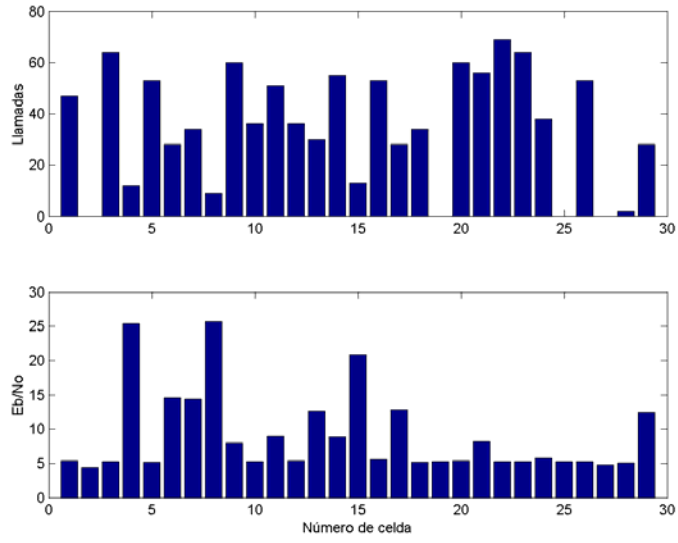


Figura 83 Número de llamadas y valor de  $E_b / N_0$  al finalizar la simulación

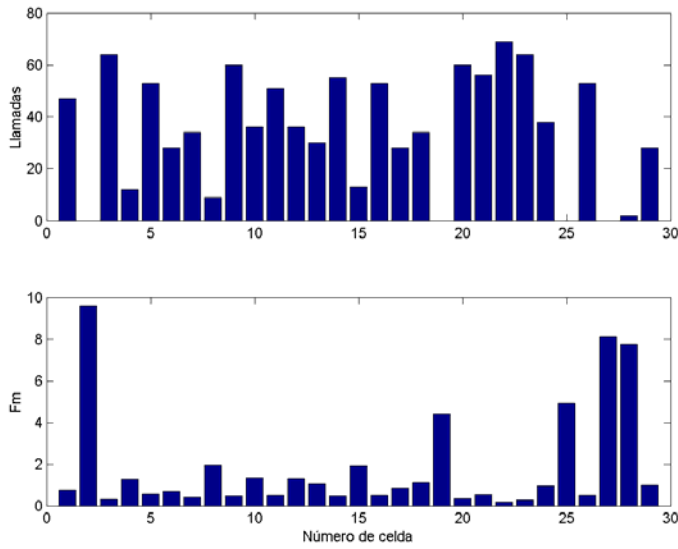
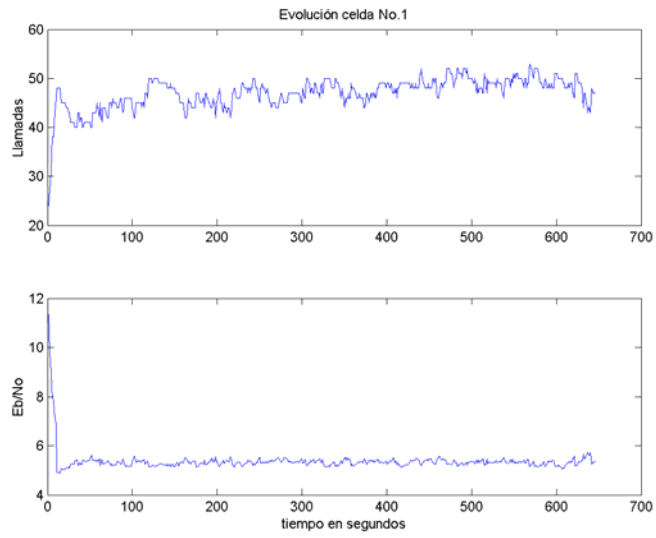
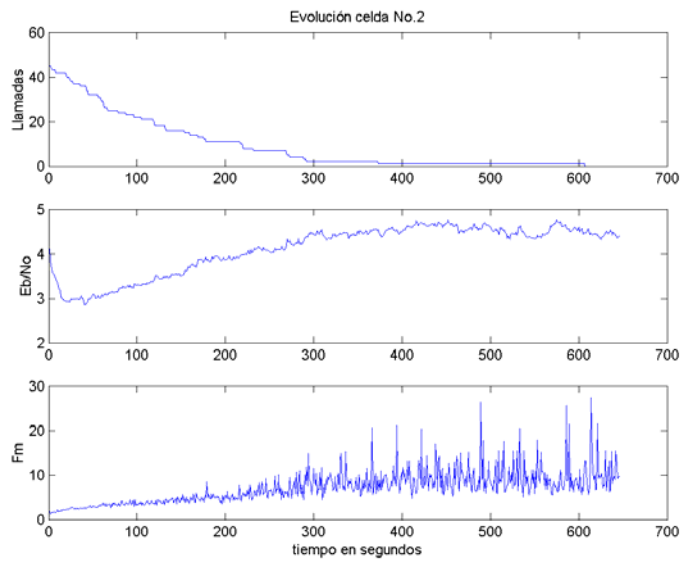


Figura 84 Número de llamadas y factor Fm al finalizar la simulación



**Figura 85 Evolución de las llamadas y el  $E_b / N_0$  en la celda No.1**

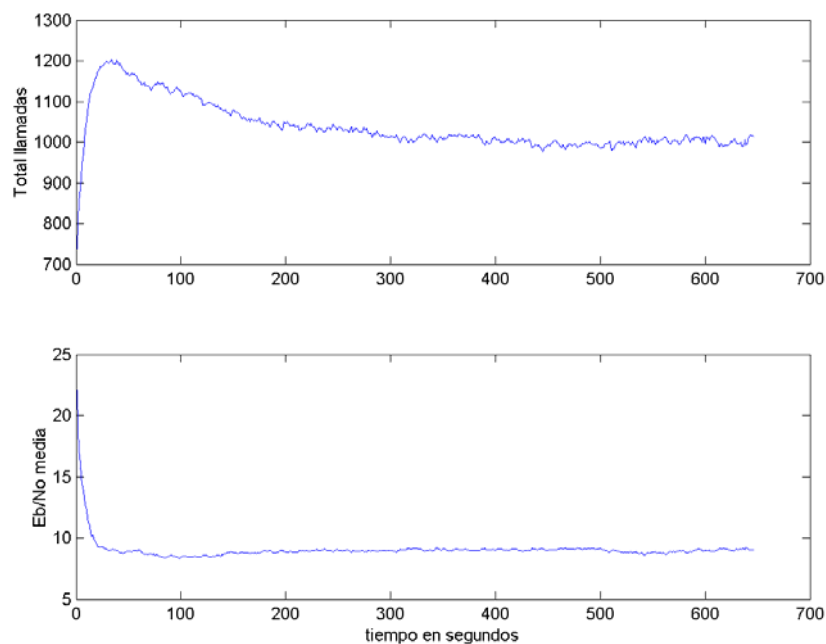


**Figura 86 Evolución de llamadas,  $E_b / N_0$  y factor Fm en la celda No.2**

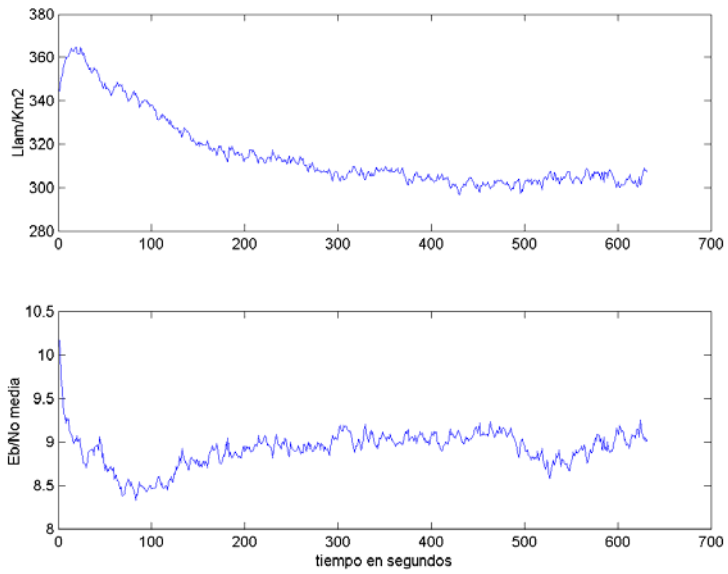
La Figura 87 muestra la evolución total de llamadas y la  $E_b / N_0$  media para este sistema. Si se compara con el sistema analizado en el apartado anterior, se puede apreciar una diferencia apreciable en la capacidad de ambos sistemas, en este caso, el sistema tiene una capacidad dieciséis (16) veces mayor, y a diferencia del sistema anterior, no ha alcanzado el valor mínimo para el  $E_b / N_0$ , lo que implica que esta diferencia es todavía mayor.

En la Figura 88 y en la Figura 89 se muestran la evolución en el tiempo de la capacidad del sistema en términos de llamadas por kilómetro cuadrado y kilobits por segundo por kilómetro cuadrado. Como el sistema no tiene tráfico de datos, la forma de las gráficas es similar a la de la Figura 87.

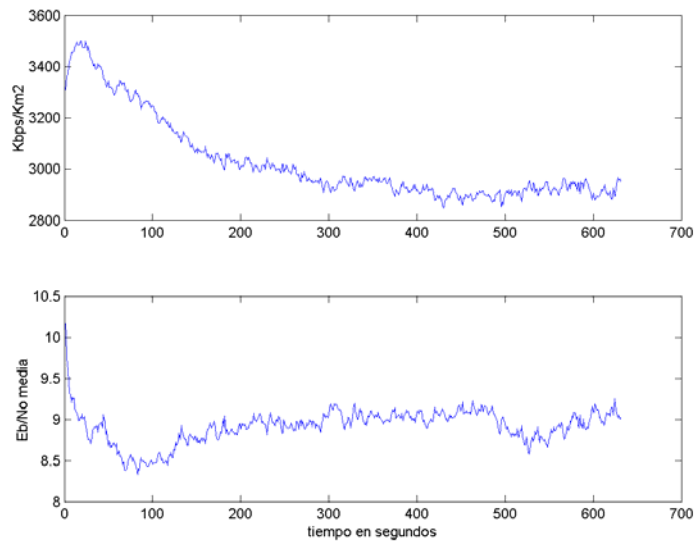
Según el cálculo del vector de estructura que se muestra en el apartado 5.7.2.7, el valor del primer elemento del vector de estructura para este sistema es 14 y para el sistema anterior es 1. Teniendo en cuenta que el vector de estructura está formado sólo por números enteros, se puede decir que hay una relación entre el vector de estructura y la capacidad entre estos dos sistemas.



**Figura 87 Evolución de llamadas totales y  $E_b / N_0$  media para el sistema**

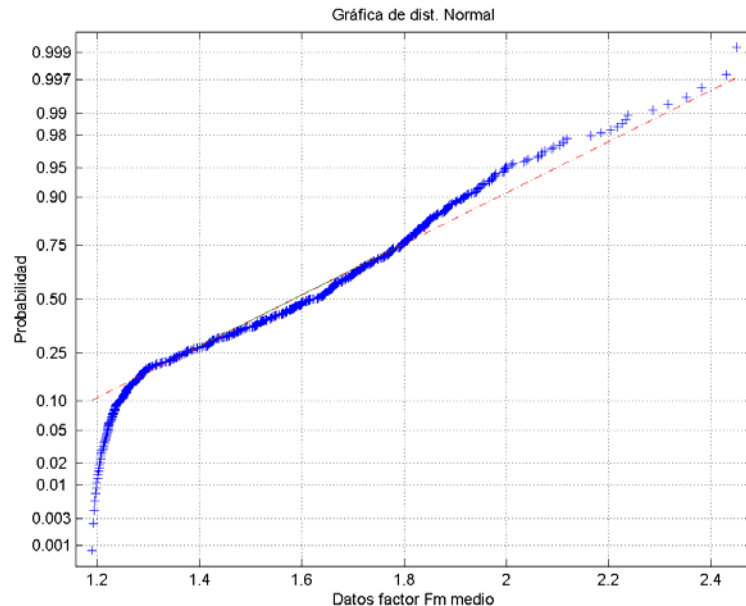


**Figura 88 Evolución de la capacidad del sistema en llamadas/Km2 y  $E_b / N_0$  en el tiempo**



**Figura 89 Evolución de la capacidad del sistema en Kbps/Km2 y del  $E_b / N_0$  en el tiempo**

En la Figura 90 se muestra la gráfica de la distribución normal que mejor se ajusta a los resultados de simulación para el factor Fm medio del sistema. Se encuentra un número de datos de simulación que se desvían de la función normal en la parte izquierda y en el extremo derecho de la gráfica.



**Figura 90 Gráfica de distribución normal y datos de simulación para el factor Fm medio del sistema.**

### ***5.3.7 Modelo de 15 celdas irregulares con antena omnidireccional usando el modelo Univalencia COST-231***

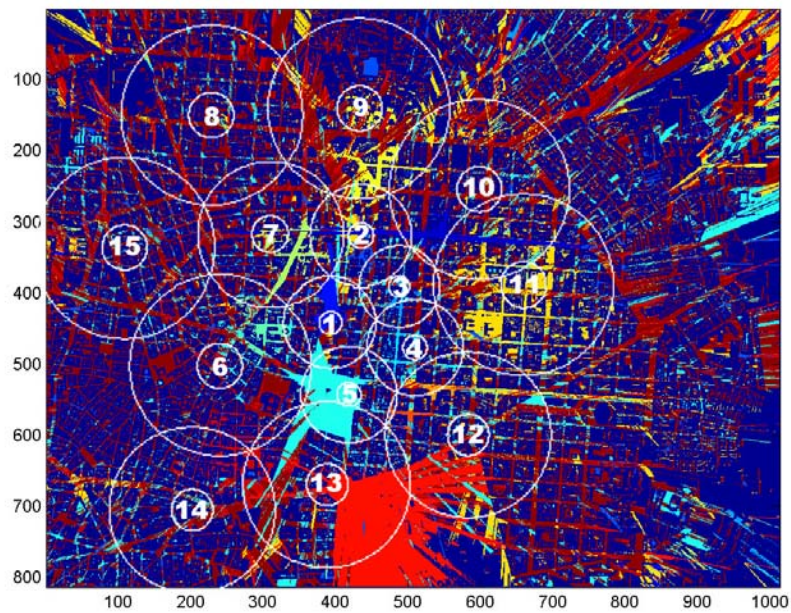
En los sistemas UMTS, se plantea la posibilidad de definir el tamaño de las celdas según la intensidad de tráfico por unidad de área, de tal forma que las zonas con mayor tráfico sean atendidas por celdas más pequeñas o por micro celdas o pico celdas. Se analizará esta situación empleando la ciudad de Madrid, con el fin de determinar la influencia que tiene el tamaño de la celda sobre la capacidad total del sistema y su relación con los otros factores que se analizan.

### 5.3.7.1 Topología del sistema (vecindad)

La Figura 91 muestra el mapa de mejor enlace del sistema. Este escenario está formado por 15 celdas con antena omnidireccional, cuyas PIRE se ajustan a un patrón celular irregular generado por Cell-view de acuerdo a los parámetros de tráfico UMTS sugeridos por el *report 5* del UMTS Forum para una determinada penetración de mercado. Para el cálculo del patrón celular, Cell-View se basa en una distribución demográfica del área de Madrid en estudio. Para calcular la PIRE necesaria para el tamaño estimado de las celdas se emplea el modelo Walfisch-Ikegami del proyecto COST-231. Las potencias de las celdas se muestran en la Tabla 4

| <b><i>Celda N°</i></b> | <b><i>PIRE en dBm</i></b> |
|------------------------|---------------------------|
| 1                      | 8.04                      |
| 2                      | 8.04                      |
| 3                      | 6.71                      |
| 4                      | 10.4                      |
| 5                      | 12.9                      |
| 6                      | 15.4                      |
| 7                      | 13.8                      |
| 8                      | 18.3                      |
| 9                      | 11.9                      |
| 10                     | 22.7                      |
| 11                     | 7.4                       |
| 12                     | 6.0                       |
| 13                     | 18.3                      |
| 14                     | 20.7                      |
| 15                     | 24                        |

**Tabla 4 PIRE para las celdas en el sistema**



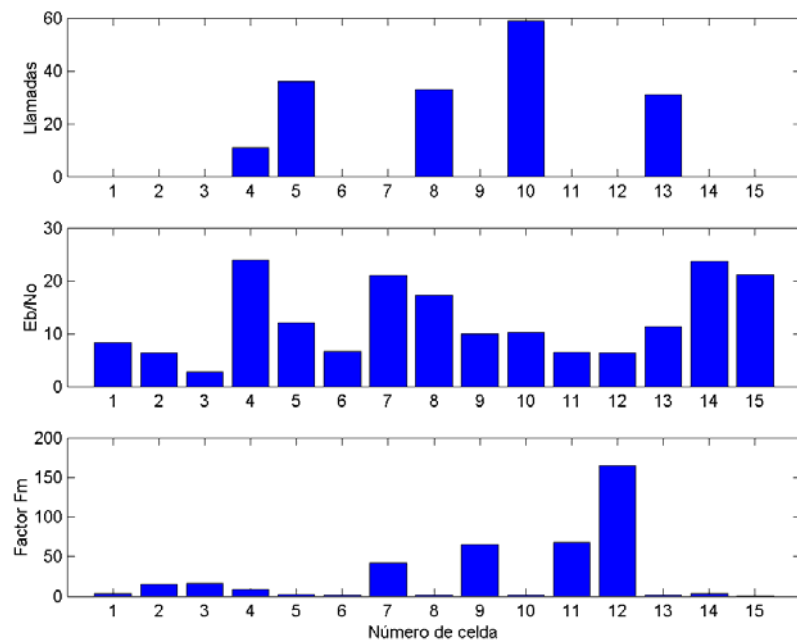
**Figura 91 Mapa de mejor enlace del sistema**

### 5.3.7.2 Resultados de simulaciones

La Figura 92 muestra el estado del sistema al finalizar la simulación. En esta figura se muestra el estado de las variables de llamadas en curso,  $E_b / N_0$  y factor  $F_m$ , respectivamente, para cada celda en el sistema.

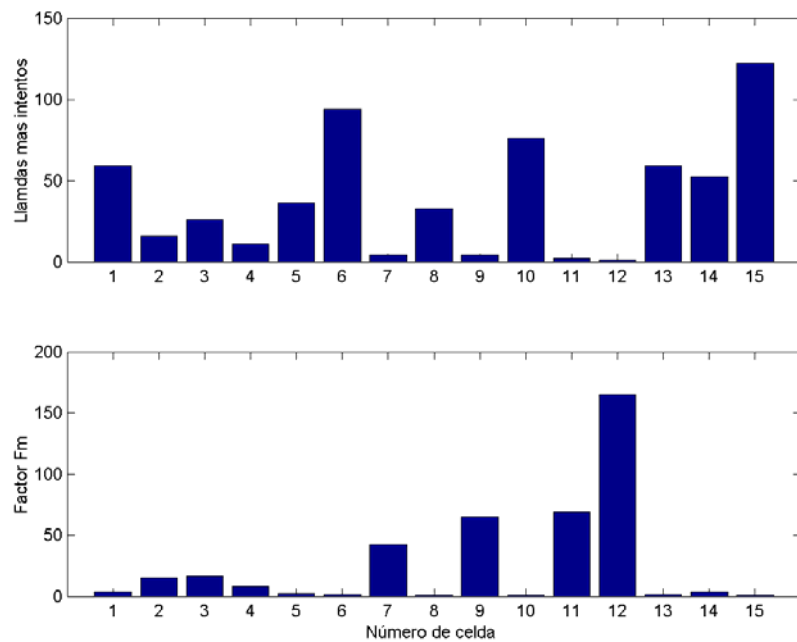
Lo primero que se observa es que tan solo cinco celdas tienen llamadas en curso y sin embargo hay celdas sin llamadas que tienen un valor de  $E_b / N_0$  cercano al mínimo requerido, es decir están bloqueadas, o muy cerca al mínimo. Mas adelante se revisará la situación de la celda No.1, que es una de las que se encuentra cerca al valor mínimo requerido para  $E_b / N_0$ .





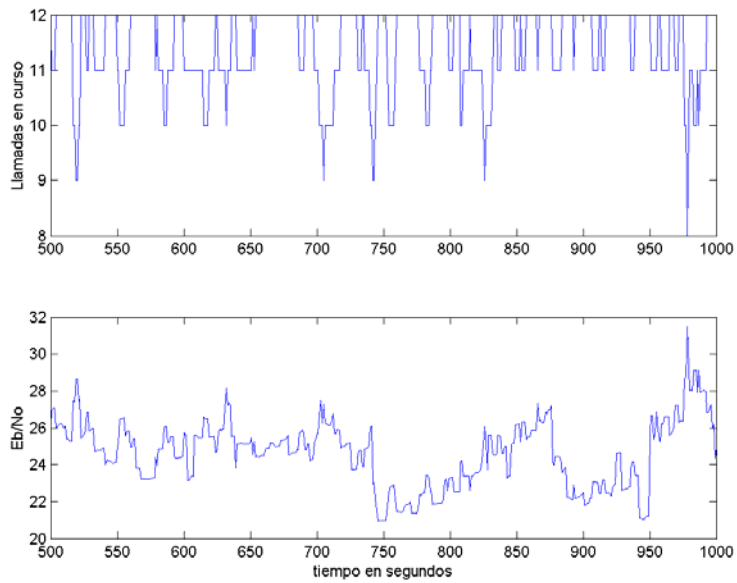
**Figura 92 Estado del sistema al finalizar la simulación**

La Figura 93 muestra el estado del sistema al finalizar la simulación, incluyendo los intentos de llamada no aceptados. Se muestra también el valor del factor  $F_m$  y su correspondencia con el número de intentos de llamadas. Para la celda No.1 por ejemplo, al haber un gran número de intentos el valor de  $F_m$  es bajo, pues la mayor parte de la interferencia proviene de la misma celda.



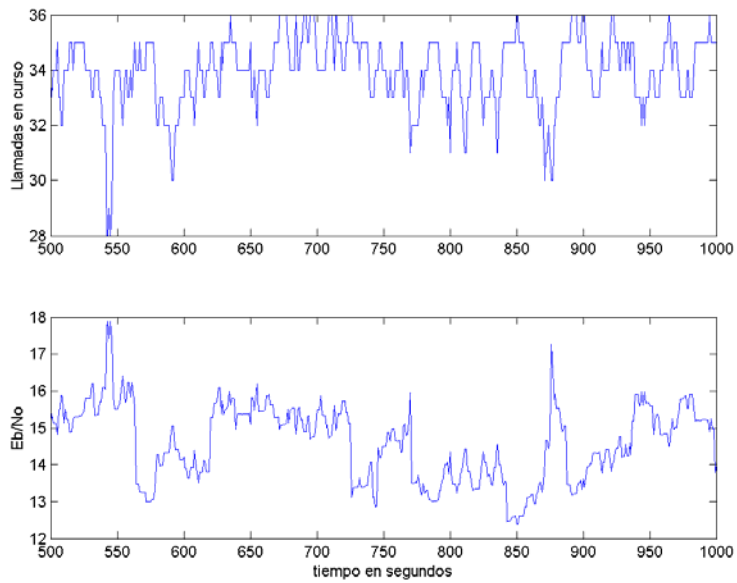
**Figura 93 Llamadas en curso más intentos y factor Fm al final de la simulación**

La Figura 94 muestra la evolución de las llamadas en curso y valor de  $E_b / N_0$  para la celda No.4. Se puede observar de la figura que el valor de  $E_b / N_0$  se ve afectado por interferencia intercelda, pues para valores constantes en el número de llamadas se aprecia variación importante en el valor de  $E_b / N_0$ . Por ejemplo, entre el segundo 650 y el segundo 700 el número de llamadas permanece estable en 12, mientras el valor de  $E_b / N_0$  oscila entre 23 y 25.



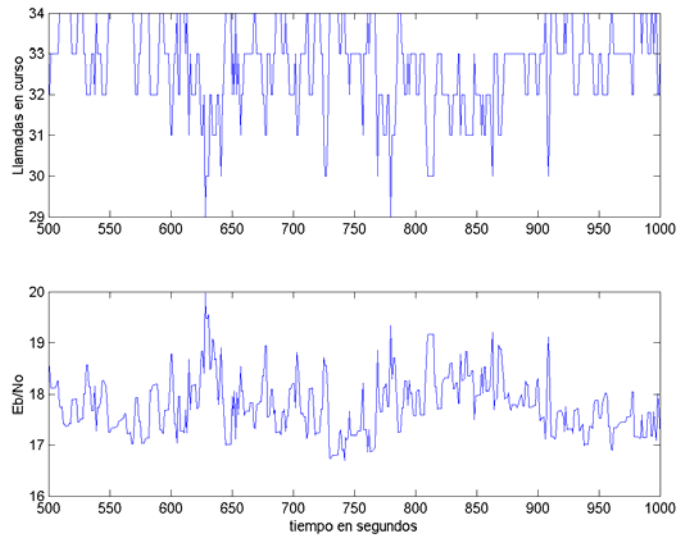
**Figura 94 Evolución de las llamadas en curso y el  $E_b / N_0$  para la celda No.4**

La Figura 97 muestra la evolución de las llamadas en curso y la relación  $E_b / N_0$  para la celda No.5. En este caso la relación entre el valor de  $E_b / N_0$  y las llamadas en la celda es más directa y se encuentra una correlación cercana a 0.9 entre el número de llamadas y el valor de  $E_b / N_0$ .



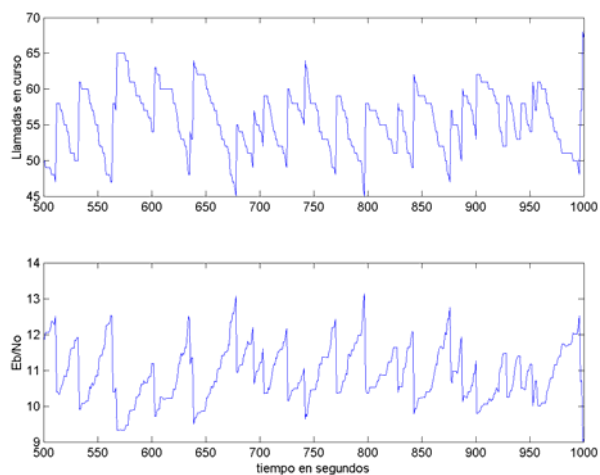
**Figura 95 Evolución de llamadas en curso y  $E_b / N_0$  en la celda No.5**

La Figura 96 muestra la evolución de llamadas en curso y valor de  $E_b / N_0$  para la celda No.8. En este caso se observa que entre el segundo 550 y el 570 el número de llamadas permanece constante mientras que el valor de  $E_b / N_0$  varía. La correlación entre el número de llamadas el valor de  $E_b / N_0$  es relativamente bajo, lo que indica una mayor influencia de la interferencia intercelda.



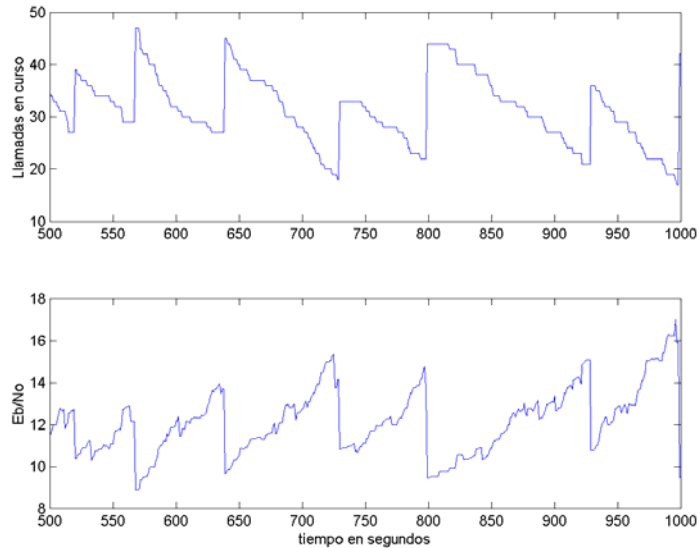
**Figura 96 Evolución de las llamadas en curso y el  $E_b / N_0$  para la celda No.8**

La Figura 97 muestra la evolución de las llamadas en curso y el valor de  $E_b / N_0$  en la celda No.10. En este caso, la correlación entre el valor de  $E_b / N_0$  y el número de llamadas es de 0.99, lo que indica que el valor de  $E_b / N_0$  está determinado casi en su totalidad por la interferencia intracelda.



**Figura 97 Evolución de las llamadas en curso y el  $E_b / N_0$  para la celda No.10**

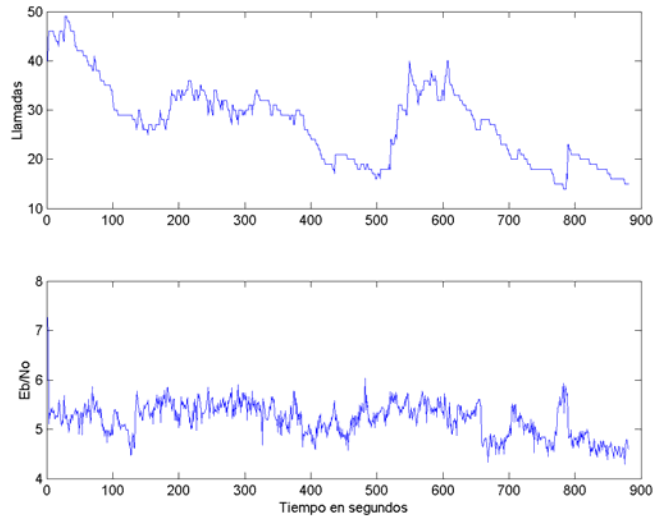
La Figura 98 muestra la evolución de las llamadas en curso y el valor de  $E_b/N_0$  para la celda No.13. En este caso la correlación entre las dos variables es de 0.95, por lo que la  $E_b/N_0$  en esta celda se encuentra determinada casi en su totalidad por la interferencia intracelda.



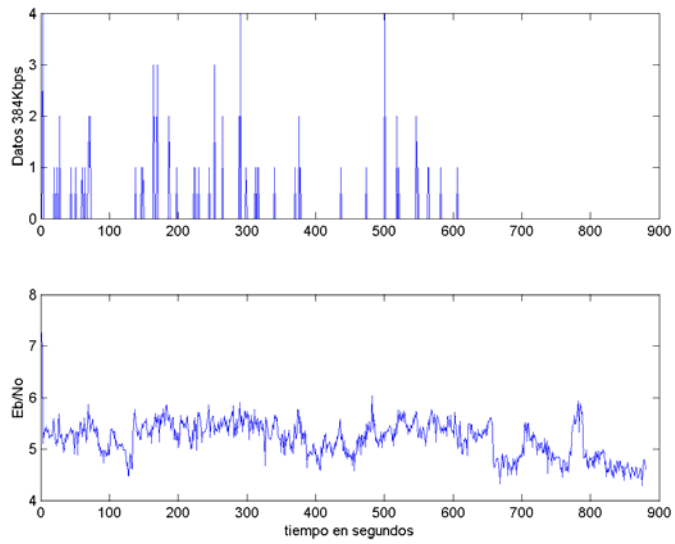
**Figura 98 Evolución de las llamadas en curso y el  $E_b/N_0$  para la celda No.13**

La Figura 99 muestra la evolución de las llamadas de voz y el  $E_b/N_0$  en la celda 14, y en la Figura 100 se muestra lo mismo para las llamadas de datos a 384 Kbps.

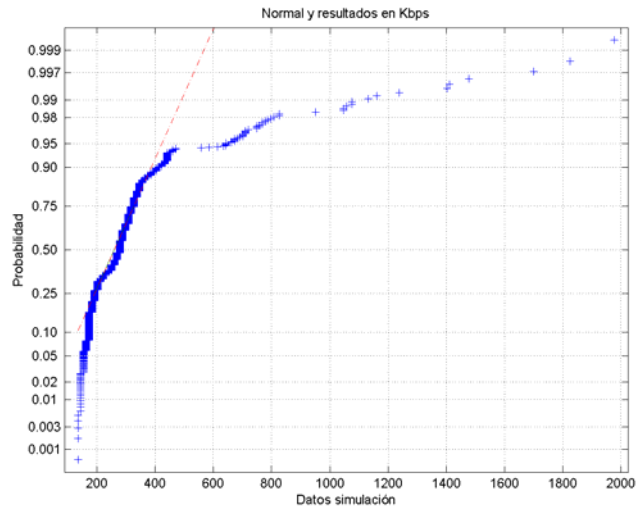
En la Figura 101 y en la Figura 102 se muestran las gráficas de ajuste de distribución normal a resultados de simulación para el tráfico en Kbps de la celda 14 y del  $E_b/N_0$  de la misma celda, respectivamente. Como se aprecia, los datos de la simulación se desvían de la recta que representa la distribución normal, indicando que no hay un ajuste adecuado de los resultados con la distribución normal.



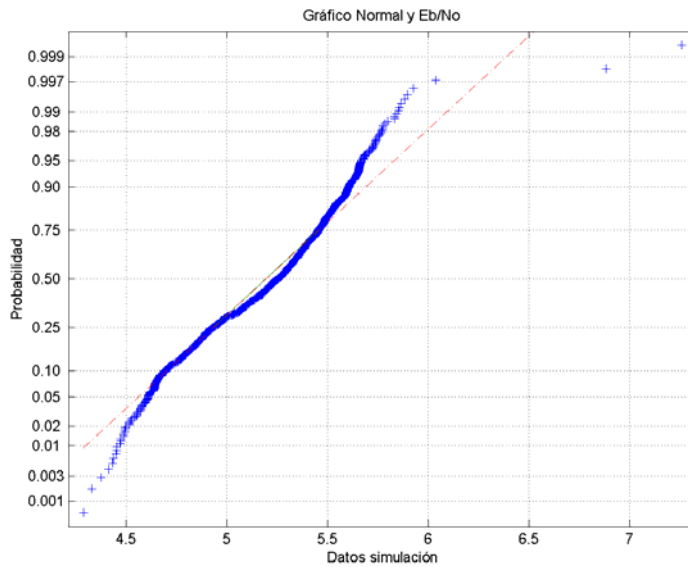
**Figura 99** Evolución de las llamadas de voz y el  $E_b / N_0$  en la celda No.14



**Figura 100** Evolución de las llamadas de datos y el  $E_b / N_0$  en la celda No.14



**Figura 101** Gráfica de ajuste de distribución normal y resultados de simulación en Kbps para la celda No.14

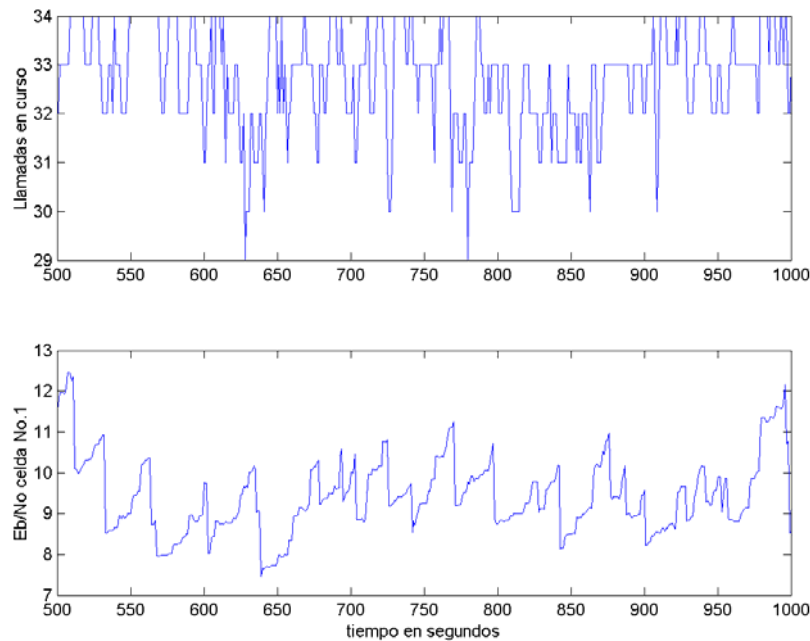


**Figura 102** Gráfica de distribución normal ajustada y resultados de simulación para  $E_b / N_0$  en la celda No.14

La Figura 103 muestra la evolución de las llamadas en la celda No.8 y el valor de  $E_b / N_0$  en la celda No.1. La celda No.1 no atiende llamadas durante el

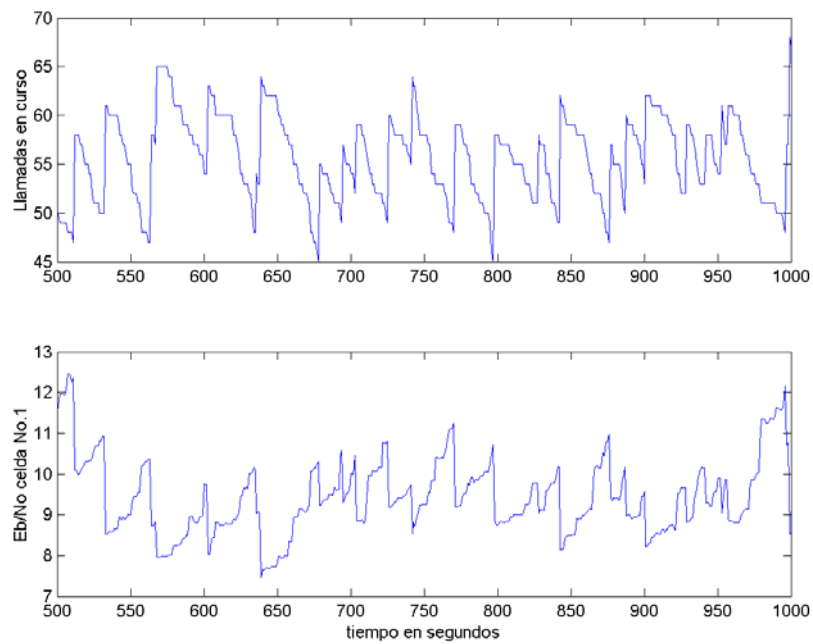


transcurso de la simulación, sin embargo el valor de  $E_b/N_0$  se mantiene relativamente bajo a causa de las llamadas en las celdas vecinas. Las celdas vecinas de la celda No.1 que tienen llamadas en curso son la celda No.8, la celda No.10 y la celda No.13. La correlación entre las llamadas de la celda No.8 y el  $E_b/N_0$  de la celda No.1 es de 0.15, lo que indica que la influencia de la celda No.8 sobre la celda No.1 no es muy grande.



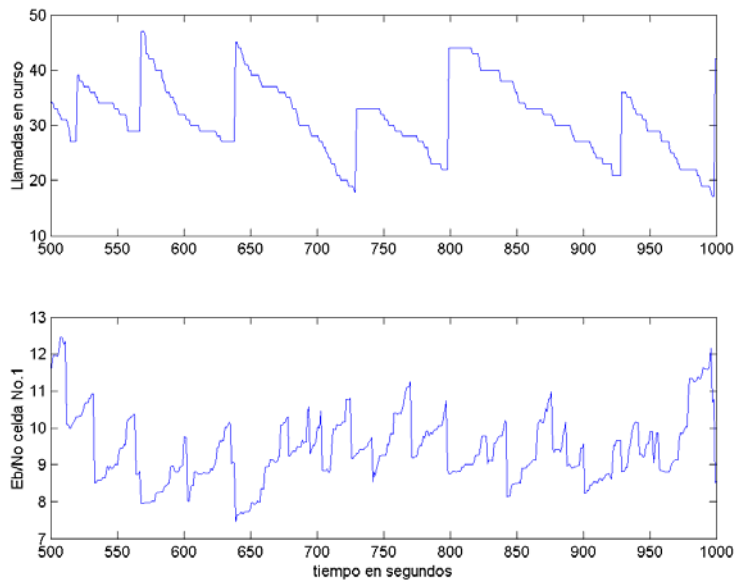
**Figura 103 Evolución de llamadas en la celda No.8 y  $E_b/N_0$  en la celda No.1**

La Figura 104 muestra la evolución de las llamadas en curso en la celda No.10 y el valor de  $E_b/N_0$  en la celda No.1. En este caso, la correlación entre las llamadas de la celda No.10 y el  $E_b/N_0$  de la celda No.1 es de 0.83. Se observa en la figura que las variaciones en el número de llamadas de la celda No.10 afectan directamente el valor de  $E_b/N_0$  en la celda No.1. La relación es tan estrecha, que un bloqueo en la celda No.10 también provocaría un bloqueo en la celda No.1 y le impediría aceptar llamadas.



**Figura 104 Evolución de llamadas en la celda No.10 y  $E_b / N_0$  en la celda No.1**

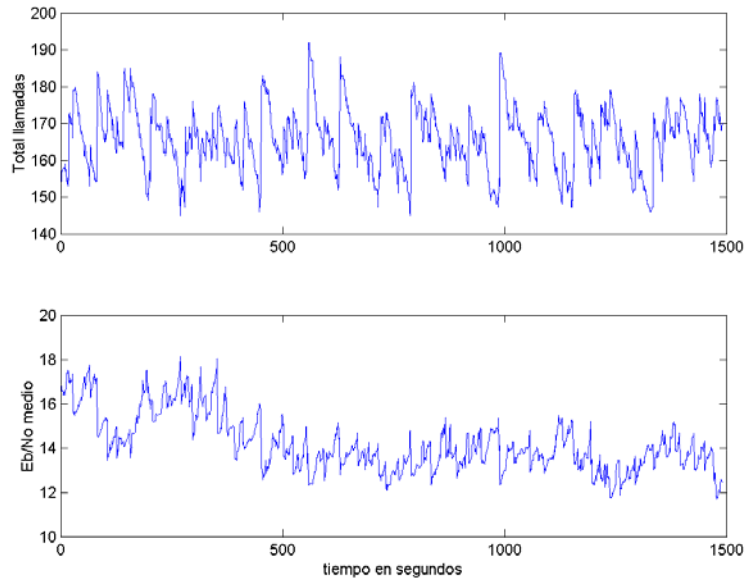
La Figura 105 muestra la evolución de las llamadas en curso de la celda No.13 entre el segundo 500 y el segundo 1000 y el valor de  $E_b / N_0$  en el mismo intervalo. La gráfica muestra un comportamiento ligeramente diferente al que se observó en la figura anterior, aunque se alcanza a observar la estrecha relación entre las llamadas de la celda No.13 y la interferencia sobre la celda No.1. La correlación entre las dos variables es de 0.43.



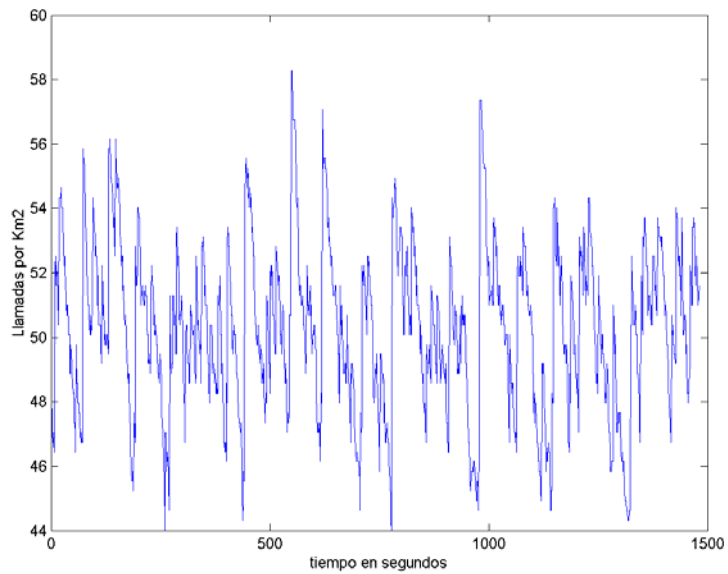
**Figura 105 Evolución de llamadas en la celda No.13 y  $E_b / N_0$  en la celda No.1**

La Figura 106 muestra la evolución del total de llamadas del sistema y el valor medio de  $E_b / N_0$ . El máximo número de llamadas en el sistema es de 192, el valor medio es de 166, y el valor mínimo que toma el  $E_b / N_0$  promedio es de 11.7, lo que indica que el sistema está en capacidad de aceptar mas llamadas. En la Figura 107 se muestra la evolución del tráfico total del sistema por kilómetro cuadrado, sumando llamadas de voz y datos, y en la Figura 108 se muestra la evolución del tráfico expresado en kilobits por segundo por kilómetro cuadrado.

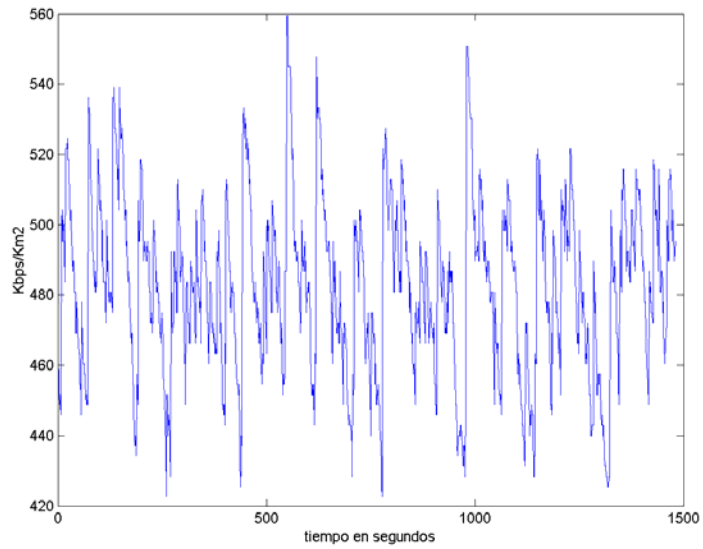
La Figura 109 muestra la función densidad de probabilidad obtenida de la simulación para el tráfico en  $Kbps / Km^2$  y la PDF de una distribución normal con media 482.45 y desviación estándar 24.5, iguales a las de la simulación, y se puede observar que las dos curvas coinciden, por lo que se puede decir que el tráfico en el sistema se ajusta a una distribución normal.



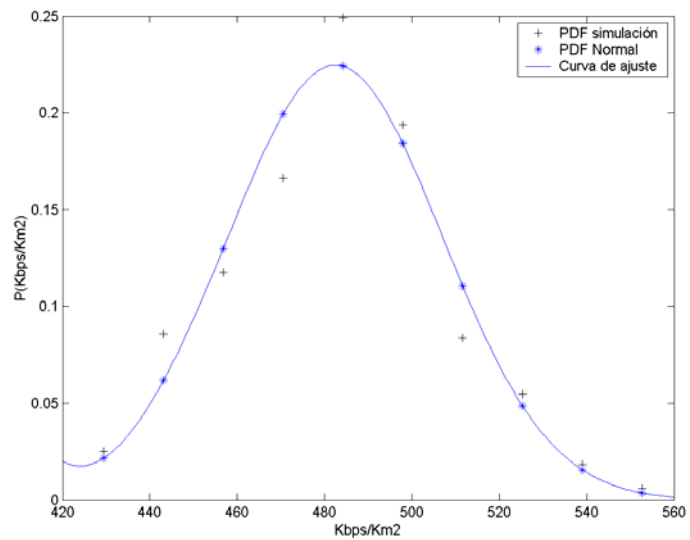
**Figura 106** Evolución del total de llamadas en el sistema y el valor de  $E_b / N_0$



**Figura 107** Evolución del tráfico total del sistema en llamadas de voz y datos por kilómetro cuadrado

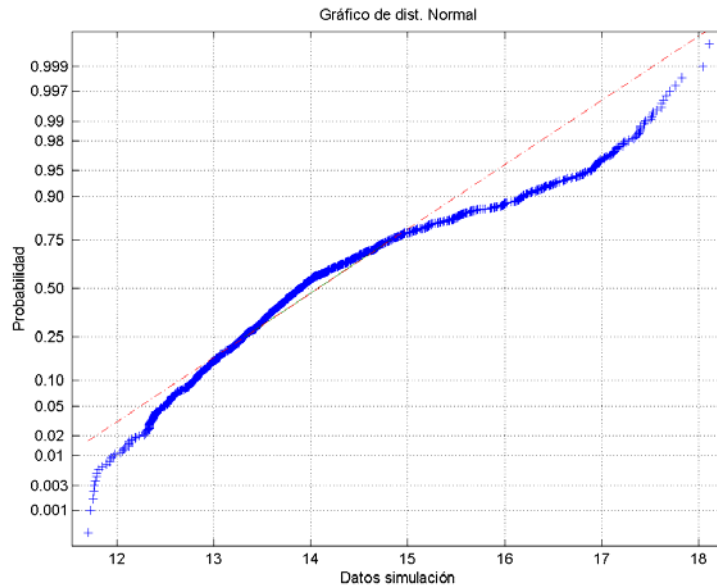


**Figura 108 Evolución en el tiempo de la capacidad del sistema en kilobits por segundo por kilómetro cuadrado**



**Figura 109 Función densidad de probabilidad de los resultados de tráfico en Kbps/Km2 y curva normal**

En la Figura 110 se muestra la gráfica de distribución normal ajustada a los resultados de simulación para el  $E_b / N_0$  medio del sistema. En este caso, los resultados no se ajustan a una distribución normal.



**Figura 110 Gráfica de distribución normal ajustada a resultados de simulación para la  $E_b / N_0$  media**

### ***5.3.8 Modelo de 15 celdas irregulares con antena sectorizada usando el modelo Univalencia COST-231***

#### ***5.3.8.1 Topología del sistema (vecindad)***

La Figura 111 muestra el mapa de mejor enlace del sistema. Este escenario está formado por 15 *sites* sectorizados en tres sectores. El patrón utilizado es el mismo del escenario anterior, es decir, se basa en un patrón celular irregular calculado a partir de una distribución de tráfico. Las potencias de cada *site* están dadas en la Tabla 5. La PIRE de cada sector es la misma, por lo que sólo se indica la potencia por *site*.

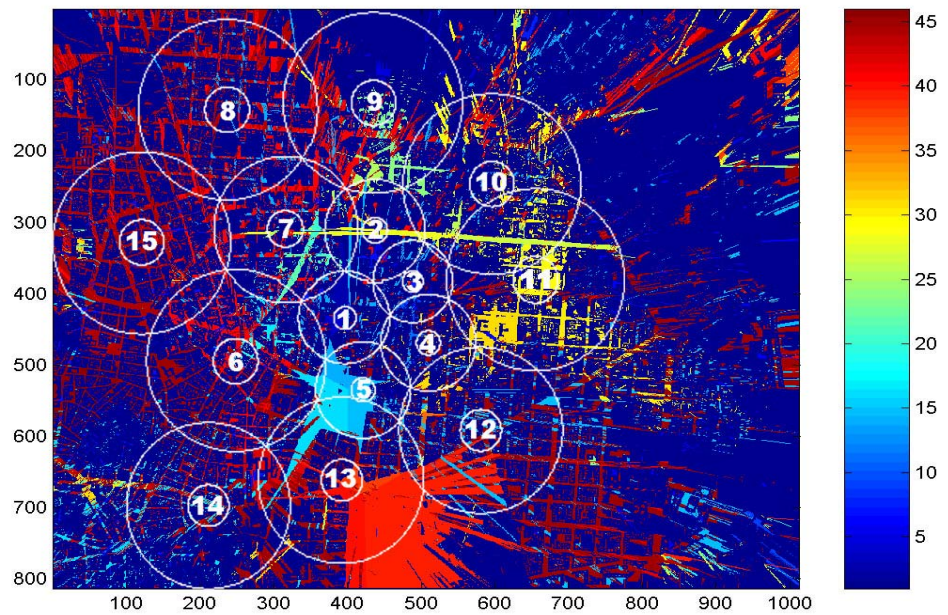
Con esta distribución, el sistema queda conformado por 45 coberturas, calculadas empleando el modelo Univalencia, lo que da coberturas bastante irregulares. La numeración empleada es la de cada *site*, por lo tanto para identificar una celda es necesario dividir el número de celda por 3 y aproximar al siguiente entero para identificar el *site*. En cada *site*, la numeración de las celdas es consecutiva de la uno a la tres empezando por azimuth cero y

siguiendo las manecillas del reloj. Por ejemplo, la celda No.31 corresponde al *site* 11, la celda que apunta a 0 grados de azimut.

La relación de vecindad para este sistema muestra que algunas coberturas tienen un mayor número de vecinas que otras, y en general se requiere analizar el vecindario en forma individual. También se encuentra que esta relación de vecindad se ve afectada por el efecto de respiración, pues al cambiar el área de las coberturas también cambia la topología del sistema.

| <i>Site N°</i> | <i>PIRE en dBm</i> |
|----------------|--------------------|
| 1              | 8.04               |
| 2              | 8.04               |
| 3              | 6.71               |
| 4              | 10.4               |
| 5              | 12.9               |
| 6              | 15.4               |
| 7              | 13.8               |
| 8              | 18.3               |
| 9              | 11.9               |
| 10             | 22.7               |
| 11             | 7.4                |
| 12             | 6.0                |
| 13             | 18.3               |
| 14             | 20.7               |
| 15             | 24                 |

**Tabla 5 Potencias de celdas en el sistema**

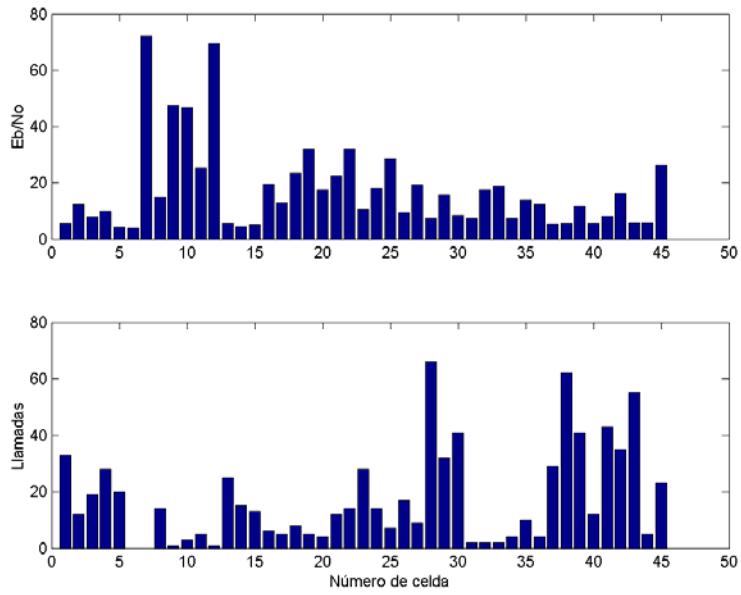


**Figura 111 Mapa de mejor enlace del sistema con 15 celdas de tres sectores**

### 5.3.8.2 Resultados de simulaciones

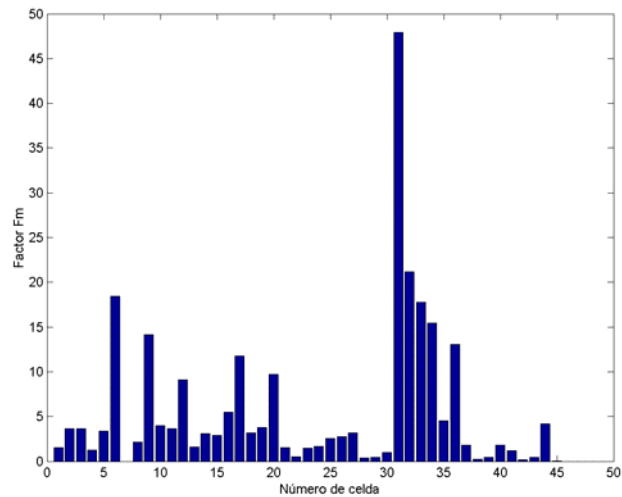
En la Figura 112 se muestra el  $E_b / N_0$  y el número de llamadas en cada celda del sistema al finalizar la simulación. Se puede observar en la gráfica que algunas celdas como la No.5, la No.6, la No.31, la No.32 y la No.33, no tienen llamadas o tienen muy pocas, y el valor de  $E_b / N_0$  es muy bajo, lo que indica que reciben una interferencia muy alta de las otras celdas del sistema.





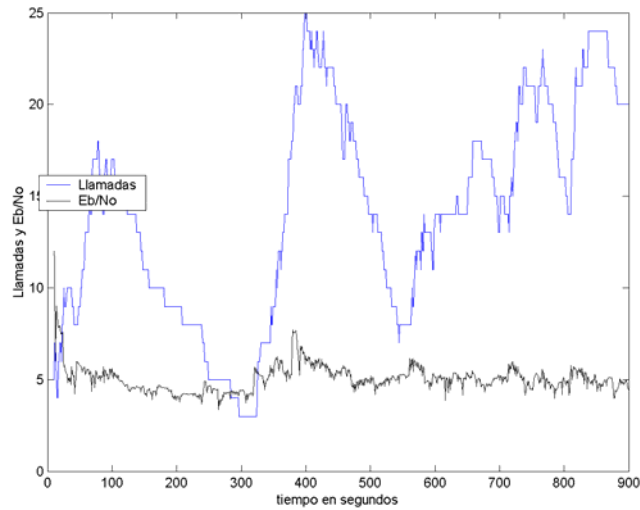
**Figura 112 Estado del sistema al finalizar la simulación**

En la Figura 113 se muestra el estado del factor Fm en cada celda al finalizar la simulación. Se observa que el valor del factor Fm para las celdas con pocas llamadas y un valor bajo de  $E_b / N_0$  es alto, ya que la interferencia se genera principalmente en las celdas externas.



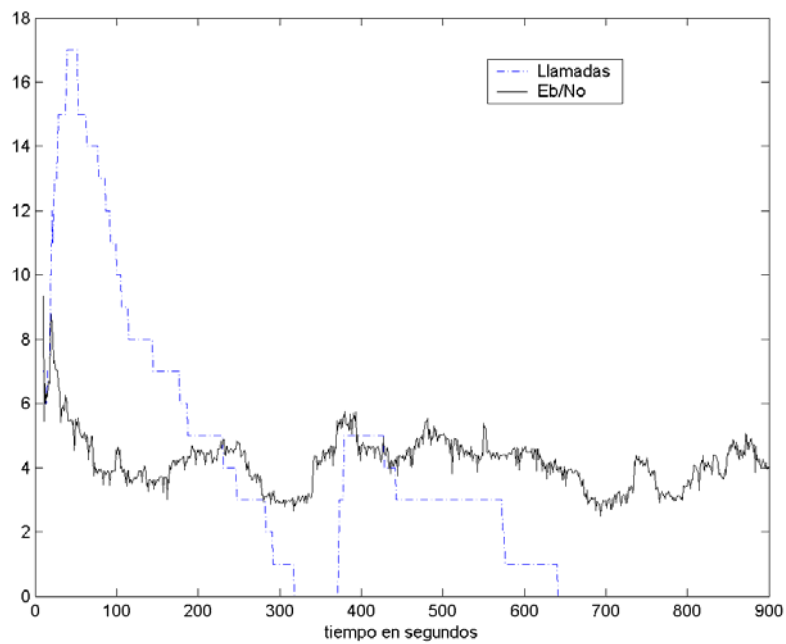
**Figura 113 Valores del factor Fm al final de la simulación**

La Figura 114 muestra la evolución en el tiempo de las llamadas y el  $E_b / N_0$  de la celda No.5. La correlación entre llamadas y el  $E_b / N_0$  no es muy alta.



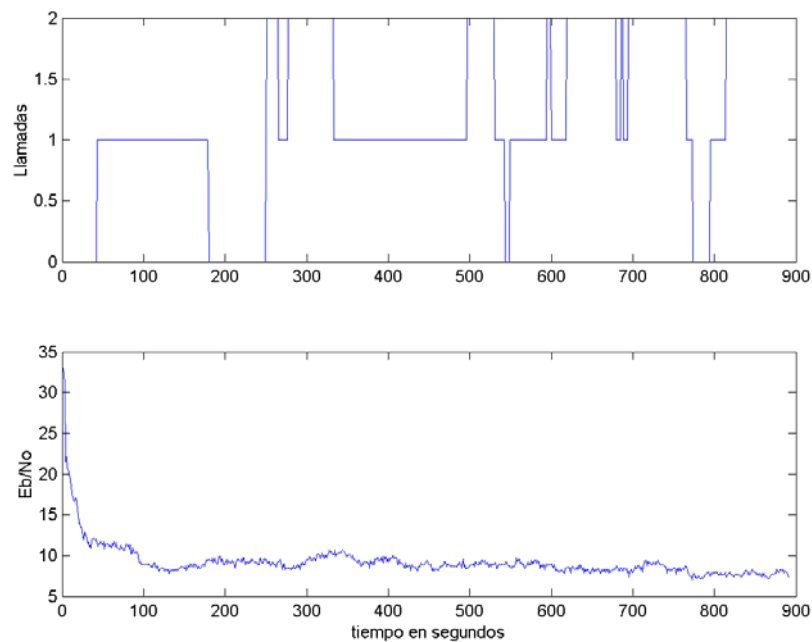
**Figura 114 Evolución de las llamadas y el  $E_b / N_0$  en la celda No.5**

En la Figura 115 se muestra la evolución de las llamadas y el  $E_b / N_0$  en la celda No.6, que al final de la simulación no tendrá llamadas activas. Se observa que a partir del segundo 650, las llamadas caen a cero, y el valor de  $E_b / N_0$  permanece sin mayor variación. En este caso, es claro que la interferencia proviene principalmente de las celdas externas a la celda No.6.



**Figura 115 Evolución de llamadas y  $E_b / N_0$  en la celda No.6**

En la Figura 116 se muestra la evolución de las llamadas y el  $E_b / N_0$  para la celda No.31. En esta celda el número de llamadas permanece entre una y dos llamadas, y el valor de  $E_b / N_0$  permanece alrededor de 10. En esta celda, también hay una correlación baja entre el número de llamadas y el valor de  $E_b / N_0$ , lo que es un claro indicio de una interferencia intercelda alta.



**Figura 116 Evolución de las llamadas y el  $E_b / N_0$  en la celda**

**No.31**

La Figura 117 muestra la evolución en el tiempo del total de llamadas en el sistema y el valor medio de  $E_b / N_0$ . Se puede observar que una vez se estabiliza la simulación, el valor de llamadas permanece alrededor de las 700 (la media es exactamente 709) llamadas y el valor de  $E_b / N_0$  media está alrededor de 20.

Si se compara el valor medio del total de llamadas de este sistema, con el valor medio del total de llamadas del sistema anterior (descrito en el apartado 5.3.7) se obtiene un valor de 4.3, aunque hay que anotar que este sistema tiene un valor de  $E_b / N_0$  medio 1.36 veces mayor que el anterior, por lo que tiene una mayor capacidad disponible. Este valor de 4.3 es casi el doble del valor que normalmente se obtiene en análisis teóricos (que oscila entre 2.5 y 3), y si se tiene en cuenta la mayor capacidad disponible de este sistema, la relación puede ser aún mayor. La Figura 118 muestra la evolución de las llamadas de datos y el valor de  $E_b / N_0$  para el sistema.

Este resultado lleva a asociar la mayor capacidad obtenida no solamente al efecto de la sectorización, sino también a la topología del sistema resultante del modelo de propagación empleado y la topología del entorno.

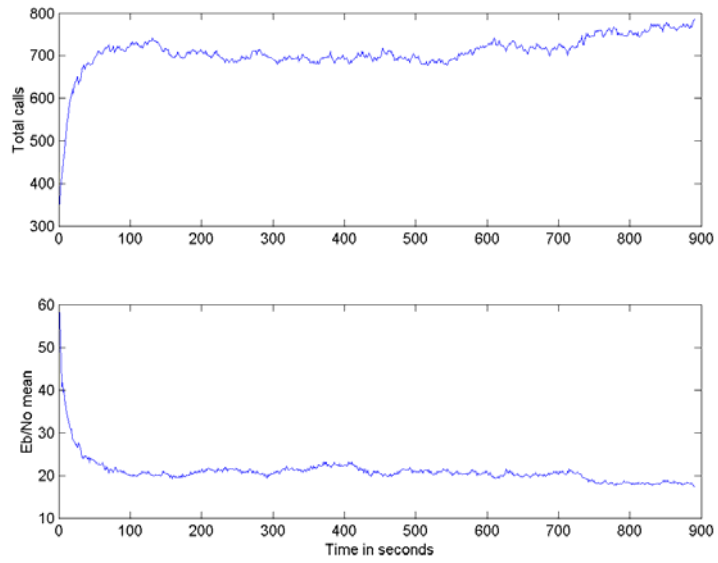


Figura 117 Evolución del total de llamadas y el valor  $E_b / N_0$  medio para el sistema

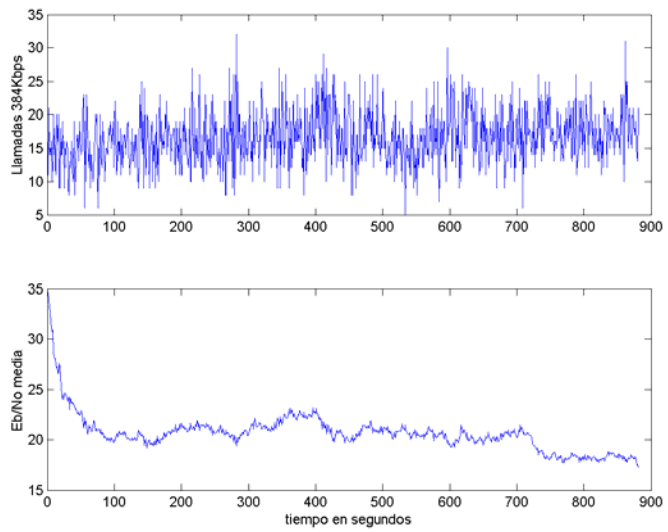
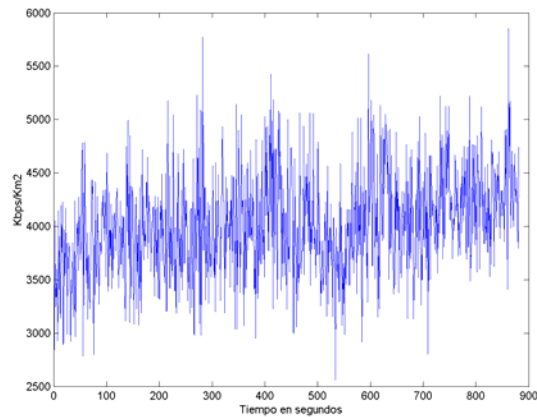
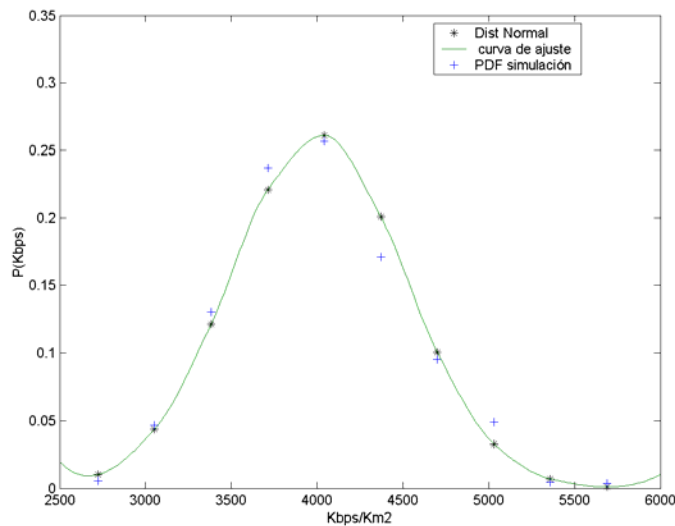


Figura 118 Evolución de las llamadas de datos a 384Kbps y el  $E_b / N_0$

En la Figura 119 se muestra la capacidad del sistema en kilobits por segundo y por kilómetro cuadrado, obteniendo un valor medio de  $4.005\text{Mbps}/\text{Km}^2$  y un comportamiento estadístico como se muestra en la función densidad de probabilidad de la Figura 120, que muestra la PDF de los resultados de simulación y de la distribución normal con media  $4.005\text{Mbps}/\text{Km}^2$  y desviación estándar 503.4



**Figura 119 Evolución de la capacidad en Kbps por kilómetro cuadrado**



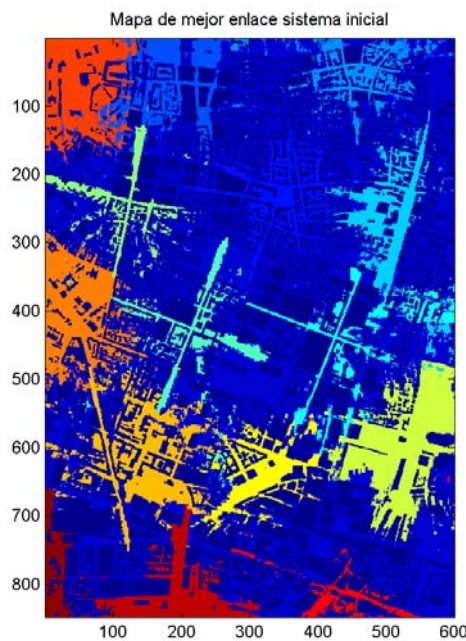
**Figura 120 PDF de los resultados de simulación para el tráfico en Kbps/Km2 y la distribución normal.**

## 5.4 ESCENARIOS SOBRE LA CIUDAD DE MUNICH

### 5.4.1 *micro celdas: caso Munich con antenas omnidireccionales y modelo de propagación basado en red neuronal*

#### 5.4.1.1 *Topología del sistema (vecindad)*

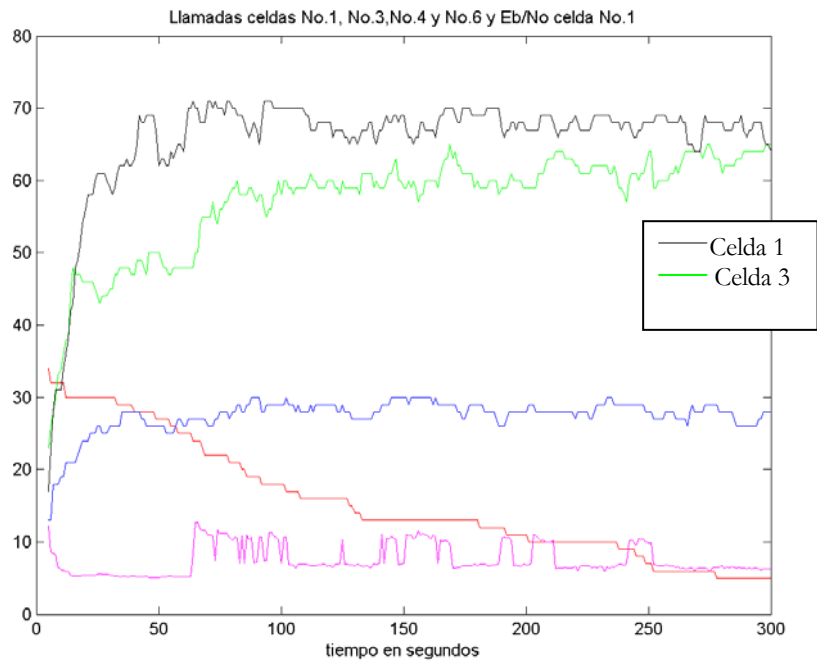
El sistema planteado para la ciudad de Munich empleando antenas omnidireccionales fue calculado empleando un modelo de propagación basado en red neuronal desarrollado en la UPV, con antenas ubicadas a 6 metros de altura, el receptor ubicado a 1.8 metros de altura, y una PIRE de 21 dBm. El mapa de mejor enlace se muestra en la figura a continuación.



**Figura 121** Mapa de mejor enlace para el sistema Munich de 15 celdas

#### 5.4.1.2 *Resultados de simulación*

En este sistema, se tiene tráfico de voz y tráfico de datos con distribución exponencial y a una tasa de 384Kbps. A continuación se muestran algunos de los resultados obtenidos para este caso que se está analizando.



**Figura 122 Llamadas y  $E_b/N_0$  en la celda No.1 y llamadas en las celdas vecinas**

La Figura 122 muestra la evolución de las llamadas y de la relación portadora a interferencia para la celda y para sus vecinas.

De la Figura 92 a la Figura 94 se muestra la evolución de llamadas en las celdas No6, No.7 y No.11 del sistema y su correspondiente factor de portadora a interferencia  $E_b/N_0$ .



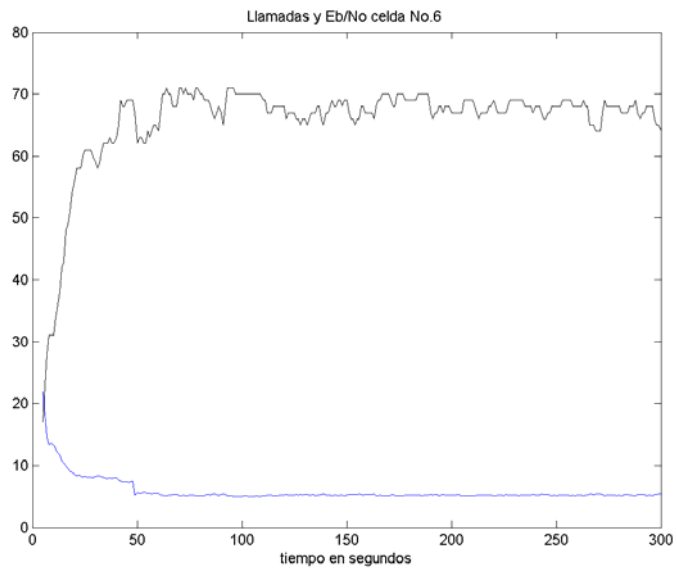


Figura 123 Evolución de llamadas y  $E_b / N_0$  en la celda No.6

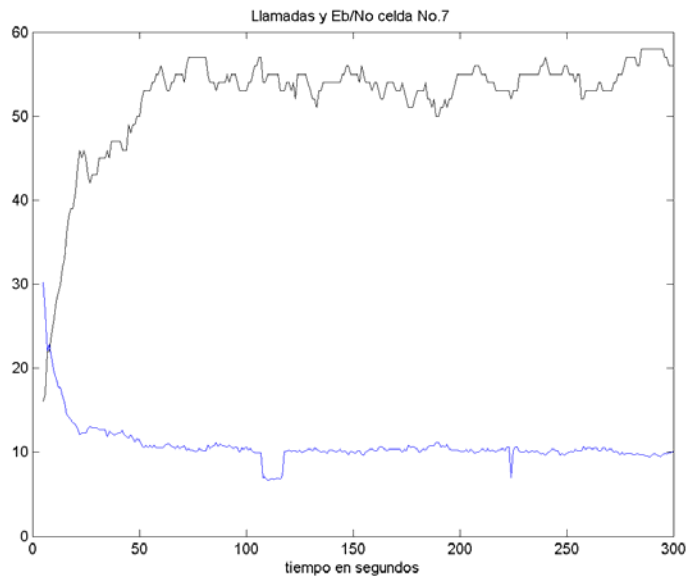
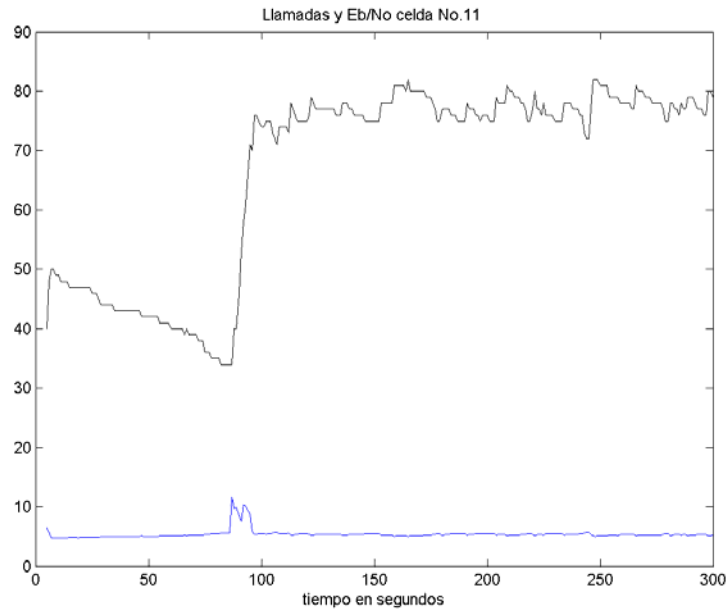


Figura 124 Evolución de llamadas y  $E_b / N_0$  en la celda No.7

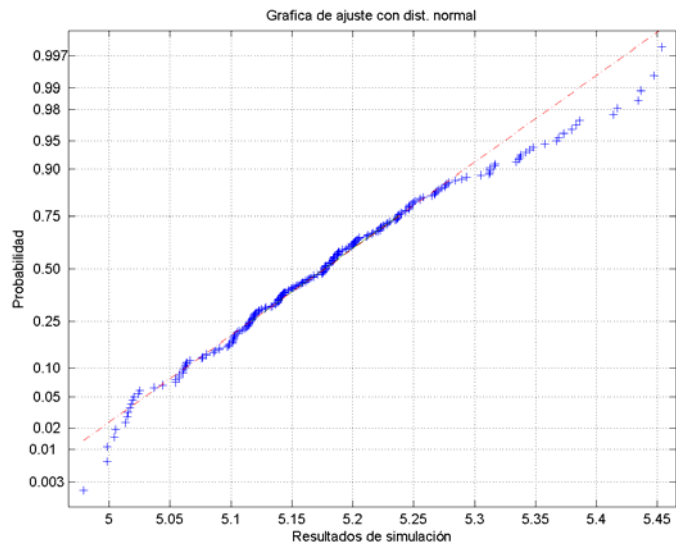


**Figura 125 Evolución de llamadas y  $E_b / N_0$  en la celda No.11**

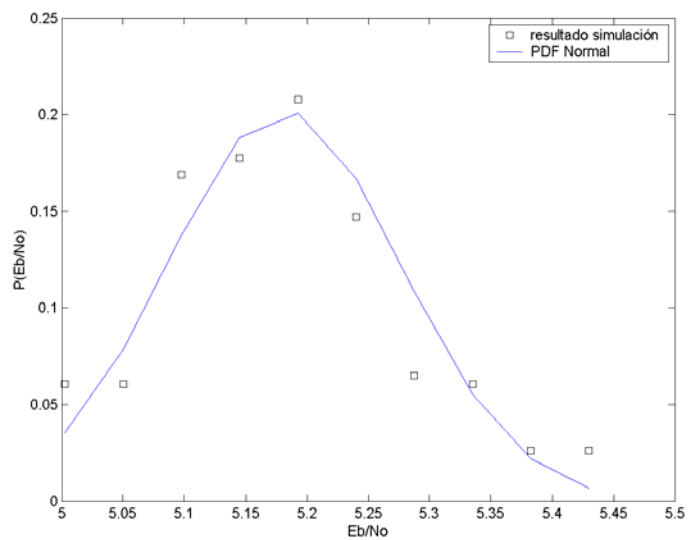
De las anteriores figuras se puede observar que en este caso, se alcanza casi la *pole capacity* en la celda No.11, la cual se encuentra ubicada en un extremo y por lo tanto no se ve muy afectada por celdas vecinas.. Es decir, las celdas que se acercan a un valor de  $E_b / N_0$  de 7dB tienen alrededor de 90 llamadas de voz. Es de esperar que la razón por la que no se alcanza la capacidad teórica total en número de llamadas de voz se deba a la existencia de usuarios generando datos. En este caso, la media de llamadas activas de datos es de 0.11 y la desviación estándar es de 0.4.

En la Figura 126 se muestra una curva de ajuste de los resultados de la simulación y la PDF de la distribución normal. La gran mayoría de los resultados se encuentran sobre la recta punteada que corresponde a la distribución normal, por lo que se puede considerar este resultado muy similar al de un sistema ideal. En la Figura 127 se muestra la PDF de la simulación, graficada contra la distribución normal con media 5.48 y una desviación estándar de 0.86, para la celda No.6 en la forma usual, y como complemento a lo que muestra la Figura 126.

El promedio de llamadas en la celda No.6 es de 67.3 y se alcanza un máximo de 72 llamadas de voz. El valor mínimo que alcanza  $E_b / N_0$  es de 4.97, y el valor máximo es de 8.6 recorriendo un margen de 3.63 durante el recorrido estable de la simulación.

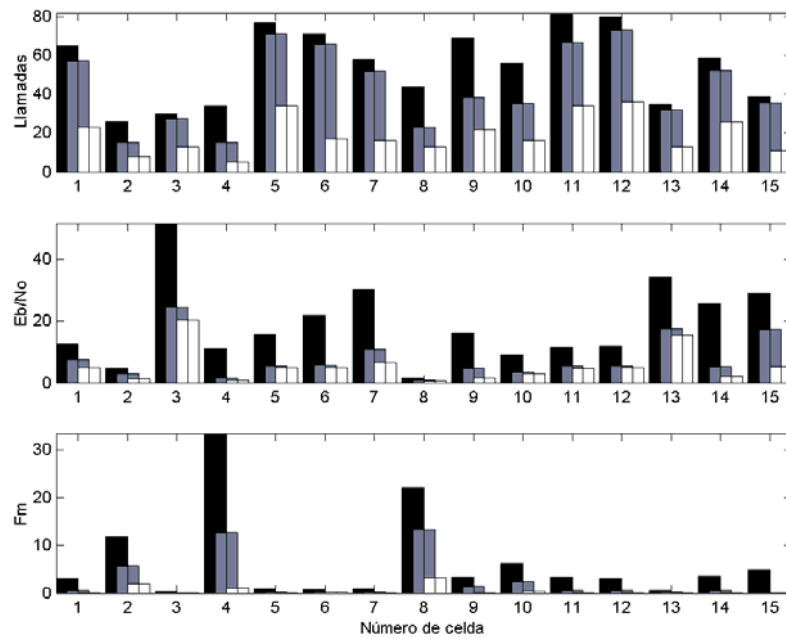


**Figura 126 Resultados de  $E_b / N_0$  contra recta de distribución normal para la celda No.6**

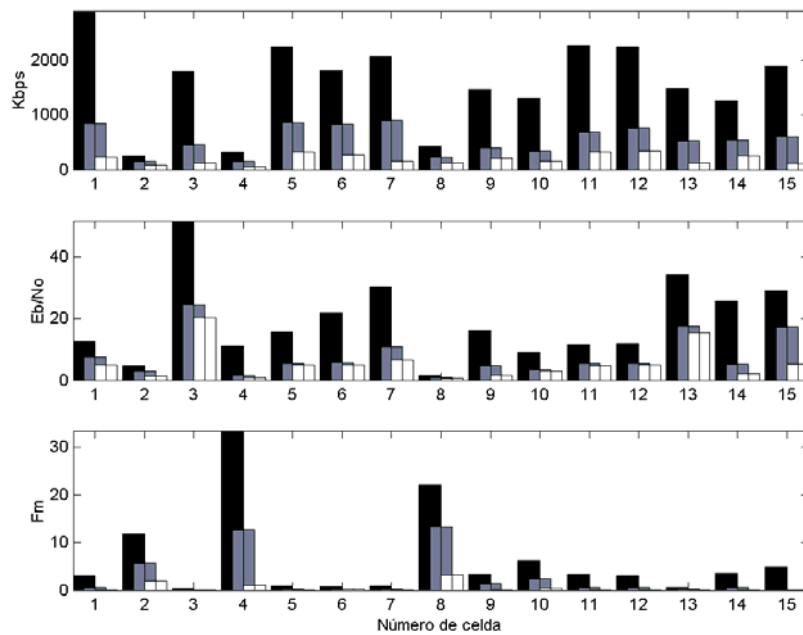


**Figura 127 Resultados de simulación contra curva normal en la celda No.6**

La siguiente figura muestra los valores máximo, mínimo y medio para las llamadas de voz, el  $E_b/N_0$  y el factor  $F_m$  durante toda la simulación. Se observa que en general hay una relación proporcional entre el número de llamadas y el valor de  $E_b/N_0$ , exceptuando las celdas No.4 y No.8. Para la celda número 4, el valor medio de  $E_b/N_0$  es de 2.01, tiene en promedio 5 llamadas activas y su valor de  $F_m$  alcanza el máximo valor de todo el sistema, mientras que para la celda número 1 el valor medio de  $E_b/N_0$  es de 6.32 y tiene una media de 58 llamadas activas. La relación de vecindad de la celda No.4 indica que las vecinas son las celdas No.1, No.5 y No.8.



**Figura 128** Valores mínimo, máximo y medio para las variables de llamadas,  $E_b/N_0$  y  $F_m$  durante la simulación

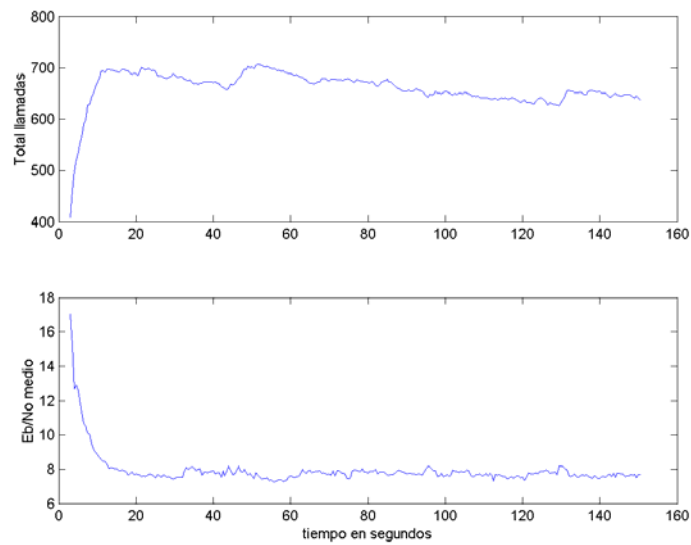


**Figura 129** Valores mínimo, máximo y medio para las variables de tráfico en Kbps,  $E_b / N_0$  y  $F_m$  durante la simulación

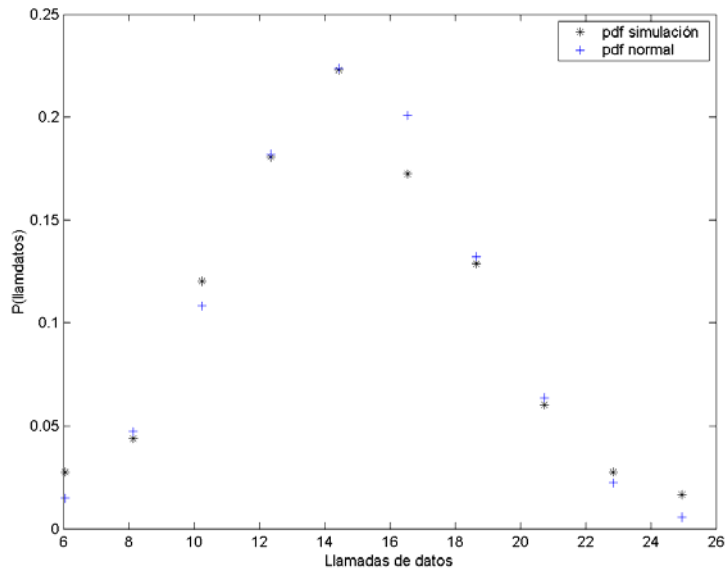
La Figura 129 muestra la variación del tráfico en el sistema durante la simulación, el  $E_b / N_0$  y el valor del factor  $F_m$ . Se puede observar entonces, en forma cualitativa, de la Figura 129 la relación entre el tráfico de una celda, el valor de  $E_b / N_0$  y de dónde proviene la interferencia, según el valor del factor  $F_m$ . Dicho de otra forma, una celda con pocas llamadas activas y un valor malo de  $E_b / N_0$  debe tener un factor  $F_m$  alto, indicando que la interferencia proviene de usuarios externos a la celda.

La Figura 130 muestra la evolución de las llamadas en curso totales del sistema y el valor medio de la relación  $E_b / N_0$ . Se puede apreciar que valor del total de llamadas se mantiene alrededor de 700 y el  $E_b / N_0$  se mantiene cerca de 8. Exactamente, el valor medio de  $E_b / N_0$  para todo el sistema es 7.9, lo que indica que el sistema todavía está en capacidad de aceptar más llamadas. El promedio de llamadas que se cursaron en el sistema entre el segundo 5 y el final de la simulación en el segundo 150 es de 661.

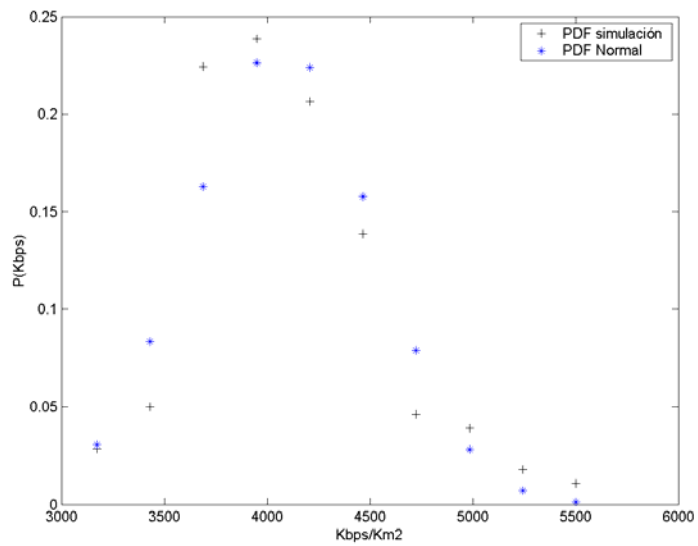
En la Figura 131 se muestra la función densidad de probabilidad para las llamadas totales de datos y para una distribución normal con media 4.95, y en la Figura 132 se muestra la PDF para el tráfico del sistema en  $Kbps/Km^2$  y de una distribución normal con media  $4.07Mbps/Km^2$  y desviación estándar 444.02. Es claro que el tráfico total en el sistema está ajustado a una distribución normal con los parámetros mencionados, en forma similar a como se comporta un sistema ideal.



**Figura 130 Evolución de las llamadas totales del sistema y el valor medio de  $E_b / N_0$**



**Figura 131** Función densidad de probabilidad para las llamadas totales de datos



**Figura 132** Función densidad de probabilidad para los resultados de simulación en Kbps/Km2 y de la dist normal

## 5.4.2 Modelo con 15 celdas sectorizadas usando el modelo de propagación red neuronal

### 5.4.2.1 Topología del sistema (vecindad)

Este escenario de simulación está formado por un sistema con 15 celdas empleando antenas sectorizadas a 120 grados, para un total de 35 coberturas, ya que en las zonas de frontera del sistema no se incluyeron coberturas, pues su área de influencia quedaría fuera del sistema. Los transmisores se ubican a una altura de 6 metros, el receptor se ubica a una altura de 1.8 metros y la PIRE para todas las coberturas es de 21 dBm, por lo que se considera un sistema con coberturas regulares. La Figura 133 muestra el mapa de mejor enlace del sistema.

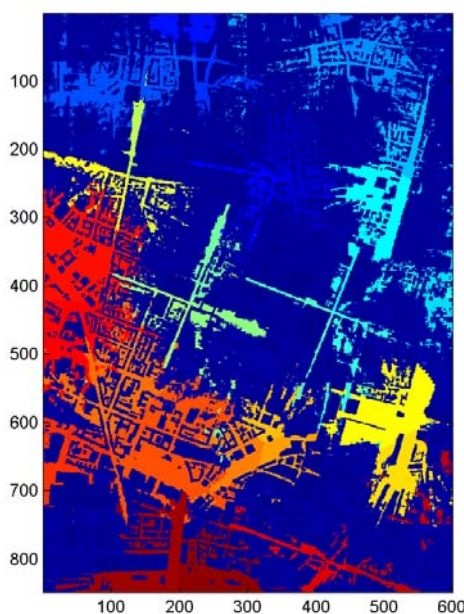


Figura 133 Mapa de mejor enlace del sistema

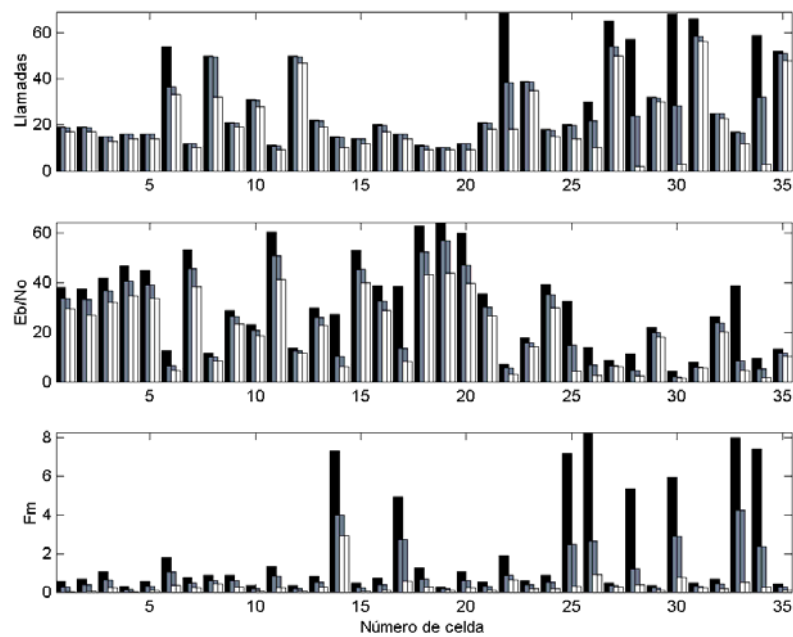
### 5.4.2.2 Resultados de simulaciones

La Figura 134 muestra los valores máximo, medio y mínimo del sistema durante toda la simulación. Se muestran las llamadas en curso, la relación  $E_b / N_0$  en cada celda y el factor  $F_m$ . De acuerdo a la figura, al finalizar el sistema las celdas que alcanzan la condición de bloqueo son la celda No.22, la celda No. 28, la celda No.30 y la celda No.34. La celda No.22 por ejemplo



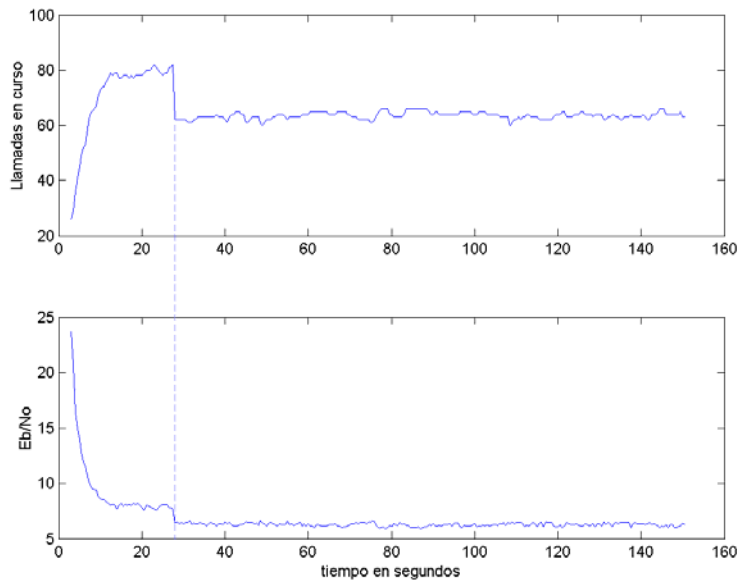
tiene una media cercana a 40 llamadas y un  $E_b / N_0$  medio de 4.55. La celda No.28 tiene una media de 23.8 llamadas, un  $E_b / N_0$  de 4.6 y un  $F_m$  medio de 1.19 y un máximo de 5.3.

En cuanto a las otras celdas con valores bajos de llamadas y de  $E_b / N_0$  medio, se puede observar en la figura que coinciden con los mayores valores del factor  $F_m$ , lo que implicaría que en estas celdas el valor de  $E_b / N_0$  está afectado principalmente por la interferencia intercelda.



**Figura 134 Valores máximo, medio y mínimo de llamadas,  $E_b / N_0$  y factor  $F_m$**

En la Figura 135 se muestra la evolución en el tiempo de las llamadas en curso y la relación  $E_b / N_0$  para la celda No.6. En este caso se aprecia que existe una relación más o menos proporcional entre el número de llamadas y el valor de  $E_b / N_0$ , salvo alrededor del segundo 26, cuando se presenta una reducción brusca del número de llamadas y ocurre lo mismo con el valor de  $E_b / N_0$ , lo que no obedece a la relación entre llamadas e interferencia.



**Figura 135 Evolución de llamadas de voz y  $E_b / N_0$  para la celda No.6**

La Figura 136 muestra los resultados de la simulación sobre la celda No.16, localizada hacia el centro del sistema. Esta celda se encuentra descongestionada y por lo tanto, el recorrido de  $E_b / N_0$  está entre 30 y 50 aproximadamente. Para el caso de esta celda, la PDF asociada a los resultados de simulación difiere bastante de una distribución normal, y parece más bien una combinación de tres distribuciones independientes, como se muestra en la Figura 137.

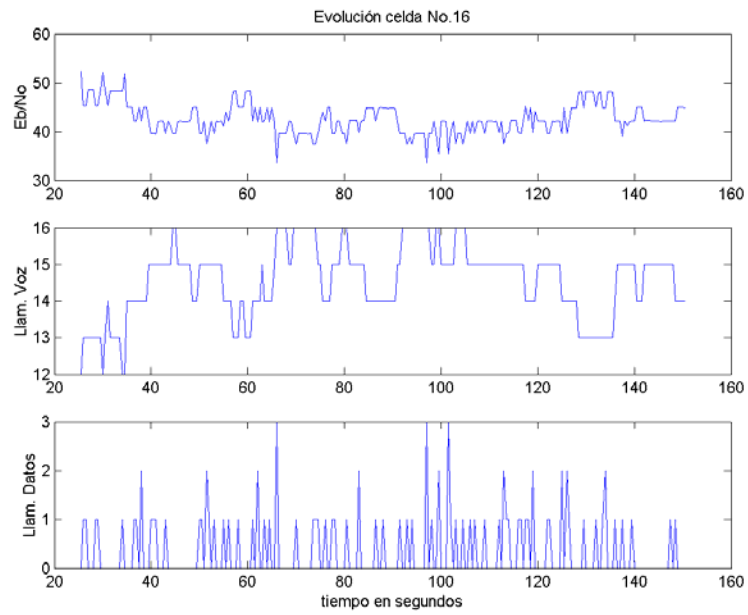


Figura 136 Evolución de llamadas de voz y datos en la celda No.16

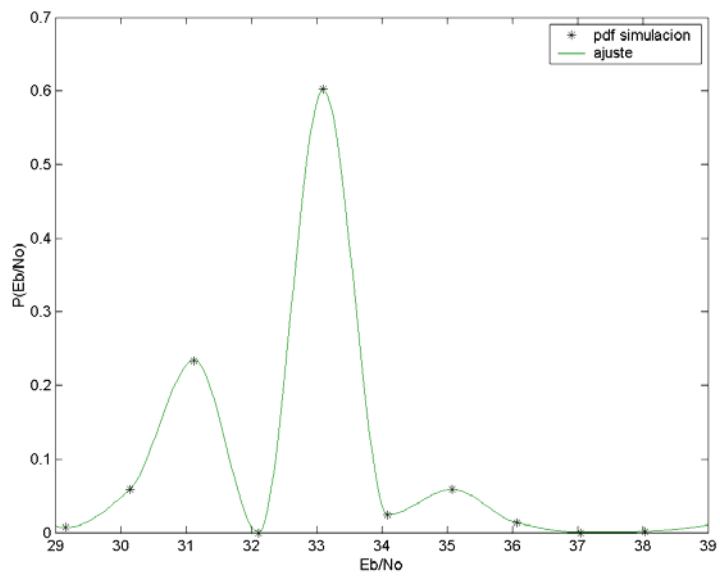
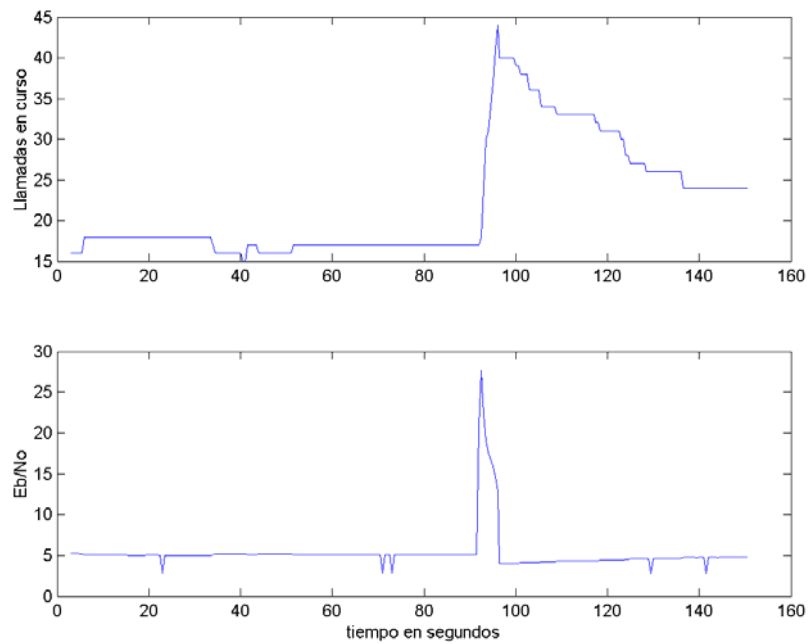


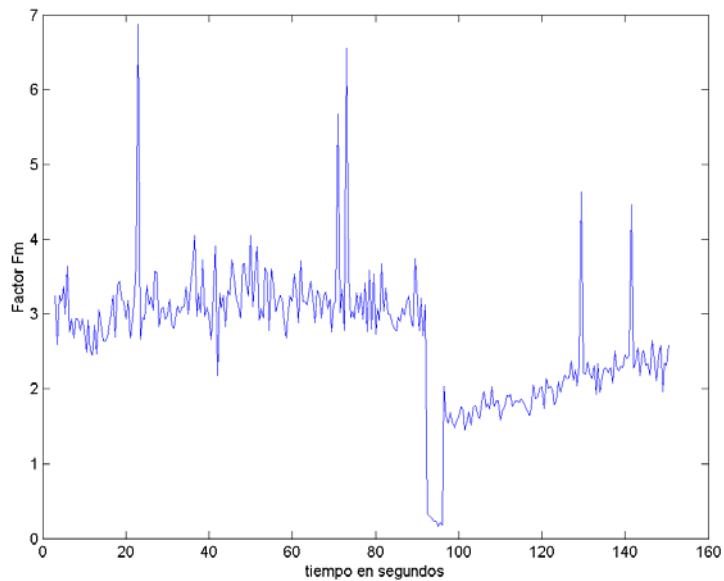
Figura 137 PDF del  $E_b / N_0$  en la celda No.16

La Figura 138 muestra la evolución en el tiempo de las llamadas en curso y la relación  $E_b / N_0$  para la celda No.22. Se observa que el valor de  $E_b / N_0$  se mantiene cerca al mínimo requerido, con un número de llamadas que oscila entre 15 y 20 hasta aproximadamente el segundo 90, cuando aumenta el valor de  $E_b / N_0$  a un nivel donde la celda puede aceptar llamadas y aumenta el número de llamadas en curso. Ceca del segundo 100 el valor de  $E_b / N_0$  vuelve a caer por debajo del mínimo requerido, hasta el final de la simulación.



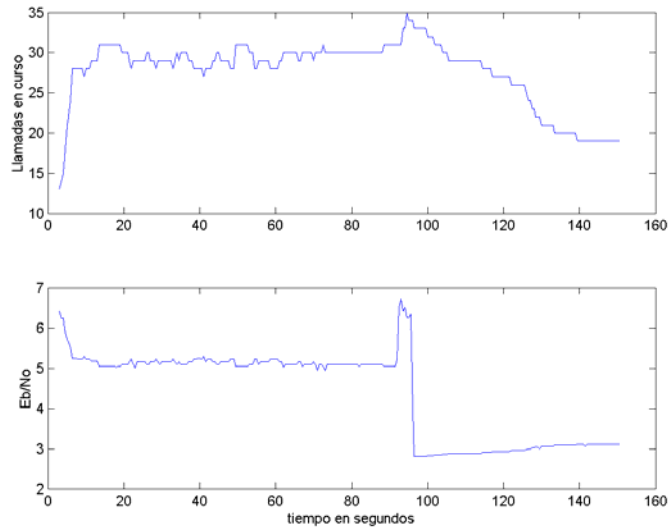
**Figura 138 Evolución de llamadas en curso y  $E_b / N_0$  para la celda No.22**

La Figura 139 muestra la evolución del factor  $F_m$  para la celda No.22. Alrededor del segundo 90, el valor de  $F_m$  decrece, indicando una reducción en la interferencia intercelda, que ocasiona la mejora de  $E_b / N_0$  que se observa en la Figura 139. Este comportamiento muestra la fuerte influencia que pueden tener las otras celdas del sistema sobre la relación  $E_b / N_0$  de una celda particular.

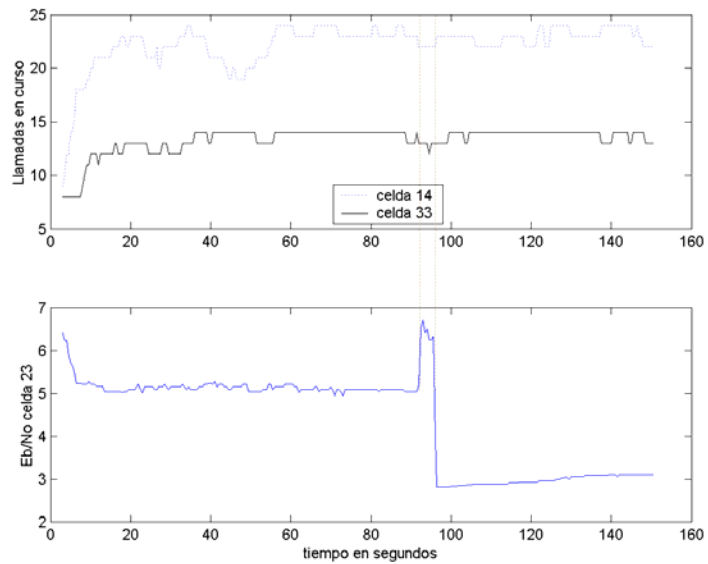


**Figura 139 Evolución del factor Fm para la celda No.22**

La Figura 140 muestra la evolución de las llamadas en curso y la relación  $E_b / N_0$  para la celda No.23. En forma similar al caso de la celda No.22 el valor de  $E_b / N_0$  se mantiene cercano al mínimo requerido hasta aproximadamente el segundo 90, cuando el valor de  $E_b / N_0$  mejora y la celda acepta mas llamadas. Cerca del segundo 100, el valor de  $E_b / N_0$  vuelve a caer y queda por debajo del mínimo requerido. La Figura 141 muestra la evolución de las llamadas de dos celdas vecinas de la celda No.23, las celdas No.14 y No.33, así como la evolución del  $E_b / N_0$  de la celda No.23. Tal como se indica con las líneas punteadas en la figura, la reducción del número de llamadas en la celda No.14 probablemente causaron el aumento del  $E_b / N_0$  en la celda No.23. Se puede apreciar que esta misma reducción de llamadas en la celda No.14 es la más probable causa del aumento del  $E_b / N_0$  en la celda No.22 que se muestra en la Figura 138.

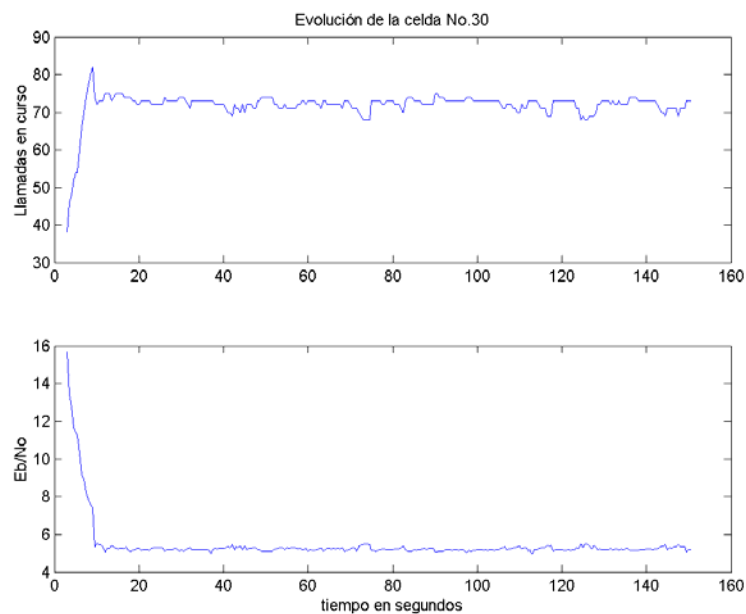


**Figura 140** Evolución de las llamadas en curso y el  $E_b / N_0$  en la celda No.23



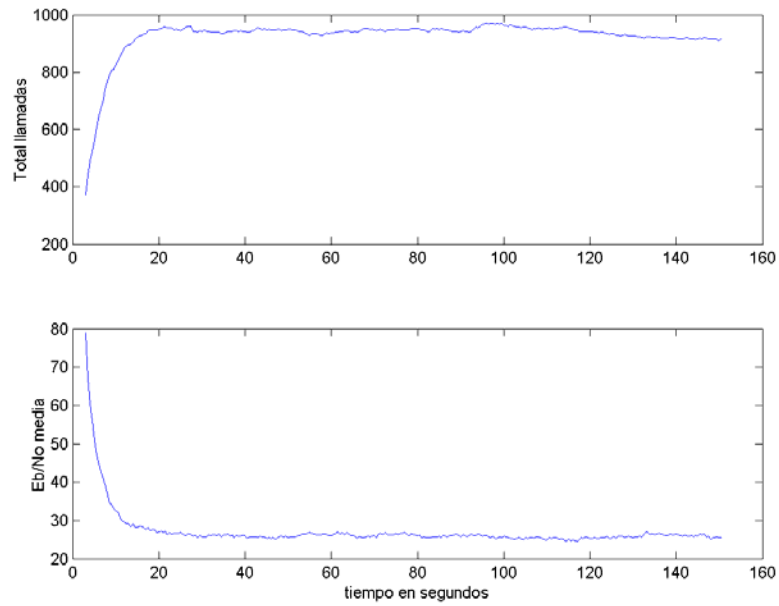
**Figura 141** Evolución de las llamadas en curso de la celda No.14 y la celda No.33 contra  $E_b / N_0$  de la celda No.23

La Figura 142 muestra la evolución del número de llamadas en curso y la relación  $E_b / N_0$  para la celda No.30, que es la que mantiene el mayor número de llamadas en el sistema. Para esta celda, la relación entre el número de llamadas y al valor de  $E_b / N_0$  es bastante lineal, con un coeficiente de correlación de 0.84 entre el número de llamadas y el valor de  $E_b / N_0$ . Las vecinas de la celda No.30 son las celdas No.18, No.20, No.21, No.27 y No.31. Como se puede ver en la Figura 134, el valor del factor  $F_m$  es relativamente bajo, lo que indica que tiene mayor impacto sobre  $E_b / N_0$  la interferencia intracelda.



**Figura 142 Evolución en el tiempo de llamadas y  $E_b / N_0$  en la celda No.30**

La Figura 143 muestra la evolución en el tiempo del total de llamadas en el sistema entre el segundo 5 y el segundo 150 al final de la simulación. Se puede observar un número alto de llamadas en curso activas y un valor medio de  $E_b / N_0$  alto (27.2), muy por encima del mínimo requerido, lo que indica que el sistema tiene capacidad para aceptar más llamadas.



**Figura 143 Evolución del total de llamadas en el sistema y  
valor medio de  $E_b / N_0$**

La Figura 144 muestra una curva de ajuste de distribución normal y de resultados de simulación para las llamadas de voz del sistema. Se aprecia que el ajuste no es muy bueno, por lo que la distribución de llamadas en el sistema no corresponde a una distribución normal. Para las llamadas de datos, el ajuste es mucho mejor, como muestra la Figura 146 y la Figura 147.



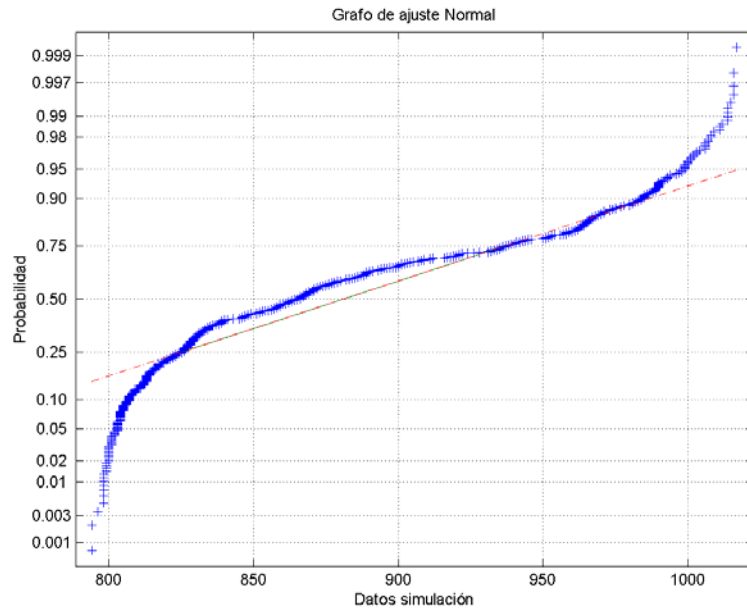


Figura 144 Distribución normal y resultados de simulación para llamadas totales de voz

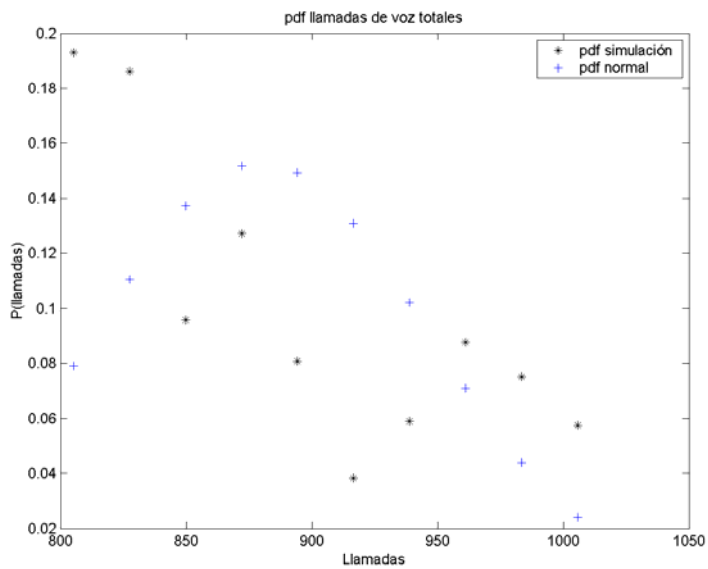
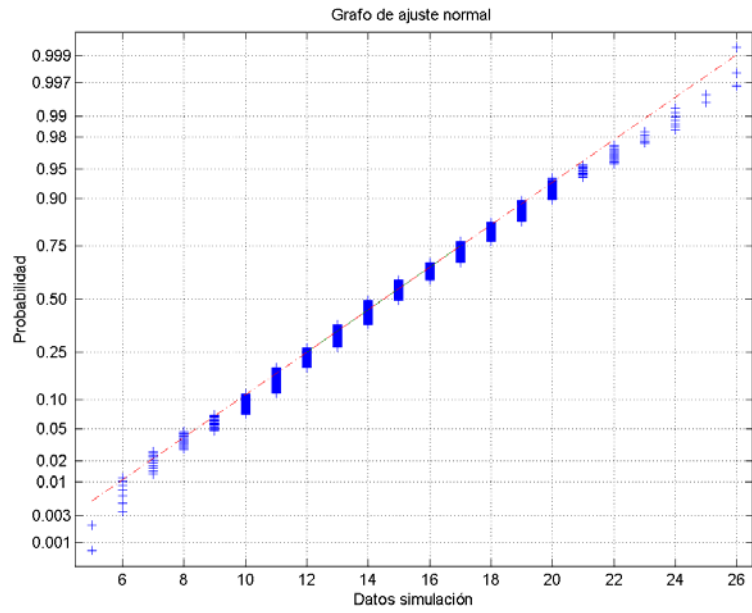
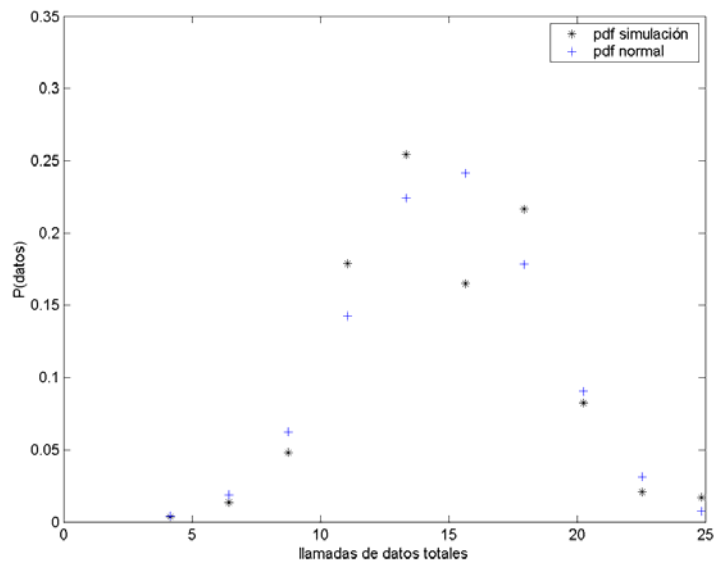


Figura 145 PDF de la simulación y de la distribución normal



**Figura 146 Recta de distribución normal y resultados de simulación para datos totales**



**Figura 147 PDF de la simulación y de la distribución normal para llamadas de datos**

Al finalizar la simulación, el máximo número de llamadas es aproximadamente 1800, para un valor de  $E_b / N_0$  cercano a 7.8. En este caso, el sistema está en capacidad de aceptar llamadas, pero el valor de  $E_b / N_0$  es similar al del sistema con celdas omnidireccionales, lo que permite hacer una comparación aproximada, resultando en una mayor capacidad del sistema sectorizado por un factor de aproximadamente 2.6, tal como se ha estimado en los modelos analíticos con coberturas ideales.

Desde el punto de vista topológico, el sistema es homeomorfo a un sistema ideal con coberturas circulares o hexagonales, pues al ser continuas las coberturas, se pueden obtener a partir de una deformación continua de una circunferencia.

## 5.5 COMPARATIVA

Hasta ahora se han mostrado resultados de diferentes escenarios de simulación, con características particulares en dichos escenarios, que permiten analizar diferentes factores que afectan la capacidad en sistemas CDMA. A continuación se hará un análisis comparativo de estos resultados, según cada uno de los factores que se han tomado en consideración para las simulaciones.

Los factores considerados, como se mencionó en el apartado 5.1, serán: influencia del modelo de propagación, número de celdas, patrón celular irregular y regular, sectorización a 120 grados y sectorización a 60 grados.

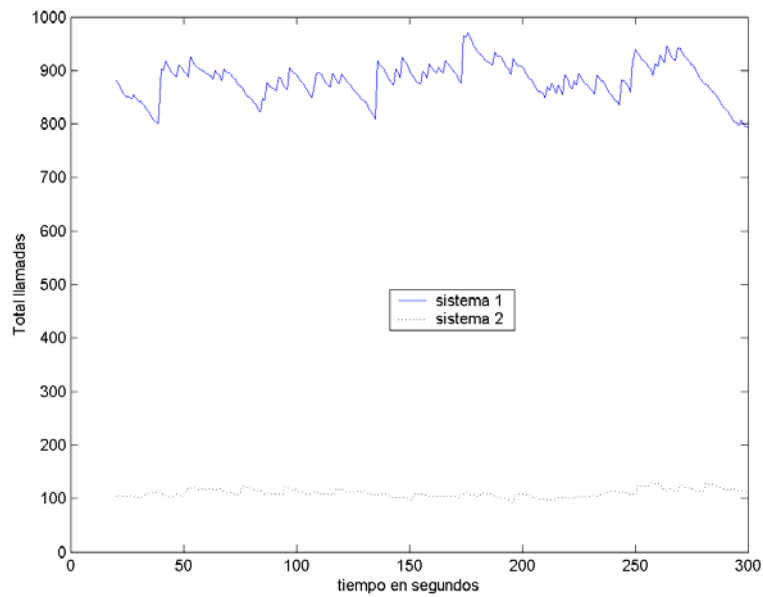
### 5.5.1 *Influencia del modelo de propagación*

Sobre la ciudad de Madrid se plantearon dos escenarios de simulación con condiciones iguales en cuanto a número de celdas, altura de EB y terminales móviles, PIRE y tipo de antena, pero empleando diferentes modelos de propagación para calcular las coberturas y por lo tanto el mapa de mejor enlace. Los resultados de simulación para estos escenarios se mostraron en el apartado 5.3.1 para el caso del modelo Hata, y en el apartado 5.3.2 para el modelo Univalencia COST-231.

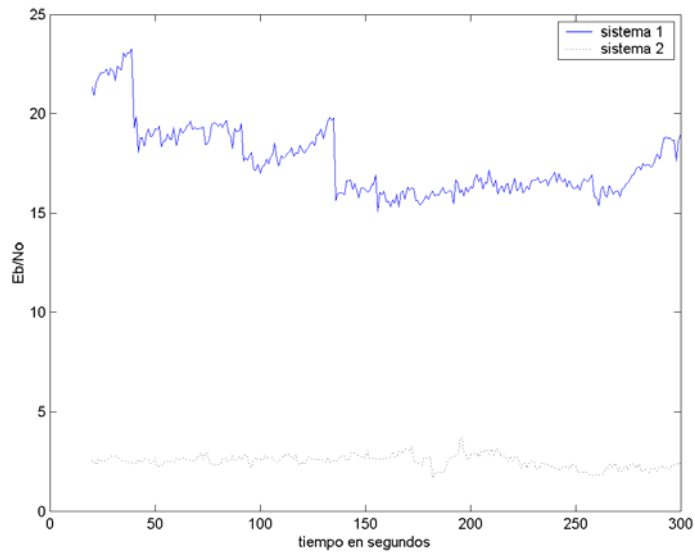
El sistema 1 emplea el modelo de Hata para calcular las coberturas, y el sistema 2 utiliza el modelo Univalencia. En la Figura 148 se muestra la evolución en el tiempo de las llamadas totales en el sistema, y en la Figura 149 se muestra la evolución en el tiempo del valor medio de la relación  $E_b / N_0$ ; se aprecia en estas dos figuras una diferencia considerable en el número de llamadas y el valor de  $E_b / N_0$ . El sistema 1, con el modelo de Hata tiene un número de llamadas mucho mayor que el sistema 2, y adicionalmente la

relación  $E_b/N_0$  es mejor, lo que implica que el sistema 1 tiene capacidad disponible, mientras el sistema 2 se encuentra en el límite de su capacidad.

También se puede apreciar en la Figura 148 que el sistema con el modelo Hata tiene una capacidad de más de nueve veces la capacidad del sistema calculado con el modelo Univalencia. Esta es una diferencia considerable que puede afectar notablemente el comportamiento de una red móvil en una situación real y por consiguiente traer problemas para el operador.



**Figura 148 Evolución de las llamadas totales para el sistema 1(Hata) y el sistema 2 (Univalencia)**



**Figura 149 Evolución en el tiempo del  $E_b / N_0$  promedio para los dos sistemas que se comparan**

Si se observa esta situación desde el punto de vista de la planificación, el sistema calculado con el modelo de Hata tiene una cobertura menor que el sistema que emplea el modelo de Univalencia, por que se pensaría que se requieren más celdas para cubrir la misma área de servicio empleando el modelo Hata.

### **5.5.2 Influencia del número de celdas**

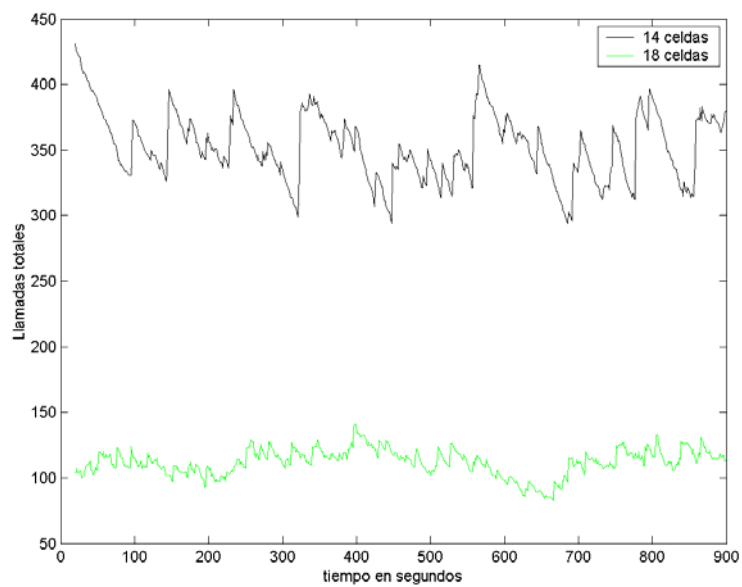
Una de las características que durante años se le han atribuido a los sistemas basados en CDMA es la posibilidad de incrementar la capacidad reduciendo el tamaño de las celdas y aumentando su número sin necesidad de re-planificar el sistema, como ocurre en TDMA. También se considera en algunos casos el empleo de nuevas celdas para cubrir zonas de sombra.

En las simulaciones realizadas, se analizan varios sistemas donde se usan los mismos modelos de propagación, las mismas condiciones de simulación, pero cada sistema tiene diferente cantidad de estaciones base.

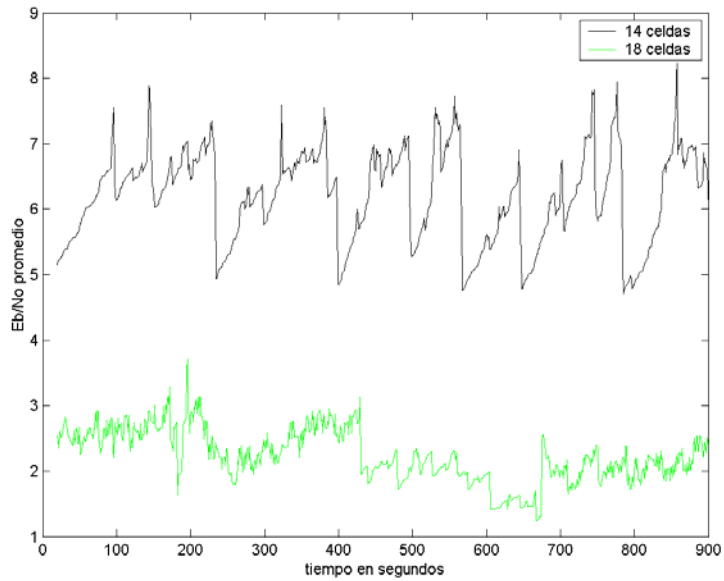
En el caso de Madrid, hay varios escenarios donde la única diferencia entre uno y otro es el número de celdas, específicamente hay tres escenarios, uno con dieciocho celdas, uno con 14 celdas y otro con seis celdas, y todas las coberturas empleando antenas omnidireccionales.

En la Figura 150 y en la Figura 151 se muestran las llamadas de voz para los dos sistemas simulados en Madrid con 14 y 18 celdas y la evolución en el tiempo de la relación  $E_b/N_0$  para estos sistemas. Al contrario de lo que ocurre con los sistemas de Valencia, en este caso el sistema con un mayor número de celdas tiene una menor capacidad y un peor comportamiento de  $E_b/N_0$ .

Según esto, el número de celdas por si solo no está directamente asociado a la capacidad, sino que aparecen otros factores adicionales que estarán relacionados con la topología del sistema.

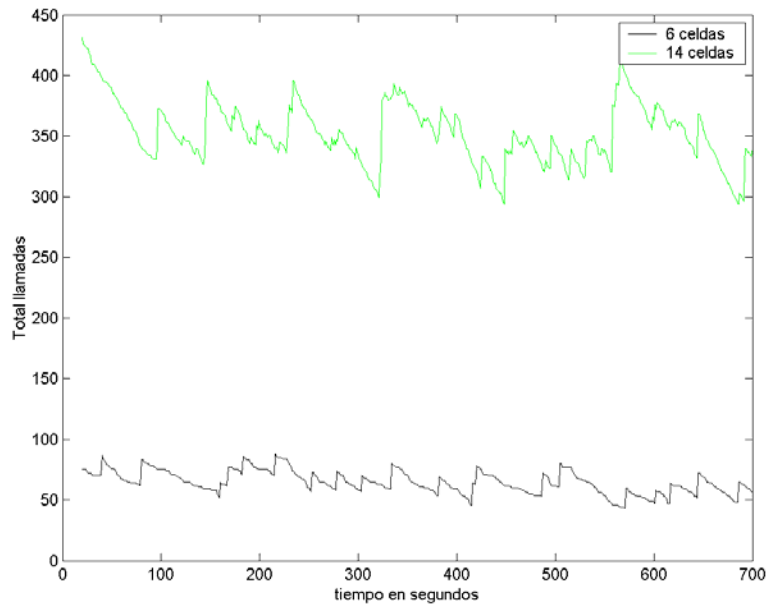


**Figura 150 Evolución en el tiempo de las llamadas totales para los dos sistemas**

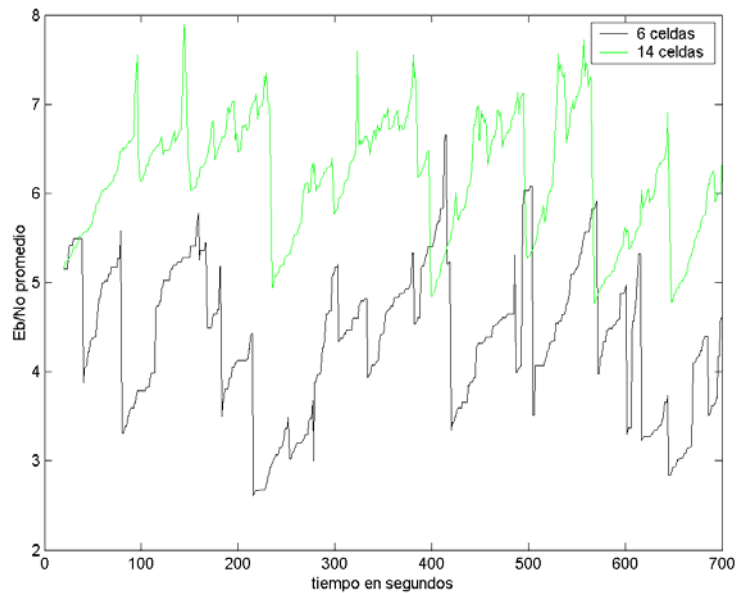


**Figura 151 Evolución en el tiempo de la  $E_b / N_0$  promedio para los dos sistemas**

En la Figura 152 y en la Figura 153 se muestra la evolución en el tiempo de las llamadas totales en el sistema y la evolución del valor de  $E_b / N_0$  para un sistema de 6 celdas y un sistema de 14 celdas, simulados en Madrid. En este caso, el sistema con 14 celdas presenta una mayor capacidad promedio y un mejor comportamiento de  $E_b / N_0$ .



**Figura 152 Evolución del total de llamadas para los sistemas de 6 y 14 celdas**

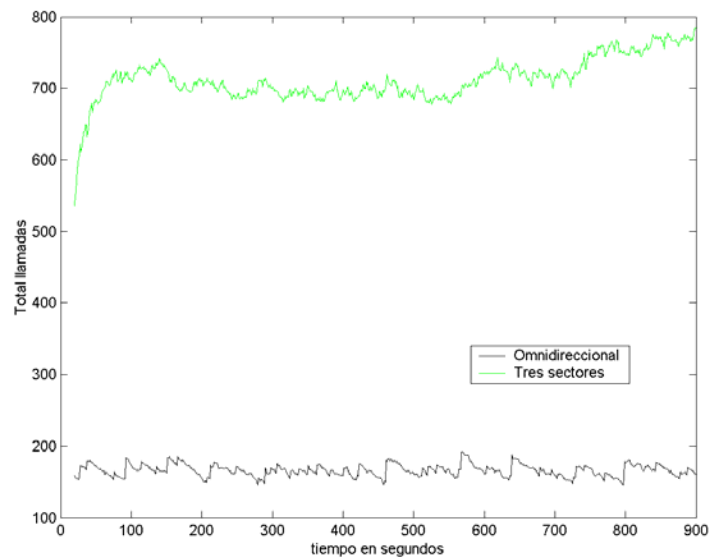


**Figura 153 Evolución del  $E_b / N_0$  promedio para los sistemas de 6 y 14 celdas**

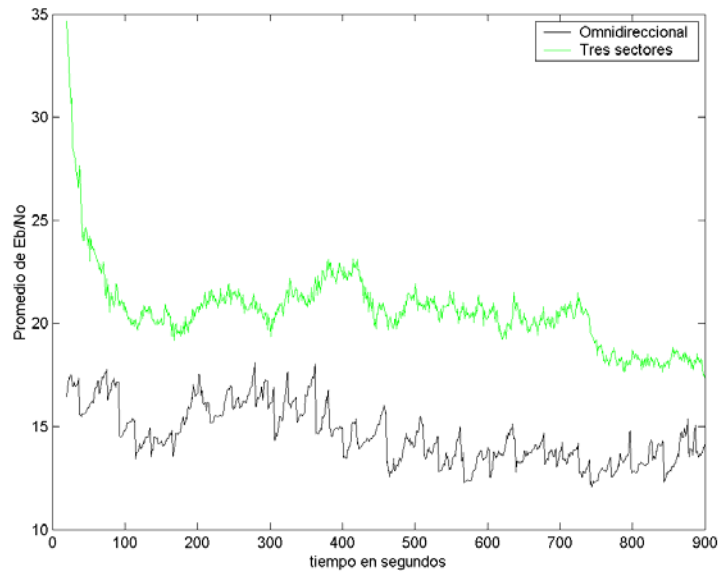


### 5.5.3 Efecto de la sectorización

En la Figura 154 se muestra la evolución en el tiempo de las llamadas totales y en la Figura 155 se muestra la evolución en el tiempo de la relación  $E_b / N_0$  para un sistema con celdas omnidireccionales y el mismo sistema con celdas divididas en tres sectores. En la Figura 154 se puede ver que el sistema sectorizado tiene una mayor capacidad que el sistema omnidireccional, específicamente 4.3 veces la capacidad. Igualmente, en la Figura 155 se puede ver que la relación  $E_b / N_0$  es mejor en el sistema sectorizado, por lo que la capacidad puede ser aún mayor que la calculada.



**Figura 154 Evolución del total de llamadas para el sistema omnidireccional y el sistema con tres sectores**

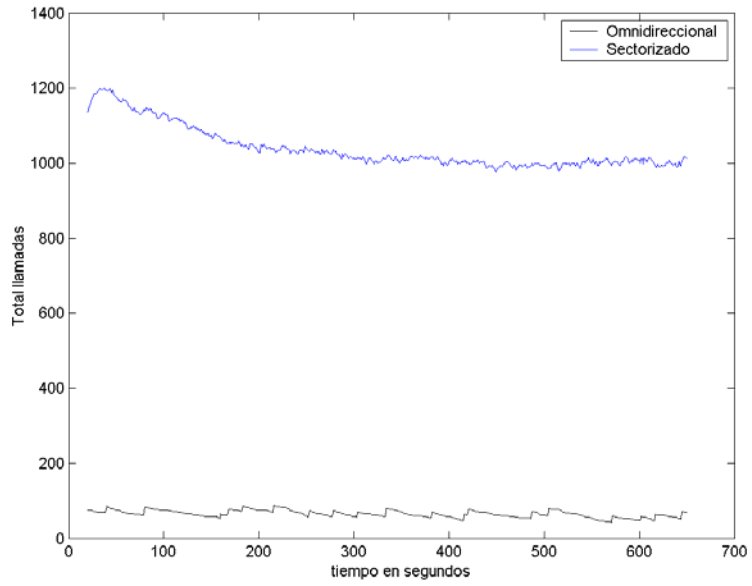


**Figura 155 Evolución del  $E_b / N_0$  promedio para el sistema omnidireccional y el de tres sectores**

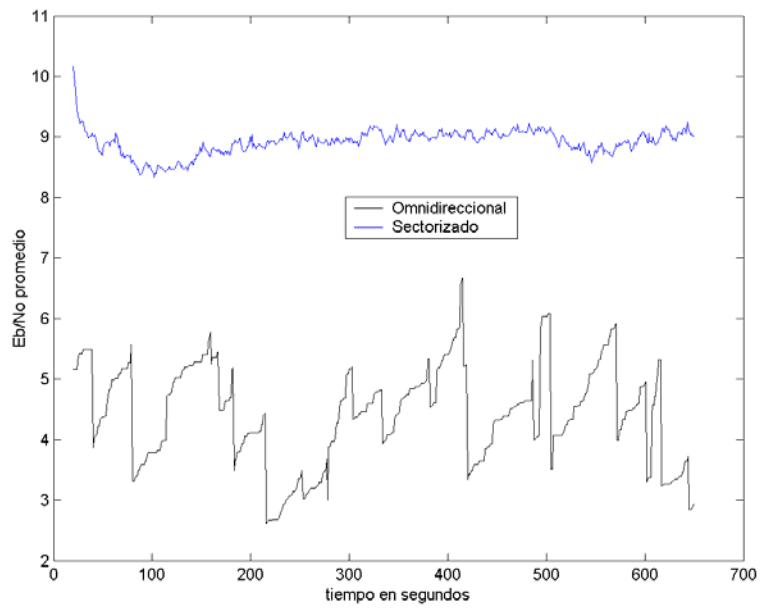
En la Figura 156 se muestra la evolución en el tiempo de las llamadas totales para un sistema con seis celdas omnidireccionales y el mismo sistema con celdas divididas en seis sectores, y en la Figura 157 se muestra la evolución en el tiempo de la relación  $E_b / N_0$  media para estos dos sistemas.

En la Figura 156 se puede ver que el sistema con seis sectores tiene una capacidad mucho mayor (16 veces) que el sistema con celdas omnidireccionales. Igualmente se puede ver en la Figura 157 que la relación  $E_b / N_0$  para el sistema con seis sectores es mejor que para el sistema omnidireccional.

De los dos casos comparados, es claro que la sectorización permite un aumento de capacidad en el sistema, incluso mayor que lo predicho teóricamente, pues reduce la interferencia intercelda del sistema y permite una mejor aproximación a la *pole capacity* de un sistema ideal.



**Figura 156 Evolución de las llamadas totales para el sistema omnidireccional y el de seis sectores**

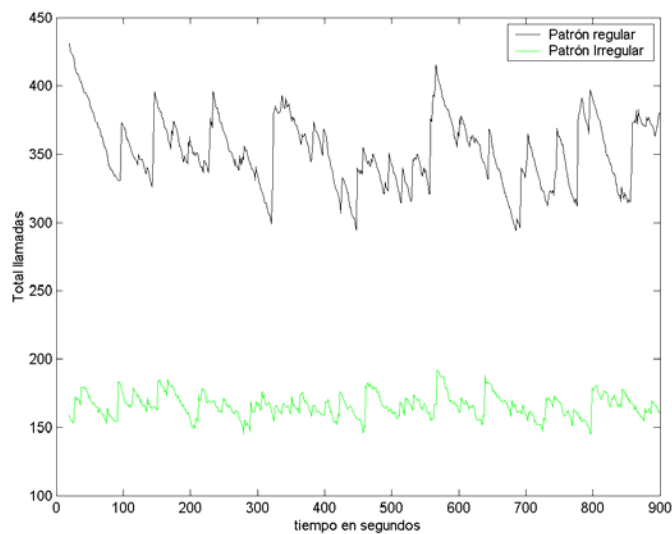


**Figura 157 Evolución del  $E_b/N_0$  promedio para el sistema omnidireccional y el de seis sectores**

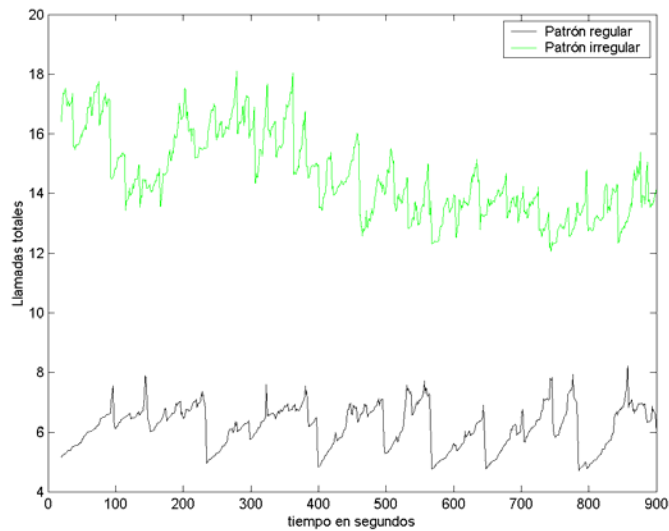
#### 5.5.4 Influencia del patrón regular y el patrón irregular.

En la Figura 158 se muestra la evolución de llamadas para un sistema con 15 celdas omnidireccionales del mismo radio (patrón regular) y un sistema con 15 celdas omnidireccionales con radio ajustado a un patrón de tráfico irregular, y por consiguiente diferentes radios. En la Figura 159 se muestra la evolución en el tiempo de la relación  $E_b / N_0$  para estos dos sistemas.

De las figuras se observa que el sistema con patrón regular presenta una mayor capacidad y una mejor relación  $E_b / N_0$ . Sin embargo, el sistema no está optimizado, y las celdas reales no corresponden a los radios estimados, por lo que es probable que esto esté castigando la capacidad del sistema con patrón irregular, así que es difícil llegar a una comparación precisa entre estos dos sistemas antes de intentar una optimización.



**Figura 158 Evolución del total de llamadas para el sistema con patrón regular y el sistema con patrón irregular**



**Figura 159 Evolución en el tiempo del  $E_b / N_0$  para el sistema con patrón irregular y el sistema con patrón regular**

## 5.6 ALGUNAS CONCLUSIONES SOBRE LAS SIMULACIONES

Hasta el momento, se han mostrado resultados de simulaciones sobre diferentes escenarios, usando el modelo descrito en el Capítulo 3. De estas simulaciones se han obtenido resultados de capacidad, valores de  $E_b / N_0$  y comportamiento del factor que relaciona la interferencia intercelda y la intracelda o factor  $F_m$ .

En el apartado 5.3.1 y en el apartado 5.3.2 se analizaron dos sistemas cuya única diferencia era el modelo de propagación empleado, y se obtuvieron resultados de capacidad muy diferentes. La principal diferencia entre los modelos de propagación empíricos y los modelos de propagación semi-deterministas ó deterministas es que los últimos tienen en cuenta la estructura del terreno sobre el que se hacen los cálculos, por lo que se obtienen formas de cobertura radicalmente diferentes. La planificación de sistemas CDMA con modelos de propagación empíricos tipo Hata ó log-distancia y que generan sistemas ideales o casi ideales, provoca resultados excesivamente optimistas, de tal forma que se puede prever una capacidad del orden de 2 a 3 veces mayor que en el caso de modelos semi-deterministas tipo Univalencia.

En algunos casos, donde se analizan sistemas con sectorización, como en los apartados 5.3.6 y 5.3.8 y sus sistemas equivalentes sin sectorización (apartados 5.3.5 y 5.3.7) se puede obtener una relación de incremento de capacidad por el uso de sectorización. Esto en principio es lógico porque cada celda cubre

ahora un área menor y por lo tanto captura menos tráfico, por lo que sería de esperar que la capacidad total se incremente. Adicionalmente, la sectorización permite reducir la interferencia intercelda y por tanto obtener  $F_m$  menores y  $E_b/N_0$  mayores. Los resultados obtenidos muestran que esta mejora en capacidad llega a ser mucho mayor que lo que predicen los modelos teóricos. El empleo de sectorización va a tener la contrapartida de coste por el mayor número de equipos requerido, pero podría requerir también menos *sites* para cubrir la misma área, como podría ser el caso del sistema con 6 *sites* sectorización a 60 grados, que tiene una capacidad menor que el sistema con 15 *sites* y sectores de 120 grados (29 coberturas contra 45 coberturas), pero cuya capacidad se podría mejorar incrementando el número de coberturas.

En el apartado 5.3.2 y en el apartado 5.3.3 se analizan dos modelos que emplean la misma distribución de celdas, el mismo modelo de propagación, pero diferente número de celdas. En este caso se encuentra que el sistema con menos celdas tiene una mayor capacidad que el sistema con un mayor número de celdas, lo que en principio contradice los modelos teóricos. Sin embargo, si se observan los resultados para el modelo con 18 celdas, se encuentra que algunas celdas tienen factores  $F_m$  muy altos, por lo que son celdas prácticamente “inútiles”. Este resultado induce a pensar que es posible planificar con un número grande de celdas y eliminar las celdas “inútiles” tras simulación. **(es necesario repetir una simulación M3 ?)**

En el apartado 5.3.3 y en el apartado 5.3.7 se muestran los resultados de sistemas similares, con el mismo modelo de propagación, pero empleando un patrón celular diferente, en el primer caso se emplea un patrón regular y en el segundo un patrón irregular. De estos resultados se puede observar que planificar con patrón irregular aparentemente no supone mejora, aunque estos resultados se pueden ver afectados por cuestiones relativas al algoritmo de localización de *sites* empleado por Cell-View, que no tiene en cuenta la altura del site, ni su ubicación en el entorno cercano. Esto va a incidir en que el área real de las coberturas puede diferir considerablemente del área teórica esperada del patrón celular. Al igual que en el caso anterior, se pueden encontrar celdas con altos valores de  $F_m$  que se podrían eliminar del sistema sin que esto vaya a afectar su capacidad y más bien la mejora. **(es necesario repetir una simulación M2 eliminando estas celdas “inútiles” ?)**

La aparente dependencia entre la capacidad y el modelo de propagación empleado lleva a pensar en la necesidad de utilizar herramientas de análisis diferentes a las empleadas tradicionalmente en la planificación y estimación de capacidad de sistemas CDMA. El análisis estructural, basado en la topología algebraica, permite analizar un sistema celular desde la perspectiva de una serie de relaciones o interdependencias independientes de la forma de las coberturas o del modelo de propagación utilizado.

## 5.7 ANALISIS POR DINÁMICA POLIÉDRICA O Q-ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS SIMULADOS

### 5.7.1 *Introducción*

En el Capítulo 2 se explicó el concepto de dinámica poliédrica o q-análisis. Este concepto permite analizar un sistema celular como un complejo simplicial y obtener invariantes topológicos de este, que permitan compararlo con otros sistemas celulares a la luz de la topología. Los complejos simpliciales se han utilizado previamente para modelar propiedades de conectividad de diversas redes o entidades ínter actuantes como tráfico, redes biológicas y algoritmos distribuidos [ 29 ], [ 30].

Los complejos simpliciales también han sido utilizados para el estudio de procesos dinámicos en la red. Los complejos simpliciales tienen asociados varios invariantes topológicos que permiten estudiar algunas propiedades estructurales de diferentes sistemas. El concepto de invariante topológico permite determinar si dos sistemas son topológicamente equivalentes u homeomorfos; si dos sistemas, en este caso complejos simpliciales, no comparten un invariante topológico, entonces se puede decir sin duda que no son homeomorfos. Pero si dos sistemas comparten un invariante topológico, esto es condición necesaria mas no suficiente para determinar su homeomorfismo.

Por lo visto en el apartado 5.5, algunos criterios de capacidad que tradicionalmente se han aplicado en sistemas CDMA no se cumplen, o se ven modificados cuando se involucran coberturas irregulares obtenidas con herramientas de planificación que emplean mapas digitales, por lo que se hace necesario recurrir a herramientas mas elaboradas que permitan una adecuada planificación de sistemas de tercera generación basados en CDMA, como el UMTS, y que permitan analizar el comportamiento dinámico de los sistemas de tercera generación. Una alternativa explorada en esta tesis y en algunos trabajos publicados recientemente es la utilización de simulaciones dinámicas con diferentes mecanismos de simplificación para reducir los tiempos de cálculo. Otra alternativa es utilizar herramientas diferentes y que permitan llegar a resultados similares en menor tiempo que empleando simulaciones, que es lo que se propone a continuación.

Un sistema celular con tecnología CDMA es un sistema con una serie de complejas interacciones entre las diferentes celdas que determinan su capacidad, por lo que la aplicación del q-análisis a los sistemas celulares permitirá determinar homeomorfismos entre sistemas celulares o estimar la capacidad de estos a partir de sus propiedades topológicas. Los invariantes topológicos obtenidos a partir de la aplicación de q-análisis permiten en primera instancia comparar dos o más sistemas que a primera vista puedan parecer muy diferentes, y en una segunda instancia pueden permitir establecer la capacidad de un determinado sistema.

Lo que se propone entonces es la utilización de algunos invariantes topológicos, como son el vector de estructura y el acoplamiento, para determinar la capacidad de un determinado sistema a partir de su relación de conectividad dimensional. Es de esperar que sistemas con características topológicas similares tengan capacidades similares.

A continuación se muestran los resultados del cálculo del vector de estructura o vector de q-conectividad para los diferentes escenarios empleados en las simulaciones para estimar capacidad. En el apartado 5.7.3 se muestra una comparativa entre las capacidades de los diferentes sistemas simulados y sus invariantes topológicos.

El vector de estructura va a entregar dos resultados, de acuerdo con la forma como se ha definido un sistema celular como complejo simplicial, es decir las coberturas son los vértices y los solapamientos entre coberturas forman los símlices.

En el vector de estructura se obtiene primero la dimensión del vector o el número de elementos que lo conforman, que determina la dimensión en la cual existen solapamientos entre celdas. Para cada dimensión existente, el número entero obtenido determina el grado de conectividad en esa dimensión; un número mayor implica una menor conectividad en esa dimensión.

### ***5.7.2 Resultado de cálculo de vector de estructura para los diferentes escenarios***

#### *5.7.2.1 Sistema Munich con celdas omnidireccionales*

El vector de estructura está dado por:  $\{11, 1, 1\}$

Estos valores indican que solo hay conectividad hasta la tercera dimensión, y en la primera dimensión hay once símlices no conectados.

#### *5.7.2.2 Sistema Munich con celdas sectorizadas*

El vector de estructura está dado por:  $\{30, 1, 1\}$

Estos valores indican que hay conectividad hasta la tercera dimensión y en la primera dimensión hay 30 símlices no conectados.

#### *5.7.2.3 Sistema Ideal con 18 celdas*

El vector de estructura del sistema está dado por:  $\{1, 38\}$

Estos valores indican una conectividad alta en la primera dimensión, que es de esperarse, ya que hay una estructura celular con traslapes entre todas las



celdas y ningún hueco entre ellas, y aparece un elemento de conectividad muy bajo en la segunda dimensión, lo que indica que en algunas partes del sistema hay traslapes de tres coberturas.

*5.7.2.4 Sistema Madrid con 18 celdas omnidireccionales y modelo Okumura-Hata*

El vector de estructura para este sistema está dado por: { 9, 13 }

Estos valores indican que hay conectividad hasta la segunda dimensión y en la primera dimensión hay nueve símplexes no conectados.

*5.7.2.5 Sistema Madrid con 18 celdas omnidireccionales y modelo Univalencia*

El vector de estructura para este sistema está dado por: {1, 1, 1, 1, 1, 1, 78 }

Estos valores indican la existencia de conectividad hasta la séptima dimensión y una conectividad total en la primera dimensión, pues sólo aparece un símplex.

*5.7.2.6 Sistema Madrid con 14 celdas omnidireccionales y modelo UniValencia*

El vector de estructura para este sistema está dado por: { 1, 1, 1, 1, 1, 1, 36 }

Los valores del vector de q-conectividad muestran la existencia de conectividad hasta la séptima dimensión, y conectividad total en la primera dimensión.

*5.7.2.7 Sistema Madrid con 15 celdas sectorizadas regulares y modelo UniValencia*

El vector de estructura para este sistema está dado por: {4, 1, 1, 1, 1, 129 }

Los valores del vector de estructura muestran conectividad hasta la sexta dimensión y cuatro símplexes no conectados en la primera dimensión.

*5.7.2.8 Sistema Madrid con 15 celdas omnidireccionales irregulares*

El vector de estructura está dado por: {2, 1, 1, 1, 1}. En este caso, existe una relación de vecindad de todas con todas, pero la matriz de incidencias muestra un complejo simplicial de pocas dimensiones. La matriz de incidencias está dada de la forma:

| VERTICES |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1        | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1        | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1        | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1        | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1        | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0        | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0        | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

#### *5.7.2.9 Sistema Madrid con 15 celdas sectorizadas irregulares*

El vector de estructura para este sistema es:  $q$ -conectividad = {34, 1, 1, 1, 1, 1}

Estos valores indican que hay 34 símlices no conectados en la primera dimensión y una relación de conectividad hasta la sexta dimensión.

#### *5.7.2.10 Sistema Madrid con 6 celdas omnidireccionales regulares*

El vector de estructura para este sistema está dado por: {1, 1, 1, 1, 1, 1}

El cálculo del vector de estructura empleando la matriz de incidencias de usuarios resultante al fin de la simulación está dado por: {1, 1, 1, 1, 1, 1}, lo que indica que para este caso, hay usuarios en los traslapes entre diferentes coberturas y el complejo simplicial es igual desde el punto de vista topológico, aunque las dos matrices incidentes son relativamente diferentes. Para el caso del cálculo a partir de los traslapes, donde la celda es el vértice y el traslape es el símlice, se obtiene una matriz incidente de 6x6, mientras que en el caso en el que se toman los usuarios como símlices y las coberturas como vértices, la matriz incidente es de 224x6.

#### *5.7.2.11 Sistema Madrid con 6 celdas con sectores de 60 grados regulares*

El vector de estructura para este sistema está dado por: {14, 1, 1, 1, 1, 1, 9}

Estos valores indican una relación de conectividad hasta la séptima dimensión y la existencia de 14 símlices no conectados en la primera dimensión.

### ***5.7.3 Relación entre $q$ -conectividad y capacidad en CDMA***

Como se ha mostrado en apartados previos, es posible relacionar algunos parámetros de un sistema CDMA con su capacidad, a través de simulaciones. En un proceso de planificación de un sistema UMTS, es posible llegar a un sistema óptimo desde el punto de vista de capacidad empleando dichas simulaciones dinámicas, sin embargo este es un proceso computacionalmente costoso y que implica largo tiempo de ensayo y error.

El cálculo de un invariante topológico como es el vector de estructura o  $q$ -conectividad de un sistema es un proceso muy corto que arroja información útil sobre la capacidad de un sistema, dado su mapa de mejor enlace y las coberturas que lo componen. En la Tabla 6 se muestra una comparativa entre las capacidades de los sistemas simulados y los vectores de estructura obtenidos para cada sistema, así como los otros invariantes topológicos que se pueden obtener.

En la Tabla 6 se muestran los resultados de capacidad promedio en los diferentes escenarios simulados, la relación  $E_b / N_0$  promedio durante la simulación y los invariantes topológicos de los diferentes escenarios simulados. De los diferentes invariantes, sólo se requieren dos para definir adecuadamente el sistema, por lo que se va a emplear el vector de estructura, la cohesión y un tercero que es el acoplamiento. Adicionalmente, se utilizará un cuarto factor, obtenido de la relación entre invariantes y el número de sectores de los sistemas, ya que la sectorización y el número de celdas modifican la topología y afectan la capacidad.

Para obtener una relación entre vector de estructura, cohesión y acoplamiento, es preciso hacer algunas consideraciones sobre planificación y capacidad en sistemas CDMA. Si se asume que un sistema ideal basado en un *layout celular* es el que tiene las mejores condiciones de cobertura y capacidad, se pueden identificar algunas relaciones existentes entre el vector de estructura del sistema ideal y el vector de estructura de los demás sistemas, como por ejemplo la conectividad en la primera dimensión, que se puede asociar a los agujeros de cobertura que puedan existir en el sistema. Por otra parte, cuando el sistema tiene sectorización, la conectividad se ve modificada por esta sectorización, resultando un vector de estructura con un valor que es múltiplo de tres (3) en la primera dimensión, y cuyo valor final depende del número de celdas en el sistema.

En la Tabla 6 se puede ver que la primera relación que hay entre capacidad y vector de estructura es que un valor alto del vector de estructura en la primera dimensión está asociado a una capacidad alta, pero también indica la existencia de agujeros de cobertura entre las celdas del sistema. El valor alto en la primera dimensión del vector de estructura está asociado también a la sectorización, pues un sistema con sectorización se puede asimilar a un complejo simplicial que se ha separado en varios sub-complejos, lo que implica revisar la segunda dimensión del vector de estructura. En la Tabla 6 se puede ver que el valor del vector de estructura para el sistema ideal es de 1 en la primera dimensión y 38 en la segunda dimensión.

Entonces el vector de estructura se puede interpretar como: Un valor alto en la primera dimensión, en un sistema sin sectorización está asociado a una alta capacidad, pero sin continuidad en el sistema, lo que implica zonas sin cobertura e el área de servicio del sistema. En un sistema con sectorización, un valor alto en la primera dimensión del vector de estructura está asociado a una alta capacidad, pero no dice nada acerca de los agujeros de cobertura, por lo que es necesario recurrir a un segundo invariante.

El otro parámetro a tomar en consideración para relacionar la capacidad con el análisis poliédrico es el acoplamiento, que indica que tan fuerte es la relación entre los diferentes simplices del complejo. En la Tabla 6 se puede ver también que los sistemas con una capacidad mayor tienen un

acoplamiento bajo, aunque un acoplamiento demasiado bajo va a indicar también un sistema con agujeros de cobertura, como es el caso de Madrid con el modelo Hata ó los dos escenarios de Munich. La excepción a este comportamiento es el sistema Madrid 11, que es un sistema con celdas de seis sectores y un acoplamiento muy fuerte, cuya capacidad está asociada fundamentalmente con la sectorización.

El acoplamiento también va a servir para indicar el comportamiento del sistema en condiciones de alto tráfico, pues se asocia con la separación de las celdas cuando éstas se contraen por el efecto de respiración. Esto implica que un sistema con un acoplamiento alto será un sistema donde no aparecen agujeros de cobertura al contraerse, y esto explica el caso del sistema Madrid 11, que tiene una alta capacidad relacionada con el valor de la primera dimensión del vector de estructura y un acoplamiento alto.

| Sistema                      | Capacidad<br>(Kbps/Km2) | Eb/No media | vect estruct     | Dim | Cohesión   | Acoplamiento |
|------------------------------|-------------------------|-------------|------------------|-----|------------|--------------|
| Munich Sect(3)               | 7,26E+03                | 7,8         | {30,1,1}         | 2   | 8,29E-03   | 1,44E-02     |
| Madrid 8 (18 celdas Hata)    | 4,15E+03                | 13,46       | {9,13}           | 1   | 0,18706697 | 0,35371179   |
| Ideal                        | 3,40E+03                | 5,8         | {1,38}           | 1   | 0,17430639 | 0,333525678  |
| Madrid 11(M7 seis sectores)  | 3,01E+03                | 8,9         | {14,1,1,1,1,1,9} | 6   | 0,99057993 | 0,992020908  |
| Madrid 2(15 celdas sect.irr) | 4,01E+03                | 20,6        | {34,1,1,1,1,1}   | 5   | 0,36138614 | 0,391248391  |
| Munich I                     | 4,07E+03                | 7,9         | {11,1,1}         | 2   | 5,41E-02   | 9,09E-02     |
| Madrid 3                     | 1,07E+03                | 6,2         | {1,1,1,1,1,1,36} | 6   | 0,99751431 | 1            |
| Madrid 5                     | 482,45                  | 14,6        | {2,1,1,1,1}      | 4   | 0,95566502 | 0,964143426  |
| Madrid 1                     | 1,57E+03                | 7,4         | {1,1,1,1,1,1,78} | 6   | 0,99706512 | 1            |
| Madrid 7(6 celdas omni)      | 188,3                   | 4,3         | {1,1,1,1,1,1}    | 5   | 1          | 1            |
|                              |                         |             |                  |     |            |              |
| Ideal tres sectores          |                         |             | {18,1,1}         | 2   | 2,19E-02   | 3,77E-02     |

Tabla 6 Capacidad de los diferentes escenarios simulados y sus invariantes topológicos

#### 5.7.4 *Algunas conclusiones*

De los resultados obtenidos con el cálculo de q-conectividad y los otros invariantes, se encuentra una fuerte coincidencia entre varios resultados del q-análisis y la capacidad de los sistemas obtenida por simulaciones. En concreto los indicadores de capacidad que podemos obtener a partir del análisis con dinámica poliédrica son:

##### 5.7.4.1 *Vector de estructura ó Q-vector*

Del vector de estructura como tal se pueden utilizar dos parámetros que son: Primero, la dimensión del vector, pues los sistemas con vectores de menores dimensiones y coberturas omnidireccionales tienen una mayor capacidad que los sistemas con conectividades en mayores dimensiones, lo cual tiene sentido, ya que la existencia de elementos del vector en cada dimensión está asociada a la existencia de solapamiento entre un número de celdas igual a la dimensión.

El segundo factor es el valor de conectividad en la primera dimensión. Se observa que los mayores valores del primer elemento del vector de conectividad están asociados a mayores capacidades, según los resultados de las simulaciones. Si se analiza este resultado desde el concepto básico de los sistemas celulares, un sistema altamente conectado (valor bajo en el vector de estructura) es un sistema con mayor número de interferentes, y un sistema con baja conectividad es un sistema con grupos de interferencia separados, lo que, por ejemplo, se pretende al sectorizar. Este valor de la primera dimensión no se debe considerar aisladamente, pues los sistemas con sectorización van a tener necesariamente un valor alto de este parámetro.

##### 5.7.4.2 *Cohesión*

La cohesión nos va a indicar si hay o no agujeros en la cobertura, es decir, un sistema con una baja cohesión, como los dos sistemas en Munich, van a tener una mala cobertura del área de servicio, mientras que una cohesión demasiado alta va a indicar un excesivo solapamiento entre celdas que va a hacer que los valores de  $F_m$  se hagan muy altos. Este valor se debe mirar en conjunto con el primer elemento del vector de estructura, pues si se observa en forma independiente se pueden encontrar casos particulares como el escenario de Madrid con Hata, que tiene un valor de cohesión mayor que el sistema ideal, pero el valor del primer elemento del vector de estructura es también alto, indicando los agujeros de cobertura que efectivamente existen.

##### 5.7.4.3 *Acoplamiento*

El acoplamiento es un factor complementario a la cohesión que nos va a indicar que tanta es la relación existente entre los elementos del complejo

simplicial. Va a servir fundamentalmente para verificar el cálculo de la cohesión.

De los resultados obtenidos no se puede obtener una relación directa entre el valor de estos elementos y la capacidad del sistema, pero sí permite seleccionar entre varios sistemas el de mayor capacidad.

De los resultados obtenidos, lo que sí es posible determinar, al menos inicialmente pues haría falta tener más casos de análisis, es una relación que permita diferenciar un sistema “bueno” de uno “malo” desde el punto de vista de capacidad y cobertura. Esta relación debe tener en cuenta si el sistema es o no sectorizado. Se podría decir en principio que un sistema bien planificado desde el criterio del  $q$ -análisis tendrá una baja dimensión, un valor del primer elemento del vector de estructura igual a 1 y una cohesión cercana a 0.4, si es omnidireccional; si tiene sectorización el valor del primer elemento del  $q$ -vector aumenta, pero los demás parámetros deberán mantenerse, aunque una sectorización imperfecta (es decir, real) va a implicar un aumento en la dimensión del  $q$ -vector.

El vector de estructura y el acoplamiento nos da entonces una herramienta de análisis muy simple y computacionalmente liviana para comparar varios sistemas en un proceso de planificación y seleccionar los candidatos con mayor capacidad y mejor cobertura, evitando largas simulaciones. Ya que existen otros factores que se emplean en el análisis estructural, se puede pensar que la utilización de otros factores adicionales como los  $q$ -agujeros o los números de Betti o el segundo vector de estructura, entre otros pueden aportar elementos adicionales en el análisis y planificación de sistemas de tercera generación basados en CDMA.

## Capítulo 6

### CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

Mediante el uso de simulaciones se ha logrado establecer dependencia de la capacidad de un sistema CDMA con factores relacionados con la planificación como son el modelo de propagación, el número de celdas, la sectorización y el uso de patrones celulares regulares o irregulares. Se ha encontrado también que en algunos sistemas con coberturas muy irregulares, un desbalance causado por excesivo tráfico en una o varias celdas puede afectar fuertemente la capacidad del sistema.

Se ha logrado establecer, para el caso de la sectorización, que esta puede influir de forma más determinante sobre la capacidad que lo que predicen los modelos teóricos que asumen celdas hexagonales.

Se ha establecido una relación entre la capacidad de un sistema CDMA y la utilización de la dinámica poliédrica ó q-análisis, que permite incluir en dicho análisis los factores arriba mencionados como son el modelo de propagación y la sectorización.

Se ha podido mostrar la relación entre un invariante topológico como el vector de estructura y la capacidad de un sistema CDMA, de tal forma que se dispone de una herramienta de análisis poderosa y mucho menos exigente computacionalmente que la simulación. Cabe anotar, que el significado que tenga el vector de estructura va a depender principalmente del valor en la primera dimensión, el número de dimensiones y los valores de los elementos a partir de la segunda dimensión. En el caso de los sistemas que emplean sectorización, es de esperarse un valor alto en la primera dimensión, por lo que va a ser más determinante el significado de las dimensiones adicionales.

Es posible buscar elementos adicionales en la dinámica poliédrica, que permitan obtener análisis más precisos, como son el segundo vector de estructura o el número de betti. Igualmente es posible extender el análisis con el empleo de topología algebraica, que podría aportar herramientas más poderosas.

#### 6.1 RESUMEN DE CONTRIBUCIONES.

Las principales contribuciones de esta tesis son:



**Utilización de mapas de cobertura irregulares generados por una herramienta de planificación:** Todos los trabajos previos sobre análisis de capacidad han utilizado coberturas ideales, y por lo general basados en el modelo de Okumura – Hata.

**Simulación de nivel de sistema bidimensional:** Las simulaciones de nivel de sistema que se emplean tradicionalmente en el análisis de capacidad son unidimensionales, es decir no ubican los usuarios sobre un mapa bidimensional.

**Dependencia de la topología del terreno en la simulación:** Por primera vez se efectúa una simulación dinámica para análisis de capacidad donde se incluyen modelos digitales de terreno como una variable del análisis.

**Utilización del modelo de propagación como una variable de análisis:** Hasta ahora todos los análisis de capacidad no han tenido en cuenta el modelo de propagación utilizado como un factor que puede afectar la capacidad. Sin embargo, se ha encontrado que el modelo de propagación, unido a la topología del terreno afectan la estructura del sistema y por lo tanto afectarán la capacidad del sistema. Esto lleva a la necesidad de emplear modelos de propagación adecuados a las condiciones de terreno de cada entorno donde se requiera planificación de un sistema móvil.

**Análisis de la estructura dinámica del sistema en la simulación al incluir el efecto de respiración:** Exceptuando tal vez el trabajo de Hoppe [15], el efecto de respiración no se ha modelado dinámicamente en herramientas de simulación.

**Utilización de Q-análisis en el modelado de un sistema móvil:** El q-análisis es una herramienta de la topología matemática que permite definir la estructura del sistema a partir de invariantes topológicos que permiten comparar diferentes sistemas que parecen similares y determinar si topológicamente son equivalentes.

## **6.2 DESARROLLOS FUTUROS:**

Entre los desarrollos futuros que siguen a este trabajo se pueden citar:

Utilización de topología combinatoria en la planificación y optimización de sistemas de tercera generación.

Utilización de q-análisis en la optimización de sistemas CDMA de segunda generación en servicio actualmente.

Utilizar el q-análisis para determinar el impacto que puede tener el incremento o disminución en la potencia del canal piloto sobre la capacidad del sistema en forma dinámica. Es decir, mantener la capacidad del sistema ante fluctuaciones del tráfico aumentando o disminuyendo la potencia del canal piloto en la celda afectada y las vecinas a partir del análisis del vector de estructura.

Emplear el q-análisis para analizar dinámicamente el comportamiento de un sistema CDMA tanto en *up-link* como en *down-link*, de tal forma que se pueda predecir algún desbalance de capacidad a partir de parámetros como SIR ó BER.

Extender el uso de q-análisis introduciendo el concepto de conexión de Galois en el análisis de capacidad.

Utilización de invariantes topológicos que permitan no solo determinar la existencia de relaciones vía solapamiento entre celdas, sino la influencia del grado de solapamiento en la capacidad.

## BIBLIOGRAFÍA

1. LEWIS T.G and SMITH B.J, 1.979, "Computer principles of modeling and simulation". Houghton Mifflin Company, Dallas, US., 393 p. ISBN: 0-395-27143-6.
2. GILHOUSEN, K., I. JACOBS, R.PADOVANI, A.VITERBI, L.WEAVER, and C. WHEATLEY, III, 1991, "On the capacity of a cellular CDMA system", IEEE Trans. On VT, Vol.40, No. 2, 303-312
3. CARDONA N, JUAN L. y REIG J., 1.996, "Sistemas de Radiocomunicación: Planificación mediante sistemas de información geográfica". Mundo Electrónico, N°267, pp 47-51
4. RAPPAPORT T. S., 1.996, "Wireless Communications: Principles and Practice", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, US
5. LEE W.C.Y, 1997, "Mobile Communications Engineering", McGraw-Hill, New York, US
6. JUNG P, Baier W and SEIL A, 1993, "Advantages of CDMA and Spread Spectrum Techniques over FDMA and TDMA in cellular Mobile Radio Applications", IEEE Trans. On VT, 42, N°3, 357-364
7. VITERBI A and VITERBI A, 1993, "Elang Capacity of a Power Controlled CDMA System", IEEE JSAC, 11, N°6, 892-900
8. ENG T and MILSTEIN L.B, 1994, "Comparison of Hybrid FDMA/CDMA Systems in Frequency Selective Rayleigh Fading", IEEE JSAC, 12, N°5, 938-951
9. JALALI A and MERMELSTEIN P, 1994, "Effects of Diversity, Power Control, and Bandwidth on the Capacity of Microcellular CDMA Systems", IEEE JSAC, 12, N°5, 952-961
10. Hass Z, Winters J and Johnson D, 1997, "Simulation Results of the Capacity of cellular Systems", IEEE Trans. on VT, 46, N°4, 805-817
11. DAHLMAN E et. al. 1998, "UMTS/IMT-2000 Based on wideband CDMA", IEEE CommMag, 36, 70-80
12. EWERBRING, Farjh, J. And GRANZOW W, 1997, "Performance Evaluation of a Wideband Testbed Based on CDMA", Proc. VTC'97, Phoenix, AZ, US
13. HOLMA, Harri and TOSKALA, Antti (editors). "WCDMA for UMTS". Chichester: John Wiley & Sons, 2.000, 317p.. ISBN: 0-471-72051-8
14. SUNDELIN M, GRANZOW W And OLOFSSON H, 1998, "A Test System for Evaluation of the W-CDMA technology", Proc. VTC'98, Ottawa, Canada
15. HOPPE, R.BUDDENDICK, G and LANSDTORFER, F.M. "Dynamic Simulator for Studying WCDMA Radio Network Performance".
16. SAMPATH, Ashwin, MANDAYARN, Narayan B and HOLTZMAN, Jack. "Erlang Capacity of a Power Controlled Integrated Voice and Data CDMA System", Proc. VTC'97, Phoenix, AZ, US.
17. ZORZI, Michele. On the Analytical Computation of the Interference Statistics with Applications to the Performance Evaluation of Mobile Radio Systems. IEEE Transactions on Communications, vol.45, No.1, January 1997.

18. PAXSON, Vern and FLOYD, Sally. "Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling" IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 3 No.3, June 1995, pp.226-244.
19. DAS, Kaushik and MORGERA, Salvatore D. Interference and SIR in Integrated Voice/Data Wireless DS-CDMA Networks- A Simulation Study. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.15, No.8, October 1997.
20. ADACHI, Fumiyuki; SAWAHASHI, Mamouru and SUDA, Hirohito. Promising Techniques to Enhance Radio Link Performance of Wideband Wireless Access Based on DS-CDMA. IEICE Transactions. Fundamentals. Vol. E81-A, No.11, November 1998
21. ZHOU, Jie, ONOZATO, Yoshikuni and YAMAMOTO, Ushio. "On the Capacity and Outage Probability of a CDMA Hierarchical Mobile System with Perfect/Imperfect Power Control and Sectorization. IEICE Transactions Fundamentals, Vol.E82-A No.7, July 1999.
22. KOO, Inzo, et al. "Analysis of Erlang Capacity for the Multimedia DS-CDMA Systems". IEICE Transactions Fundamentals, vol.E82-A, No.5, May 1999
23. HASHEM, Bassam and SOUSA, Elvino S. "Reverse Link Capacity and Interference Statistics of a Fixed-Step Power Controlled DS/CDMA System Under Slow Multipath Fading" IEEE Transactions on Communications, vol.47, No.12, December 1999.pp.1.905-1.912
24. GLISIC, Savo and PIRINEN, Pekka. "Wideband CDMA Network Sensitivity Function". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.17, No.10, October 1999.
25. BOCHE, Holger and JUGL, Enrico. "Review of Viterbi's Model Estimating the Capacity of CDMA Based Mobile Systems". IEICE Transactions Communications. Vol.E84-B, No.12, December 2001.pp 3212-3217
26. STELLAKIS, H. et al. "Reverse Link Performance of Wireless Local Loop CDMA Networks". IEEE Communications Letters, Vol.4, No.2, February 2000
27. LYU, Dugin, SUDA, Hirohito and ADACHI, Fumiyuki. "Evaluation of Reverse-Link Capacity of a DS-CDMA System with Power Control and Diversity Reception". IEICE Transactions Communications, Vol.E84-B, No.2, February 2001.
28. HANLY, Stephen. "An algorithm for Combined Cell-Site Selection and Power Control to Maximize Cellular Spread Spectrum Capacity". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.13, No.7, September 1995,pp. 1333-1340.
29. BARCELO, Helene, KRAMER, Xenia, LAUBENBACHER, Reinhard and WEAVER, Christopher. "Foundations of a Connectivity Theory for Simplicial Complexes". Adv. in Applied Math.
30. KRAETZL, M. LAUBENBACHER, R. and GASTON, M.E. "Combinatorial and Algebraic Approaches to Network Analysis". January, 2001.
31. PROAKIS, John G. "Digital Communications". New York, Mac Graw-Hill: 2001, Fourth Edition, 1002p.
32. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-22.100v.3.4.0. UMTS Phase 1 Release 99. 1999, 16p.
33. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-23.002v. 3.1.0. Network Architecture, Release 99, 1999, 27p

34. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-25.331v4.30. Radio Resource Control (RRC), Protocol Specification. Release 4 , 2001. 822p.
35. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-25.201v5.0.0. Physical Layer- General description (release 5). 2001, 10p.
36. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-25.211. Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels (FDD). Release 99, 2000, 40p.
37. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-25.213v5.0.0. Spreading and Modulation (FDD). Release 5, 2001.
38. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-25.214v4.3.0. Physical Layer Procedures (FDD). Release 4. 2001. 53 p.
39. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-25.2221v5.0.0. Physical Channels and Mapping of Transport Channels onto Physical Channels (TDD). Release 5. 2001. 46p.
40. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-25.401v5.1.0. UTRAN Overall Description. Release 5. 2001. 38p.
41. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-21.103v1.0.0. 3rd Generation mobile system Release 5 specifications. 2001. 9p.
42. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-23.002v.5.5.0. Network architecture. Release 5. 2001. 48p.
43. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-23.101v.4.0.0. General UMTS Architecture. Release 4, 2001, 14p.
44. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-25.104v.5.1.0. UTRA (BS) FDD; Radio transmission and Reception. Release 5, 2001, 49p.
45. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-25-922
46. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS-21.101v.3.0.1. 3rd Generation mobile system Release 1999 Specifications. Release 99, 2000, 16p.
47. 3rd Generation Partnership Project 2. 3GPP2 C.S0002-A. Physical Layer Standard for CDMA2000 Spread Spectrum Systems. Release A. Version 6. 2002, 457p.
48. 3rd Generation Partnership Project 2. 3GPP2 C.S0010-A. v.1.0. Recommended Minimum Performance Standards for CDMA2000 Spread Spectrum Systems. Release A. 2001. 155p.
49. MUNKRES, James R. "Elements of Algebraic Topology". Reading: Addison-Wesley, 1.997 pp.1-129.
50. LIBERTI, Joseph C. and RAPPAPORT, Theodore S. "Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA applications". Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. pp 2-79.
51. JANSEN, Michael G. and PRASAD, Ramjee. "Capacity, Throughput, and Delay Analysis of a Cellular DS CDMA System With Imperfect Power Control and Imperfect Sectorization". IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.44, No.1, February 1995, pp.67-75
52. NEWSON, Paul and HEATH, Mark R. "The Capacity of a Spread Spectrum CDMA System for Cellular Mobile Radio with Consideration of System Imperfections". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.12, No.4, May 1994, pp.673-683

53. LIBERTI, Joseph C. and RAPPAPORT, Theodore S. "Analytical Results for Capacity Improvements in CDMA". IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.43, No.3, August 1994, pp.680-690
54. FISHWICK, Paul A. "Simulation Model Design and Execution". Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995. 441p.
55. VEERAVALLI, Venugopal and SENDONARIS, Andrew. "The Coverage-Capacity Tradeoff in Cellular CDMA Systems". IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.48, No.5, September 1999, pp. 1443-1450.
56. LANGER, Johan and LARSSON, Gwenn. "CDMA-2000 – A World view" Ericsson Review No.3, 2001, pp.150-158.
57. ETEMAD, Kamran. "Enhanced Random Access and Reservation Scheme in CDMA-2000". IEEE Personal Communications, april 2001. pp.30-36
58. HANLY, Stephen and MATHAR, Rudolf. "On the Optimal Base Station Density for CDMA Cellular Networks". University of Melbourne, Technical Report. 28p.
59. OJANPERA, Tero, and PRASAD, Ramjee, "Wideband CDMA for Third Generation Mobile Communications", London: Artech House, 1998
60. FANTACCI, Romano, and NANNICINI, Saverio. "Multiple Access Protocol for Integration of Variable Bit Rate Multimedia Traffic in UMTS/IMT-2000 Based on Wideband CDMA". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 18 No.8, AUGUST 2000
61. TRABELSI, C. and YONGAÇOGLU, A. "Bit Error Rate performance for asynchronous DS-CDMA over Multipath fading channels" IEE Proceedings Communications, Vol.42, No.5, October 1995.
62. WANG, J. "Cellular CDMA Overlay systems". IEE Proc. –Commun., Vol. 143, No.6, December 1996
63. CHEN, X.H. "Adaptive traffic-load shedding and its capacity gain in CDMA cellular systems". IEE Proc.-Commun., Vol. 142, No. 3, June 1995
64. KIM, D.H., LEE, D.D., KIM, H.J. and WANG, K.C. "Capacity Analysis of Macro/Microcellular CDMA with Power Ratio Control and Tilted Antenna" IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 49, No.1, January 2000, pp.28-34
65. *Tonguz, O.K.; Wang, M.M.* "Cellular CDMA networks impaired by Rayleigh fading: system performance with power control" IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 43, No.3, August 1994
66. KAWAHARA, Toshiro and MATSUMOTO, Tadashi. "Joint Decorrelating Multiuser Detection and Channel Estimation in Asynchronous CDMA Mobile Communications Channels" IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 44, No.3, August 1995
67. ALENKAR, Marcelo S. And BLAKE, Ian F. "The Capacity for a Discrete-State Code Division Multiple Access Channel". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 12, No.5, June 1994, pp. 925-937
68. TUTSCHKU, Kurt. "Interference Minimization using automatic design of cellular communication networks" IEEE Vehicular technology Conference, 1998, pp.634-638.
69. CALEGARI, P., GUIDEC, F., KUONEN, P. and WAGNER, D. "GENETIC APPROACH TO RADIO NETWORK OPTIMIZATION FOR MOBILE SYSTEMS" IEEE Vehicular Technology Conference, 1997.

70. CHAMARET, B. JOSSELIN, S., KUONEN, P. PIZARROSO, M., SALAS-MANZANEDO, B., UBEDA, S. And WAGNER, D. "RADIO NETWORK OPTIMIZATION UIT MAXIMUM INDEPENDENT SET SEARCH" IEEE Vehicular Technology Conference, 1997
71. WRIGHT, Margaret. "OPTIMIZATION METHODS FOR BASE STATION PLACEMENT IN WIRELESS APPLICATIONS" IEEE Vehicular Technology Conference, 1998.
72. LEE, Chae Y. and KANG, Hyon G. "Cell Planning with Capacity Expansion in Mobile Communications: A Tabu Search Approach" IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.49, No. 5, September 2000
73. HUANG, Xuemin. "Automatic Cell Planning for Mobile Network Design: Optimization Models and Algorithms" Ph.D. Dissertation, University of Karlsruhe, 2001
74. BÜHLER, Hermann. "RSSUS – Reference System Scenario for UMTS Simulations Based on a Real World Environment" COST-273 TD(02) 162, Lisboa, Portugal, September 19-20, 2002.
75. COST 231 Final Report. "DigitalLand Mobile Radio Communications: Towards Future Generation Systems". *COST Telecom Secretariat, European Commission, Brussels, Belgium, 1999*
76. UMTS Forum, Report #5: Minimum spectrum demand per public terrestrial UMTS operator in the initial phase", 8 september 1998.
77. CORREIA, Luis M. "Wireless Flexible Personalised Communications, COST 259: European Co-operation in Mobile Radio Research". Chichester: Wiley, 2001
78. KIM, SPNG Won, JEONG, Dong Geun, JEON, Wha Sok and CHOI, Chong-Ho. Forward Link Performance of Combined Soft and Hard Handoff in Multimedia CDMA Systems. IEICE Transactions On Communications, Vol.E85-B, No.7, July 2002.
79. HERNANDO RÁBANOS , Jose María, LLUCH MESQUIDA , Cayetano (*Coordinadores*). Comunicaciones móviles de tercera generación (vols 1,2). Editorial Telefónica Móviles España. 2000.
80. SAUNDERS, Simon and BONAR, F.R. "Prediction of Mobile Radio Wave Propagation Over Buildings of Irregular Heights and Spacings". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.42, No. 2, February 1994, pp. 137-144

## **ANEXO A: PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA TESIS**

1. Un modelo de simulación para comparar capacidad en sistemas TDMA y CDMA en entornos microcelulares. En: Primera Jornada regional de Investigación y desarrollo en telecomunicaciones (JIDTEL), Medellín, abril de 1.999
2. Análisis de capacidad en sistemas CDMA empleando herramientas de planificación mediante GIS. En:Memorias del XIV congreso nacional y V andino de telecomunicaciones, Cartagena, Octubre de 1.999
3. Análisis de capacidad en sistemas CDMA empleando herramientas de planificación mediante GIS, versión modificada. En: Revista Colombiana de Telecomunicaciones – Cintel, vol.7 No.21. Diciembre – Marzo de 2000.
4. Cardona, N. And Navarro A. W-CDMA CAPACITY ANALYSIS USING GIS BASED PLANING TOOLS AND MATLAB SIMULATION. IEE 3G2000, London, march 2000.
5. Cardona, Narcís and Navarro, Andrés. CAPACITY ANALISYS IN CDMA SYSTEMS USING GIS PLANNING TOOLS. Eurocomm 2000, Munich, april 2000.
6. Cardona, Narcís and Navarro, Andrés. CAPACITY ANALISYS IN CDMA SYSTEMS USING GIS BASED PLANNING TOOLS. 3Gwireless 2000, San Francisco June 2000.
7. Cardona, Narcís and Navarro, Andrés. A Simulation Model for CDMA and W-CDMA Capacity Evaluation Using GIS based Planning Tools. ICT-2000, Acapulco, May 2000.
8. Cardona, Narcís y Navarro, Andrés. Un modelo de simulación para análisis de capacidad en sistemas CDMA usando herramientas de planificación basadas en GIS.En: Jornada regional de Investigación y desarrollo en telecomunicaciones (JIDTEL), Medellín, agosto de 2000
9. Cardona, Narcís y Navarro, Andrés. Modelo de simulación para análisis de capacidad en sistemas W-CDMA usando herramientas de planificación basadas en GIS y MATLAB En:Memorias del XV congreso nacional y VI andino de telecomunicaciones, Cartagena, Octubre de 2000.



10. Cardona, Narcís and Navarro, Andrés. SOME PARAMETERS THAT AFFECT WCDMA CAPACITY ANALYSIS RESULTS USING GIS BASED SIMULATION. 2001 Virginia Tech Symposium on Wireless Personal Communications. June 6-8 2001, Blacksburg, Virginia.
11. Cardona, N.; Navarro, A. Some parameters that affect CDMA capacity analysis. Results using GIS based simulation . 3G Mobile Communication Technologies, 2001. Second International Conference on (Conf. Publ. No. 477) , 2001, Page(s): 401 –406
12. Cardona, Narcís and Navarro, Andrés. THE INFLUENCE OF PROPAGATION MODEL AND SECTORIZATION OVER WCDMA CAPACITY. IASTED Communication Systems and Networks (CSN 2002), September 9 –12 2002, Málaga. Spain.
13. García Ariza, Paolo, Horteaga, Homero, NAVARRO, Andrés y Rodríguez, Alexis. “Efectos del terreno en la propagación electromagnética en entornos urbanos sobre la región andina, usando el modelo Cost-231-Walfisch-Ikegami y herramientas de planificación basadas en GIS”. Sistemas&Telemática. Vol. 1, No.1, enero-junio de 2003, pp. 13-33.
14. García, A.P. Horteaga, H. Navarro, A. and Rodríguez, A.H. Effect of terrain on electromagnetic propagation in urban environments on the Andean region, using the COST 231- Walfisch-Ikegami model and GIS planning tools. Twelfth International Conference on Antennas and Propagation, March 31 – April 3rd 2003, Exeter, UK.