

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

Comunicaciones WCDMA por satélite

Raquel Fernández Llorente

Febrero 2010

Comunicaciones WCDMA por satélite

AUTOR: Raquel Fernández Llorente

TUTOR: Bazil Taha Ahmed

Grupo de Sistemas de Radiocomunicación y Comunicaciones Ópticas

Dpto. de Ingeniería Informática

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Febrero de 2010

Agradecimientos

En primer lugar quería agradecer a mi tutor, Bazil, por haberme dejado realizar este proyecto, servirme de ayuda en todo momento y darme ánimos para por fin acabarlo.

A los profesores de la UAM, en especial a Chema, porque me han guiado cuando lo necesitaba.

A mi familia, mis padres Manuel y Vicenta, que siempre me han dado ánimos para hacer todo lo que me proponga, me han guiado como mejor sabían, apoyado incondicionalmente, hacerme todo más fácil y desvivido por mí. A mi hermano Manolo, *el Tate*, porque al igual que mis padres, me ha apoyado y defendido en todo lo que hago.

A mis abuelos, que ya mayores, quieren ver cómo su nieta crece.

A mis amigas de toda la vida, que siempre han estado atentas a todo lo que necesitaba y me han apoyado sin juzgar.

A mis triscochitas por darme tantos ánimos.

A mis amigos de clase, mucho más que compañeros, que me han hecho reír durante más de 5 años, sin duda es lo mejor que me llevo de todos estos años, sin vosotros esto no hubiera sido lo mismo.

A mi florecilla *Candy* que siempre, siempre, siempre mira el lado bueno de las cosas y me lo contagia.

A Sebas, por querer estar siempre junto a mí sin importar el resto. Por su paciencia, sus ánimos, su ayuda, y sobretodo por quererme tanto. Contigo siempre seré la gorda más feliz del mundo.

Gracias a todas las personas que de alguna forma han colaborado en este proyecto, con su ayuda ha salido adelante.

Resumen:

Hoy en día las redes de comunicaciones tienden a la integración de toda clase de servicios mediante una red global de comunicaciones que permita al usuario acceder desde cualquier punto del planeta en el momento que lo desee. Las comunicaciones por satélite permiten telefonía celular y radiolocalización mundial en cualquier parte del planeta a través de aparatos personales portátiles. Permiten también comunicar lugares muy alejados o previamente inaccesibles transmitiendo sorprendentes cantidades y variedades de información a alta velocidad.

El objetivo de este proyecto es estudiar en detalle la capacidad de la tecnología WCDMA, que permite velocidades de descarga de hasta 2Mbps, empleando el componente satélite, en algunos casos proporcionando cobertura global, y en otros, cobertura localizada en una zona determinada.

El análisis se realizará con distintos modelos de satélites de comunicaciones, estos son LEO, MEO y GEO, cada uno con distintas características. Se variarán distintos parámetros para estudiar su influencia en la capacidad del sistema.

Palabras clave

- ✓ WCDMA
- ✓ UMTS
- ✓ Satélite de comunicaciones
- ✓ LEO
- ✓ MEO
- ✓ GEO
- ✓ Sistemas limitados por interferencia
- ✓ Capacidad
- ✓ Enlace ascendente
- ✓ Enlace descendente
- ✓ Servicio de voz
- ✓ Servicio de datos

Abstract:

Nowadays, the communication networks tend to integrate all kind of services by means of a global communication network. This network will allow the user to access from any part of the world at anytime. Satellite communications allow, by means of personal portable devices, mobile phone cellular networks and world radiolocalization anywhere. It is also possible to communicate very remote or previously inaccessible places by transmitting amazing high speed quantities and varieties of information.

The aim of this project is to study the capacity of WCDMA technology in detail, which allows up to 2Mbps bit rates with the satellite component. Sometimes it will provide global coverage and others coverage in a certain zone.

The analysis will be performed by different models of communication satellites, LEO, MEO and GEO, each one with different characteristics. Some parameters will be changed to study its influence in the system capacity.

Key words:

- ✓ WCDMA
- ✓ UMTS
- ✓ Communicatios Satellite
- ✓ LEO
- ✓ MEO
- ✓ GEO
- ✓ Interferente limited system.
- ✓ Capacity
- ✓ Uplink
- ✓ Downlink
- ✓ Voice services
- ✓ Data services

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | | |
|-----------|---|----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 | MOTIVACIÓN | 1 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 2 |
| 1.3 | ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA | 3 |
| 2 | ESTADO DEL ARTE | 5 |
| 2.1 | SISTEMA UMTS | 5 |
| 2.1.1 | <i>Evolución de las interfaces radio</i> | 6 |
| 2.1.2 | <i>Arquitectura de la red UMTS</i> | 6 |
| 2.1.3 | <i>Bandas de frecuencia</i> | 7 |
| 2.1.4 | <i>Acceso a radio</i> | 8 |
| 2.1.5 | <i>Tipos de canales</i> | 10 |
| 2.1.6 | <i>Prestaciones</i> | 10 |
| 2.2 | TECNOLOGÍA WCDMA | 11 |
| 2.2.1 | <i>Espectro ensanchado</i> | 12 |
| 2.2.2 | <i>Ventajas</i> | 12 |
| 2.2.3 | <i>Especificaciones técnicas de la interfaz radio</i> | 14 |
| 2.2.4 | <i>Aplicaciones</i> | 14 |
| 2.2.5 | <i>Factores del sistema WCDMA interesantes para nuestro estudio</i> | 15 |
| 2.2.5.1 | Características del medio de propagación | 15 |
| 2.2.5.2 | Canal Piloto | 15 |
| 2.2.5.3 | Efecto de la movilidad de los terminales | 16 |
| 2.2.5.4 | Control de potencia | 16 |
| 2.2.5.5 | Traspaso con continuidad | 17 |
| 2.2.6 | <i>Sistemas limitados por interferencia</i> | 19 |
| 2.2.6.1 | Planificación radio | 20 |
| 2.2.6.2 | Cálculo de la capacidad en sistemas WCDMA | 21 |
| 2.2.6.2.1 | Capacidad para el enlace ascendente | 22 |
| 2.2.6.2.2 | Capacidad para el enlace descendente | 30 |
| 2.2.6.2.3 | Capacidad total | 37 |
| 2.3 | SISTEMAS POR SATÉLITE | 38 |
| 2.3.1 | <i>Función actual y ventajas</i> | 40 |
| 2.3.2 | <i>¿Qué es un satélite de comunicaciones?</i> | 40 |
| 2.3.3 | <i>Elementos de un sistema satelital</i> | 41 |
| 2.3.4 | <i>Diseño de un sistema de comunicaciones</i> | 43 |
| 2.3.5 | <i>Tipos de órbitas</i> | 43 |
| 2.3.6 | <i>Diversidad de satélites</i> | 44 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.3.7 | <i>Bandas de frecuencia para satélites</i> | 45 |
| 2.4 | DESCRIPCIÓN DE NUESTRO SISTEMA | 46 |
| 2.4.1 | <i>Estudio de los distintos escenarios</i> | 46 |
| 2.4.2 | <i>Arquitectura del sistema</i> | 46 |
| 2.4.3 | <i>Bandas de frecuencia utilizadas</i> | 48 |
| 2.4.4 | <i>Descripción de la cobertura del sistema</i> | 48 |
| 2.4.5 | <i>Superficie terrestre</i> | 50 |
| 2.4.6 | <i>Comprobación Line of Sight</i> | 50 |
| 2.4.7 | <i>Número de satélites</i> | 52 |
| 2.4.8 | <i>Relación entre el número de usuarios y el número de satélites</i> | 53 |
| 3 | SISTEMAS WCDMA CON SATÉLITES LEO | 55 |
| 3.1 | INTRODUCCIÓN | 55 |
| 3.2 | PRINCIPALES SERVICIOS | 57 |
| 3.3 | DATOS DEL SISTEMA | 58 |
| 3.3.1 | <i>Diagramas de radiación de la antena del satélite</i> | 58 |
| 3.3.2 | <i>Parámetros utilizados en cada servicio bajo estudio</i> | 61 |
| 3.3.2.1 | Datos para el servicio de voz..... | 61 |
| 3.3.2.2 | Datos para el servicio de datos | 62 |
| 3.4 | SIMULACIONES | 64 |
| 3.4.1 | <i>Requisitos de la constelación</i> | 64 |
| 3.4.1.1 | Número de satélites | 64 |
| 3.4.1.2 | Posibles constelaciones | 65 |
| 3.4.1.3 | Constelación de 37 celdas por satélite..... | 65 |
| 3.4.2 | <i>Resultado de los servicios estudiados</i> | 70 |
| 3.4.2.1 | Servicio de voz..... | 70 |
| 3.4.2.1.1 | CASO GENERAL. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia | 70 |
| 3.4.2.1.2 | CASO 1. Variación de la capacidad ante distintos valores de la altura del satélite | 75 |
| 3.4.2.1.3 | CASO 2. Variación de la capacidad ante distintos valores de ganancia mínima de la antena del satélite | 77 |
| 3.4.2.1.4 | CASO 3. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia y ganancia mínima del sistema | 80 |
| 3.4.2.2 | Servicio de datos | 82 |
| 3.4.2.2.1 | CASO GENERAL. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia | 82 |
| 3.4.2.2.2 | CASO 1. Variación de la capacidad ante distintos valores de la altura del satélite | 86 |
| 3.4.2.2.3 | CASO 2. Variación de la capacidad ante distintos valores de ganancia mínima del sistema | 87 |
| 3.4.2.2.4 | CASO 3. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia y ganancia mínima del sistema | 89 |
| 3.4.2.3 | Relación entre la capacidad de voz y datos | 91 |
| 3.4.2.3.1 | CASO 1. Comparativa lineal | 91 |
| 3.4.2.3.2 | CASO 2. Comparativa real | 93 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 3.4.2.4 | Capacidad total..... | 93 |
| 3.5 | CONCLUSIONES | 94 |
| 3.5.1 | <i>Mejor opción</i> | 95 |
| 3.6 | CASO FUTURO: CONSTELACIÓN DE 91 CELDAS POR SATÉLITE..... | 97 |
| 3.6.1 | <i>Constelación de 91 celdas.</i> | 97 |
| 3.6.2 | <i>Resultado de los servicios estudiados.</i> | 100 |
| 3.6.2.1 | Servicio de voz..... | 100 |
| 3.6.2.1.1 | CASO GENERAL. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia..... | 100 |
| 3.6.2.1.2 | CASO 1. Variación de la capacidad ante distintos valores de la altura del satélite..... | 101 |
| 3.6.2.1.3 | CASO 2. Variación de la capacidad ante distintos valores de ganancia mínima de la antena del satélite | 101 |
| 3.6.2.1.4 | CASO 3. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia y ganancia mínima del sistema | 102 |
| 3.6.2.1.5 | CASO 4. Variación de la capacidad ante distintos valores del factor de ruido del sistema.... | 102 |
| 3.6.2.2 | Servicio de datos | 103 |
| 3.6.2.2.1 | CASO GENERAL. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia..... | 103 |
| 3.6.2.2.2 | CASO 1. Variación de la capacidad ante distintos valores de la altura del satélite..... | 104 |
| 3.6.2.2.3 | CASO 2. Variación de la capacidad ante distintos valores de ganancia mínima del sistema . | 104 |
| 3.6.2.2.4 | CASO 3. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia y ganancia mínima del sistema | 105 |
| 3.6.2.2.5 | CASO 4. Variación de la capacidad ante distintos valores del factor de ruido del sistema.... | 105 |
| 3.6.2.3 | Relación entre la capacidad de voz y datos | 105 |
| 3.6.2.4 | Capacidad total..... | 106 |
| 3.6.3 | <i>Conclusiones para los satélites LEO del futuro</i> | 107 |
| 3.6.3.1 | Mejor opción..... | 107 |
| 4 | SISTEMAS WCDMA CON SATÉLITES MEO..... | 109 |
| 4.1 | INTRODUCCIÓN | 109 |
| 4.2 | PRINCIPALES SERVICIOS..... | 111 |
| 4.3 | DATOS DEL SISTEMA..... | 111 |
| 4.3.1 | <i>Diagramas de radiación de la antena del satélite</i> | 111 |
| 4.3.2 | <i>Parámetros utilizados en cada servicio bajo estudio</i> | 114 |
| 4.3.2.1 | Datos para el servicio de voz..... | 114 |
| 4.3.2.2 | Datos para el servicio de datos | 114 |
| 4.4 | SIMULACIONES..... | 116 |
| 4.4.1 | <i>Requisitos de la constelación</i> | 116 |
| 4.4.1.1 | Número de satélites | 117 |
| 4.4.1.2 | Posibles constelaciones | 117 |
| 4.4.1.3 | Constelación de 37 celdas por satélite..... | 117 |
| 4.4.1.3.1 | Datos comunes para los distintos casos..... | 117 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.4.1.3.2 | CASO 1. MEO alto. Constelación de 9 satélites | 118 |
| 4.4.1.3.3 | CASO 2. MEO Medio. Constelación de 16 satélites..... | 121 |
| 4.4.1.3.4 | CASO 3. MEO Bajo. Constelación de 25 satélites | 125 |
| 4.5 | CONCLUSIONES | 128 |
| 5 | SISTEMAS WCDMA CON SATÉLITES GEO | 129 |
| 5.1 | INTRODUCCIÓN | 129 |
| 5.2 | PRINCIPALES SERVICIOS..... | 131 |
| 5.3 | SIMULACIONES..... | 131 |
| 5.3.1 | <i>Diagramas de radiación de la antena del satélite</i> | <i>132</i> |
| 5.3.2 | <i>Parámetros utilizados en cada servicio bajo estudio</i> | <i>134</i> |
| 5.3.2.1 | Datos para el servicio de voz..... | 134 |
| 5.3.2.2 | Datos para el servicio de datos | 135 |
| 5.3.3 | <i>Requisitos de la constelación.....</i> | <i>137</i> |
| 5.3.4 | <i>Resultado de los servicios estudiados.....</i> | <i>142</i> |
| 5.3.4.1 | Resultados para el servicio de voz..... | 142 |
| 5.3.4.1.1 | Caso general. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia | 143 |
| 5.3.4.1.2 | Caso 2.Variación de la capacidad ante distintos valores de ganancia de transmisión del terminal de usuario..... | 147 |
| 5.3.4.1.3 | Caso 3.Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia y ganancia de la antena de los terminales de usuario | 149 |
| 5.3.4.1.4 | Caso 3.Variación de la capacidad ante distintos valores del factor de ruido del sistema . | 151 |
| 5.3.4.2 | Resultados para el servicio de datos | 154 |
| 5.3.4.2.1 | Caso general. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia | 154 |
| 5.3.4.2.2 | Caso 2.Variación de la capacidad ante distintos valores de ganancia de transmisión del terminal usuario | 158 |
| 5.3.4.2.3 | Caso 3.Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia y ganancia de transmisión del sistema | 160 |
| 5.3.4.2.4 | Caso 3.Variación de la capacidad ante distintos valores del factor de ruido del sistema . | 162 |
| 5.3.4.3 | Relación entre la capacidad de voz y datos | 164 |
| 5.3.4.3.1 | Caso 1. Comparativa lineal | 164 |
| 5.3.4.3.2 | Caso 4. Comparativa real | 165 |
| 5.4 | CONCLUSIONES | 166 |
| 5.4.1 | <i>Mejor opción</i> | <i>166</i> |
| 5.5 | EJEMPLO GEO AVIONES EUROPA..... | 168 |
| 5.5.1 | <i>Datos del sistema.....</i> | <i>169</i> |
| 5.5.2 | <i>Elección de radio de cobertura</i> | <i>169</i> |
| 5.5.3 | <i>Diseño del escenario</i> | <i>170</i> |
| 5.5.4 | <i>Estudio de la capacidad para distintas frecuencias</i> | <i>172</i> |
| 5.5.4.1 | Estudio para una frecuencia de 2 GHz. | 173 |
| 5.5.4.1.1 | Datos específicos para la banda de 2 GHz. | 173 |
| 5.5.4.1.2 | Diagrama de radiación de la antena del satélite | 174 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| 5.5.4.1.2.1 | Diagrama de radiación de la antena del satélite para 1.996 GHz | 174 |
| 5.5.4.1.2.2 | Diagrama de radiación de la antena del satélite para 2.186 GHz | 175 |
| 5.5.4.1.3 | Simulaciones para la banda de 2 GHz | 175 |
| 5.5.4.1.3.1 | Simulaciones en uplink | 175 |
| 5.5.4.1.3.2 | Simulaciones en downlink | 178 |
| 5.5.4.1.4 | Resultados comunes de la capacidad para uplink y downlink en 2 GHz | 180 |
| 5.5.4.1.4.1 | Resultados en uplink | 180 |
| 5.5.4.1.4.2 | Resultados en downlink | 180 |
| 5.5.4.1.5 | Conclusiones para 2 GHz | 180 |
| 5.5.4.2 | Estudio para una frecuencia de 4 GHz. | 181 |
| 5.5.4.2.1 | Datos específicos para la banda de 4 GHz. | 181 |
| 5.5.4.2.2 | Diagrama de radiación de la antena del satélite | 182 |
| 5.5.4.2.2.1 | Diagrama de radiación de la antena del satélite para 3.996 GHz | 182 |
| 5.5.4.2.2.2 | Diagrama de radiación de la antena del satélite para 4.186 GHz en downlink | 182 |
| 5.5.4.2.3 | Simulaciones para la banda de 4 GHz | 183 |
| 5.5.4.2.3.1 | Simulaciones en uplink | 183 |
| 5.5.4.2.3.2 | Simulaciones en downlink | 186 |
| 5.5.4.2.4 | Resultados comunes de la capacidad para uplink y downlink en 4 GHz | 188 |
| 5.5.4.2.4.1 | Resultados en uplink | 188 |
| 5.5.4.2.4.2 | Resultados en downlink | 188 |
| 5.5.4.2.5 | Conclusiones para la banda de 4 GHz | 188 |
| 5.5.4.3 | Estudio para una frecuencia de 6 GHz. | 189 |
| 5.5.4.3.1 | Datos específicos para la banda de 6 GHz. | 189 |
| 5.5.4.3.2 | Diagrama de radiación de la antena del satélite | 190 |
| 5.5.4.3.2.1 | Diagrama de radiación de la antena del satélite para 5.996 GHz | 190 |
| 5.5.4.3.2.2 | Diagrama de radiación de la antena del satélite para 6.186 GHz | 190 |
| 5.5.4.3.3 | Simulaciones para la banda de 6 GHz | 191 |
| 5.5.4.3.3.1 | Simulaciones en uplink | 191 |
| 5.5.4.3.3.2 | Simulaciones en downlink | 194 |
| 5.5.4.3.4 | Resultados comunes de la capacidad para uplink y downlink en 6 GHz | 196 |
| 5.5.4.3.4.1 | Resultados en uplink | 196 |
| 5.5.4.3.4.2 | Resultados en downlink | 196 |
| 5.5.4.3.5 | Conclusiones para la banda de 6 GHz | 196 |
| 5.5.4.4 | Estudio para una frecuencia de 8 GHz. | 197 |
| 5.5.4.4.1 | Datos específicos para 8 GHz. | 197 |
| 5.5.4.4.2 | Diagrama de radiación de la antena del satélite | 198 |
| 5.5.4.4.2.1 | Diagrama de radiación de la antena del satélite para 7.996 GHz | 198 |
| 5.5.4.4.2.2 | Diagrama de radiación de la antena del satélite para 8.186 GHz | 198 |
| 5.5.4.4.3 | Simulaciones para la banda de 8 GHz | 199 |
| 5.5.4.4.3.1 | Simulaciones para en uplink | 199 |
| 5.5.4.4.3.2 | Simulaciones en downlink | 202 |
| 5.5.4.4.4 | Resultados comunes de la capacidad para uplink y downlink en 8 GHz | 204 |
| 5.5.4.4.4.1 | Resultados en uplink | 204 |
| 5.5.4.4.4.2 | Resultados en downlink | 204 |
| 5.5.4.4.5 | Conclusiones para la banda de 8 GHz | 204 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6 | CONCLUSIONES Y LÍNEAS ABIERTAS DE INVESTIGACIÓN | 207 |
| 6.1 | CONCLUSIONES FINALES | 207 |
| 6.2 | LÍNEAS ABIERTAS DE INVESTIGACIÓN..... | 209 |
| | REFERENCIAS | 211 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 213 |
| | GLOSARIO..... | 215 |
| | ANEXOS | 217 |
| | ANEXO A GRÁFICAS Y FIGURAS PARA EL SISTEMA LEO DE 91 CELDAS | 217 |
| | A.1 Gráficas del servicio de voz..... | 217 |
| | A.2 Gráficas del servicio de datos | 219 |
| | A.3 Gráficas de la comparativa entre voz y datos para LEO 91 | 221 |
| | ANEXO B TABLAS DEL EJEMPLO EUROPA | 222 |
| | B.1 Tablas comparativas de la capacidad en la banda de 2 GHz. | 223 |
| | B.1.1 Tabla de la capacidad en uplink | 223 |
| | B.1.2 Tabla de la capacidad en downlink | 224 |
| | B.2 Tablas comparativas de la capacidad en la banda de 4 GHz. | 225 |
| | B.2.1 Tabla de la capacidad en uplink | 225 |
| | B.2.2 Tabla de la capacidad en downlink | 226 |
| | B.3 Tablas comparativas de la capacidad en la banda de 6 GHz. | 227 |
| | B.3.1 Tabla de la capacidad en uplink | 227 |
| | B.3.2 Tabla de la capacidad en downlink | 228 |
| | B.4 Tablas comparativas de la capacidad en la banda de 8 GHz. | 229 |
| | B.4.1 Tabla de la capacidad en uplink | 229 |
| | B.4.2 Tabla de la capacidad en downlink | 230 |
| | ANEXO C CÓDIGO MATLAB | 231 |
| | C.1 Cálculo del Número de satélites para cobertura global según su altura..... | 231 |
| | C.2 Cálculo del Número de satélites para cobertura global según su radio de cobertura por haz para LEO 91 | 232 |
| | C.3 Ejemplo distancia LOS..... | 233 |
| | C.4 Ejemplo diagrama de radiación de la antena | 234 |
| | C.5 Ejemplo cálculo de la capacidad para servicios de voz en uplink..... | 235 |
| | C.6 Ejemplo cálculo de la capacidad para servicios de voz en downlink..... | 237 |
| | C.7 Ejemplo cálculo de la capacidad para servicios de datos en uplink..... | 240 |
| | C.8 Ejemplo cálculo de la capacidad para servicios de datos en downlink | 242 |
| | C.9 Comparativa servicios de voz frente a datos real | 244 |
| | ANEXO D PRESUPUESTO | 248 |
| | PLIEGO DE CONDICIONES | 249 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 2.1 INTERFACES RADIO DE IMT-2000 | 6 |
| FIGURA 2.2 ARQUITECTURA DE LA RED DE TELECOMUNICACIONES. | 7 |
| FIGURA 2.3 PROPUESTA DE ITU PARA LAS BANDAS DE FRECUENCIA DE IMT-2000..... | 8 |
| FIGURA 2.4 HANDOVER EN SATÉLITES DE ÓRBITA NO GEOESTACIONARIA. | 18 |
| FIGURA 2.5 PASO DE SINR A E_b/N_0 | 23 |
| FIGURA 2.6 GEOMETRÍA DE INTERFERENCIA EN SATÉLITES. | 24 |
| FIGURA 2.7 EFICIENCIA DE REUTILIZACIÓN DE FRECUENCIA PARA | 29 |
| FIGURA 2.8 CONCEPTO DE RANGO CELULAR. | 30 |
| FIGURA 2.9 GEOMETRÍA DE INTERFERENCIA EN DOWNLINK. | 32 |
| FIGURA 2.10 ARQUITECTURA DE LOS COMPONENTES TERRESTRE Y SATÉLITE DE UMTS | 39 |
| FIGURA 2.11 HUELLA DE UN SATÉLITE DE COMUNICACIONES. | 41 |
| FIGURA 2.12 UBICACIÓN DE ÓRBITAS DE SATÉLITES EN EL ESPACIO. | 44 |
| FIGURA 2.13 BANDAS DE FRECUENCIA PARA SATÉLITES. | 45 |
| FIGURA 2.14 ESTRUCTURA DEL SISTEMA SATÉLITE. | 47 |
| FIGURA 2.15 CLÚSTER DE 5 CORONAS MÁS LA CÉLULA CENTRAL. | 49 |
| FIGURA 2.16 CÁLCULO DE LA DISTANCIA LOS. | 49 |
| FIGURA 2.17 DESCRIPCIÓN DE LA DISTANCIA LINE OF SIGHT. | 50 |
| FIGURA 2.18 RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE SATÉLITES PARA COBERTURA GLOBAL Y SU ALTURA. | 52 |
| FIGURA 2.19 RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE SATÉLITES PARA COBERTURA GLOBAL Y EL RADIO DE LA CELDA. | 53 |
| FIGURA 3.1 SATÉLITE DE ÓRBITA DE BAJA ALTURA. | 55 |
| FIGURA 3.2 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DEL SATÉLITE LEO EN UPLINK... | 59 |
| FIGURA 3.3 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DEL SATÉLITE LEO EN DOWNLINK | 60 |
| FIGURA 3.4 COMPORTAMIENTO DE LA CAPACIDAD EN UN RANGO DE 100 A 700 KM. | 66 |
| FIGURA 3.5 CAPACIDAD Y RANGO DE RADIO DE COBERTURA PARA DISTINTAS ALTURAS | 67 |
| FIGURA 3.6 IMPRESIÓN DE LA COMPROBACIÓN DISTANCIA LOS. | 69 |
| FIGURA 3.7 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA EL SISTEMA LEO EN UPLINK. | 71 |
| FIGURA 3.8 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA EL SISTEMA LEO EN DOWNLINK. | 72 |
| FIGURA 3.9 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA ALTAS POTENCIAS EN UPLINK. | 73 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 3.10 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA ALTAS POTENCIAS EN DOWNLINK..... | 73 |
| FIGURA 3.11 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ DEL SISTEMA LEO SEGÚN LA ALTURA DEL SATÉLITE EN UPLINK. | 75 |
| FIGURA 3.12 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ DEL SISTEMA LEO SEGÚN LA ALTURA DEL SATÉLITE EN DOWNLINK. | 76 |
| FIGURA 3.13 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DEL SATÉLITE LEO EN UPLINK PARA DISTINTOS VALORES DE G_{MIN} | 77 |
| FIGURA 3.14 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DEL SATÉLITE LEO EN DOWNLINK PARA DISTINTOS VALORES DE G_{MIN} | 78 |
| FIGURA 3.15 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA EL SISTEMA LEO SEGÚN LA G_{MIN} EN UPLINK..... | 78 |
| FIGURA 3.16 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA EL SISTEMA LEO SEGÚN LA G_{MIN} EN DOWNLINK..... | 79 |
| FIGURA 3.17 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA EL SISTEMA LEO SEGÚN LA G_{MIN} Y LA POTENCIA EN UPLINK. | 80 |
| FIGURA 3.18 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA EL SISTEMA LEO SEGÚN LA G_{MIN} Y LA POTENCIA EN DOWNLINK. | 81 |
| FIGURA 3.19 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA EL SISTEMA LEO EN UPLINK. | 83 |
| FIGURA 3.20 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA EL SISTEMA LEO EN DOWNLINK. . | 83 |
| FIGURA 3.21 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA ALTAS POTENCIAS EN UPLINK. | 84 |
| FIGURA 3.22 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA ALTAS POTENCIAS EN DOWNLINK. | 85 |
| FIGURA 3.23 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS DEL SISTEMA LEO SEGÚN LA ALTURA DEL SATÉLITE EN UPLINK. | 86 |
| FIGURA 3.24 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS DEL SISTEMA LEO SEGÚN LA ALTURA DEL SATÉLITE EN DOWNLINK. | 87 |
| FIGURA 3.25 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA EL SISTEMA LEO SEGÚN LA G_{MIN} EN UPLINK..... | 88 |
| FIGURA 3.26 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA EL SISTEMA LEO SEGÚN LA G_{MIN} EN DOWNLINK..... | 89 |
| FIGURA 3.27 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA EL SISTEMA LEO SEGÚN LA G_{MIN} Y LA POTENCIA EN UPLINK. | 90 |
| FIGURA 3.28 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA EL SISTEMA LEO SEGÚN LA G_{MIN} Y LA POTENCIA EN DOWNLINK. | 90 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 3.29 RELACIÓN LINEAL DE LA CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ FRENTE A DATOS..... | 92 |
| FIGURA 3.30 RELACIÓN REAL DE LA CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ FRENTE A DATOS. | 93 |
| FIGURA 3.31 COMPORTAMIENTO DE LA CAPACIDAD EN UN RANGO DE 100 A 700 KM. ... | 98 |
| FIGURA 3.32 IMPRESIÓN DE LA COMPROBACIÓN DISTANCIA LOS..... | 99 |
| FIGURA 4.1 SATÉLITES DE ÓRBITA MEO. | 109 |
| FIGURA 4.2 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DEL SATÉLITE MEO EN UPLINK. | 112 |
| FIGURA 4.3 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DEL SATÉLITE MEO EN DOWNLINK. | 113 |
| FIGURA 4.4 CAPACIDAD DEL SISTEMA MEO ALTO A DISTINTAS ALTURAS_PARTE 1. ... | 119 |
| FIGURA 4.5 CAPACIDAD DEL SISTEMA MEO ALTO A DISTINTAS ALTURAS_PARTE 2. ... | 120 |
| FIGURA 4.6 CAPACIDAD DEL SISTEMA MEO MEDIO A DISTINTAS ALTURAS_PARTE 1. . | 122 |
| FIGURA 4.7 CAPACIDAD DEL SISTEMA MEO MEDIO A DISTINTAS ALTURAS_PARTE 2. . | 123 |
| FIGURA 4.8 CAPACIDAD DEL SISTEMA MEO MEDIO A DISTINTAS ALTURAS_PARTE 3. . | 124 |
| FIGURA 4.9 CAPACIDAD DEL SISTEMA MEO BAJO A DISTINTAS ALTURAS_PARTE 1..... | 126 |
| FIGURA 4.10 CAPACIDAD DEL SISTEMA MEO BAJO A DISTINTAS ALTURAS_PARTE 2... | 127 |
| FIGURA 5.1 SATÉLITES DE ÓRBITA GEOESTACIONARIA. | 129 |
| FIGURA 5.2 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DE LA CONSTELACIÓN GEO EN UPLINK..... | 132 |
| FIGURA 5.3 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DE LA CONSTELACIÓN GEO EN DOWNLINK. | 134 |
| FIGURA 5.4 CLÚSTER DE 2 CORONAS MÁS LA CENTRAL. | 138 |
| FIGURA 5.5 RADIO PEQUEÑO DE UN HEXÁGONO. | 138 |
| FIGURA 5.6 CAPACIDAD DE USUARIOS PARA UN RADIO DE TRABAJO DE 1200 A 2200 KM PARA DISTINTOS VALORES DE POTENCIA EN UPLINK. | 139 |
| FIGURA 5.7 CAPACIDAD DEL SISTEMA ACOTANDO EL RADIO DE COBERTURA. | 140 |
| FIGURA 5.8 IMPRESIÓN DE LA COMPROBACIÓN DISTANCIA LOS..... | 141 |
| FIGURA 5.9 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA EL SISTEMA GEO EN UPLINK..... | 143 |
| FIGURA 5.10 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA EL SISTEMA GEO EN DOWNLINK.... | 144 |
| FIGURA 5.11 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA ALTAS POTENCIAS EN UPLINK. | 145 |
| FIGURA 5.12 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA ALTAS POTENCIAS EN DOWNLINK... | 146 |
| FIGURA 5.13 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA EL SISTEMA GEO SEGÚN LA GTX DE LOS TERMINALES MÓVILES EN UPLINK. | 147 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 5.14 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA EL SISTEMA LEO SEGÚN LA GTX EN DOWNLINK..... | 148 |
| FIGURA 5.15 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA EL SISTEMA GEO ANTE DISTINTOS VALORES DE POTENCIA..... | 149 |
| FIGURA 5.16 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA EL SISTEMA GEO SEGÚN LA GTX Y LA POTENCIA EN DOWNLINK..... | 150 |
| FIGURA 5.17 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA EL SISTEMA GEO SEGÚN EL FACTOR DE RUIDO EN UPLINK..... | 152 |
| FIGURA 5.18 NÚMERO DE USUARIOS DE VOZ PARA EL SISTEMA GEO SEGÚN EL FACTOR DE RUIDO EN DOWNLINK..... | 153 |
| FIGURA 5.19 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA EL SISTEMA GEO EN UPLINK..... | 155 |
| FIGURA 5.20 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA EL SISTEMA GEO EN DOWNLINK. | 156 |
| FIGURA 5.21 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA ALTAS POTENCIAS EN UPLINK. ... | 157 |
| FIGURA 5.22 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA ALTAS POTENCIAS EN DOWNLINK. | 157 |
| FIGURA 5.23 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA EL SISTEMA GEO SEGÚN LA GTX EN UPLINK..... | 159 |
| FIGURA 5.24 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA EL SISTEMA GEO SEGÚN LA GTX EN DOWNLINK..... | 159 |
| FIGURA 5.25 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA EL SISTEMA GEO SEGÚN LA GTX Y LA POTENCIA EN UPLINK..... | 161 |
| FIGURA 5.26 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA EL SISTEMA GEO SEGÚN LA GTX Y LA POTENCIA EN DOWNLINK..... | 161 |
| FIGURA 5.27 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA EL SISTEMA GEO SEGÚN EL FACTOR DE RUIDO EN UPLINK..... | 163 |
| FIGURA 5.28 NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS PARA EL SISTEMA GEO SEGÚN EL FACTOR DE RUIDO EN DOWNLINK..... | 163 |
| FIGURA 5.29 RELACIÓN LINEAL DE LA CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ FRENTE A DATOS..... | 164 |
| FIGURA 5.30 RELACIÓN REAL DE LA CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ FRENTE A DATOS. | 165 |
| FIGURA 5.31 MAPA DE EUROPA..... | 168 |
| FIGURA 5.32 MAPA DE EUROPA DIVIDIDO EN CELDAS DE 500KM. DE RADIO DISPUESTAS EN 6 FILAS Y 7 COLUMNAS..... | 171 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 5.33 MAPA DE EUROPA DIVIDO EN CELDAS DE 500 KM. DE RADIO, DISPUESTAS EN LA MEJOR CONFIGURACIÓN PARA CUBRIR EL CONTINENTE. | 172 |
| FIGURA 5.34 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DEL SATÉLITE PARA 1.996 GHZ. | 174 |
| FIGURA 5.35 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DEL SATÉLITE PARA 2.186GHZ. | 175 |
| FIGURA 5.36 CAPACIDAD PARA UNA GANANCIA DEL AVIÓN DE 18 dB Y DISTINTOS VALORES DE POTENCIA PARA 1.996GHZ. | 176 |
| FIGURA 5.37 CAPACIDAD EN FUNCIÓN DE LA GANANCIA DE LA ANTENA DEL AVIÓN Y DE LA POTENCIA TRANSMITIDA EN 500KM DE RADIO CELULAR PARA 1.996GHZ. | 177 |
| FIGURA 5.38 CAPACIDAD PARA UNA GANANCIA DEL AVIÓN DE 18 dB Y DISTINTOS VALORES DE POTENCIA PARA 2.186GHZ. | 178 |
| FIGURA 5.39 CAPACIDAD EN FUNCIÓN DE LA GANANCIA DE LA ANTENA DEL AVIÓN Y DE LA POTENCIA TRANSMITIDA EN 500KM DE RADIO CELULAR PARA 2.186GHZ. | 179 |
| FIGURA 5.40 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DEL SATÉLITE PARA 3.996 GHZ. | 182 |
| FIGURA 5.41 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DEL SATÉLITE PARA 4.186 GHZ. | 183 |
| FIGURA 5.42 CAPACIDAD PARA UNA GANANCIA DEL AVIÓN DE 18 dB Y DISTINTOS VALORES DE POTENCIA PARA 3.996GHZ. | 184 |
| FIGURA 5.43 CAPACIDAD EN FUNCIÓN DE LA GANANCIA DE LA ANTENA DEL AVIÓN Y DE LA POTENCIA TRANSMITIDA EN 500KM DE RADIO CELULAR PARA 3.996 GHZ..... | 185 |
| FIGURA 5.44 CAPACIDAD PARA UNA GANANCIA DEL AVIÓN DE 18.4 dB Y DISTINTOS VALORES DE POTENCIA PARA 4.186GHZ. | 186 |
| FIGURA 5.45 CAPACIDAD EN FUNCIÓN DE LA GANANCIA DE LA ANTENA DEL AVIÓN Y DE LA POTENCIA TRANSMITIDA EN 500KM DE RADIO CELULAR PARA 4.186 GHZ..... | 187 |
| FIGURA 5.46 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DEL SATÉLITE PARA 5.996 GHZ. | 190 |
| FIGURA 5.47 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DEL SATÉLITE PARA 6.186 GHZ. | 191 |
| FIGURA 5.48 CAPACIDAD PARA UNA GANANCIA DEL AVIÓN DE 20 dB Y DISTINTOS VALORES DE POTENCIA PARA 5.996GHZ. | 192 |
| FIGURA 5.49 CAPACIDAD EN FUNCIÓN DE LA GANANCIA DE LA ANTENA DEL AVIÓN Y DE LA POTENCIA TRANSMITIDA EN 500KM DE RADIO CELULAR PARA 5.996 GHZ..... | 193 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 5.50 CAPACIDAD PARA UNA GANANCIA DEL AVIÓN DE 20 dB Y DISTINTOS VALORES DE POTENCIA PARA 6.186GHZ. | 194 |
| FIGURA 5.51 CAPACIDAD EN FUNCIÓN DE LA GANANCIA DE LA ANTENA DEL AVIÓN Y DE LA POTENCIA TRANSMITIDA EN 500KM DE RADIO CELULAR PARA 6.186 GHz..... | 195 |
| FIGURA 5.52 CAPACIDAD EN 5.996 GHz CON RESULTADOS COMPATIBLES CON DOWNLINK. | 196 |
| FIGURA 5.53 CAPACIDAD EN 6.186 GHz CON RESULTADOS COMPATIBLES CON UPLINK. | 196 |
| FIGURA 5.54 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DEL SATÉLITE PARA 7.996 GHz. | 198 |
| FIGURA 5.55 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DEL SATÉLITE PARA 8.186 GHz. | 199 |
| FIGURA 5.56 CAPACIDAD PARA UNA GANANCIA DEL AVIÓN DE 20 dB Y DISTINTOS VALORES DE POTENCIA PARA 7.996GHz. | 200 |
| FIGURA 5.57 CAPACIDAD EN FUNCIÓN DE LA GANANCIA DE LA ANTENA DEL AVIÓN Y DE LA POTENCIA TRANSMITIDA EN 400KM DE RADIO CELULAR PARA 7.996 GHz..... | 201 |
| FIGURA 5.58 CAPACIDAD PARA UNA GANANCIA DEL AVIÓN DE 20 dB Y DISTINTOS VALORES DE POTENCIA PARA 8.186GHz. | 202 |
| FIGURA 5.59 CAPACIDAD EN FUNCIÓN DE LA GANANCIA DE LA ANTENA DEL AVIÓN Y DE LA POTENCIA TRANSMITIDA EN 400KM DE RADIO CELULAR PARA 8.186GHz. | 203 |
| FIGURA 5.60 CAPACIDAD EN 7.996 GHz CON RESULTADOS COMPATIBLES CON DOWNLINK. | 204 |
| FIGURA 5.61 CAPACIDAD EN 8.186 GHz PARA DOWNLINK CON RESULTADOS COMPATIBLES CON UPLINK. | 204 |
| FIGURA A.1 CAPACIDAD DEL SISTEMA LEO 91 PARA EL SERVICIO DE VOZ_PARTE 1.... | 217 |
| FIGURA A.2 CAPACIDAD DEL SISTEMA LEO 91 PARA EL SERVICIO DE VOZ_PARTE 2... | 218 |
| FIGURA A.3 CAPACIDAD DEL SISTEMA LEO 91 PARA EL SERVICIO DE VOZ_PARTE 3... | 219 |
| FIGURA A.4 CAPACIDAD DEL SISTEMA LEO 91 PARA EL SERVICIO DE DATOS_PARTE 1 | 219 |
| FIGURA A.5 CAPACIDAD DEL SISTEMA LEO 91 PARA EL SERVICIO DE DATOS_PARTE 2 | 220 |
| FIGURA A.6 CAPACIDAD DEL SISTEMA LEO 91 PARA EL SERVICIO DE DATOS_PARTE 3 | 221 |
| FIGURA A.7 GRÁFICAS DE LA COMPARATIVA ENTRE VOZ Y DATOS PARA LEO 91 | 221 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 2.1 BANDAS DE FRECUENCIA PARA FDD..... | 9 |
| TABLA 2.2 BANDAS DE FRECUENCIA PARA TDD..... | 9 |
| TABLA 3.1 ESTUDIO DE LA CONSTELACIÓN PARA DISTINTAS ALTURAS. | 68 |
| TABLA 3.2 DATOS GENERALES..... | 69 |
| TABLA 3.3 DATOS ESPECÍFICOS CONSTELACIÓN LEO..... | 69 |
| TABLA 3.4 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE VOZ PARA DISTINTOS VALORES DE POTENCIA EN UPLINK Y DOWNLINK. | 72 |
| TABLA 3.5 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE VOZ PARA ALTAS POTENCIAS EN UPLINK Y DOWNLINK..... | 74 |
| TABLA 3.6 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE VOZ PARA DISTINTOS VALORES DE LA ALTURA DEL SATÉLITE EN UPLINK Y DOWNLINK..... | 76 |
| TABLA 3.7 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE VOZ PARA DISTINTOS VALORES DE LA GANANCIA MÍNIMA DEL SATÉLITE EN UPLINK Y DOWNLINK..... | 79 |
| TABLA 3.8 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE VOZ PARA DISTINTOS VALORES DE LA GANANCIA MÍNIMA DEL SATÉLITE (EN dB) Y LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN (EN W) EN UPLINK Y DOWNLINK. | 81 |
| TABLA 3.9 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE DATOS PARA DISTINTOS VALORES DE POTENCIA EN UPLINK Y DOWNLINK. | 84 |
| TABLA 3.10 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE DATOS PARA ALTAS POTENCIAS EN UPLINK Y DOWNLINK..... | 85 |
| TABLA 3.11 CAPACIDAD EN SERVICIO DE DATOS PARA DISTINTOS VALORES DE LA ALTURA DEL SATÉLITE EN UPLINK Y DOWNLINK..... | 87 |
| TABLA 3.12 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE DATOS PARA DISTINTOS VALORES DE LA GANANCIA MÍNIMA DEL SATÉLITE EN UPLINK Y DOWNLINK..... | 89 |
| TABLA 3.13 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE DATOS PARA DISTINTOS VALORES DE LA GANANCIA MÍNIMA DEL SATÉLITE (EN dB) Y LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN (EN W) EN UPLINK Y DOWNLINK. | 91 |
| TABLA 3.14 COMPARATIVA LINEAL. | 92 |
| TABLA 3.15 COMPARATIVA REAL. | 93 |
| TABLA 3.16 ESTUDIO DE LA CONSTELACIÓN PARA DISTINTAS ALTURAS. | 98 |
| TABLA 3.17 DATOS GENERALES..... | 99 |

| | |
|--|-----|
| TABLA 3.18 DATOS ESPECÍFICOS CONSTELACIÓN LEO..... | 99 |
| TABLA 3.19 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE VOZ PARA DISTINTOS VALORES DE POTENCIA EN UPLINK Y DOWNLINK. | 100 |
| TABLA 3.20 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE VOZ PARA VALORES DE POTENCIA EXCESIVAMENTE ALTOS EN UPLINK Y DOWNLINK. | 100 |
| TABLA 3.21 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE VOZ PARA DISTINTOS VALORES DE LA GANANCIA MÍNIMA DEL SATÉLITE EN UPLINK Y DOWNLINK. | 101 |
| TABLA 3.22 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE VOZ PARA DISTINTOS VALORES DE LA GANANCIA MÍNIMA DEL SATÉLITE (EN dB) Y LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN (EN W) EN UPLINK Y DOWNLINK. | 102 |
| TABLA 3.23 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE VOZ PARA DISTINTOS VALORES DEL FACTOR DE RUIDO EN UPLINK Y DOWNLINK. | 102 |
| TABLA 3.24 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE DATOS PARA DISTINTOS VALORES DE POTENCIA EN UPLINK Y DOWNLINK. | 103 |
| TABLA 3.25 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE DATOS PARA VALORES DE POTENCIA EXCESIVAMENTE ALTOS EN UPLINK Y DOWNLINK..... | 103 |
| TABLA 3.26 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE DATOS PARA DISTINTOS VALORES DE LA GANANCIA MÍNIMA DEL SATÉLITE EN UPLINK Y DOWNLINK. | 104 |
| TABLA 3.27 CAPACIDAD EN PROCESO DE DATOS PARA DISTINTOS VALORES DE LA GANANCIA MÍNIMA DEL SATÉLITE (EN dB) Y LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN (EN W) EN UPLINK Y DOWNLINK. | 105 |
| TABLA 3.28 CAPACIDAD DEL SERVICIO DE DATOS PARA DISTINTOS VALORES DEL FACTOR DE RUIDO EN UPLINK Y DOWNLINK. | 105 |
| TABLA 3.29 COMPARATIVA LINEAL. | 106 |
| TABLA 3.30 COMPARATIVA REAL. | 106 |
| TABLA 4.1 DATOS COMUNES..... | 117 |
| TABLA 4.2 TABLA COMPARATIVA DEL SISTEMA MEO ALTO A DISTINTAS ALTURAS..... | 121 |
| TABLA 4.3 TABLA COMPARATIVA DEL SISTEMA MEO MEDIO A DISTINTAS ALTURAS... | 124 |
| TABLA 4.4 TABLA COMPARATIVA DEL SISTEMA MEO BAJO A DISTINTAS ALTURAS. | 128 |
| TABLA 5.1 DATOS GENERALES..... | 139 |
| TABLA 5.2 CAPACIDAD EN DISTINTOS RADIOS DE COBERTURA. | 141 |
| TABLA 5.3 DATOS ESPECÍFICOS DE LA CONSTELACIÓN GEO..... | 141 |
| TABLA 5.4 DATOS DE LA CONSTELACIÓN GEO..... | 142 |

| | |
|---|-----|
| TABLA 5.5 CAPACIDAD EN PROCESO DE VOZ PARA DISTINTOS VALORES DE POTENCIA EN UPLINK Y DOWNLINK. | 145 |
| TABLA 5.6 CAPACIDAD EN PROCESO DE VOZ PARA ALTAS POTENCIAS EN UPLINK Y DOWNLINK..... | 146 |
| TABLA 5.7 CAPACIDAD EN PROCESO DE VOZ PARA DISTINTOS VALORES DE LA GANANCIA DE TRANSMISIÓN DEL SATÉLITE EN UPLINK Y DOWNLINK. | 148 |
| TABLA 5.8 CAPACIDAD EN PROCESO DE VOZ PARA DISTINTOS VALORES DE LA GANANCIA MÍNIMA DEL SATÉLITE Y LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN EN UPLINK Y DOWNLINK. | 151 |
| TABLA 5.9 CAPACIDAD EN PROCESO DE VOZ PARA DISTINTOS VALORES DEL FACTOR DE RUIDO EN UPLINK Y DOWNLINK. | 153 |
| TABLA 5.10 CAPACIDAD EN PROCESO DE DATOS PARA DISTINTOS VALORES DE POTENCIA EN UPLINK Y DOWNLINK. | 156 |
| TABLA 5.11 CAPACIDAD EN PROCESO DE DATOS PARA ALTAS POTENCIAS EN UPLINK Y DOWNLINK..... | 158 |
| TABLA 5.12 CAPACIDAD EN PROCESO DE DATOS PARA DISTINTOS VALORES DE LA GANANCIA MÍNIMA DEL SATÉLITE EN UPLINK Y DOWNLINK..... | 160 |
| TABLA 5.13 CAPACIDAD EN PROCESO DE DATOS PARA DISTINTOS VALORES DE LA GANANCIA DE TRANSMISIÓN DEL SATÉLITE Y LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN EN UPLINK Y DOWNLINK. | 162 |
| TABLA 5.14 CAPACIDAD EN PROCESO DE DATOS PARA DISTINTOS VALORES DEL FACTOR DE RUIDO EN UPLINK Y DOWNLINK. | 164 |
| TABLA 5.15 COMPARATIVA LINEAL. | 165 |
| TABLA 5.16 COMPARATIVA REAL. | 166 |
| TABLA 5.17 TABLA COMPARATIVA ENTRE EL RADIO DE COBERTURA Y EL NÚMERO DE CELDAS NECESARIAS..... | 170 |
| TABLA 5.18 CAPACIDAD Y NÚMERO DE CELDAS PARA DISTINTOS RADIOS CELULARES PARA 1.996GHZ. | 177 |
| TABLA 5.19 CAPACIDAD Y NÚMERO DE CELDAS PARA DISTINTOS RADIOS CELULARES EN 2.186GHZ. | 179 |
| TABLA 5.20 CAPACIDAD EN 1.996 GHz. CON RESULTADOS COMPATIBLES CON DOWNLINK. | 180 |
| TABLA 5.21 CAPACIDAD EN 2.186 GHz CON RESULTADOS COMPATIBLES CON UPLINK. | 180 |
| TABLA 5.22 CAPACIDAD Y NÚMERO DE CELDAS PARA DISTINTOS RADIOS CELULARES PARA 3.996 GHz. | 185 |

| | |
|--|-----|
| TABLA 5.23 CAPACIDAD Y NÚMERO DE CELDAS PARA DISTINTOS RADIOS CELULARES PARA 4.186 GHZ. | 187 |
| TABLA 5.24 CAPACIDAD EN 3.996 GHZ CON RESULTADOS COMPATIBLES CON DOWNLINK. | 188 |
| TABLA 5.25 CAPACIDAD EN 4.186 GHZ CON RESULTADOS COMPATIBLES CON UPLINK. | 188 |
| TABLA 5.26 CAPACIDAD Y NÚMERO DE CELDAS PARA DISTINTOS RADIOS CELULARES PARA 5.996 GHZ. | 193 |
| TABLA 5.27 CAPACIDAD Y NÚMERO DE CELDAS PARA DISTINTOS RADIOS CELULARES PARA 6.186 GHZ. | 195 |
| TABLA 5.28 CAPACIDAD Y NÚMERO DE CELDAS PARA DISTINTOS RADIOS CELULARES PARA 7.996 GHZ. | 201 |
| TABLA 5.29 CAPACIDAD Y NÚMERO DE CELDAS PARA DISTINTOS RADIOS CELULARES PARA 8.186 GHZ. | 203 |
| TABLA B.1 CAPACIDAD PARA 1.996 GHZ. | 223 |
| TABLA B.2 CAPACIDAD PARA 2.186 GHZ. | 224 |
| TABLA B.3 CAPACIDAD PARA 3.996 GHZ. | 225 |
| TABLA B.4 CAPACIDAD PARA 4.186 GHZ. | 226 |
| TABLA B.5 CAPACIDAD PARA 5.996 GHZ. | 227 |
| TABLA B.6 CAPACIDAD PARA 6.186 GHZ. | 228 |
| TABLA B.7 CAPACIDAD PARA 7.996 GHZ. | 229 |
| TABLA B.8 CAPACIDAD PARA 8.186 GHZ. | 230 |

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

La aparición de nuevas tecnologías surge, consecuentemente, con la necesidad que tiene la sociedad para transmitir información. En la actualidad se busca la integración de toda clase de servicios mediante una red global de comunicaciones, a la que un usuario pueda acceder desde cualquier lugar, sin necesidad de estar atado a una red fija. La demanda de los usuarios crece y se hace más compleja. Para satisfacerla es necesario mejorar la tecnología de banda ancha terrestre, celular y por satélite con sistemas que garanticen el acceso a toda clase de servicios desde cualquiera que sea la ubicación del usuario.

El concepto de tercera generación identifica a los sistemas de telecomunicaciones móviles que operan a bandas de frecuencia comunes en todos los países ofreciendo servicios multimedia en tiempo real y transferencia de datos. De acuerdo a esta definición, estos sistemas requieren cobertura global que únicamente con celdas y estaciones base de la tecnología terrestre sería inviable debido al despliegue de medios y el coste que supondría. Esto dio origen en la década de los noventa a una generación de comunicaciones móviles a través de sistemas satelitales. Los componentes terrestre y satélite de IMT-2000¹ son complementarios, mientras que el componente terrestre proporciona cobertura sobre zonas terrestres con una densidad de población lo suficientemente grande como para permitir la viabilidad económica para el despliegue de los sistemas, el componente satélite a su vez proporciona una cobertura global, proporcionando servicio al resto. Esta cobertura global sólo puede llevarse a cabo usando una combinación de las interfaces terrestre y satélite siendo por tanto fundamental a la hora de diseñar una red de comunicaciones realizar un estudio del tráfico de datos que ofrece la población de usuarios.

¹ IMT-2000 (Telecomunicaciones móviles internacionales 2000) es el estándar global para las comunicaciones sin hilos de [3G](#) de redes terrestres y redes satelitales.

1. Introducción

CDMA es el principal protocolo de acceso múltiple de las PCN², siendo adoptado por la asociación de la industria de las telecomunicaciones (TIA) en 1993. CDMA³ emplea la tecnología de ensanchado del espectro y un esquema de codificación especial, en el que a cada transmisor se le asigna un código, para permitir a múltiples usuarios ser multiplexados sobre el mismo canal físico. Este protocolo hace disminuir el efecto multicamino y se comporta bien ante las interferencias debido a su espectro ensanchado. Además las transmisiones orientadas a conexión y de las de datagramas no necesitan ninguna modificación, con lo que un servicio integrado de voz/datos es sencillo de ofrecer.

WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) es una tecnología móvil de tercera generación que utiliza la interfaz aérea de CDMA en lugar de la de TDMA, aumentando así las tasas de transmisión de datos y pudiendo llegar hasta los 2Mbps en áreas locales. Por tanto ofrece velocidades de datos mucho más altas en dispositivos móviles y portátiles que las ofrecidas hasta el momento.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo de este estudio se centra en calcular la capacidad de voz y datos, en los enlaces ascendente y descendente, que admite un sistema WCDMA de comunicaciones por satélite, en las tres modalidades más comunes de satélites de comunicaciones que existen actualmente.

En este proyecto se pretende estudiar, para cada uno de los tipos de satélite, todos los factores que influyen en la capacidad del sistema, con el fin de conocer las limitaciones del sistema y las condiciones óptimas que permiten obtener mayor capacidad de usuarios.

También se pretende estudiar, de entre los distintos modelos y configuraciones de satélites, el ámbito para el que cada uno es adecuado, así como sus restricciones y sus competencias.

² PCN (Personal Communications Network)

³ CDMA (Code Division Multiple Access)

1. Introducción

Para poder lograr nuestros objetivos, el examen de cada escenario, es decir, para cada modelo de satélite, se realizarán en varias partes. En primer lugar se analizarán los aspectos generales de la configuración de los satélites, como la altura a la que se encuentran, la cantidad de ellos si hablamos de cobertura global, su radio de cobertura, etc. Esto se realizará mediante pruebas en Matlab, cálculos numéricos y el método ensayo y error. En segundo lugar, se analizarán los factores que influyen en la capacidad del sistema y se ajustarán esos valores al máximo en beneficio de nuestro sistema. En tercer lugar se estudiarán los resultados con el fin de elegir el óptimo para nuestro sistema.

1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

La memoria del Proyecto va a ir estructurada de la siguiente manera:

- i. 1. Introducción:** en este capítulo se realizará una pequeña explicación de los motivos que nos han llevado a la realización de este proyecto y nuestros objetivos a la hora de realizarlo.
- ii. 2. Estado del Arte:** en este capítulo realizaremos una introducción a varios temas que se deben conocer antes de la realización de las simulaciones, el sistema UMTS, la tecnología WCDMA y los Sistemas Satelitales. De los cuales se detallarán aquellas características que consideramos más importantes para conocer el funcionamiento de dichas tecnologías, así como para entender nuestras futuras simulaciones. También se abordará la descripción general de nuestro sistema, común a las distintas modalidades de satélites que se estudiarán en los capítulos siguientes.
- iii. 3. Sistemas WCDMA con satélites LEO:** en este capítulo se realizarán los análisis explicados en la **sección 1.2** para la modalidad de satélites LEO. Además se realizará el estudio para un sistema WCDMA con satélites LEO para el futuro.
- iv. 4. Sistemas WCDMA con satélites MEO:** en este capítulo se realizarán los análisis explicados en la **sección 1.2** para la modalidad de satélites MEO.

1. Introducción

- v. **5. Sistemas WCDMA con satélites GEO:** en este capítulo se realizarán los análisis explicados en la **sección 1.2** para la modalidad de satélites GEO. Además se realizará el estudio de un ejemplo de cobertura para aviones en Europa.
- vi. **6. Conclusiones finales y líneas abiertas de investigación:** en este capítulo se expondrán unas breves conclusiones sobre la tecnología WCDMA tras su análisis con todas las modalidades de satélites.
- vii. **7. Referencias, bibliografía, glosario, anexos y pliego de condiciones:** en estos apartados de la memoria se mostrarán las referencias empleadas para la elaboración de este proyecto; la bibliografía donde se detallará el material al que podrá dirigirse el lector para obtener información suplementaria; un glosario con el significado de todos los acrónimos empleados; los anexos con información añadida y el pliego de condiciones.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 SISTEMA UMTS

El sistema UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), es la respuesta Europea de Tecnología de red de comunicaciones móviles de tercera generación, IMT-2000. Éste pretende explotar la potencialidad de los conceptos genéricos: Anywhere, Anytime, Anykind, es decir, en cualquier lugar, en cualquier momento y de cualquier tipo, combinando la personalización, la movilidad y las aplicaciones multimedia [1].

Para su buen funcionamiento, UMTS tiene unas características propias independientes de los sistemas anteriores. Su principal ventaja es el soporte de velocidades de datos flexibles de hasta 2 Mbps (200 veces superior a GSM) y capacidad para una alta densidad de usuarios. Estas ventajas junto con la conmutación de circuitos y paquetes y el uso de protocolos IP se combinan para prestar servicios multimedia y nuevas aplicaciones de banda ancha como video telefonía y video conferencia. Se incluyen también servicios VHE (Virtual Home Environment), en el que el usuario tendrá el mismo interfaz y entorno de servicio independientemente de donde se encuentre.

UMTS ofrece un nuevo interfaz radio denominado UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access). Dicho interfaz está basado en tecnología WCDMA (Wide Code Division Multiple Access), la cual utiliza la interfaz aérea CDMA en lugar de TDMA, permitiendo así aumentar considerablemente la velocidad de transferencia de datos, y soportando dos modos de operación el FDD (Frequency Division Duplex) y el TDD (Time Division Duplex).

UMTS sustenta una amplia variedad de servicios en todos los entornos radio, con independencia de la red que soporte, y permite presentarlos de forma unificada al usuario.

La estructura modular de UMTS y su arquitectura abierta favorecen la interoperabilidad de los terminales y permiten la introducción de nuevas aplicaciones. Se introducen nuevas facilidades y servicios multimedia simétricos y asimétricos.

Este sistema proporciona seguridad de acceso y confidencialidad a través del enlace de acceso por radio.

2.1.1 Evolución de las interfaces radio

El estándar IMT-2000 destaca por la variedad de interfaces radio que alberga. Como acata la diversidad, la tercera generación se alcanza a través de los sistemas celulares de 2 y 2.5G, no obstante el sistema UMTS introduce muchas mejoras y características independientes de los sistemas anteriores. A continuación se muestra en la **Figura 2.1** la evolución de las interfaces de radio que han sido acogidas en el estándar IMT-2000.

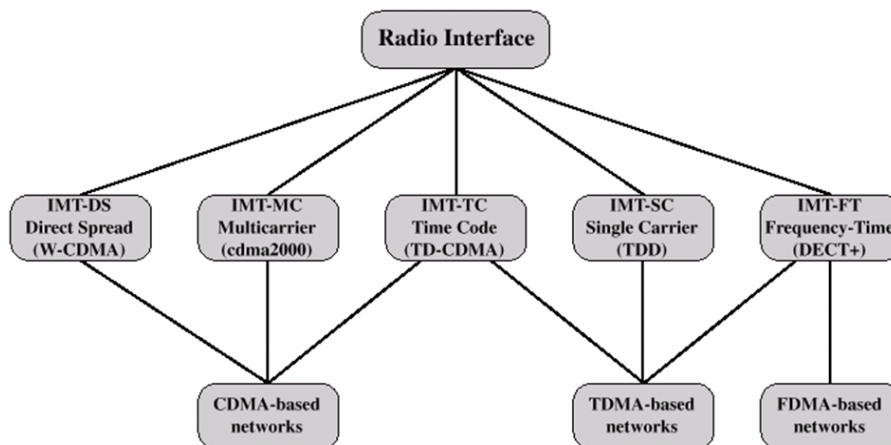


Figura 2.1 Interfaces radio de IMT-2000

2.1.2 Arquitectura de la red UMTS

La estructura del sistema UMTS se divide en dos redes

- La Red de Telecomunicaciones, se encarga de asegurar el transporte de la comunicación de extremo a extremo de la conexión.
- La Red de Gestión, se encarga de realizar todas las funciones auxiliares de operación y mantenimiento de red, facturación y tarificación de los abonados, detección y resolución de anomalías, etc.

Este apartado se centra en la red de telecomunicaciones, la cual se divide en tres sub-redes:

- Núcleo de Red, CN (Core Network). El núcleo de red proporciona las funciones de transporte, gestión e interconexión con otras redes. A través del núcleo de red, UMTS se conecta con otras redes de comunicaciones

2. Estado del arte

posibilitando la comunicación no sólo entre usuarios móviles UMTS, sino también con usuarios de otras redes.

- Red de Acceso, UTRAN (UMTS Radio Access Network). La red de acceso radio UTRAN permite la conexión entre los equipos de usuarios y el núcleo de red. Se enlaza con el CN a través de la interfaz Iu, y a su vez conectados entre sí mediante la interfaz Iur, que permite el resolver traspaso de una RNS (Radio Network Service) a otra en la capa de acceso. Esta última interfaz no existía en otros sistemas.
- Terminales de Usuario, UE (User Equipment). El equipo del usuario UE se compone de un Terminal móvil y un módulo de identidad de servicios de usuario/subscriptor (USIM) equivalente a la tarjeta SIM del teléfono móvil.

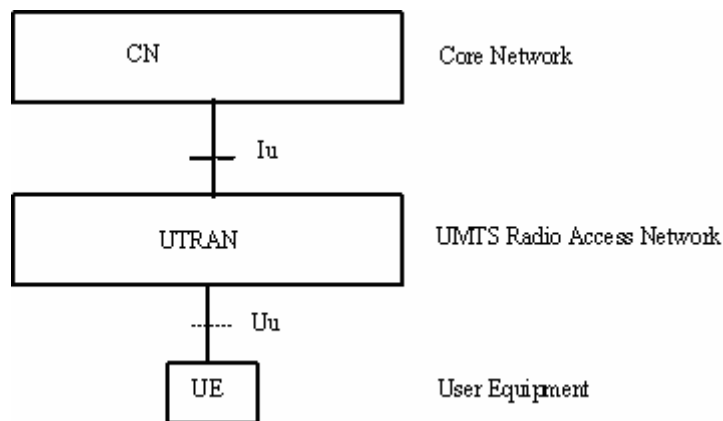


Figura 2.2 Arquitectura de la red de telecomunicaciones.

2.1.3 Bandas de frecuencia

Si bien es querido un sistema de telecomunicaciones global, lo primero que se debe hacer es la reserva de una banda de frecuencias a nivel mundial para IMT-2000.

En la siguiente figura se muestra la asignación y uso de las bandas de frecuencia en las diversas regiones desde 1992 [8]:

2. Estado del arte

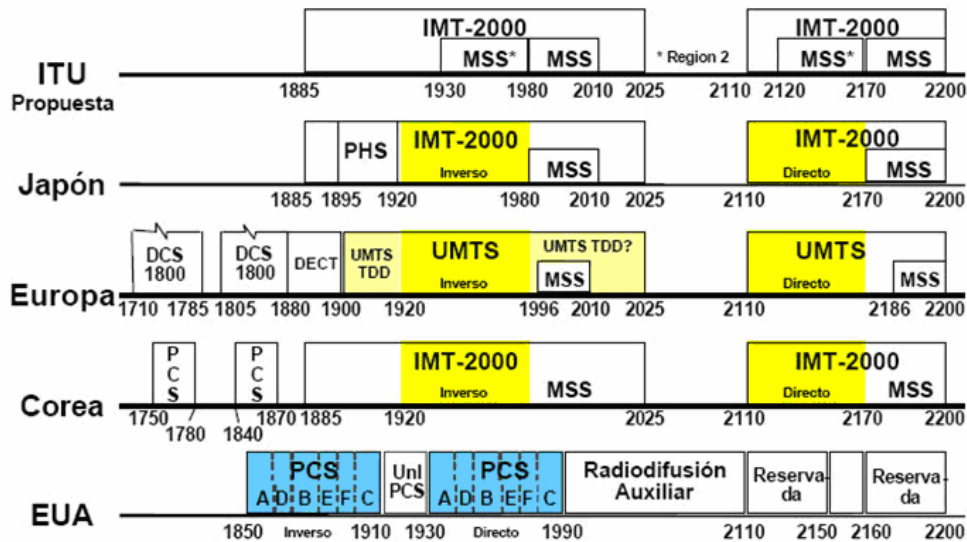


Figura 2.3 Propuesta de ITU para las bandas de frecuencia de IMT-2000 (en MHz.).

Asignación y uso de bandas de frecuencia:

- Enlace Inverso = Enlace Ascendente = Uplink (UL)
- Enlace Directo = Enlace Descendente = Downlink (DL)

En esta figura se definen bandas de frecuencia apareadas y despareadas para el componente terrestre y para el componente satélite (MSS). En Europa se han definido bandas de frecuencia para UMTS, su versión de IMT-2000, y un sistema DECT⁴ avanzado para el componente terrestre de IMT-2000. La tendencia, es desarrollar interfaces radio para el componente satelital lo más compatibles con el componente terrestre y aprovechar el hecho de disponer de bandas adyacentes para ambos componentes, por lo menos en Europa. Así se evitarían terminales duales poco favorables en tamaño y coste. En otras regiones como Estados Unidos de América han alojado servicios diferentes al estándar en cuestión en la banda propuesta.

2.1.4 Acceso a radio

Para la red de acceso a radio, UTRAN, se han definido dos modalidades de WCDMA [2]:

⁴ DECT – Digital Enhanced Cordless Telecommunications. Sistema de comunicaciones sin hilos.

2. Estado del arte

- Modo dúplex de frecuencia FDD (*Frequency Division Duplex*), basado en un esquema de secuencia directa CDMA. Esta modalidad asigna a la comunicación dos frecuencias portadoras, una para el enlace ascendente y otra para el descendente, constituyendo un par de “frecuencias emparejadas”.

Tabla 2.1 Bandas de frecuencia para FDD.

| Bandas de frecuencia (MHz) | Componente Terrestre | Componente satélite |
|---------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Frecuencias en UL | 1920 – 1980 | 1980 – 2010 |
| Frecuencias en DL | 2110 – 2170 | 2170 – 2200 |

- Modo dúplex temporal TDD (*Time División Dúplex*), está basado en la multiplexación de tiempo y código. En esta modalidad se usa la misma frecuencia para los enlaces ascendentes y descendentes, los cuales se separan por intervalos de tiempo de forma dinámica y variable. La frecuencias son únicas y se eligen dentro de la banda de “frecuencias no emparejadas”.

Tabla 2.2 Bandas de frecuencia para TDD.

| Bandas de frecuencia (MHz) | Componente terrestre |
|---------------------------------------|--|
| Frecuencias en UL y DL | 1900 – 1920 2010 - 2025 |

El acceso mediante TDD está bastante retrasado debido a que en una primera fase de despliegue, los terminales móviles han de ser duales GSM/UMTS y sólo incorporan el modo FDD. Por tanto la modalidad que emplearemos en este estudio es el modo de acceso FDD.

En FDD la separación nominal entre las frecuencias es de 5 MHz y la anchura de banda del sistema es de 60 MHz, por lo que se disponen de 12 radiocanales. La separación dúplex es de 190 MHz.

2.1.5 Tipos de canales

En la arquitectura se establecen tres tipos de canales:

- a. Canales lógicos: definen el tipo de información que debe transmitirse y se dividen en canales de control, para la señalización, y canales de tráfico, para la información.
- b. Canales de transporte: definen el formato de envío y se dividen en comunes y dedicados.
- c. Canales físicos: pueden estar asociados a un canal de transporte o no. Comprende la frecuencia de la portadora y los códigos de expansión.

Existen otras bandas de frecuencias que se utilizan en redes de servicio en muchos países y que se deja a la administración la decisión del tiempo y forma de utilizarlas.

2.1.6 Prestaciones

UMTS proporciona mayor capacidad, posibilidades de transmisión de datos y una gama de servicios mucho más extensa. Para ello usa un innovador programa de acceso radioeléctrico y una red principal mejorada basándose en las actuales tecnologías móviles, inalámbricas y satelitales.

2.2 TECNOLOGÍA WCDMA

WCDMA (Wideband Code DIvision Multiple Access) es la tecnología de interfaz de aire en la que se basa UMTS, por tanto, una de las principales tecnologías para la implementación de sistemas celulares de tercera generación (3G). El estándar de esta tecnología se inició como el proyecto de la sociedad de la tercera generación (3GPP) para asegurar la interoperabilidad entre diversas redes 3G. Finalmente, ha sido adoptada por la ETSI como tecnología de acceso radio para UMTS/IMT-2000 en la banda apareada de Japón, Europa y EEUU [2][3].

Se trata de una tecnología móvil inalámbrica de espectro ensanchado, que utiliza la interfaz aérea de CDMA (Code División Multiple Access) para alcanzar velocidades de transmisión de datos mucho más altas y mayor capacidad en dispositivos móviles y portátiles comparadas con los sistemas celulares de segunda generación (2G). La interfaz aérea de CDMA se combina con las redes basadas en GSM para asegurar la interoperabilidad.

WCDMA está altamente especializado en comunicaciones móviles de alta calidad de voz, imagen, datos y video hasta un máximo de 2 Mbps en entornos urbanos o 384 Kbps en zonas rurales. Otra ventaja es que puede soportar varias conversaciones simultáneas sin ningún problema como puede ser una conexión a Internet a la vez que se realiza una videoconferencia.

WCDMA proviene de *Wide CDMA* (CDMA ensanchado), la señal se digitaliza, codifica y se extiende por un amplio marco de frecuencias. La diferencia entre ambas es que en WCDMA la información se extiende por una ventana de aproximadamente 5 MHz mientras que en CDMA lo hacía en una de 200 KHz. Esto hace que se usen códigos más veloces y que tengan mayor ganancia de procesado.

A la tecnología WCDMA también se la conoce como UTRA-FDD, UMTS-FDD o IMT-2000 CDMA Direct Spread.

2.2.1 Espectro ensanchado

El espectro ensanchado es una modalidad de transmisión donde la señal transmitida ocupa un ancho de banda W mucho mayor que el ancho de banda B de la señal de información. Para ello se utiliza una secuencia código.

La modalidad de Secuencia Directa (DS, *Direct Sequence*) es la que se utiliza actualmente en los sistemas de comunicaciones móviles, y es la que utilizamos a partir de ahora en este estudio.

El ensanchamiento se realiza multiplicando la señal de información por un código de expansión, el cuál posee una velocidad de chip mucho mayor a la velocidad binaria de la señal original. A los bits de la señal código se les llaman chips para diferenciarlos de los bits de usuario. Al realizar esto, la señal original ocupa un ancho de banda mucho mayor que antes, pero a su vez su densidad espectral de potencia disminuye. Se produce un intercambio entre potencia y ancho de banda. La señal resultante se modula y se transmite por el canal de comunicación. En recepción se ejecuta la operación inversa, la señal recibida se multiplica por una réplica sincronizada del código de expansión y se demodula. Los códigos de expansión tienen que ser conocidos por el emisor y el receptor.

2.2.2 Ventajas

Se obtienen una serie de ventajas con respecto a los sistemas móviles anteriores:

- ✓ Reducción de la densidad espectral de potencia. La energía de la señal sobre un mayor ancho de banda, como resultado las señales de espectro ensanchado pueden ser poco detectables y la interferencia sobre otras emisiones radioeléctricas es pequeña.
- ✓ Protección frente a interferencias:
 - i. *De banda estrecha.* Al aplicar el código de expansión correspondiente al proceso el desensanchamiento, la señal interferente se convierte en una señal de banda ancha y por tanto con baja densidad espectral de potencia.

2. Estado del arte

ii. *De banda ancha.* En el proceso de desensanchamiento la señal interferente continua ensanchada. Estas señales pueden ser señales ensanchadas correspondientes a otros usuarios CDMA.

- ✓ Elevada resolución temporal. Se obtiene una mayor E_b/N_0 y se evita ISI (*Interferencia entre símbolos*)
- ✓ Privacidad de la información. La detección de la señal no implica extraer la información a menos que se conozcan los códigos de expansión.
- ✓ Protección frente al desvanecimiento y aprovechamiento de la propagación multitrayecto. Las componentes multitrayecto en vez de producir desvanecimiento, pueden recuperarse y combinarse favoreciendo la recepción de la señal. Esto se realiza a través del receptor Rake.
- ✓ Frecuentemente utilizada en aplicaciones militares y donde se requiere alta seguridad por su baja probabilidad de detección.
- ✓ Mayor velocidad de transmisión, desde los 144 kbps en entornos rurales, alrededor de los 384 Kbps en entornos urbanos, hasta los 2 Mbps en entornos urbanos.
- ✓ Control de potencia. Si la señal se transmite con mucha potencia también creará mucha interferencia a las células vecinas, se realiza por tanto un control de potencia dinámico, con actualizaciones periódicas, para equilibrar la intensidad de las señales en recepción.

2.2.3 Especificaciones técnicas de la interfaz radio

A continuación se enumeran las especificaciones técnicas de la interfaz radio de WCDMA:

- Canales radio de 5 MHz.
- Tasa básica de chip de 3.84 Mcps.
- Detección coherente en el uplink y el downlink basada en el uso de símbolos piloto y canales.
- Soporta operaciones asíncronas entre células.
- Envío variable en tramas de 10 ms.
- Altas tasas de bits con transmisiones multicódigo.
- Traspaso con continuidad (soft/softer handover, SHO)
- Control de potencia basado en la SIR.
- Se puede usar detección multiusuario y antenas pequeñas para incrementar la capacidad y la cobertura.
- Alta flexibilidad del servicio. Los servicios varían de acuerdo a las características de la conexión.

2.2.4 Aplicaciones

En escenarios de transmisión en los que la E_b está limitada debido al gran valor de la distancia es interesante aprovechar la transacción entre $\frac{E_b}{N_0}$ y el ancho de banda que nos proponen los sistemas WCDMA. Este es el caso de las comunicaciones espaciales, estos sistemas están limitados en potencia pero no en banda, por tanto es conveniente utilizar señales de banda ancha con densidades espectrales de potencia reducidas y con propiedades similares a las de ruido blanco.

La tecnología WCDMA también es de gran aplicación para servicios conversacionales (de alta calidad de voz, videotelefonía y videojuegos), servicios afluentes (el visionado de

2. Estado del arte

una película), servicios interactivos (navegación web) y también para servicios diferidos (correo electrónico, descargas,...).

2.2.5 Factores del sistema WCDMA interesantes para nuestro estudio

A continuación se estudiarán una serie de factores interesantes, a tener en cuenta para la realización posterior de nuestro estudio.

2.2.5.1 Características del medio de propagación

Los inconvenientes que sufre la señal radioeléctrica al viajar por el medio de propagación afectan más a los sistemas GEO que a los no GEO debido a la distancia entre el satélite y el usuario.

2.2.5.2 Canal Piloto

Los canales piloto son muy útiles para el canal de bajada ya que proporciona la información necesaria para el seguimiento y adquisición de la señal, facilita la demodulación coherente y las mediciones para el control de potencia y si dispone de símbolos pilotos multiplexados en el tiempo (time-domain multiplexing of pilot symbols TDMP) en intervalos pre-asignados, podría soportar el control de antenas adaptativas [4].

El canal piloto se transmite con más potencia que los demás, entre un 10% y un 20% de la potencia total disponible en la estación base, para facilitar su captación y seguimiento por parte de los móviles.

En el canal de subida, los canales pilotos están relacionados con información de señalización.

2.2.5.3 Efecto de la movilidad de los terminales

Hay que tener en cuenta que las comunicaciones pueden realizarse en movimiento. Cuando esto sucede se produce una variabilidad temporal en el canal radio que genera dos efectos estrechamente ligados entre sí, desvanecimiento espacial, que se transforma en desvanecimiento selectivo en tiempo (Time Selective Fading) y las variaciones temporales de la amplitud de la señal, que se transforman en un desplazamiento en las frecuencias espectrales de la señal recibida (desplazamiento Doppler, Doppler Shift) [2].

El desplazamiento de los satélites de órbitas bajas sobre la superficie terrestre produce un efecto Doppler. Este no es el caso de los satélites geoestacionarios, los cuales parecen inmóviles para antenas fijas dispuestas en la tierra y, por tanto, el fenómeno no perjudica a la comunicación.

Para mitigar el desvanecimiento selectivo en el tiempo es necesario un control de potencia dinámico, que debe reactualizarse con un tiempo menor o igual al tiempo de coherencia del canal. Además con el uso del receptor *Rake* las componentes multitrayecto se combinan de forma óptima haciendo que la dispersión temporal pase de ser perjudicial a ser beneficiosa.

Estos efectos han de compensarse para una buena comunicación, y se han tenido en cuenta en este estudio.

2.2.5.4 Control de potencia

El control de potencia es necesario para no desperdiciar potencia por parte del usuario y proteger la capacidad del sistema evitando el problema cerca-lejos. Si todos los usuarios emitieran con la misma potencia pero estuvieran a distintas distancias de la estación base, las señales de los usuarios más cercanos a ésta llegarían con una amplitud mucho mayor, generando una interferencia muy grande para los demás usuarios y degradando la calidad de las señales recibidas. Por ello se hace necesario equilibrar la amplitud de las señales recibidas a través de un control de potencia dinámico, con actualizaciones periódicas, cuyas órdenes de control se multiplexan en el tiempo con la información [2].

2. Estado del arte

En WCDMA tenemos un control de potencia basado en tres bucles:

- *Bucle abierto*: Estima la atenuación del enlace descendente midiendo el nivel de señal recibido en el canal piloto y supone dicha estimación válida para el enlace ascendente. Esta estimación se realiza cada 20 ms aproximadamente y compensa los desvanecimientos lentos. En el caso de desvanecimientos rápidos, que suelen ser selectivos en frecuencia, esta técnica no funciona ya que la pérdida de propagación en ambos enlaces serán diferentes. Para compensarlos es necesario un bucle cerrado.
- *Bucle cerrado*: Compensa desvanecimientos rápidos. Se basa en un proceso de *realimentación negativa*: Se mide, en la estación base, el nivel de señal recibido o la relación señal/interferencia (SIR), se compara con el valor objetivo y ordena al extremo transmisor se aumente o reduzca la potencia. Este control debe ser rápido, cada 0.66 ms.
- *Bucle externo*: Se ajusta, independientemente de cada conexión, la SIR a un valor objetivo en función de la calidad deseada (BLER). La SIR ajustada actúa como valor de referencia del bucle cerrado. Esto se realiza cada 20 ms aproximadamente.

2.2.5.5 Traspaso con continuidad

En WCDMA, gracias a la reutilización universal de las frecuencias, es posible una técnica de traspaso denominado traspaso con continuidad (*soft/softer handover, SHO*). Anteriormente en otros sistemas, al pasar la comunicación de una estación a otra, debía interrumpirse brevemente la conexión para realizar el intercambio de una base a otra, ya que ambas usaban frecuencias diferentes. En sistemas WCDMA es posible la conexión a varias estaciones simultáneamente, evitando el riesgo de una posible pérdida de llamada, el usuario se conecta a la estación elegida antes de desconectarse de la estación de origen, y queda unido a ambas durante un cierto tiempo. Cuando el nivel de señal de una de las dos es insuficiente, el móvil se desconecta y queda enlazado a la “mejor” de las dos [2].

2. Estado del arte

Este mecanismo de traspaso conlleva una serie de ventajas:

- ✓ Mayor continuidad en las llamadas.
- ✓ Reducción de la interferencia en el enlace ascendente. El móvil transmite en cada momento con la potencia mínima de entre las que exijan las estaciones bases a las que esté conectado (conjunto activo).
- ✓ Se obtiene una mayor calidad por macrodiversidad.
 - Para el enlace descendente, se transmite desde varias estaciones base y se combinan las señales en el móvil (gracias al *receptor Rake*).
 - Para el enlace ascendente, se recibe la señal en varias estaciones base.
 - Las señales se seleccionan si se reciben en emplazamientos distintos (Soft handover).
 - Las señales se combinan si se reciben en sectores de un mismo emplazamiento (Softer Handover).

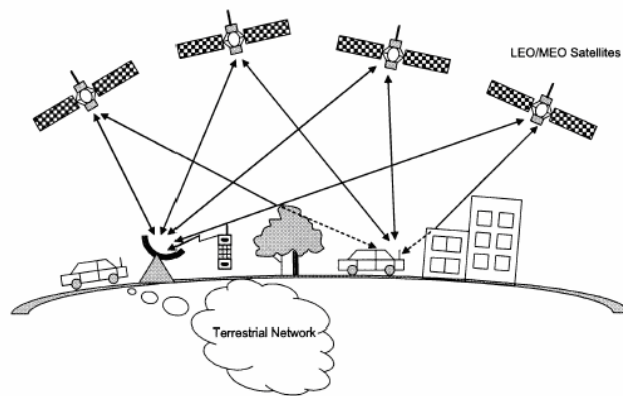


Figura 2.4 Handover en satélites de órbita no geoestacionaria.

2.2.6 Sistemas limitados por interferencia

En las comunicaciones por satélite, la cobertura de un sistema WCDMA está definida por la potencia máxima que un móvil puede radiar (para el enlace ascendente) o satélite (para el enlace descendente, no obstante su capacidad queda limitada por la **interferencia** [2]).

Al contrario que FDMA y TDMA, WCDMA utiliza las mismas frecuencias para células vecinas, y por tanto, un usuario en un sistema WCDMA experimenta una interferencia intracelular producida por los usuarios de su misma célula, y una interferencia extracelular producida por los usuarios en células adyacentes.

La estimación de la capacidad de un sistema WCDMA no es un proceso sencillo, debido a una serie de consecuencias de los sistemas limitados por interferencia:

- Relación entre capacidad y cobertura: En una célula aislada, el radio dependerá del número de usuarios activos dentro de ella. Cuantos más usuarios haya, menor radio de cobertura, ya que al activarse más usuarios, los que se encuentran en el borde de la célula no emiten con potencia suficiente para alcanzar la estación base.
- Compartición de carga. Cuando la célula no está aislada, sufre interferencia de los usuarios alojados en ella y de los alojados en células vecinas, se dice por tanto se sufre interferencia intracelular y extracelular. Cualquier variación en el número de móviles de una célula vecina repercute sobre la capacidad de nuestra célula, ya que sufrirá mayor o menor interferencia.
- Múltiples servicios. Según el servicio que proporcione el sistema, se empleará mayor o menor potencia, repercutiendo en la capacidad del sistema.
- Actividad discontinua de fuente. En los periodos de inactividad, como en transmisión de datos o en los silencios en el caso de telefonía, se puede reducir la potencia de transmisión, lo cual hace que el nivel de interferencia medio se reduzca y aumente la capacidad del sistema.
- Capacidad flexible a costa de calidad. Los usuarios de un sistema WCDMA deben transmitir con una potencia tal que la relación señal a ruido total (SIR) alcance un cierto valor umbral. Al aumentar el número de usuarios en una célula, aumenta la interferencia recibida en ella y en el resto de células. Si los usuarios no aumentan

2. Estado del arte

la potencia a la que transmiten se produce una reducción en la SIR recibida por la estación base, y por tanto una degradación de la calidad de la señal. Por este motivo se dice que la capacidad es *flexible*, ya que puede crecer a costa de una degradación en la calidad de la señal, así hasta que la comunicación deje de ser sostenible.

Estos efectos logran un uso más eficiente de los recursos y constituyen una de las principales ventajas de los sistemas multiacceso WCDMA. No obstante suponen una mayor complejidad en la planificación y el dimensionamiento de la red, por lo que la mayoría de las veces hay que recurrir a procesos de simulación para llegar a estimaciones realistas.

2.2.6.1 Planificación radio

Como se ha explicado antes la limitación por interferencia implica que los conceptos de cobertura y la capacidad estén íntimamente ligados entre sí. No se puede realizar el cálculo del balance de enlace, el análisis del tráfico y el dimensionado por separado, por lo que se realiza una planificación aproximada, seguida de una planificación detallada que constan de las siguientes etapas:

- Planificación aproximada:
 - Cálculo del balance de enlace radio.
 - Aplicación de técnicas de aproximación.
 - Relación cobertura-capacidad mediante factores de carga.
- Planificación detallada:
 - Simulación de forma detallada de las prestaciones de red.
 - Se eliminan las aproximaciones.
 - Resultados más exactos.
 - Desventaja: Se necesita un software específico para la simulación.

2.2.6.2 Cálculo de la capacidad en sistemas WCDMA

La **capacidad de los sistemas WCDMA** se define como el número de usuarios que pueden ser servidos simultáneamente por una estación base [2].

La capacidad en WCDMA es función del enlace. Antes hemos mencionado que en WCDMA se usan las mismas frecuencias para todas las células, en particular dos frecuencias distintas, una para el enlace ascendente y otra para el descendente. Al usar distintas frecuencias para cada enlace, las señales de uno no interferirán con las del otro y viceversa, por lo que es posible y necesario evaluar cada enlace por separado, a fin de ver cuál es que limita la comunicación.

La capacidad en WCDMA también es función del tipo de servicio, dependiendo de esto se requerirá un valor de la SIR mayor o menor.

En nuestro estudio se realizarán simulaciones por separado según en enlace y el tipo de servicio, se analizarán los resultados y se proporcionará una comparativa según los datos obtenidos.

➤ *Potencia de ruido*

La potencia de ruido del sistema (dBm) viene determinada por la siguiente ecuación:

$$P_n = -114 + 10\log_{10}(BW) + NF \quad (2.1)$$

Donde:

BW: Ancho de banda del canal (MHz).

NF: Factor de ruido del receptor (dB).

➤ *Pérdida de propagación*

La pérdida básica de propagación en el espacio libre (dB) viene dada por la siguiente expresión:

$$L_b = 92,45 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d) + L_{shadowing} \quad (2.2)$$

2. Estado del arte

Donde:

f : Frecuencia de funcionamiento del sistema (GHz).

d : Distancia que recorre la señal (Km.).

$$d = \sqrt{R^2(Km) + h_{\text{satélite}}^2(Km)}. \quad (2.3)$$

$L_{\text{shadowing}}$ = Pérdida por sombra. Esta interferencia depende del escenario de estudio.

2.2.6.2.1 Capacidad para el enlace ascendente

Para el cálculo del enlace ascendente nos basamos en las siguientes hipótesis:

- i. Distribución uniforme de la carga en todas las células. Las estaciones móviles están repartidas uniformemente por todo el sistema.
- ii. Control de potencia ideal. Las señales de las distintas unidades móviles se reciben en la estación base con la misma potencia.
- iii. Cálculo del número de usuarios según la clase de servicio (una única clase).
- iv. Se ignora la variabilidad de la carga y de la propagación.
- v. Hipótesis gaussiana de las interferencias.

En el enlace ascendente se debe mantener un determinado valor de SIR en la estación base, esto es que todos los móviles deben radiar con una potencia tal que al llegar la señal a la estación base, se cumpla el valor de SIR requerido.

La capacidad de este enlace viene limitado por la potencia de las estaciones individuales.

La potencia requerida en cada enlace debe ser la estrictamente necesaria para cumplir los requisitos de relación señal/interferencia (SIR)

2. Estado del arte

Las estaciones deben radiar con la potencia justa para alcanzar la SIR requerida y no crear más interferencia de la necesaria.

En primer lugar vamos a definir la relación señal a interferencia más ruido (SINR) que se recibe en la estación base o móvil:

$$SINR = \frac{S}{I_{intra} + I_{inter} + N_{receptor}}. \quad (2.4)$$

Nuestra propuesta se basa en medidas instantáneas de la SIR, más exactamente de la E_b/N_0 (energía por bit/ruido del sistema). Esto es debido a que la SIR es uno de los parámetros calidad (QoS) más críticos de cualquier sistema de comunicaciones.

La SIR al atravesar un proceso mejora gracias a la ganancia de procesado, dándonos la E_b/N_0 :



Figura 2.5 Paso de SINR a E_b/N_0 .

Por tanto la E_b/N_0 viene dada por la siguiente expresión:

$$E_b/N_0 = \frac{S/R_b}{I_{intra}/W + I_{inter}/W + N_{receptor}}, \quad (2.6)$$

Donde:

E_b : Energía por bit.

N_0 : Densidad espectral de potencia de ruido.

S : Potencia de la señal recibida en la estación base o móvil.

R_b : Tasa de binaria (bps).

W : Ancho de banda total.

I_{intra} : Interferencia intracelular.

I_{inter} : Interferencia intercelular.

$N_{receptor}$: Densidad de potencia de ruido en el receptor.

2. Estado del arte

Como se ha indicado anteriormente, la capacidad está limitada por la interferencia y el ruido, por tanto la evaluaremos según el análisis de interferencia recibida en la estación base procedente de las estaciones móviles:

- Situadas dentro de la célula servida por la estación base. **Interferencia intracelular.**
- Situadas en células vecinas. **Interferencia intercelular.**

El ruido presente en la estación base se considera como otra interferencia más, p_N :

$$p_N = KT_0 f_{sis} W . \quad (2.7)$$

Donde f_{sis} es el factor de ruido del sistema receptor y W la tasa de chips.

Se realiza un control de potencia basado en la distancia de n-usuarios al centro de la célula [6].

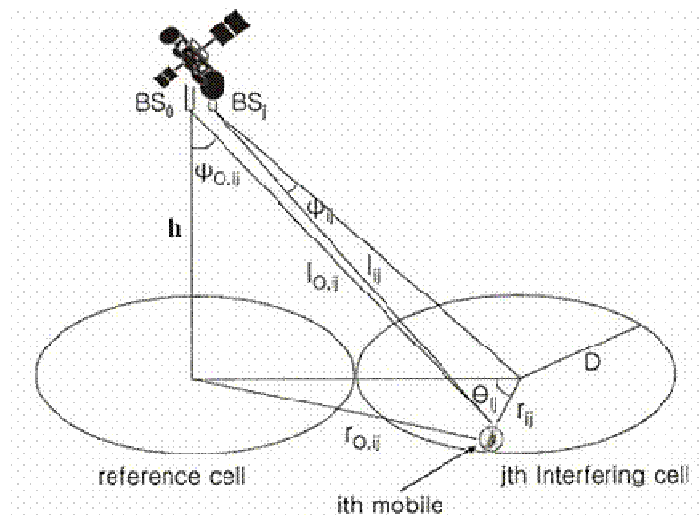


Figura 2.6 Geometría de interferencia en satélites.

Donde h equivale a la altura del satélite en Km.

Asumimos células circulares ideales para la realización de los cálculos, aunque por la proyección de los haces sobre el terreno, sean en realidad de forma elíptica. El efecto de huellas elípticas se disminuye con haces elípticos.

2. Estado del arte

➤ **Potencia recibida**

La potencia que recibe el satélite j por el usuario i puede expresarse por la siguiente ecuación:

$$P_{rec:ij}(\vartheta_j) = P_{tx:ij} g_{ij}(\vartheta_j), \quad (2.7)$$

Donde:

$P_{tx:ij}$: Potencia máxima que el móvil (i, j) transmite a su vano correspondiente del satélite.

$g_{ij}(\vartheta_j)$: Ganancia total del enlace, incluidas las pérdidas por el espacio libre. Depende del ángulo de elevación del satélite ϑ_j .

En dB:

$$P_{rec:ij}(\vartheta_j) \approx P_{tx:ij} + G_{tx:ij} + G_{rx:ij} - L_b. \quad (2.8)$$

Donde:

$G_{tx:ij}$: Ganancia de la antena transmisora (dB).

$G_{rx:ij}$: Ganancia de la antena receptora (dB).

L_b : Pérdida básica de propagación (dB).

➤ **Modelo de radiación de la antena del satélite**

El modelo utilizado depende del escenario en que nos encontremos. Para cada uno se ha empleado el modelo más adecuado y se describirán más profundamente en cada capítulo.

➤ **Interferencia Intracelular**

Asumiendo que el nivel de potencia de la señal deseada es S , la interferencia intracelular I_{intra} viene dada por:

$$I_{intra} = \alpha(N_u - 1)S. \quad (2.9)$$

2. Estado del arte

Donde α Es el factor de actividad y N_u es el número de usuarios de la célula.

➤ **Interferencia Intercelular**

Al borde de la célula bajo estudio nos encontramos con otras muchas células, cuyos usuarios producen interferencia extracelular a la célula de referencia.

Asumiremos que (i, j) denota el i -ésimo móvil en la j -ésima celda y que el haz BS_j , es el haz del satélite que sirve al móvil (i, j) . El móvil (i, j) está a una distancia r_{ij} del centro de la celda por la que es servida y a una distancia $r_{o,ij}$ del centro de la celda de referencia. La potencia transmitida por el móvil (i, j) viene dada por:

$$S_{T,ij} = S l_{ij}^5 10^{-\zeta_{ij}/10} 10^{-G(\psi_{ij})/10}. \quad (2.10)$$

La interferencia producida por el móvil (i, j) viene dada por:

$$I_{BS_0} = S \left[\frac{l_{ij}}{l_{o,ij}} \right]^5 10^{\frac{\zeta_{o,ij} - \zeta_{ij}}{10}} 10^{\frac{G(\psi_{o,ij}) - G(\psi_{ij})}{10}}. \quad (2.11)$$

Siendo:

l_{ij} : Distancia del móvil (i, j) a BS_j (spot beam o vano que sirve a la celda j).

$l_{o,ij}$: Distancia del móvil (i, j) a BS_0 (spot beam o vano que sirve a la celda de referencia).

ζ_{ij} : Pérdidas por sombra correspondiente al camino l_{ij} .

$\zeta_{o,ij}$: Pérdidas por sombra correspondiente al camino $l_{o,ij}$.

ψ_{ij} : Ángulo bajo el que es visto el móvil (i, j) y el centro de la celda j , relativo a BS_j (Ángulo boresight).

$\psi_{o,ij}$: Ángulo bajo el que es visto el móvil (i, j) y el centro de la celda de referencia, relativo a BS_0 (Ángulo boresight).

$G(\psi_{ij})$: Ganancia de la antena receptora normalizada evaluada en ψ_{ij} .

$G(\psi_{o,ij})$: Ganancia de la antena receptora normalizada evaluada en $\psi_{o,ij}$.

2. Estado del arte

Gracias a la geometría de los satélites, si las células pertenecen a la cobertura de un mismo satélite, los haces de las antenas del satélite se originan desde el mismo lugar atravesando prácticamente el mismo camino, $l_{0,ij} \approx l_{ij}$, y están sujetos aproximadamente a las mismas pérdidas por sombra, $\zeta_{0,ij} \approx \zeta_{ij}$. Por tanto, cuando hablamos de un sólo satélite podemos simplificar la ecuación anterior poniendo:

$$I_{BS_0} \approx S 10^{\frac{G(\psi_{0,ij})-G(\psi_{ij})}{10}}. \quad (2.12)$$

La interferencia intercelular I_{inter} producida por las J celdas interferentes a la célula bajo estudio será:

$$I_{inter} = \alpha S N_u \sum_{j=1}^J \int_A 10^{\frac{G(\psi_{0,ij})-G(\psi_{ij})}{10}} dA, \quad (2.13)$$

$$I_{inter} = \alpha S N_u \sum_{j=1}^J \int_0^{2\pi} \int_0^D 10^{\frac{G(\psi_{0,ij})-G(\psi_{ij})}{10}} \frac{r_{ij} dr_{ij} d\vartheta_{ij}}{\pi D^2}, \quad (2.14)$$

$$I_{inter} = \alpha S N_u F_u \approx I_{intra} F_{uplink}. \quad (2.15)$$

F_{uplink} denota el factor de carga, esta variable depende de la geometría y el lugar y nos da el efecto de todas las demás células interferentes. Viene definido por la siguiente ecuación:

$$F_{uplink} = \sum_{j=1}^J \int_0^{2\pi} \int_0^D 10^{\frac{G(\psi_{0,ij})-G(\psi_{ij})}{10}} \frac{r_{ij} dr_{ij} d\vartheta_{ij}}{\pi D^2}. \quad (2.16)$$

En el caso de estar en una célula al borde de cobertura del satélite, no podemos ignorar la interferencia producida por otros satélite, la distancia recorrida por las señales ya no será similar, $l_{0,ij} \neq l_{ij}$, y las pérdidas por sombra tampoco, $\zeta_{0,ij} \neq \zeta_{ij}$, debiendo ser incluidas en las fórmulas anteriores de forma semejante a la ecuación (2.11)

2. Estado del arte

➤ **Interferencia total en el Uplink**

La interferencia total en el uplink será la suma de todas las interferencias:

$$I_{\text{total}} = I_{\text{intra}} + I_{\text{inter}} + P_n \approx I_{\text{intra}} (1 + F_{\text{uplink}}) + P_n. \quad (2.17)$$

➤ **Cálculo de la capacidad**

A partir de las ecuaciones anteriores podemos obtener la capacidad representada por el número de usuarios:

$$E_b/N_0 = \frac{W}{R_b} \frac{S}{I_{\text{intra}} + I_{\text{inter}} + N_{\text{receptor}}}, \quad (2.18)$$

Siendo la ganancia de procesamiento $G_p = W/R_b$ y teniendo en cuenta la ecuación anterior, tenemos:

$$E_b/N_0 = G_p \frac{S}{I_{\text{intra}} + I_{\text{inter}} + N_{\text{receptor}}}, \quad (2.19)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.9) y (2.15) en (2.19), se supone $(N_u - 1) \approx N_u$ y que la interferencia prevalece sobre el ruido.

$$E_b/N_0 = G_p \frac{S}{\alpha(N_u - 1)S + \alpha S N_u F_{\text{uplink}} + N_{\text{receptor}}} \approx G_p \frac{1}{\alpha N_u (F_{\text{uplink}} + 1)}. \quad (2.20)$$

Despejando N_u se obtiene el número de usuarios para el enlace ascendente:

$$N_u = \frac{G_p}{\alpha(E_b/N_0)} \frac{1}{(F_{\text{uplink}} + 1)} = \frac{G_p}{\alpha(E_b/N_0)} f_{\text{uplink}}. \quad (2.21)$$

Siendo f_{uplink} el factor de reutilización de frecuencia del sistema, definido por:

$$f_{uplink} = \frac{1}{(F_{uplink} + 1)} = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^J \int_0^{2\pi D} \int_0^{10^{\frac{\zeta_{0,ij}-\zeta_{ij}}{10}}} \frac{G(\psi_{0,ij})-G(\psi_{ij})}{10} \frac{r_{ij} dr_{ij} d\vartheta_{ij}}{\pi D^2}} \quad (2.22)$$

➤ **Estimación de la eficiencia de reutilización de frecuencia**

La eficiencia de reutilización de frecuencia del sistema es uno de los factores principales que afectan a la capacidad del sistema.

La siguiente figura muestra la eficiencia de reutilización de frecuencia para ambos enlaces en función del rango celular. Así hallamos F_{uplink} a partir de la ganancia de la antena, el radio y en ángulo boresight [6].

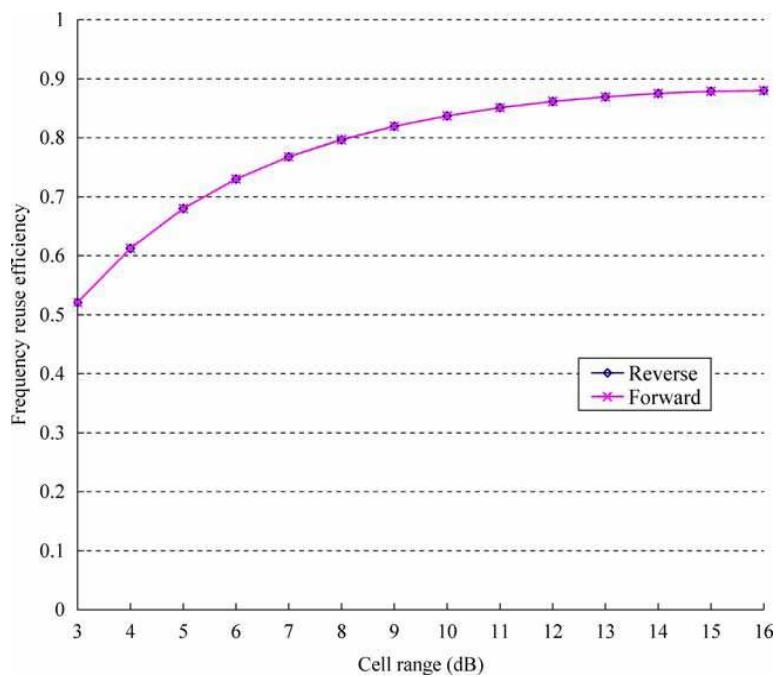


Figura 2.7 Eficiencia de reutilización de frecuencia para ambos links según el rango celular.

La f_{uplink} incrementa con el rango celular, pero queda saturado aproximadamente a unos 16-20 dB de rango celular.

El tamaño de la célula varía de acuerdo con el rango celular. En la **Figura 2.8** se muestra el cálculo del rango celular, como la diferencia entre la ganancia máxima de la antena y la ganancia correspondiente a un determinado ángulo boresight.

2. Estado del arte

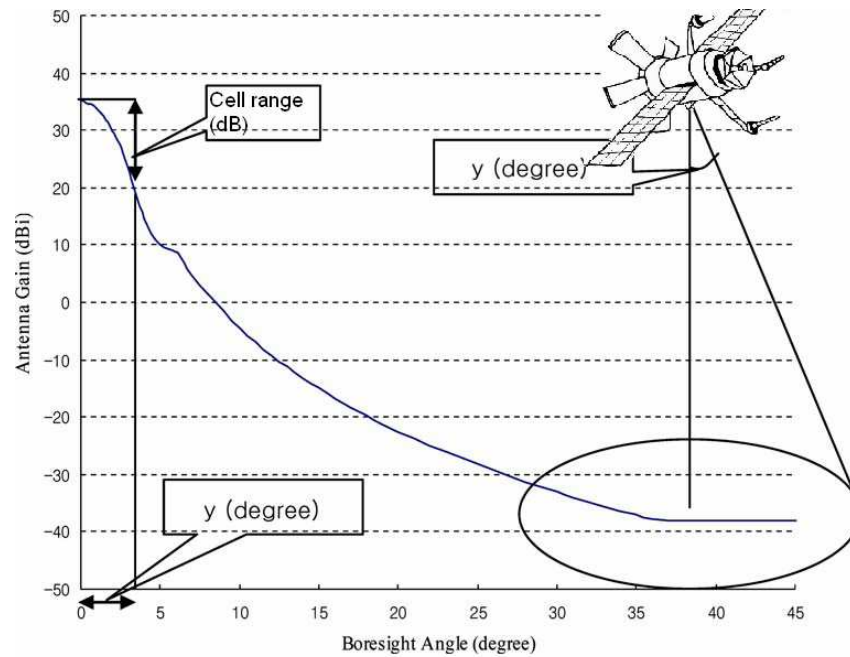


Figura 2.8 Concepto de rango celular.

Con la función `polyfit` de Matlab obtenemos los valores adecuados de f_{uplink} para cada valor de r y así obtener la interferencia intercelular.

Se considera un número de células interferentes hasta la quinta corona (5º tier).

➤ **Control de potencia**

El control de potencia viene incluido dentro de f_{uplink} .

2.2.6.2.2 Capacidad para el enlace descendente

El enlace descendente tiene unas características distintas al enlace ascendente.

- i. La comunicación proviene de un único transmisor, el satélite, hacia múltiples receptores, los móviles.
- ii. La potencia radiada por cada satélite tiene que ser muy superior a la radiada por los móviles en el enlace ascendente, y además, debe radiarse una señal piloto (señal de referencia común) para facilitar la detección y adquisición de la señal por los móviles.

2. Estado del arte

- iii. No es esencial realizar control de potencia como en el enlace ascendente, pero si deseable puesto que en determinadas condiciones permite incrementar la capacidad.
- iv. La interferencia externa recibida por el móvil proviene de un número pequeño de estaciones concentradas (satélite), en vez de un gran número de estaciones distribuidas (móviles).
- v. La interferencia interna es prácticamente nula, por el uso de los códigos ortogonales. No obstante sabemos que en la práctica la ortogonalidad no se mantiene del todo debido al multitrayecto y se debe tener en cuenta la interferencia interna.
- vi. El cálculo de la capacidad es muy complicado, depende de la posición de los móviles en cada momento.

Después de tener claro lo anterior, se realiza el cálculo del enlace descendente a través de múltiples simulaciones. Realizamos el estudio del caso peor, basándonos en las siguientes hipótesis:

- i. Las estaciones base transmiten con la misma potencia máxima. Suponemos que las estaciones están a plena carga.
- ii. La potencia radiada se divide en un porcentaje $(1 - P_{ch})$ destinada al piloto y a los canales comunes y el porcentaje restante P_{ch} , para los canales de tráfico. Podemos poner $P_{piloto} = (1 - P_{ch})$. **(2.23)**
- iii. Cada usuario que se encuentra en una célula tiene asignada una fracción de potencia β_0 . Donde si N es el número de usuarios: $\sum_{i=1}^N \beta_i \leq 1$. **(2.24)**
- iv. Atenuación de la forma $l = kd^n$. **(2.25)** Siendo k la misma para todas las células.
- v. No se considera el efecto de traspaso con continuidad. Este punto queda transparente al usuario. Se introduce por información pero no se contempla en este estudio.

2. Estado del arte

El límite de la capacidad se produce al alcanzar el número de usuarios tal que la potencia que emite la estación base, distribuida entre esos usuarios, es insuficiente para cumplir la SIR requerida.

Tomamos ahora como referencia la geometría del enlace descendente que se muestra en la siguiente figura:

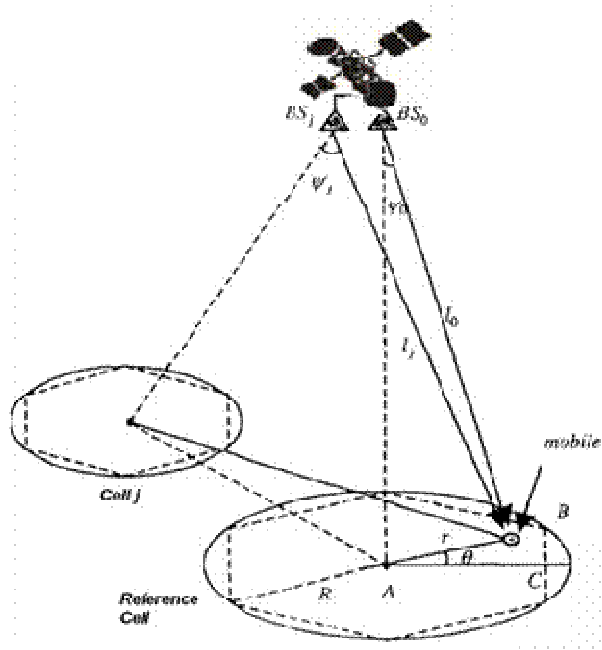


Figura 2.9 Geometría de interferencia en downlink.

Denotamos (r, ϑ) como las coordenadas del usuario bajo estudio.

➤ Modelo de control de potencia

La potencia transmitida a un móvil (i, j) situado a una distancia r viene dada por [7]:

$$P_t(r) = P_{req} f(r). \quad (2.26)$$

Donde P_{req} es la potencia de referencia asignada al usuario situado a $r = R$ y $f(r)$ la función de control de potencia que viene dada por:

$$f(r) = \begin{cases} \left(a + b \left(\frac{r}{r_0} \right)^{n1} \right) \left(\frac{r_0}{R} \right) & \text{para } r \leq r_0 \\ \left(\frac{r}{R} \right)^n & \text{para } r > r_0 \end{cases} \quad (2.27)$$

Donde $n1 > 1$, $a + b = 1$ y r_0 es la distancia a la que el esquema de control de potencia cambia. Para obtener los valores óptimos se utiliza un programa de ordenador.

Siendo $\rho = \frac{N_u}{\pi R^2}$ la densidad de usuarios, tomando una distribución uniforme de N usuarios en cada célula. La potencia total transmitida por la estación base es:

$$P_T = \frac{N_u P_{req}}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R f(r_{ij}, \vartheta_{ij}) r_{ij} dr_{ij} d\vartheta_{ij} = 2N_u P_{req} f_p \quad (2.28)$$

$$\text{Donde } f_{p,nueva} = a \left(\frac{r_0}{R} \right)^{n+2} + \frac{2b}{n1+2} \left(\frac{r_0}{R} \right)^{n+2} + \frac{2}{n+2} - \frac{2}{n+2} \left(\frac{r_0}{R} \right)^{n+2} \quad (2.29)$$

➤ **Potencia recibida**

Podemos expresar la potencia recibida por el móvil (i, j) por la estación base BS_j con:

$$P_r = P_{req} f(r_{ij}, \vartheta_{ij}) 10^{G(\psi_{ij})/10} l_{ij}^{-\mu} 10^{\zeta_{ij}/10} \quad (2.30)$$

Siendo μ el exponente de pérdida de propagación por el espacio libre. Para entorno urbano $\mu = 2$.

➤ **Interferencia intracelular**

Usando las ecuaciones (2.28) y (2.30) podemos presentar la interferencia intracelular de la siguiente forma:

2. Estado del arte

$$I_{\text{intra}} = \alpha \left(P_T 10^{\frac{G(\psi_{ij})}{10}} l_{ij}^{-\mu} 10^{\frac{\zeta_{ij}}{10}} - P_r(r_{ij}, \vartheta_{ij}) \right). \quad (2.31)$$

Simplificada queda:

$$I_{\text{intra}} = \alpha (P_T - S)(1 - \phi). \quad (2.32)$$

La interferencia será la potencia total transmitida por la estación base menos la potencia la que debe llegar al usuario móvil. Todo ello multiplicado por el factor de ortogonalidad. Si las señales son ortogonales, $\phi = 1$ y no existe interferencia interna. En la práctica las señales no son ortogonales del todo debido al multitrayecto.

➤ **Interferencia intercelular**

La interferencia intercelular queda:

$$I_{\text{inter}} = \alpha \sum_{j=1}^J P_T 10^{\frac{G(\psi_{0,ij})}{10}} l_{0,ij}^{-\mu} 10^{\frac{\zeta_{0,ij}}{10}}. \quad (2.33)$$

La interferencia intercelular será la suma de las señales enviadas por las estaciones base de células próximas. Podemos escribirla de la siguiente forma:

$$I_{\text{inter}} = \alpha P_T (B_1 + B_2 + \dots + B_J) = \alpha P_T F_{\text{downlink}}. \quad (2.34)$$

Donde B_1, B_2, \dots, B_J representan la contribución de cada estación base al usuario final, y F_{downlink} la suma de esas contribuciones.

Nota: Obsérvese que cada contribución de interferencia B_1, B_2, \dots, B_J es distinta según su situación, ángulo y distancia.

➤ **Interferencia total en downlink**

La interferencia total será la suma de todas las interferencias:

$$I_{\text{total}} = I_{\text{intra}} + I_{\text{inter}} + P_n. \quad (2.35)$$

2. Estado del arte

$$I_{\text{total}} \approx \alpha(P_T - S)(1 - \phi) + \alpha P_T F_{\text{downlink}} + p_n \approx \alpha P_T (1 - \phi + F_{\text{downlink}}) + p_n \quad (2.36)$$

➤ Cálculo de la capacidad

A partir de las ecuaciones anteriores podemos obtener la capacidad representada según el número de usuarios.

Empecemos nombrando BS_j ($j = 0, \dots, J$) la estación base que sirve a la célula j -ésima como la mostrada en la **Figura 2.9**.

Para un móvil situado en (r, ϑ) en la célula de referencia servida por BS_0 la relación portadora/interferencia viene dada por:

$$\frac{C}{I} = \frac{S_{\text{recibida}}}{I_{\text{intra}} + I_{\text{inter}} + P_n} = \frac{P_{ch} P_t(r) G(\psi_0) l_0^{-\mu} \zeta_0 / \alpha}{P_T G(\psi_0) l_0^{-\mu} \zeta_0 (1 - \phi) + \sum_{j=1}^J P_T G(\psi_j) l_j^{-\mu} \zeta_j}. \quad (2.37)$$

Donde,

P_{ch} : es la potencia asignada a los canales usuario, es decir excluyendo al canal piloto y a los canales de control. Suele tener un valor de ≈ 0.8 .

l_j : Distancia del móvil (i, j) a BS_j (spot beam o vano que sirve a la celda j).

l_0 : Distancia del móvil (i, j) a BS_0 (spot beam o vano que sirve a la celda de referencia).

ζ_j : Pérdidas por sombra correspondiente al camino l_j .

ζ_0 : Pérdidas por sombra correspondiente al camino l_0 .

ψ_j : Ángulo bajo el que es visto el móvil (i, j) y el centro de la celda j , relativo a BS_j . (Ángulo boresight)

ψ_0 : Ángulo bajo el que es visto el móvil (i, j) y el centro de la celda de referencia, relativo a BS_0 . (Ángulo boresight)

2. Estado del arte

$G(\psi_j)$: Ganancia normalizada de la antena receptora normalizada evaluada en ψ_j .

$G(\psi_0)$: Ganancia normalizada de la antena receptora normalizada evaluada en ψ_0 .

μ : Es el exponente de pérdidas de propagación por el espacio libre. (En un entorno urbano $\mu=4$).

α : Factor de actividad.

ϕ : Factor de ortogonalidad.

Debido a la geometría de satélite, las dimensiones de las antenas son insignificantes con respecto a la altura del satélite, de este modo podemos decir que las señales procedentes de un satélite recorren aproximadamente el mismo camino siendo $l_0 \approx l_j$ y $\zeta_0 \approx \zeta_j$.

La interferencia extracelular debido a otros satélites es despreciable comparado con la gran distancia de cobertura, por tanto no la consideramos.

La relación señal/interferencia queda:

$$\frac{C}{I} \approx \frac{P_{ch} P_t(r)/\alpha}{P_T \gamma(r, \vartheta)}. \quad (2.38)$$

Donde,

$$\gamma(r, \vartheta) = \frac{(1 - \phi)G(\psi_0) + \sum_{j=1}^J G(\psi_j)}{G(\psi_0)} \quad (2.39)$$

Sustituyendo por P_T con la ecuación (2.28) en (2.38) obtenemos:

$$\frac{C}{I} \approx \frac{P_{ch} P_{req} f(r)/\alpha}{2N_u(r) P_{req} f_p \gamma(r, \vartheta)} \approx \frac{P_{ch} f(r)/\alpha}{2N_u(r) f_p \gamma(r, \vartheta)}. \quad (2.40)$$

Donde $N_u(r)$ es el número de usuarios en el enlace descendente.

2. Estado del arte

Ahora veamos que sucede con el cociente $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)$

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = \left(\frac{C}{I}\right) G_p. \quad (2.41)$$

Donde, como en el uplink, G_p es la ganancia de procesamiento en WCDMA.

Utilizando la ecuación (2.40) obtenemos:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) \approx \frac{G_p P_{ch} f(r)/\alpha}{2N_u(r) f_p \gamma(r, \vartheta)}. \quad (2.42)$$

Despejando de la ecuación anterior obtenemos el número de usuarios para el enlace descendente a una distancia r .

$$N_u(r) \approx \frac{G_p P_{ch} f(r)/\alpha}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right) (2f_p) \gamma(r, \vartheta)}. \quad (2.43)$$

Finalmente, la capacidad para downlink queda como se muestra a continuación:

$$C_{\text{downlink}} = \min[N(r)]. \quad (2.44)$$

2.2.6.2.3 Capacidad total

La capacidad total del sistema estará limitada por el enlace que menos usuarios puede servir.

$$\text{Capacidad} = \min(C_{\text{uplink}}, C_{\text{downlink}}) \quad (2.45)$$

2.3 SISTEMAS POR SATÉLITE

Las comunicaciones móviles por satélite van a permitir comunicaciones entre estaciones terrenas y móviles en cualquier parte del mundo. Actualmente los sistemas celulares terrestres sólo dan servicio a la mitad de la población mundial, bien porque no haya infraestructura en la zona en la que los usuarios se encuentran, bien por el tipo de información que necesiten comunicar, no tienen acceso a ningún sistema de comunicaciones. Y no sólo eso sino que cerca del 90% de la superficie terrestre se encuentra fuera del alcance del cableado y de las redes de comunicaciones convencionales [1][9][10].

El 71% de la superficie terrestre está cubierta de agua. Las comunicaciones marítimas quedan un poco aisladas al no tener línea visible con la estación base, y por la dificultad de poner repetidores intermedios que reciban y envíen la señal. Algunas de las redes de comunicaciones móviles terrestres, se encuentran desparramadas para comunicar con regiones aún no enlazadas, además existen diversas partes del terreno en las que es difícil y cara la instalación de estaciones terrestres. Las comunicaciones por satélite se han convertido en una solución a estos problemas.

Los satélites se lanzan al espacio y se sitúan en una órbita circular o elíptica, se mantienen en ella gracias al equilibrio entre la fuerza gravitacional de la Tierra, y la fuerza centrífuga que sufre el satélite al describir el movimiento circular con la Tierra. Los satélites que describen órbitas circulares y con velocidad constante son utilizados para comunicaciones, mientras que los que se mueven en órbitas elípticas y con velocidad variable se suelen asignar para actividades de reconocimiento.

Con las comunicaciones por satélite se ofrecen también buenos medios de comunicación entre aviones y tierra. En el **Capítulo 5** se verá un ejemplo de comunicación aérea sobre la superficie europea.

Las comunicaciones por satélite competían con las comunicaciones terrestres, no obstante, con la aparición de la fibra óptica, se redujo el tráfico potencial de telefonía y datos que se cursaban a través de ellos, obligando a explorar nuevos nichos de mercado ya que el transporte punto a punto había sido dominado por la fibra. Se prepararon para competir en escenarios diferentes y, se han concentrado en mercados cerca del usuario final como los servicios Directo al Hogar (Direct to Home DTH) que llevan Difusión de Video Digital (Digital Video Broadcasting DVB) y Difusión Digital de Multimedia por Satélite

2. Estado del arte

(Digital Multimedia Broadcast by Satellite). En la actualidad se quiere ampliar estos servicios y proporcionar, en caso de ser posible, comunicaciones móviles con cobertura global y servicios de voz y datos en aéreas localizadas donde el cableado terrestre no sea factible.

Se pretende un sistema global de comunicaciones móviles por satélite que permita el acceso a lugares remotos o de difícil acceso sin necesidad de grandes infraestructuras terrestres adicionales, complementado y supliendo el sistema terrestre. A diferencia con la generación anterior, las comunicaciones móviles por satélite ya no forman un sistema a parte del componente terrestre, sino que son reconocidos como parte integral del sistema de comunicaciones en vista de su capacidad de proveer amplias zonas de cobertura, de difundir información y de facilitar un verdadero roaming internacional. En IMT-2000 los componentes terrestres y satelital toman el nombre de T-UMTS y S-UMTS respectivamente, ambos compatibles entre si como se muestra en la **Figura 2.10**.

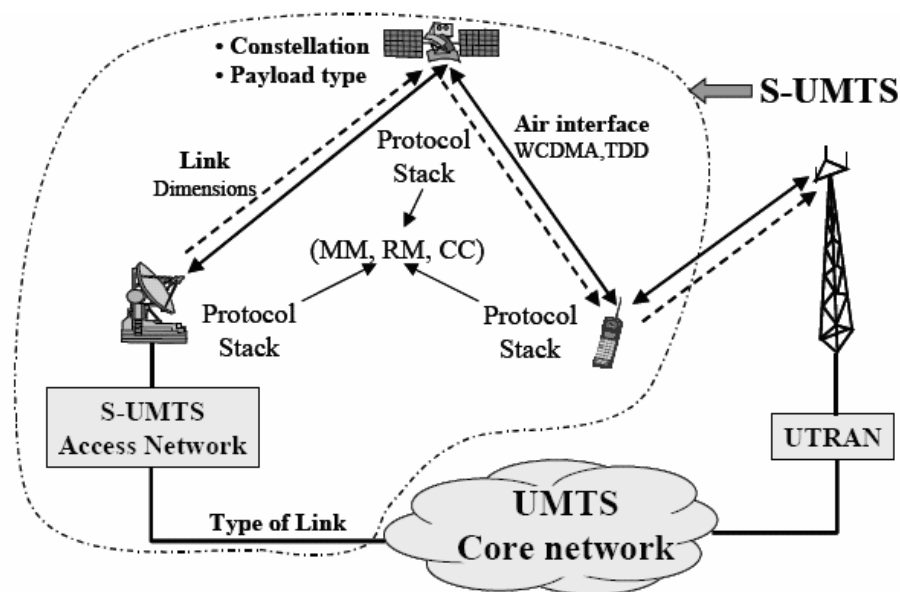


Figura 2.10 Arquitectura de los componentes terrestre y satélite de UMTS.

Los organismos reguladores internacionales buscan un estándar que permita comunicaciones móviles vía satélite a cualquier parte del planeta y las Redes de Comunicaciones Personales por Satélite (S-PCN - Satélite Personal Communications Networks) son las adecuadas para ofrecer tales servicios.

2.3.1 Función actual y ventajas

Las comunicaciones por satélite ayudan a completar la cobertura de una zona utilizando redes locales, extienden la cobertura a usuarios que se encuentren fuera de esa zona y utilizan el sistema MSS (Mobile Satellite Service) para usuarios marítimos y aeronáuticos. En caso de desastre natural en un área local, se podría utilizar la comunicación por satélite con un simple móvil.

Las comunicaciones por satélite permiten en si mismas lograr una gran superficie de cobertura. El tamaño de una celda procedente de un satélite equivale a muchas células terrestres y por tanto dependiendo de la potencia aplicada, pueden dar servicio a muchos más usuarios. Esto produce una vía alternativa para la situación de los actuales sistemas de tercera generación inalámbricos IMT-2000.

Se suelen emplear altas frecuencias del orden de los GHz ya que, al no haber problemas de visión directa, las ondas son más inmunes frente a las interferencias y tienen mayor direccionalidad, con lo que podemos acceder a zonas concretas del planeta.

Se hace necesario el estudio sobre lanzamientos espaciales que produzcan mejoras en el consumo de combustible y utilizar estas mejoras para reducir gastos y enriquecer las capacidades de los satélites.

2.3.2 ¿Qué es un satélite de comunicaciones?

Un satélite de comunicaciones es un satélite artificial dedicado a servir a las telecomunicaciones utilizando frecuencias de radio y microondas. Estos satélites se utilizan como repetidores de microondas localizados en el cielo, abarcan un ancho de banda muy grande, de alrededor de 500MHz. Cada satélite está equipado con múltiples antenas y transpondedores. El transpondedor recibe, demodula, amplifica y retransmite la señal. Cada uno de los haces da cobertura a una pequeña región del planeta.

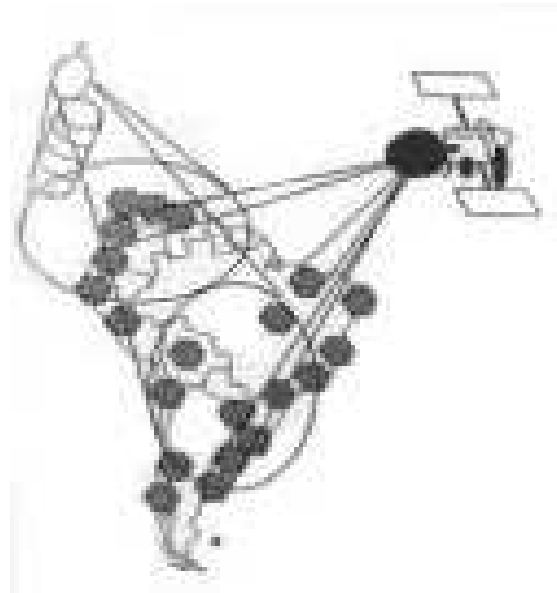


Figura 2.11 Huella de un satélite de comunicaciones.

2.3.3 Elementos de un sistema satelital

Un sistema de comunicaciones por satélite está formado por [9]:

- Estaciones terrenas. Para la transmisión y recepción de las señales. Las estaciones terrenas pueden ser de solo transmisión, de solo recepción o de ambas cosas y están compuestas por:
 - Subsistema de antena.
 - Subsistema de seguimiento (apunta el haz al satélite deseado).
 - Subsistema de transmisión/recepción en radiofrecuencia. (dependiendo del tipo de estación que sea).
 - Etapa de conversión de frecuencia.
 - Etapa de modulación/demodulación.
 - Sistema de conexión con las redes terrenas.
 - Suministro de energía para toda la estación.
- Estaciones de seguimiento y control. Junto a las estaciones terrenas tenemos las estaciones de seguimiento y control, se consideran el mismo módulo. Se procesa la información para la toma de decisiones, estructuración del sistema y la corrección. Puede subdividirse en:

2. Estado del arte

- Telecontrol y telemetría.
 - Pruebas periódicas de los parámetros del módulo de comunicaciones del satélite.
 - Supervisión de la calidad y características de las señales emitidas por el satélite.
- Satélite. Recogen, amplifican y retransmiten la señal. Los satélites constan de dos módulos distintos para su perfecto funcionamiento:
 - Módulo de servicio: Para el mantenimiento del satélite en orbita.
 - Subsistema de suministro de energía.
 - Subsistema de estabilización del satélite.
 - Subsistema de control orbital.
 - Subsistema de control térmico.
 - Subsistema de telecontrol y telemetría.
 - Estructura mecánica del propio satélite.
 - Módulo de comunicaciones específico para la función o funciones a cumplir.
 - Antena de recepción.
 - Receptor conversor de frecuencia de banda ancha.
 - Multiplexor de entrada.
 - Amplificadores de canal.
 - Amplificadores de potencia.
 - Multiplexor de salida.
 - Antena de transmisión.
 - Nivel de redundancia en las partes más críticas para asegurar su pleno funcionamiento.
 - Si el sistema es regenerativo además consta de un procesador a bordo, sistema de modulación y demodulación.
 - Paneles solares para proporcionar la energía necesaria al satélite para su correcto funcionamiento.

2. Estado del arte

- Baterías para realizar las funciones de mantenimiento durante los eclipses.

2.3.4 Diseño de un sistema de comunicaciones

El diseño de un satélite de comunicaciones es un proceso complicado, hay que tener en cuenta diversos factores que interactúan unos con otros y la mayoría de las veces no son compatibles. El satélite debe ser pequeño, duro y ligero para poder ponerlo en órbita, puesto que esto es caro. Debe utilizar el mínimo posible de energía pero a su vez tiene que constar de todos los elementos necesarios para su correcto funcionamiento, incluidos en algunos casos los niveles de redundancia, aunque añadan peso al satélite. La potencia de transmisión también está relacionada con la masa del satélite, ésta depende del tamaño de los amplificadores de potencia, de los paneles solares, del combustible, etc... Por tanto hay un compromiso entre funcionalidad y la masa del satélite. Las estaciones terrenas deben ser potentes, sofisticadas, pero también baratas para que puedan ser compradas por los usuarios.

Se deben tener en cuenta las pérdidas de cada elemento del sistema, las pérdidas de propagación y con frecuencias superiores a 10GHz las pérdidas por lluvia, para una buena recepción de la señal.

En el diseño del sistema de comunicaciones es fundamental tener en cuenta, que existe un movimiento de los satélites respecto a los usuarios en tierra en todas las constelaciones excepto las que operan con satélites GEO, esto produce complejidad en el diseño y múltiples procesos de handover entre satélites obligándolos a tener una capacidad de procesamiento adicional.

2.3.5 Tipos de órbitas

En este apartado clasificaremos las distintas órbitas de satélites. Aunque existen varias formas de clasificar a los satélites, nos centramos en distinguirlos por su altura, ya que poseen distintas características según la altura a la que se encuentren. Los estudios de capítulos posteriores se han realizado para los siguientes tipos de satélites.

- i. Satélites LEO (Low Earth Orbit): se encuentran entre 500 y 1500 Km. de altura.

2. Estado del arte

- ii. Satélites MEO (Medium Earth Orbit): se encuentran en el espacio intermedio entre los satélites LEO y los GEO. Normalmente a 10.000 Km. de altura.
- iii. Satélites GEO (Geostationary Earth Orbit): Se encuentran a 35.786,04 Km. sobre el ecuador terrestre, órbita conocida como Cinturón de Clarke. A esta altura el periodo orbital del satélite coincide con el de rotación de la Tierra.

La siguiente figura muestra una idea sobre la ubicación de los satélites [11].

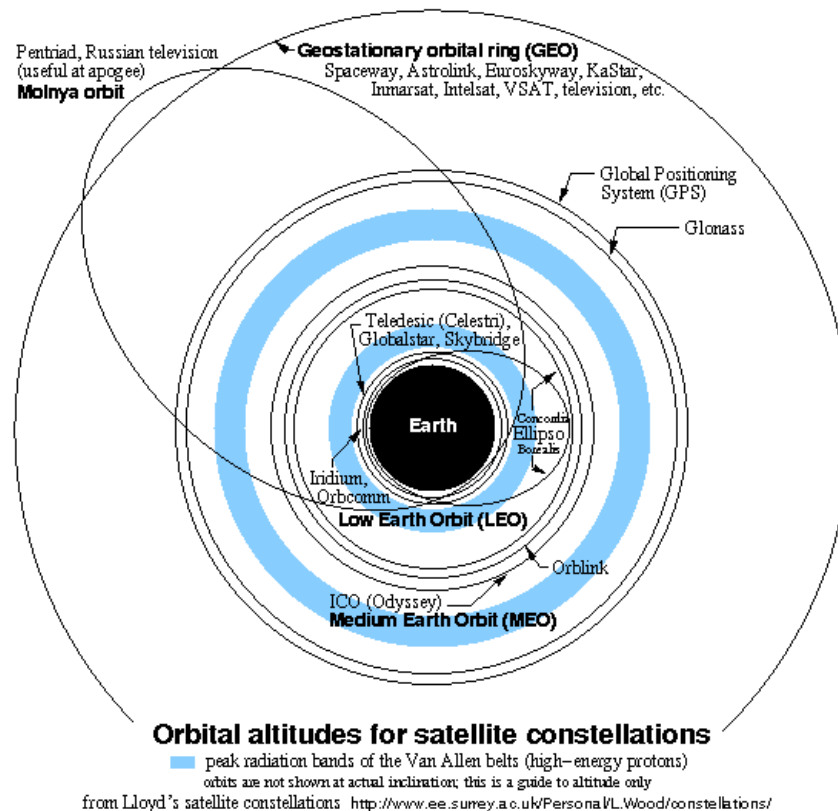


Figura 2.12 Ubicación de órbitas de satélites en el espacio.

2.3.6 Diversidad de satélites

En sistemas de comunicaciones por satélite la línea de vista del usuario al satélite es fundamental para mantener velocidades adecuadas en la transmisión. A los sistemas GEO esto no les influye, ya que al viajar a la misma velocidad de rotación de la Tierra, son siempre visibles para un usuario que se encuentre en su superficie. No obstante esto no ocurre con los sistemas no Geostacionarios, ya que los satélites se desplazan sobre la superficie del planeta apareciendo y desapareciendo por el horizonte desde el punto de vista de un usuario del globo terrestre.

2. Estado del arte

La diversidad de satélites es una cualidad que tienen los satélites no geoestacionarios para permitir que un usuario pueda “ver” varios satélites a la vez. Se evita así la probabilidad de bloqueo al permitir el cambio de un satélite a otro en provecho del usuario e incluso se podría aumentar la capacidad si se establece comunicación con varios de ellos a la vez. Un usuario, dependiendo de su posición, puede “ver” de uno a tres satélites si el sistema es no geoestacionario, mientras que si el sistema es geoestacionario sólo se “verá” un único satélite constantemente, debido a su condición de amplia cobertura.

2.3.7 Bandas de frecuencia para satélites

El espectro electromagnético es un recurso limitado que debemos administrar con el objetivo de prevenir un posible caos en el cielo. Por ello se han establecido acuerdos internacionales sobre quién puede hacer uso de las frecuencias y cuáles son esas frecuencias.

Las bandas de frecuencias en las que operan los satélites se basan en letras y son las siguientes:

| Banda | Rango-Ghz. |
|-----------------------------|------------|
| L (Comunicaciones Móviles) | 1-2 |
| S (Móviles/Reservada) | 2-4 |
| C (Comercial) | 4-8 |
| X (Reservada) | 8-12 |
| Ku (Comercial) | 12-18 |
| K (Radioenlaces/Microondas) | 18-27 |
| Ka | 27-40 |

Figura 2.13 Bandas de frecuencia para satélites.

En nuestro estudio nos centraremos en las bandas L y S, entorno a los 2GHz. Es la banda propuesta ITU para el componente satélite en UMTS y donde trabajan los sistemas de WCDMA en comunicaciones móviles por satélite. En el **Capítulo 3** se realizarán algunos estudios en 4, 6 y 8 GHz, para ampliación de resultados.

2.4 DESCRIPCIÓN DE NUESTRO SISTEMA

Nuestra atención se centra en el cálculo aproximado de la capacidad que proporcionan los sistemas WCDMA en los distintos sistemas de satélites.

2.4.1 Estudio de los distintos escenarios

El principal objetivo de este proyecto se basa en el estudio de la capacidad del sistema WCDMA en los distintos tipos de satélites de comunicaciones, por tanto en los distintos escenarios:

- i. Sistemas WCDMA por satélites LEO (Satélites de baja altura).
- ii. Sistemas WCDMA por satélites MEO (Satélites de altura media).
- iii. Sistemas WCDMA por satélites GEO (Satélites geoestacionarios).

En este apartado se concentra la información general necesaria y común para nuestros sistemas.

2.4.2 Arquitectura del sistema

Como hemos comentado anteriormente, los satélites de comunicaciones son sistemas pensados para completar la comunicación de una zona que no tenga cobertura terrestre y/o proporcionar servicios de broadcast distintos a los proporcionados por el segmento terrestre.

2. Estado del arte

El escenario general es el que se muestra a continuación:

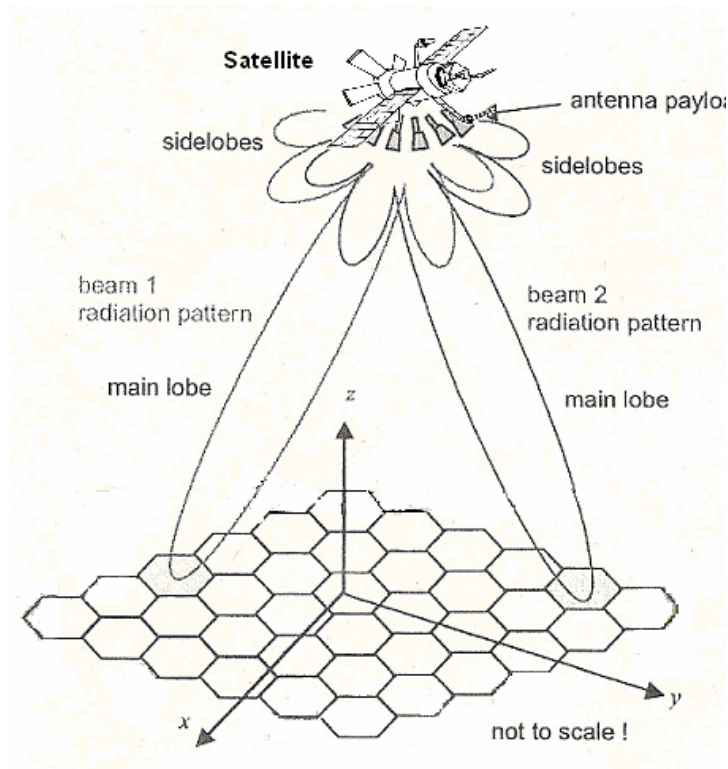


Figura 2.14 Estructura del sistema satélite.

Cada satélite concentra su potencia de transmisión en varios haces (*spot beams*). Cada haz cubre una célula del suelo y todas las células juntas definen la huella de cobertura (*footprint*) del satélite. Esto, en WCDMA tiene una ventaja, ya que la potencia transmitida se centra en un área mucho más pequeña que el área total del satélite.

En la figura se observa una célula central rodeada de células vecinas que actuarán como células interferentes.

Por la relación **capacidad-cobertura**, hay dos opciones a la hora de definir la capacidad celular. La primera es dar un radio fijo de célula y limitar el número de usuarios que caben en cada una. La segunda trata de dejar el número de usuarios sin límite y sin radio fijo, a medida que se activen más o menos usuarios en la célula o células vecinas, el radio crecerá o decrecerá.

En este estudio se realiza el cálculo fijando primero el radio, para así calcular el número de usuarios posibles del sistema.

2.4.3 Bandas de frecuencia utilizadas

A continuación se aclaran los distintos enlaces existentes. Se utilizan los valores detallados a continuación para la mayoría de las simulaciones, salvo en algunos casos especiales en lo que se indique lo contrario.

En el enlace *terminal de usuario-satélite* se ha elegido la frecuencia de 1.996GHz perteneciente a la banda L para el Uplink y una frecuencia de 2.186GHz perteneciente a la banda S para el Downlink.

Para los enlaces entre *estación fija-satélite* se ha elegido una frecuencia de 6GHz. Perteneciente a la banda C (banda comercial 4-8GHz.).

Los enlaces entre satélites se realizan a 60GHz.

Los dos últimos enlaces se exponen a modo informativo, puesto que no se contemplan en las simulaciones.

2.4.4 Descripción de la cobertura del sistema

En nuestro sistema vamos a definir que un satélite abarca de 2 a 5 coronas celulares más la central, dependiendo de tipo de satélite con el que nos encontremos.

Con 5 coronas esto hace un total de:

$$1 + 6 + 12 + 18 + 24 + 30 = 91 \text{ células/ satélite}$$

Como cada célula es servida por un spot-beam (haz o vano del satélite) tendremos que cada satélite posee 91 spot-beams.

2. Estado del arte

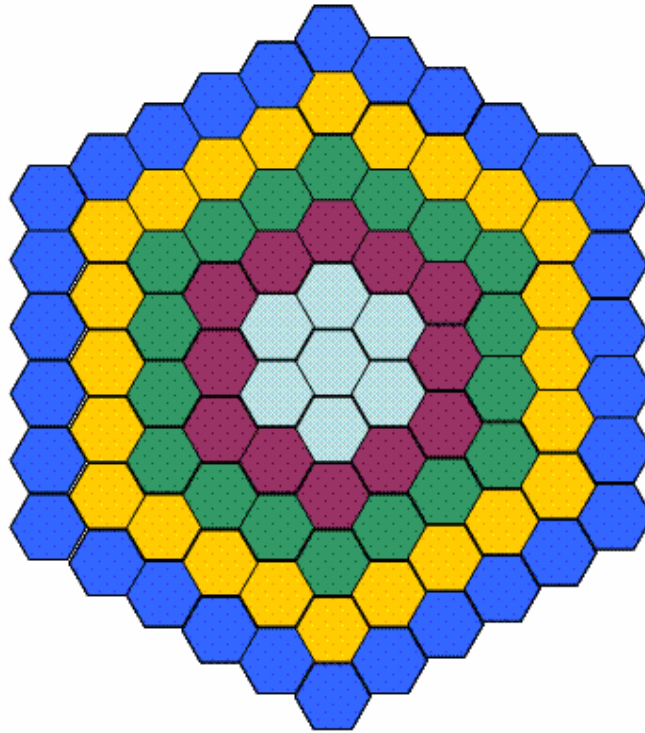


Figura 2.15 Clúster de 5 coronas más la célula central.

Podemos calcular la distancia en línea recta que abarcaría el satélite de la forma siguiente:

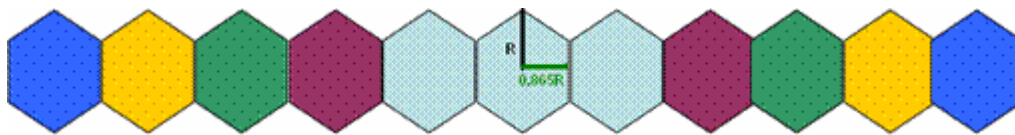


Figura 2.16 Cálculo de la distancia LOS.

Células en línea = 11.

Lado del hexágono = $0.86 \times R$.

$$\text{Distancia línea de cobertura} = 11 \times 2(0.86)R = 11 \times 1.73R. \quad (2.46)$$

A medida que nos alejamos de la célula central, estas se van convirtiendo en celdas ovaladas debido a la inclinación y la distancia del satélite.

Para el resto de configuraciones, la metodología será la misma a no ser que se indique lo contrario. En cada capítulo se expondrá la disposición y el número de celdas por satélite utilizadas.

2.4.5 Superficie terrestre

Para calcular el número de satélites necesarios para una cobertura global, primero tenemos que conocer algunos parámetros sobre nuestro planeta.

$$\begin{aligned} \text{Radio de la Tierra} &= 6378 \text{ Km.} \\ \text{Circunferencia de la tierra} &= 2\pi R_{\text{Tierra}} = 40074 \text{ Km} \end{aligned} \quad (2.47)$$

Con esto podemos empezar a hacer nuestros cálculos.

2.4.6 Comprobación *Line of Sight*

La línea LOS es la línea de visión desde el satélite hasta la superficie horizonte de la Tierra. Para satélites queda definida de la siguiente forma [12]:

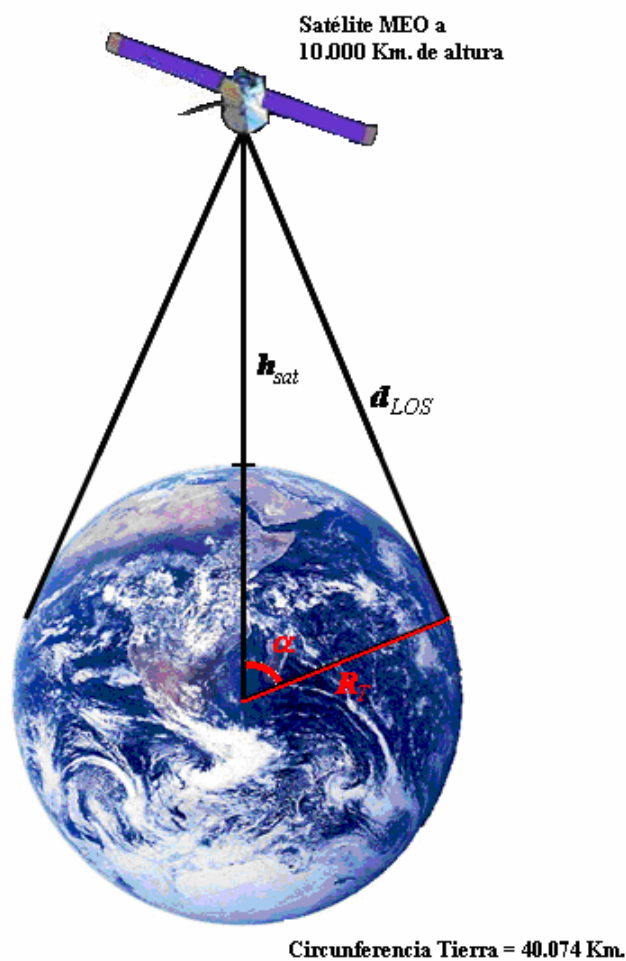


Figura 2.17 Descripción de la distancia Line Of Sight.

2. Estado del arte

$$d_{Los} (Km) = 3.54 \sqrt{h_{\text{satélite}} (m)} \quad (2.48)$$

Siendo $h_{\text{satélite}}$ la altura del satélite en metros.

Lo que se pretende es dar cobertura a toda una esfera, no obstante habrá zonas a las que el satélite no pueda acceder ya que se pierden tras la curva terrestre, por tanto además de necesitar varios satélites, se debe comprobar si la *Distancia Línea de cobertura* calculada en el **apartado 2.4.4** está dentro de la distancia *Line of Sight* y no nos estamos dejando zona alguna a la que servir.

Para ello hacemos la prueba de “Line-of-sight” de modelo Tierra curva:

- Se calcula la *Distancia Línea de cobertura*.
- Se calcula la distancia LOS según la fórmula (2.48)
- Calculamos el ángulo α y con él el arco que forma con la circunferencia según las fórmulas:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{d_{Los}}{\text{Radio de la Tierra}}\right). \quad (2.49)$$

$$\text{Distancia curva} = 2\alpha(\text{Radio de la Tierra}). \quad (2.50)$$

- Comparamos la *Distancia Curva* con la *Distancia Línea de cobertura*.
 - Si *Distancia Curva* \geq *Distancia Línea de cobertura*. Perfecto, no hay zona a la que no llegue la señal.
 - Si *Distancia Curva* $<$ *Distancia Línea de cobertura*. Se deben hacer cambios como:
 - Poner más satélites.
 - Disminuir el número de coronas circulares
 - Disminuir el radio de cobertura de cada célula
 - Cambiar altura del satélite

Estos cálculos se realizarán con un programa hecho previamente en Matlab e introduciendo distintos valores para la altura y los radios de cobertura.

2. Estado del arte

2.4.7 Número de satélites

Con el radio de cobertura, la altura del satélite y la circunferencia de la Tierra podemos calcular cuántos satélites/plano(órbita) son necesarios para cubrir la Tierra de forma global.

Para cubrir una órbita:

$$N^{\circ}_{\text{satélites en una órbita}} = \frac{\text{Circunferencia de la Tierra}}{\text{Distancia línea de cobertura}}. \quad (2.51)$$

Para cobertura global:

$$N^{\circ}_{\text{satélites para cobertura global}} = (N^{\circ}_{\text{satélites en una órbita}})^2 \quad (2.52)$$

En la **Figura 2.18** se muestra la relación entre el número de satélites necesarios para cobertura global y la altura de éstos.

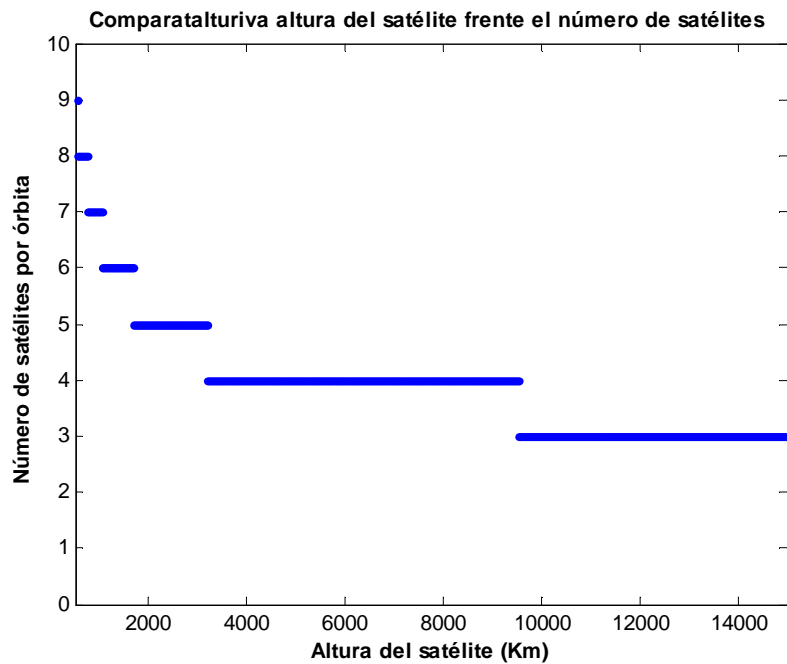


Figura 2.18 Relación entre el número de satélites para cobertura global y su altura.

En la **Figura 2.19** se muestra la relación entre el número de satélites necesarios para cobertura global y el radio de cobertura por celda.

2. Estado del arte

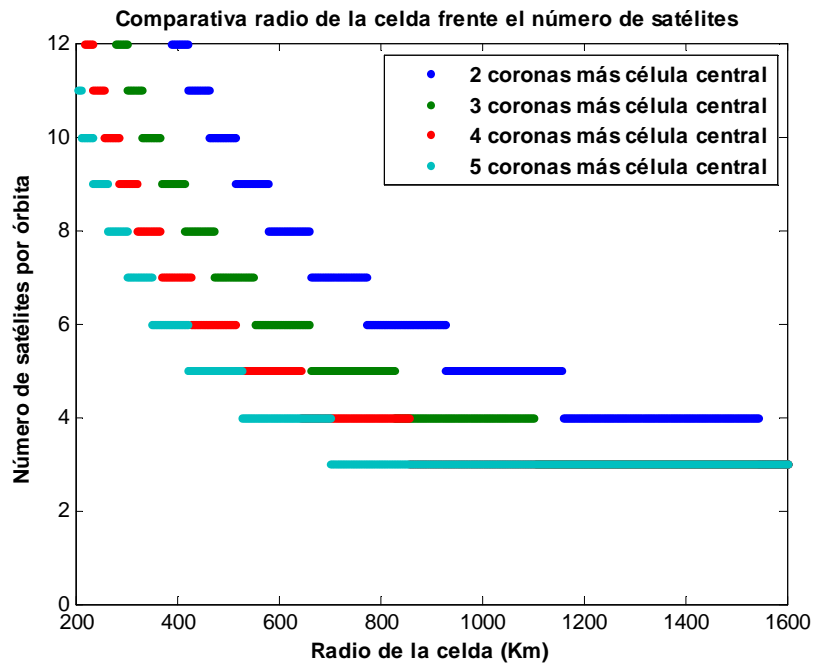


Figura 2.19 Relación entre el número de satélites para cobertura global y el radio de la celda.

En la **Figura 2.19** no se ha tenido en cuenta la distancia *Line-of-Sight*, ya que se realiza independientemente de la altura. En el apartado simulaciones de cada capítulo se comprobará esta limitación.

2.4.8 Relación entre el número de usuarios y el número de satélites

Existe un compromiso entre el número de usuarios y el número de satélites en el sistema.

Cuanto mayor radio de célula tengamos, mayor será la zona de cobertura y menos satélites tendremos que utilizar. No obstante cuanto mayor sea el radio de cobertura, más usuarios estarán en la zona para acceder al satélite y la potencia se tendrá que repartir entre más superficie.

En caso contrario, si tenemos un radio de célula muy pequeño, se podrá dar cobertura a más densidad de usuarios, pero se necesitarán más satélites para completar la cobertura de un terreno, y esto no es deseable.

2. Estado del arte

En los siguientes capítulos se realiza el estudio la capacidad de los sistemas WCDMA por satélites en los distintos escenarios posibles, proporcionando el “mejor” resultado siguiendo los cálculos facilitados en estos últimos apartados.

3 SISTEMAS WCDMA CON SATÉLITES LEO

3.1 INTRODUCCIÓN

Los satélites LEO están situados en órbitas de baja altura. Describen típicamente órbitas circulares a una altura que varía entre los 500 y 2000Km y sus periodos orbitales se encuentran entre los 90 y 120 minutos. Los ángulos de inclinación están entre los 45-90° [9].



Figura 3.1 Satélite de órbita de baja altura.

En los inicios de la tecnología de comunicaciones por satélite se utilizaron los satélites LEO como una etapa para llegar al lanzamiento de los satélites geoestacionarios, ya que eran más pequeños, se situaban a menor altura y costaba menos lanzarlos al espacio.

En sus comienzos fueron pensados para sistemas de navegación, predicción, vigilancia meteorológica y observación de la Tierra, pero nunca como sistemas de comunicaciones. Los satélites vuelan a muy baja altura, esto implica un tiempo orbital pequeño y por tanto sólo son visibles durante unos minutos desde un punto de la superficie terrestre.

No obstante, el concepto de constelación de satélites y el traspaso de la comunicación de un satélite a otro, hace posible y muy viable las comunicaciones con satélites LEO. Cuando el satélite deja de ser visible por el usuario, se traspasa la comunicación al siguiente satélite visible que haya.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

○ **Principales ventajas:**

- ✓ Las principales ventajas derivan en su magnitud de la cercanía de estos satélites a la Tierra.
- ✓ Al estar a una altura más baja, necesitan un sistema de lanzamiento más barato que los sistemas GEO y MEO.
- ✓ Se produce una minimización en los retardos (<10ms). Permite la generación de aplicaciones en tiempo real, como la transmisión de voz, videoconferencia y aplicaciones avanzadas.
- ✓ Se reduce la potencia necesaria para el envío de las señales, desde la Tierra y desde el satélite. Esto se debe a que la señal sufre menores pérdidas de propagación.
- ✓ Son más pequeños y pesan menos.
- ✓ El tamaño de la huella de cobertura que deja el satélite es mayor que los sistemas celulares.
- ✓ Terminales más pequeños.
- ✓ Uso eficiente del espectro.

○ **Principales inconvenientes:**

- ✗ Los principales inconvenientes derivan del elevado número de satélites que se necesitan para una cobertura global debido a su baja altura. Son por tanto inevitables numerosos lanzamientos espaciales.
- ✗ Se necesitan muchos satélites para cubrir un área de cobertura exigida y con continuidad.
- ✗ El reducido tiempo de visibilidad del satélite desde un punto del planeta requiere handovers muy frecuentes. Aproximadamente cada 15 minutos.
- ✗ La ganancia de la antena del satélite cambia con el cambio de ubicación del mismo.
- ✗ La constelación de satélites puede necesitar un diseño orbital complejo con un mantenimiento sofisticado.
- ✗ Continuos eclipses.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

- ✗ Tiempo de vida limitado (de 5 a 8 años) y necesidad de reemplazo.
- ✗ Generan basura espacial.
- ✗ La señal recibida puede ser susceptible a sombras por estar cerca de la superficie terrestre.
- ✗ Necesidad de corrección continua de la órbita debido al efecto de la atmósfera.
- ✗ Posible necesidad de búsqueda del satélite por el Terminal.
- ✗ Desviación Doppler.
- ✗ Antenas dirigibles por el segmento terrestre de seguimiento capaces de seguir el rastro a los satélites. (Se soluciona con una antena del tipo array en fase).
- ✗ Direccionamiento mediante enlaces intersatélites. Problema que surge al direccionar la señal entre dos puntos alejados de la Tierra.

3.2 PRINCIPALES SERVICIOS

Las principales utilidades para las que se usan estos satélites son:

- Comunicaciones móviles.
- Teledetección (remote sensing).
- Investigación espacial.
- Vigilancia.
- Meteorología.
- etc.

3.3 DATOS DEL SISTEMA

3.3.1 Diagramas de radiación de la antena del satélite

La elección de la antena de los satélites es muy importante para estas comunicaciones. La capacidad del sistema tiene relación con su ganancia, y ésta varía según el ángulo en el que el usuario se encuentre.

La ganancia máxima de la antena dependerá del lóbulo principal y la mínima del lóbulo secundario. Cuanta más diferencia haya entre el lóbulo principal y los lóbulos secundarios, más fácil será el diseño de la antena en la práctica. Esta diferencia será de entre 15 y 40 dB, sin bajar nunca de los 15 dB.

Para las comunicaciones con satélites LEO hemos usado la fórmula de la ganancia de una antena. La ganancia de una antena en función del ancho de haz y de la eficiencia es [12]:

$$G = \eta \frac{48360}{\vartheta_{3dB}^2} \quad (3.1)$$

En las proximidades del máximo la variación de la ganancia se puede aproximar como:

$$G(\vartheta) = [G_{\max}] - 12 \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_{3dB}} \right)^2 \quad (3.2)$$

La ganancia máxima de la antena se incrementa con el cuadrado de la frecuencia. Al utilizar una frecuencia distinta para ambos enlaces, la ganancia máxima de la antena del satélite variará de uno a otro.

Datos para uplink:

- Como ganancia máxima de la antena tenemos: $G_{\max} = 35$ dB .
- Como ganancia mínima se ha elegido $G_{\min} = 22$ dB para la zona de cobertura, es decir, para ángulos menores a 45° .
- $\vartheta_{3dB} = 3^\circ$
- $\eta = 0.6$.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

El diagrama de radiación de la antena del satélite para uplink viene representado en la **Figura 3.2**:

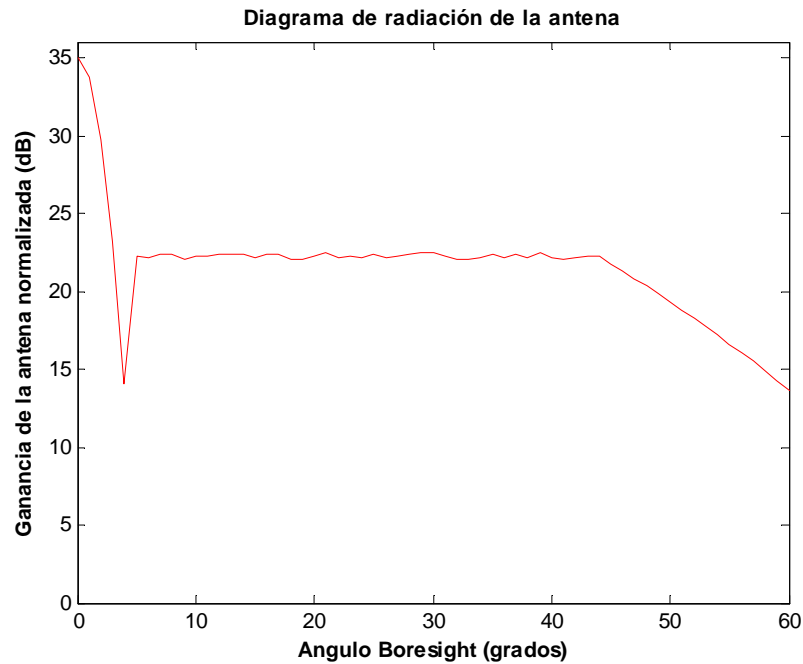


Figura 3.2 Diagrama de radiación de la antena del satélite LEO en uplink.

Hallamos la ganancia máxima para downlink:

$$Delta_G = G_{\max_2} - G_{\max_1} = 10 \log_{10} \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \quad (3.3)$$

Introduciendo nuestros valores en (3.3) obtenemos la nueva G_{\max} :

$$Delta_G = 10 \log_{10} \left(\frac{2.186}{1.995} \right)^2 = 0.789 \text{ dB} \quad (3.4)$$

$$G_{\max_2} = G_{\max_1} + 0.789 = 40 + 0.789 = 35.789 \text{ dB}$$

Con la fórmula (3.1) calculamos la nueva anchura de haz $\vartheta_{3dB} = 1.555^\circ$, un 91% la anchura de haz del uplink. Con esto ya podemos representar la ganancia de nuestra antena para el enlace descendente.

Datos para downlink:

- Como ganancia máxima de la antena tenemos: $G_{\max} = 35.789 \text{ dB}$.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

- Como ganancia mínima se ha elegido $G_{\min} = 22.789 \text{ dB}$ para la zona de cobertura, es decir, para ángulos menores a 45° .
- $\vartheta_{3dB} = 2.76^\circ$
- $\eta = 0.6$.

El diagrama de radiación de la antena del satélite para downlink viene representado en la **Figura 3.3**:

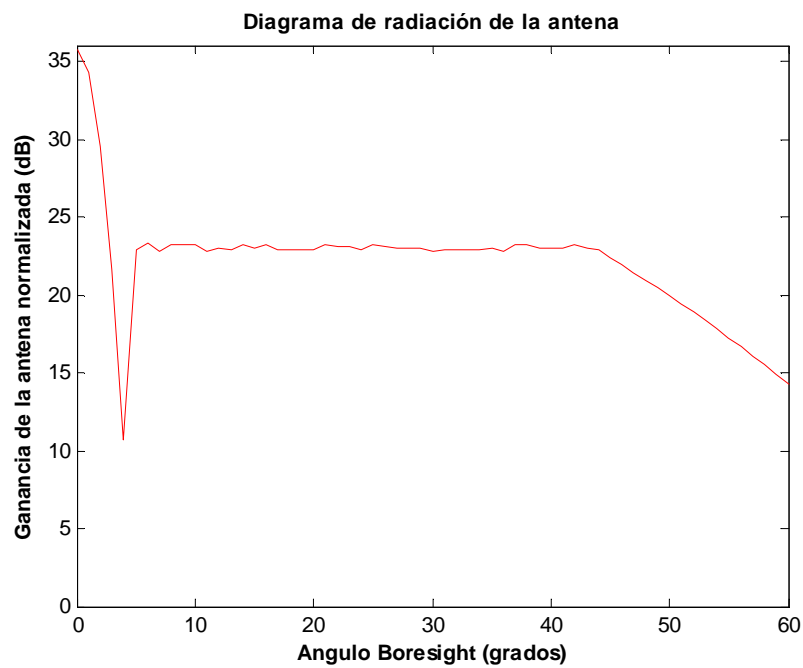


Figura 3.3 Diagrama de radiación de la antena del satélite LEO en downlink.

Usamos estas fórmulas para realizar nuestra simulación.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

3.3.2 Parámetros utilizados en cada servicio bajo estudio

3.3.2.1 Datos para el servicio de voz

Los datos utilizados para el servicio de voz son los siguientes:

◆ Datos del satélite:

- Altura del satélite de 600 Km.
- Antenas transmisoras con ganancia de 4 dB.

◆ Datos del sistema WCDMA:

- Frecuencia para Uplink $f_{\text{uplink}} = 1.996 \text{ GHz}$.
- Frecuencia para downlink $f_{\text{downlink}} = 2.186 \text{ GHz}$.
- Ancho de banda WCDMA de 5 MHz.

◆ Datos del proceso de voz:

- Factor de actividad para voz “ α ” de 0.66.
- Ganancia del proceso $G_p = 256$.
- Relación señal a ruido requerida para buena recepción $E_b/N_0 = 7 \text{ dB}$.

◆ Otros datos:

- Factor de ortogonalidad para downlink $\phi = 0.25$.
- Potencia asignada al canal piloto en downlink $P_p = 0.1$.
- Factor de ruido NF de 5 dB.
- Pérdidas de propagación por espacio libre de acuerdo a la fórmula (2.2) del apartado 2.2.6.2.

3.3.2.2 Datos para el servicio de datos

En este apartado se analizan los resultados obtenidos para usuarios de datos a través de simulaciones con el programa Matlab. Para ello se han utilizado los siguientes datos:

- ◆ Datos del satélite:
 - Altura del satélite de 600 Km.
 - Antenas transmisoras con ganancia de 4 dB.
- ◆ Datos del sistema WCDMA:
 - Frecuencia para Uplink $f_{\text{uplink}} = 1.996 \text{ GHz}$.
 - Frecuencia para downlink $f_{\text{downlink}} = 2.186 \text{ GHz}$.
 - Ancho de banda WCDMA de 5 MHz.
- ◆ Datos del proceso de datos:
 - Factor de actividad para datos “ α ” de 1.
 - Ganancia del proceso $G_p = 32$.
 - Relación señal a ruido requerida para buena recepción $E_b/N_0 = 3.5 \text{ dB}$.
- ◆ Otros datos:
 - Potencia para datos en uplink 3.57 veces mayor que para voz.
 - Factor de ortogonalidad para downlink $\phi = 0.25$.
 - Potencia asignada al canal piloto en downlink $P_p = 0.1$.
 - Factor de ruido NF de 5 dB.
 - Pérdidas de propagación por espacio libre de acuerdo a la fórmula (2.2) del apartado 2.2.6.2.

La potencia de datos debe ser mayor que en los procesos de voz para una buena recepción de la señal. Como indica la ecuación (2.19) la SNR o mejor la E_b/N_0 depende

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

de la ganancia de procesamiento, de la señal transmitida, de la potencia de la señal y de las interferencias incluido el ruido. Al tener valores distintos de G_p y requerir distinta E_b/N_0 , se debe encontrar la potencia necesaria en datos para que la interferencia siga siendo la misma en ambos servicios. Así se trabajará siempre en el punto óptimo de combinación de servicios.

Podemos averiguar este valor de la siguiente forma:

Sabiendo que:

$$\left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{voz} = G_p \Big|_{voz} \frac{S|_{voz}}{I_{total}} \quad (3.5)$$

$$\left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{datos} = G_p \Big|_{datos} \frac{S|_{datos}}{I_{total}} \quad (3.6)$$

Despejando I_{total} podemos decir que:

$$\left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{voz} = 7 \text{ dB} \Rightarrow \text{en número naturales} \Rightarrow \left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{voz} = 5.01$$

$$\left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{datos} = 3.5 \text{ dB} \Rightarrow \text{en número naturales} \Rightarrow \left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{datos} = 2.24$$

$$I_{total} = G_p \Big|_{voz} \frac{S|_{voz}}{\left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{voz}} = G_p \Big|_{datos} \frac{S|_{datos}}{\left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{datos}} = 256 \frac{S|_{voz}}{5} = 32 \frac{S|_{datos}}{2.24} \Rightarrow \quad (3.7)$$

$$3.57 S|_{voz} = S|_{datos} \quad (3.8)$$

La potencia en servicios de datos debe ser 3.57 veces mayor que la potencia en servicios de voz en el enlace ascendente.

Para el enlace descendente se utilizan los mismos valores en ambos servicios.

3.4 SIMULACIONES

En esta sección vamos a presentar una serie de simulaciones que nos permitirán alcanzar el objetivo de este proyecto. Para la elaboración de éstas, se ha utilizado un programa en Matlab cuyas características se adaptan perfectamente a las simulaciones que queremos desarrollar.

En este apartado se proporciona el estudio de la capacidad WCDMA para una constelación de satélites LEO.

3.4.1 Requisitos de la constelación

En primer lugar debemos establecer nuestra constelación de satélites. Para ello se hace un estudio de la altura a la que se encuentra el satélite, el radio de cobertura que proporciona cada uno y cuántos satélites se necesitan para cobertura global.

En las comunicaciones por satélite se debe tener un compromiso entre el número de satélites para cubrir el globo terrestre, su altura y su radio de cobertura. Elegir una altura mayor hace que se necesiten menos satélites para cubrir la esfera terrestre, no obstante esto implica mayor potencia necesaria, mayor interferencia, mayores pérdidas por el espacio libre, mayor efecto de ruido,..., en definitiva menor capacidad. Elegir un radio de cobertura muy pequeño equivale al uso de un número mayor de satélites o de más spot-beams en cada uno de ellos, lo que produce costes muy elevados y/o dificultad en los lanzamientos. Por tanto se deben combinar bien estos factores para llegar al resultado óptimo.

Se debe tener en cuenta también que la distancia de cobertura se encuentre dentro de la distancia *Line of Sight* del satélite y que la distancia de solapamiento entre satélites sea mayor que la mínima requerida, para no dejar zona sin cobertura.

3.4.1.1 Número de satélites

La constelación que se va a utilizar en esta sección será de 64 satélites divididos en 8 planos. Esta constelación nos conviene porque se puede conseguir a partir de una altura de 545 Km **Figura 2.18**. Al estar “cerca” de la Tierra necesitaremos menor potencia para transmitir y los costes de lanzamiento serán también menores.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

3.4.1.2 Posibles constelaciones

En la actualidad, en número máximo de celdas por cluster disponible es de alrededor de 50 células por satélite. Esto se debe al tamaño de las placas solares y su eficiencia (todavía de un 30%).

Algunas configuraciones posibles serán, para la actualidad:

- i. 37 celdas (Conjunto de 3 coronas más la célula central).
- ii. 52 celdas (Configuración rectangular de 8 filas y columnas alternas de 6 y 7 células).

Para el futuro, con el avance de la tecnología:

- iii. 61 celdas (Conjunto de 4 coronas más la célula central). Configuración para un futuro cercano.
- iv. 91 celdas (Conjuntor de 5 coronas más la célula central). Configuración para un futuro lejano.

En este capítulo estudiaremos la capacidad para la opción i. y daremos resultados para iv.

3.4.1.3 Constelación de 37 celdas por satélite.

Vamos a estudiar el comportamiento de la capacidad en función del radio de cobertura y la altura del satélite para hallar la constelación óptima.

De la **Figura 2.18** obtenemos que la altura mínima para conseguir una constelación de 64 satélites (8 por plano) es de 545 Km. Y de la **Figura 2.19** que el radio de celda tiene que estar entre 414 y 472 Km, dependiendo de la altura del satélite.

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de la capacidad para 1 W. en un radio de cobertura de entre 100 y 700 Km a 735 Km. de altura.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

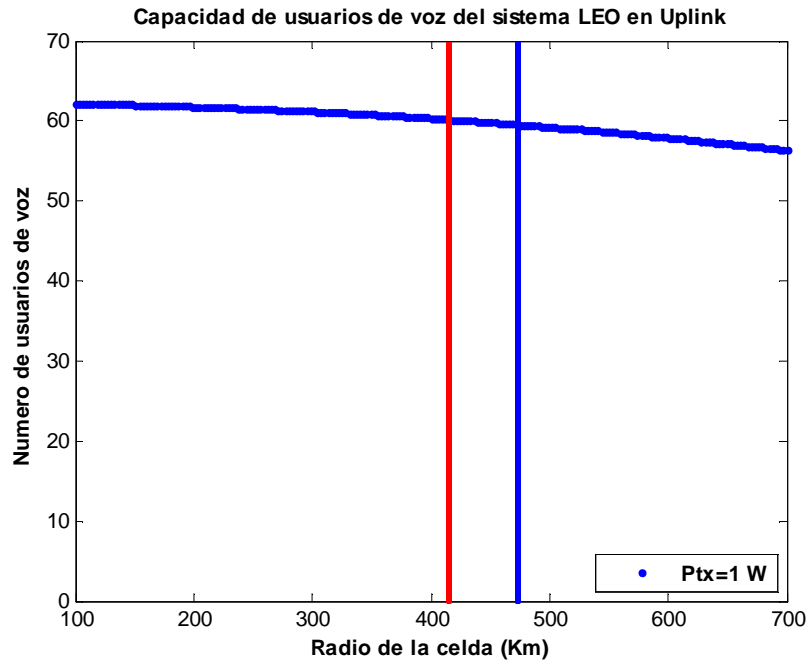
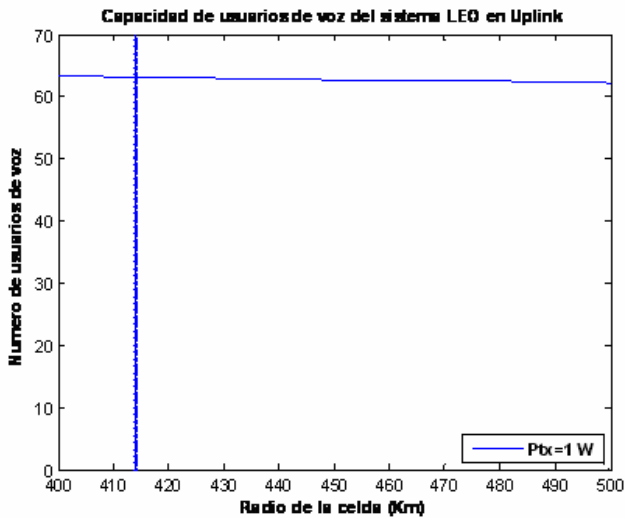


Figura 3.4 Comportamiento de la capacidad en un rango de 100 a 700 Km.

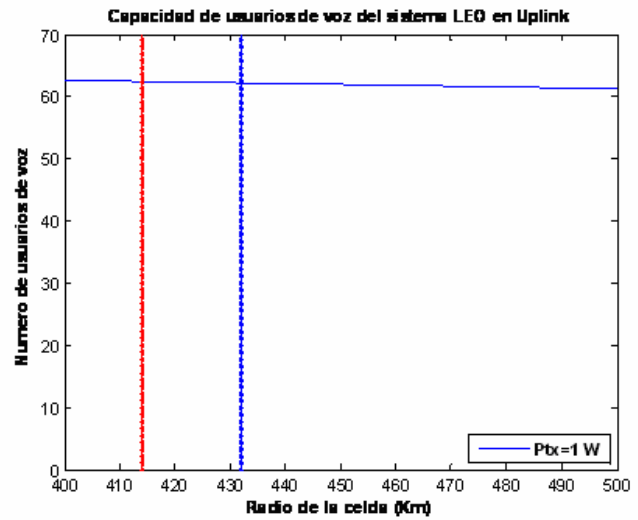
En la **Figura 3.4** se observa que a medida que crece el radio de cobertura, disminuye la capacidad por celda. Entre las líneas verticales roja y azul se encuentra el posible radio de cobertura. Fuera de este rango la constelación necesitará más satélites para cobertura global o necesitará más altura para producir huellas más grandes.

En la **Figura 3.5** y en la **Tabla 3.1** se muestra un estudio sobre distintas posibilidades para la constelación a fin de elegir la solución óptima.

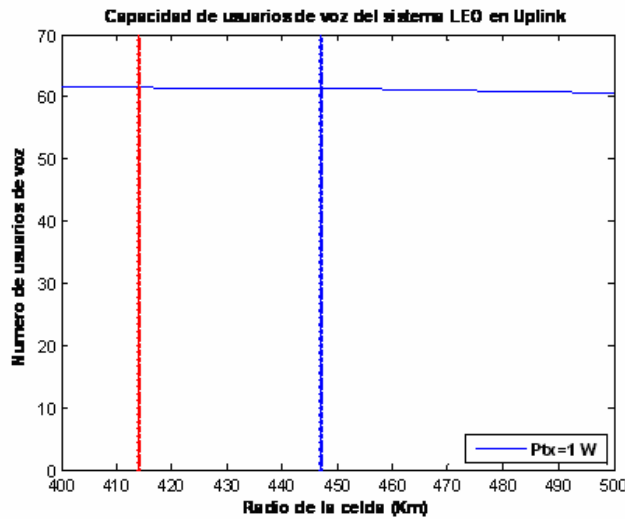
3. Sistemas WCDMA con satélites LEO



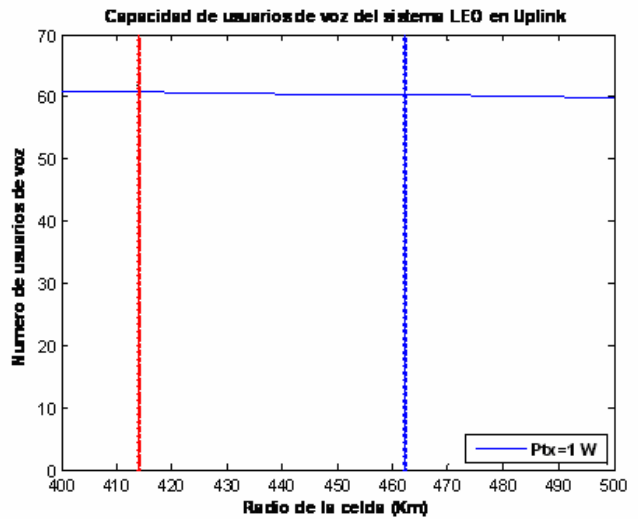
Opción 1 Altura: 545 Km. Rango: 414 Km.



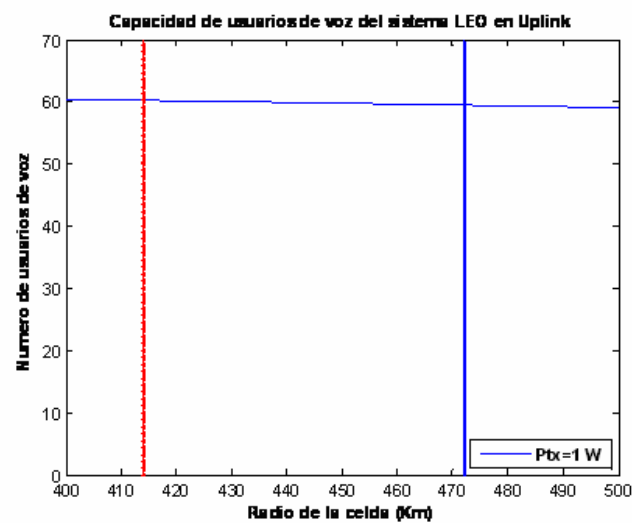
Opción 2 Altura: 600 Km. Rango: 414-432 Km.



Opción 3 Altura: 650 Km. Rango: 414-447 Km.



Opción 4 Altura: 700 Km. Rango: 414-462 Km.



Opción 5 Altura: 700 Km. Rango: 414-462 Km.

Figura 3.5 Capacidad y rango de radio de cobertura para distintas alturas

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Tabla 3.1 Estudio de la constelación para distintas alturas.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| Altura (Km) | 545 | 600 | 650 | 700 | 735 |
| Rango de radio de cobertura (Km) | 414 | 414-432 | 414-447 | 414-462 | 414-472 |
| Radio de cobertura elegido (Km) | 414 | 414 | 414 | 414 | 414 |
| Distancia Los (Km) | 2642,90 | 2773,06 | 2886,29 | 2995,24 | 3069,21 |
| Distancia Line-of-sight sobre el suelo (Km) | 5011,06 | 5231,61 | 5420,82 | 5600,53 | 5721,19 |
| Distancia que contempla en satélite en línea recta (Km) | 5013,54 | 5013,54 | 5013,54 | 5013,54 | 5013,54 |
| Número de satélites en una órbita | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Número de satélites totales | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 |
| Espacio de solapamiento entre satélites (Km) | 2,14 | 2,14 | 2,14 | 2,14 | 2,14 |
| Distancia mínima de solapamiento (0,5% de error) | 1,754739 | 1,754739 | 1,754739 | 1,754739 | 1,754739 |
| Número de usuarios/celda para 1 W. | 63,15 | 62,4 | 61,65 | 60,8 | 60,2 |
| Número de usuarios totales | 366912 | 361088 | 355264 | 349440 | 349440 |

A menor altura los satélites se encuentran más cerca de la superficie terrestre y al emitir con la misma potencia se obtiene una mayor capacidad. El dato rango de radio de cobertura nos proporciona los posibles radios de cobertura celular para una altura definida. La distancia mínima de solapamiento entre satélites se ha calculado siguiendo la red celular hexagonal con un 0.5% de error, que proporciona una transmisión más efectiva y compacta, sin dejar huecos en la comunicación.

A continuación se analizan las distintas opciones:

- En el CASO 1, a 545 Km. y un radio de cobertura menor de 414 Km. la distancia *Line-of-Sight* sobre el suelo es menor que la distancia que contempla el satélite en línea recta, habrá zonas a las que el satélite no pueda llegar por no tener visión directa.
- En los CASOS 2-6 la constelación es la deseada y el espacio de solapamiento es el adecuado. Se diferencian en la altura, a mayor altura menor número de usuarios, no obstante el rango de radio disponible es mayor, lo que nos proporciona mayor libertad a la hora de elegir el radio de cobertura.

Entre los CASOS 2-6 nos quedamos con el caso 2, hay suficiente rango de cobertura, la constelación es la deseada, la distancia de solapamiento es adecuada, cumple la distancia *Line-of-sight*, el coste es el menor y en número de usuarios el mayor. Es por tanto el resultado óptimo.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

◆ **DATOS GENERALES:**

Tabla 3.2 Datos generales

| DATOS | |
|----------------------------------|-------------|
| Radio tierra (Km) | 6378 |
| Hexagono diametro pequeño | 1,73 |
| Ncell/sat | 37 |
| Cell en linea/sat | 7 |
| Circunferencia de la Tierra (Km) | 40074,15589 |

◆ **DATOS ESPECÍFICOS:**

Tabla 3.3 Datos específicos constelación LEO.

| DATOS PARA CONSTELACIÓN LEO | |
|------------------------------------|-------------|
| Radio celula (Km) | 414 |
| Altura Satélite (Km) | 600 |
| Nsatelites en una orbita | 8 |
| Nsatelites totales | 64 |
| Espacio de solapamiento | 2,135256926 |

Con un programa en Matlab diseñado específicamente para comprobar la distancia *LOS* aseguramos que el radio de cobertura de 284 Km. se encuentra dentro de la distancia *LOS*.

```
distancia_cobertura_sat =  
  
5.0135e+003  
  
distancia_curva_LOS =  
  
5.2316e+003  
  
BIEN! La distancia curva LOS es mayor que la de cobertura del satelite
```

Figura 3.6 Impresión de la comprobación distancia LOS.

Tenemos por tanto una constelación de 64 satélites LEO, a 600 Km de altura. Cada satélite contiene 37 spot-beams que abarcan un radio de cobertura de 414 Km cada uno. Siendo la zona de cobertura del satélite la suma de todos ellos, hace un total de $445.629,6 \text{ Km}^2 / \text{celda}$, $21.835.850 \text{ Km}^2 / \text{satélite}$, de superficie aproximadamente.

3.4.2 Resultado de los servicios estudiados

En esta sección vamos a presentar una serie de simulaciones que nos permitirán alcanzar el objetivo de este proyecto. Para la elaboración de éstas, se ha utilizado un programa en Matlab cuyas características se adaptan perfectamente a las situaciones que queremos desarrollar. El objetivo de este apartado es mostrar, mediante pruebas simulaciones, la capacidad de los sistemas WCDMA por satélites en función del tipo de satélite, de sus condiciones y de distintas variables para proporcionar la mejor opción. Cada sub-apartado se mostrará con una representación gráfica de los resultados acompañada por diversos comentarios que explicarán lo obtenido. Al finalizar todas las simulaciones, se expondrán unas conclusiones globales sobre el sistema analizado.

Con un radio de celda de 414 Km podremos cubrir con un solo haz del satélite países como Zimbabue (390.580 Km²), Polonia (312.685 Km²) o Alemania (357.021 Km²) [17].

Los resultados se mostrarán en el rango de trabajo posible para una altura de 600, es decir de 414 a 432 Km.

En este caso se analizarán resultados para el sistema WCDMA por satélites LEO en uplink y downlink para voz y datos.

3.4.2.1 Servicio de voz

En este apartado se analizan los resultados obtenidos para los servicios de voz. Se examinan distintos casos a través de simulaciones con Matlab.

3.4.2.1.1 CASO GENERAL. *Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia*

El primer paso es proceder al estudio de la capacidad en función de la distancia de cobertura del sistema. Se analizará la capacidad primero para el enlace ascendente y después para el enlace descendente, y se compararán ambos resultados. Los resultados obtenidos se muestran en las **Figuras 3.7 y 3.8**.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Capacidad para uplink:

En este apartado utilizamos la potencia transmitida como parámetro que varía entre 0.38 W hasta los 0.48 W con un paso de 20 mW.

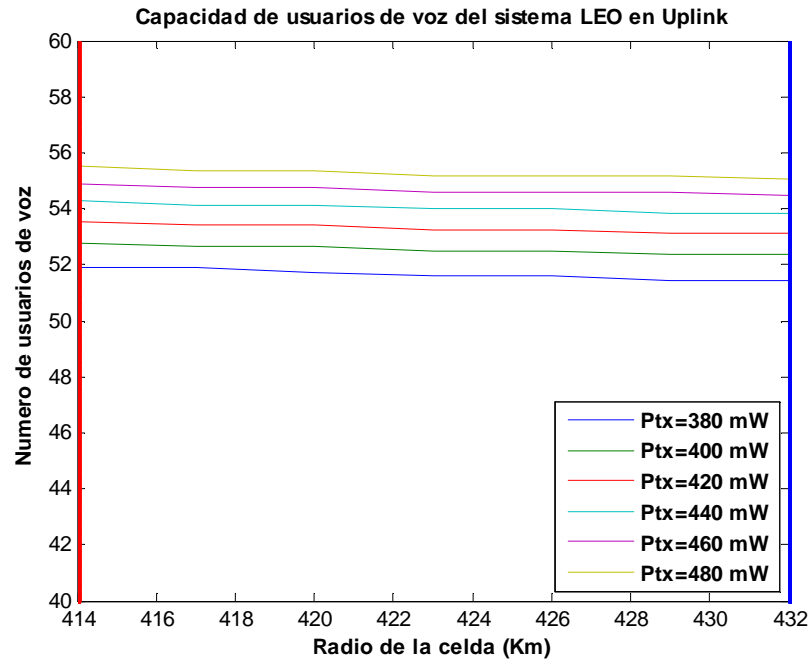


Figura 3.7 Número de usuarios de voz para el sistema LEO en uplink.

Capacidad para downlink:

Para downlink utilizamos una potencia que varía desde los 110 W por celda hasta los 160 W por celda, con un paso de 10 W.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

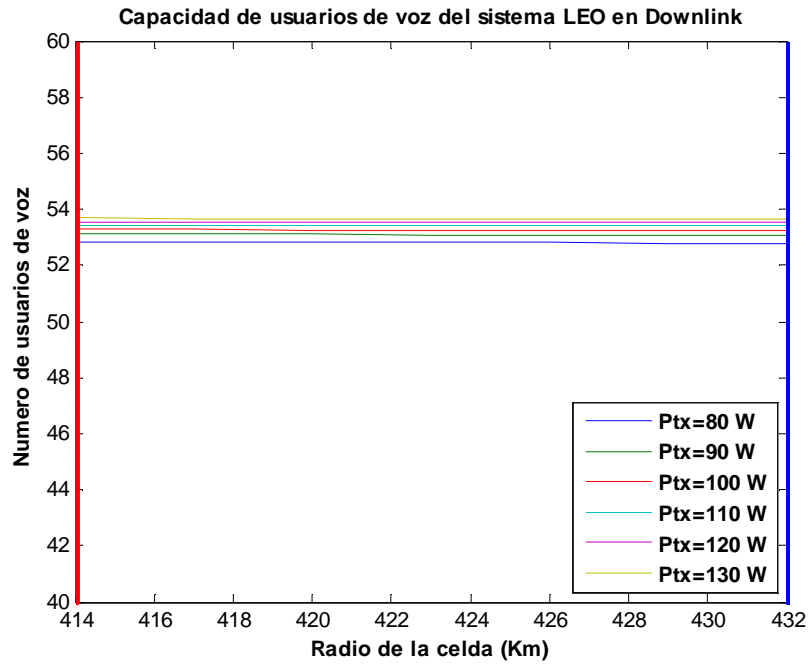


Figura 3.8 Número de usuarios de voz para el sistema LEO en downlink.

Tabla 3.4 Capacidad del servicio de voz para distintos valores de potencia en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|
| OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios | OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios |
| 1 | 0,38 | 51,90 | 1 | 80 | 52,85 |
| 2 | 0,40 | 52,80 | 2 | 90 | 53,10 |
| 3 | 0,42 | 53,55 | 3 | 100 | 53,30 |
| 4 | 0,44 | 54,30 | 4 | 110 | 53,45 |
| 5 | 0,46 | 54,90 | 5 | 120 | 53,55 |
| 6 | 0,48 | 55,50 | 6 | 130 | 53,70 |

En este apartado hemos estudiado la capacidad para distintos valores de potencia en ambos enlaces. Como podemos apreciar en las Figuras 3.7 y 3.8, tanto para uplink como para downlink, la capacidad disminuye a medida que crece el radio de cobertura celular. Antes de continuar haremos otra prueba. Vamos a ver que pasaría si aumentamos drásticamente la potencia de transmisión en ambos enlaces:

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Capacidad para uplink:

Utilizamos una potencia que varía desde 1 W hasta 2 W con un paso de 200 mW.

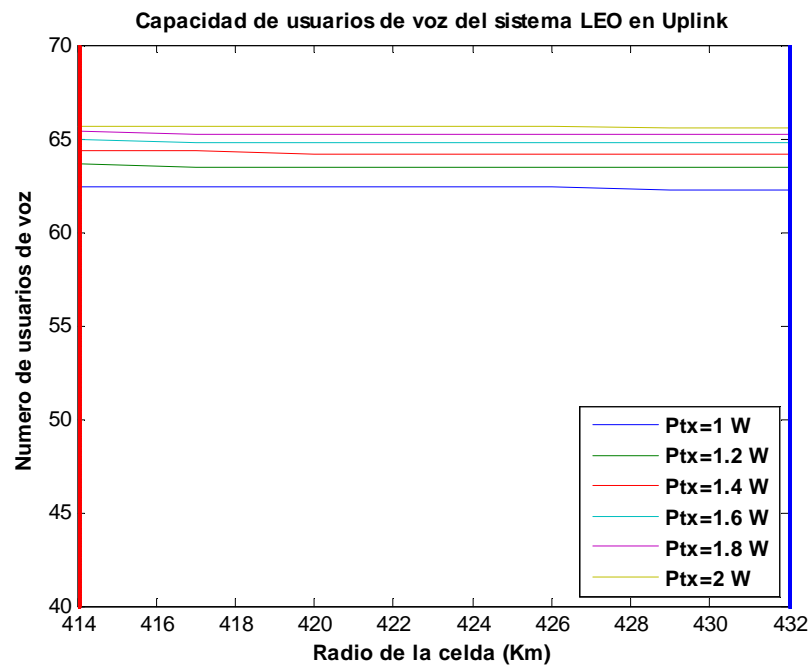


Figura 3.9 Número de usuarios de voz para altas potencias en uplink.

Capacidad para downlink:

Utilizamos una potencia extremadamente elevada, de 1000 W y vemos qué ocurre.

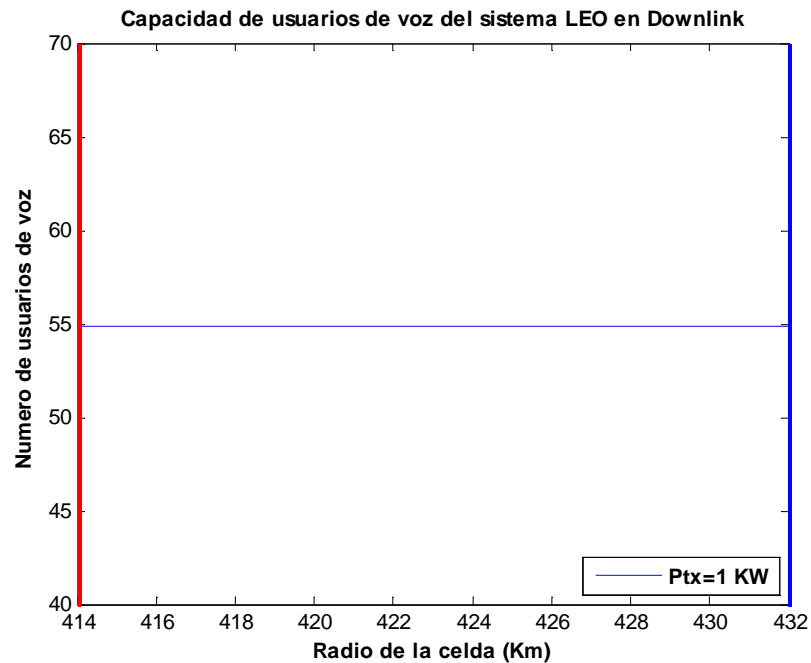


Figura 3.10 Número de usuarios de voz para altas potencias en downlink.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Tabla 3.5 Capacidad del servicio de voz para altas potencias en uplink y downlink

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|--------|--------------|-------------|----------|--------------|-------------|
| OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios | OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios |
| 1 | 1,00 | 62,40 | 1 | 1000 | 54,90 |
| 2 | 1,20 | 63,60 | | | |
| 3 | 1,40 | 64,35 | | | |
| 4 | 1,60 | 64,95 | | | |
| 5 | 1,80 | 65,40 | | | |
| 6 | 2,00 | 65,70 | | | |

A partir de los resultados obtenidos en estas últimas gráficas, de la y de las **Figuras 3.9** y **3.10**, extraemos los valores de la **Tabla 3.5**. En ella se observan comportamientos diferentes para ambos enlaces. En el uplink vemos que aumentando la potencia en un 138%, se consigue un aumento de 9 usuarios. Sin embargo en el downlink ocurre algo distinto, ni siquiera aumentando hipotéticamente la potencia a 1000 W, se alcanzaría una capacidad superior a los 54 usuarios. Esto equivale a un aumento en potencia en un 1011%, que implica un aumento en la capacidad de un simple 1.8%, equivalente a 1 usuario. Demasiado gasto de potencia para tan poco provecho. Esto se debe a que llegamos a un punto donde la interferencia es suficientemente alta en comparación con la potencia de ruido y por consiguiente la capacidad permanece constante, ni siquiera aumentando la potencia, estancándose así la capacidad e impidiendo el acceso a nuevos usuarios. Por tanto diremos que el enlace descendente limita nuestro sistema.

Volvamos a las **Figuras 3.7** y **3.8** y a la **Tabla 3.4**. Se observa que la capacidad en uplink aumenta en mayor proporción con un incremento menor de potencia que en downlink.

Con una potencia de 420 mW para el uplink y una potencia de 90 W para el downlink se conseguiría una capacidad de 53 usuarios de voz. A partir de 90 W la capacidad en el downlink sigue siendo de 53 usuarios, con lo que si eligiéramos una potencia mayor, derrocharíamos potencia para obtener la misma capacidad. La opción marcada en la **Tabla 3.4**. sería la mejor opción. Se utilizarán estos valores de potencia para la simulación del resto de apartados.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

3.4.2.1.2 CASO 1. Variación de la capacidad ante distintos valores de la altura del satélite

La altura del satélite guarda relación con el radio de cobertura de la celda, con la distancia que recorre la señal de transmisión y por tanto con sus pérdidas. En este apartado vamos a estudiar el efecto que produce la variación de la altura en nuestra constelación.

Se halla la capacidad para alturas en el rango de 545 Km. a 735 Km., ya que es a esta altura cuando podemos obtener una constelación de 8 satélites por plano. A alturas menores no es posible obtener una constelación con cobertura global de 64 satélites. A alturas mayores podremos obtener constelaciones con menor número de satélites, aunque también sería posible una constelación de 64 satélites.

Estudiamos la capacidad para 545, 600, 650, 700, y 735 Km de altura.

A la izquierda de la línea vertical verde nos encontramos en el rango de radio de cobertura celular para una altura de 600 Km., para el resto de rangos consultar la **Tabla 3.1**.

Capacidad para uplink:

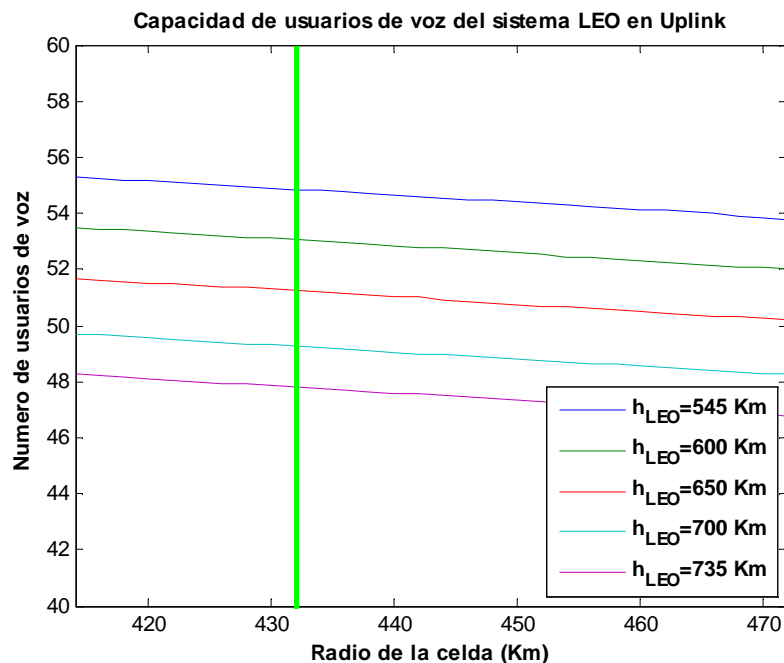


Figura 3.11 Número de usuarios de voz del sistema LEO según la altura del satélite en uplink.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Capacidad para downlink:

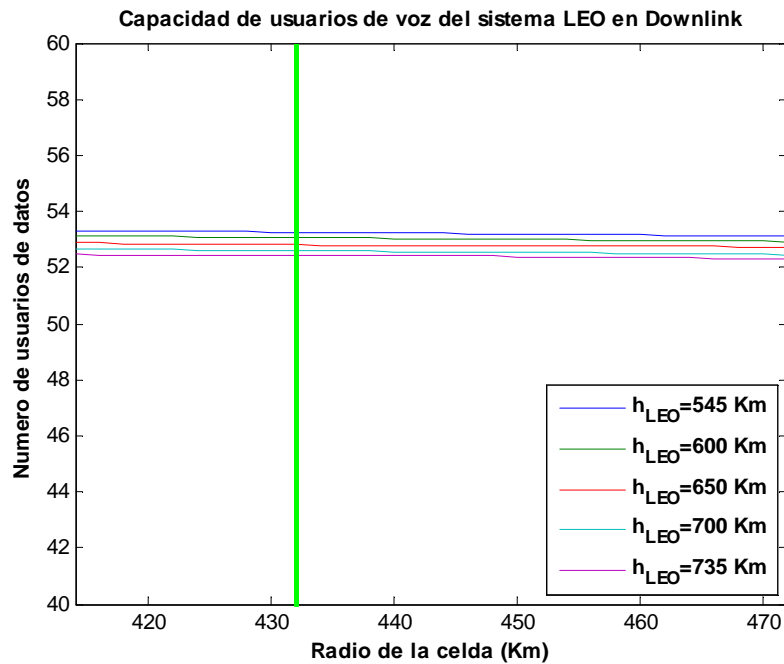


Figura 3.12 Número de usuarios de voz del sistema LEO según la altura del satélite en downlink.

Tabla 3.6 Capacidad del servicio de voz para distintos valores de la altura del satélite en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|-----------------|--------------|----------|-----------------|--------------|
| OPCIÓN | Altura LEO (Km) | N. Usuarios | OPCIÓN | Altura LEO (Km) | N. Usuarios |
| 1 | 545 | 55,30 | 1 | 545 | 53,30 |
| 2 | 600 | 53,50 | 2 | 600 | 53,10 |
| 3 | 650 | 51,65 | 3 | 650 | 52,90 |
| 4 | 700 | 49,70 | 4 | 700 | 52,65 |
| 5 | 735 | 48,25 | 5 | 735 | 52,50 |

Como se observa en las imágenes, a medida que aumenta la altura disminuye la capacidad del sistema tanto en uplink como en downlink, no obstante decrece más rápido para uplink. Esto se debe a que en uplink la señal de un solo usuario, al atravesar mayor distancia sufre pérdidas mayores, la señal se degrada antes y puede no llegar con buena calidad. En downlink la potencia es la emitida por el satélite, así que a medida que aumenta la altura, la señal sufrirá mayores pérdidas, y se podrá servir a menos usuarios.

3.4.2.1.3 CASO 2. Variación de la capacidad ante distintos valores de ganancia mínima de la antena del satélite

En este apartado se variará la ganancia mínima de la antena del satélite para ver su efecto en la capacidad. Se utilizarán valores de 20 a 22 dB para la ganancia mínima (en donwlink estos valores se incrementan en 0.789 dB). Obsérvese que la diferencia entre el lóbulo principal y los secundarios no será nunca inferior a 13 dB.

El diagrama de radiación para cada uno de los enlaces son los que se presentan a continuación en las **Figuras 3.13.y 3.14.**

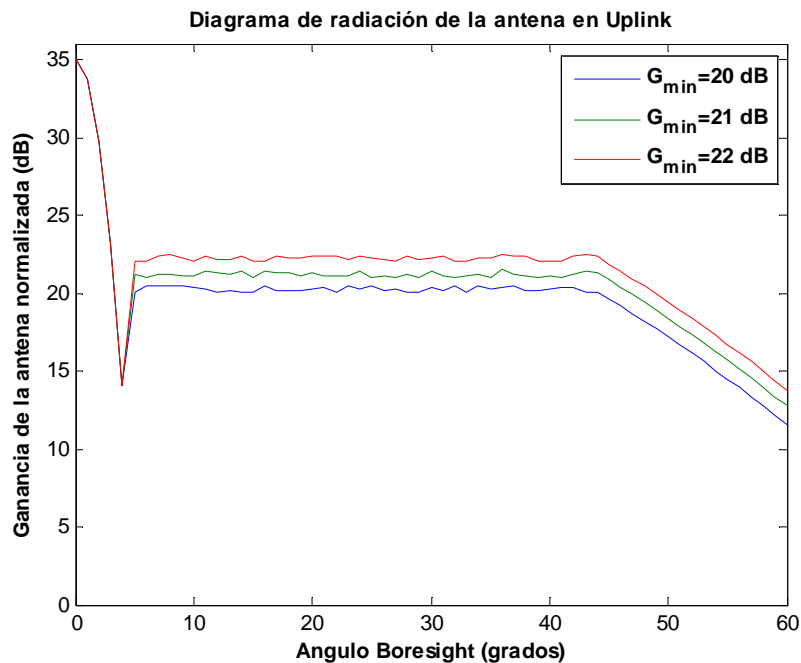


Figura 3.13 Diagrama de radiación de la antena del satélite LEO en uplink para distintos valores de G_{min} .

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

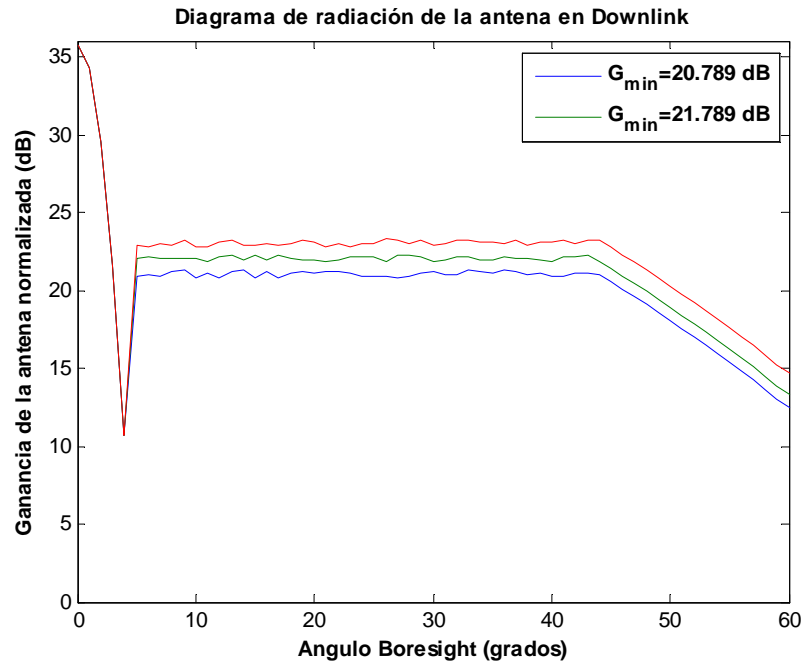


Figura 3.14 Diagrama de radiación de la antena del satélite LEO en downlink para distintos valores de G_{\min} .

Capacidad para uplink:

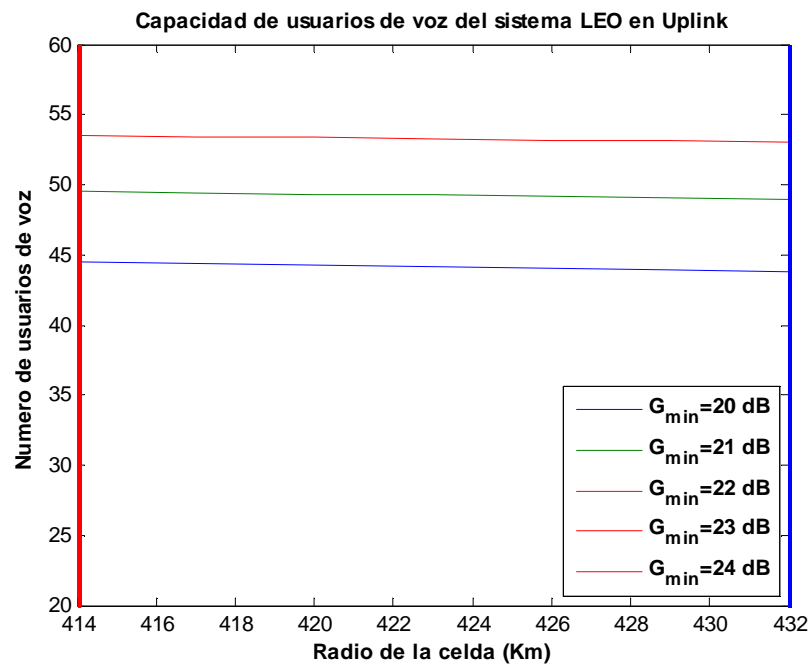


Figura 3.15 Número de usuarios de voz para el sistema LEO según la G_{\min} en uplink.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Capacidad para downlink:

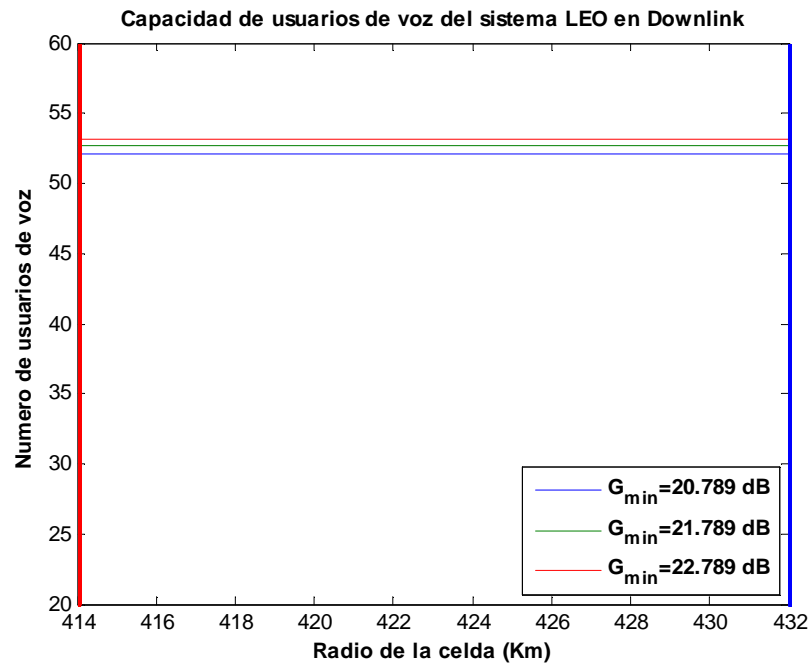


Figura 3.16 Número de usuarios de voz para el sistema LEO según la G_{min} en downlink.

Tabla 3.7 Capacidad del servicio de voz para distintos valores de la ganancia mínima del satélite en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|--------|----------------|-------------|----------|----------------|-------------|
| OPCIÓN | G_{min} (dB) | N. Usuarios | OPCIÓN | G_{min} (dB) | N. Usuarios |
| 1 | 20 | 44,55 | 1 | 20 | 52,05 |
| 2 | 21 | 49,55 | 2 | 21 | 52,65 |
| 3 | 22 | 53,50 | 3 | 22 | 53,10 |

Como observamos en las **Figuras 3.15** y **3.16** y en la **Tabla 3.7** anteriores a medida que aumenta la ganancia mínima, aumenta la capacidad del sistema. La capacidad aumenta cuanto menor sea la diferencia entre la ganancia máxima y la ganancia de los lóbulos secundarios. No obstante, en la práctica es mejor que la diferencia sea un poco mayor, ya que a medida que aumenta la ganancia mínima aumenta la dificultad de diseñar la antena y fabricarla. La capacidad máxima se obtiene con 22 dB, y como no podemos obtener una antena con mayor ganancia mínima, elegimos ese valor para nuestro sistema.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

3.4.2.1.4 CASO 3. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia y ganancia mínima del sistema

En este apartado se analiza una nueva visión de la capacidad en función de la ganancia mínima de transmisión y la potencia de transmisión.

La simulación se realiza para un radio de 414 Km.

Capacidad para uplink:

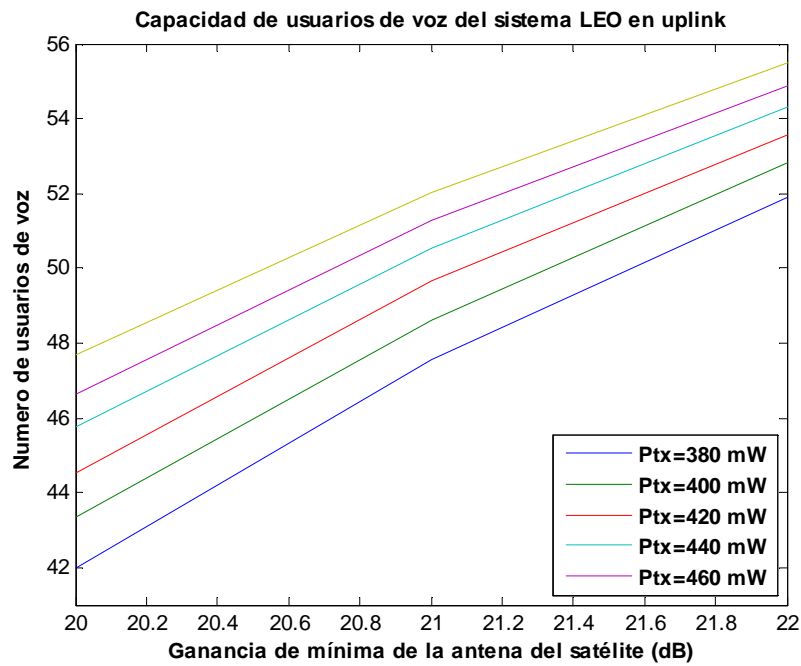


Figura 3.17 Número de usuarios de voz para el sistema LEO según la G_{\min} y la potencia en uplink.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Capacidad para downlink:

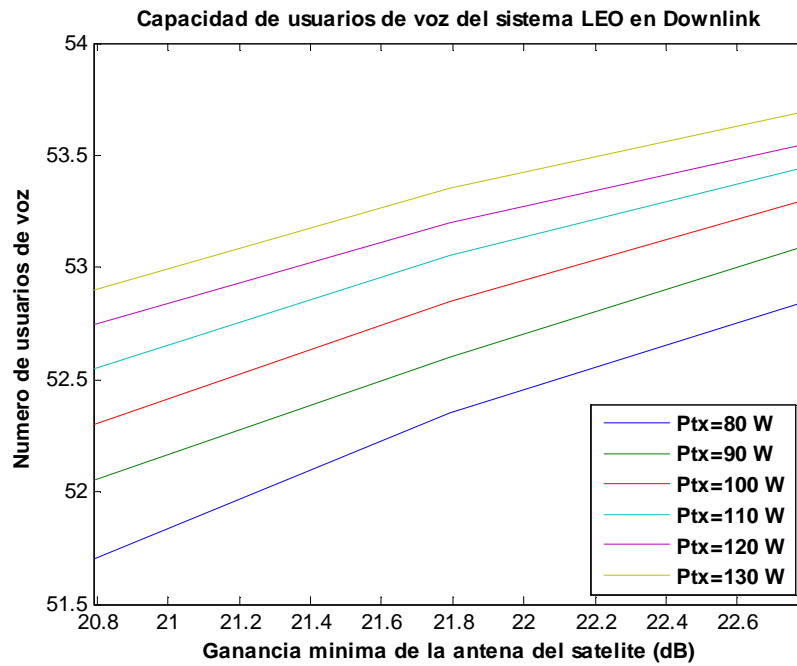


Figura 3.18 Número de usuarios de voz para el sistema LEO según la G_{\min} y la potencia en downlink.

Tabla 3.8 Capacidad del servicio de voz para distintos valores de la ganancia mínima del satélite (en dB) y la potencia de transmisión (en W) en uplink y downlink.

| UPLINK | | | |
|----------|----------------|----------------|----------------|
| Ptx | Gmin=20 dB | Gmin=21 dB | Gmin=22 dB |
| 0,38 | 42,00 | 47,55 | 51,90 |
| 0,40 | 43,35 | 48,60 | 52,80 |
| 0,42 | 44,55 | 49,65 | 53,55 |
| 0,44 | 45,75 | 50,55 | 54,30 |
| 0,46 | 46,65 | 51,30 | 54,90 |
| 0,48 | 47,70 | 52,05 | 55,50 |
| DOWNLINK | | | |
| Ptx | Gmin=20,798 dB | Gmin=21,789 dB | Gmin=22,789 dB |
| 80 | 51,70 | 52,35 | 52,85 |
| 90 | 52,05 | 52,60 | 53,10 |
| 100 | 52,30 | 52,85 | 53,30 |
| 110 | 52,55 | 53,05 | 53,45 |
| 120 | 52,75 | 53,20 | 53,55 |
| 130 | 52,90 | 53,35 | 53,70 |

Se observa que tanto en uplink como en downlink, a mayor potencia y mayor ganancia la capacidad es mayor. De la **Tabla 3.8** extraemos la mejor opción. Puesto que el downlink

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

limita la capacidad, eliminamos el área sombreada en rojo, ya que sobrepasa el número de usuarios máximos para el enlace descendente. Para ambos enlaces la ganancia de la antena debe ser la casi misma, varía ligeramente con la frecuencia en un +0.789 dB para downlink. Valoramos que la mejor opción es una $G_{\min} = 22$ dB puesto que es con la que más número de usuarios se obtienen. Como potencia en uplink elegimos 0.42 W para obtener 53 usuarios como mínimo, y dejando que el downlink limite la capacidad se ha elegido una potencia de 90 W para este enlace. Si aumentásemos la potencia de downlink hasta 130 W, la capacidad seguiría siendo la misma y desperdiciaríamos potencia.

3.4.2.2 Servicio de datos

En este apartado se analizan los resultados obtenidos para usuarios de datos a través de simulaciones con el programa Matlab.

3.4.2.2.1 CASO GENERAL. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia

El primer paso es proceder al estudio de la capacidad en función de la distancia de cobertura del sistema para distintos valores de potencia como hicimos para usuarios de voz.

Se supone que nos encontramos en la misma red móvil que en la que nos encontrábamos para los procesos de voz.

Se analizará la capacidad primero para el enlace ascendente y después para el enlace descendente, y se compararán ambos resultados. En este apartado se analizará la capacidad del sistema WCDMA con satélites LEO a partir de distintos valores de potencia. Hemos extraído los valores en los 414 Km, radio de cobertura de nuestras células. Los resultados obtenidos se muestran en las **Figura 2.19** y **Figura 2.20**.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Capacidad para uplink:

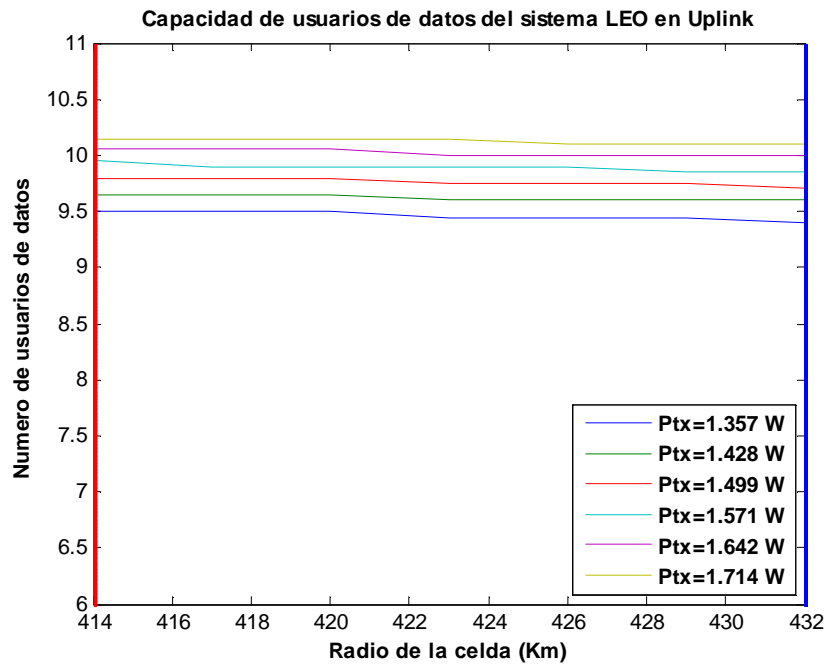


Figura 3.19 Número de usuarios de datos para el sistema LEO en uplink.

Capacidad para downlink:

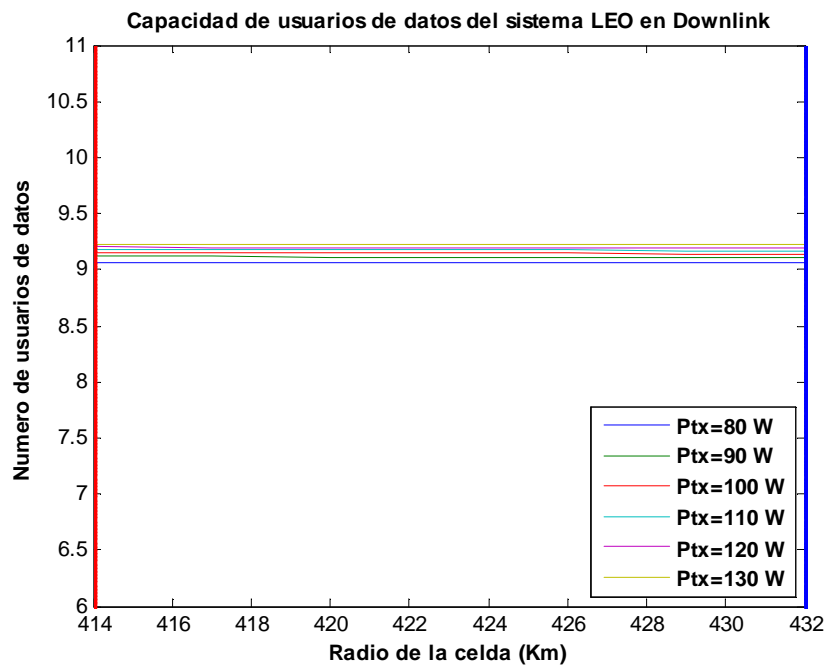


Figura 3.20 Número de usuarios de datos para el sistema LEO en downlink.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Tabla 3.9 Capacidad del servicio de datos para distintos valores de potencia en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|--------------|-------------|----------|--------------|-------------|
| OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios | OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios |
| 1 | 1,36 | 9,50 | 1 | 80 | 9,07 |
| 2 | 1,43 | 9,65 | 2 | 90 | 9,12 |
| 3 | 1,50 | 9,80 | 3 | 100 | 9,15 |
| 4 | 1,57 | 9,95 | 4 | 110 | 9,18 |
| 5 | 1,64 | 10,05 | 5 | 120 | 9,21 |
| 6 | 1,71 | 10,15 | 6 | 130 | 9,23 |

Como podemos apreciar en las imágenes tanto para uplink como para downlink, la capacidad disminuye en comparación a los procesos de voz. Esto se debe a que se utiliza más potencia por usuario en datos. Antes de continuar haremos otra prueba. Vamos a ver que pasaría si aumentamos drásticamente la potencia de transmisión en ambos enlaces:

Capacidad para uplink:

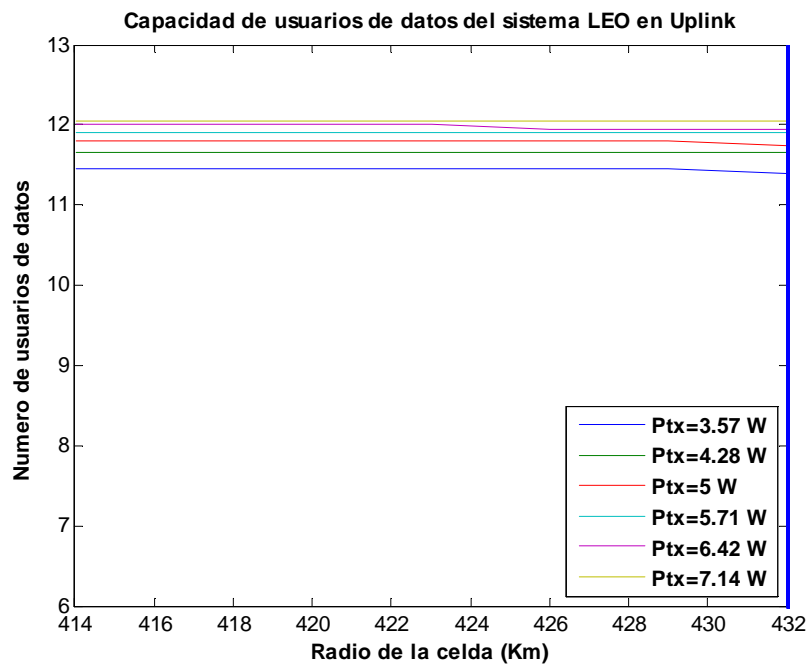


Figura 3.21 Número de usuarios de datos para altas potencias en uplink.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Capacidad para downlink:

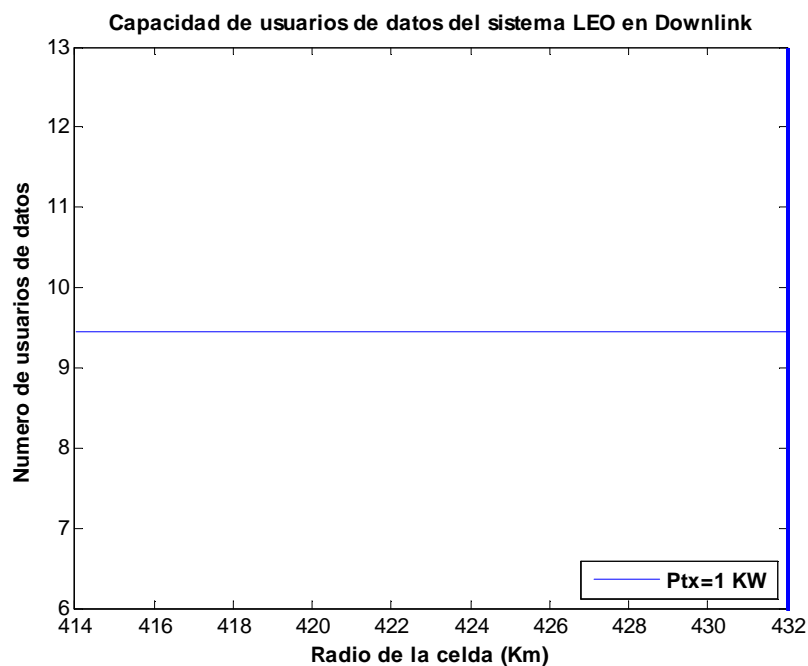


Figura 3.22 Número de usuarios de datos para altas potencias en downlink.

Tabla 3.10 Capacidad del servicio de datos para altas potencias en uplink y downlink

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|--------|--------------|-------------|----------|--------------|-------------|
| OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios | OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios |
| 1 | 3,57 | 11,45 | 1 | 1000 | 9,45 |
| 2 | 4,28 | 11,65 | | | |
| 3 | 5,00 | 11,80 | | | |
| 4 | 5,71 | 11,90 | | | |
| 5 | 6,43 | 12,00 | | | |
| 6 | 7,14 | 12,05 | | | |

Como se puede apreciar en la **Figura 3.22**, la capacidad en downlink se estanca en 9.45 aunque aumentemos la potencia drásticamente. Por tanto diremos que el enlace descendente limita nuestra capacidad.

Volvamos a las **Figuras 3.19** y **3.20** Como se puede apreciar en las figuras el comportamiento de la capacidad para ambos enlaces es similar al de los usuarios de voz, la capacidad en uplink aumenta en mayor proporción con un incremento menor de potencia que en downlink.

En este caso se deben elegir las opciones que concuerden con las elegidas para voz, ya que nos encontramos en el mismo sistema. Con una potencia de 1.5 W para el uplink y una potencia de 90 W para el downlink tendríamos una capacidad de 9 usuarios.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

3.4.2.2 CASO 1. Variación de la capacidad ante distintos valores de la altura del satélite

Veamos lo que ocurre en el proceso de datos al variar la altura del satélite.

Estudiamos la capacidad para 545, 600, 650, 700, y 735 Km de altura.

A la izquierda de la línea vertical verde nos encontramos en el rango de radio de cobertura celular para una altura de 600 Km., para el resto de rangos consultar la **Figura 3.1**

Capacidad para uplink:

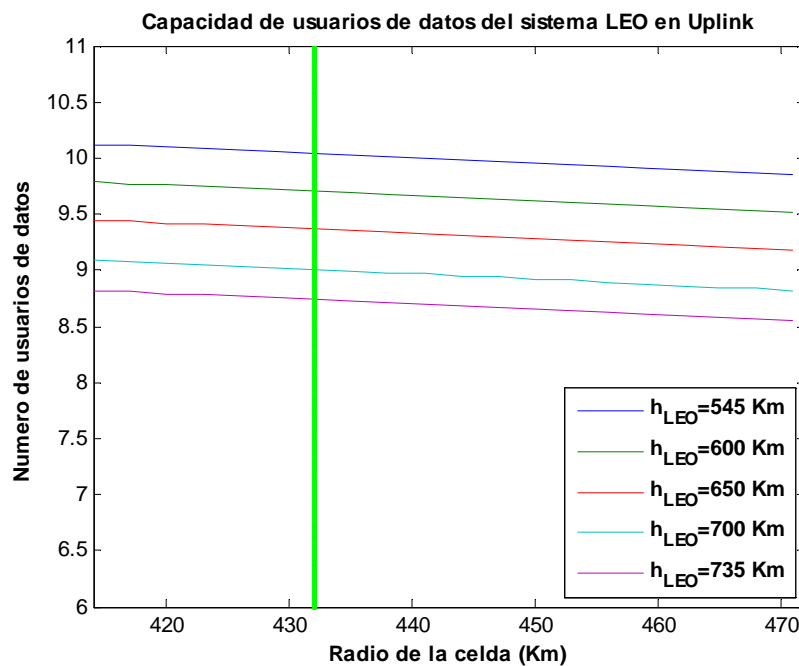


Figura 3.23 Número de usuarios de datos del sistema LEO según la altura del satélite en uplink.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Capacidad para downlink:

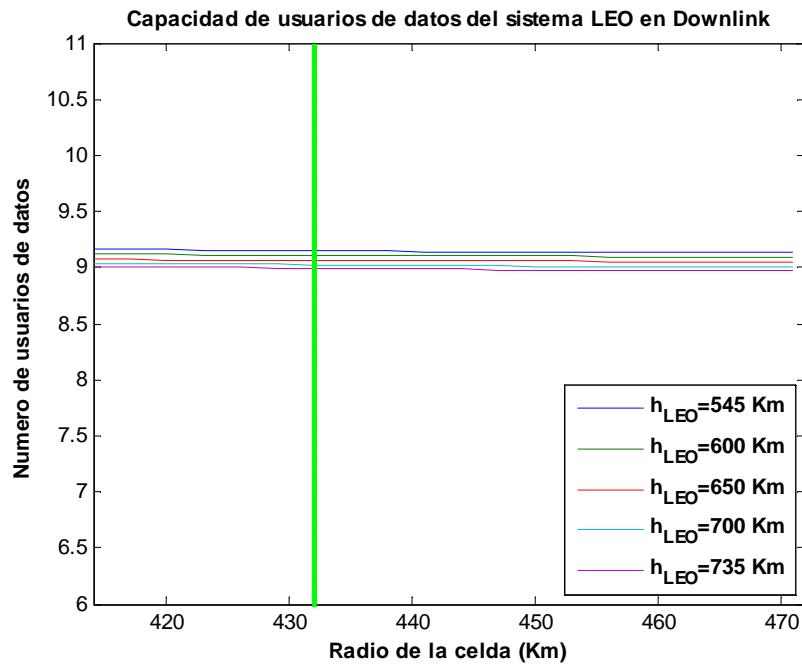


Figura 3.24 Número de usuarios de datos del sistema LEO según la altura del satélite en downlink.

Tabla 3.11 Capacidad en servicio de datos para distintos valores de la altura del satélite en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|-----------------|-------------|----------|-----------------|-------------|
| OPCIÓN | Altura LEO (Km) | N. Usuarios | OPCIÓN | Altura LEO (Km) | N. Usuarios |
| 1 | 545 | 10,12 | 1 | 545 | 9,16 |
| 2 | 600 | 9,79 | 2 | 600 | 9,12 |
| 3 | 650 | 9,45 | 3 | 650 | 9,08 |
| 4 | 700 | 9,09 | 4 | 700 | 9,03 |
| 5 | 735 | 8,82 | 5 | 735 | 9,00 |

Como ocurría en el servicio de datos, a medida que aumente la altura disminuye el número de usuarios posibles.

3.4.2.2.3 CASO 2. Variación de la capacidad ante distintos valores de ganancia mínima del sistema

En este apartado se analizará el efecto que produce la ganancia mínima de la antena del satélite en los procesos de datos para ambos enlaces.

Se utilizarán valores de 20 a 22 dB para la ganancia mínima (en donwlink estos valores se incrementan en 0.789 dB). El diagrama de radiación de la antena para ambos enlaces se representó en las **Figura 3.2 y 3.3**.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Capacidad para uplink:

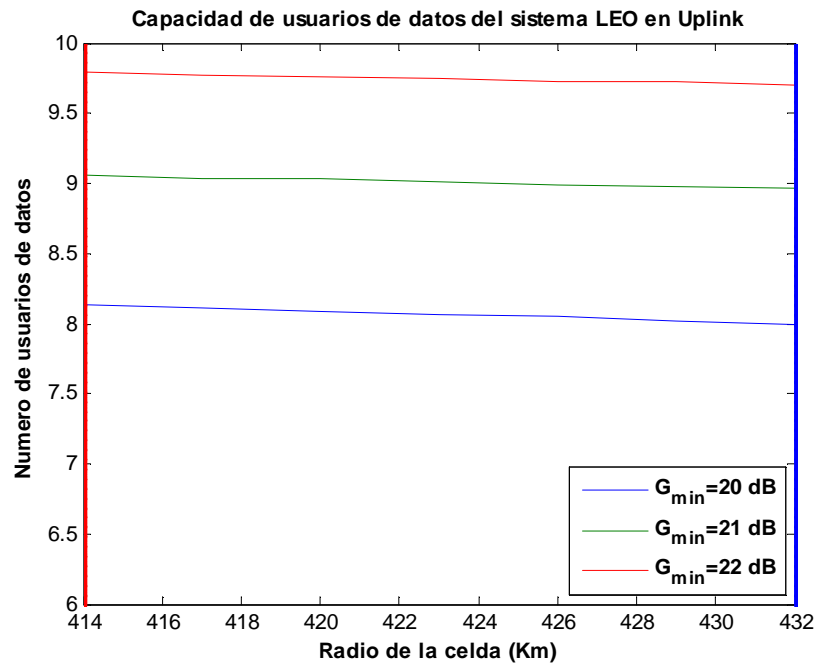


Figura 3.25 Número de usuarios de datos para el sistema LEO según la G_{min} en uplink.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Capacidad para downlink:

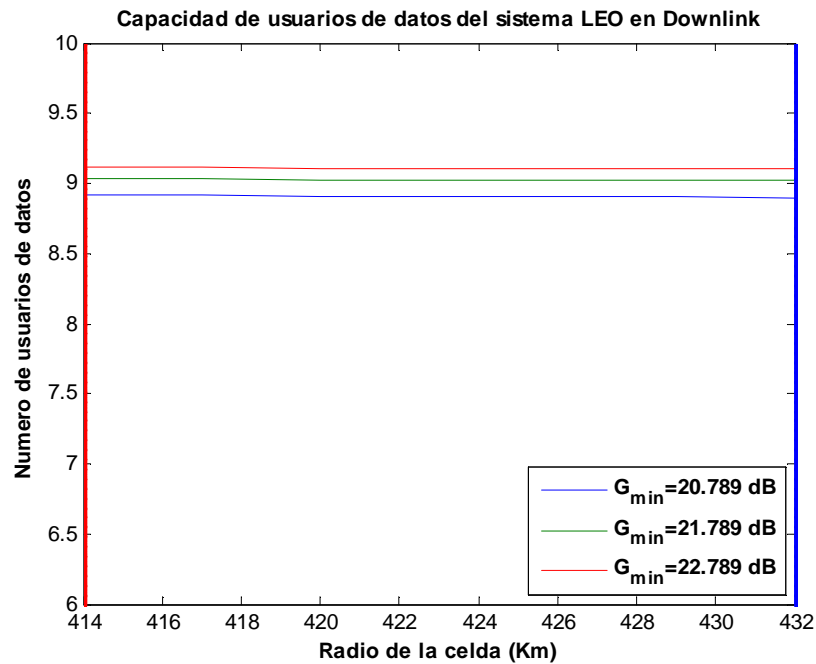


Figura 3.26 Número de usuarios de datos para el sistema LEO según la G_{min} en downlink.

Tabla 3.12 Capacidad del servicio de datos para distintos valores de la ganancia mínima del satélite en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|--------|-----------|-------------|----------|-----------|-------------|
| OPCIÓN | Gmin (dB) | N. Usuarios | OPCIÓN | Gmin (dB) | N. Usuarios |
| 1 | 20 | 8,13 | 1 | 20 | 8,92 |
| 2 | 21 | 9,06 | 2 | 21 | 9,03 |
| 3 | 22 | 9,79 | 3 | 22 | 9,12 |

Se obtiene un comportamiento similar al del servicio de voz, ya que el aumento de la ganancia mínima produce un aumento en la capacidad del sistema.

3.4.2.2.4 CASO 3. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia y ganancia mínima del sistema

En este apartado estudiamos el valor de la capacidad del sistema WCDMA por satélites LEO según la ganancia mínima de la antena del satélite y de la potencia emitida.

La simulación se realiza para un radio de 414 Km.

Capacidad para uplink:

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

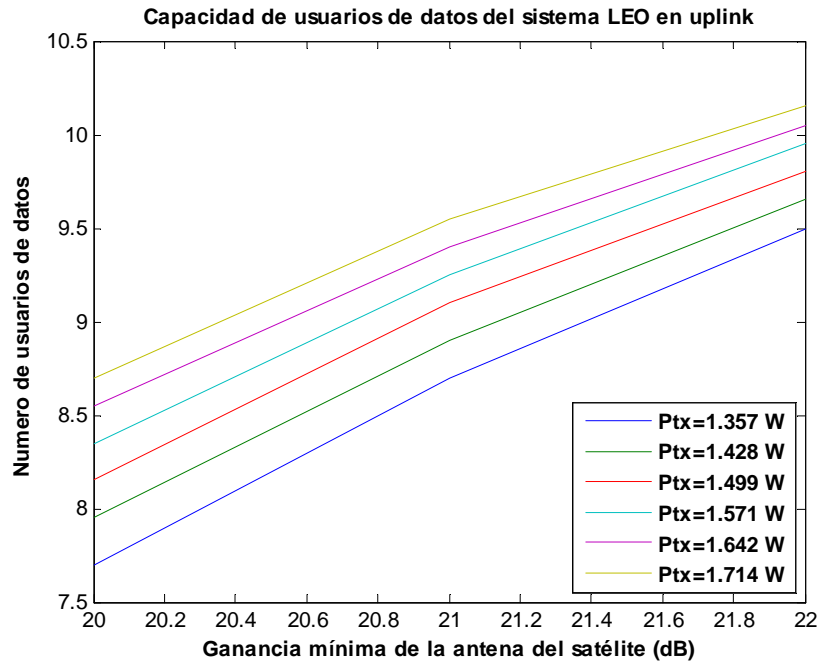


Figura 3.27 Número de usuarios de datos para el sistema LEO según la G_{min} y la potencia en uplink.

Capacidad para downlink:

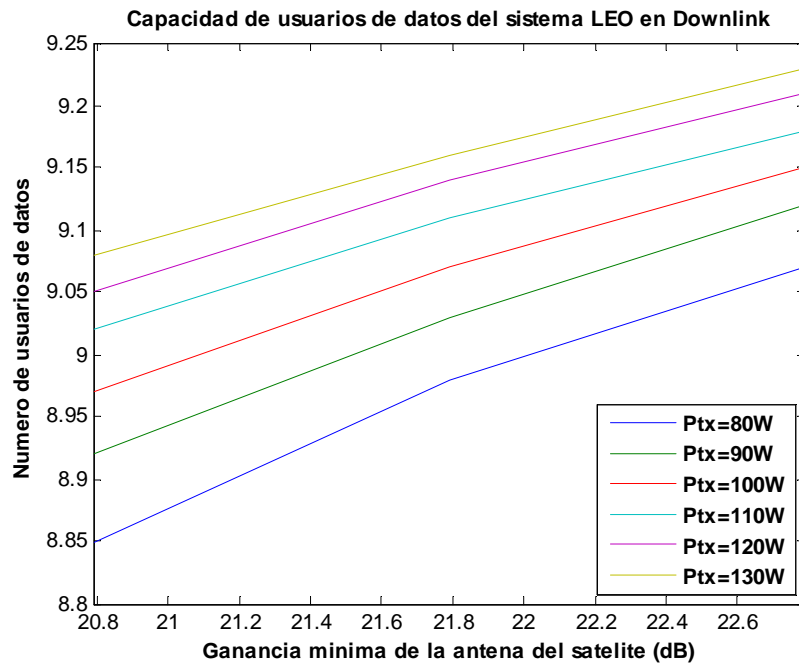


Figura 3.28 Número de usuarios de datos para el sistema LEO según la G_{min} y la potencia en downlink.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Tabla 3.13 Capacidad del servicio de datos para distintos valores de la ganancia mínima del satélite (en dB) y la potencia de transmisión (en W) en uplink y downlink.

| UPLINK | | | |
|----------|----------------|----------------|----------------|
| Ptx | Gmin=20 dB | Gmin=21 dB | Gmin=22 dB |
| 1,36 | 7,70 | 8,70 | 9,50 |
| 1,43 | 7,95 | 8,90 | 9,65 |
| 1,50 | 8,15 | 9,10 | 9,80 |
| 1,57 | 8,35 | 9,25 | 9,95 |
| 1,64 | 8,55 | 9,40 | 10,05 |
| 1,71 | 8,70 | 9,55 | 10,15 |
| DOWNLINK | | | |
| Ptx | Gmin=20,798 dB | Gmin=21,789 dB | Gmin=22,789 dB |
| 80 | 8,85 | 8,98 | 9,07 |
| 90 | 8,92 | 9,03 | 9,12 |
| 100 | 8,97 | 9,07 | 9,15 |
| 110 | 9,02 | 9,11 | 9,18 |
| 120 | 9,05 | 9,14 | 9,21 |
| 130 | 9,08 | 9,16 | 9,23 |

3.4.2.3 Relación entre la capacidad de voz y datos

A continuación veremos una serie de gráficas que describen la relación entre la capacidad de usuarios de voz y la capacidad de usuarios de datos.

Para ello nos centramos en el radio de cobertura, es decir, los resultados que se muestran en la gráfica se han obtenido para un valor fijo de R, siendo R=414 Km.

3.4.2.3.1 CASO 1. Comparativa lineal

En este apartado se compara la capacidad de usuarios de voz frente la capacidad de usuarios de datos de forma lineal.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

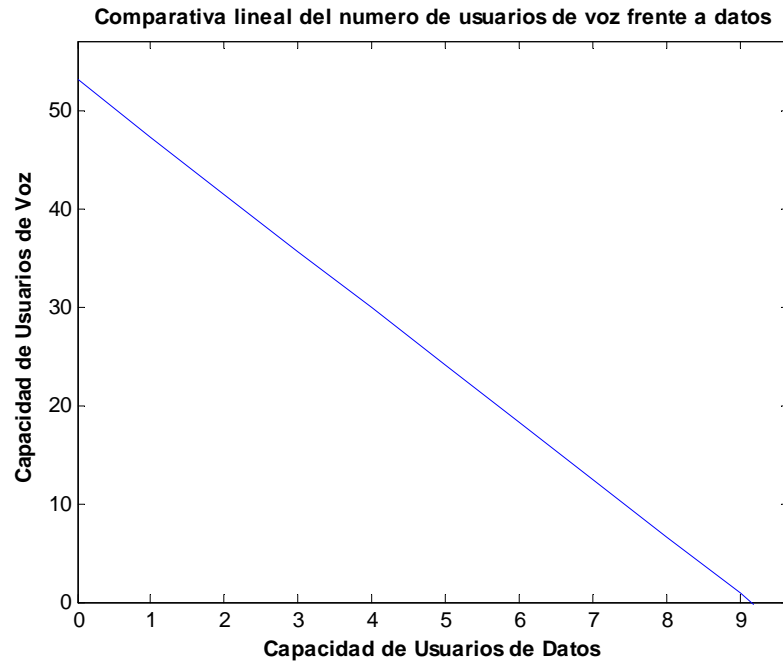


Figura 3.29 Relación lineal de la capacidad de usuarios de voz frente a datos.

La capacidad máxima por celda será:

Tabla 3.14 Comparativa lineal.

| COMPARATIVA LINEAL | | | | | | | |
|--------------------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| USUARIOS DE VOZ | 53,1 | 47,29 | 41,49 | 29,88 | 18,28 | 6,67 | 0,87 |
| USUARIOS DE DATOS | 0 | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 | 9 |

En la **Figura 3.29** se muestra la relación entre la capacidad de voz frente a datos y en la **Tabla 3.14** la equivalencia entre número de usuarios de voz y número de usuarios para datos. Se han dado valores en número racionales por ser una comparativa lineal. En el apartado siguiente se estudiará la comparativa real.

El número máximo de usuarios de voz será de 53 usuarios por célula, esto ocurrirá exclusivamente si no existen usuarios de datos.

El número máximo de usuarios de datos será de 9 usuarios por célula, esto ocurrirá exclusivamente si no existen usuarios de voz.

Los resultados intermedios combinando usuarios de voz y datos, se pueden en la **Tabla 3.14**.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

3.4.2.3.2 CASO 2. Comparativa real

En este apartado se compara la capacidad de usuarios de voz frente a la capacidad de usuarios de datos de forma real (se presentan el número de usuarios con número enteros). Esto se propone para hallar números exactos, es decir los usuarios se deben contar como números naturales ya que no se puede obtener parte de ellos.

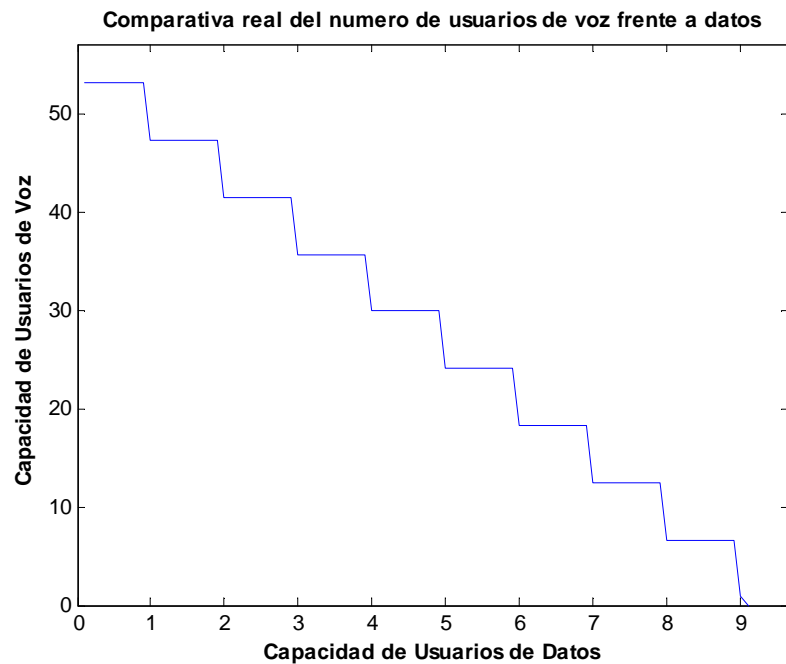


Figura 3.30 Relación real de la capacidad de usuarios de voz frente a datos.

Tabla 3.15 Comparativa real.

| COMPARATIVA REAL | | | | | | | |
|-------------------|----|----|----|----|----|---|---|
| USUARIOS DE VOZ | 53 | 47 | 41 | 29 | 18 | 6 | 0 |
| USUARIOS DE DATOS | 0 | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 | 9 |

En la **Tabla 3.15** se muestra la equivalencia entre usuarios de datos y usuarios de voz en números naturales. Un usuario de datos equivale a entre 5 y 6 usuarios de voz.

3.4.2.4 Capacidad total

La densidad de usuarios por celda es de:

$$\text{Densidad}_{\text{Usuarios de voz}} = \frac{N_{\text{usuarios de voz}}}{\text{Área}_{\text{celda}}} = \frac{53}{\pi R^2} = \frac{53}{\pi 414^2} = 9.8 \cdot 10^{-5} \text{ Usuarios de voz/Km}^2$$

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

$$\text{Densidad}_{\text{Usuarios de datos}} = \frac{N_{\text{usuarios de datos}}}{\text{Área}_{\text{celda}}} = \frac{9}{\pi R^2} = \frac{9}{\pi 414^2} = 31.67 \cdot 10^{-5} \text{ Usuarios de datos/Km}^2.$$

Capacidad total del sistema LEO, con 91 celdas por satélite:

$$\begin{aligned} \text{Capacidad total del sistema}_{\text{usuarios de voz}} &= N_{\text{usuarios de voz/celda}} * N_{\text{celdas/satélite}} * N_{\text{satélites por constelación}} \\ &= 53 * 37 * 64 = 125504 \text{ Usuarios de voz} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Capacidad total del sistema}_{\text{usuarios de datos}} &= N_{\text{usuarios de datos/celda}} * N_{\text{celdas/satélite}} * N_{\text{satélites por constelación}} \\ &= 9 * 37 * 64 = 21312 \text{ Usuarios de datos} \end{aligned}$$

3.5 CONCLUSIONES

Con los sistemas WCDMA con satélites LEO podemos proporcionar cobertura global en cualquier parte del planeta con una limitación en la cantidad de tráfico simultáneo. Esta limitación depende del número de satélites empleados, de la altura de éstos, de los parámetros de transmisión, de las tecnologías de satélites y terminales empleadas, de las pérdidas y del radio de cobertura que abarca cada haz del satélite.

Factores que tienen relación directa con la capacidad del sistema, esto es que al aumentar el factor aumentan el número de usuarios del sistema WCDMA:

- ✓ Potencia de transmisión.
- ✓ Ganancia mínima de la antena del satélite.

Factores que tienen relación inversa con la capacidad del sistema:

- ✗ Altura del satélite.
- ✗ Factor de ruido de los terminales.
- ✗ Radio de cobertura

$$\text{Número de abonados posibles} = 10 * \text{Capacidad máxima}$$

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

3.5.1 Mejor opción

La mejor opción para la capacidad ha sido elegida teniendo en cuenta todos los factores posibles ha sido:

- Altura del satélite 600 Km.
- Radio de cobertura 414 Km.
- Potencia de transmisión para uplink:
 - Voz: 420 mW.
 - Datos: 1.5 W.
- Potencia elegida para downlink: 90 W
- Ganancia máxima para uplink: 35 dB.
- Ganancia máxima para downlink: 35.789 dB.
- Ganancia mínima de la antena del satélite para uplink: 22 dB.
- Ganancia mínima de la antena del satélite para downlink: 22.789 dB.
- Ganancia de los terminales móviles para uplink: 4 dB.
- Ganancia de los terminales móviles para downlink: 4.789 dB.
- Factor de ruido del sistema $NF=5$ dB.

Con estos valores tenemos una constelación de 64 satélites LEO divididos en 8 órbitas para cobertura global.

La capacidad con estos valores es la siguiente:

- Capacidad máxima para servicios de voz exclusivo: 53 usuarios por celda.
- Capacidad máxima para servicios de datos exclusivo: 9 usuarios por celda.
- Capacidad mixta por celda: (mirar **Figura 3.30** y **Tabla 3.15**)
- Capacidad total para servicio de voz: 125504 Usuarios de voz.
- Capacidad total para el servicio de datos: 21312 Usuarios de datos.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Con los datos obtenidos en este capítulo podemos decir, que la tecnología WCDMA con satélites LEO es una buena opción para obtener cobertura global para servicios de emergencia, ya que se proporciona cobertura en cualquier parte del planeta a través de pequeños terminales móviles. Su uso también podría destinarse para cubrir las necesidades de estamentos exclusivos como el gobierno y las fuerzas del estado, y dar servicio de telefonía y datos a usuarios como por ejemplo operadores de transporte.

Entre los usuarios de este servicio se podrían contar operadores de flotas de transportes, líneas aéreas, pasajeros en aviones y controladores de tráfico aéreo, trabajadores gubernamentales, grupos de emergencia, administradores de bancos, periodistas y broadcasters, agencias de defensa civil y fuerzas de la paz, entre otros.

3.6 CASO FUTURO: Constelación de 91 celdas por satélite.

En la actualidad, no es posible el desarrollo de un sistema de satélites LEO con 91 haces debido a la tecnología de hoy en día. Las placas solares trabajan bajo el principio del efecto fotovoltaico, cuanto mayor sea la densidad de flujote la radiación solar sobre ellas, mayor es la electricidad que generan. Aún así, la desventaja que tienen estas celdas solares es que su factor de eficiencia en la conversión de energía solar en eléctrica es bajo (en un principio fue de un 8 %, en la actualidad está en torno al 30%) [10][14]. Nuevas investigaciones en materiales evolucionan el mercado de las comunicaciones por satélite y por tanto es interesante este estudio para años posteriores [15][16].

En este capítulo se proporcionan directamente resultados numéricos, para posibles consultas futuras.

3.6.1 Constelación de 91 celdas.

En una constelación de 64 satélites, 8 por plano, y 91 celdas por satélite, el radio de celda para cobertura global debe ser menor que para 37 celdas por satélite. Esto proporcionará más capacidad por celda, ya que como hemos visto en el apartado de 37 celdas, la capacidad disminuye con el radio celular en radios de 100 a 700 Km, habrá más capacidad por satélite, puesto que el número de celdas es mayor, y por tanto más capacidad total.

Se van a proporcionar los resultados para esta configuración, como posible información para años futuros, cuando la tecnología de satélites LEO haya avanzado para poder proporcionar satélites con 91 haces.

De la **Figura 2.18** obtenemos que la altura mínima para conseguir una constelación de 64 satélites (8 por plano), es de 545 Km. A partir de 736 de puede obtener cobertura global con 49 satélites. Y de la **Figura 2.19** que el radio de celda tiene que estar entre 264 y 300 Km, dependiendo de la altura del satélite.

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de la capacidad para 1 W. en un radio de cobertura de 264 y 300 Km a 735 Km. de altura.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

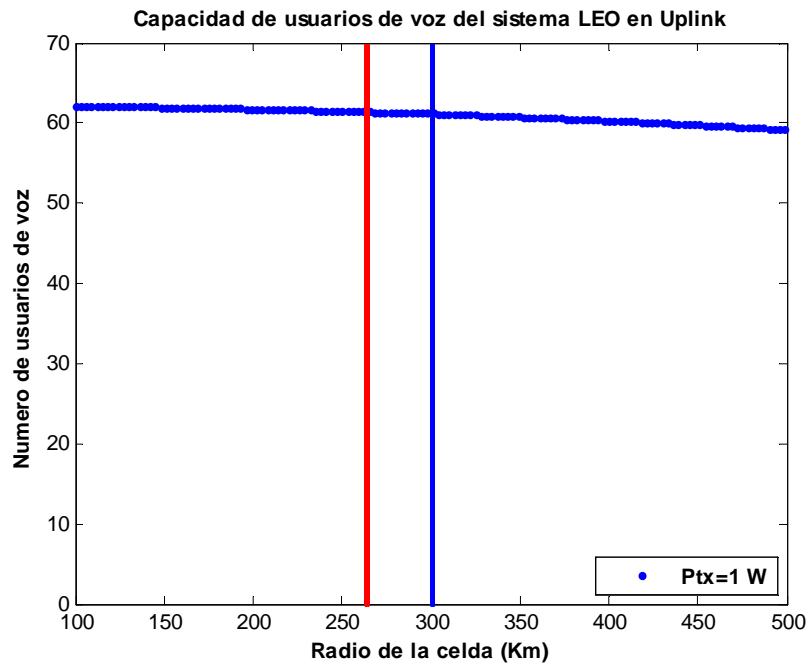


Figura 3.31 Comportamiento de la capacidad en un rango de 100 a 700 Km.

En la **Figura 3.31** y en la **Tabla 3.16** se muestra un estudio sobre distintas posibilidades para la constelación a fin de elegir la solución óptima.

Tabla 3.16 Estudio de la constelación para distintas alturas.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|-------------|----------|----------|----------|----------|
| Altura (Km) | 545 | 580 | 600 | 675 | 700 |
| Rango de radio de cobertura (Km) | 263,1-263,3 | 264-274 | 264-274 | 264-289 | 264-294 |
| Radio de cobertura elegido (Km) | 263,3 | 270 | 270 | 284 | 284 |
| Distancia Los (Km) | 2642,90 | 2726,45 | 2773,06 | 2941,27 | 2995,24 |
| Distancia Line-of-sight sobre el suelo (Km) | 5011,06 | 5153,00 | 5231,61 | 5511,80 | 5600,53 |
| Distancia que contempla en satélite en línea recta (Km) | 5010,60 | 5138,10 | 5138,10 | 5404,52 | 5404,52 |
| Número de satélites en una órbita | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Número de satélites totales | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 |
| Espacio de solapamiento entre satélites (Km) | 0,66 | 64,42 | 64,42 | 197,63 | 197,63 |
| Distancia mínima de solapamiento | 1,75370965 | 1,798335 | 1,798335 | 1,891582 | 1,891582 |
| Número de usuarios/celda para 500 mW. | 60,05 | 58,9 | 58,4 | 55,9 | 55,05 |
| Número de usuarios totales | 349731,2 | 343033,6 | 340121,6 | 325561,6 | 320611,2 |

Nos quedamos con el CASO 2, 580 Km de altura, y radio por celda de 270 Km. Se cumple la condición de la distancia *Line-of-Sight* y de la distancia de solapamiento.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

◆ *DATOS GENERALES:*

Tabla 3.17 Datos generales

| DATOS | |
|----------------------------------|------------|
| Radio tierra (Km) | 6378 |
| Hexagono diametro pequeño | 1,73 |
| Ncell/sat | 37 |
| Cell en linea/sat | 11 |
| Circunferencia de la Tierra (Km) | 40074,1559 |

◆ *DATOS ESPECÍFICOS:*

Tabla 3.18 Datos específicos constelación LEO.

| DATOS PARA CONSTELACIÓN LEO | |
|------------------------------------|------------|
| Radio celula (Km) | 270 |
| Altura Satélite (Km) | 580 |
| Nsatelites en una orbita | 8 |
| Nsatelites totales | 64 |
| Espacio de solapamiento | 64,4152569 |

Con un programa en Matlab diseñado específicamente para comprobar la distancia *LOS* aseguramos que el radio de cobertura de 284 Km. se encuentra dentro de la distancia *LOS*.

```
distancia_cobertura_sat =
```

```
5.1381e+003
```

```
distancia_curva_LOS =
```

```
5.1530e+003
```

```
BIEN! La distancia curva LOS es mayor que la de cobertura del satelite
```

Figura 3.32 Impresión de la comprobación distancia LOS.

Tenemos por tanto una constelación de 64 satélites LEO, a 580 Km de altura. Cada satélite contiene 91 spot-beams que abarcan un radio de cobertura de 280 Km cada uno. Siendo la zona de cobertura del satélite la suma de todos ellos, hace un total de 29802404 Km² de superficie aproximadamente.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

3.6.2 Resultado de los servicios estudiados

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones de la constelación LEO de 64 satélites, con 91 celdas por satélite. Las gráficas de las que se extraen los resultados se muestran en el Anexo A.

3.6.2.1 Servicio de voz

En esta sección se muestran los resultados para el servicio de voz.

3.6.2.1.1 CASO GENERAL. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia

Tabla 3.19 Capacidad del servicio de voz para distintos valores de potencia en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|
| OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios | OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios |
| 1 | 0,30 | 52,35 | 1 | 90 | 53,55 |
| 2 | 0,32 | 53,40 | 2 | 100 | 53,70 |
| 3 | 0,34 | 54,30 | 3 | 110 | 53,80 |
| 4 | 0,36 | 55,05 | 4 | 120 | 53,90 |
| 5 | 0,38 | 55,80 | 5 | 130 | 54,00 |
| 6 | 0,40 | 56,40 | 6 | 140 | 54,05 |

Tabla 3.20 Capacidad del servicio de voz para valores de potencia excesivamente altos en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|--------|--------------|-------------|----------|--------------|-------------|
| OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios | OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios |
| 1 | 1,00 | 62,40 | 1 | 2500 | 54,90 |
| 2 | 1,20 | 63,45 | | | |
| 3 | 1,40 | 64,20 | | | |
| 4 | 1,60 | 64,80 | | | |
| 5 | 1,80 | 65,25 | | | |
| 6 | 2,00 | 65,70 | | | |

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

3.6.2.1.2 CASO 1. Variación de la capacidad ante distintos valores de la altura del satélite

Se halla la capacidad para alturas en el rango de 545 Km. a 735 Km., ya que es a esta altura cuando podemos obtener una constelación de 8 o más satélites por plano. A alturas mayores podremos obtener constelaciones con menor número de satélites, aunque también sería posible una constelación de 64 satélites.

Tabla 3.6 Capacidad del servicio de voz para distintos valores de la altura del satélite en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|-----------------|--------------|----------|-----------------|--------------|
| OPCIÓN | Altura LEO (Km) | N. Usuarios | OPCIÓN | Altura LEO (Km) | N. Usuarios |
| 1 | 545 | 55,65 | 1 | 545 | 54,10 |
| 2 | 580 | 54,25 | 2 | 580 | 54,00 |
| 3 | 600 | 53,40 | 3 | 600 | 53,90 |
| 4 | 650 | 51,15 | 4 | 650 | 53,75 |
| 5 | 700 | 48,75 | 5 | 700 | 53,60 |
| 5 | 735 | 46,95 | 5 | 735 | 53,50 |

3.6.2.1.3 CASO 2. Variación de la capacidad ante distintos valores de ganancia mínima de la antena del satélite

En este apartado se variará la ganancia mínima de la antena del satélite para ver su efecto en la capacidad. Se utilizarán valores de 20 a 24 dB para la ganancia mínima (en donwlink estos valores se incrementan en 0.789 dB).

El diagrama de radiación para cada uno de los enlaces se presentaron en las en las **Figuras 3.2 y 3.3:**

Tabla 3.21 Capacidad del servicio de voz para distintos valores de la ganancia mínima del satélite en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|-----------|--------------|----------|-----------|--------------|
| OPCIÓN | Gmin (dB) | N. Usuarios | OPCIÓN | Gmin (dB) | N. Usuarios |
| 1 | 20 | 45,70 | 1 | 20 | 53,40 |
| 2 | 21 | 50,50 | 2 | 21 | 53,70 |
| 3 | 22 | 54,25 | 3 | 22 | 54,00 |
| 4 | 23 | 57,10 | 4 | 23 | 54,30 |
| 5 | 24 | 59,25 | 5 | 24 | 54,45 |

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

3.6.2.1.4 CASO 3. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia y ganancia mínima del sistema

La simulación se realiza para un radio de 270 Km.

Tabla 3.22 Capacidad del servicio de voz para distintos valores de la ganancia mínima del satélite (en dB) y la potencia de transmisión (en W) en uplink y downlink.

| UPLINK | | | | | |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ptx | Gmin=20 dB | Gmin=21 dB | Gmin=22 dB | Gmin=23 dB | Gmin=24 dB |
| 0,30 | 42,60 | 48,15 | 52,35 | 55,65 | 58,05 |
| 0,32 | 44,25 | 49,35 | 53,40 | 56,40 | 58,80 |
| 0,34 | 45,75 | 50,55 | 54,30 | 57,15 | 59,25 |
| 0,36 | 47,10 | 51,60 | 55,05 | 57,75 | 59,85 |
| 0,38 | 48,15 | 52,50 | 55,80 | 58,35 | 60,30 |
| 0,40 | 49,20 | 53,25 | 56,40 | 58,95 | 60,75 |
| DOWNLINK | | | | | |
| Ptx | Gmin=20,789 dB | Gmin=21,798 dB | Gmin=22,789 dB | Gmin=23,789 dB | Gmin=24,789 dB |
| 90 | 52,70 | 53,15 | 53,55 | 53,85 | 54,05 |
| 100 | 52,90 | 53,35 | 53,70 | 53,95 | 54,15 |
| 110 | 53,10 | 53,50 | 53,80 | 54,05 | 54,25 |
| 120 | 53,25 | 53,60 | 53,90 | 54,10 | 54,30 |
| 130 | 53,40 | 53,70 | 54,00 | 54,20 | 54,35 |
| 140 | 53,50 | 53,80 | 54,05 | 54,25 | 54,40 |

Eliminamos el área sombreada en rojo, ya que sobrepasa el número de usuarios para el enlace descendente. Eliminamos también el área sombreada en naranja, puesto que ya no es posible utilizar esas ganancias al haber eliminado el área roja en uplink.

3.6.2.1.5 CASO 4. Variación de la capacidad ante distintos valores del factor de ruido del sistema

Tabla 3.23 Capacidad del servicio de voz para distintos valores del factor de ruido en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|--------|---------|-------------|----------|---------|-------------|
| CASO | NF (dB) | N. Usuarios | CASO | NF (dB) | N. Usuarios |
| 1 | 3 | 59,65 | 1 | 3 | 54,35 |
| 2 | 4 | 57,25 | 2 | 4 | 54,20 |
| 3 | 5 | 54,25 | 3 | 5 | 54,00 |

No es necesario utilizar receptores con un factor de ruido menor que 5 dB, ya que se obtiene el mismo número de usuarios.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

3.6.2.2 Servicio de datos

En esta sección se muestran los resultados para el servicio de datos.

3.6.2.2.1 CASO GENERAL. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia

Tabla 3.24 Capacidad del servicio de datos para distintos valores de potencia en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|--------------|-------------|----------|--------------|-------------|
| OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios | OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios |
| 1 | 1,07 | 9,60 | 1 | 90 | 9,20 |
| 2 | 1,14 | 9,80 | 2 | 100 | 9,23 |
| 3 | 1,21 | 9,95 | 3 | 110 | 9,25 |
| 4 | 1,29 | 10,10 | 4 | 120 | 9,27 |
| 5 | 1,36 | 10,25 | 5 | 130 | 9,28 |
| 6 | 1,43 | 10,35 | 6 | 140 | 9,30 |

Tabla 3.25 Capacidad del servicio de datos para valores de potencia excesivamente altos en uplink y downlink

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|--------|--------------|-------------|----------|--------------|-------------|
| OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios | OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios |
| 1 | 4,00 | 11,75 | 1 | 2500 | 9,45 |
| 2 | 4,80 | 11,90 | | | |
| 3 | 5,60 | 12,00 | | | |
| 4 | 6,40 | 12,10 | | | |
| 5 | 7,20 | 12,15 | | | |
| 6 | 8,00 | 12,20 | | | |

No hace falta utilizar potencias mayores a las que se encuentran en la **Tabla 3.24**.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

3.6.2.2.2 CASO 1. Variación de la capacidad ante distintos valores de la altura del satélite

Tabla 3.6 Capacidad en servicio de datos para distintos valores de la altura del satélite en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|-----------------|-------------|----------|-----------------|-------------|
| OPCIÓN | Altura LEO (Km) | N. Usuarios | OPCIÓN | Altura LEO (Km) | N. Usuarios |
| 1 | 545 | 10,18 | 1 | 545 | 9,30 |
| 2 | 580 | 9,92 | 2 | 580 | 9,28 |
| 3 | 600 | 9,77 | 3 | 600 | 9,27 |
| 4 | 650 | 9,35 | 4 | 650 | 9,24 |
| 5 | 700 | 8,91 | 5 | 700 | 9,21 |
| 6 | 735 | 8,58 | 5 | 735 | 9,19 |

3.6.2.2.3 CASO 2. Variación de la capacidad ante distintos valores de ganancia mínima del sistema

Tabla 3.26 Capacidad del servicio de datos para distintos valores de la ganancia mínima del satélite en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|-----------|-------------|----------|-----------|-------------|
| OPCIÓN | Gmin (dB) | N. Usuarios | OPCIÓN | Gmin (dB) | N. Usuarios |
| 1 | 20 | 8,35 | 1 | 20 | 9,17 |
| 2 | 21 | 9,24 | 2 | 21 | 9,23 |
| 3 | 22 | 9,92 | 3 | 22 | 9,28 |
| 4 | 23 | 10,45 | 4 | 23 | 9,32 |
| 5 | 24 | 10,85 | 5 | 24 | 9,35 |

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

3.6.2.2.4 CASO 3. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia y ganancia mínima del sistema

La simulación se realiza para un radio de 270 Km.

Tabla 3.27 Capacidad en proceso de datos para distintos valores de la ganancia mínima del satélite (en dB) y la potencia de transmisión (en W) en uplink y downlink.

| UPLINK | | | | | |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ptx | Gmin=20 dB | Gmin=21 dB | Gmin=22 dB | Gmin=23 dB | Gmin=24 dB |
| 1,07 | 7,80 | 8,80 | 9,60 | 10,20 | 10,65 |
| 1,14 | 8,10 | 9,05 | 9,80 | 10,35 | 10,75 |
| 1,21 | 8,35 | 9,25 | 9,95 | 10,45 | 10,85 |
| 1,29 | 8,60 | 9,45 | 10,10 | 10,60 | 10,95 |
| 1,36 | 8,80 | 9,60 | 10,25 | 10,70 | 11,05 |
| 1,43 | 9,00 | 9,75 | 10,35 | 10,80 | 11,15 |
| DOWNLINK | | | | | |
| Ptx | Gmin=20,789 dB | Gmin=21,798 dB | Gmin=22,789 dB | Gmin=23,789 dB | Gmin=24,789 dB |
| 90 | 9,04 | 9,13 | 9,20 | 9,25 | 9,30 |
| 100 | 9,08 | 9,16 | 9,23 | 9,28 | 9,32 |
| 110 | 9,12 | 9,19 | 9,25 | 9,29 | 9,33 |
| 120 | 9,15 | 9,21 | 9,27 | 9,31 | 9,34 |
| 130 | 9,17 | 9,23 | 9,28 | 9,32 | 9,35 |
| 140 | 9,19 | 9,25 | 9,30 | 9,33 | 9,36 |

3.6.2.2.5 CASO 4. Variación de la capacidad ante distintos valores del factor de ruido del sistema

Tabla 3.28 Capacidad del servicio de datos para distintos valores del factor de ruido en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|
| CASO | NF (dB) | N. Usuarios | CASO | NF (dB) | N. Usuarios |
| 1 | 3 | 10,92 | 1 | 3 | 9,35 |
| 2 | 4 | 10,48 | 2 | 4 | 9,32 |
| 3 | 5 | 9,92 | 3 | 5 | 9,28 |

3.6.2.3 Relación entre la capacidad de voz y datos

A continuación se muestran los resultados de la relación entre la capacidad de usuarios de voz y la capacidad de usuarios de datos.

Para ello nos centramos en el radio de cobertura, es decir, los resultados se han obtenido para un valor fijo de R, siendo R=270 Km.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Tabla 3.29 Comparativa lineal.

| COMPARATIVA LINEAL | | | | | | | |
|--------------------|----|-------|-------|-------|-------|------|------|
| USUARIOS DE VOZ | 54 | 48,19 | 42,39 | 30,77 | 19,16 | 7,55 | 1,74 |
| USUARIOS DE DATOS | 0 | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 | 9 |

Tabla 3.30 Comparativa real.

| COMPARATIVA | | | | | | | |
|-------------------|----|----|----|----|----|---|---|
| USUARIOS DE VOZ | 54 | 48 | 42 | 30 | 19 | 7 | 1 |
| USUARIOS DE DATOS | 0 | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 | 9 |

3.6.2.4 Capacidad total

Aunque la capacidad por celda aumente ligeramente en comparación con el sistema Leo de 37 celdas por satélite, la densidad de usuarios por celda aumenta notablemente debido a la disminución del radio de cobertura por celda. La capacidad total aumenta notablemente al poder utilizar un número mayor de haces por satélite, es decir al proporcionar un número mayor del celdas por satélite.

La densidad de usuarios por celda es de:

$$\text{Densidad}_{\text{Usuarios de voz}} = \frac{N_{\text{usuarios de voz}}}{\text{Área}_{\text{celda}}} = \frac{54}{\pi R^2} = \frac{54}{\pi 270^2} = 2.35 \cdot 10^{-4} \text{ Usuarios de voz/Km}^2.$$

$$\text{Densidad}_{\text{Usuarios de datos}} = \frac{N_{\text{usuarios de datos}}}{\text{Área}_{\text{celda}}} = \frac{9}{\pi R^2} = \frac{9}{\pi 270^2} = 3.9 \cdot 10^{-5} \text{ Usuarios de datos/Km}^2$$

Capacidad total del sistema LEO, con 91 celdas por satélite:

$$\begin{aligned} \text{Capacidad total del sistema}_{\text{usuarios de voz}} &= N_{\text{usuarios de voz/celda}} * N_{\text{celdas/satélite}} * N_{\text{satélites por constelación}} \\ &= 54 * 91 * 64 = 314496 \text{ Usuarios de voz} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Capacidad total del sistema}_{\text{usuarios de datos}} &= N_{\text{usuarios de datos/celda}} * N_{\text{celdas/satélite}} * N_{\text{satélites por constelación}} \\ &= 9 * 91 * 64 = 52416 \text{ Usuarios de datos} \end{aligned}$$

3.6.3 Conclusiones para los satélites LEO del futuro

Las conclusiones sobre este estudio se enumeran a continuación:

- La capacidad por celda no aumenta notoriamente.
- La densidad de capacidad por celda aumenta en un 117% .
- La capacidad total en aproximadamente un 146%.

Por estas razones podemos decir que un sistema de satélites LEO que puede proveer capacidad para 91 celdas por satélite, proporcionará mejores resultado que un sistema que sólo pueda proveer a 37 celdas por satélite. Por ello se requiere el desarrollo de nuevas tecnologías de satélites LEO para aumentar la capacidad de estos sistemas en el futuro.

3.6.3.1 Mejor opción

La mejor opción para la capacidad ha sido elegida teniendo en cuenta todos los factores posibles ha sido:

- Altura del satélite 580 Km.
- Radio de cobertura 270 Km.
- Potencia de transmisión para uplink:
 - Voz: 340 mW.
 - Datos: 1.21 W
- Potencia elegida para downlink: 130 W
- Ganancia máxima para uplink: 40 dB.
- Ganancia máxima para downlink: 40.789 dB.
- Ganancia mínima de la antena del satélite para uplink: 22 dB.
- Ganancia mínima de la antena del satélite para downlink: 22.789 dB.
- Ganancia de los terminales móviles para uplink: 4 dB.
- Ganancia de los terminales móviles para downlink: 4.789 dB.
- Factor de ruido del sistema $NF=5$ dB.

3. Sistemas WCDMA con satélites LEO

Con estos valores tenemos una constelación de 64 satélites LEO divididos en 8 órbitas para cobertura global.

La capacidad con estos valores es la siguiente:

- Capacidad máxima para servicios de voz exclusivo: 54 usuarios
- Capacidad máxima para servicios de datos exclusivo: 9 usuarios.
- Capacidad total para servicio de voz: 314496 Usuarios de voz.
- Capacidad total para el servicio de datos: 52416 Usuarios de datos.

4 SISTEMAS WCDMA CON SATÉLITES MEO

4.1 INTRODUCCIÓN

Los satélites de órbita terrestre media están situados entre los 2000 y 20000 Km de altura, por debajo, al igual que los LEO, de los satélites geostacionarios. Su posición relativa respecto a la Tierra no es fija. Su periodo orbital es de varias horas, mayor por tanto que el de los LEO. Su velocidad es alta, entre 3 y 6 km/s. y los ángulos de inclinación son similares a los de las órbitas LEO (45-90°) [9].

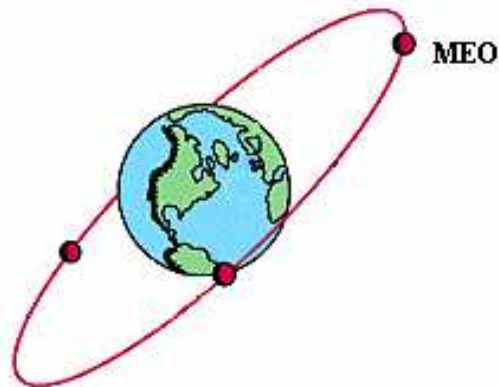


Figura 4.1 Satélites de órbita MEO.

Las principales ventajas e inconvenientes de la tecnología MEO están entre las de los LEO y las de los GEO.

4. Sistemas WCDMA con satélites MEO

- ***Principales ventajas:***

- ✓ Al estar a una altitud mayor que los LEO, necesitan menos satélites para cubrir la zona de cobertura, pero aún se necesitan muchos.
- ✓ Traspaso entre satélites menos frecuente que en los satélites LEO. Menor frecuencia de Handover.
- ✓ Mayor tiempo de visibilidad que los LEO.
- ✓ Menores pérdidas de propagación que los GEO.
- ✓ Terminales de tamaño medio.
- ✓ Uso eficaz del espectro.
- ✓ Retardos medios (<100ms).
- ✓ Vida útil mayor que los satélites LEO. Los satélites orbitan más lentamente y les afectan menos los cambios bruscos de temperatura.
- ✓ Órbitas suficientemente altas para evitar el problema de sombras.

- ***Principales inconvenientes***

- ✗ Los inconvenientes son prácticamente los mismos que para los satélites LEO.
- ✗ El retardo de propagación es mayor que en los satélites LEO.
- ✗ Necesidad de mayor potencia transmisora.
- ✗ Dificultad de puesta en órbita con respecto a los LEO (varias etapas).
- ✗ Radiación de los cinturones de Van Allen.
- ✗ Tecnología poco establecida.
- ✗ Muchos eclipses.
- ✗ Basura espacial.

4. Sistemas WCDMA con satélites MEO

- ✘ Compleja arquitectura de red.
- ✘ Antenas dirigibles capaces de seguir el rastro a los satélites. (Se soluciona con una antena del tipo array en fase).
- ✘ Desviación Doppler.
- ✘ Saturación de las órbitas. Puede pasar que haya un elevado número de satélites en la zona deseada.
- ✘ Direccionamiento mediante enlaces intersatélites. Problema que surge al direccional la señal entre dos punto alejados de la Tierra.

4.2 PRINCIPALES SERVICIOS

Las principales utilidades para las que se usan estos satélites son:

- Navegación.
- Comunicaciones móviles.
- Televisión.
- Mediciones de experimentos espaciales.
- Gestión de flotas.

4.3 DATOS DEL SISTEMA

4.3.1 Diagramas de radiación de la antena del satélite

La elección de la antena se ha realizado como se realizó para el sistema con satélites LEO en el apartado 3.3.1.

Para los satélites MEO, la ganancia máxima de la antena del satélite no debe ser mayor de 34 o 35 dB, debido a la tecnología actual. Utilizamos las ecuaciones (3.1) y (3.2) y una ganancia máxima de la antena de 34 dB para obtener el resto de parámetros y realizar las simulaciones [12].

4. Sistemas WCDMA con satélites MEO

Datos para uplink:

- Como ganancia máxima de la antena tenemos: $G_{\max} = 34 \text{ dB}$.
- Como ganancia mínima se ha elegido $G_{\min} = 22 \text{ dB}$ para la zona de cobertura, es decir, para ángulos menores a 45° .
- $\vartheta_{3dB} = 3.4^\circ$
- $\eta = 0.6$.

El diagrama de radiación de la antena del satélite para uplink viene representado en la **Figura 4.2**:

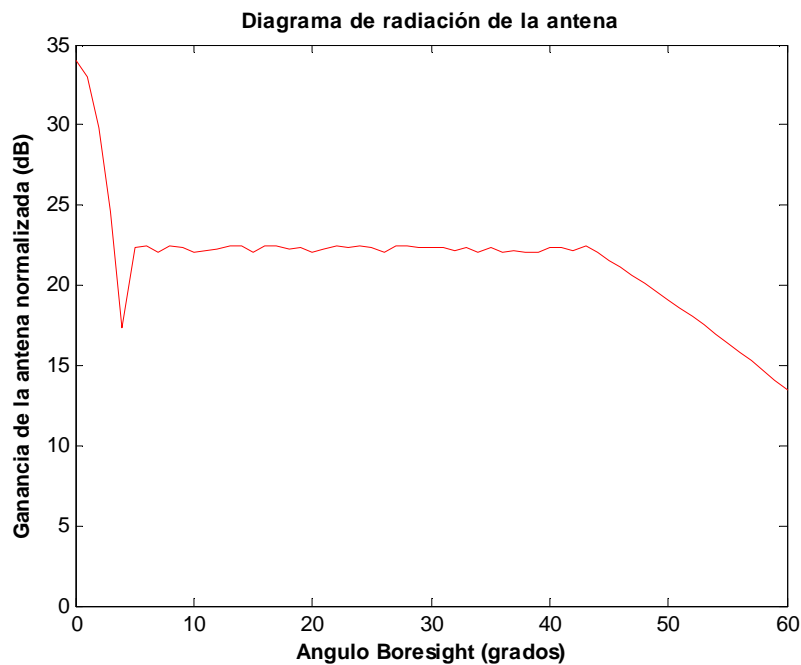


Figura 4.2 Diagrama de radiación de la antena del satélite MEO en uplink.

Hallamos la ganancia máxima para downlink con la ecuación (3.3).

Con la fórmula (3.1) calculamos la anchura de haz para downlink $\vartheta_{3dB} = 3.1^\circ$, un 91% la anchura de haz del uplink. Con esto ya podemos representar la ganancia de nuestra antena para el enlace descendente.

4. Sistemas WCDMA con satélites MEO

Datos para downlink:

- Como ganancia máxima de la antena tenemos: $G_{\max} = 34.789 \text{ dB}$.
- Como ganancia mínima se ha elegido $G_{\min} = 22.789 \text{ dB}$ para la zona de cobertura, es decir, para ángulos menores a 45° .
- $\vartheta_{3dB} = 3.1^\circ$
- $\eta = 0.6$.

El diagrama de radiación de la antena del satélite para downlink viene representado en la **Figura 4.3**:

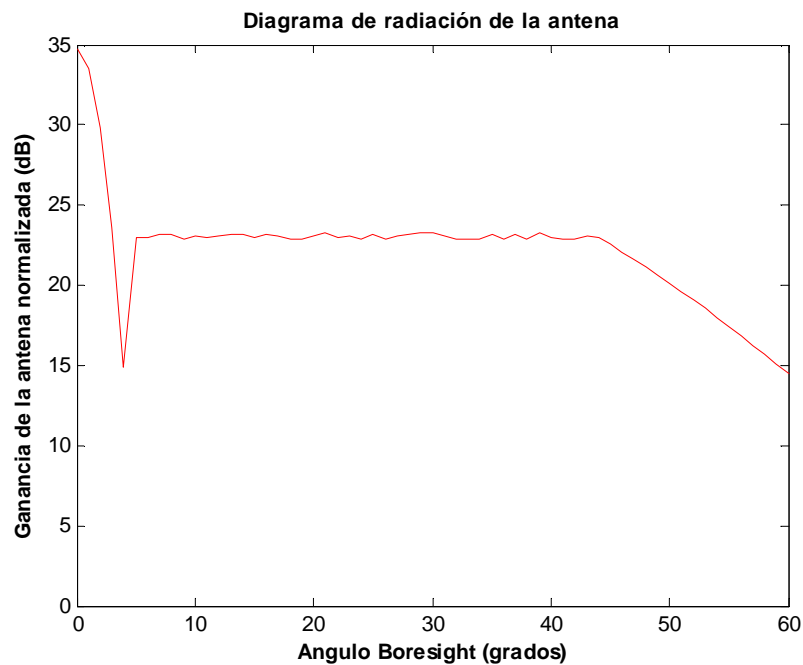


Figura 4.3 Diagrama de radiación de la antena del satélite MEO en downlink.

Usamos estas fórmulas para realizar nuestra simulación.

4.3.2 Parámetros utilizados en cada servicio bajo estudio

4.3.2.1 Datos para el servicio de voz

Los datos utilizados para el servicio de voz son los siguientes:

- ◆ Datos del satélite:
 - Altura del satélite: varía.
 - Antenas transmisoras con ganancia de 4 dB.
- ◆ Datos del sistema WCDMA:
 - Frecuencia para Uplink $f_{\text{uplink}} = 1.996 \text{ GHz}$.
 - Frecuencia para downlink $f_{\text{downlink}} = 2.186 \text{ GHz}$.
 - Ancho de banda WCDMA de 5 MHz.
- ◆ Datos del proceso de voz:
 - Factor de actividad para voz “ α ” de 0.66.
 - Ganancia del proceso $G_p = 256$.
 - Relación señal a ruido requerida para buena recepción $E_b/N_0 = 6.5 \text{ dB}$.
- ◆ Otros datos:
 - Factor de ortogonalidad para downlink $\phi = 0.25$.
 - Potencia asignada al canal piloto en downlink $P_p = 0.1$.
 - Factor de ruido NF de 5 dB.
 - Pérdidas de propagación por espacio libre de acuerdo a la fórmula (2.2) del apartado 2.2.6.2.

4.3.2.2 Datos para el servicio de datos

En este apartado se analizan los resultados obtenidos para usuarios de datos a través de simulaciones con el programa Matlab. Para ello se han utilizado los siguientes datos:

- ◆ Datos del satélite:
 - Altura del satélite: varía.
 - Antenas transmisoras con ganancia de 4.789 dB.
- ◆ Datos del sistema WCDMA:

4. Sistemas WCDMA con satélites MEO

- Frecuencia para Uplink $f_{\text{uplink}} = 1.996 \text{ GHz}$.
 - Frecuencia para downlink $f_{\text{downlink}} = 2.186 \text{ GHz}$.
 - Ancho de banda WCDMA de 5 MHz.
- ◆ Datos del proceso de datos:
- Factor de actividad para datos “ α ” de 1.
 - Ganancia del proceso $G_p = 32$.
 - Relación señal a ruido requerida para buena recepción $E_b/N_0 = 3.25 \text{ dB}$.
- ◆ Otros datos:
- Potencia para datos en uplink 3.77 veces mayor que para voz.
 - Factor de ortogonalidad para downlink $\phi = 0.25$.
 - Potencia asignada al canal piloto en downlink $P_p = 0.1$.
 - Factor de ruido NF de 5 dB.
 - Pérdidas de propagación por espacio libre de acuerdo a la fórmula (2.2) del apartado 2.2.6.2.

La potencia de datos debe ser mayor que en los procesos de voz para una buena recepción de la señal. Como se hizo en el apartado 2.3.2.2 del capítulo de satélites LEO, calculamos el valor por el que multiplicamos la potencia de los servicios de datos, para trabajar siempre en el punto óptimo de combinación de servicios.

Con las ecuaciones (3.5), (3.6) y (3.7) obtenemos que:

$$\begin{aligned} \left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{\text{voz}} = 6.5 \text{ dB} &\Rightarrow \text{en número naturales} \Rightarrow \left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{\text{voz}} = 4.47 \\ \left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{\text{datos}} = 3.25 \text{ dB} &\Rightarrow \text{en número naturales} \Rightarrow \left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{\text{datos}} = 2.11 \\ I_{\text{total}} = G_p \Big|_{\text{voz}} \frac{S \Big|_{\text{voz}}}{\left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{\text{voz}}} &= G_p \Big|_{\text{datos}} \frac{S \Big|_{\text{datos}}}{\left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{\text{datos}}} = 256 \frac{S \Big|_{\text{voz}}}{4.47} = 32 \frac{S \Big|_{\text{datos}}}{2.11} \Rightarrow \\ 3.77 S \Big|_{\text{voz}} &= S \Big|_{\text{datos}} \quad (4.1) \end{aligned}$$

4. Sistemas WCDMA con satélites MEO

La potencia en servicios de datos debe ser 3.77 veces mayor que la potencia en servicios de voz en el enlace ascendente.

Para el enlace descendente se utilizan los mismos valores en ambos servicios.

4.4 SIMULACIONES

En esta sección vamos a presentar una serie de simulaciones que nos permitirán alcanzar el objetivo de este proyecto. Para la elaboración de éstas, se ha utilizado un programa en Matlab cuyas características se adaptan perfectamente a las simulaciones que queremos desarrollar.

En este apartado se proporciona el estudio de la capacidad WCDMA para una constelación de satélites MEO.

4.4.1 Requisitos de la constelación

Como se hizo en el **Capítulo 3**, en primer lugar debemos establecer nuestra constelación de satélites. Para ello se hace un estudio de la altura a la que se encuentra el satélite, el radio de cobertura que proporciona cada uno y cuántos satélites se necesitan para cobertura global.

Este apartado se realiza teniendo en cuenta las mismas exigencias que se tuvieron en el caso de satélites LEO (**apartado 3.4.1**).

4. Sistemas WCDMA con satélites MEO

4.4.1.1 Número de satélites

Se va a realizar el estudio para distintas constelaciones de satélites. En cada apartado se especificará cada una de ellas.

4.4.1.2 Posibles constelaciones

En la actualidad, el número máximo de celdas por satélite disponible es de alrededor de 50. Esto se debe al tamaño de las placas solares y su eficiencia (todavía de un 30%).

Las configuraciones posibles serán las mismas que en el caso de satélites LEO. Algunas de ellas se mostraron en el **apartado 3.4.1.2**.

Para nuestro estudio se elige una constelación de 37 celdas por satélite.

4.4.1.3 Constelación de 37 celdas por satélite.

Vamos a estudiar el comportamiento de la capacidad en función del radio de cobertura y la altura del satélite para hallar la constelación óptima.

Como se ha dicho antes, los satélites MEO se encuentran en teoría en todo el espacio que hay entre los LEO y los GEO. No obstante los expertos los sitúan comúnmente entre los 10000 y los 20000 Km.

Vamos a ver su comportamiento a distintas alturas y distinto número de satélites según su altura. Se separan las configuraciones en distintos casos.

4.4.1.3.1 *Datos comunes para los distintos casos*

Tabla 4.1 Datos comunes.

| DATOS | |
|----------------------------------|------------|
| Radio tierra (Km) | 6378 |
| Hexagono diametro pequeño | 1,73 |
| Ncell/sat | 37 |
| Cells en linea/sat | 7 |
| Circunferencia de la Tierra (Km) | 40074,1559 |

4. Sistemas WCDMA con satélites MEO

4.4.1.3.2 CASO 1. MEO alto. Constelación de 9 satélites.

En esta sección se estudia el comportamiento de la capacidad para el sistema WCDMA con satélites MEO a una altura superior a 9522 Km. A partir de esta altura obtenemos una constelación de 9 satélites divididos en 3 planos (ver **Figura 2.18**)

A esta constelación la llamaremos *MEO Alto*.

Se realiza el estudio para alturas entre 9522 y 20000 Km. Se utiliza una potencia de 1W para uplink (potencia máxima de transmisión de los terminales móviles) y una potencia de 100 W para downlink. Los resultados se muestran en las **Figuras 4.4** y **4.5** y en la **Tabla 4.2**.

4. Sistemas WCDMA con satélites MEO

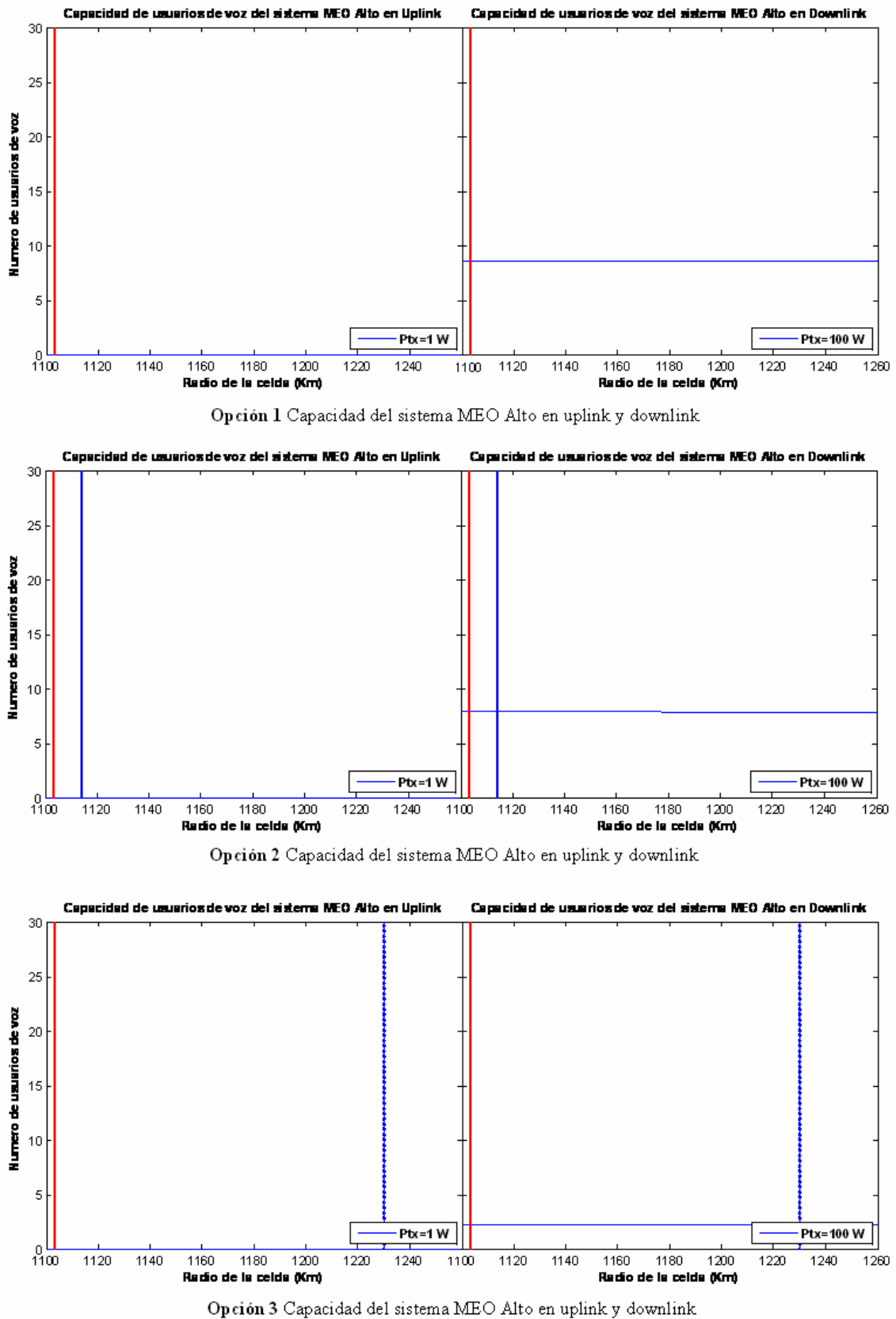
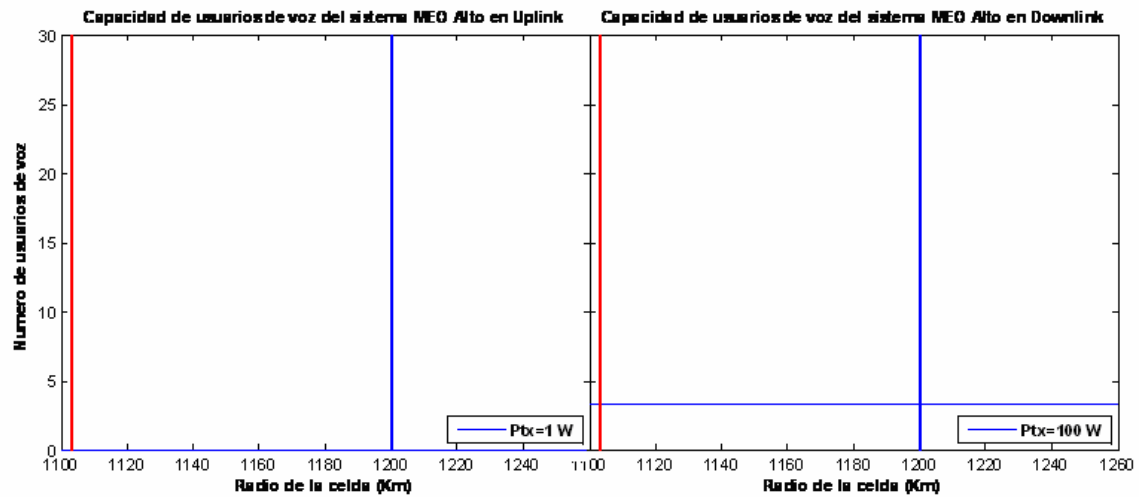
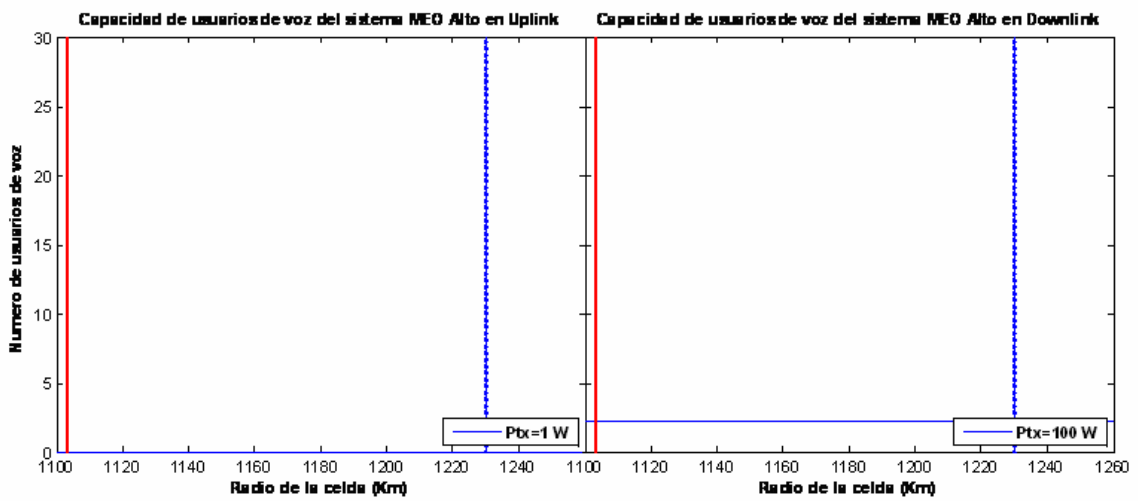


Figura 4.4 Capacidad del sistema MEO Alto a distintas alturas_parte 1.

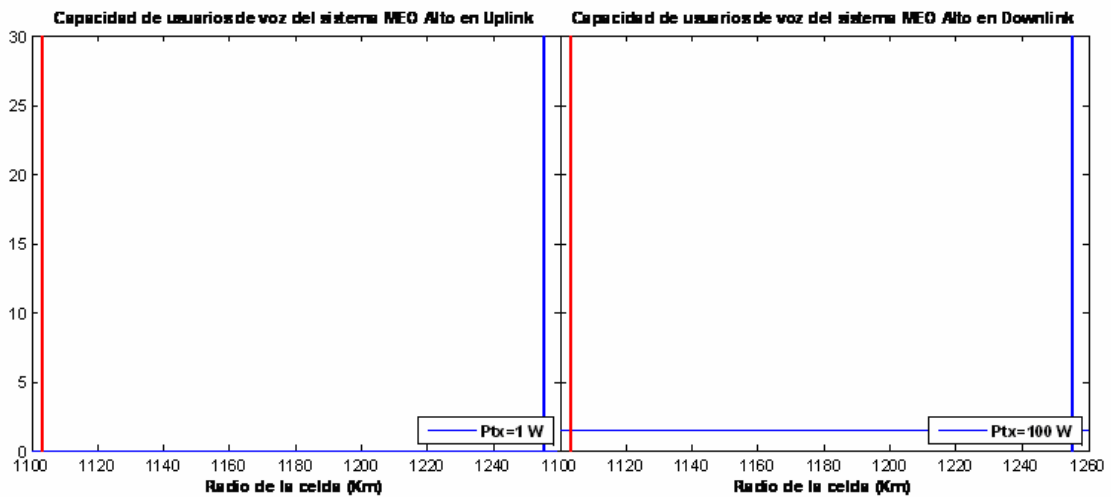
4. Sistemas WCDMA con satélites MEO



Opción 4 Capacidad del sistema MEO Alto en uplink y downlink



Opción 5 Capacidad del sistema MEO Alto en uplink y downlink



Opción 6 Capacidad del sistema MEO Alto en uplink y downlink

Figura 4.5 Capacidad del sistema MEO Alto a distintas alturas_parte 2.

4. Sistemas WCDMA con satélites MEO

Tabla 4.2 Tabla comparativa del sistema MEO Alto a distintas alturas

| CASO | 1 | 2 | 2 | 3 | 5 | 6 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Altura (Km) | 9522 | 10000 | 12500 | 15000 | 17500 | 20000 |
| Rango de radio de cobertura (Km) | 1103 | 1103-1114 | 1103-1162 | 1103-1200 | 1103-1230 | 1103-1255 |
| Radio de cobertura elegido (Km) | 1103 | 1104 | 1104 | 1104 | 1104 | 1104 |
| Distancia Los (Km) | 11047,07 | 11320,95 | 12657,21 | 13865,28 | 14976,21 | 16010,25 |
| Distancia Line-of-sight sobre el suelo (Km) | 13358,08 | 13492,51 | 14083,03 | 14537,49 | 14901,36 | 15201,27 |
| Distancia que contempla en satélite en línea recta (Km) | 13357,33 | 13369,44 | 13369,44 | 13369,44 | 13369,44 | 13369,44 |
| Número de satélites en una órbita | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Número de satélites totales | 16 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| Espacio de solapamiento entre satélites (Km) | 1669,40 | 5,69 | 5,69 | 5,69 | 5,69 | 5,69 |
| Distancia mínima de solapamiento (0,5% de error) | 4,6750655 | 4,679304 | 4,679304 | 4,679304 | 4,679304 | 4,679304 |
| Número de usuarios/celda para 1 W. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Número de usuarios totales | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

En las **Figuras 4.4** y **4.5** podemos apreciar que para 1 W de potencia la capacidad con satélites MEO es cero. En la **Tabla 4.2** se muestra una tabla comparativa, con diferentes alturas, para una constelación de 16 satélites, y se proporciona la capacidad para el servicio de voz.

Se observa que la capacidad es cero para todo el rango de alturas. Sería necesario utilizar mayor potencia de transmisión, pero como en este caso los terminales son móviles no podemos aumentarla más. Por tanto una constelación del sistema WCDMA con 9 satélites MEO no sería recomendable.

No se realiza el estudio del servicio de datos, a causa de los malos resultados para el servicio de voz.

4.4.1.3.3 CASO 2. MEO Medio. Constelación de 16 satélites

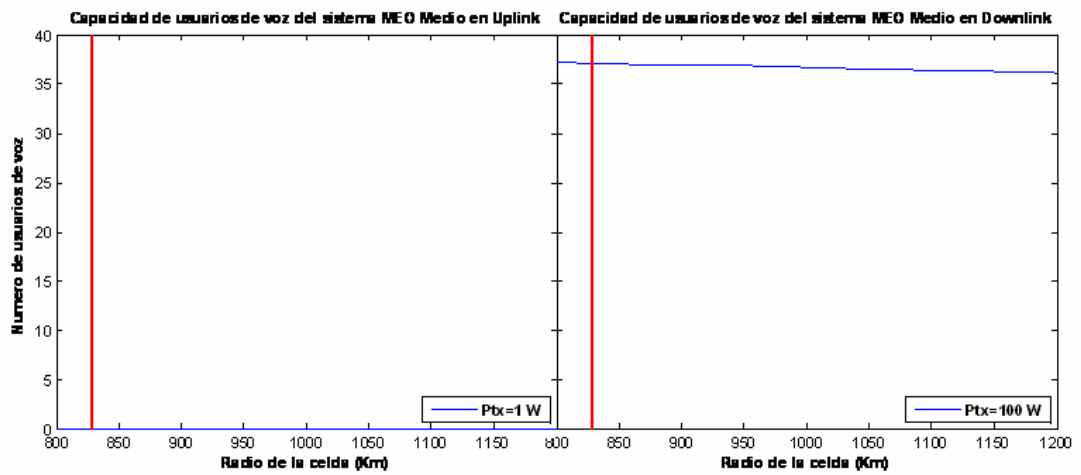
En esta sección se muestra el comportamiento de la capacidad del sistema WCDMA con satélites MEO para una constelación de 16 satélites (4 por plano).

A partir de la **Figura 2.18** obtenemos que la altura mínima para conseguir una constelación de 16 satélites (4 por plano) es de 3174 Km. Y de la **Figura 2.19** que el radio de celda tiene que estar entre 828 y 1103 Km, dependiendo de la altura del satélite. A esta constelación la llamaremos *MEO Medio*.

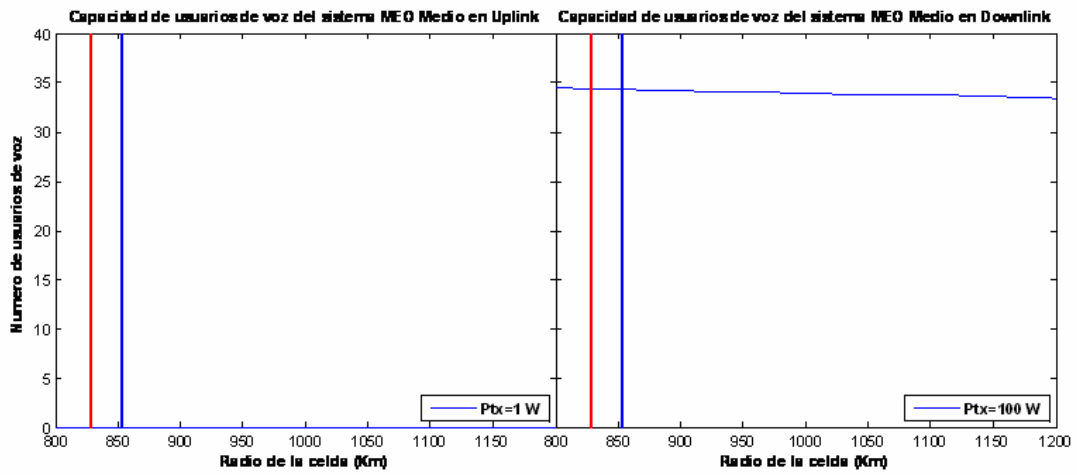
Se utiliza una potencia de 1W para uplink (potencia máxima de transmisión de los terminales móviles) y una potencia de 100 W por celda para downlink.

Los resultados se muestran en las **Figuras 4.6, 4.7** y **4.8**, y en la **Tabla 4.3**.

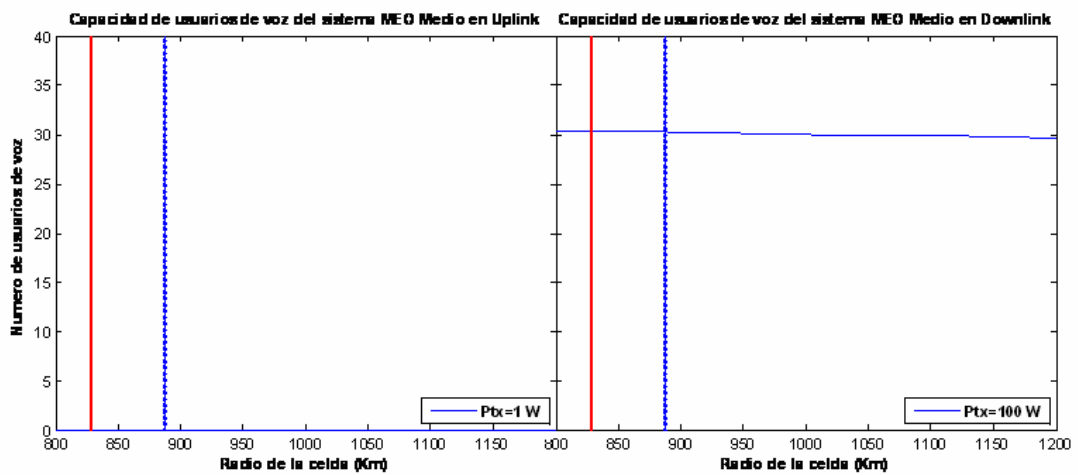
4. Sistemas WCDMA con satélites MEO



Opción 1 Capacidad del sistema MEO Medio en uplink y downlink.



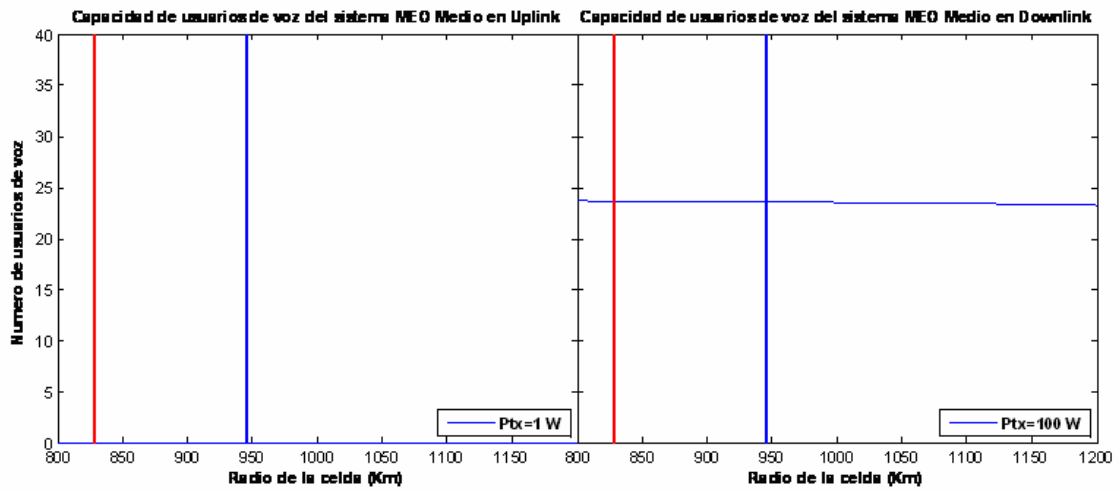
Opción 2 Capacidad del sistema MEO Medio en uplink y downlink.



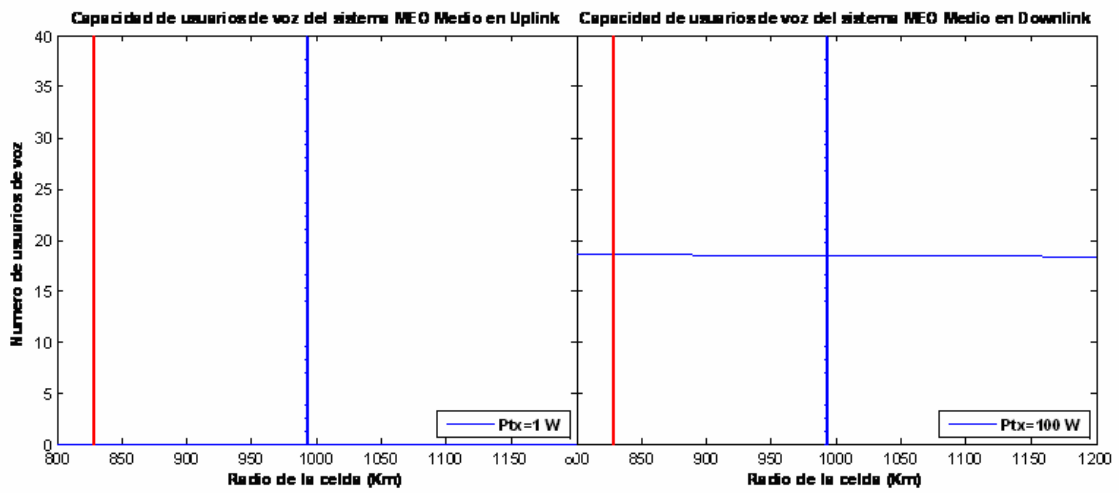
Opción 3 Capacidad del sistema MEO Medio en uplink y downlink.

Figura 4.6 Capacidad del sistema MEO Medio a distintas alturas_parte 1.

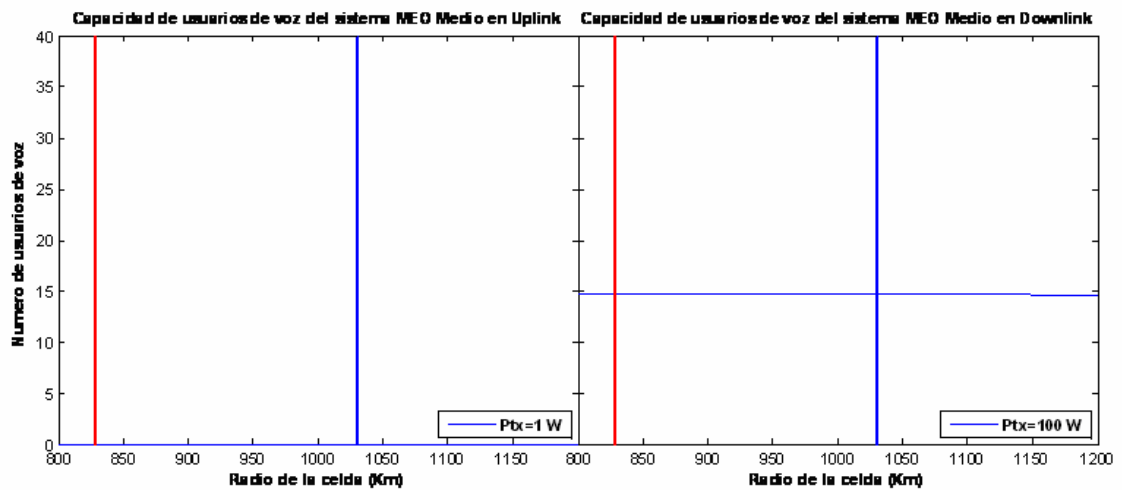
4. Sistemas WCDMA con satélites MEO



Opcción 4 Capacidad del sistema MEO Medio en uplink y downlink.



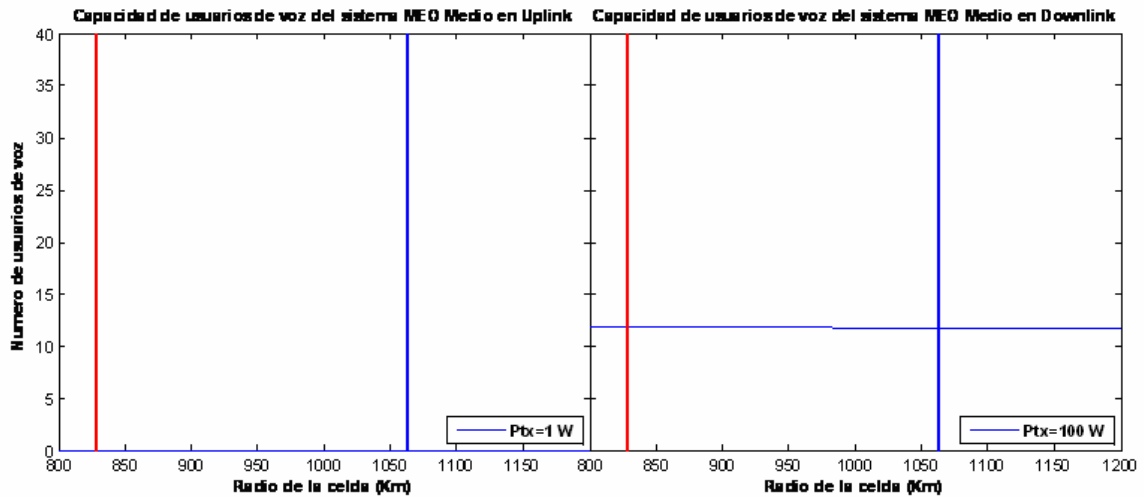
Opcción 5 Capacidad del sistema MEO Medio en uplink y downlink.



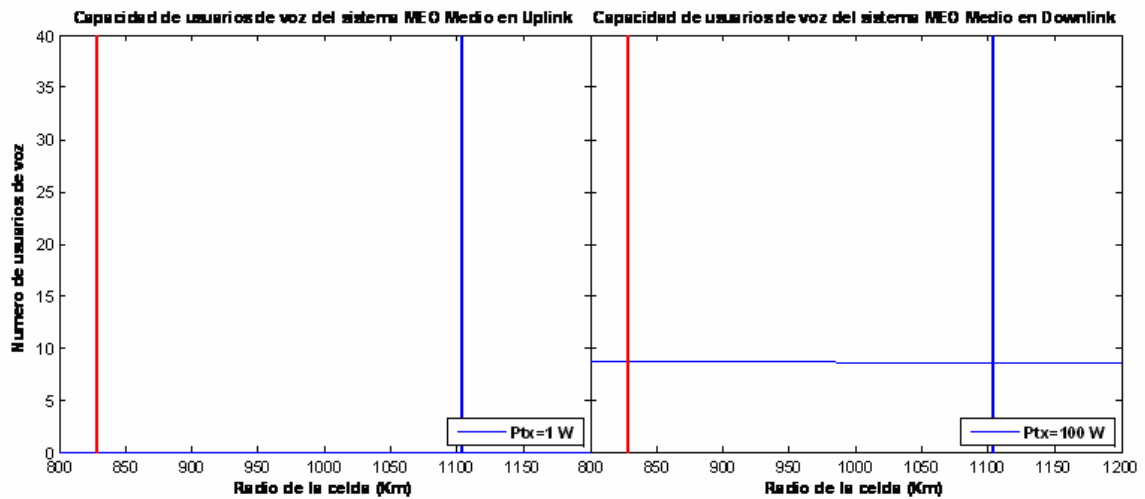
Opcción 6 Capacidad del sistema MEO Medio en uplink y downlink.

Figura 4.7 Capacidad del sistema MEO Medio a distintas alturas_parte 2.

4. Sistemas WCDMA con satélites MEO



Opción 7 Capacidad del sistema MEO Medio en uplink y downlink.



Opción 8 Capacidad del sistema MEO Medio en uplink y downlink.

Figura 4.8 Capacidad del sistema MEO Medio a distintas alturas_parte 3.

Tabla 4.3 Tabla comparativa del sistema MEO Medio a distintas alturas.

| CASO | 1 | 2 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Altura (Km) | 3175 | 3500 | 4000 | 5000 | 6000 | 7000 | 8000 | 9520 |
| Rango de radio de cobertura (Km) | 828 | 828-853 | 828-887 | 828-945 | 828-992 | 828-1030 | 828-1062 | 828-1103 |
| Radio de cobertura elegido (Km) | 828 | 828 | 828 | 828 | 828 | 828 | 828 | 828 |
| Distancia Los (Km) | 6379,03 | 6697,57 | 7160,00 | 8005,12 | 8769,17 | 9471,79 | 10125,77 | 11045,91 |
| Distancia Line-of-sight sobre el suelo (Km) | 10019,57 | 10330,23 | 10754,55 | 11455,48 | 12015,75 | 12477,52 | 12866,94 | 13357,50 |
| Distancia que contempla en satélite en línea recta (Km) | 10027,08 | 10027,08 | 10027,08 | 10027,08 | 10027,08 | 10027,08 | 10027,08 | 10027,08 |
| Número de satélites en una órbita | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Número de satélites totales | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| Espacio de solapamiento entre satélites (Km) | 4,27 | 4,27 | 4,27 | 4,27 | 4,27 | 4,27 | 4,27 | 4,27 |
| Distancia mínima de solapamiento (0,5% de error) | 3,509478 | 3,509478 | 3,509478 | 3,509478 | 3,509478 | 3,509478 | 3,509478 | 3,509478 |
| Número de usuarios/celda para 1 W. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Número de usuarios totales | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4. Sistemas WCDMA con satélites MEO

En las **Figuras 4.6, 4.7 y 4.8**, se muestra la capacidad del sistema WCDMA con satélites MEO Medio a distintas alturas. En la **Tabla 4.3**, se muestra una tabla comparativa, con las diferentes alturas de las Figuras anteriores, para una constelación de 16 satélites. Se observa que la capacidad sigue cero para todo el rango de alturas. Sería necesario utilizar mayor potencia de transmisión, pero como el caso de MEO Alto, los terminales son móviles y no podemos aumentarla más. Por tanto una constelación de 16 satélites MEO no sería recomendable.

No se realiza el estudio del servicio de datos, a causa de los malos resultados para el servicio de voz.

4.4.1.3.4 CASO 3. MEO Bajo. Constelación de 25 satélites

En esta sección se muestra el comportamiento de la capacidad del sistema WCDMA con satélites MEO para una constelación de 25 satélites (4 por plano).

La altura mínima para los satélites MEO es de 2000 Km. A partir de la **Figura 2.18**, obtenemos que a esa altura podemos obtener una constelación de 25 satélites (5 por plano). De la **Figura 2.19** extraemos que el radio de celda debe estar entre 662 y 827 Km, dependiendo de la altura del satélite, para que se cumpla el requisito de 4 satélites por plano. A esta constelación la llamaremos *MEO Bajo*.

Se utiliza una potencia de 1W para uplink (potencia máxima de transmisión de los terminales móviles) y una potencia de 17 W por celda para downlink.

Los resultados se muestran en las **Figuras 4.9 y 4.10**, y en la **Tabla 4.4**.

4. Sistemas WCDMA con satélites MEO

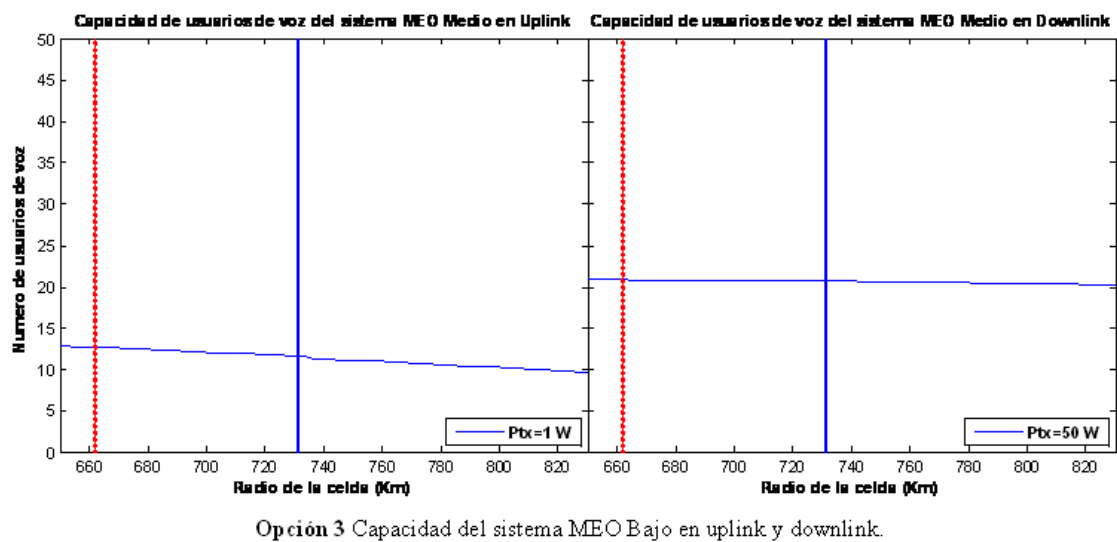
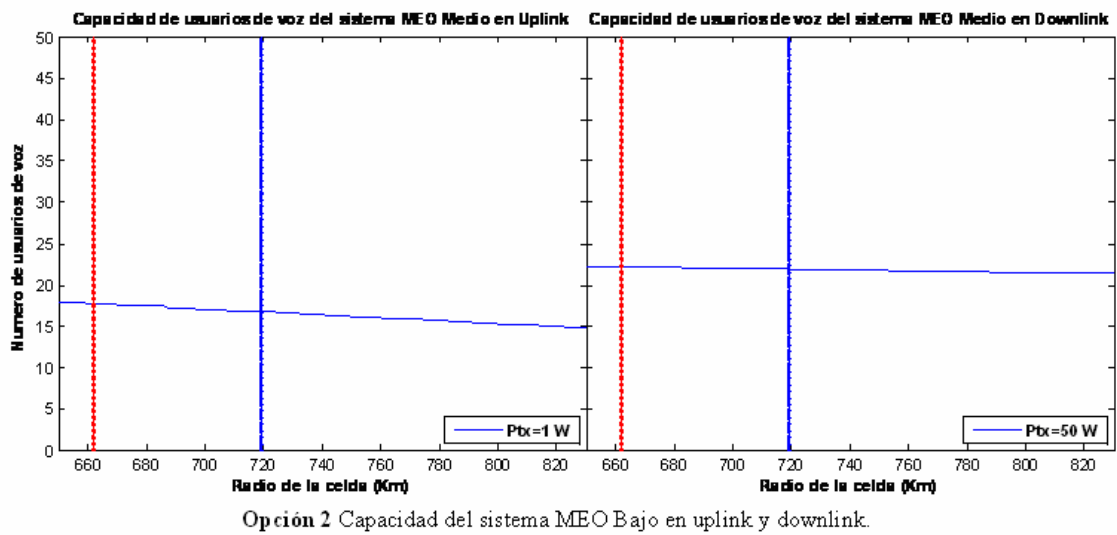
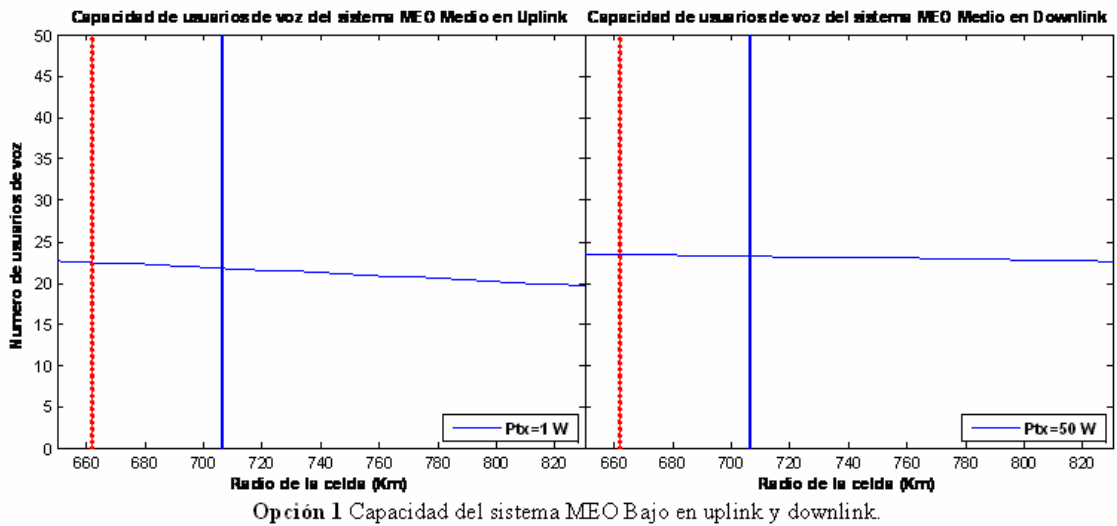
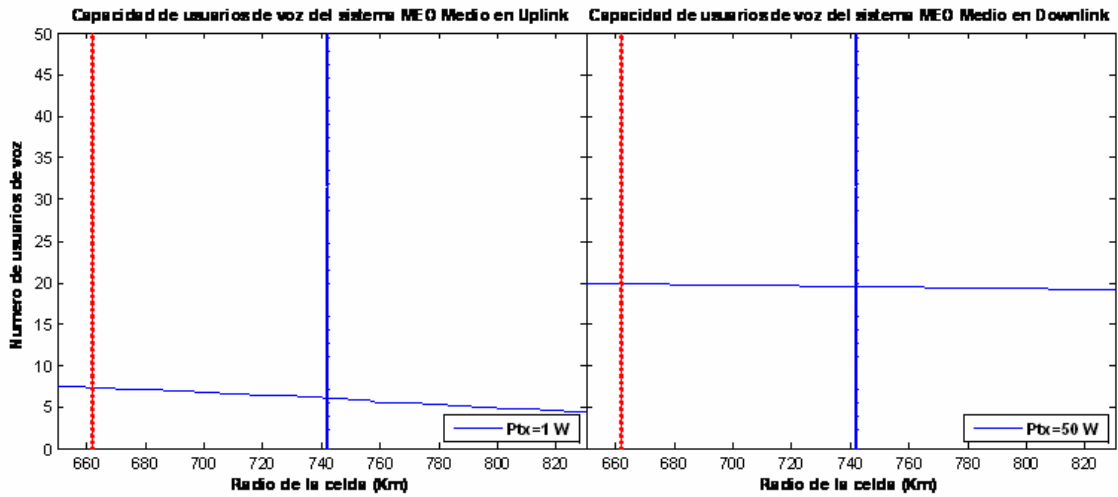
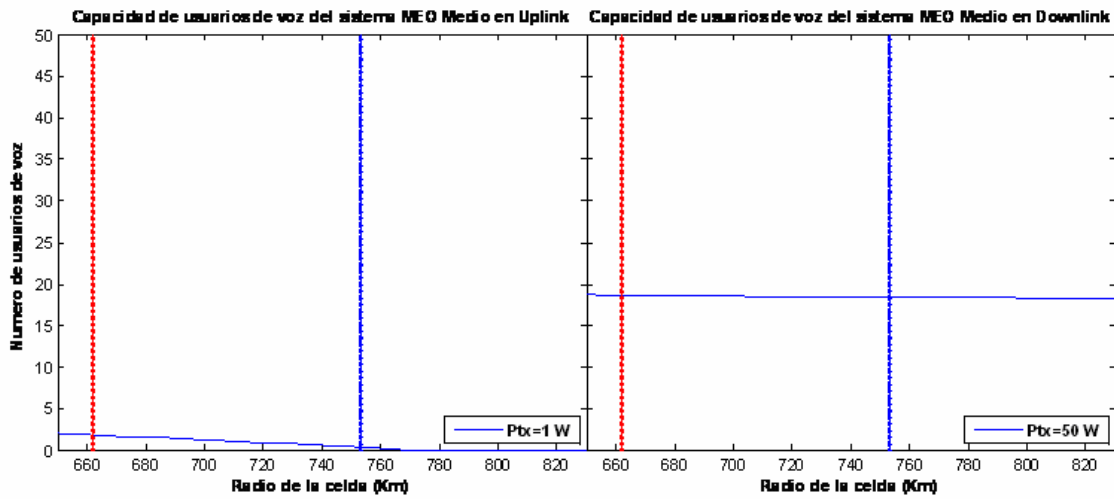


Figura 4.9 Capacidad del sistema MEO Bajo a distintas alturas_parte 1.

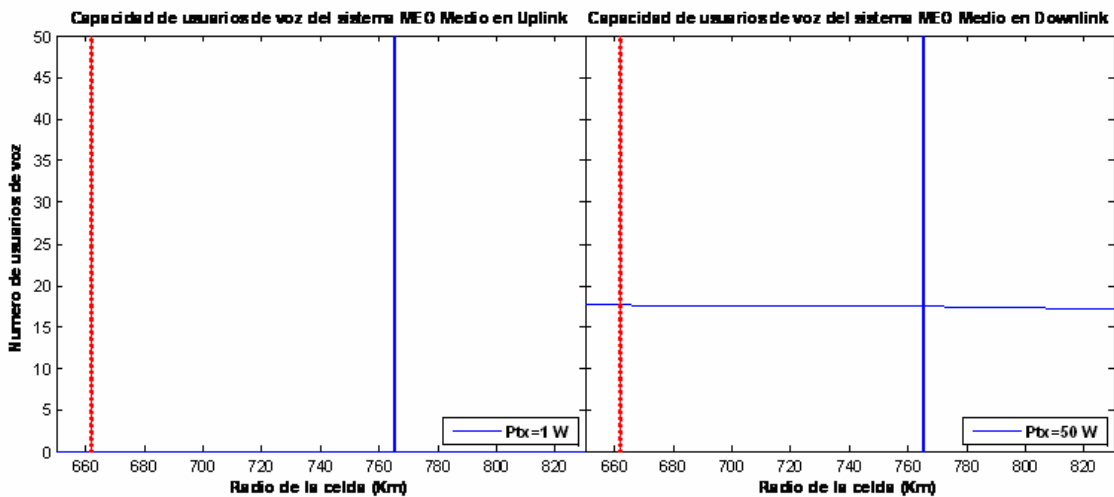
4. Sistemas WCDMA con satélites MEO



Opción 4 Capacidad del sistema MEO Bajo en uplink y downlink.



Opción 5 Capacidad del sistema MEO Bajo en uplink y downlink.



Opción 6 Capacidad del sistema MEO Bajo en uplink y downlink.

Figura 4.10 Capacidad del sistema MEO Bajo a distintas alturas_parte 2.

4. Sistemas WCDMA con satélites MEO

Tabla 4.4 Tabla comparativa del sistema MEO Bajo a distintas alturas.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Altura (Km) | 2000 | 2100 | 2200 | 2300 | 2400 | 2500 |
| Rango de radio de cobertura (Km) | 662-706 | 662-719 | 662-731 | 662-742 | 662-753 | 662-765 |
| Radio de cobertura elegido (Km) | 663 | 663 | 663 | 663 | 663 | 663 |
| Distancia Los (Km) | 5062,88 | 5187,91 | 5310,00 | 5429,34 | 5546,11 | 5660,48 |
| Distancia Line-of-sight sobre el suelo (Km) | 8558,66 | 8710,60 | 8856,18 | 8995,85 | 9130,05 | 9259,15 |
| Distancia que contempla en satélite en línea recta (Km) | 8028,93 | 8028,93 | 8028,93 | 8028,93 | 8028,93 | 8028,93 |
| Número de satélites en una órbita | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Número de satélites totales | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Espacio de solapamiento entre satélites (Km) | 7,05 | 7,05 | 7,05 | 7,05 | 7,05 | 7,05 |
| Distancia mínima de solapamiento (0,5% de error) | 2,8101255 | 2,8101255 | 2,8101255 | 2,8101255 | 2,8101255 | 2,8101255 |
| Número de usuarios/celda para 1 W. | 22,5 | 17,7 | 12,75 | 7,35 | 1,8 | 0 |
| Número de usuarios totales | 20350 | 15725 | 11100 | 6475 | 925 | 0 |

En el caso de MEO Bajo podemos apreciar un ligero incremento de la capacidad a las alturas más bajas.

A una altura de alrededor de 2500 se empieza a obtener una capacidad de cero usuarios. Por tanto, y como se ha comprobado antes en los apartados 4.4.1.3.3 y 4.4.1.3.4, el sistema WCDMA con satélites MEO no se debe utilizar en este rango de alturas.

A medida que decrece la altura obtenemos algo de capacidad en nuestro sistema.

El mejor resultado para esta constelación sería a una altura de 2000 Km., en la que se obtienen 22 usuarios por celda, 20350 usuarios totales.

Aunque este sea el mejor resultado, no es una buena solución, puesto que difiere mucho de los sistemas WCDMA con satélites LEO. No compensa el gasto para la escasa capacidad que produce, en comparación con el resto de tecnologías.

No se realiza el estudio del servicio de datos, a causa de los malos resultados para el servicio de voz.

4.5 CONCLUSIONES

Por la escasa capacidad que se genera, la configuración con satélites MEO no es recomendable en sistemas WCDMA las frecuencias estudiadas.

5 SISTEMAS WCDMA CON SATÉLITES GEO

5.1 INTRODUCCIÓN

Según las leyes de Kepler, el periodo orbital de un satélite varía de acuerdo con el radio de la órbita elevado a la potencia de $3/2$. A una altura de 35783Km por encima del Ecuador terrestre el periodo del satélite es de 23h, 56min, 4.1seg. Por consiguiente, el satélite girará a la misma velocidad angular de la Tierra, pareciendo inmóvil al ser visto desde un punto fijo del planeta. Los satélites geoestacionarios orbitan a esta altura y poseen estas características [9][10].

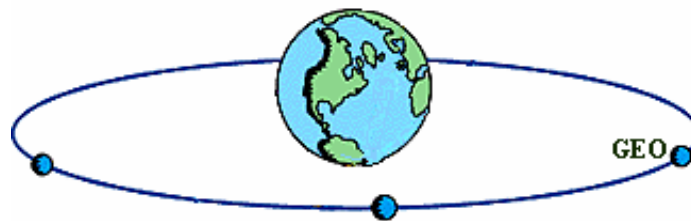


Figura 5.1 Satélites de órbita geoestacionaria.

A la órbita correspondiente se la conoce como órbita geoestacionaria o cinturón de Clarke, en honor al famoso escritor de ciencia ficción Arthur C. Clarke por ser el primero en sugerir esta idea en 1945. A los satélites que viajan por esa órbita se les denomina satélites geoestacionarios y podrían recibir y transmitir señales desde casi un hemisferio completo.

Existe una diferencia entre los satélites geosíncronos y los geoestacionarios a pesar de que los dos siguen las mismas pautas de altura, velocidad, etc. Los satélites geoestacionarios tienen una inclinación y excentricidad nulas, en cambio los geosíncronos pueden tener inclinación y excentricidad no nulas.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

○ *Principales ventajas:*

- ✓ El satélite parece fijo para un observador situado en la Tierra. Esto permite el uso de antenas receptoras fijas en la Tierra y no se necesita hacer un seguimiento para encontrarlo.
- ✓ No se necesita handover. Un satélite dará cobertura a una zona constantemente.
- ✓ Teóricamente se puede cubrir la superficie terrestre consiguiendo una cobertura global con tres satélites geoestacionarios, exceptuando las zonas polares.
- ✓ Aspectos de mantenimiento y control muy conocidos.
- ✓ Efectos Doppler de menor impacto.
- ✓ Tecnología desarrollada.
- ✓ Interferencias predecibles.
- ✓ Numerosas oportunidades de lanzamiento y puesta en órbita ya conocida.
- ✓ Buena visibilidad.

○ *Principales inconvenientes*

- ✗ Retardo considerable a causa de la distancia del satélite (comunicación bidireccional $\approx 0.5s.$). Las comunicaciones en tiempo real presentan dificultades.
- ✗ No cubre zonas polares.
- ✗ Posible pérdida del enlace por la distancia y por obstáculos.
- ✗ Eclipses.
- ✗ Generan y pueden ser dañados por basura espacial.
- ✗ Más caros. Categoría de lanzadores más cara. Uso costoso de satélites de reserva.
- ✗ Necesitan una posición orbital específica que separe los satélites entre sí para evitar posibles interferencias (aprox. 2 grados). La ITU y la FCC son quienes se encargan de ello.

5.2 PRINCIPALES SERVICIOS

Las principales utilidades para las que se usan estos satélites son:

- Operadores de telefonía.
- Distribución de televisión.
- Radiodifusión y enlaces de contribución.
- Comunicación de flotas.
- Comunicaciones móviles.
- Meteorología (Meteosat).
- Satélites de Relay.
- Redes VSAT.
- Etc..

5.3 SIMULACIONES

En esta sección vamos a presentar una serie de simulaciones que nos permitirán alcanzar el objetivo de este proyecto. Para la elaboración de éstas, se ha utilizado un programa en Matlab cuyas características se adaptan perfectamente a las simulaciones que queremos desarrollar.

En este apartado se proporciona el estudio de la capacidad WCDMA para una constelación de satélites GEO.

5.3.1 Diagramas de radiación de la antena del satélite

Para las comunicaciones por satélites GEO hemos utilizado la fórmula de la ganancia de una antena multihaz (phased array) del artículo [13] adaptándolo a nuestro sistema. La antena trabaja en dos frecuencias distintas, una por cada enlace, por tanto su diagrama de radiación va a variar de uplink a downlink.

La fórmula que da el diagrama de radiación de la antena del satélite para el uplink es la siguiente:

$$G(\vartheta) = \begin{cases} 34.8 - 3\left(\frac{\vartheta}{1.57}\right)^2, & \text{para } 0^\circ \leq \vartheta \leq 4.53^\circ \\ 9.8, & \text{para } 4.53^\circ < \vartheta \leq 5.87^\circ \\ 55.95 - 60\log(\vartheta), & \text{para } 5.87^\circ < \vartheta \leq 37^\circ \\ -38.2, & \text{para } 37^\circ < \vartheta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (5.1)$$

El diagrama de radiación se muestra en la **Figura 5.2**.

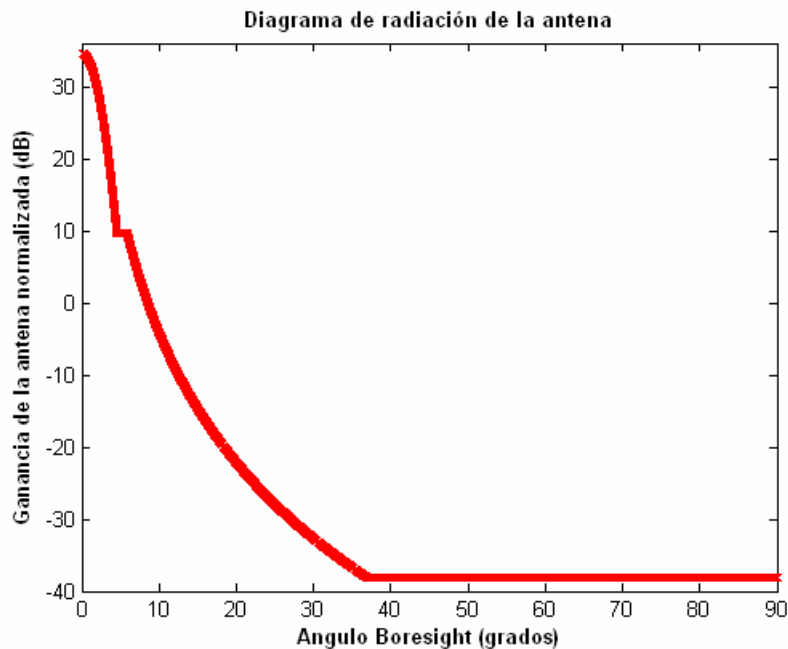


Figura 5.2 Diagrama de radiación de la antena de la Constelación GEO en uplink.

Para el downlink modificamos la fórmula anterior con los valores de este enlace.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

La ganancia de una antena se incrementa con el cuadrado de la frecuencia:

$$\Delta G = G_{\max_2} - G_{\max_1} = 10 \log_{10} \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \quad (5.2)$$

Introduciendo nuestros valores en (5.2) obtenemos la nueva G_{\max} :

$$\begin{aligned} \Delta G &= 10 \log_{10} \left(\frac{2.186}{1.995} \right)^2 = 0.789 \text{ dB} \\ G_{\max_2} &= G_{\max_1} + 0.789 = 34.8 + 0.789 = 35.59 \text{ dB} \end{aligned}$$

Con la fórmula (3.1) calculamos la nueva ϑ_{3dB} para downlink y nos sale $\vartheta_{3dB} = 1.4335^\circ$ y los nuevos límites para los ángulos. Con esto ya podemos representar el diagrama de radiación de nuestra antena para el enlace descendente.

$$G(\vartheta) = \begin{cases} 35.59 - 3 \left(\frac{\vartheta}{1.4335} \right)^2, & \text{para } 0^\circ \leq \vartheta \leq 4.136^\circ \\ 10.59, & \text{para } 4.136^\circ < \vartheta \leq 5.35^\circ \\ 55.739 - 64 \log(\vartheta), & \text{para } 5.35^\circ < \vartheta \leq 29.58^\circ \\ -37.411, & \text{para } 29.58^\circ < \vartheta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (5.3)$$

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

El diagrama de radiación de la antena del satélite para downlink viene representado en la **Figura 5.3**:

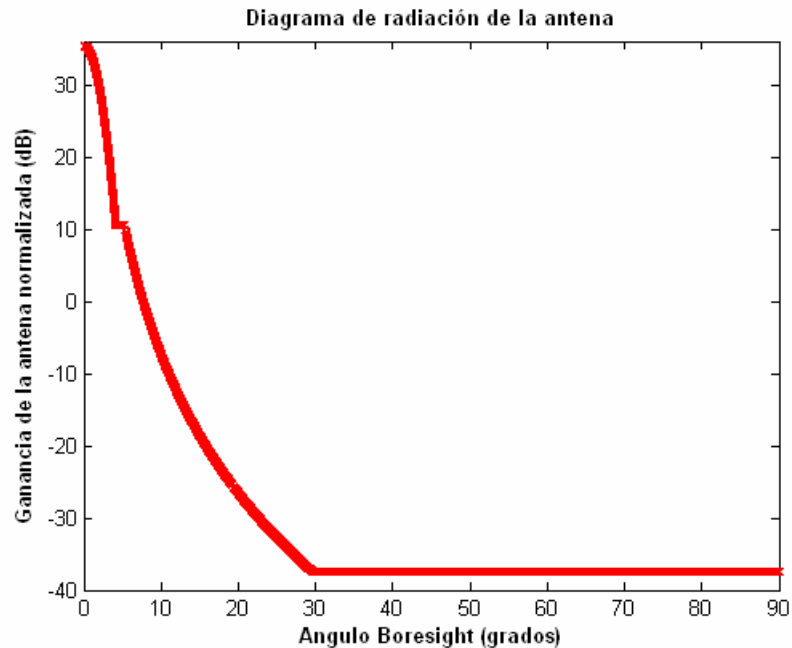


Figura 5.3 Diagrama de radiación de la antena de la Constelación GEO en downlink.

Los terminales para las comunicaciones con satélites GEO utilizan antenas, con ganancias mayores a las usadas en los LEO, que apuntan al satélite.

5.3.2 Parámetros utilizados en cada servicio bajo estudio

5.3.2.1 Datos para el servicio de voz

En este apartado se analizan los resultados obtenidos a través de simulaciones con Matlab. Para ello se han utilizado los siguientes datos:

- ◆ Datos del satélite:
 - Altura del satélite de 36000 Km.
 - Antenas transmisoras con ganancia de alrededor de 30 dB.
- ◆ Datos del sistema WCDMA:
 - Frecuencia para Uplink $f_{\text{uplink}} = 1.996 \text{ GHz}$.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

- Frecuencia para downlink $f_{\text{downlink}} = 2.186 \text{ GHz}$.
- Ancho de banda WCDMA de 5 MHz.
- ◆ Datos del proceso de voz:
 - Factor de utilización de voz “ α ” de 0.66.
 - Ganancia del proceso $G_p = 256$.
 - Relación señal a ruido requerida para buena recepción $E_b/N_0 = 6 \text{ dB}$.
- ◆ Otros datos:
 - Factor de ortogonalidad para downlink $\phi = 0.25$.
 - Potencia asignada al canal piloto en downlink $P_p = 0.1\%$ de la potencia total por celda.
 - Factor de ruido NF del receptor de 5 dB.
 - Pérdidas de propagación por espacio libre de acuerdo a la fórmula (2.2) del apartado 2.2.6.2.

5.3.2.2 Datos para el servicio de datos

En este apartado se analizan los resultados obtenidos para usuarios de datos a través de simulaciones con el programa Matlab. Para ello se han utilizado los siguientes datos:

- ◆ Datos del satélite:
 - Altura del satélite de 36000 Km.
 - Antenas transmisoras con ganancia de alrededor de 30 dB.
- ◆ Datos del sistema WCDMA:
 - Frecuencia para Uplink $f_{\text{uplink}} = 1.996 \text{ GHz}$.
 - Frecuencia para downlink $f_{\text{downlink}} = 2.186 \text{ GHz}$.
 - Ancho de banda WCDMA de 5 MHz.
- ◆ Datos del proceso de datos:

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

- Factor de utilización de voz “ α ” de 1.
- Ganancia del proceso $G_p = 32$.
- Relación señal a ruido requerida para buena recepción $E_b/N_0 = 3$ dB.

◆ Otros datos:

- Potencia para datos en uplink 4 veces mayor que para voz.
- Factor de ortogonalidad para downlink $\phi = 0.25$.
- Potencia asignada al canal piloto en downlink $P_p = 0.1$.
- Factor de ruido NF del receptor de 5 dB.
- Pérdidas de propagación por espacio libre de acuerdo a la fórmula (2.2) del apartado 2.2.6.2.

Como se ha hecho en los capítulos anteriores, debemos de encontrar la potencia necesaria para poder combinar los servicios de voz y datos. Los cálculos se realizan a continuación.

Sabiendo que:

$$\left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{voz} = G_p \left|_{voz} \frac{S|_{voz}}{I_{total}} \quad (5.4)$$

$$\left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{datos} = G_p \left|_{datos} \frac{S|_{datos}}{I_{total}} \quad (5.5)$$

Despejando I_{total} podemos decir que:

$$\left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{voz} = 6 \text{ dB} \Rightarrow \text{en número naturales} \Rightarrow \left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{voz} = 3.98$$

$$\left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{datos} = 3 \text{ dB} \Rightarrow \text{en número naturales} \Rightarrow \left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{datos} = 1.99$$

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

$$I_{\text{total}} = G_p|_{\text{voz}} \frac{S|_{\text{voz}}}{E_b/N_0|_{\text{voz}}} = G_p|_{\text{datos}} \frac{S|_{\text{datos}}}{E_b/N_0|_{\text{datos}}} = 256 \frac{S|_{\text{voz}}}{3.98} = 32 \frac{S|_{\text{datos}}}{1.99} \Rightarrow \quad (5.6)$$

$$4S|_{\text{voz}} = S|_{\text{datos}} \quad (5.7)$$

La potencia en servicios de datos debe ser 4 veces mayor que la potencia en servicios de voz.

5.3.3 Requisitos de la constelación

En primer lugar debemos establecer nuestra constelación de satélites. Para ello se hace un estudio de la altura a la que se encuentra el satélite, el radio de cobertura que proporciona cada uno y cuánto satélites se necesitan para cobertura global.

Como se ha explicado anteriormente los satélites geostacionarios están a una altura de 35783Km. Aunque en nuestro estudio utilizamos una altura de hasta 40000 Km en el caso de Europa, para compensar que no nos encontramos justo encima del ecuador.

Para el caso de satélites GEO utilizamos una constelación distinta a la descrita anteriormente. Como los satélites se encuentran a mayor altura, se abarca un radio mucho mayor, por tanto no se necesitan tantos spot-beams por satélite como en los casos anteriores. Un elevado número de spot-beams por satélite dificultan la maniobra de lanzamiento, ya que el satélite pesa más y se necesitan de más recursos para ponerlo en órbita. Al estar los satélites GEO a gran altura esto es una ventaja.

En nuestro sistema para satélites GEO vamos a cambiar el escenario. Se define que un satélite abarca 2 coronas celulares más la central. Esto hace un total de:

$$1 + 6 + 12 = 19 \text{ células/satélite}$$

Como cada célula es servida por un spot-beam (haz o vano del satélite) tendremos que cada satélite posee 19 spot-beams.

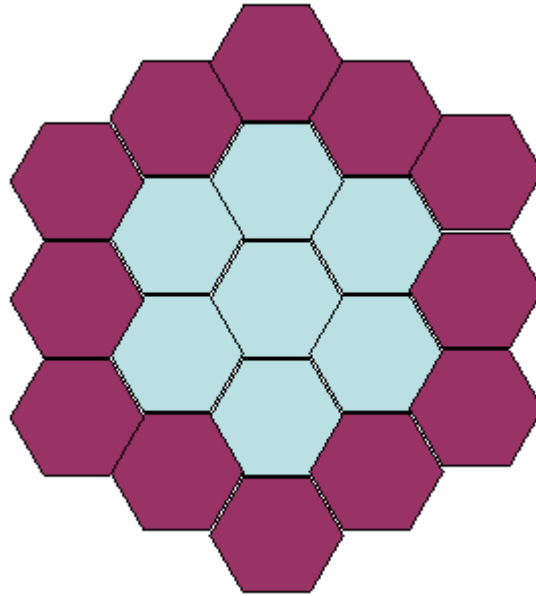


Figura 5.4 Clúster de 2 coronas más la central.

En la **Figura 5.4** se muestra la situación de las células en la huella formada por un satélite GEO. En ella se asume células hexagonales ideales, pero en el caso real las celdas van “estirándose” al alejarse del centro. Los extremos se deforman hasta verse ovaladas. En nuestro documento hacemos el estudio para el menor radio, es decir, el caso en que todas son hexagonales.

Calculamos así la distancia en línea recta que abarca el satélite:

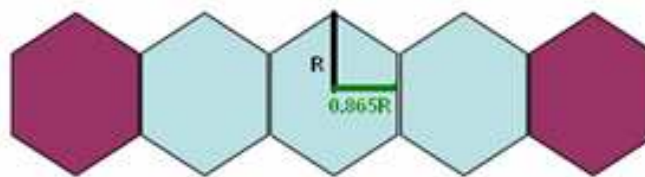


Figura 5.5 Radio pequeño de un hexágono.

$$\text{Distancia línea de cobertura} = 5 \times 2(0.86)R = 5 \times 1.73R \quad (5.8)$$

◆ **DATOS GENERALES:**

Tabla 5.1 Datos generales.

| DATOS | |
|----------------------------------|-------------|
| Radio tierra (Km) | 6378 |
| Hexagono diametro pequeño | 1,73 |
| Ncell/sat | 19 |
| Cell en linea/sat | 5 |
| Circunferencia de la Tierra (Km) | 40074,15589 |

Nuestro primer radio de trabajo se centra entre los 1200 y los 2275 Km por haz de satélite. La elección de este rango se debe a que, tras realizar varias simulaciones se observa que en esa zona se producen los máximos en la capacidad del sistema.

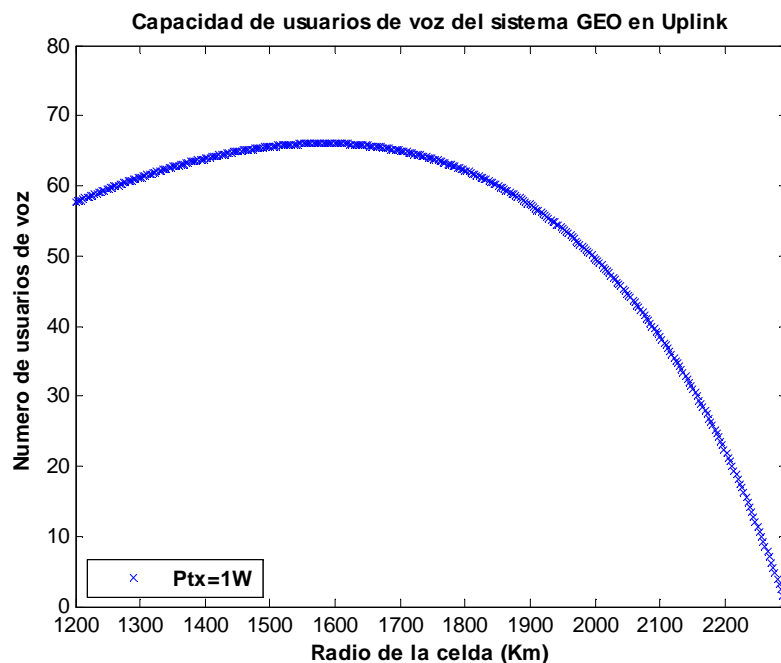


Figura 5.6 Capacidad de usuarios para un radio de trabajo de 1200 a 2200 Km para distintos valores de potencia en uplink.

Según nos muestra la **Figura 5.6** la capacidad para uplink crece hasta aproximadamente 1478 Km. que se mantiene en su máximo hasta 1588 Km para 1 W de potencia transmitida, ese rango sería idóneo para definir nuestro radio de trabajo. Después empieza a decrecer a medida que aumenta el radio celular, hasta llegar a un radio de 2295 Km en el que la capacidad se hace cero. A medida que aumenta el radio, la señal se recibe con un ángulo mayor con respecto a la vertical del satélite. La ganancia de las antenas del satélite decrecen

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

a ángulos mayores y por tanto la señal resultante tendrá menor potencia. Por esta razón la capacidad disminuye a grandes radios celulares.

A modo informativo, puesto que en este capítulo no nos centramos en cobertura global, diremos que con un radio de trabajo menor de 1545 Km necesitaríamos 4 satélites como mínimo para cubrir la Tierra. La línea vertical roja de la **Figura 5.7** muestra el límite entre poder usar 4 satélites o 3.

En las comunicaciones con satélites GEO, no se necesita cubrir la Tierra entera para dar servicio a una zona concreta. Como se ha indicado al principio del capítulo, los satélites geostacionarios giran a la misma velocidad angular que la de rotación terrestre y parecen fijos desde el punto de vista de un observador inmóvil en tierra. Se pueden utilizar los satélites que se requieran para dar un cierto nivel de cobertura a una zona de la Tierra sin necesidad de cobertura global. En este capítulo nos olvidamos del concepto de cobertura global y damos un ejemplo de cobertura localizada en Europa en el **apartado 5.5**.

Con un radio de trabajo mayor a 1890 Km no se cumple la condición de que el radio de cobertura esté dentro de la distancia Line of Sight sobre el suelo. Por ello se va a trabajar con radios menores a ese valor.

En la **Figura 5.7** las líneas discontinuas acotan el radio de cobertura.

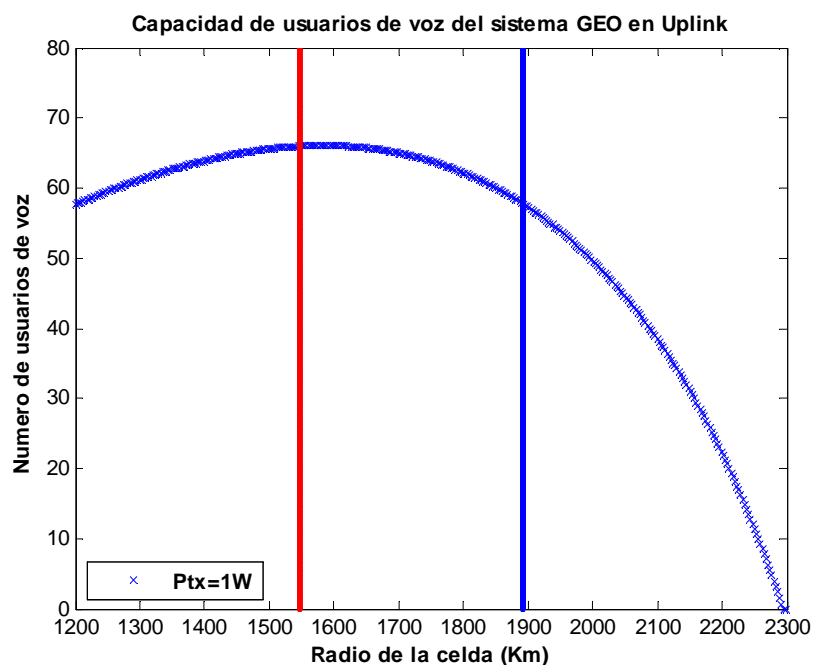


Figura 5.7 Capacidad del sistema acotando el radio de cobertura.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

A la derecha de la línea vertical azul tendremos sistemas que no cumplen la condición *Line of Sight*, es decir, el radio celular será mayor que la distancia *Line of sight* sobre el suelo y malgastaremos potencia.

Como se observa en la **Figura 5.7** el máximo de capacidad en uplink ocurre aproximadamente en 1600 Km. El radio de cobertura depende de la zona a cubrir y de la constelación de satélites. En nuestro caso vamos a elegir la que más capacidad por celda nos proporcione, y esto, como se acaba de decir, ocurre en 1600 Km.

La **Tabla 5.2** muestra la capacidad en distintos radios de cobertura para 1 W de potencia en uplink. Con un radio de 1600 Km por haz, obtenemos 66 usuarios, el máximo posible.

Tabla 5.2 Capacidad en distintos radios de cobertura.

| Radio | 1400 | 1450 | 1500 | 1550 | 1600 | 1650 |
|-------------------|-------|------|------|------|-------|-------|
| Capacidad para 1W | 63,95 | 64,9 | 65,6 | 66 | 66,05 | 65,75 |

◆ *DATOS ESPECÍFICOS:*

Tabla 5.3 Datos específicos de la constelación GEO.

| DATOS PARA CONSTELACIÓN GEO | |
|-----------------------------|-------|
| Radio celula (Km) | 1600 |
| Altura Satélite (Km) | 36000 |

Para asegurarnos comprobamos mediante un programa en Matlab que nos encontramos dentro de la distancia *Line of Sight* sobre el suelo. Esto se muestra en la **Figura 5.8**.

```
distancia_cobertura_sat =  
  
    13840  
  
distancia_Line_of_Sight_sobre_el_suelo =  
  
    1.6355e+004  
  
BIEN! La distancia LOS sobre el suelo es mayor que la de cobertura del satellite
```

Figura 5.8 Impresión de la comprobación distancia LOS.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Tabla 5.4 Datos de la constelación GEO.

| DATOS PARA CONSTELACIÓN GEO | |
|---|------------|
| Distancia Los (Km) | 21480 |
| Distancia Line-of-sight sobre el suelo (Km) | 16355,2436 |
| Distancia que contempla en satelite en linea recta (Km) | 13840 |

Los satélites GEO de nuestro ejemplo contienen 19 spot-beams, cada uno forma una célula con un radio de cobertura de 1600 Km. El radio de cobertura total del satélite será, siguiendo la **Figura 5.5**, la mitad de la distancia que contempla el satélite en línea recta, esto hace un total de 6920 Km. de radio por satélite.

5.3.4 Resultado de los servicios estudiados

En esta sección vamos a presentar una serie de simulaciones que nos permitirán alcanzar el objetivo de este proyecto. Para la elaboración de éstas, se ha utilizado un programa en Matlab cuyas características se adaptan perfectamente a las situaciones que queremos desarrollar. El objetivo de este apartado es mostrar, mediante pruebas simulaciones, la capacidad de los sistemas WCDMA por satélites en función del tipo de satélite, de sus condiciones y de distintas variables para proporcionar la mejor opción. Cada sub-apartado se mostrará con una representación gráfica de los resultados acompañada por diversos comentarios que explicarán lo obtenido. Al finalizar todas las simulaciones, se expondrán unas conclusiones globales sobre el sistema analizado.

En este caso analizaremos resultados para el sistema WCDMA por satélites GEO en uplink y downlink para voz y datos.

5.3.4.1 Resultados para el servicio de de voz

En este apartado se analizan los resultados obtenidos para usuarios de datos a través de simulaciones con el programa Matlab. Para ello se han utilizado los datos señalados en el **apartado 5.3.2.1**.

5.3.4.1.1 Caso general. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia

El primer paso es proceder al estudio de la capacidad en función de la distancia de cobertura del sistema. Se analizará la capacidad primero para el enlace ascendente y después para el enlace descendente, y se compararán ambos resultados. Hemos extraído los valores en 1600 Km, radio de cobertura de nuestras células. Los resultados obtenidos se muestran en las **Figuras 5.9** y **5.10**.

Capacidad para uplink:

En este apartado utilizamos la potencia transmitida como parámetro que varía entre 0.85 W hasta los 1,15 W con un paso de 50 mW, en un rango de cobertura de entre 1545 y 1890 Km.

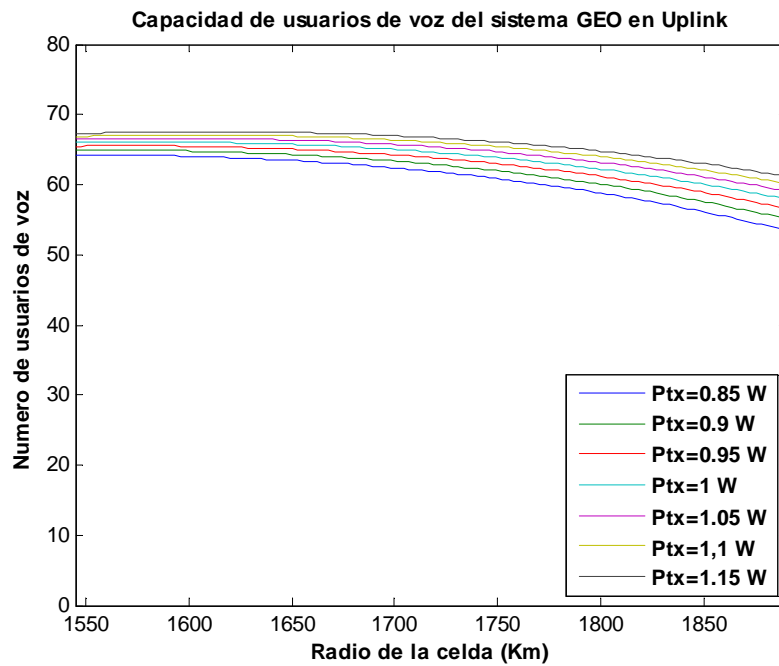


Figura 5.9 Número de usuarios de voz para el sistema GEO en uplink.

La capacidad del sistema disminuye a medida que crece el radio celular y aumenta a mayor potencia de transmisión.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Capacidad para downlink:

En este apartado utilizamos la potencia transmitida que varía de 120 W a 180 W por haz con un paso de 10 W. En la actualidad, un metro cuadrado de placa solar proporciona una potencia de 310 W. Utilizando un TWT al 64% de eficiencia por metro cuadrado de placa, se puede proporcionar un máximo de potencia en downlink de entre 150 y 180 W, (quedando de 20 a 40 W para el subsistema interno). Por ello la elección de este rango de potencias.

La diferencia de potencias entre ambos enlaces se debe a que en el enlace ascendente son los usuarios móviles los que transmiten, recibándose la suma de todas sus potencias en el satélite, mientras que en downlink el satélite es quién envía la potencia que se reparte entre un número elevado de usuarios móviles, por tanto ésta debe ser mucho mayor.

Estos son los resultados obtenidos:

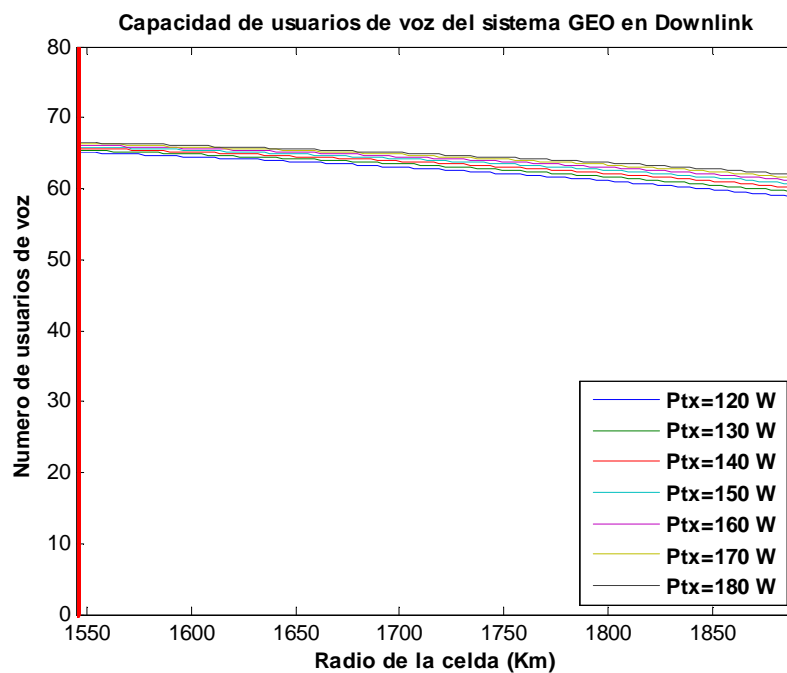


Figura 5.10 Número de usuarios de voz para el sistema GEO en downlink.

La capacidad del sistema disminuye a medida que crece el radio celular y aumenta a mayor potencia de transmisión.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Tabla 5.5 Capacidad en proceso de voz para distintos valores de potencia en Uplink y Downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|--------------|--------------|----------|--------------|-------------|
| OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios | OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios |
| 1 | 0,85 | 64,05 | 1 | 120 | 64,50 |
| 2 | 0,9 | 64,80 | 2 | 130 | 64,85 |
| 3 | 0,95 | 65,45 | 3 | 140 | 65,15 |
| 4 | 1 | 66,05 | 4 | 150 | 65,45 |
| 5 | 1,05 | 66,60 | 5 | 160 | 65,70 |
| 6 | 1,1 | 67,10 | 6 | 170 | 65,90 |
| 7 | 1,15 | 67,55 | 7 | 180 | 66,1 |

Conclusiones:

En este apartado hemos estudiado la capacidad para distintos valores de potencia en ambos enlaces. Como podemos apreciar en las imágenes tanto para uplink como para downlink, la capacidad disminuye a medida que crece el radio de cobertura celular. Antes de continuar haremos otra prueba. Vamos a ver que pasaría si realizamos un cambio drástico de la potencia de transmisión en ambos enlaces:

Capacidad para uplink:

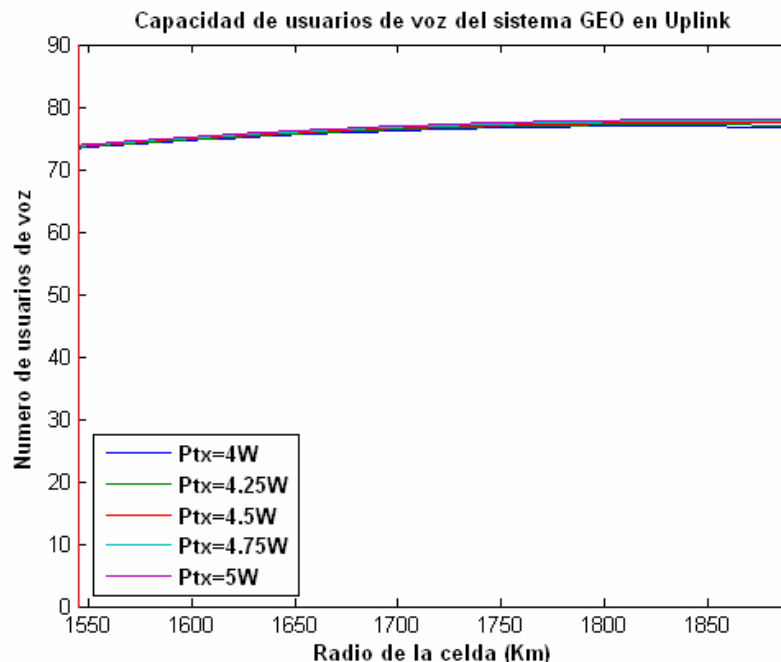


Figura 5.11 Número de usuarios de voz para altas potencias en uplink.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Capacidad para downlink:

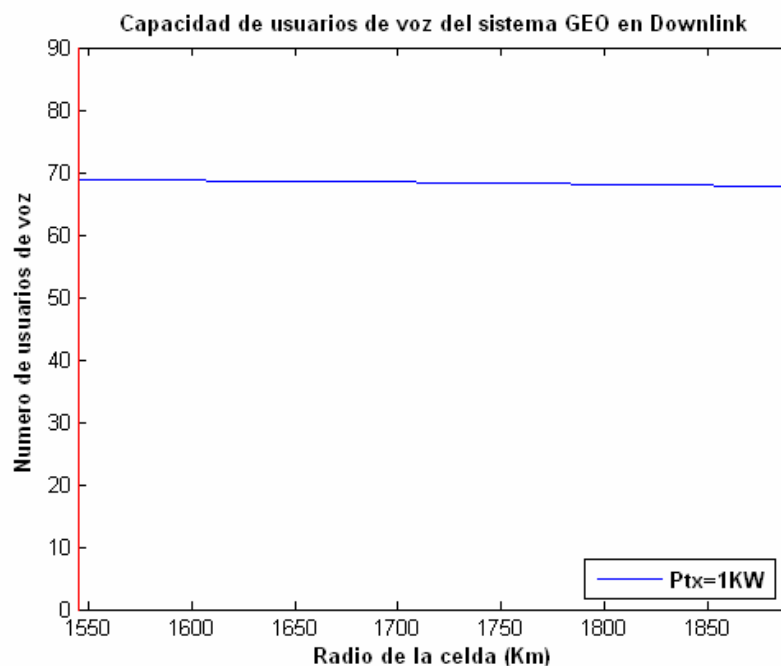


Figura 5.12 Número de usuarios de voz para altas potencias en downlink.

Tabla 5.6 Capacidad en proceso de voz para altas potencias en uplink y downlink

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|--------|--------------|-------------|----------|--------------|-------------|
| OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios | OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios |
| 1 | 4 | 74,60 | 1 | 1000 | 68,7 |
| 2 | 4,25 | 74,80 | | | |
| 3 | 4,5 | 74,95 | | | |
| 4 | 4,75 | 75,05 | | | |
| 5 | 5 | 75,20 | | | |

Al igual que ocurre en los otros sistemas de satélites el enlace descendente parece limitar la capacidad. Ni siquiera utilizando un TWT (Travelling-wave tube) que amplifica la señal y emitiendo 1 KW de potencia, se alcanzaría una capacidad superior a los 69 usuarios. Esto equivale a un aumento en potencia en un 488%, que implica un aumento en la capacidad de un simple 3%, equivalente a 2 usuarios. Otra vez demasiado gasto de potencia para tan poco provecho. Como no vamos a tener una capacidad mayor a 69 usuarios, vamos a elegir una potencia adecuada para el downlink volviendo a mirar en la **Tabla 5.5**.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Con una potencia de 1 W para el uplink y una potencia de 180 W por haz para el downlink obtenemos una capacidad de 66 usuarios. Esta será la mejor opción. Se utilizarán estos valores de potencia para la simulación del resto de apartados.

5.3.4.1.2 Caso 2. Variación de la capacidad ante distintos valores de ganancia de transmisión del terminal de usuario

Como se ha dicho anteriormente, la elección de la antena tanto de los terminales como del satélite es muy importante. Hace que la potencia recibida de la señal se incremente o disminuya, favoreciendo o perjudicando a la comunicación.

En este apartado se estudia el efecto que produce la ganancia de estos terminales en la capacidad del sistema WCDMA.

Capacidad para uplink:

Se analizan los resultados para los siguientes valores de ganancia de los terminales: 26, 27, 28, 29 y 30 dB.

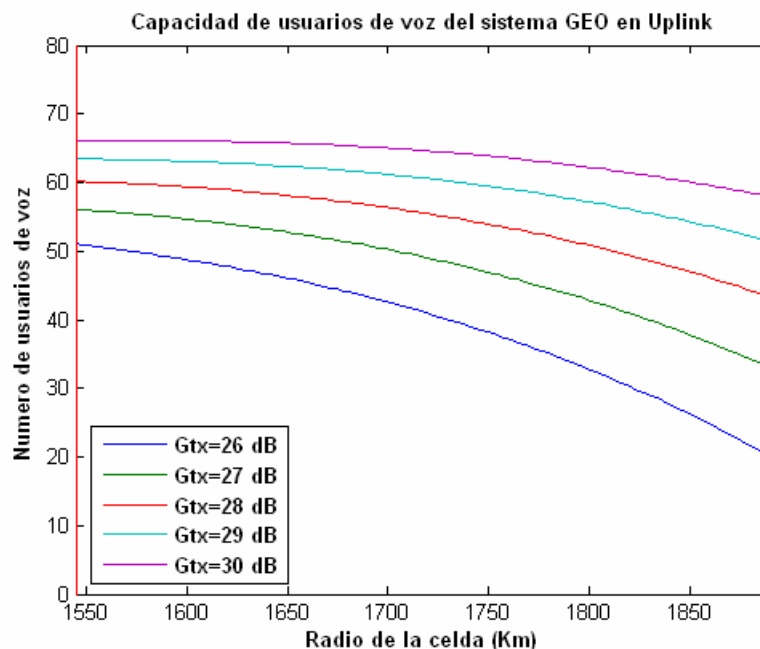


Figura 5.13 Número de usuarios de voz para el sistema GEO según la Gtx de los terminales móviles en uplink.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Como se observa en la **Figura 5.13**, a medida que crece la ganancia de la antena de los terminales de usuario, mayor capacidad se obtiene.

Capacidad para downlink:

Se analizan los resultados para los siguientes valores de ganancia de los terminales: 26.789, 27.789, 28.789, 29.789 y 30.789 dB.

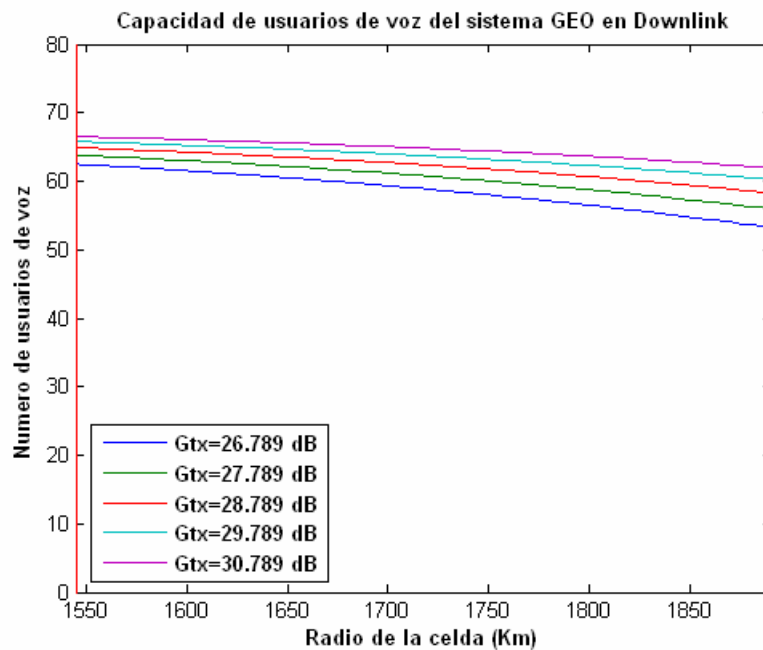


Figura 5.14 Número de usuarios de voz para el sistema LEO según la Gtx en downlink.

Al igual que en uplink la capacidad aumenta cuanto mayor valor de ganancia se utilice.

Tabla 5.7 Capacidad en proceso de voz para distintos valores de la ganancia de transmisión del satélite en Uplink y Downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|---------------|--------------|----------|---------------|--------------|
| OPCIÓN | Gusuario (dB) | N. Usuarios | OPCIÓN | Gusuario (dB) | N. Usuarios |
| 1 | 26 | 48,80 | 1 | 26,789 | 61,55 |
| 2 | 27 | 54,70 | 2 | 27,789 | 63,05 |
| 3 | 28 | 59,40 | 3 | 28,789 | 64,25 |
| 4 | 29 | 63,10 | 4 | 29,789 | 65,25 |
| 5 | 30 | 66,05 | 5 | 30,789 | 66,10 |

Como indica la **Tabla 5.7** cuanto mayor ganancia de transmisión tengamos mayor número de usuarios aceptará el sistema. La elección de la ganancia dependerá del terminal.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

En nuestro caso hemos elegido la quinta opción, terminales usuario con una ganancia de 30 dB para la frecuencia de uplink y de 30.789 dB para la frecuencia de downlink, ya que en ambos la capacidad coincide en 66 usuarios y dan la mayor capacidad.

5.3.4.1.3 Caso 3. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia y ganancia de la antena de los terminales de usuario

En este apartado se analiza una nueva visión de la capacidad en función de la ganancia de la antena de los terminales y la potencia de transmisión.

Capacidad para uplink:

Se han utilizado valores de 0.9 W a 1.1 W, con un paso de 50 mW para la potencia transmitida.

Se han utilizado los valores: 26, 28, 30, 32 y 34 dB para la ganancia de la antena de los terminales de usuario.

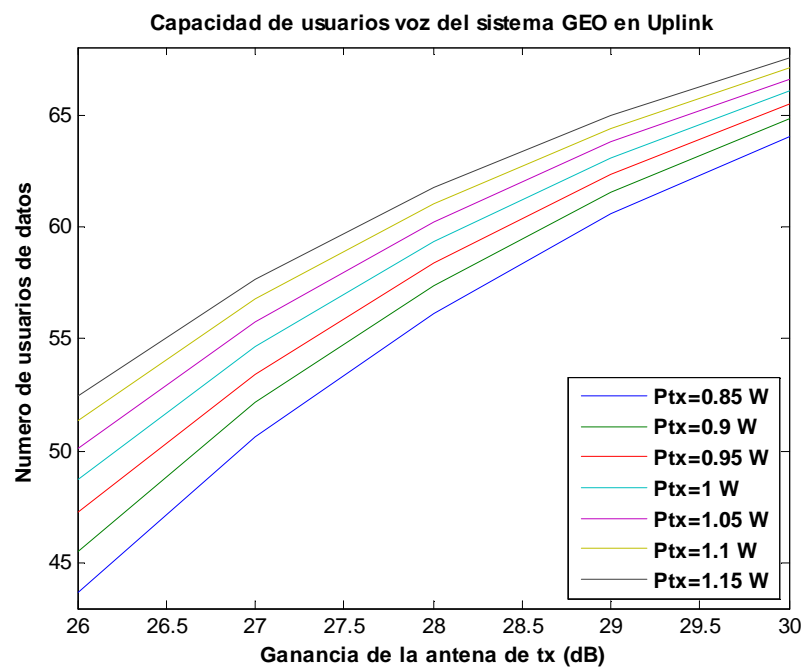


Figura 5.15 Número de usuarios de voz para el sistema GEO ante distintos valores de potencia.

Capacidad para downlink:

Se han utilizado valores de 120 W a 180 W, con un paso de 10 W para la potencia transmitida.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Se han utilizado los valores: 26.789, 28.789, 30.789, 32.789 y 34.789 dB para la ganancia de la antena de los terminales de usuario.

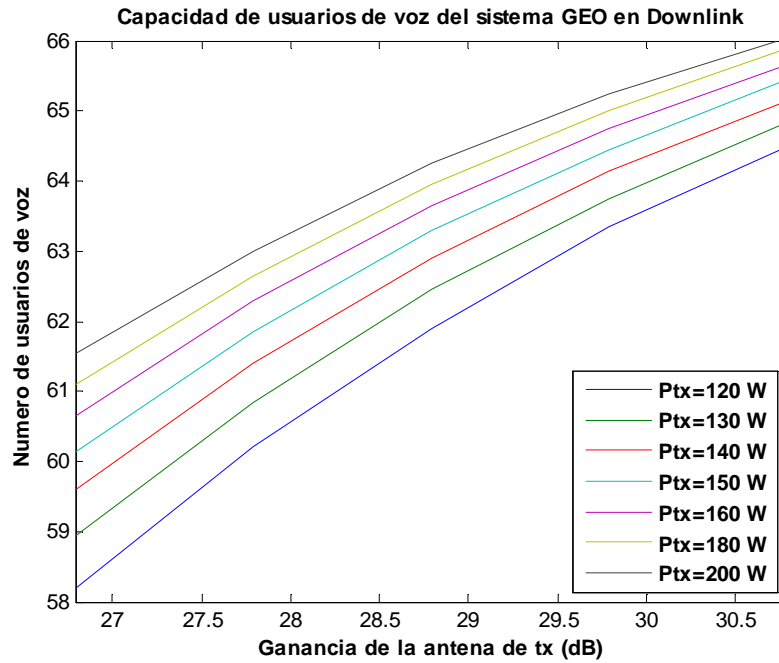


Figura 5.16 Número de usuarios de voz para el sistema GEO según la G_{tx} y la potencia en downlink.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Tabla 5.8 Capacidad en proceso de voz para distintos valores de la ganancia mínima del satélite y la potencia de transmisión en uplink y downlink.

| UPLINK | | | | | |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ptx | Gusu=26 dB | Gusu=27 dB | Gusu=28 dB | Gusu=29 dB | Gusu=30 dB |
| 0,85 | 43,70 | 50,65 | 56,15 | 60,55 | 64,05 |
| 0,9 | 45,55 | 52,15 | 57,35 | 61,50 | 64,80 |
| 0,95 | 47,25 | 53,45 | 58,40 | 62,35 | 65,45 |
| 1 | 48,75 | 54,65 | 59,35 | 63,10 | 66,05 |
| 1,05 | 50,15 | 55,75 | 60,25 | 63,80 | 66,60 |
| 1,1 | 51,35 | 56,75 | 61,00 | 64,40 | 67,10 |
| 1,15 | 52,50 | 57,65 | 61,75 | 64,95 | 67,55 |
| DOWNLINK | | | | | |
| Ptx | Gusu=26,789 dB | Gusu=27,789 dB | Gusu=28,789 dB | Gusu=29,789 dB | Gusu=30,789 dB |
| 120 | 58,20 | 62,45 | 65,15 | 62,30 | 65,00 |
| 130 | 60,20 | 63,75 | 60,15 | 63,65 | 65,90 |
| 140 | 61,90 | 64,85 | 61,85 | 64,75 | 61,55 |
| 150 | 63,35 | 59,60 | 63,30 | 65,65 | 63,00 |
| 160 | 64,50 | 61,40 | 64,45 | 61,10 | 64,25 |
| 170 | 58,95 | 62,90 | 65,45 | 62,65 | 65,25 |
| 180 | 60,85 | 64,15 | 60,65 | 63,95 | 66,05 |

En ambos enlaces se observa el mismo comportamiento, observamos que cuanto mayor ganancia de transmisión y cuanto mayor potencia, mayor número de usuarios por celda. Analizando los resultados de la **Tabla 5.8** vemos que la opción de 30 dB es la mejor para cada enlace. Puesto que el downlink limita la capacidad eliminamos el área sombreada en rojo, ya que sobrepasan el número de usuarios máximos para el enlace descendente. Para este estudio se ha elegido una ganancia de alrededor de 30 dB, equivalente a un terminal con una antena de 2m. Con una ganancia de 30.789 dB y una potencia de 180 W en el downlink, se obtienen 66 usuarios. La mejor opción para el uplink es una ganancia de 30 dB y una potencia de 1 W con la que se consiguen otra vez 66 usuarios. La capacidad en ambos enlaces coincide.

5.3.4.1.4 Caso 3. Variación de la capacidad ante distintos valores del factor de ruido del sistema

Como se ha explicado en capítulos anteriores, la calidad del terminal con el que se realice la recepción de la información es importante para el cálculo de la capacidad del sistema.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

En esta sección se realiza el análisis de la influencia del factor de ruido en el número de usuarios en sistemas WCDMA con satélites GEO. Se utilizan distintos valores del factor de ruido según su evolución en el tiempo.

Con la tecnología actual, el factor de ruido es del orden de 5 dB.

A continuación estudiamos los resultados obtenidos tras las simulaciones para los siguientes valores del factor de ruido: 3, 4, y 5 dB.

Capacidad para uplink:

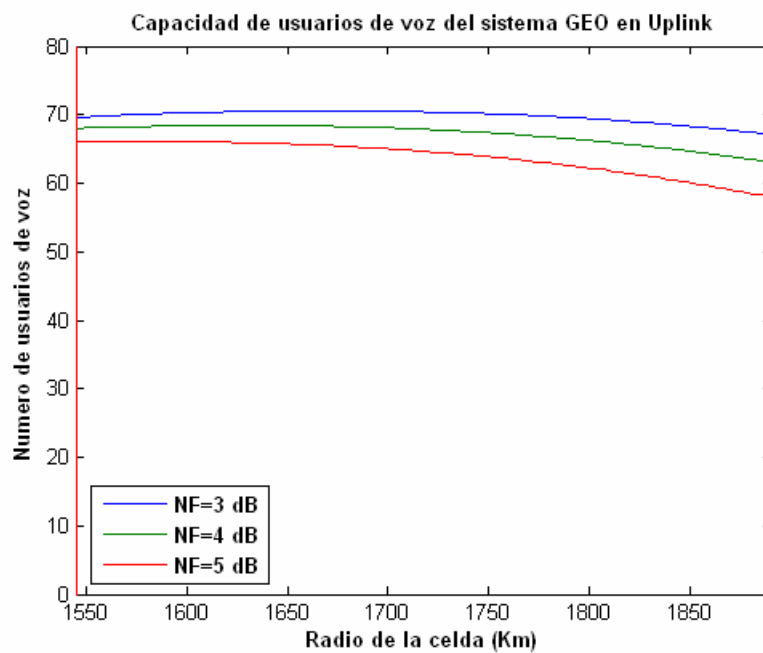


Figura 5.17 Número de usuarios de voz para el sistema GEO según el factor de ruido en uplink.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Capacidad para downlink:

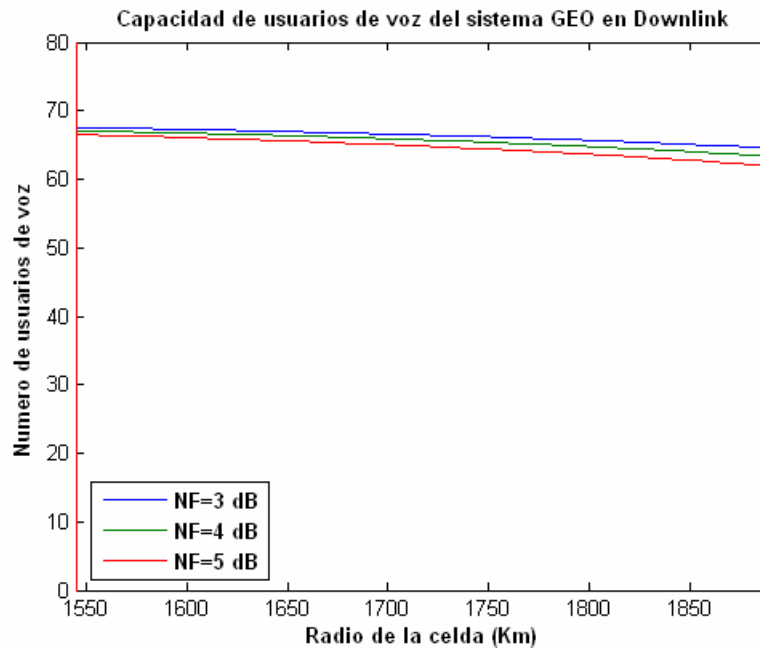


Figura 5.18 Número de usuarios de voz para el sistema GEO según el factor de ruido en downlink.

Tabla 5.9 Capacidad en proceso de voz para distintos valores del factor de ruido en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|----------|--------------|----------|----------|--------------|
| CASO | NF (dB) | N. Usuarios | CASO | NF (dB) | N. Usuarios |
| 1 | 3 | 70,25 | 1 | 3 | 67,30 |
| 2 | 4 | 68,40 | 2 | 4 | 66,75 |
| 3 | 5 | 66,05 | 3 | 5 | 66,10 |

Como podemos apreciar en las figuras la calidad del terminal móvil que empleemos influye en la capacidad del sistema WCDMA. A partir de las imágenes podemos observar un aumento de la capacidad para factores de ruido menores. El factor de ruido afecta directamente a la potencia de ruido. Es deseable el desarrollo de nuevos terminales para el aumento de la capacidad en WCDMA.

En nuestro sistema obtenemos una capacidad de 66 usuarios con un factor de ruido de 5 dB.

5.3.4.2 Resultados para el servicio de datos

En este apartado se analizan los resultados obtenidos para usuarios de datos a través de simulaciones con el programa Matlab. Para ello se han utilizado los datos señalados en el apartado 5.3.2.2.

5.3.4.2.1 *Caso general. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia*

El primer paso es proceder al estudio de la capacidad en función de la distancia de cobertura del sistema para distintos valores de potencia como hicimos para usuarios de voz.

Nos encontramos en la misma red que en el servicio de voz.

En este apartado se realiza el estudio de la capacidad para distintos valores de potencia. Se analizará la capacidad primero para el enlace ascendente y después para el enlace descendente, y se compararán ambos resultados. Se han extraído los valores en los 1600 Km, radio de cobertura de nuestras células. Los resultados obtenidos se muestran en las **Figuras 5.19 y 5.20.**

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Capacidad para uplink:

Los valores de potencia utilizados son 4 veces mayores que los utilizados en el servicio de voz: 3.4, 3.6, 3.8, 4, 4.2, 4.4, y 4.6 W.

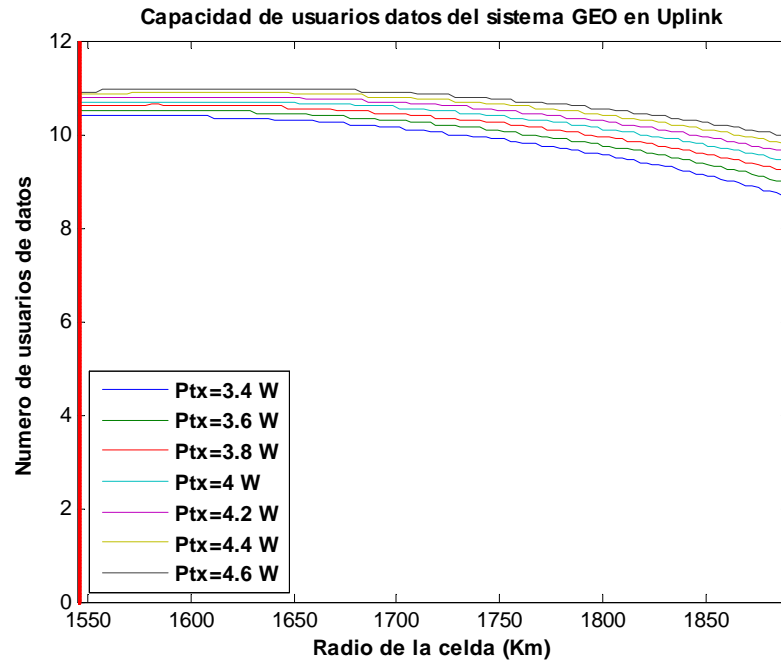


Figura 5.19 Número de usuarios de datos para el sistema GEO en uplink.

La capacidad se mantiene hasta 1600 Km aproximadamente, según la potencia, y después empieza a decrecer a medida que crece el radio. Se observa que a mayor potencia se obtiene un número mayor de usuarios. Para radios grandes la diferencia entre las capacidades es mayor, por tanto la variación de potencia afecta más a radios de cobertura mayores.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Capacidad para downlink:

Utilizamos los mismos valores de potencia que los usados en el servicio de voz: 120, 130, 140, 160, 150, 170, y 180 W por haz.

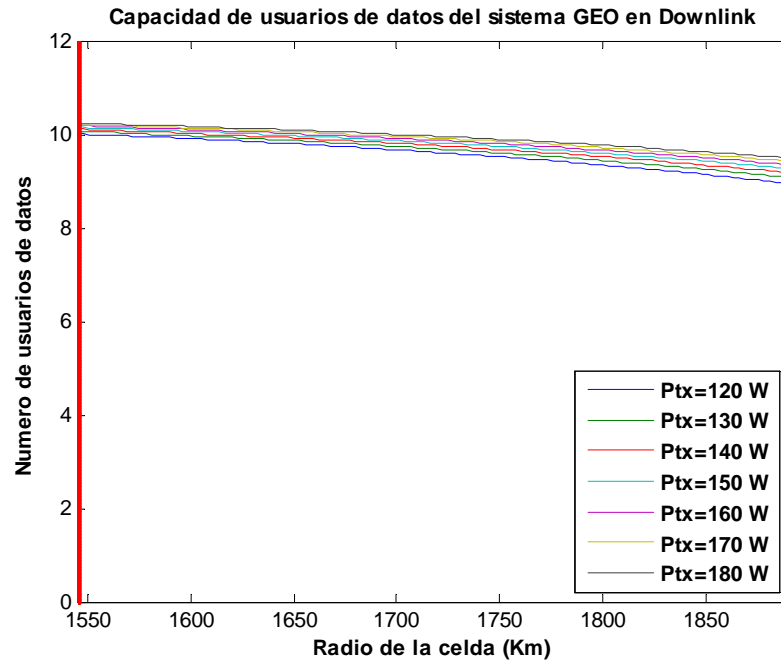


Figura 5.20 Número de usuarios de datos para el sistema GEO en downlink.

La capacidad en downlink decrece con el radio celular y aumenta con la potencia.

Tabla 5.10 Capacidad en proceso de datos para distintos valores de potencia en Uplink y Downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|--------|--------------|-------------|----------|--------------|-------------|
| OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios | OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios |
| 1 | 3,4 | 10,40 | 1 | 120 | 9,91 |
| 2 | 3,6 | 10,50 | 2 | 130 | 9,97 |
| 3 | 3,8 | 10,60 | 3 | 140 | 10,02 |
| 4 | 4 | 10,70 | 4 | 150 | 10,07 |
| 5 | 4,2 | 10,80 | 5 | 160 | 10,10 |
| 6 | 4,4 | 10,90 | 6 | 170 | 10,14 |
| 7 | 4,6 | 10,95 | 7 | 180 | 10,17 |

Como podemos apreciar en las imágenes tanto para uplink como para downlink, la capacidad disminuye un 84.8% en comparación al proceso de voz. Esto se debe a que un usuario de datos tiene menor ganancia de procesamiento. Antes de continuar haremos la misma prueba que hicimos en downlink.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Vamos a ver que pasaría si aumentamos drásticamente la potencia de transmisión en ambos enlaces:

Capacidad para uplink:

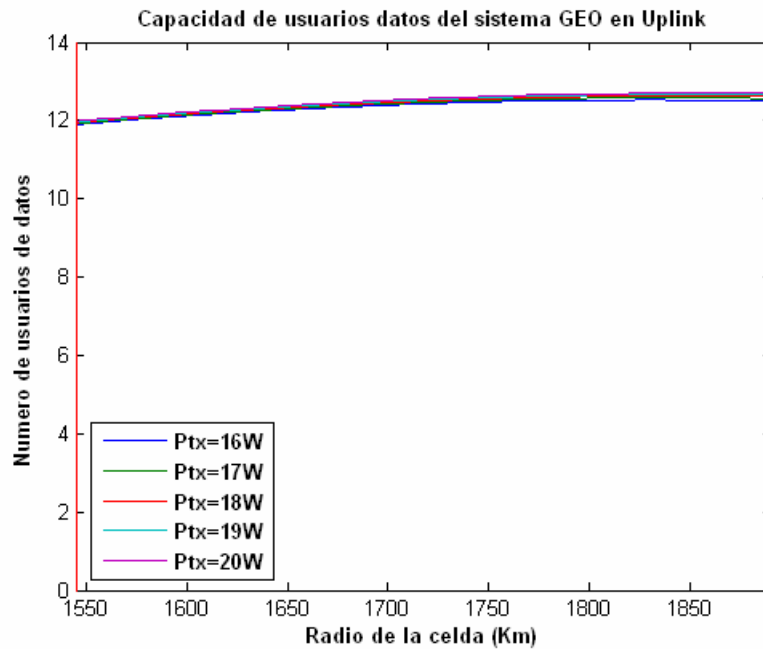


Figura 5.21 Número de usuarios de datos para altas potencias en uplink.

Capacidad para downlink:

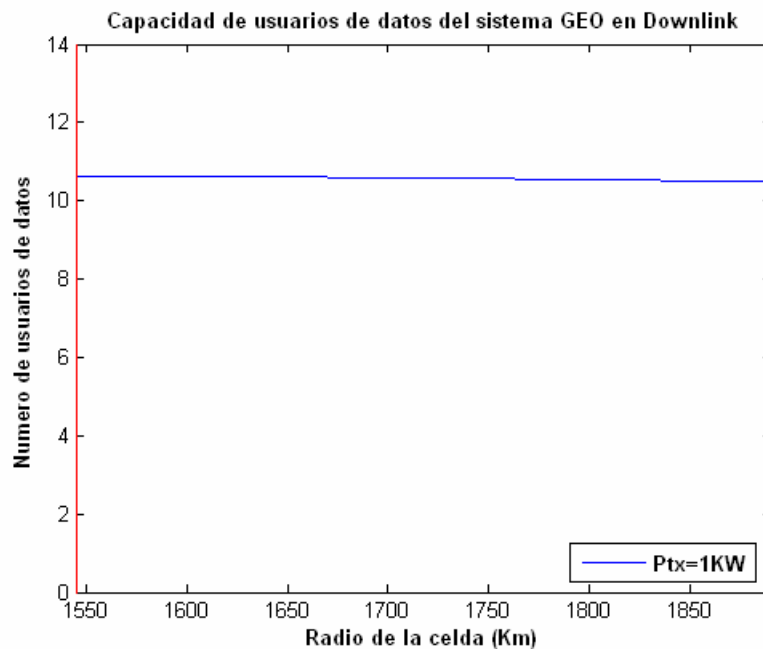


Figura 5.22 Número de usuarios de datos para altas potencias en downlink.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Tabla 5.11 Capacidad en proceso de datos para altas potencias en uplink y downlink

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|--------|--------------|-------------|----------|--------------|-------------|
| OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios | OPCIÓN | Potencia (W) | N. Usuarios |
| 1 | 16 | 12,11 | 1 | 1000 | 10,63 |
| 2 | 17 | 12,14 | | | |
| 3 | 18 | 12,17 | | | |
| 4 | 19 | 12,19 | | | |
| 5 | 20 | 12,21 | | | |

A partir de la **Tabla 5.11** podemos decir que ocurre lo mismo que ocurría para los procesos de voz. La capacidad con una altísima potencia sigue siendo 10 usuarios para el downlink.

Volvamos a las **Figuras 5.19, 5.20** y a la **Tabla 5.10**. El comportamiento es similar al del proceso de voz. En este caso se deben elegir las mismas opciones que para voz, ya que nos encontramos en el mismo sistema. Con una potencia de 4 W para el uplink y una potencia de 180 W por haz para el downlink, tendríamos una capacidad de 10 usuarios de datos.

5.3.4.2.2 *Caso 2. Variación de la capacidad ante distintos valores de ganancia de transmisión del terminal usuario*

En este apartado se analizará el efecto que produce la ganancia de transmisión de la antena del satélite en los procesos de datos para ambos enlaces.

Capacidad para uplink:

Se analizan los resultados para los siguientes valores de ganancia de los terminales: 26, 27, 28, 29 y 30 dB.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

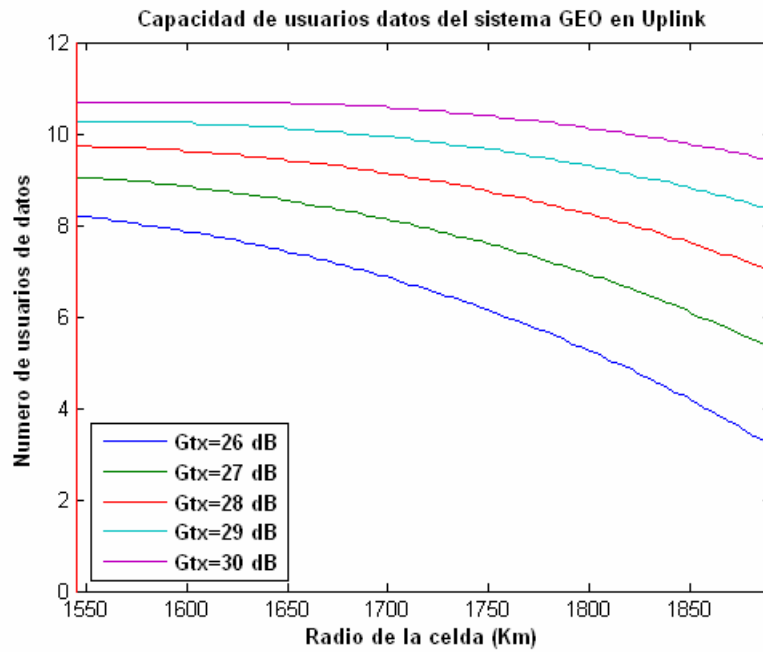


Figura 5.23 Número de usuarios de datos para el sistema GEO según la Gtx en uplink.

Capacidad para downlink:

Se analizan los resultados para los siguientes valores de ganancia de los terminales: 26.789, 27.789, 28.789, 29.789 y 30.789 dB.

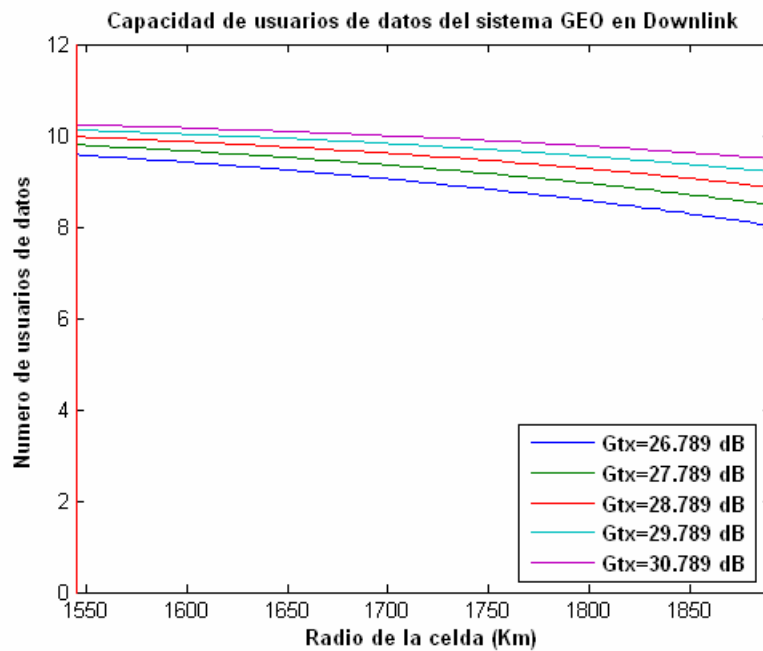


Figura 5.24 Número de usuarios de datos para el sistema GEO según la Gtx en downlink.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Tabla 5.12 Capacidad en proceso de datos para distintos valores de la ganancia mínima del satélite en Uplink y Downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|----------|---------------|--------------|----------|---------------|--------------|
| OPCIÓN | Gusuario (dB) | N. Usuarios | OPCIÓN | Gusuario (dB) | N. Usuarios |
| 1 | 26 | 7,85 | 1 | 26,789 | 9,42 |
| 2 | 27 | 8,85 | 2 | 27,789 | 9,66 |
| 3 | 28 | 9,60 | 3 | 28,789 | 9,87 |
| 4 | 29 | 10,25 | 4 | 29,789 | 10,03 |
| 5 | 30 | 10,70 | 5 | 30,789 | 10,17 |

Se obtiene un comportamiento similar a los procesos de voz, ya que el aumento de la ganancia de los terminales móviles produce un aumento en la capacidad del sistema.

En este caso, como los terminales móviles son los mismos para voz y para datos utilizamos una ganancia de transmisión de alrededor de 30 dB con la que se obtendrían 10 usuarios.

5.3.4.2.3 *Caso 3. Variación de la capacidad ante distintos valores de potencia y ganancia de transmisión del sistema*

En este apartado estudiamos el valor de la capacidad del sistema WCDMA por satélites GEO según la ganancia de transmisión de la antena del satélite y de la potencia emitida.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Capacidad para uplink:

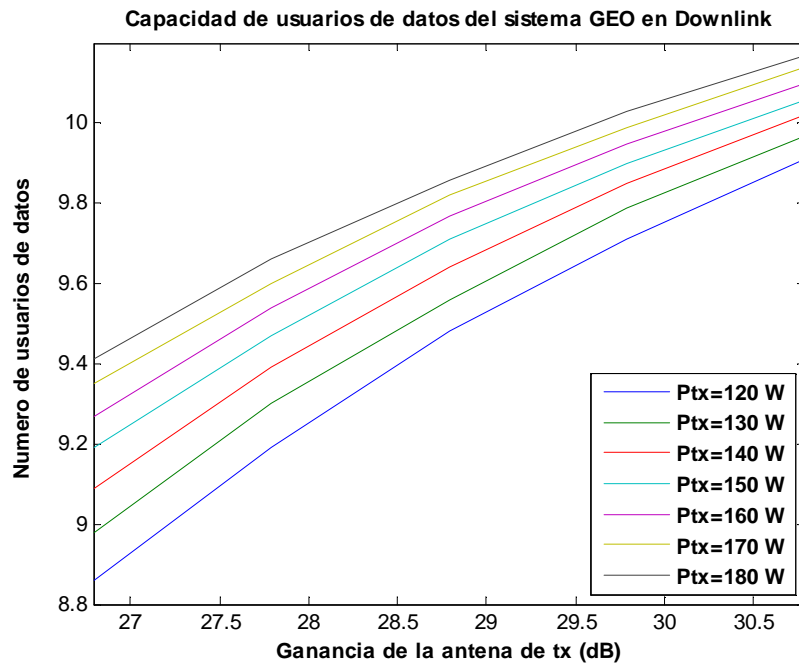


Figura 5.25 Número de usuarios de datos para el sistema GEO según la G_{tx} y la potencia en uplink.

Capacidad para downlink:

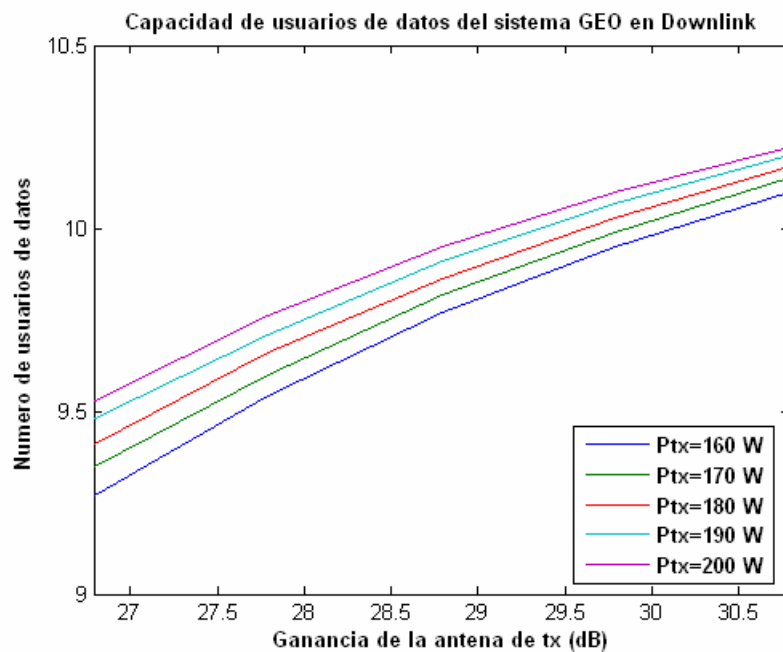


Figura 5.26 Número de usuarios de datos para el sistema GEO según la G_{tx} y la potencia en downlink.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Tabla 5.13 Capacidad en proceso de datos para distintos valores de la ganancia de transmisión del satélite y la potencia de transmisión en uplink y downlink.

| UPLINK | | | | | |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ptx | Gusu=26 dB | Gusu=27 dB | Gusu=28 dB | Gusu=29 dB | Gusu=30 dB |
| 3,4 | 7,05 | 8,20 | 9,10 | 9,80 | 10,40 |
| 3,6 | 7,35 | 8,40 | 9,30 | 9,95 | 10,50 |
| 3,8 | 7,60 | 8,65 | 9,45 | 10,10 | 10,60 |
| 4 | 7,85 | 8,85 | 9,60 | 10,25 | 10,70 |
| 4,2 | 8,10 | 9,00 | 9,75 | 10,35 | 10,80 |
| 4,4 | 8,30 | 9,20 | 9,90 | 10,45 | 10,90 |
| 4,6 | 8,50 | 9,35 | 10,00 | 10,55 | 10,95 |
| DOWNLINK | | | | | |
| Ptx | Gusu=26,789 dB | Gusu=27,789 dB | Gusu=28,789 dB | Gusu=29,789 dB | Gusu=30,789 dB |
| 120 | 8,86 | 9,19 | 9,48 | 9,71 | 9,91 |
| 130 | 8,98 | 9,30 | 9,56 | 9,79 | 9,97 |
| 140 | 9,09 | 9,39 | 9,64 | 9,85 | 10,02 |
| 150 | 9,19 | 9,47 | 9,71 | 9,90 | 10,06 |
| 160 | 9,27 | 9,54 | 9,77 | 9,95 | 10,10 |
| 170 | 9,35 | 9,60 | 9,82 | 9,99 | 10,14 |
| 180 | 9,41 | 9,66 | 9,86 | 10,03 | 10,17 |

Como podemos apreciar en la **Tabla 5.13** el downlink vuelve a limitar la capacidad. Según la **Tabla 5.14** vemos que no vamos a tener una capacidad mayor que 10 usuarios de datos, por tanto la mejor elección sería una ganancia de alrededor de 29 dB, una potencia de 3.8 W para uplink y 180 W para downlink para no desperdiciar potencia. No obstante esto no puede ocurrir, debemos usar las mismas opciones que las que habíamos usado en el servicio de voz ya que los terminales son los mismos. Los valores seleccionados son por tanto una potencia de 4 W para uplink y 180 W para downlink con una ganancia de la antena de alrededor de 30 dB, llegando al máximo de 10 usuarios de datos.

5.3.4.2.4 Caso 3. Variación de la capacidad ante distintos valores del factor de ruido del sistema

En este apartado se analizará el efecto del factor de ruido a la capacidad del sistema WCDMA por satélites LEO.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Capacidad para uplink:

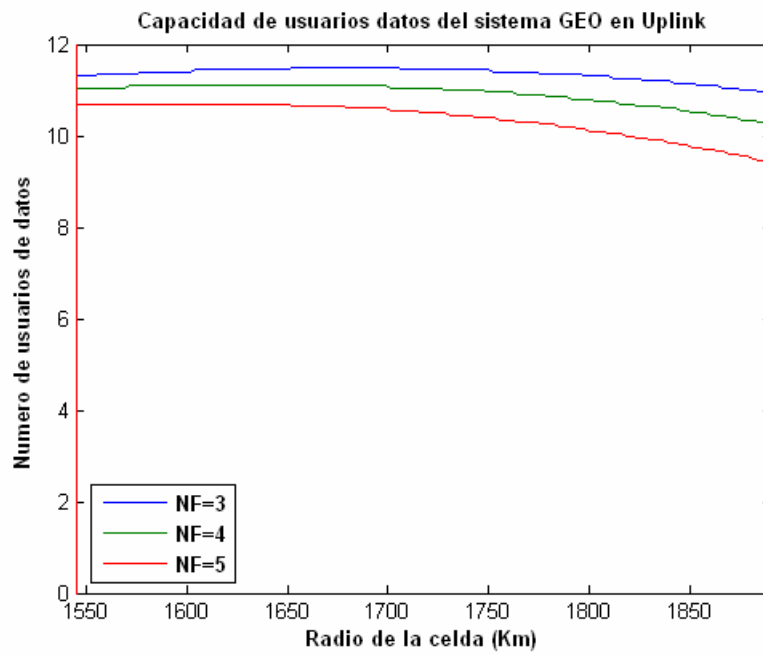


Figura 5.27 Número de usuarios de datos para el sistema GEO según el factor de ruido en uplink.

Capacidad para downlink:

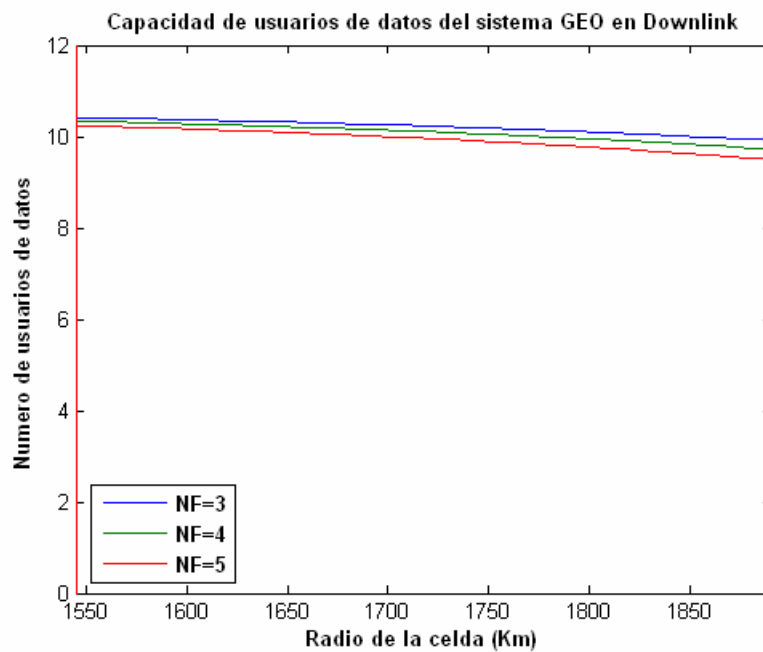


Figura 5.28 Número de usuarios de datos para el sistema GEO según el factor de ruido en downlink.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Tabla 5.14 Capacidad en proceso de datos para distintos valores del factor de ruido en uplink y downlink.

| UPLINK | | | DOWNLINK | | |
|--------|---------|-------------|----------|---------|-------------|
| CASO | NF (dB) | N. Usuarios | CASO | NF (dB) | N. Usuarios |
| 1 | 3 | 11,40 | 1 | 3 | 10,37 |
| 2 | 4 | 11,10 | 2 | 4 | 10,28 |
| 3 | 5 | 10,70 | 3 | 5 | 10,17 |

Al igual que en los procesos de voz, a medida que disminuye el factor de ruido en los terminales, aumenta la capacidad del sistema WCDMA.

5.3.4.3 Relación entre la capacidad de voz y datos

A continuación veremos una serie de gráficas que describen la relación entre la capacidad de usuarios de voz y la capacidad de usuarios de datos.

Para ello nos centramos en el radio de cobertura, es decir, los resultados que se muestran en la gráfica se han obtenido para un valor fijo de R, siendo R=1600 Km.

5.3.4.3.1 Caso 1. Comparativa lineal

En este apartado se compara la capacidad de usuarios de voz frente la capacidad de usuarios de datos de forma lineal.

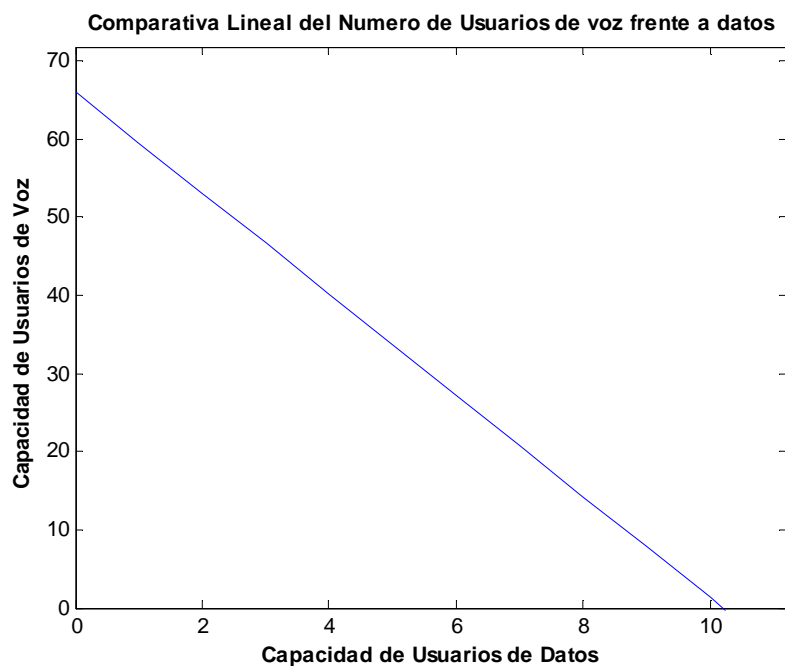


Figura 5.29 Relación lineal de la capacidad de usuarios de voz frente a datos.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

La capacidad máxima por celda será:

Tabla 5.15 Comparativa lineal.

| COMPARATIVA LINEAL | | | | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|
| USUARIOS DE VOZ | 66,05 | 59,57 | 53,09 | 40,14 | 27,2 | 14,24 | 7,77 | 1,29 |
| USUARIOS DE DATOS | 0 | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 | 9 | 10 |

En la **Tabla 5.15** se muestra la equivalencia entre número de usuarios de voz y número de usuarios para datos. Se han dado valores en número racionales por ser una comparativa lineal. En el apartado siguiente se estudiará una comparativa real.

El número máximo de usuarios de voz será de 66 usuarios por célula, esto ocurrirá exclusivamente si no existen usuarios de datos.

El número máximo de usuarios de datos será 10 usuarios por célula, esto ocurrirá exclusivamente cuando haya un o ningún usuario de voz.

Los valores intermedios son los que se muestran en la **Tabla 5.15**.

5.3.4.3.2 Caso 4. Comparativa real

En este apartado se compara la capacidad de usuarios de voz frente la capacidad de usuarios de datos de forma real.

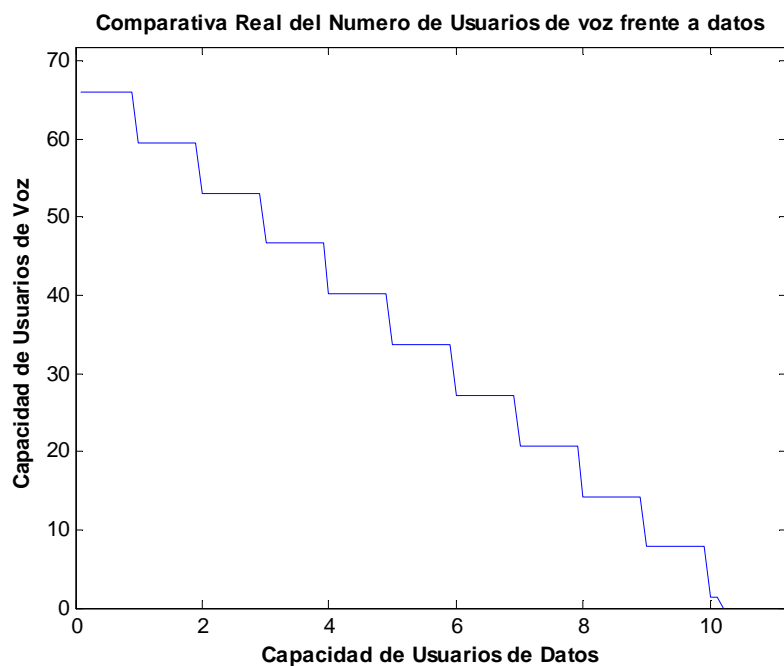


Figura 5.30 Relación real de la capacidad de usuarios de voz frente a datos.

Tabla 5.16 Comparativa real.

| COMPARATIVA | | | | | | | | |
|-------------------|----|----|----|----|----|----|---|----|
| USUARIOS DE VOZ | 66 | 59 | 53 | 40 | 27 | 14 | 7 | 1 |
| USUARIOS DE DATOS | 0 | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 | 9 | 10 |

La **Tabla 5.16** muestra la equivalencia entre usuarios de datos y usuarios de voz en números naturales. Un usuario de datos equivale a entre 6 y 7 usuarios de voz.

5.4 CONCLUSIONES

Con la tecnología WCDMA con satélites GEO podemos proporcionar cobertura a zonas específicas del planeta usando un sólo satélite geoestacionario. Estos satélites son los más importantes y los de mayor uso en la actualidad, por la órbita en que se encuentran y las clases de servicios que pueden proporcionar, como pueden ser los de radiodifusión, telefonía y transmisión de datos.

Factores que tienen relación directa con la capacidad del sistema, esto es que al aumentar el factor aumentan el número de usuarios del sistema WCDMA:

- ✓ Potencia de transmisión.
- ✓ Ganancia de la antena del transmisor móvil.

Factores que tienen relación inversa con la capacidad del sistema:

- ✗ Factor de ruido de los terminales.
- ✗ Radio de cobertura.

5.4.1 Mejor opción

La mejor opción para la capacidad ha sido elegida teniendo en cuenta todos los factores posibles ha sido:

- Altura del satélite 36000 Km.
- Radio de cobertura por celda 1600 Km.
- Potencia de transmisión para uplink:

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

- Voz: 1 W
- Datos: 4 W
- Potencia elegida para downlink: 180 W/celda.
- Ganancia de la antena del terminal de usuario: 30 dB.
- Ganancia máxima de la antena del satélite: 35.59 dB.
- Factor de ruido del sistema $NF=5$ dB.

La capacidad con los valores anteriores es la siguiente:

- Capacidad máxima para servicio de voz exclusivo: 66 usuarios
- Capacidad máxima para servicio de datos exclusivo: 10 usuarios.
- Capacidad total: (mirar **Tabla 5.6**)

Con los resultados obtenidos en este capítulo podemos decir que las comunicaciones WCDMA con satélites GEO son buenas para comunicaciones móviles cuyos terminales se encuentren en estaciones de gran tamaño alejadas de la cobertura terrestre, como lo son barcos y aviones, debido a las grandes dimensiones de estos terminales. Por ejemplo sería absurdo que un camión de carga circulando por las calles y autopistas llevara un plato parabólico en el techo, por cuestiones de estabilidad, peso y estética, además del alto riesgo de vandalismo que tendría. Estas comunicaciones permitirían a los barcos navegar con mayor seguridad y les facilitaría, por ejemplo, realizar los trámites de llegada y partida a puertos de forma anticipada. Entre los usuarios de este servicio se podrían contar operadores de flotas de transportes, líneas aéreas, pasajeros en aviones y controladores de tráfico aéreo, trabajadores gubernamentales, grupos de emergencia, administradores de bancos, periodistas y broadcasters, agencias de defensa civil y fuerzas de la paz, entre otros.

5.5 EJEMPLO GEO AVIONES EUROPA

OBJETIVO: Cubrir el continente Europeo con celdas de un satélite GEO para alcanzar la capacidad máxima posible en comunicaciones en avión comercial.

Alrededor de 5500 aviones comerciales surcan el cielo europeo en cada instante. Sería muy interesante el desarrollo de un sistema de comunicaciones que permita la comunicación de los aviones con el resto del continente Europeo por motivos de seguridad y emergencia.

Para realizar todo ello se debe cubrir el continente Europeo, incluido mares, con un satélite GEO, sin dejar zonas sin cobertura entre celdas para que la comunicación sea fiable. Aquí tenemos un mapa con la distribución de celdas de cobertura sobre él.



Figura 5.31 Mapa de Europa.

Los aviones comerciales vuelan a una altura de 10 Km.

5.5.1 Datos del sistema

Datos generales:

- Servicio GEO IP de datos a la frecuencia de voz (15 Kbps).
- $E_b/N_0 = 7dB$. (el avión está en movimiento).
- $G_p = 256$.
- $\alpha = 1$.
- Radio de trabajo de 450 a 550 Km.
- Distancia del satélite: 38000 Km. (ya que no nos encontramos encima del ecuador)
- Altura del avión (usuario): 10 Km.
- Uso de un satélite GEO.

Datos de Europa:

- Situada entre los paralelos 30 y 70°.
 - De Norte a Sur: 4452 Km. → Cogemos una distancia de 5000 Km. para incluir parte del mar periférico.
 - De Este a Oeste: 5269 Km. → Cogemos una distancia de 5500 Km para incluir parte de mar periférico.

5.5.2 Elección de radio de cobertura

En este apartado se investiga el mejor radio de trabajo.

A continuación se muestra en la **Tabla 5.17** de la capacidad para distintos radios de trabajo. Se muestra también el número de celdas necesarias para cada radio de cobertura.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Tabla 5.17 Tabla comparativa entre el radio de cobertura y el número de celdas necesarias.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Radio celda (Km) | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | 90 | 64 | 56 | 42 | 36 | 30 |

Para los satélites GEO, utilizamos un número máximo de spotbeams, es decir, un número máximo de 50 celdas por satélite, ya que en la actualidad las placas solares transmiten una potencia máxima de alrededor de 30KW al 30% de eficiencia [13],[15], Por tanto radios de cobertura de 350, 400 y 450 Km. no están al nuestro alcance en estos momento. Se muestran a modo informativo para futuras tecnologías.

Nuestro radio de cobertura ideal sería de 500 Km., esto es porque para radios mayores el número de celdas para un satélite será demasiado pequeño, y aunque la capacidad por celda pueda ser mayor, la densidad de usuarios totales disminuirá, esto lo comprobaremos más adelante.

5.5.3 Diseño del escenario

A continuación se muestra la configuración de la cobertura para 42 celdas, dispuestas en 6 filas y 7 columnas, y radio de cobertura de 500 Km. por celda.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO



Figura 5.32 Mapa de Europa dividido en celdas de 500Km. de radio dispuestas en 6 filas y 7 columnas.

Como hay zonas que nos interesan más que otras, puesto que circularán más aviones por ellas, recolocaremos las celdas según nos convenga más. Incluimos las Islas Canarias y el Mar Mediterráneo descartando partes del océano atlántico y de Asia.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO



Figura 5.33 Mapa de Europa dividido en celdas de 500 Km. de radio, dispuestas en la mejor configuración para cubrir el continente.

Las células en los extremos serán ovaladas y con un radio de cobertura mayor. Las figuras se muestran para el caso en el que todas las celdas son hexagonales, caso teórico.

5.5.4 Estudio de la capacidad para distintas frecuencias

En este apartado se estudia la capacidad del sistema WCDMA con satélites GEO, para cobertura Europea en aviones comerciales.

Cada avión se contabilizará como un usuario.

Se realiza el estudio para los siguientes valores de la frecuencia: 2, 4, 6, y 8 GHz.

5.5.4.1 Estudio para una frecuencia de 2 GHz.

5.5.4.1.1 Datos específicos para la banda de 2 GHz.

Datos en uplink:

- $f_{uplink} = 1.996$ GHz.
- $P_{tx.avión} = 4 - 9$ W. en intervalos de 1 W.
- $G_{ant.avión} = 16, 18, 20, 22, 24, \text{ y } 26$ dB .

Datos en downlink:

- $f_{downlink} = 2.186$ GHz.
- $P_{tx.satélite} = 40 - 100$ W/Celda. en intervalos de 10 W.
- $G_{ant.avión} = 16.789, 18.789, 20.789, 22.789, 24.789, \text{ y } 26.789$ dB .

A partir de estos datos se realizan una serie de simulaciones para hallar la capacidad óptima.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

5.5.4.1.2 Diagrama de radiación de la antena del satélite

5.5.4.1.2.1 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 1.996 GHz.

En la **Figura 5.34**.se muestra el diagrama de radiación de la antena del satélite.

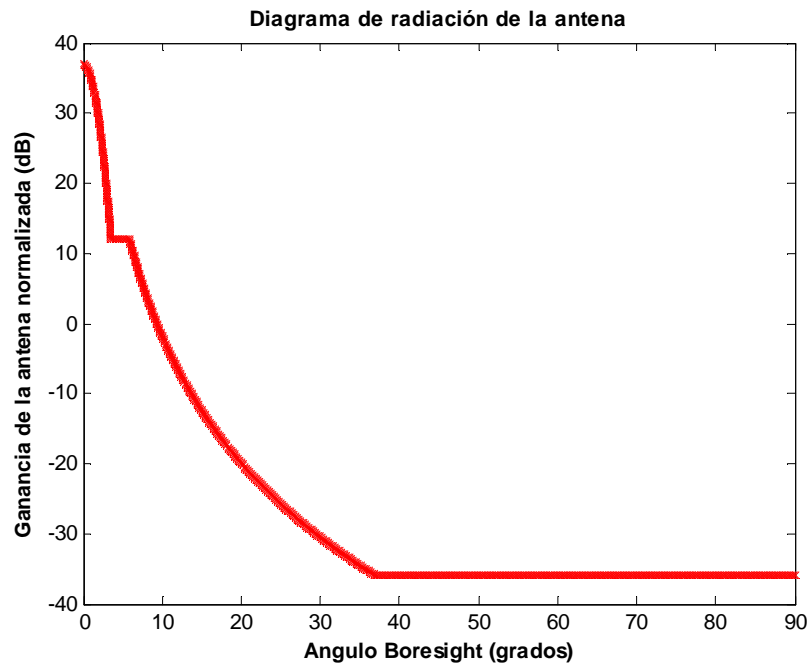


Figura 5.34 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 1.996 GHz.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

5.5.4.1.2.2 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 2.186 GHz

En la **Figura 5.35** se muestra el diagrama de radiación de la antena del satélite para uplink.

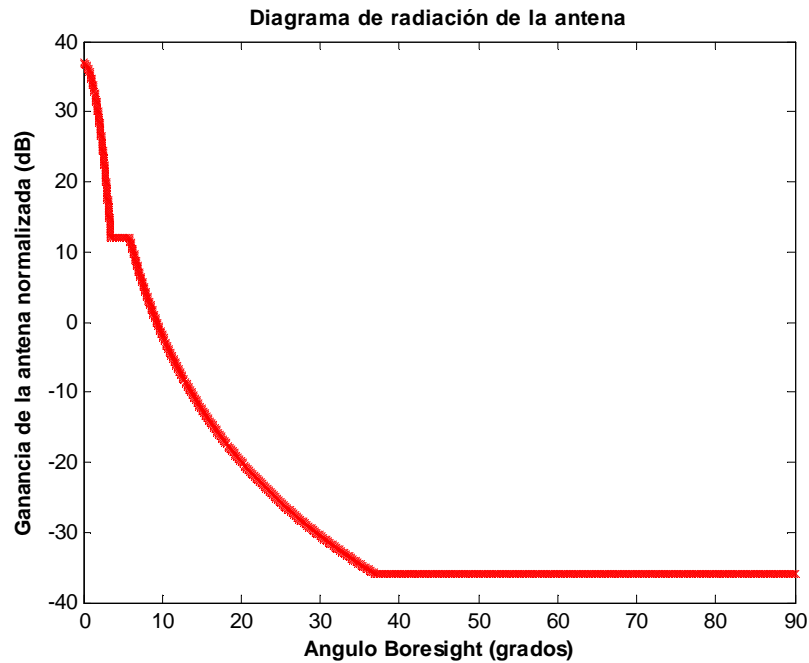


Figura 5.35 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 2.186GHz.

5.5.4.1.3 Simulaciones para la banda de 2 GHz.

En este apartado se realiza el estudio de la capacidad de un sistema WCDMA en 2GHz para distintos valores de la potencia de transmisión y la ganancia de la antena del avión.

5.5.4.1.3.1 Simulaciones en uplink

La muestra la capacidad para una ganancia de la antena del avión de 18 dB. y los valores de potencia mostrados en la **Figura 5.36**.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

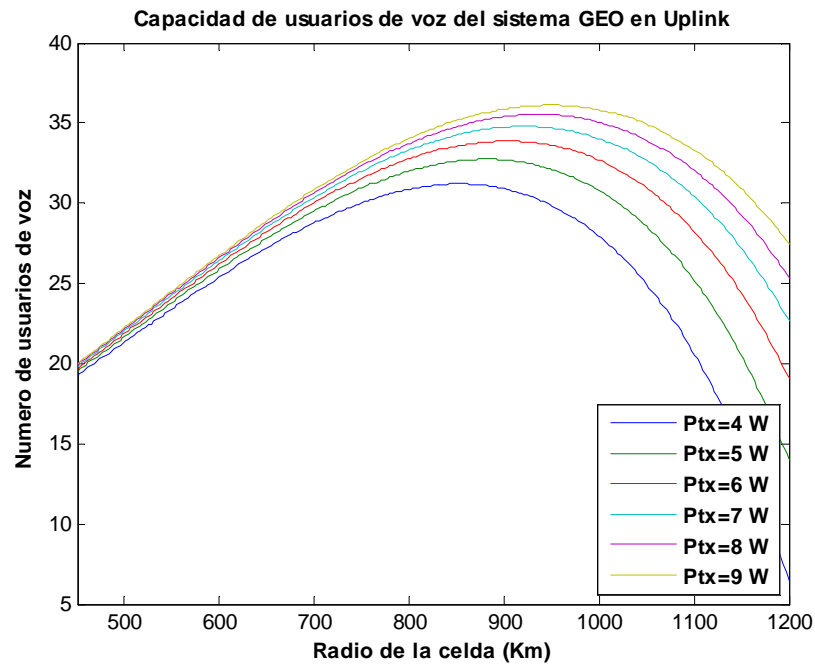


Figura 5.36 Capacidad para una ganancia del avión de 18 dB y distintos valores de potencia para 1.996GHz.

El máximo de la capacidad se encuentra entre 850 y 900 Km de radio celular. Como se declaró en la **sección 5.5.2** el radio de cobertura deseado se encuentra en 500 Km. La capacidad no será máxima para esa zona, pero sí la suficiente para cumplir el objetivo de proporcionar servicio a 5500 aviones que llamen simultáneamente, por lo tanto que el máximo se encuentre a mayores radios a priori no nos preocupa.

Analizamos resultados para los distintos valores de potencia y de ganancia expuestos en el **apartado 5.5.4.1.1**.

Los resultados se muestran para un radio de cobertura de 500 Km por celda.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

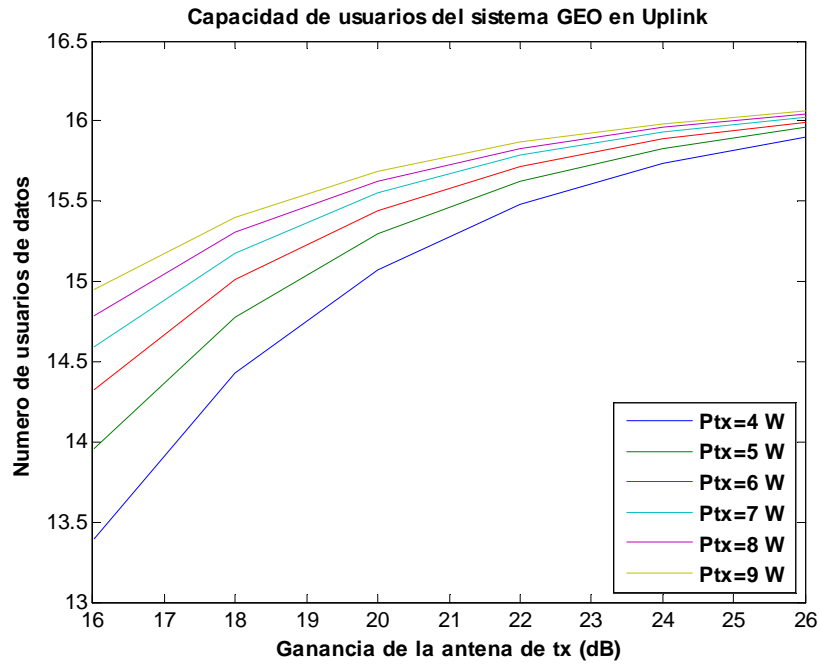


Figura 5.37 Capacidad en función de la ganancia de la antena del avión y de la potencia transmitida en 500Km de radio celular para 1.996GHz.

Los mejores resultados para este enlace se muestran a continuación en la **Tabla 5.18**. Se han ajustado los valores para que la capacidad se encuentre entre 5500 y 7500 usuarios. Se requiere proporcionar servicio a 5500 aviones como mínimo, pero se contempla una posible subida del número de vuelos para años futuros, por tanto un aumento de la capacidad. Esto se tiene en cuenta ajustando los parámetros de potencia y ganancia para un número mayor de usuarios.

Tabla 5.18 Capacidad y número de celdas para distintos radios celulares para 1.996GHz.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|------|------|------|------|
| Radio | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Nusu/celda | 13 | 15 | 17 | 19 |
| Nusuarios total/simultáneos | 728 | 630 | 612 | 570 |
| Nusuarios total (Factividad total=10%) | 7280 | 6300 | 6120 | 5700 |
| Ptx transmitida (W) | 6 | 6 | 5 | 6 |
| Gantena avión (dB) | 16 | 18 | 22 | 26 |

Según la **Tabla 5.18** obtenemos una capacidad de 6300 aviones con 6 W de potencia y 16 dB de ganancia de la antena del avión.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

5.5.4.1.3.2 Simulaciones en downlink.

La muestra la capacidad para una ganancia de la antena del avión de 18.789 dB. y los valores de potencia mostrados en la **Figura 5.38**.

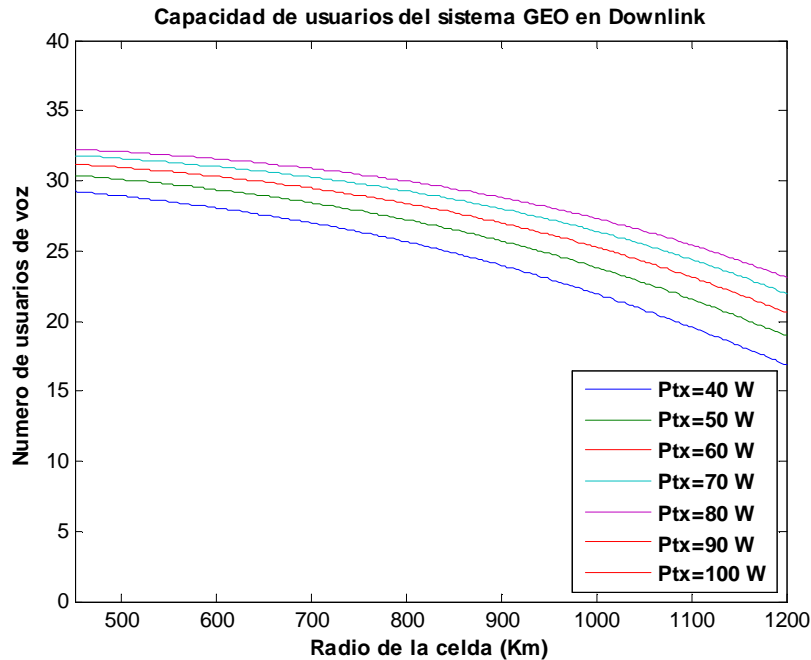


Figura 5.38 Capacidad para una ganancia del avión de 18 dB y distintos valores de potencia para 2.186GHz.

El máximo de la capacidad se encuentra entre 450Km. de radio celular y después empieza a decrecer.

Analizamos resultados para los distintos valores de potencia y de ganancia expuestos en el **apartado 5.5.4.1.1** en un radio de cobertura de 500Km. por celda.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

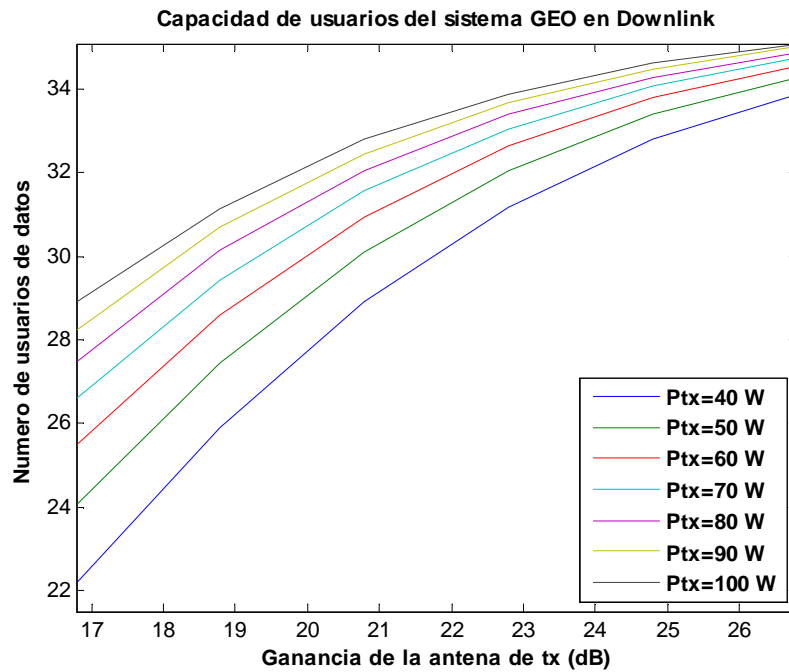


Figura 5.39 Capacidad en función de la ganancia de la antena del avión y de la potencia transmitida en 500Km de radio celular para 2.186GHz.

Los mejores resultados para este enlace se muestran a continuación en la **Tabla 5.19**. Se han ajustado los valores para que la capacidad se encuentre entre 7000 y 12500 usuarios.

Tabla 5.19 Capacidad y número de celdas para distintos radios celulares en 2.186GHz.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Radio | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Nusu/celda | 22 | 22 | 23 | 24 |
| Nusuarios total/simultáneos | 1232 | 924 | 828 | 720 |
| Nusuarios total (Factividad total= | 12320 | 9240 | 8280 | 7200 |
| Ptx transmitida (W/Celda) | 40 | 40 | 50 | 60 |
| Gantena avión (dB) | 16,780 | 16,789 | 16,789 | 16,789 |

Según la **Tabla 5.19** obtenemos una capacidad de 9240 aviones con 40 W/Celda de potencia y 16.789 dB de ganancia de la antena del avión.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

5.5.4.1.4 Resultados comunes de la capacidad para uplink y downlink en 2 GHz.

Como bien es sabido, la ganancia de la antena del avión debe ser la misma para ambos enlaces (con una diferencia de 0.789 dB debido a la frecuencia de cada enlace). A continuación se muestra la capacidad para resultados compatibles entre el uplink y el downlink.

5.5.4.1.4.1 Resultados en uplink

La **Tabla 5.20** muestra la capacidad compatible con el enlace descendente.

Tabla 5.20 Capacidad en 1.996 GHz. con resultados compatibles con downlink.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|------|------|------|------|
| Radio | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Nusu/celda | 13 | 15 | 17 | 19 |
| Nusuarios total/simultáneos | 728 | 630 | 612 | 570 |
| Nusuarios total (Factividad total=10%) | 7280 | 6300 | 6120 | 5700 |
| Ptx transmitida (W) | 6 | 6 | 5 | 6 |
| Gantena avión (dB) | 16 | 18 | 22 | 26 |

5.5.4.1.4.2 Resultados en downlink

La **Tabla 5.21** muestra la capacidad compatible con el enlace descendente.

Tabla 5.21 Capacidad en 2.186 GHz con resultados compatibles con uplink.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|--------|--------|--------|--------|
| Radio | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Nusu/celda | 22 | 25 | 30 | 33 |
| Nusuarios total/simultáneos | 1232 | 1050 | 1080 | 990 |
| Nusuarios total (Factividad total=10%) | 12320 | 10500 | 10800 | 9900 |
| Ptx transmitida (W/Celda) | 40 | 40 | 40 | 40 |
| Gantena avión (dB) | 16,780 | 18,789 | 22,789 | 26,789 |

5.5.4.1.5 Conclusiones para 2 GHz.

La capacidad para el sistema WCDMA con un satélite GEO para proporcionar cobertura a los aviones que sobrevuelan el continente europeo, en la banda de 2GHz de frecuencia y un radio de cobertura por celda de 500 Km., es de 6300 aviones con una ganancia de antena del avión de 18 dB., una potencia de transmisión del satélite de 40 W/Celda, y una potencia del Terminal del avión de 6 W.

Para radios de cobertura mayores la capacidad total disminuye.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Para radios de cobertura de 450 Km. por celda y menores, la capacidad por celda disminuye, pero al disponer de más celdas, la capacidad total es mayor. Para años futuros, cuando la tecnología de los satélites GEO permita un mayor número de celdas, se podría usar esta configuración para obtener más usuarios.

En la actualidad si se requiere una mayor capacidad, bastaría con aumentar la potencia de transmisión en cada enlace. Las tablas con los valores de la capacidad para distintos valores de potencia y ganancia de la antena del avión, vienen representados en el Anexo B.

5.5.4.2 Estudio para una frecuencia de 4 GHz.

5.5.4.2.1 Datos específicos para la banda de 4 GHz.

Datos en uplink:

- $f_{uplink} = 3.996 \text{ GHz}$.
- $P_{tx.avión} = 4 - 9 \text{ W}$. en intervalos de 1 W.
- $G_{ant.avión} = 16, 18, 20, 22, 24, \text{ y } 26 \text{ dB}$.

Datos en downlink:

- $f_{downlink} = 4.186 \text{ GHz}$.
- $P_{tx.satélite} = 40 - 100 \text{ W/Celda}$. en intervalos de 10 W.
- $G_{ant.avión} = 16.4, 18.4, 20.4, 22.4, 24.4, \text{ y } 26.4 \text{ dB}$.

A partir de estos datos se realizan una serie de simulaciones para hallar la capacidad óptima.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

5.5.4.2.2 Diagrama de radiación de la antena del satélite

5.5.4.2.2.1 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 3.996 GHz.

En la **Figura 5.40** se muestra el diagrama de radiación de la antena del satélite para uplink.

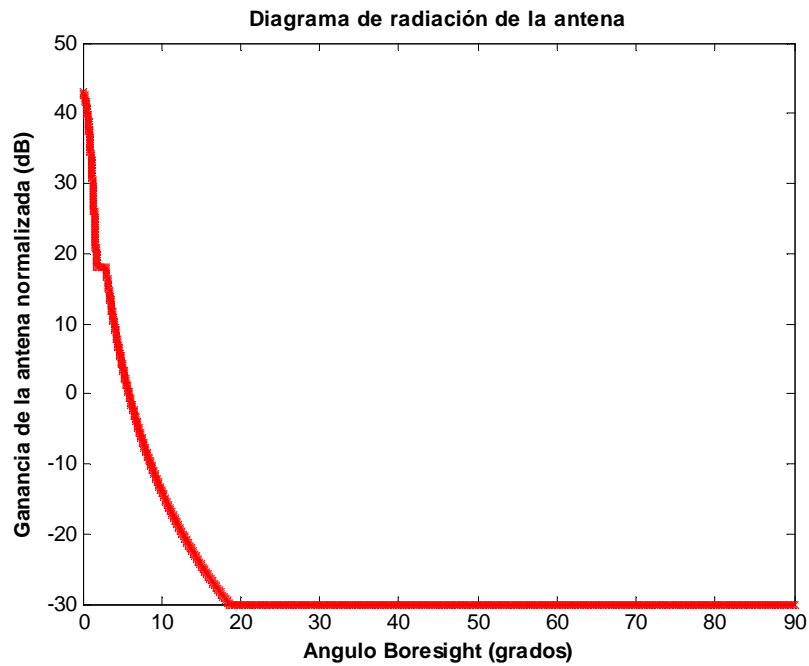


Figura 5.40 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 3.996 GHz.

5.5.4.2.2.2 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 4.186 GHz en downlink

En la **Figura 5.41** se muestra el diagrama de radiación de la antena del satélite para downlink.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

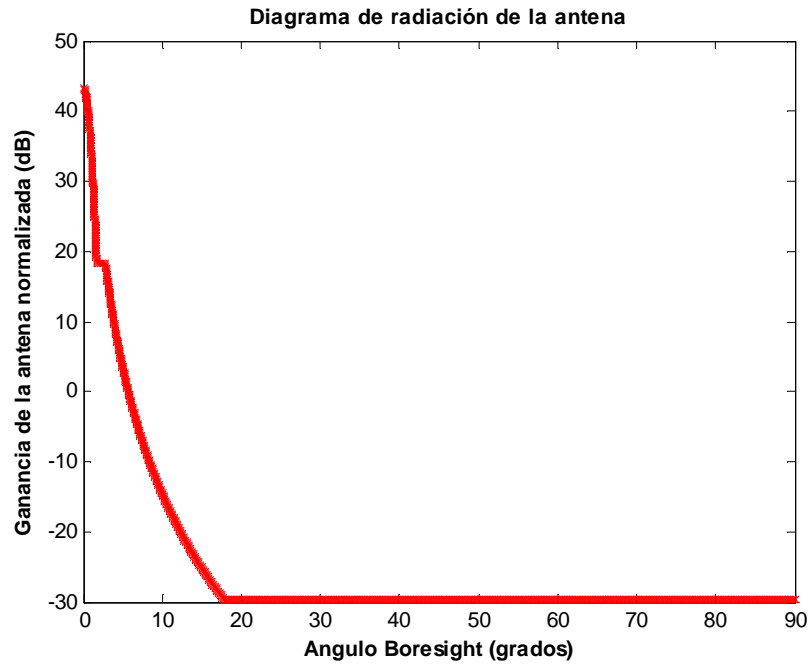


Figura 5.41 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 4.186 GHz.

5.5.4.2.3 Simulaciones para la banda de 4 GHz.

En este apartado se realiza el estudio de la capacidad de un sistema WCDMA en 4GHz para distintos valores de la potencia de transmisión y la ganancia de la antena del avión.

5.5.4.2.3.1 Simulaciones en uplink

La muestra la capacidad para una ganancia de la antena del avión de 18 dB. y los valores de potencia mostrados en la **Figura 5.42**.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

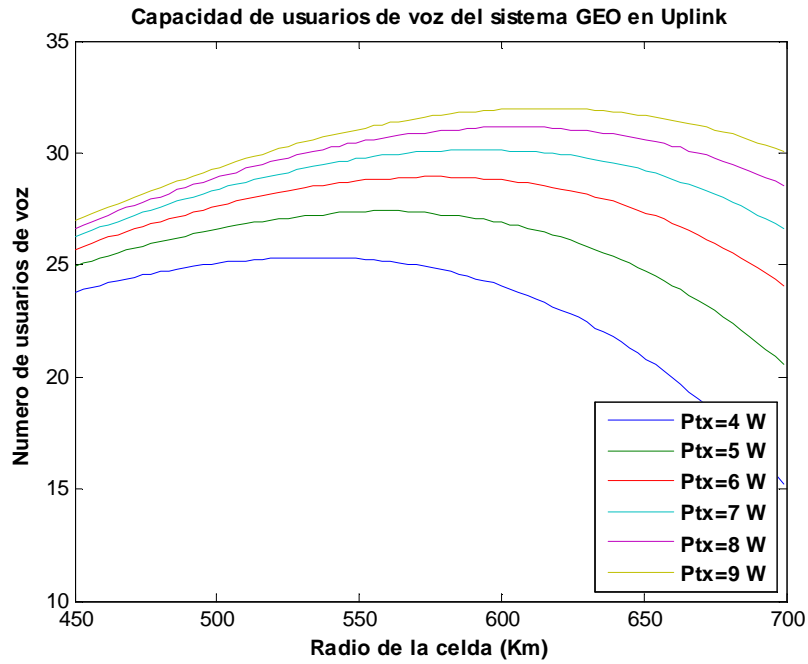


Figura 5.42 Capacidad para una ganancia del avión de 18 dB y distintos valores de potencia para 3.996GHz.

El máximo de la capacidad se encuentra entre 525 y 625 Km. de radio celular. Como se ha explicado en la **sección 5.5.2** el radio de cobertura deseado se encuentra en 500 Km.

Analizamos resultados para los distintos valores de potencia y de ganancia expuestos en el **apartado 5.5.4.2.1**.

Los resultados se muestran para un radio de cobertura de 500 Km por celda.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

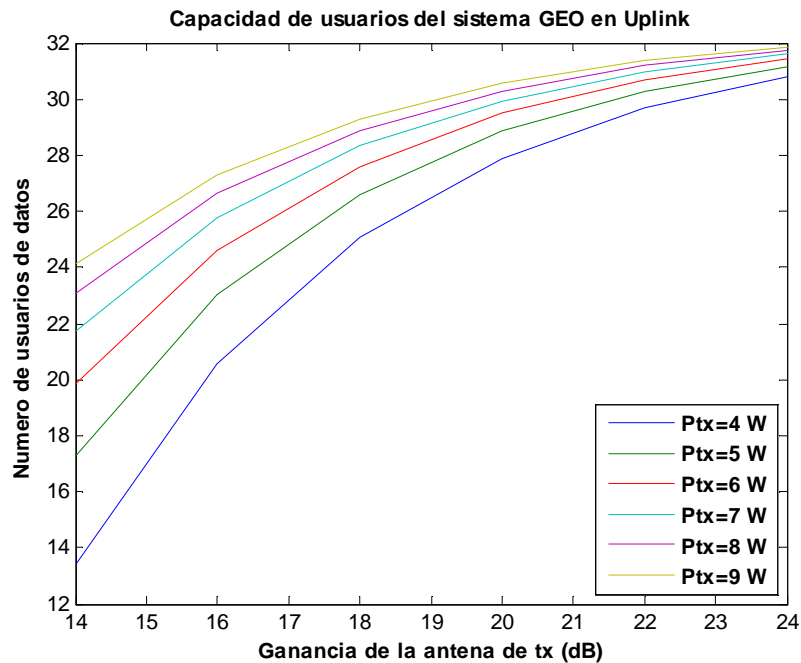


Figura 5.43 Capacidad en función de la ganancia de la antena del avión y de la potencia transmitida en 500Km de radio celular para 3.996 GHz.

Los mejores resultados para este enlace se muestran a continuación en la **Tabla 5.22**. Se han ajustado los valores para que la capacidad se encuentre entre 7000 y 850000 usuarios. Se requiere proporcionar servicio a 5500 aviones como mínimo, pero se contempla una posible subida del número de vuelos para años futuros, por tanto un aumento de la capacidad. Esto se tiene en cuenta ajustando los parámetros de potencia y ganancia para un número mayor de usuarios.

Tabla 5.22 Capacidad y número de celdas para distintos radios celulares para 3.996 GHz.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|------|------|------|------|
| Radio | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Nusu/celda | 15 | 17 | 19 | 24 |
| Nusuarios total/simultáneos | 840 | 714 | 684 | 720 |
| Nusuarios total (Factividad total=10%) | 8400 | 7140 | 6840 | 7200 |
| Ptx transmitida (W) | 5 | 6 | 5 | 8 |
| Gantena avión (dB) | 16 | 18 | 22 | 24 |

Según la **Tabla 5.22** obtenemos una capacidad de 7140 aviones con 6 W de potencia y 18 dB de ganancia de la antena del avión.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

5.5.4.2.3.2 Simulaciones en downlink

La muestra la capacidad para una ganancia de la antena del avión de 18.4 dB. y los valores de potencia mostrados en la **Figura 5.44**.

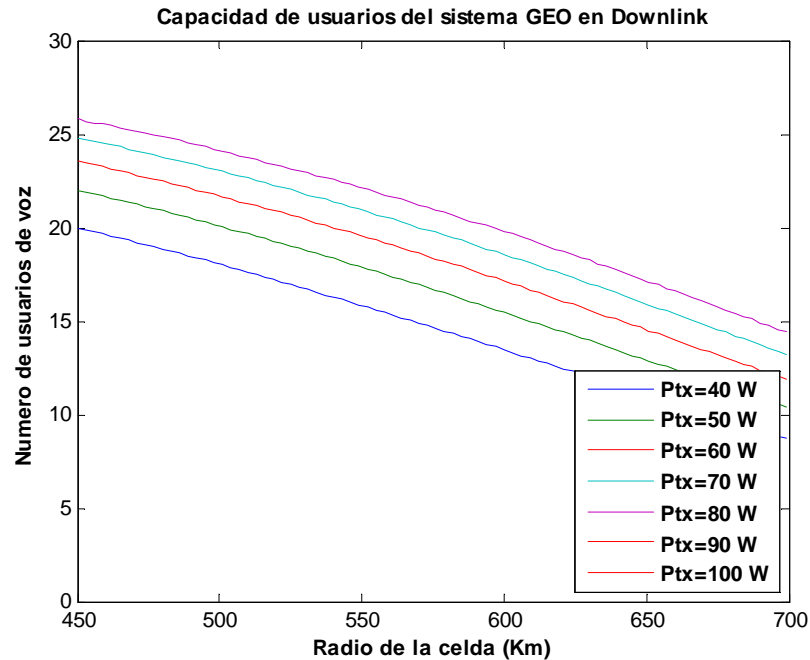


Figura 5.44 Capacidad para una ganancia del avión de 18.4 dB y distintos valores de potencia para 4.186GHz.

El máximo de la capacidad se encuentra entre 450Km. de radio celular y después empieza a decrecer.

Analizamos resultados para los distintos valores de potencia y de ganancia expuestos en el **apartado 5.5.4.2.1** en un radio de cobertura de 500Km. por celda.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

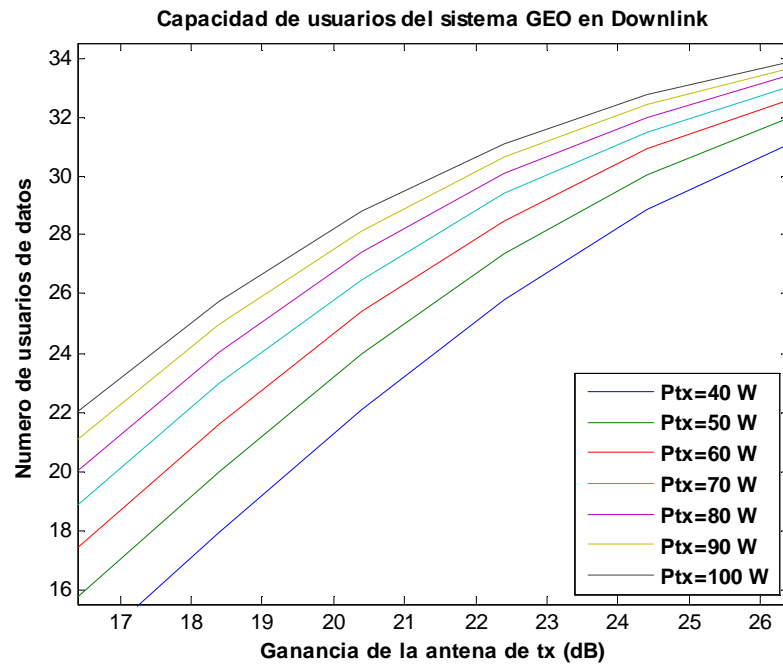


Figura 5.45 Capacidad en función de la ganancia de la antena del avión y de la potencia transmitida en 500Km de radio celular para 4.186 GHz.

Los mejores resultados para este enlace se muestran a continuación en la **Tabla 5.23**. Se han ajustado los valores para que la capacidad se encuentre entre 6900 y 8500 usuarios.

Tabla 5.23 Capacidad y número de celdas para distintos radios celulares para 4.186 GHz.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|------|------|------|------|
| Radio | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Nusu/celda | 15 | 18 | 21 | 23 |
| Nusuarios total/simultáneos | 840 | 756 | 756 | 690 |
| Nusuarios total (Factividad total= | 8400 | 7560 | 7560 | 6900 |
| Ptx transmitida (W/Celda) | 40 | 70 | 50 | 80 |
| Gantena avión (dB) | 16,4 | 16,4 | 20,4 | 20,4 |

Según la **Tabla 5.23** obtenemos una capacidad de 7560 aviones con 70 W de potencia y 16.4 dB de ganancia de la antena del avión.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

5.5.4.2.4 Resultados comunes de la capacidad para uplink y downlink en 4 GHz.

Como bien es sabido, la ganancia de la antena del avión debe ser la misma para ambos enlaces (con una diferencia de 0.4 dB debido a la frecuencia de cada enlace). A continuación se muestra la capacidad para resultados compatibles entre el uplink y el downlink.

5.5.4.2.4.1 Resultados en uplink

La **Tabla 5.24** muestra la capacidad compatible con el enlace descendente.

Tabla 5.24 Capacidad en 3.996 GHz con resultados compatibles con downlink.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|------|------|------|------|
| Radio | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Nusu/celda | 15 | 17 | 19 | 24 |
| Nusuarios total/simultáneos | 840 | 714 | 684 | 720 |
| Nusuarios total (Factividad total=10%) | 8400 | 7140 | 6840 | 7200 |
| Ptx transmitida (W) | 5 | 6 | 5 | 8 |
| Gantena avión (dB) | 16 | 18 | 22 | 24 |

5.5.4.2.4.2 Resultados en downlink

La **Tabla 5.25** muestra la capacidad compatible con el enlace descendente.

Tabla 5.25 Capacidad en 4.186 GHz con resultados compatibles con uplink.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|------|------|------|------|
| Radio | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Nusu/celda | 15 | 17 | 23 | 25 |
| Nusuarios total/simultáneos | 840 | 714 | 828 | 750 |
| Nusuarios total (Factividad total=10%) | 8400 | 7140 | 8280 | 7500 |
| Ptx transmitida (W/Celda) | 40 | 40 | 40 | 40 |
| Gantena avión (dB) | 16,4 | 18,4 | 22,4 | 24,4 |

5.5.4.2.5 Conclusiones para la banda de 4 GHz.

La capacidad para el sistema WCDMA con un satélite GEO para proporcionar cobertura a los aviones que sobrevuelan el continente europeo, en la banda de 4 GHz de frecuencia y un radio de cobertura por celda de 500 Km., es de 7140 aviones con una ganancia de antena del avión de 18 dB., una potencia de transmisión del satélite de 40 W, y una potencia del Terminal del avión de 6 W.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Para radios de cobertura mayores necesitamos una ganancia de la antena del avión mayor.

Para radios de cobertura de 450 Km. por celda y menores, la capacidad por celda y la capacidad total aumentan. Para años futuros, cuando la tecnología de los satélites GEO permita un mayor número de celdas, se podría usar esta configuración para obtener más usuarios.

En la actualidad si se requiere una mayor capacidad, bastaría con aumentar la potencia de transmisión en cada enlace. Las tablas con los valores de la capacidad para distintos valores de potencia y ganancia de la antena del avión, vienen representados en el Anexo B.

5.5.4.3 Estudio para una frecuencia de 6 GHz.

5.5.4.3.1 Datos específicos para la banda de 6 GHz.

Datos en uplink:

- $f_{uplink} = 5.996 \text{ GHz}$.
- $P_{tx.avión} = 4 - 9 \text{ W}$. en intervalos de 1 W.
- $G_{ant.avión} = 16, 18, 20, 22, 24, \text{ y } 26 \text{ dB}$.

Datos en downlink:

- $f_{downlink} = 6.186 \text{ GHz}$.
- $P_{tx.satélite} = 40 - 100 \text{ W/Celda}$. en intervalos de 10 W.
- $G_{ant.avión} = 16.27, 18.27, 20.27, 22.27, 24.27, \text{ y } 27.27 \text{ dB}$.

A partir de estos datos se realizan una serie de simulaciones para hallar la capacidad óptima.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

5.5.4.3.2 Diagrama de radiación de la antena del satélite

5.5.4.3.2.1 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 5.996 GHz.

En la **Figura 5.46** se muestra el diagrama de radiación de la antena del satélite para uplink.

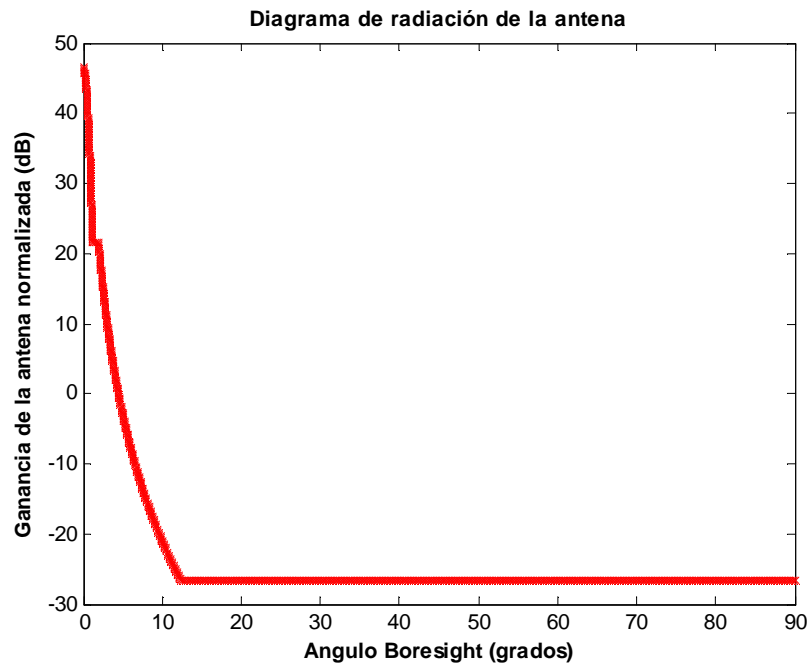


Figura 5.46 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 5.996 GHz.

5.5.4.3.2.2 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 6.186 GHz.

En la **Figura 5.47** se muestra el diagrama de radiación de la antena del satélite para downlink.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

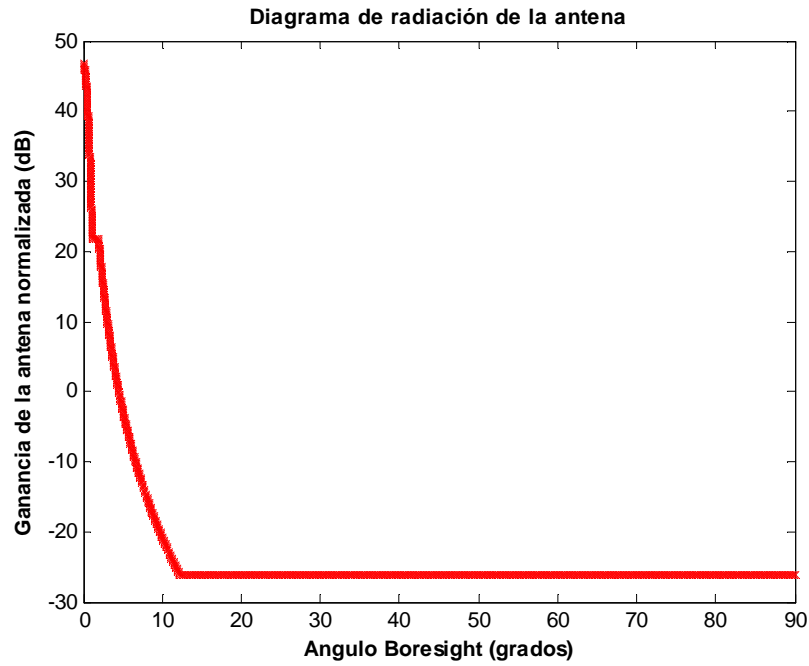


Figura 5.47 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 6.186 GHz.

5.5.4.3.3 Simulaciones para la banda de 6 GHz.

En este apartado se realiza el estudio de la capacidad de un sistema WCDMA en la banda de 6 GHz para distintos valores de la potencia de transmisión y la ganancia de la antena del avión.

5.5.4.3.3.1 Simulaciones en uplink

La muestra la capacidad para una ganancia de la antena del avión de 20 dB. y los valores de potencia mostrados en la **Figura 5.48**.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

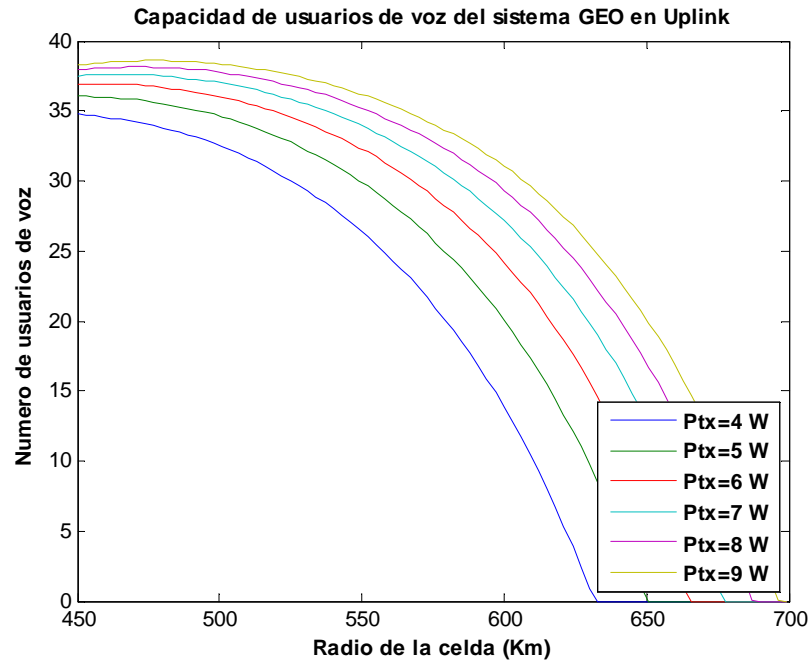


Figura 5.48 Capacidad para una ganancia del avión de 20 dB y distintos valores de potencia para 5.996GHz.

El máximo de la capacidad se encuentra alrededor de 450 Km. de radio celular (dependiendo del valor de la potencia y la ganancia). Como se ha explicado en la **sección 5.5.2** el radio de cobertura deseado se encuentra en 500 Km.

Analizamos resultados para los distintos valores de potencia y de ganancia expuestos en el **apartado 5.5.4.3.1**.

Los resultados se muestran para un radio de cobertura de 500 Km por celda.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

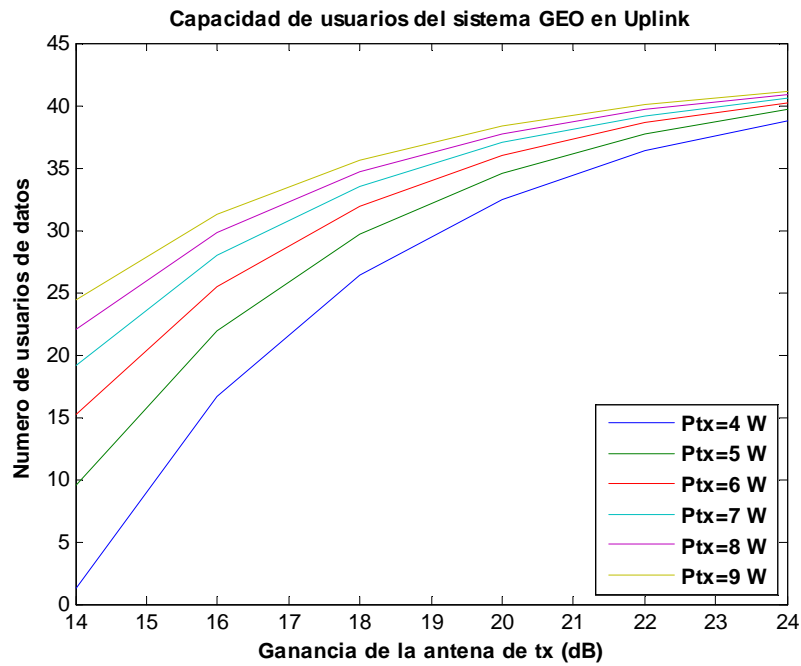


Figura 5.49 Capacidad en función de la ganancia de la antena del avión y de la potencia transmitida en 500Km de radio celular para 5.996 GHz.

Los mejores resultados para este enlace se muestran a continuación en la **Tabla 5.26**. Se han ajustado los valores para que la capacidad se encuentre entre 7500 y 9000 usuarios. Se requiere proporcionar servicio a 5500 aviones como mínimo, pero se contempla una posible subida del número de vuelos para años futuros, por tanto un aumento de la capacidad. Esto se tiene en cuenta ajustando los parámetros de potencia y ganancia para un número mayor de usuarios.

Tabla 5.26 Capacidad y número de celdas para distintos radios celulares para 5.996 GHz.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|------|------|------|------|
| Radio | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Nusu/celda | 15 | 21 | 21 | 25 |
| Nusuarios total/simultáneos | 840 | 882 | 756 | 750 |
| Nusuarios total (Factividad total=10%) | 8400 | 8820 | 7560 | 7500 |
| Ptx transmitida (W) | 4 | 5 | 5 | 4 |
| Gantena avión (dB) | 16 | 18 | 20 | 24 |

Según la **Tabla 5.26** obtenemos una capacidad de 8820 aviones con 5 W de potencia y 18 dB de ganancia de la antena del avión.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

5.5.4.3.3.2 Simulaciones en downlink

La muestra la capacidad para una ganancia de la antena del avión de 20.27 dB. y los valores de potencia mostrados en la **Figura 5.50**.

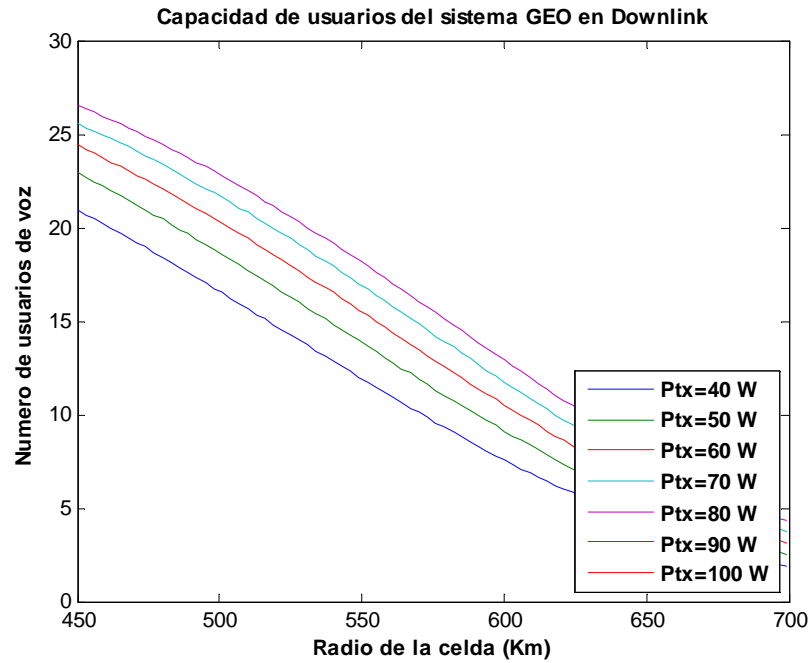


Figura 5.50 Capacidad para una ganancia del avión de 20 dB y distintos valores de potencia para 6.186GHz.

El máximo de la capacidad se encuentra entre 450Km. de radio celular y después empieza a decrecer.

Analizamos resultados para los distintos valores de potencia y de ganancia expuestos en el **apartado 5.5.4.3.1** en un radio de cobertura de 500Km. por celda.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

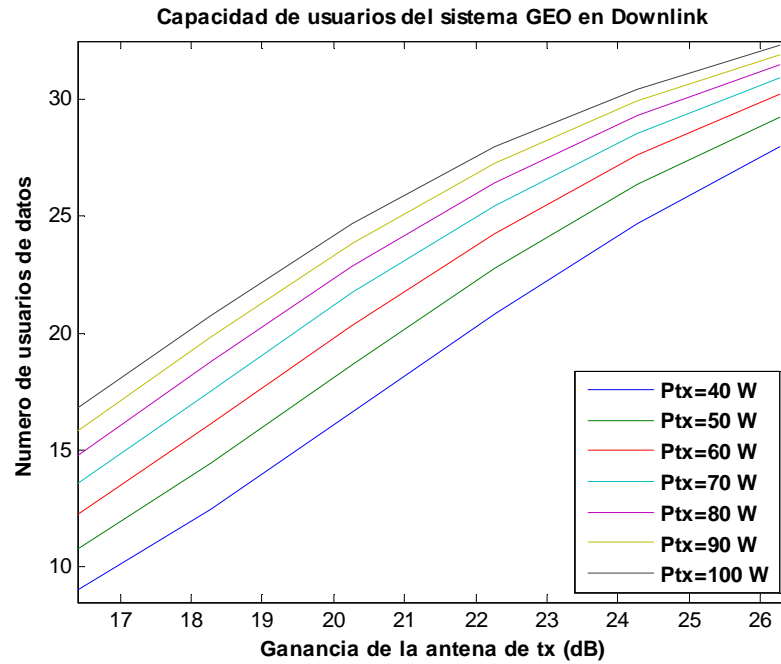


Figura 5.51 Capacidad en función de la ganancia de la antena del avión y de la potencia transmitida en 500Km de radio celular para 6.186 GHz.

Los mejores resultados para este enlace se muestran a continuación en la **Tabla 5.27**. Se han ajustado los valores para que la capacidad se encuentre entre 7500 y 9000 usuarios.

Tabla 5.27 Capacidad y número de celdas para distintos radios celulares para 6.186 GHz.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Radio | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Nusu/celda | 16 | 21 | 21 | 25 |
| Nusuarios total/simultáneos | 896 | 882 | 756 | 750 |
| Nusuarios total (Factividad total) | 8960 | 8820 | 7560 | 7500 |
| Ptx transmitida (W/Celda) | 60 | 70 | 70 | 80 |
| Gantena avión (dB) | 16,27 | 22,27 | 22,27 | 26,27 |

Según la **Tabla 5.27** obtenemos una capacidad de 8820 aviones con 70 W de potencia y 22.27 dB de ganancia de la antena del avión.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

5.5.4.3.4 Resultados comunes de la capacidad para uplink y downlink en 6 GHz.

Como bien es sabido, la ganancia de la antena del avión debe ser la misma para ambos enlaces (con una diferencia de 0.27 dB debido a la frecuencia de cada enlace). A continuación se muestra la capacidad para resultados compatibles entre el uplink y el downlink.

5.5.4.3.4.1 Resultados en uplink

La **Figura 5.52** muestra la capacidad compatible con el enlace descendente.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|------|-------|------|------|
| Radio | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Nusu/celda | 15 | 26 | 26 | 32 |
| Nusuarios total/simultáneos | 840 | 1092 | 936 | 960 |
| Nusuarios total (Factividad total=10%) | 8400 | 10920 | 9360 | 9600 |
| Ptx transmitida (W) | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Gantena avión (dB) | 16 | 20 | 22 | 26 |

Figura 5.52 Capacidad en 5.996 GHz con resultados compatibles con downlink.

5.5.4.3.4.2 Resultados en downlink

La **Figura 5.53** muestra la capacidad compatible con el enlace descendente.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|-------|-------|-------|-------|
| Radio | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Nusu/celda | 16 | 21 | 21 | 25 |
| Nusuarios total/simultáneos | 896 | 882 | 756 | 750 |
| Nusuarios total (Factividad total=10%) | 8960 | 8820 | 7560 | 7500 |
| Ptx transmitida (W/Celda) | 60 | 70 | 70 | 80 |
| Gantena avión (dB) | 16,27 | 20,27 | 22,27 | 26,27 |

Figura 5.53 Capacidad en 6.186 GHz con resultados compatibles con uplink.

5.5.4.3.5 Conclusiones para la banda de 6 GHz.

La capacidad para el sistema WCDMA con un satélite GEO para proporcionar cobertura a los aviones que sobrevuelan el continente europeo, en la banda de 6 GHz de frecuencia y un radio de cobertura por celda de 500 Km., es de 8820 aviones con una ganancia de antena del avión de 20 dB., una potencia de transmisión del satélite de 70 W, y una potencia del Terminal del avión de 4 W.

Para radios de cobertura mayores necesitamos una ganancia de la antena del avión mayor.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Para radios de cobertura de 450 Km. por celda y menores, necesitamos menor ganancia de la antena del avión y menor potencia de transmisión y obtenemos mejores resultados. Para años futuros, cuando la tecnología de los satélites GEO permita un mayor número de celdas, se podría usar esta configuración para obtener más usuarios.

En la actualidad si se requiere una mayor capacidad, bastaría con aumentar la potencia de transmisión en cada enlace. Las tablas con los valores de la capacidad para distintos valores de potencia y ganancia de la antena del avión, vienen representados en el Anexo B.

5.5.4.4 Estudio para una frecuencia de 8 GHz.

5.5.4.4.1 Datos específicos para 8 GHz.

Datos en uplink:

- $f_{uplink} = 7.996$ GHz.
- $P_{tx.avión} = 4 - 9$ W. en intervalos de 1 W.
- $G_{ant.avión} = 16, 18, 20, 22, 24,$ y 26 dB .

Datos en downlink:

- $f_{downlink} = 8.186$ GHz.
- $P_{tx.satélite} = 40 - 100$ W/Celda. en intervalos de 10 W.
- $G_{ant.avión} = 16.2, 18.2, 20.2, 22.2, 24.2,$ y 27.2 dB..

A partir de estos datos se realizan una serie de simulaciones para hallar la capacidad óptima.

5.5.4.4.2 Diagrama de radiación de la antena del satélite

5.5.4.4.2.1 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 7.996 GHz.

En la **Figura 5.54** se muestra el diagrama de radiación de la antena del satélite para uplink.

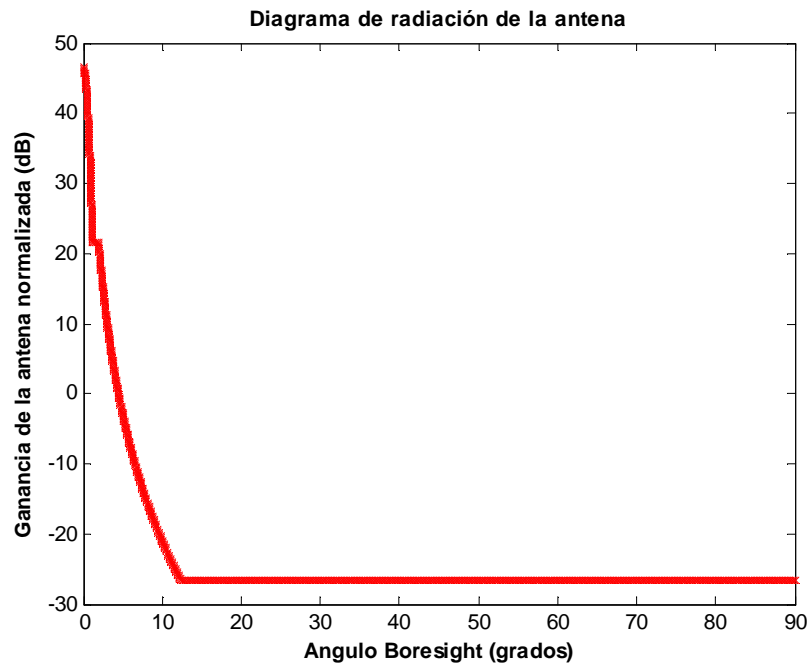


Figura 5.54 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 7.996 GHz.

5.5.4.4.2.2 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 8.186 GHz

En la **Figura 5.55** se muestra el diagrama de radiación de la antena del satélite para downlink.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

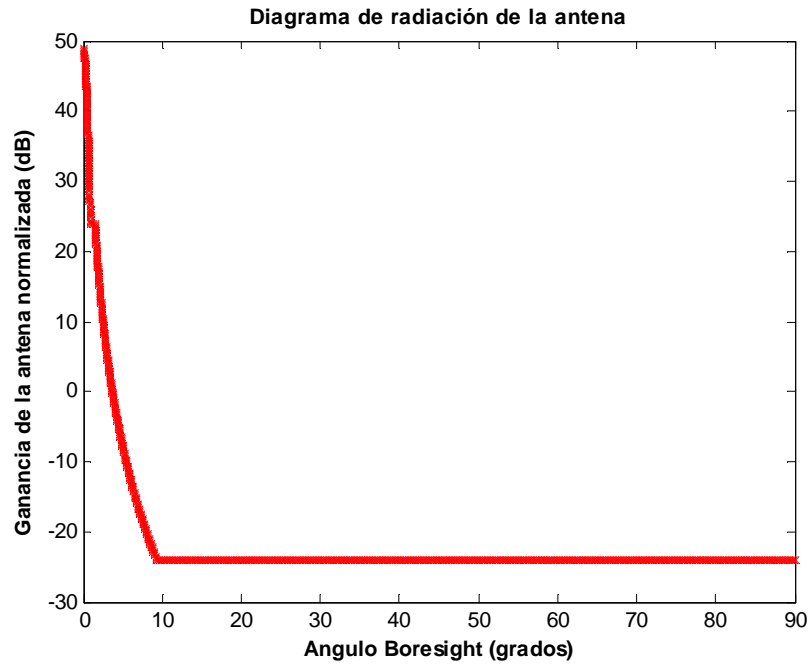


Figura 5.55 Diagrama de radiación de la antena del satélite para 8.186 GHz.

5.5.4.4.3 Simulaciones para la banda de 8 GHz.

En este apartado se realiza el estudio de la capacidad de un sistema WCDMA en la banda de 8 GHz, para distintos valores de la potencia de transmisión y la ganancia de la antena del avión.

5.5.4.4.3.1 Simulaciones para en uplink

La muestra la capacidad para una ganancia de la antena del avión de 20 dB. y los valores de potencia mostrados en la **Figura 5.56**.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

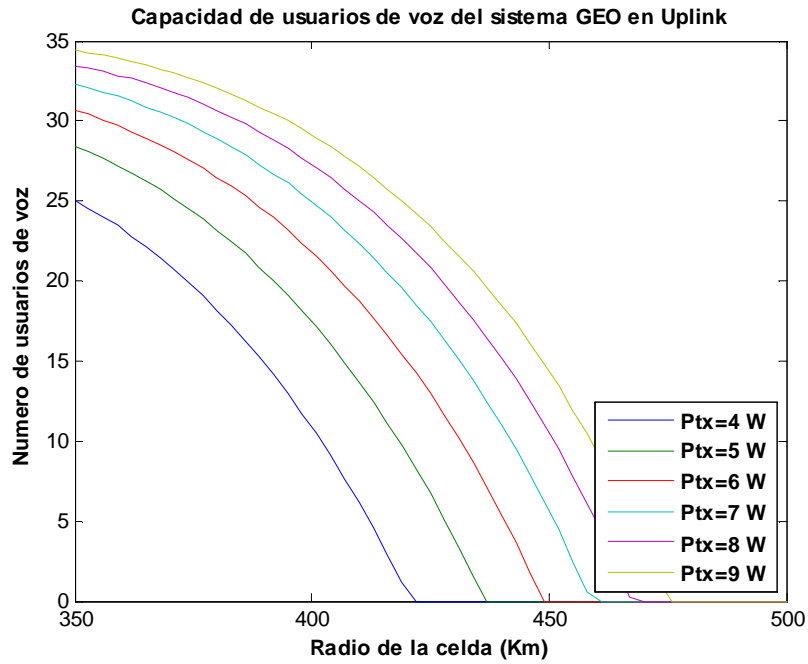


Figura 5.56 Capacidad para una ganancia del avión de 20 dB y distintos valores de potencia para 7.996GHz.

El máximo de la capacidad se encuentra en 350 Km. de radio celular. En este caso, el radio de cobertura deseado se encuentra entre 350 y 400Km., ya que en 500 Km. No se obtienen buenos resultados.

Analizamos resultados para los distintos valores de potencia y de ganancia expuestos en el apartado 5.5.4.4.1, para un radio de 400 Km.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

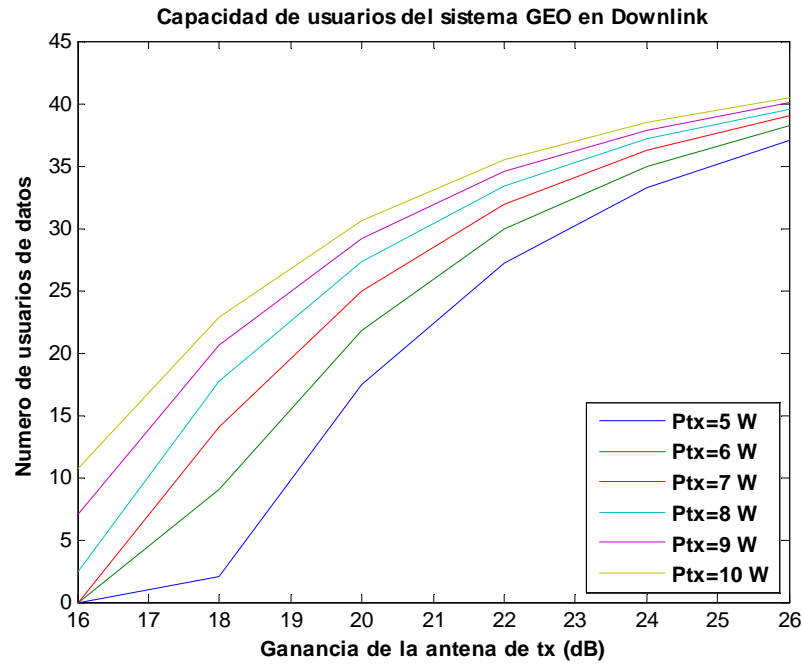


Figura 5.57 Capacidad en función de la ganancia de la antena del avión y de la potencia transmitida en 400Km de radio celular para 7.996 GHz.

Los mejores resultados para este enlace se muestran a continuación en la **Tabla 5.28**. Se han ajustado los valores para que la capacidad se encuentre entre 7500 y 12000 usuarios. Se requiere proporcionar servicio a 5500 aviones como mínimo, pero se contempla una posible subida del número de vuelos para años futuros, por tanto un aumento de la capacidad. Esto se tiene en cuenta ajustando los parámetros de potencia y ganancia para un número mayor de usuarios.

Tabla 5.28 Capacidad y número de celdas para distintos radios celulares para 7.996 GHz.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|-------|------|------|------|
| Radio | 350 | 400 | 450 | 500 |
| Nceldas | 90 | 64 | 56 | 42 |
| Nusu/celda | 13 | 13 | 15 | 18 |
| Nusuarios total/simultáneos | 1170 | 832 | 840 | 756 |
| Nusuarios total (Factividad total=10%) | 11700 | 8320 | 8400 | 7560 |
| Ptx transmitida (W) | 6 | 7 | 6 | 9 |
| Gantena avión (dB) | 16 | 18 | 22 | 24 |

Según la **Tabla 5.28**, con un radio de cobertura de 400 Km, obtenemos una capacidad de 8320 aviones con 7 W de potencia y 18 dB de ganancia de la antena del avión.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

5.5.4.4.3.2 Simulaciones en downlink

La muestra la capacidad para una ganancia de la antena del avión de 20.2 dB. y los valores de potencia mostrados en la **Figura 5.58**.

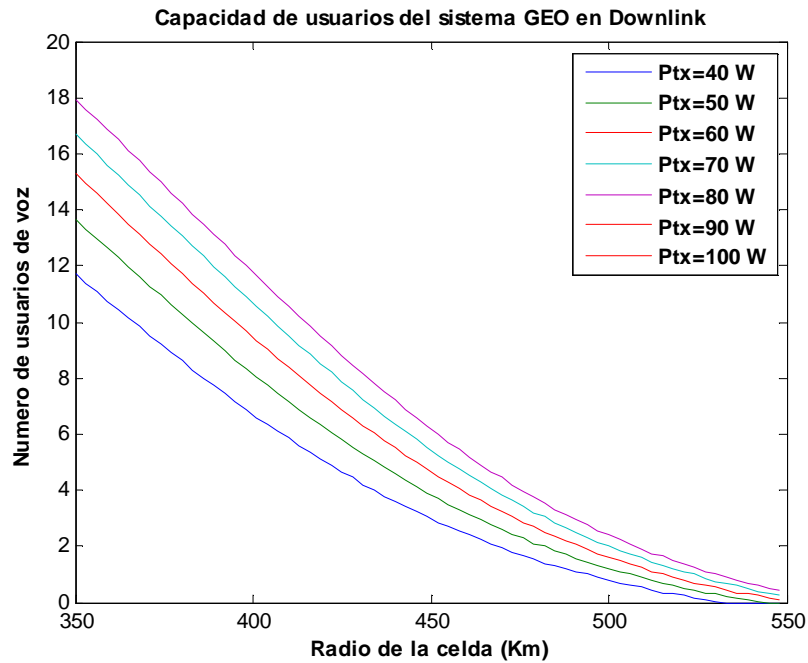


Figura 5.58 Capacidad para una ganancia del avión de 20 dB y distintos valores de potencia para 8.186GHz.

El máximo de la capacidad se encuentra en 350Km. de radio celular y después empieza a decrecer.

Analizamos resultados para los distintos valores de potencia y de ganancia expuestos en el **apartado 5.5.4.4.1** en un radio de cobertura de 400Km. por celda.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

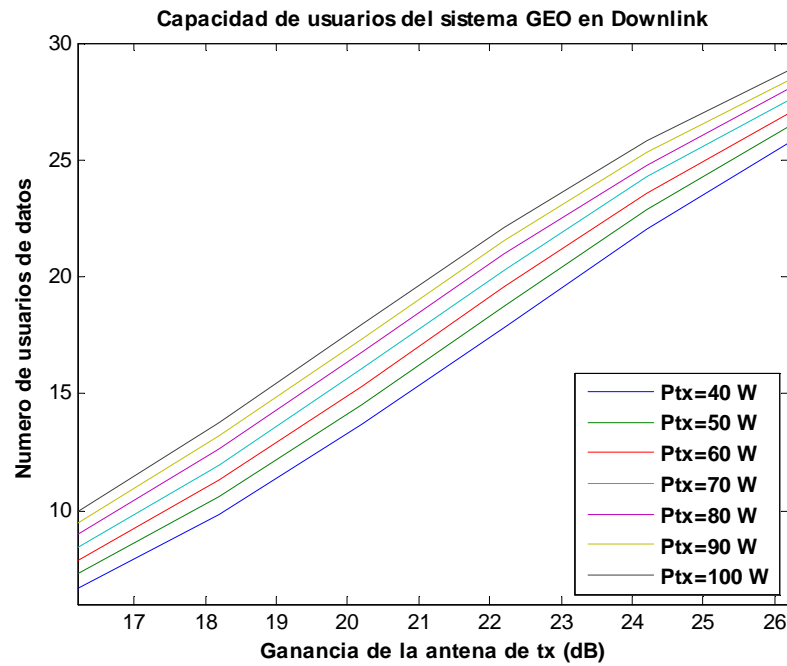


Figura 5.59 Capacidad en función de la ganancia de la antena del avión y de la potencia transmitida en 400Km de radio celular para 8.186GHz.

Los mejores resultados para este enlace se muestran a continuación en la **Tabla 5.29**. Se han ajustado los valores para que la capacidad se encuentre entre 6000 y 10000 usuarios.

Tabla 5.29 Capacidad y número de celdas para distintos radios celulares para 8.186 GHz.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|------|------|------|------|
| Radio | 350 | 400 | 450 | 500 |
| Nceldas | 90 | 64 | 56 | 42 |
| Nusu/celda | 11 | 13 | 14 | 15 |
| Nusuarios total/simultáneos | 990 | 832 | 784 | 630 |
| Nusuarios total (Factividad total: | 9900 | 8320 | 7840 | 6300 |
| Ptx transmitida (W/Celda) | 100 | 100 | 100 | 160 |
| Gantena avión (dB) | 16,2 | 20,2 | 24,2 | 26,2 |

Según la **Tabla 5.29** obtenemos una capacidad de 8320 aviones con 100 W de potencia y 20.2 dB de ganancia de la antena del avión.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

5.5.4.4.4 Resultados comunes de la capacidad para uplink y downlink en 8 GHz.

Como bien es sabido, la ganancia de la antena del avión debe ser la misma para ambos enlaces (con una diferencia de 0.2 dB debido a la frecuencia de cada enlace). A continuación se muestra la capacidad para resultados compatibles entre el uplink y el downlink.

5.5.4.4.4.1 Resultados en uplink

La **Figura 5.60** muestra la capacidad compatible con el enlace descendente.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|-------|-------|-------|------|
| Radio | 350 | 400 | 450 | 500 |
| Nceldas | 90 | 64 | 56 | 42 |
| Nusu/celda | 13 | 17 | 22 | 19 |
| Nusuarios total/simultáneos | 1170 | 1088 | 1232 | 798 |
| Nusuarios total (Factividad total=10%) | 11700 | 10880 | 12320 | 7980 |
| Ptx transmitida (W) | 6 | 5 | 5 | 6 |
| Gantena avión (dB) | 16 | 20 | 24 | 26 |

Figura 5.60 Capacidad en 7.996 GHz con resultados compatibles con downlink.

5.5.4.4.4.2 Resultados en downlink

La **Figura 5.61** muestra la capacidad compatible con el enlace descendente.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|-------|------|------|------|
| Radio | 350 | 400 | 450 | 500 |
| Nceldas | 90 | 64 | 56 | 42 |
| Nusu/celda | 13 | 13 | 14 | 15 |
| Nusuarios total/simultáneos | 1170 | 832 | 784 | 630 |
| Nusuarios total (Factividad total=10%) | 11700 | 8320 | 7840 | 6300 |
| Ptx transmitida (W/Celda) | 60 | 40 | 40 | 100 |
| Gantena avión (dB) | 16,2 | 20,2 | 24,2 | 26,2 |

Figura 5.61 Capacidad en 8.186 GHz para downlink con resultados compatibles con uplink.

5.5.4.4.5 Conclusiones para la banda de 8 GHz.

La capacidad para el sistema WCDMA con un satélite GEO para proporcionar cobertura a los aviones que sobrevuelan el continente europeo, a 8 GHz de frecuencia y un radio de cobertura por celda de 400 Km., es de 8320 aviones simultáneos, con una ganancia de antena de 20 dB., una potencia de transmisión del satélite de 40 W, y una potencia del Terminal del avión de 5 W.

5. Sistemas WCDMA con satélites GEO

Para radios de 500 Km. y superiores, la potencia y la ganancia del avión debe ser bastante elevada para una buena capacidad. No obstante actualmente se podría obtener una constelación así, puesto que el número de celdas por satélite es menor de 50.

Para radios de cobertura de 450 Km. por celda y menores, necesitamos menor ganancia de la antena del avión y menor potencia de transmisión para obtener mejores resultados. No obstante, el número de celdas por satélite necesarios son demasiados para la tecnología actual. En la actualidad las celdas solares tienen una eficiencia de un 39% y suministran una potencia de alrededor de 30 KW. Esta potencia es suficiente para 50 TWT (50 celdas por satélite) a 180 W en el enlace descendente. Para años futuros, cuando la tecnología de los satélites GEO permita un mayor número de celdas por satélite, se podrían usar configuraciones de estas características para obtener más usuarios.

En la actualidad si se requiere una mayor capacidad, bastaría con aumentar la potencia de transmisión en cada enlace. Las tablas con los valores de la capacidad para distintos valores de potencia y ganancia de la antena del avión, vienen representados en el Anexo B

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS ABIERTAS DE INVESTIGACIÓN

6.1 Conclusiones finales

Una vez realizado el estudio en profundidad del sistema WCDMA por satélite, estamos en condiciones de sacar unas conclusiones globales acerca de la tecnología y su funcionamiento con las distintas modalidades de satélites de comunicaciones.

WCDMA es una tecnología de espectro ensanchado diseñada para comunicaciones multimedia, con ella las comunicaciones persona a persona pueden ser enriquecidas con imágenes de alta calidad y vídeo, además la velocidad de acceso a los servicios será mayor. La señal se digitaliza, se codifica y se extiende por una ventana de 5 MHz., esto desemboca en códigos más veloces y mayor ganancia de procesado. Sus especificaciones han sido creadas en 3GPP (the 3rd Generation Partnership Project).

WCDMA abre a nuevas oportunidades de negocio, no sólo para los operadores, sino también para los proveedores de contenidos y aplicaciones.

Con las comunicaciones por satélite podemos comunicar lugares muy alejados, o que previamente eran inaccesibles, como por ejemplo un barco que se encuentra en medio del océano, además de la cantidad y variedad de información que pueden transmitir.

Los satélites LEO y MEO son satélites de órbita baja e intermedia respectivamente, estos satélites no tienen el mismo periodo que el de rotación de la Tierra, por lo que no parecen fijos desde un punto de la superficie de ésta. No obstante proporcionan una serie de ventajas como menores pérdidas de propagación y pequeños retardos. Introducen también el concepto de constelación de satélites, que permiten dar servicio de telefonía celular y radiolocalización mundial a cualquier punto del planeta. Las constelaciones de satélites consisten en la cobertura total de la Tierra a través de un número definido de satélites que la rodean, con ellas conseguimos los conceptos de Anywhere (en cualquier lugar) y Anytime (en cualquier momento).

6. Conclusiones y líneas abiertas de investigación

El comportamiento de la tecnología WCDMA con satélites LEO, depende de la configuración que se utilice en ellos. Por lo general se consigue capacidad del orden de los 50 usuarios de voz o 9 de datos simultáneamente para un radio de cobertura de 414 Km., esto unido a su pequeño retardo de propagación por la cercanía de estos satélites a la Tierra, y a que sus pérdidas por el espacio libre son menores, sitúan a los satélites LEO como una buena opción para sistemas de emergencia, tanto marítimos como terrestres. Una desventaja de estos sistemas es el elevado número de satélites que se necesitan para cobertura global, no obstante se debe mantener un compromiso entre la altura a la que se sitúan estos satélites y el número mínimo de ellos que se deben emplear, para utilizar un número de satélites coherente.

En el caso de satélites MEO, el comportamiento de la tecnología WCDMA no es precisamente bueno, más bien todo lo contrario. Aunque su principal ventaja es el uso de un número menor de satélites que los LEO para cobertura global, su funcionamiento con los sistemas WCDMA no es recomendable. Sus altas pérdidas de propagación debido a la distancia que debe recorrer la señal provoca que los niveles recibidos de SNR sean bajos, esto deriva en una capacidad muy baja. Entre los satélites MEO hemos diferenciado distintos tipos según la altura a la que se encuentran, MEO altos, MEO medios y MEO bajos. De entre estos, los MEO bajos, a una altura de alrededor de 2000 Km., son los que proporcionan mayor capacidad, y ésta es del orden de 20 usuarios para un radio de cobertura de 662 Km., un resultado bastante peor que el obtenido con satélites LEO.

El caso de satélites geoestacionarias es distinto al de los anteriores. Los satélites geoestacionarios siguen el mismo periodo que el de rotación terrestre, por lo que parecen fijos vistos desde un punto fijo de la Tierra. Esto genera muchas ventajas, no se necesitan sistemas de seguimiento y con un solo satélite se puede dar cobertura a una zona específica de la Tierra (como se mostró en el caso de Europa). Otra gran ventaja es que con un sólo satélite se puede dar cobertura casi a un tercio del planeta, por lo que no el número de satélites y lanzamientos para cobertura global disminuye considerablemente. Los terminales de usuarios ya no serán tan móviles como en el caso de los LEO y los MEO, puesto que necesitan antenas con mayor ganancia y terminales con más potencia, debido a la para numerosos servicios. En cuanto al comportamiento de la tecnología WCDMA con satélites GEO, se obtiene una capacidad de alrededor de 66 usuarios de voz o 10 de datos simultáneos en un radio de cobertura

6. Conclusiones y líneas abiertas de investigación

de 1600 Km. Debido a su característica principal de periodo de rotación, como se ha dicho antes, se puede dar cobertura específica a casi cualquier zona de la superficie terrestre habitada, muy útil para casos de emergencia en zonas inaccesibles por el cableado terrestre, como sistemas marítimos, aéreos y montañosos.

Para los tres tipos de satélites los factores que mejoran la capacidad del sistema, al aumenta el factor son: la potencia de transmisión y la ganancia de las antenas. Los que empeoran la capacidad son la altura de los satélites (en el caso de LEO y MEO), el factor de ruido de los terminales y el radio de cobertura celular.

6.2 Líneas abiertas de investigación

Aunque a medida que ha ido avanzando el proyecto se ha intentado avarcar posibles resultados para futuras tecnologías de satélites, a continuación se enunciarán una serie de líneas de investigación del sistema WCDMA por satélite:

- Maduración de la tecnología satelital en potencia, capacidad y vida útil.
- Maduración de los terminales usuario, ganancia de sus antenas y potencia.
- Avances tecnológicos en células solares.
- Uso de bandas de frecuencia de mayor ancho de banda (como la banda **Ka**) para la obtención de sistemas de muy alta velocidad.
- Realizar el mismo estudio que hemos desarrollado en este proyecto. Teniendo en cuenta que las celdas que forman la red de comunicaciones, no tienen el mismo tamaño.

REFERENCIAS

- [1] Miguel Calvo Ramón, Vicente Burilo Martínez, Leandro de Haro Ariet, José M^a Hernando Rábanos “Sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación IMT-2000 (UMTS)”, Fundación Airtel Vodafone, 2002.
- [2] José María Hernando Rábanos, “Comunicaciones móviles”, segunda edición.
- [3] Harri Holma, and Antti Toskala, “WCDMA For UMTS Radio Access For Third Generation Mobile communications”, John Wiley & Sons, Ltd 2000.
- [4] Daniel Boudreau, Giuseppe Caire, Giovanni Emanuele Corazza, Riccardo de Gaudenzi, Gennaro Gallinaro, Michele Lugio, R. Lyons, Javier Romero-García, A. Venucci, and Hanspeter Widmer, “Wide-Band CDMA for the UMTS/IMT-2000 Satellite Component”, IEEE Transactions on vehicular technology, Vol. 51, No. 2, March 2002.
- [5] Bazil Taha Ahmed, Miguel Calvo Ramón, Leandro de Haro-Ariet, “On the High Altitude Platform (HAP) W-CDMA System Capacity”, Departamento Sistemas, Señales y Radiocomunicaciones, ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid.
- [6] Tae Chul Hong, Bon Jun Ku, Jon Min Park, Do-Seob Ahn, and Yoon-Sik Jang, “Capacity of the WCDMA System Using High Altitude Platform Stations”, International Journal of Wireless Information Networks, Vol. 13. No. 1, January 2006 (©2005).
- [7] Bazil Taha Ahmed, Miguel Calvo Ramón, and Leandro Haro Ariet, “LEO Satellite W-CDMA Downlink Pole Capacity”, Departamento Sistemas, Señales y Radiocomunicaciones, ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid.
- [8] Bandas de frecuencias para IMT-2000. www.sertec.com, “Los sistemas satelitales dentro del modelo de comunicación UMTS”.
- [9] Miguel Calvo Ramón, Ramón martínez Rodríguez-Osorio, Antonio García Pino, “Comunicaciones por Satélite”, Fundetel, ETSIT-UPM, 1^a Edición 2003.
- [10] Rodolfo Neri Vela, “Comunicaciones por satélite”, Thomson Editores, S.A., 2003.

Referencias

- [11] Orbital altitudes for satellite constellations.
<http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/constellations/tables/overview.html#alt>
- [12] Bazil Taha Ahmed, Material de la asignatura de “Radiocomunicaciones I”, Universidad Autónoma de Madrid (2008).
- [13] Stylianos Karapantazis, Fotini-Niovi Pavlidou, “Call Admission Control in multiservice high altitude platform (HAP) W-CDMA cellular systems”, February 2007, Greece.
- [14] Spacecraft Solar Array Technology Trenches, P. Alan Jones & Brian R. Spence, AEC-Able Engineering Company, Inc., 93 Castilian Dr., Goleta, CA 93117.
- [15] Información sobre celdas solares, http://www.emcore.com/solar_photovoltaics.
- [16] Información sobre TWTs, http://www.wtec.org/loyola/satcom2/03_05.htm
PROGRESS IN TWTS AND EPCS. *December 1998*.
- [17] Lista de países por superficie,
http://es.wikipedia.org/wiki/Lista_de_pa%C3%ADses_por_superficie.

BIBLIOGRAFÍA

- T. Hule, D. Grace, and A. Mohammed, “WCDMA Uplink Interference Assesment from Multiple High Altitude Configurations”, Hindawi Publishing Corporation, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Volume 2008, Article ID 182042.
- Samir Medina Perlaza, Gustavo Villalobos Caviedes, “Los sistemas satelitales dentro del modelo de comunicaciones móviles de tercera generación”, Universidad de Cauca, Popayán, Agosto 2004.
- K. Sam Shanmugan, “Uplink Capacity of Satellite-based WCDMA Networks”, University of Kansas.
- Darren D. Chang and Olivier L. De Weck, “Basic Capacity calculation Methods and benchmarking for MF-TDMA and MF-CDMA communication satellites”, International Journal os Satellite Communications and Networking, Int. J. Satell. Commun. Network, 2005; 23:153-171.
- Luis Mendo, Material de la Asignatura de “Comunicaciones Móviles”, Universidad Autónoma de Madrid (2008)
- Manual Matlab, “Mapping Toolbox 2.1”
- Leonid Goloovanevsky, Ganesh Pattabiraman, Kedar Tacar, Dr. Rao Yallapragada, “Globalstar Link Verification”, Qualcomm Inc., San Diego, CA.
- “Introducción a la Red de Comunicaciones personales”, Trabajos Univeridad Politécnica de Valencia.
- Eduardo Vera, “Sistemas de Comunicaciones Móviles por Satélite”, USB, El Marqués Caracas.
- “Comunicaciones Vía Satélite, Hoy”, www.uspm.edu.pe/publicaciones/boletin/fia/info18/satelites.htm.
- “LEO, Satélites de órbita baja”, Universidad Politécnica de Valencia.
- Información general, <http://es.wikipedia.org/>.
- Información sobre satélites, <http://www.monografias.com>.
- Información sobre satélites, <http://www.upv.es/satelite>.
- The SCARLET™ ARRAY, FOR HIGH POWER GEO SATELLITES. Brian R. Spence, P. Alan Jones, Mike I. Eskenazi, David M. Murphy, AEC-Able Engineering Company, Inc. 93 Castilian Drive, Goleta, CA 93117

GLOSARIO

| | |
|-----------------|---|
| 2G | Telefonía móvil de segunda generación. |
| 2.5G | Telefonía móvil intermedia entre la segunda y tercera generación. |
| 3G | Telefonía móvil de tercera generación. |
| 3GPP | Third Generation Partnership Project. |
| Anykind | Cualquier tipo. |
| Anytime | En cualquier momento. |
| Anywhere | En cualquier lugar. |
| BLER | Calidad deseada de la señal. |
| BS | Base Station. |
| CDMA | Code Division Multiple Access. |
| CN | Core Network. |
| DECT | Digital Enhanced Cordless Telecommunications. |
| DTH | Direct to Home. |
| DVB | Digital Video Broadcasting. |
| Downlink | Enlace descendente (DL). |
| ETSI | Escuela Técnica Superior de Ingenieros. |
| FDD | Frequency Division Duplex. |
| GEO | Geostationary Earth Orbit. |
| GSM | Global System for Mobile Communications. |
| IMT-2000 | International Mobile Communications 2000. |
| IMT-DS | IMT Direct Sequence (WCDMA). |
| IMT-FT | Frequency Time (DECT+). |
| IMT-MC | IMT Multicarrier (CDMA2000). |
| IMT-SC | IMT Single Carrier (TDD). |
| IMT-TC | IMT Time Code (TD-CDMA). |
| IP | Internet Protocol. |
| ISI | Inerferencia entre símbolos. |
| ITU-R | International Telecommunication Union. |
| LEO | Low Herat Orbit. |
| LOS | Line Of Sight. |

Glosario

| | |
|---------------|--|
| Matlab | Programa con el que las simulaciones son realizadas. |
| Mbps | Megabits por segundo. |
| MEO | Medium Herat Orbit. |
| MSS | Mobile Satellite Service. |
| QoS | Calidad de Servicio. |
| PCN | Personal Communications Network. |
| RAKE | Receptor diseñado para para paliar los efectos de la dispersión multicamino. |
| RNS | Radio Network Servidce. |
| S-PCN | Satélite Personal Communications Networks |
| S-UMTS | Satellite UMTS. |
| SHO | Soft/softer Handover, Traspaso con continuidad. |
| SIR | Signal to Interferente Ratio. |
| SINR | Signal to Interference and Noise Ratio. |
| SNR | Signal to Noise Ratio. Relación señal a ruido. |
| T-UMTS | Terrestrial UMTS. |
| TDD | Time Division Duplex. |
| TDMA | Time Division Multiple Access. |
| TDMP | Time-Domain Multiplexing of Pilot symbols |
| TIA | Asociación de la Industria de las Telecomunicaciones. |
| UE | User Equipment. |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunication System. |
| Uplink | Enlace ascendente (UL). |
| USIM | Módulo de identidad de servicios de usuario/suscriptor. |
| UTRAN | UMTS Terrestrial Radio Access Network. |
| VHE | Virtual Home Environment. |
| WCDMA | Wide Code Division Multiple Access. |

ANEXOS

Anexo A: Gráficas y figuras para el sistema LEO de 91 celdas

En esta parte de los anexos, vamos a mostrar las figuras de los resultados mostrados en el **Capítulo 3. SISTEMAS WCDMA CON SATÉLITES LEO, sección 3.6. CASO FUTURO: Constelación de 91 celdas por satélite.**

Estos resultados se han obtenido a través de simulaciones en Matlab.

A.1 Gráficas del servicio de voz

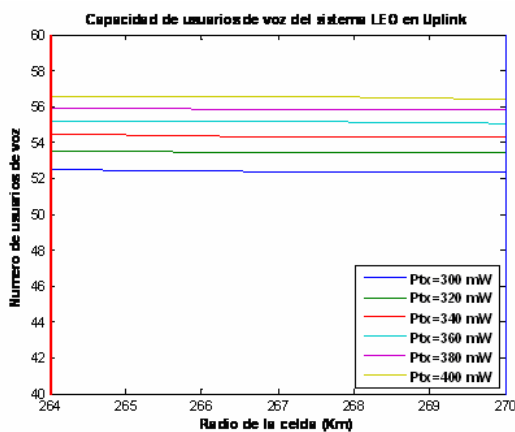


Ilustración 1 Número de usuarios de voz ante distintas potencias en UL

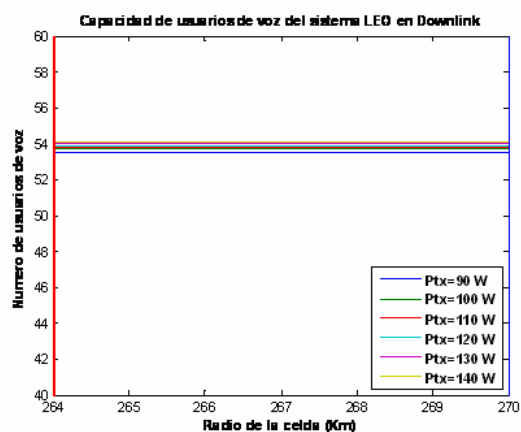


Ilustración 2 Número de usuarios de voz ante distintas potencias en DL

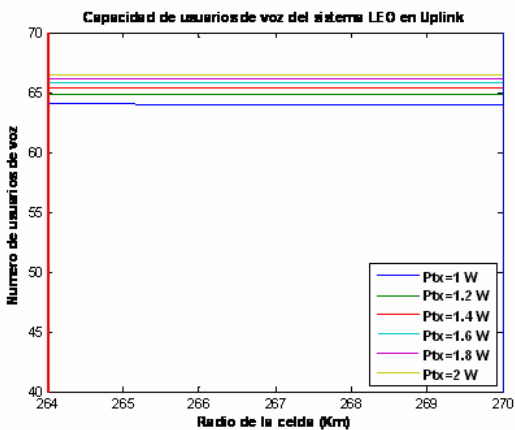


Ilustración 3 Número de usuarios de voz ante potencias muy altas en UL

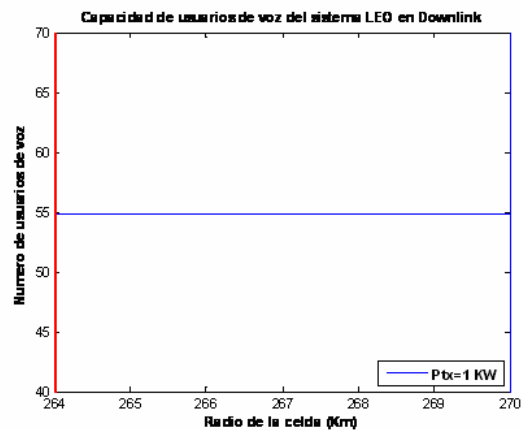


Ilustración 4 Número de usuarios de voz ante potencias muy altas en DL

Figura A.1 Capacidad del sistema LEO 91 para el servicio de voz_parte 1

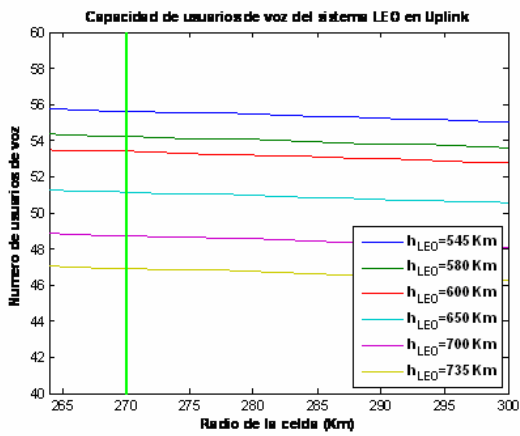


Ilustración 5 Número de usuarios de voz ante distintas alturas en UL.

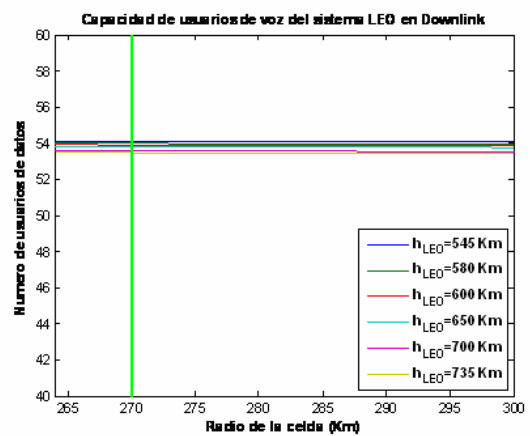


Ilustración 6 Número de usuarios de voz ante distintas alturas en DL.

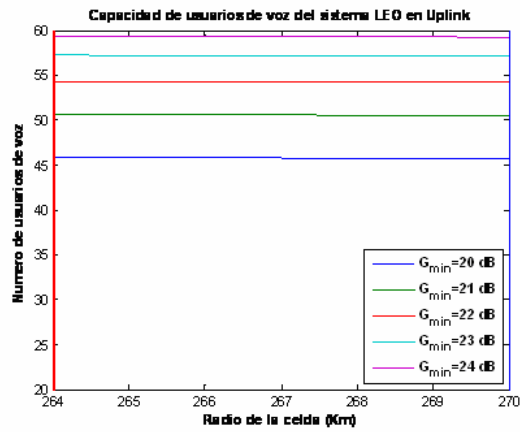


Ilustración 7 Número de usuarios de voz ante distintos valores de G_{min} en UL.

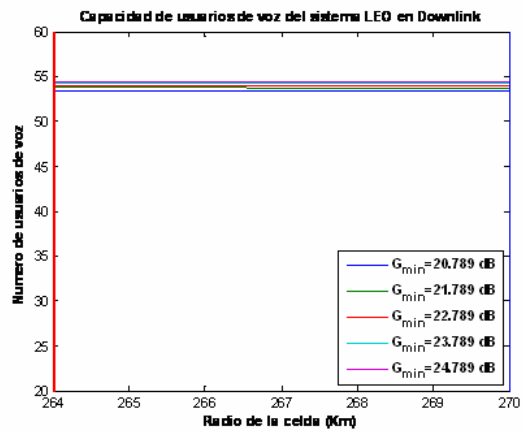


Ilustración 8 Número de usuarios de voz ante distintos valores de G_{min} en DL.

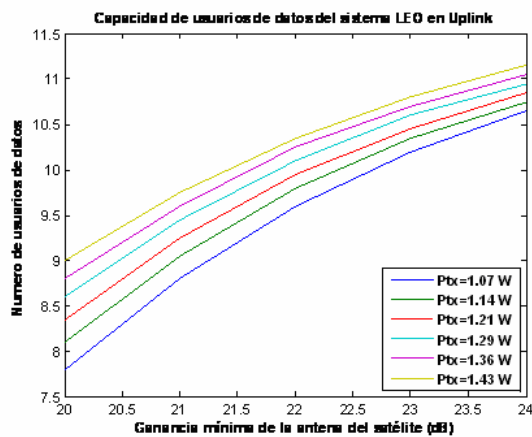


Ilustración 9 Número de usuarios de voz ante distintos valores de G_{min} y de la potencia en UL.

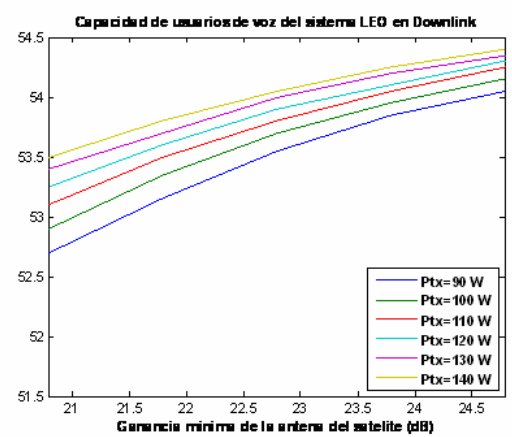


Ilustración 10 Número de usuarios de voz ante distintos valores de G_{min} y de la potencia en DL.

Figura A.2 Capacidad del sistema LEO 91 para el servicio de voz_parte 2

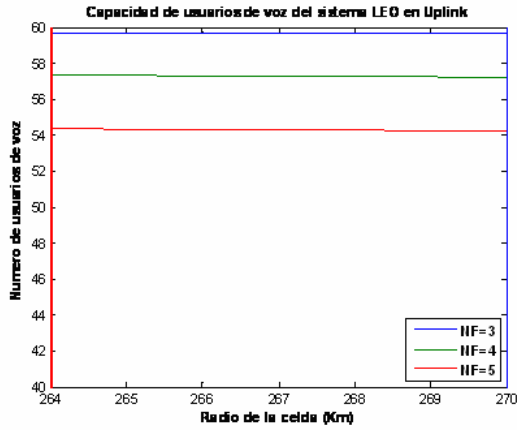


Ilustración 11 Número de usuarios de voz ante distintos valores de NF en UL.

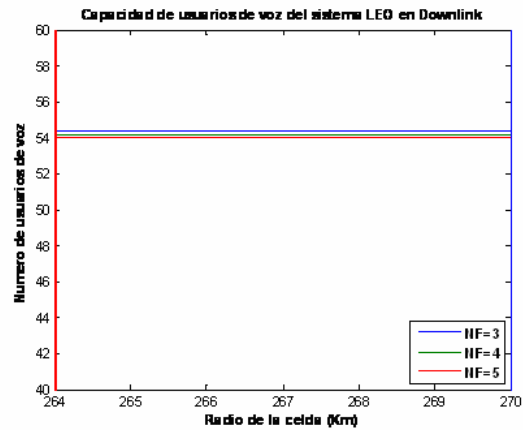


Ilustración 12 Número de usuarios de voz ante distintos valores de NF en DL.

Figura A.3 Capacidad del sistema LEO 91 para el servicio de voz_parte 3

A.2 Gráficas del servicio de datos

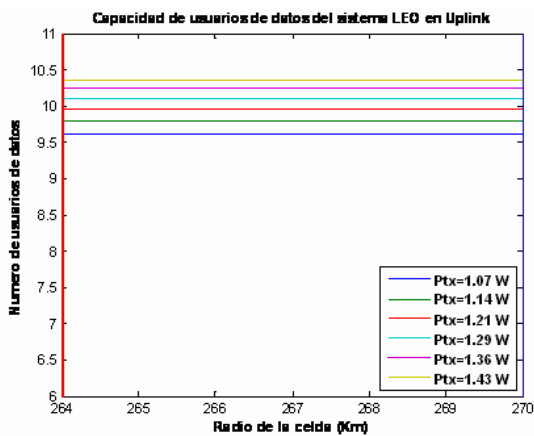


Ilustración 1 Número de usuarios de datos ante distintas potencias en UL.

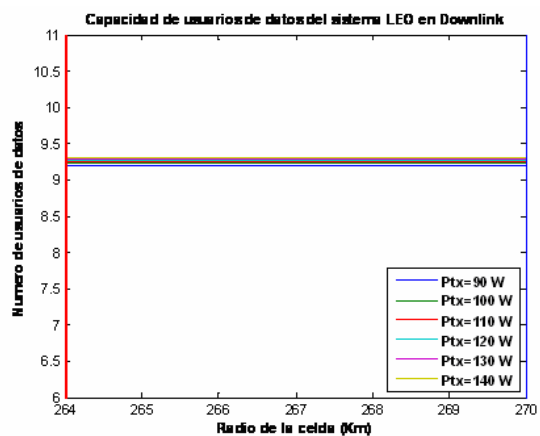


Ilustración 2 Número de usuarios de datos ante distintas potencias en DL.

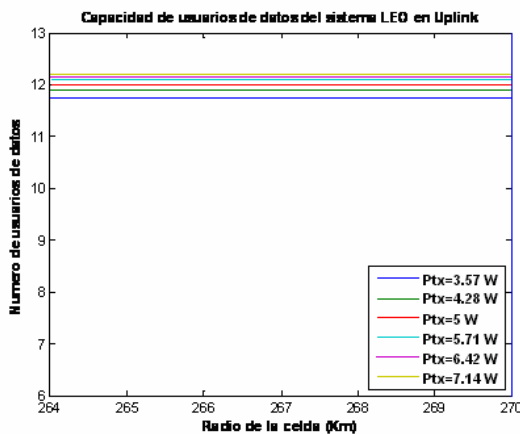


Ilustración 3 Número de usuarios de datos ante potencias muy altas en UL.

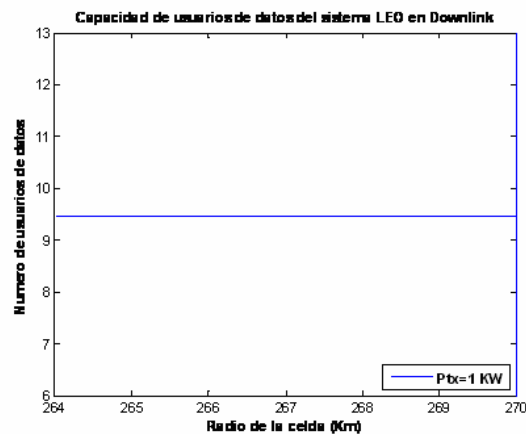


Ilustración 4 Número de usuarios de datos ante potencias muy altas en DL.

Figura A.4 Capacidad del sistema LEO 91 para el servicio de datos_parte 1

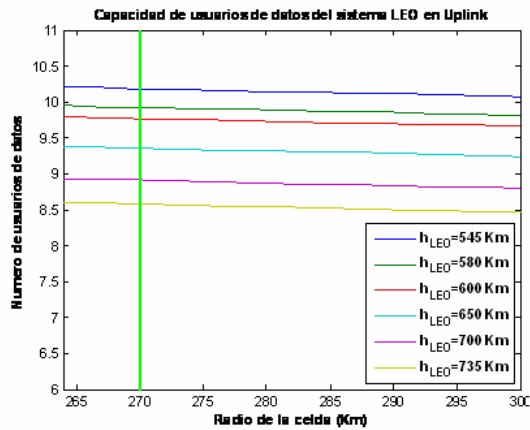


Ilustración 5 Número de usuarios de datos ante distintas alturas en UL.

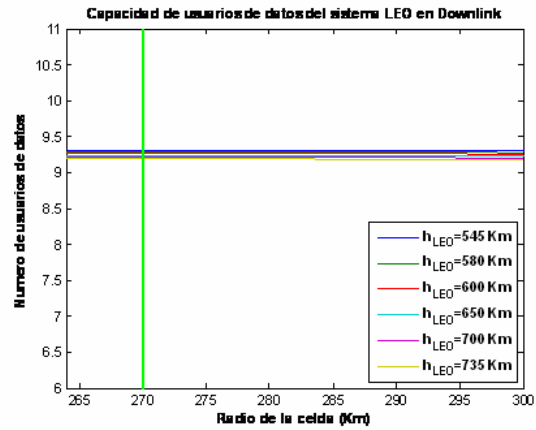


Ilustración 6 Número de usuarios de datos ante distintas alturas en DL.

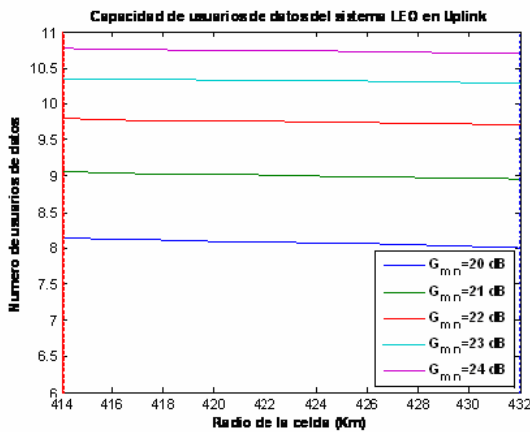


Ilustración 7 Número de usuarios de datos ante distintos valores de G_{min} en UL.

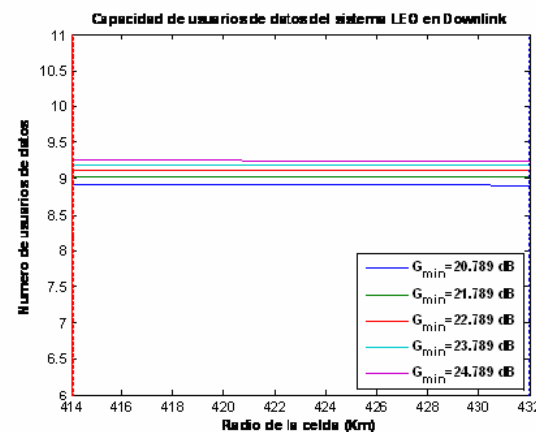


Ilustración 8 Número de usuarios de datos ante distintos valores de G_{min} en DL.

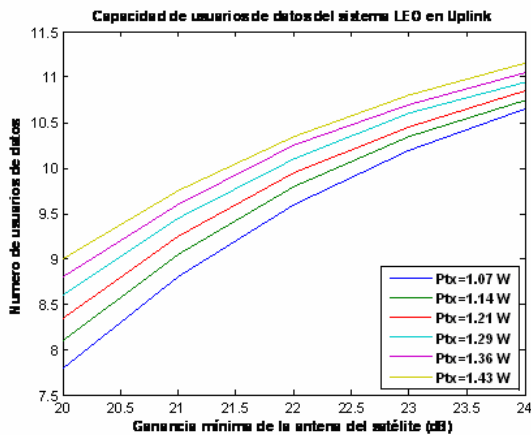


Ilustración 9 Número de usuarios de datos ante distintos valores de G_{min} y de la potencia en UL.

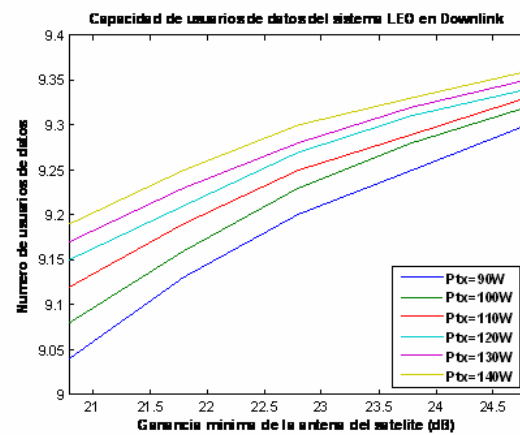


Ilustración 10 Número de usuarios de datos ante distintos valores de G_{min} y de la potencia en DL.

Figura A.5 Capacidad del sistema LEO 91 para el servicio de datos_parte 2

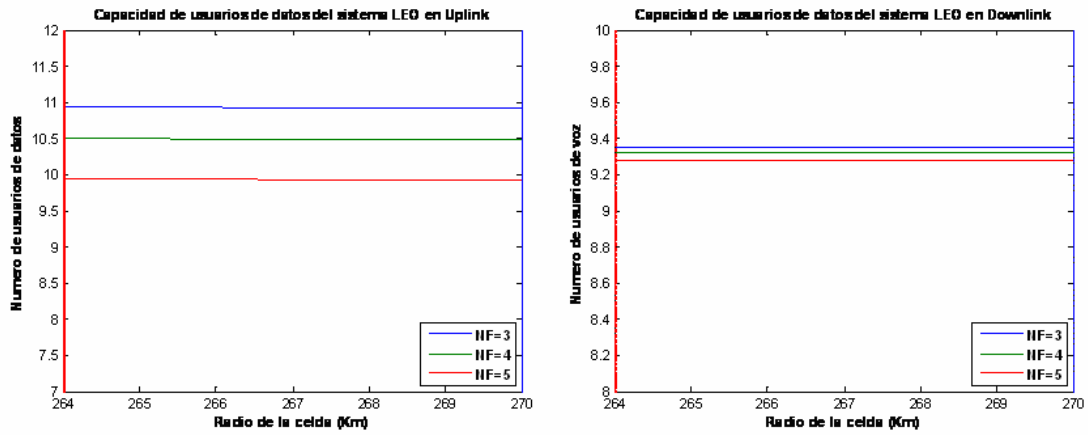


Ilustración 11 Número de usuarios de datos ante distintos valores de NF en UL. Ilustración 12 Número de usuarios de datos ante distintos valores de NF en DL.

Figura A.6 Capacidad del sistema LEO 91 para el servicio de datos_parte 3

A.3 Gráficas de la comparativa entre voz y datos para LEO 91

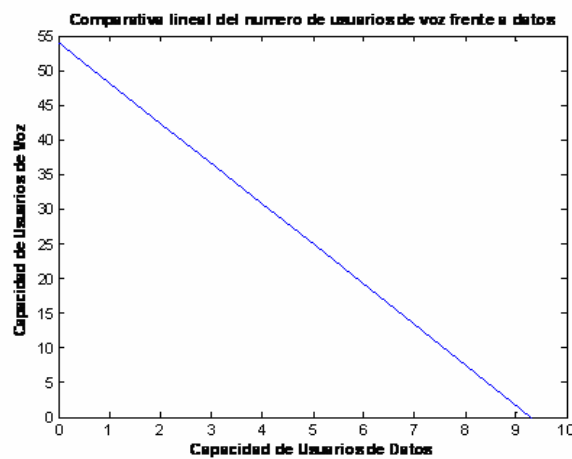


Ilustración 1 Comparativa lineal entre el número de usuarios de voz y datos en DL.

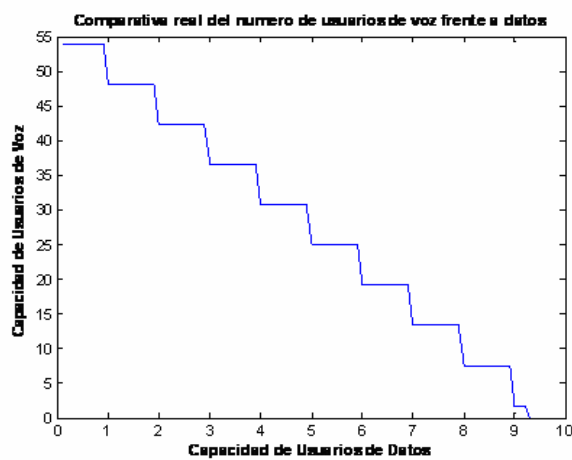


Ilustración 2 Comparativa lineal entre el número de usuarios de voz y datos en DL.

Figura A.7 Gráficas de la comparativa entre voz y datos para LEO 91

Anexo B: Tablas del ejemplo de Europa

En esta segunda parte de los anexos, vamos a mostrar las tablas comparativas de la capacidad en función de distintos valores de la potencia y de la ganancia de la antena del avión, para distintos radios de cobertura y en distintas bandas de frecuencia. De estas tablas se extraen los resultados expuestos en el **Capítulo 5 SISTEMAS WCDMA CON SATÉLITES GEO, sección 5.5 EJEMPLO GEO AVIONES EUROPA.**

Se muestran estas tablas para consulta de resultados no propuestos, así como de los mencionados en el capítulo.

B.1 Tablas comparativas de la capacidad en la banda de 2 GHz.**B.1.1 Tabla de la capacidad en uplink****Tabla B.1** Capacidad para 1.996 GHz.

| CASO | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------|------------|-------|-------|-------|-------|
| Radio | | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ga_usu=16 dB | Nusu P=4 W | 12,34 | 13,40 | 14,48 | 15,58 |
| | Nusu P=5 W | 12,82 | 13,95 | 15,13 | 16,32 |
| | Nusu P=6 W | 13,15 | 14,33 | 15,55 | 16,81 |
| | Nusu P=7 W | 13,38 | 14,59 | 15,86 | 17,16 |
| | Nusu P=8 W | 13,55 | 14,79 | 16,09 | 17,43 |
| | Nusu P=9 W | 13,69 | 14,95 | 16,27 | 17,63 |
| Ga_usu=18 dB | Nusu P=4 W | 13,23 | 14,42 | 15,67 | 16,94 |
| | Nusu P=5 W | 13,54 | 14,78 | 16,07 | 17,41 |
| | Nusu P=6 W | 13,75 | 15,01 | 16,34 | 17,72 |
| | Nusu P=7 W | 13,89 | 15,18 | 16,54 | 17,94 |
| | Nusu P=8 W | 14,00 | 15,30 | 16,68 | 18,11 |
| | Nusu P=9 W | 14,09 | 15,40 | 16,79 | 18,24 |
| Ga_usu=20 dB | Nusu P=4 W | 13,80 | 15,07 | 16,42 | 17,80 |
| | Nusu P=5 W | 14,00 | 15,30 | 16,67 | 18,10 |
| | Nusu P=6 W | 14,12 | 15,44 | 16,84 | 18,30 |
| | Nusu P=7 W | 14,22 | 15,55 | 16,96 | 18,44 |
| | Nusu P=8 W | 14,29 | 15,63 | 17,05 | 18,54 |
| | Nusu P=9 W | 14,34 | 15,69 | 17,12 | 18,62 |
| Ga_usu=22 dB | Nusu P=4 W | 14,16 | 15,48 | 16,89 | 18,35 |
| | Nusu P=5 W | 14,28 | 15,62 | 17,05 | 18,53 |
| | Nusu P=6 W | 14,36 | 15,72 | 17,15 | 18,66 |
| | Nusu P=7 W | 14,42 | 15,78 | 17,23 | 18,75 |
| | Nusu P=8 W | 14,47 | 15,83 | 17,29 | 18,81 |
| | Nusu P=9 W | 14,50 | 15,87 | 17,33 | 18,86 |
| Ga_usu=24 dB | Nusu P=4 W | 14,39 | 15,74 | 17,18 | 18,69 |
| | Nusu P=5 W | 14,46 | 15,83 | 17,29 | 18,81 |
| | Nusu P=6 W | 14,51 | 15,89 | 17,35 | 18,89 |
| | Nusu P=7 W | 14,55 | 15,93 | 17,40 | 18,94 |
| | Nusu P=8 W | 14,58 | 15,96 | 17,44 | 18,98 |
| | Nusu P=9 W | 14,60 | 15,99 | 17,47 | 19,02 |
| Ga_usu=26 dB | Nusu P=4 W | 14,53 | 15,91 | 17,37 | 18,91 |
| | Nusu P=5 W | 14,58 | 15,96 | 17,44 | 18,98 |
| | Nusu P=6 W | 14,61 | 16,00 | 17,48 | 19,03 |
| | Nusu P=7 W | 14,63 | 16,03 | 17,51 | 19,07 |
| | Nusu P=8 W | 14,65 | 16,05 | 17,53 | 19,09 |
| | Nusu P=9 W | 14,66 | 16,06 | 17,55 | 19,11 |

B.1.2 Tabla de la capacidad downlink

Tabla B.2 Capacidad para 2.186 GHz.

| CASO | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| Radio | | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Ga_usu=16.789 dB | Nusu P=40W | 22,70 | 22,20 | 21,60 | 20,95 |
| | Nusu P=50W | 24,55 | 24,05 | 23,50 | 22,90 |
| | Nusu P=60W | 25,95 | 25,50 | 25,00 | 24,40 |
| | Nusu P=70W | 27,00 | 26,60 | 26,15 | 25,60 |
| | Nusu P=80W | 27,90 | 27,50 | 27,05 | 26,55 |
| | Nusu P=90W | 28,60 | 28,25 | 27,85 | 27,35 |
| | Nusu P=100W | 29,20 | 28,90 | 28,50 | 28,05 |
| Ga_usu=18.789 dB | Nusu P=40W | 26,35 | 25,90 | 25,40 | 24,85 |
| | Nusu P=50W | 27,85 | 27,45 | 27,00 | 26,50 |
| | Nusu P=60W | 28,95 | 28,60 | 28,20 | 27,75 |
| | Nusu P=70W | 29,75 | 29,45 | 29,10 | 28,65 |
| | Nusu P=80W | 30,45 | 30,15 | 29,80 | 29,40 |
| | Nusu P=90W | 30,95 | 30,70 | 30,40 | 30,05 |
| | Nusu P=100W | 31,40 | 31,15 | 30,85 | 30,55 |
| Ga_usu=20.789 dB | Nusu P=40W | 29,25 | 28,90 | 28,50 | 28,05 |
| | Nusu P=50W | 30,40 | 30,10 | 29,75 | 29,35 |
| | Nusu P=60W | 31,20 | 30,95 | 30,65 | 30,30 |
| | Nusu P=70W | 31,80 | 31,60 | 31,30 | 31,00 |
| | Nusu P=80W | 32,25 | 32,05 | 31,85 | 31,55 |
| | Nusu P=90W | 32,65 | 32,45 | 32,25 | 32,00 |
| | Nusu P=100W | 32,95 | 32,80 | 32,60 | 32,35 |
| Ga_usu=22.789 dB | Nusu P=40W | 31,40 | 31,20 | 30,90 | 30,55 |
| | Nusu P=50W | 32,25 | 32,05 | 31,80 | 31,50 |
| | Nusu P=60W | 32,80 | 32,65 | 32,45 | 32,20 |
| | Nusu P=70W | 33,25 | 33,05 | 32,90 | 32,70 |
| | Nusu P=80W | 33,55 | 33,40 | 33,25 | 33,05 |
| | Nusu P=90W | 33,80 | 33,70 | 33,55 | 33,35 |
| | Nusu P=100W | 34,00 | 33,90 | 33,75 | 33,60 |
| Ga_usu=24.789 dB | Nusu P=40W | 32,95 | 32,80 | 32,60 | 32,35 |
| | Nusu P=50W | 33,55 | 33,40 | 33,20 | 33,05 |
| | Nusu P=60W | 33,90 | 33,80 | 33,65 | 33,50 |
| | Nusu P=70W | 34,20 | 34,10 | 33,95 | 33,85 |
| | Nusu P=80W | 34,40 | 34,30 | 34,20 | 34,10 |
| | Nusu P=90W | 34,60 | 34,50 | 34,40 | 34,30 |
| | Nusu P=100W | 34,70 | 34,65 | 34,55 | 34,45 |
| Ga_usu=26.789 dB | Nusu P=40W | 34,00 | 33,90 | 33,75 | 33,60 |
| | Nusu P=50W | 34,40 | 34,30 | 34,20 | 34,05 |
| | Nusu P=60W | 34,65 | 34,55 | 34,50 | 34,35 |
| | Nusu P=70W | 34,85 | 34,75 | 34,70 | 34,60 |
| | Nusu P=80W | 34,95 | 34,90 | 34,85 | 34,75 |
| | Nusu P=90W | 35,10 | 35,05 | 34,95 | 34,90 |
| | Nusu P=100W | 35,15 | 35,10 | 35,05 | 35,00 |

B.2 Tablas comparativas de la capacidad en la banda de 4 GHz.**B.2.1 Tabla de la capacidad en uplink.****Tabla B.3** Capacidad para 3.996 GHz.

| CASO | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------|------------|-------|-------|-------|-------|
| Radio | | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | | 50 | 0 | 0 | 0 |
| Ga_usu=16 dB | Nusu P=4 W | 15,23 | 13,46 | 9,53 | 2,59 |
| | Nusu P=5 W | 18,08 | 17,31 | 14,76 | 9,72 |
| | Nusu P=6 W | 19,98 | 19,88 | 18,24 | 14,47 |
| | Nusu P=7 W | 21,33 | 21,71 | 20,73 | 17,86 |
| | Nusu P=8 W | 22,35 | 23,09 | 22,60 | 20,41 |
| | Nusu P=9 W | 23,14 | 24,16 | 24,05 | 22,39 |
| Ga_usu=18 dB | Nusu P=4 W | 20,48 | 20,57 | 19,18 | 15,74 |
| | Nusu P=5 W | 22,28 | 23,00 | 22,48 | 20,24 |
| | Nusu P=6 W | 23,48 | 24,62 | 24,67 | 23,23 |
| | Nusu P=7 W | 24,34 | 25,77 | 26,24 | 25,38 |
| | Nusu P=8 W | 24,98 | 26,64 | 27,42 | 26,98 |
| | Nusu P=9 W | 25,48 | 27,32 | 28,34 | 28,23 |
| Ga_usu=20 dB | Nusu P=4 W | 23,80 | 25,05 | 25,26 | 24,04 |
| | Nusu P=5 W | 24,94 | 26,58 | 27,34 | 26,87 |
| | Nusu P=6 W | 25,69 | 27,60 | 28,73 | 28,76 |
| | Nusu P=7 W | 26,23 | 28,34 | 29,72 | 30,12 |
| | Nusu P=8 W | 26,64 | 28,88 | 30,46 | 31,13 |
| | Nusu P=9 W | 26,95 | 29,31 | 31,04 | 31,92 |
| Ga_usu=22 dB | Nusu P=4 W | 25,89 | 27,88 | 29,10 | 29,27 |
| | Nusu P=5 W | 26,61 | 28,85 | 30,41 | 31,06 |
| | Nusu P=6 W | 27,09 | 29,49 | 31,29 | 32,25 |
| | Nusu P=7 W | 27,43 | 29,95 | 31,92 | 33,11 |
| | Nusu P=8 W | 27,68 | 30,30 | 32,38 | 33,75 |
| | Nusu P=9 W | 27,88 | 30,57 | 32,75 | 34,24 |
| Ga_usu=24 dB | Nusu P=4 W | 27,21 | 29,66 | 31,52 | 32,57 |
| | Nusu P=5 W | 27,67 | 30,27 | 32,35 | 33,70 |
| | Nusu P=6 W | 27,97 | 30,68 | 32,91 | 34,46 |
| | Nusu P=7 W | 28,18 | 30,97 | 33,30 | 34,99 |
| | Nusu P=8 W | 28,34 | 31,19 | 33,60 | 35,40 |
| | Nusu P=9 W | 28,47 | 31,36 | 33,83 | 35,71 |
| Ga_usu=26 dB | Nusu P=4 W | 28,05 | 30,79 | 33,05 | 34,66 |
| | Nusu P=5 W | 28,33 | 31,18 | 33,58 | 35,37 |
| | Nusu P=6 W | 28,52 | 31,43 | 33,92 | 35,84 |
| | Nusu P=7 W | 28,66 | 31,62 | 34,17 | 36,18 |
| | Nusu P=8 W | 28,76 | 31,75 | 34,36 | 36,44 |
| | Nusu P=9 W | 28,84 | 31,86 | 34,50 | 36,64 |

B.2.2 Tabla de la capacidad en downlink.

Tabla B.4 Capacidad para 4.186 GHz.

| CASO | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| Radio | | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Ga_usu=16.4 dB | Nusu P=40W | 15,70 | 13,70 | 11,65 | 9,55 |
| | Nusu P=50W | 17,75 | 15,75 | 13,55 | 11,30 |
| | Nusu P=60W | 19,45 | 17,40 | 15,20 | 12,85 |
| | Nusu P=70W | 20,85 | 18,85 | 16,60 | 14,20 |
| | Nusu P=80W | 22,00 | 20,05 | 17,85 | 15,40 |
| | Nusu P=90W | 23,00 | 21,10 | 18,90 | 16,45 |
| | Nusu P=100W | 23,90 | 22,05 | 19,90 | 17,45 |
| Ga_usu=18.4 dB | Nusu P=40W | 19,95 | 17,90 | 15,70 | 13,30 |
| | Nusu P=50W | 21,90 | 19,95 | 17,75 | 15,30 |
| | Nusu P=60W | 23,45 | 21,60 | 19,40 | 17,00 |
| | Nusu P=70W | 24,70 | 22,95 | 20,80 | 18,40 |
| | Nusu P=80W | 25,75 | 24,05 | 22,00 | 19,65 |
| | Nusu P=90W | 26,60 | 24,95 | 23,00 | 20,70 |
| | Nusu P=100W | 27,30 | 25,75 | 23,90 | 21,65 |
| Ga_usu=20.4 dB | Nusu P=40W | 23,95 | 22,10 | 19,90 | 17,50 |
| | Nusu P=50W | 25,65 | 23,95 | 21,90 | 19,55 |
| | Nusu P=60W | 26,95 | 25,40 | 23,45 | 21,20 |
| | Nusu P=70W | 27,95 | 26,50 | 24,70 | 22,55 |
| | Nusu P=80W | 28,80 | 27,40 | 25,70 | 23,65 |
| | Nusu P=90W | 29,45 | 28,15 | 26,55 | 24,60 |
| | Nusu P=100W | 30,00 | 28,80 | 27,30 | 25,40 |
| Ga_usu=22.4 dB | Nusu P=40W | 27,35 | 25,80 | 23,90 | 21,65 |
| | Nusu P=50W | 28,70 | 27,35 | 25,65 | 23,55 |
| | Nusu P=60W | 29,75 | 28,50 | 26,95 | 25,00 |
| | Nusu P=70W | 30,50 | 29,40 | 27,95 | 26,15 |
| | Nusu P=80W | 31,10 | 30,10 | 28,75 | 27,10 |
| | Nusu P=90W | 31,55 | 30,65 | 29,45 | 27,90 |
| | Nusu P=100W | 31,95 | 31,10 | 30,00 | 28,50 |
| Ga_usu=24.4 dB | Nusu P=40W | 30,00 | 28,85 | 27,35 | 25,45 |
| | Nusu P=50W | 31,05 | 30,05 | 28,70 | 27,05 |
| | Nusu P=60W | 31,75 | 30,90 | 29,70 | 28,20 |
| | Nusu P=70W | 32,30 | 31,50 | 30,50 | 29,10 |
| | Nusu P=80W | 32,75 | 32,00 | 31,10 | 29,85 |
| | Nusu P=90W | 33,05 | 32,40 | 31,55 | 30,40 |
| | Nusu P=100W | 33,35 | 32,75 | 31,95 | 30,90 |
| Ga_usu=26.4 dB | Nusu P=40W | 31,95 | 31,10 | 30,00 | 28,55 |
| | Nusu P=50W | 32,70 | 32,00 | 31,05 | 29,80 |
| | Nusu P=60W | 33,20 | 32,60 | 31,75 | 30,65 |
| | Nusu P=70W | 33,60 | 33,05 | 32,30 | 31,35 |
| | Nusu P=80W | 33,85 | 33,40 | 32,75 | 31,85 |
| | Nusu P=90W | 34,10 | 33,65 | 33,05 | 32,25 |
| | Nusu P=100W | 34,25 | 33,85 | 33,35 | 32,60 |

B.3 Tablas comparativas de la capacidad en la banda de 6 GHz.**B.3.1 Tabla de la capacidad en uplink.****Tabla B.5** Capacidad para 5.996 GHz.

| CASO | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------|------------|-------|-------|-------|-------|
| Radio | | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Ga_usu=16 dB | Nusu P=4 W | 15,63 | 1,22 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=5 W | 20,73 | 9,58 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=6 W | 24,13 | 15,14 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=7 W | 26,56 | 19,12 | 3,85 | 0,00 |
| | Nusu P=8 W | 28,39 | 22,11 | 8,87 | 0,00 |
| | Nusu P=9 W | 29,80 | 24,43 | 12,77 | 0,00 |
| Ga_usu=18 dB | Nusu P=4 W | 25,04 | 16,64 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=5 W | 28,26 | 21,91 | 8,53 | 0,00 |
| | Nusu P=6 W | 30,41 | 25,42 | 14,44 | 0,00 |
| | Nusu P=7 W | 31,94 | 27,93 | 18,67 | 0,35 |
| | Nusu P=8 W | 33,09 | 29,81 | 21,83 | 5,91 |
| | Nusu P=9 W | 33,99 | 31,28 | 24,29 | 10,24 |
| Ga_usu=20 dB | Nusu P=4 W | 30,98 | 26,36 | 16,03 | 0,00 |
| | Nusu P=5 W | 33,02 | 29,69 | 21,62 | 5,54 |
| | Nusu P=6 W | 34,37 | 31,90 | 25,35 | 12,09 |
| | Nusu P=7 W | 35,34 | 33,49 | 28,01 | 16,77 |
| | Nusu P=8 W | 36,06 | 34,67 | 30,01 | 20,28 |
| | Nusu P=9 W | 36,63 | 35,60 | 31,56 | 23,00 |
| Ga_usu=22 dB | Nusu P=4 W | 34,73 | 32,50 | 26,35 | 13,84 |
| | Nusu P=5 W | 36,01 | 34,60 | 29,88 | 20,04 |
| | Nusu P=6 W | 36,87 | 35,99 | 32,23 | 24,17 |
| | Nusu P=7 W | 37,48 | 36,99 | 33,91 | 27,13 |
| | Nusu P=8 W | 37,94 | 37,74 | 35,17 | 29,34 |
| | Nusu P=9 W | 38,29 | 38,33 | 36,15 | 31,06 |
| Ga_usu=24 dB | Nusu P=4 W | 37,10 | 36,37 | 32,86 | 25,28 |
| | Nusu P=5 W | 37,91 | 37,69 | 35,09 | 29,19 |
| | Nusu P=6 W | 38,45 | 38,58 | 36,57 | 31,80 |
| | Nusu P=7 W | 38,83 | 39,21 | 37,63 | 33,66 |
| | Nusu P=8 W | 39,12 | 39,68 | 38,43 | 35,06 |
| | Nusu P=9 W | 39,34 | 40,05 | 39,05 | 36,14 |
| Ga_usu=26 dB | Nusu P=4 W | 38,59 | 38,81 | 36,97 | 32,50 |
| | Nusu P=5 W | 39,10 | 39,65 | 38,37 | 34,96 |
| | Nusu P=6 W | 39,44 | 40,20 | 39,31 | 36,61 |
| | Nusu P=7 W | 39,68 | 40,60 | 39,98 | 37,78 |
| | Nusu P=8 W | 39,87 | 40,90 | 40,48 | 38,67 |
| | Nusu P=9 W | 40,01 | 41,13 | 40,87 | 39,35 |

B.3.2 Tabla de la capacidad en downlink.**Tabla B.6** Capacidad para 6.186 GHz.

| CASO | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| Radio | | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Nceldas | | 56 | 42 | 36 | 30 |
| Ga_usu=16.27 dB | Nusu P=40W | 12,60 | 8,80 | 5,50 | 3,00 |
| | Nusu P=50W | 14,55 | 10,50 | 6,80 | 3,85 |
| | Nusu P=60W | 16,20 | 12,00 | 7,95 | 4,65 |
| | Nusu P=70W | 17,65 | 13,30 | 9,05 | 5,40 |
| | Nusu P=80W | 18,90 | 14,50 | 10,05 | 6,15 |
| | Nusu P=90W | 19,95 | 15,55 | 11,00 | 6,85 |
| | Nusu P=100W | 20,90 | 16,55 | 11,85 | 7,55 |
| Ga_usu=18.27 dB | Nusu P=40W | 16,75 | 12,45 | 8,35 | 4,90 |
| | Nusu P=50W | 18,80 | 14,40 | 10,00 | 6,10 |
| | Nusu P=60W | 20,45 | 16,10 | 11,45 | 7,20 |
| | Nusu P=70W | 21,80 | 17,50 | 12,75 | 8,25 |
| | Nusu P=80W | 22,95 | 18,75 | 13,90 | 9,20 |
| | Nusu P=90W | 23,95 | 19,80 | 15,00 | 10,10 |
| | Nusu P=100W | 24,80 | 20,75 | 15,95 | 10,90 |
| Ga_usu=20.27 dB | Nusu P=40W | 20,95 | 16,60 | 11,90 | 7,55 |
| | Nusu P=50W | 22,90 | 18,65 | 13,85 | 9,10 |
| | Nusu P=60W | 24,40 | 20,30 | 15,50 | 10,50 |
| | Nusu P=70W | 25,55 | 21,70 | 16,90 | 11,75 |
| | Nusu P=80W | 26,55 | 22,85 | 18,15 | 12,90 |
| | Nusu P=90W | 27,35 | 23,80 | 19,20 | 13,95 |
| | Nusu P=100W | 28,00 | 24,65 | 20,15 | 14,90 |
| Ga_usu=22.27 dB | Nusu P=40W | 24,80 | 20,80 | 16,00 | 10,95 |
| | Nusu P=50W | 26,45 | 22,75 | 18,05 | 12,80 |
| | Nusu P=60W | 27,70 | 24,25 | 19,70 | 14,45 |
| | Nusu P=70W | 28,65 | 25,45 | 21,10 | 15,85 |
| | Nusu P=80W | 29,40 | 26,45 | 22,25 | 17,05 |
| | Nusu P=90W | 30,00 | 27,25 | 23,25 | 18,15 |
| | Nusu P=100W | 30,55 | 27,95 | 24,15 | 19,10 |
| Ga_usu=24.27 dB | Nusu P=40W | 28,05 | 24,70 | 20,20 | 14,95 |
| | Nusu P=50W | 29,35 | 26,35 | 22,20 | 16,95 |
| | Nusu P=60W | 30,30 | 27,60 | 23,75 | 18,65 |
| | Nusu P=70W | 31,00 | 28,55 | 24,95 | 20,05 |
| | Nusu P=80W | 31,55 | 29,30 | 25,95 | 21,25 |
| | Nusu P=90W | 32,00 | 29,95 | 26,80 | 22,30 |
| | Nusu P=100W | 32,35 | 30,45 | 27,50 | 23,20 |
| Ga_usu=26.27 dB | Nusu P=40W | 30,55 | 27,95 | 24,15 | 19,15 |
| | Nusu P=50W | 31,50 | 29,25 | 25,90 | 21,20 |
| | Nusu P=60W | 32,15 | 30,20 | 27,15 | 22,75 |
| | Nusu P=70W | 32,65 | 30,90 | 28,15 | 24,05 |
| | Nusu P=80W | 33,05 | 31,50 | 28,95 | 25,10 |
| | Nusu P=90W | 33,35 | 31,90 | 29,60 | 25,95 |
| | Nusu P=100W | 33,60 | 32,30 | 30,15 | 26,70 |

B.4 Tablas comparativas de la capacidad para la banda de 8 GHz.**B.4.1 Tabla de la capacidad en uplink.****Tabla B.7** Capacidad para 7.996 GHz.

| CASO | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| Radio | | 350 | 400 | 450 | 500 |
| Nceldas | | 90 | 64 | 56 | 42 |
| Ga_usu=16 dB | Nusu P=5 W | 8,11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=6 W | 13,73 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=7 W | 17,74 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=8 W | 20,75 | 2,46 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=9 W | 23,10 | 7,05 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=10 W | 24,97 | 10,71 | 0,00 | 0,00 |
| Ga_usu=18 dB | Nusu P=5 W | 20,55 | 2,07 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=6 W | 24,10 | 9,01 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=7 W | 26,63 | 13,96 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=8 W | 28,53 | 17,68 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=9 W | 30,01 | 20,57 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=10 W | 31,19 | 22,88 | 1,32 | 0,00 |
| Ga_usu=20 dB | Nusu P=5 W | 28,40 | 17,43 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=6 W | 30,64 | 21,81 | 0,00 | 0,00 |
| | Nusu P=7 W | 32,24 | 24,94 | 5,61 | 0,00 |
| | Nusu P=8 W | 33,44 | 27,28 | 10,51 | 0,00 |
| | Nusu P=9 W | 34,37 | 29,11 | 14,32 | 0,00 |
| | Nusu P=10 W | 35,12 | 30,57 | 17,37 | 0,00 |
| Ga_usu=22 dB | Nusu P=5 W | 33,36 | 27,13 | 10,18 | 0,00 |
| | Nusu P=6 W | 34,77 | 29,89 | 15,95 | 0,00 |
| | Nusu P=7 W | 35,78 | 31,86 | 20,07 | 0,00 |
| | Nusu P=8 W | 36,53 | 33,34 | 23,16 | 0,00 |
| | Nusu P=9 W | 37,12 | 34,49 | 25,57 | 2,20 |
| | Nusu P=10 W | 37,59 | 35,41 | 27,49 | 6,51 |
| Ga_usu=24 dB | Nusu P=5 W | 36,48 | 33,24 | 22,96 | 0,00 |
| | Nusu P=6 W | 37,37 | 34,98 | 26,60 | 4,51 |
| | Nusu P=7 W | 38,01 | 36,23 | 29,20 | 10,34 |
| | Nusu P=8 W | 38,49 | 37,16 | 31,15 | 14,72 |
| | Nusu P=9 W | 38,86 | 37,89 | 32,67 | 18,12 |
| | Nusu P=10 W | 39,16 | 38,47 | 33,88 | 20,84 |
| Ga_usu=26 dB | Nusu P=5 W | 38,46 | 37,10 | 31,02 | 14,43 |
| | Nusu P=6 W | 39,02 | 38,20 | 33,32 | 19,58 |
| | Nusu P=7 W | 39,42 | 38,99 | 34,96 | 23,26 |
| | Nusu P=8 W | 39,72 | 39,57 | 36,19 | 26,02 |
| | Nusu P=9 W | 39,95 | 40,03 | 37,15 | 28,17 |
| | Nusu P=10 W | 40,14 | 40,40 | 37,91 | 29,88 |

B.4.2 Tabla de la capacidad en downlink.**Tabla B.8** Capacidad para 8.186 GHz.

| CASO | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| Radio | | 350 | 400 | 450 | 500 |
| Nceldas | | 90 | 64 | 56 | 42 |
| Ga_usu=16.2 dB | Nusu P=40W | 11,70 | 6,70 | 2,95 | 0,80 |
| | Nusu P=50W | 12,50 | 7,30 | 3,30 | 0,95 |
| | Nusu P=60W | 13,25 | 7,85 | 3,65 | 1,10 |
| | Nusu P=70W | 13,95 | 8,40 | 4,00 | 1,30 |
| | Nusu P=80W | 14,60 | 8,95 | 4,35 | 1,45 |
| | Nusu P=90W | 15,25 | 9,45 | 4,65 | 1,60 |
| | Nusu P=100W | 15,85 | 9,95 | 4,95 | 1,75 |
| Ga_usu=18.2 dB | Nusu P=40W | 15,75 | 9,85 | 4,90 | 1,75 |
| | Nusu P=50W | 16,60 | 10,60 | 5,40 | 2,00 |
| | Nusu P=60W | 17,45 | 11,30 | 5,85 | 2,25 |
| | Nusu P=70W | 18,15 | 11,95 | 6,35 | 2,45 |
| | Nusu P=80W | 18,85 | 12,60 | 6,75 | 2,70 |
| | Nusu P=90W | 19,50 | 13,20 | 7,20 | 2,95 |
| | Nusu P=100W | 20,05 | 13,75 | 7,60 | 3,20 |
| Ga_usu=20.2 dB | Nusu P=40W | 20,00 | 13,70 | 7,55 | 3,15 |
| | Nusu P=50W | 20,85 | 14,55 | 8,20 | 3,50 |
| | Nusu P=60W | 21,60 | 15,30 | 8,80 | 3,85 |
| | Nusu P=70W | 22,30 | 16,05 | 9,40 | 4,20 |
| | Nusu P=80W | 22,95 | 16,75 | 9,95 | 4,55 |
| | Nusu P=90W | 23,50 | 17,35 | 10,50 | 4,85 |
| | Nusu P=100W | 24,05 | 17,95 | 11,00 | 5,20 |
| Ga_usu=22.2 dB | Nusu P=40W | 23,95 | 17,85 | 10,95 | 5,15 |
| | Nusu P=50W | 24,75 | 18,75 | 11,75 | 5,65 |
| | Nusu P=60W | 25,40 | 19,55 | 12,45 | 6,15 |
| | Nusu P=70W | 26,00 | 20,30 | 13,15 | 6,60 |
| | Nusu P=80W | 26,50 | 20,95 | 13,80 | 7,05 |
| | Nusu P=90W | 27,00 | 21,55 | 14,40 | 7,50 |
| | Nusu P=100W | 27,45 | 22,10 | 15,00 | 7,95 |
| Ga_usu=24.2 dB | Nusu P=40W | 27,35 | 22,05 | 14,90 | 7,85 |
| | Nusu P=50W | 28,00 | 22,85 | 15,80 | 8,55 |
| | Nusu P=60W | 28,50 | 23,60 | 16,60 | 9,15 |
| | Nusu P=70W | 29,00 | 24,25 | 17,35 | 9,75 |
| | Nusu P=80W | 29,40 | 24,80 | 18,00 | 10,35 |
| | Nusu P=90W | 29,75 | 25,35 | 18,65 | 10,90 |
| | Nusu P=100W | 30,10 | 25,85 | 19,25 | 11,40 |
| Ga_usu=26.2 dB | Nusu P=40W | 30,05 | 25,75 | 19,15 | 11,35 |
| | Nusu P=50W | 30,50 | 26,45 | 20,00 | 12,10 |
| | Nusu P=60W | 30,90 | 27,05 | 20,80 | 12,85 |
| | Nusu P=70W | 31,25 | 27,60 | 21,50 | 13,55 |
| | Nusu P=80W | 31,55 | 28,05 | 22,15 | 14,20 |
| | Nusu P=90W | 31,80 | 28,45 | 22,75 | 14,85 |
| | Nusu P=100W | 32,05 | 28,85 | 23,30 | 15,45 |

Anexo C: Código Matlab

En esta segunda parte de los anexos, vamos a mostrar los códigos de los programas realizados en Matlab, que han sido empleados para determinar todos los resultados obtenidos en capítulos anteriores. A pesar de que los escenarios para los distintos modelos de satélites son diferentes, los códigos de los programas son muy similares, ya que sólo varían los parámetros propios del tipo de satélite utilizado, como pueden ser su altura, su rango de cobertura o el diagrama de radiación de las antenas utilizadas, del tipo de servicio (voz o datos) y del enlace (uplink o downlink). Debido a esto, y para ahorrar espacio, sólo se mostrarán los códigos de los programas que se consideren más relevantes. En caso de que el lector desee determinar un resultado para el cual se necesite un código distinto al expuesto, el interesado sólo deberá copiar el código de ejemplo escrito en esta parte de la memoria y variar los parámetros a su gusto y si fuera necesario añadir los bucles pertinentes para esos datos.

C.1 Cálculo del Número de satélites para cobertura global según su

altura

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Script que calcula el número de satélites necesarios para      %
% cobertura global según su altura.                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Datos
hmin=500; %Altura mínima de los satélites, en Km.
hmax=15000; %Altura máxima de los satélites, en Km.
Nsat_min=0; %Número mínimo de satélites.
Nsat_max=10; %Número máximo de satélites.
Hexagono_diametro_pequeno=1.73; %En Km.
Circunferencia_Tierra=40074.1559; %En Km.
Radio_Tierra=6378; %En Km.

for h=hmin:1:hmax,

    %Cálculo de la distancia LOS y LOS sobre el suelo
    Altura(h)=h;
    Distancia_LOS(h)=3.58*sqrt(h*10.^3);

    Distancia_LOS_sobre_el_suelo(h)=2*atan(Distancia_LOS(h)/Radio_Tierra)
    *Circunferencia_Tierra/(2*pi);

    %Número de satélites por órbita

    Nsat_orbita(h)=ceil(Circunferencia_Tierra/Distancia_LOS_sobre_el
    _suelo(h));

end

```

```

%Representación gráfica del resultado final
plot(Altura, Nsat_orbita, '.')
title('\bfComparata altura del satélite frente el número de
satélites ')
xlabel('\bfNúmero de satélites por órbita')
ylabel('\bfAltura del satélite (Km)')
axis([hmin hmax Nsat_min Nsat_max])

```

C.2 Cálculo del Número de satélites para cobertura global según su radio de cobertura por haz

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Script que calcula el número de satélites necesarios para      %
% cobertura global según su radio celular.                       %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Datos
rmin=200; %Radio mínimo de cobertura, en Km.
rmax=1600; %Radio máximo de cobertura, en Km.
Nsat_min=0; %Número mínimo de satélites.
Nsat_max=12; %Número máximo de satélites.

Hexagono_diametro_pequeno=1.73; %En Km.
Cell_en_linea_sat=[5,7,9,11];
nCell_linea=length(Cell_en_linea_sat);
Circunferencia_Tierra=40074.1559; %En Km.
Radio_Tierra=6378; %En Km.

for i=1:nCell_linea,
    for r=rmin:1:rmax,

        %Cálculo de la distancia LOS y LOS sobre el suelo
        Radio(r)=r;

        Distancia_Linea_recta(r)=Cell_en_linea_sat(i)*Hexagono_diametro_pequeno*r;

        %Número de satélites por órbita

        Nsat_orbita(i,r)=ceil(Circunferencia_Tierra/Distancia_Linea_recta(r));

        if Nsat_orbita(i,r)<3
            Nsat_orbita(i,r)=3; %El número mínimo de satélites por
órbita es 3.
        end

    end
end

%Representación gráfica del resultado final
plot(Radio, Nsat_orbita, '.')

```

```

legend('\bf2 coronas más célula central', '\bf3 coronas más célula
central', '\bf4 coronas más célula central', '\bf5 coronas más célula
central')
title('\bfComparativa radio de la celda frente el número de satélites
')
xlabel('\bfRadio de la celda (Km)')
ylabel('\bfNúmero de satélites por órbita')
axis([rmin rmax Nsat_min Nsat_max])

```

C.3 Ejemplo distancia LOS

Como ejemplo se muestra el código del sistema LEO.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Script que la distancia de cobertura que abarca el satellite se %
% encuentra dentro de la distancia Line-of-sight del satellite. %
% Comprobación para los satélites LEO. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Datos
h_LEO=600; %Altura del satélite, en Km.
Rtierra=6378; %Radio de la Tierra, en Km
Rcobertura_cell=414; %Radio de cobertura celular, en Km.
Ncoronas=3; %Número de coronas (sin incluir la celda central).
Diametro_hexagono_pequeno=1.73;

%Cálculo de los distintos parámetros necesarios para la comprobación.
Para
%más información sobre cada uno de ellos mirar Apartado 1.4.4
Descripción del sistema y 1.4.6 Comprobación
%Line of Sight.
Ncelulas_en_linea_por_satellite=(Ncoronas*2)+1;
distancia_cobertura_sat=Ncelulas_en_linea_por_satellite*Diametro_hexago
no_pequeno*Rcobertura_cell %en Km.
Circunferencia_Tierra=2*pi*Rtierra; %En Km.
d_los=3.58*sqrt(h_LEO*10.^3); %En Km.
alpha=atan(d_los/Rtierra); %En radianes.

%Cálculo de la distancia_curva_LOS.
%La distancia_curva_LOS debe ser mayor que la distancia_cobertura_sat
%ya que la distancia_curva_LOS es la mayor distancia a la que puede
acceder el
%satellite.
distancia_curva_LOS=2*((alpha*Circunferencia_Tierra)/(2*pi)) %se
multiplica por 2 puesto q lo calculamos para los dos lados.

%Comprobación de los resultados
if distancia_curva_LOS >= distancia_cobertura_sat
    disp('BIEN! La distancia curva LOS es mayor que la de cobertura
del satellite');
else
    disp('La distancia de cobertura es mayor que la distancia curva
LOS, se puede:');
    disp('- Poner mas satellites');
    disp('- Disminuir el numero de coronas circulares');

```

```

disp('- Disinuir el radio de cobertura de cada celula');
disp('- Cambiar altura del satelite')
end

```

C.4 Ejemplo diagrama de radiación de la antena

Por su distinta configuración, en este ejemplo se muestran dos códigos para los diagramas de radiación de las antenas de los satélites, uno para la tecnología MEO y otro para la GEO.

Código del diagrama de radiación de la antena del satélite MEO para uplink.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Script que muestra el diagrama de radiación de las antenas      %
% de los satélites MEO en función del ángulo de radiación para  %
% uplink.                                                         %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Datos
theta =[0:1:60]; %Angulo de radiación, en grados.
Gmax=34; %Ganancia máxima de las antenas de los satélites, en dB.
Gmaxnat=10^(Gmax/10);
Gmin=22; %Ganancia mínima de las antenas de los satélites, en dB.
eta=0.6;

%Datos para los ejes.
Xmin=theta(1);
Xmax=theta(end);
Ymin=0;
Ymax=35;

%Cálculo del ancho de haz.
theta3dB=sqrt(eta*48360/Gmaxnat)

%Bucle que clacula la ganancia de la antena del satélite segun el
angulo de
%radiación, en grados.
for i=1:length(theta),
    if i<6
        Grx(i)=Gmax-12*((theta(i)/theta3dB).^2);
    elseif i>=6 && i<46
        Grx(i)= Gmin+0.5*rand;
    else
        Grx(i)=Grx(i-1)-0.01*i;
    end
end

end

%Representación gráfica de los resultados.
plot(theta, Grx,'r');
title('\bfDiagrama de radiación de la antena');
xlabel('\bfAngulo Boresight (grados)');
ylabel('\bfGanancia de la antena normalizada (dB)');
axis([Xmin Xmax Ymin Ymax]);

```

Código del diagrama de radiación de la antena del satélite GEO para downlink.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Script que muestra el diagrama de radiación de las antenas de los %
% satélites GEO en función del ángulo de radiación para downlink. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Datos
theta =[0:0.005:90]; %Angulo de radiación, en grados.
Gmax=35.59; %Ganancia máxima de las antenas de los satélites, en dB.
theta3dB=1.4335; %Ancho de haz, en grados.
Xmin=theta(1);
Xmax=theta(end);
Ymin=-40;
Ymax=36+0.2;

%Bucle que clacula la ganancia de la antena del satélite segun el
angulo de
%radiación, en grados.
for i=1:length(theta),

    if 0 <= theta(i) && theta(i) <= 4.136
        Gtx(i)=Gmax - 3*((theta(i)/theta3dB).^2);
    elseif 4.136 < theta(i) && theta(i) <= 5.35
        Gtx(i)=10.59;
    elseif 5.35 < theta(i) && theta(i) <= 29.58
        Gtx(i)=56.739 - 64*log10(theta(i));
    elseif 29.58 < theta(i) && theta(i) <= 90
        Gtx(i)=-37.411;
    end

end

%Representación gráfica del resultado final.
plot(theta, Gtx,'rx');
title('\bfDiagrama de radiación de la antena');
xlabel('\bfAngulo Boresight (grados)');
ylabel('\bfGanancia de la antena normalizada (dB)');
axis([Xmin Xmax Ymin Ymax]);

```

C.5 Ejemplo cálculo de la capacidad para servicios de voz en uplink

Como ejemplo se muestra el código del sistema LEO.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Script del cálculo de la capacidad de Sistema WCDMA por satélites %
% LEO para los servicios de voz en uplink. Resultados mostrados para %
% distintos valores de potencia. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% DATOS
h_LEO=600; %Altura del satélite en Km.
Ptx_nat=[0.38:0.02:48]; %Potencia tx en W.
nPtx=length(Ptx_nat); %Número de valores de potencia.
Gtx=4; %Ganancia de la antena del usuario m-vil en dB.

```

Anexos

```
Nusuarios_max=100; %Ponemos un numero máximo de usuarios.
NF=5; %Factor de ruido en dB.

%Datos para los ejes
Rmin=414; %Radio de cobertura mínimo, en Km.
Rmax=432; %Radio de cobertura máximo, en Km.
Cmin=40; %Eje mínimo para el número de usuarios.
Cmax=60; %Eje máximo para el número de usuarios.
Y=[Cmin:0.01:Cmax];

%Datos para el servicio de voz
alpha=0.66; %Factor de utilización de voz.
Gp=256; %Ganancia del proceso de voz.
SNR_req=7; %Relación Eb/No mínima requerida en dB.

%Datos del sistema WCDMA
f=1.996; %Frecuencia WCDMA para uplink en GHz.
BW=5; %Ancho de banda en MHz.

%Constantes, variables y conversiones
Gmax=40; %Ganancia máxima de la antena del satélite en dB.
Gmaxnat=10^(Gmax/10);
Gmin=22; %Ganancia mínima de la antena del satélite en dB.
eta=0.6;
Capacidad=0;

%Potencia de ruido en el receptor en dB
Pn= -114 + 10*log(BW) + NF;
Pn=10.^(Pn/10);

%Ancho de haz a 3 dB bajo la ganancia máxima.
theta3dB=sqrt(eta*48360/Gmaxnat);

%Valores para hallar el factor de eficiencia de utilizacion mas
adelante
%Valores extraidos del articulo "Capacity of the WCDMA System Using
HAPS"[referencia]
x=[3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 20 25 30]; %Cell Range
y=[0.52 0.61 0.68 0.73 0.77 0.795 0.82 0.84 0.85 0.86 0.87 0.88 0.885
0.887 0.887 0.877 0.877]; %Frequency Reuse Efficiency
N=5; %Grado del polinomio
a=polyfit(x,y,N); %Polinomio generado para el cálculo de Fuplink.

%Bucle que calcula la capacidad para los radios de cobertura.
Radio=0;
for R=Rmin:3:Rmax;
    Radio=Radio+1;
    distancia(Radio)=R;

    %Cálculo del ángulo boresight (ángulo al borde de la celda).
    theta_rad=atan2(R,h_LEO);
    theta=theta_rad*180/pi; %En grados.

    %Hallamos la ganancia de la antena tx según el ángulo boresight
    %en grados
    G=Gmax-12*((theta/theta3dB).^2);
    Grx(Radio)=max(G, Gmin);
    delta_G=Gmax-Grx(Radio);

    %Factor de eficiencia de utilización.
```

```

B=a(N+1) + a(N)*delta_G + a(N-1)*(delta_G.^2) + a(N-
2)*(delta_G.^3)+ a(N-3)*(delta_G.^4) +a(N-4)*(delta_G.^5);
Fu(Radio)=(1-B)/B;

%Perdidas totales
d=(h_LEO)/cos(theta_rad);
Lp= 92.45 + 20*log10(f) + 20*log10(d); %Perdidas de propagación en
el espacio libre en dB

for k=1:nPtx,
    Ptx=10*log10(Ptx_nat(k))+30; %Potencia transmitida en dBm.
    Prx= Ptx + Gtx + Grx(Radio) - Lp; %Potencia recibida en dBm.
    S=10.^(Prx/10);

    step=0.15;
    for Nu=1:step:Nusuarios_max,
        Iintra=alpha*(Nu-1)*S; %Interferencia Intracelular.
        Iextra=Nu*alpha*S*Fu(Radio); %Interferencia Intercelular.
        Itotal=Iintra + Iextra + Pn; %Interferencia total.

        SNR=10*log10(S*Gp/Itotal); %Eb/No conseguida, en dB

        %Capacidad por celda.
        if SNR<SNR_req,
            Capacidad(Radio,k)=Nu-1;
            break,
        end
    end
end
end

%Muestra de los resultados en la pantalla de comandos.
sprintf('%f \n',Capacidad(1,:))

%Representación gráfica del resultado final
plot(distancia,Capacidad)
hold on
plot(414,Y,'r')
plot(432,Y,'b')
legend('\bfPtx=380 mW','\bfPtx=400 mW','\bfPtx=420 mW','\bfPtx=440
mW','\bfPtx=460 mW','\bfPtx=480 mW',4);
title('\bfCapacidad de usuarios de voz del sistema LEO en Uplink');
xlabel('\bfRadio de la celda (Km)');
ylabel('\bfNumero de usuarios de voz');
axis([Rmin Rmax Cmin Cmax]);
hold off

```

C.6 Ejemplo cálculo de la capacidad para servicios de voz en downlink

Como ejemplo se muestra el código del sistema GEO.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Script del cálculo de la capacidad de Sistema WCDMA por satélites %
% GEO para los servicios de voz en Downlink. Resultados mostrados %
% para distintos valores de potencia. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Anexos

```
% DATOS
h_GEO=36000; %Altura del satélite, en km (mas adelante se trabaja en
metros)
Ptx_nat=[120:10:180]; %Potencia tx, en W
nPtx=length(Ptx_nat);
Grx=30.789; %Ganancia de la antena del móvil
Nusuarios_max=100; %Ponemos un numero máximo de usuarios
NF=5; %Factor de ruido en dB
Pp=0.1; %Potencia para el piloto
phi=0.25; %Factor de ortogonalidad

%Datos para los ejes
Rmin=1545; %Radio de trabajo mínimo , en Km
Rmax=1890; %Radio de trabajo máximo, en Km
Cmin=0; %eje mínimo de usuarios
Cmax=80; %eje máximo de usuarios
Y=[Cmin:0.01:Cmax];

%Datos de los servicios de voz
alpha=0.66; %factor de utilización de voz
Gp=256; %Ganancia del proceso de voz
SNR_req=6; %relación Eb/No mínima requerida ed dB

%Datos del sistema WCDMA
f=2.186; %frecuencia WCDMA para downlink en GHz
BW=5; %ancho de banda en MHz

%Constantes, variables y conversiones
Gmax=35.59; %Ganancia máxima de la antena del satélite, ed dB
theta3dB=1.4335; %Ancho de haz, en grados
Capacidad=0;

%Potencia de ruido en el re
ceptor en dB
Pn= -114 + 10*log(BW) + NF;
Pn=10.^(Pn/10); %en números naturales

%Bucle que calcula la capacidad para los radios de cobertura.
Radio=0;
for R=Rmin:3:Rmax;
    Radio=Radio+1;
    distancia(Radio)=R;

    %Calculo del ángulo boresight (ángulo al borde de la celda).
    theta_rad=atan2(R,h_GEO); % ángulo boresight (al borde de la
celda)
    theta=180*theta_rad/pi; % en grados ángulo boresight (al borde de
la celda)

    %Hallamos la ganancia de la antena tx según el ángulo boresight
    %en grados
    if 0 <= theta && theta <= 4.136
        Gtx=Gmax - 3*((theta/theta3dB).^2);
    elseif 4.136 < theta && theta <= 5.35
        Gtx=10.59;
    elseif 5.35 < theta && theta <= 29.58
        Gtx=56.739 - 64*log10(theta);
    elseif 29.58 < theta(i) && theta(i) <= 90
        Gtx=-37.411;
```


Anexos

```
end
delta_G=Gmax-Gtx;

%Perdidas totales
d=(h_GEO)/cos(theta_rad);
Lp= 92.45 + 20*log10(f) + 20*log10(d); %Perdidas de propagación en
el espacio libre en dB
%Ltotal=Lp + Ishadowing; %Sumo las perdidas por sombra, en dB

%Bucle para hallar la Capacidad para los distintos valores de
potencia
k=0;
for k=1:nPtx,

    step=0.05;
    for Nu=1:step:Nusuarios_max,
        Pusuario=Ptx_nat(k)*(1-Pp)/(Nu*alpha); %Potencia
transmitida por cada usuario, en dBm
        Pusuario_dB=10*log10(Pusuario)+30; %dBm
        Prx= Pusuario_dB + Gtx + Grx - Lp; %potencia recibida en
dBm

        S=10.^(Prx/10);

        Presto=(Ptx_nat(k)-Pusuario);
        Presto_dB=10*log10(Presto)+30;
        Presto_recibida=Presto_dB + Gtx + Grx - Lp;
        Iintra=(10.^(Presto_recibida/10))*phi;

        Pextra=10*log10(Ptx_nat(k))+30;
        Pextra_rx=Pextra + Gtx + Grx -Lp;
        Iextra=10.^(Pextra_rx/10);

        Itotal=Iintra + Iextra + Pn;

        SNR=10*log10(S*Gp/Itotal); %Eb/No conseguida, en dB

        if SNR<SNR_req,
            Capacidad(Radio,k)=Nu-1;
            break,
        end
    end
end
end

%Muestra los resultados en la pantalla de comandos.
sprintf('%f\n', Capacidad(19,:))

%Representación gráfica del resultado final.
plot(distancia, Capacidad)
hold on
plot(1545,Y, 'r')
plot(1890,Y, 'b')
legend('\bfPtx=120 W', '\bfPtx=130 W', '\bfPtx=140 W', '\bfPtx=150
W', '\bfPtx=160 W', '\bfPtx=170 W', '\bfPtx=180 W', 4);
title('\bfCapacidad de usuarios de voz del sistema GEO en Downlink');
xlabel('\bfRadio de la celda (Km)');
ylabel('\bfNumero de usuarios de voz');
```

```
axis([Rmin Rmax Cmin Cmax]);
```

C.7 Ejemplo cálculo de la capacidad para servicios de datos en uplink

Como ejemplo se muestra el código del sistema GEO.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Script del cálculo de la capacidad de Sistema WCDMA por satélites %
% GEO para los servicios de datos en uplink. %
% Resultados mostrados para distintos valores de potencia. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% DATOS
h_GEO=36000; %Altura del satélite, en Km
Ptx_nat=[0.85:0.05:1.15]*4; %Potencia de tx, en dB
nPtx=length(Ptx_nat);
Gtx=30; %Ganancia de la antena del usuario, en dB
Nusuarios_max=100; %Ponemos un numero máximo de usuarios
NF=5; %Factor de ruido en dB

%para los ejes
Rmin=1545; %Radio de trabajo mínimo, en km
Rmax=1890; %Radio de trabajo máximo, en km
Cmin=0; %eje mínimo de usuarios
Cmax=12; %eje máximo de usuarios
Y=[Cmin:0.01:Cmax];

%Datos del proceso de voz
alpha=1; %factor de utilización de voz
Gp=32; %Ganancia del proceso de voz
SNR_req=3; %relación Eb/No mínima requerida ed dB

%Datos del sistema WCDMA
f=1.996; %frecuencia WCDMA para uplink en GHz
BW=5; %ancho de banda en MHz

%Constantes, variables y conversiones
Gmax=34.8; %Ganancia máxima de la antena del satélite
theta3dB=1.57;
Capacidad=0;

%Potencia de ruido en el receptor en dB
Pn= -114 + 10*log(BW) + NF;
Pn=10.^(Pn/10); %en números naturales

%Valores para hallar el factor de utilización mas adelante
%Valores extraídos del artículo "Capacity of the WCDMA System Using
%HAPS"[Referencia]
x=[3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16]; %Cell Range
y=[0.52 0.61 0.68 0.73 0.77 0.795 0.82 0.84 0.85 0.86 0.87 0.88 0.885
0.887]; %Frequency Reuse Efficiency
N=3; %Grado del polinomio
a=polyfit(x,y,N); %Polinomio generado para el calculo de Fuplink.

%Bucle que calcula la capacidad para los radios de cobertura.
Radio=0;
```

Anexos

```
for R=Rmin:3:Rmax;
    Radio=Radio+1;
    distancia(Radio)=R;

    %Cálculo del ángulo boresight (ángulo al borde de la celda).
    theta_rad=atan2(R,h_GEO); % ángulo boresight (al borde de la
celda)
    theta=180*theta_rad/pi; % en grados ángulo boresight (al borde de
la celda)

    %Hallamos la ganancia de la antena del satélite según el ángulo
boresight
    %en grados
    if 0 <= theta && theta <= 4.53
        Grx=Gmax - 3*((theta/theta3dB).^2);
    elseif 4.53 < theta && theta <= 5.87
        Grx=9.8;
    elseif 5.87 < theta && theta <= 37
        Grx=55.95 - 60*log10(theta);
    elseif 37 < theta && theta <= 90
        Grx=-38.2;
    end
    delta_G=Gmax-Grx;
    G1(Radio)=Grx;

    %Factor de eficiencia de utilización.
    B=a(N+1) + a(N)*delta_G + a(N-1)*(delta_G.^2) + a(N-
2)*(delta_G.^3);
    Fu(Radio)=(1-B)/B;
    if delta_G>15;
        Fu(Radio)=0.135-0.035*0.1*(delta_G-15);
    end;

    %Perdidas totales.
    d=(h_GEO)/cos(theta_rad);
    Lp= 92.45 + 20*log10(f) + 20*log10(d); %Perdidas de propagación en
el espacio libre en dB

    %Bucle para hallar la Capacidad para los distintos valores de
potencia
    k=0;
    for k=1:nPtx,

        Ptx=10*log10(Ptx_nat(k)*1000); %Potencia transmitida por cada
usuario, en dBm
        Prx= Ptx + Gtx + Grx - Lp; %potencia recibida en dB
        S=10.^(Prx/10);

        step=0.05;
        for Nu=1:step:Nusuarios_max,

            Iintra=alpha*(Nu-1)*S; %Interferencia intracelular.
            Iextra=Nu*alpha*S*Fu(Radio); %Interferencia intercelular.
            Itotal=Iintra + Iextra + Pn; %Interferencia total.

            SNR=10*log10(S*Gp/Itotal); %Eb/No conseguida, en dB
```

Anexos

```
        %Capacidad por celda
        if SNR<SNR_req,
            Capacidad(Radio,k)=Nu-1; %%%%Se quedan los datos del
ultimo R, poner una R fija
            break,
        end
    end
end
end;

%Muestra de los resultados en la pantalla de comandos
sprintf('%f\n', Capacidad(19,:))

%Representación gráfica del resultado final
plot(distancia, Capacidad)
hold on
plot(1545, Y, 'r')
plot(1890, Y, 'b')
legend('\bfPtx=3.4 W', '\bfPtx=3.6 W', '\bfPtx=3.8 W', '\bfPtx=4
W', '\bfPtx=4.2 W', '\bfPtx=4.4 W', '\bfPtx=4.6 W', 3);
title('\bfCapacidad de usuarios datos del sistema GEO en Uplink');
xlabel('\bfRadio de la celda (Km)');
ylabel('\bfNumero de usuarios de datos');
axis([Rmin Rmax Cmin Cmax]);
```

C.8 Ejemplo cálculo de la capacidad para servicios de datos en

downlink

Como ejemplo se muestra el código del sistema LEO.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Script del cálculo de la capacidad de Sistema WCDMA por satélites %
% LEO para los servicios de datos en downlink. Resultados mostrados %
% para distintos valores de potencia. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% DATOS
h_LEO=600; %Altura del satélite, en Km.
Ptx_nat=[80,90,100,110,120,130]; %Potencia tx en W.
nPtx=length(Ptx_nat);
Gtx=4.789; %Ganancia de la antena del usuario, en dB.
Nusuarios_max=100; %Ponemos un numero máximo de usuarios.
NF=5; %Factor de ruido, en dB.
Pp=0.1; %Potencia asignada al piloto.
phi=0.25; %Factor de Ortogonalidad.

%Datos para los ejes
Rmin=414; %Radio de trabajo mínimo, en Km.
Rmax=432; %Radio de trabajo máximo, en Km.
Cmin=6; %eje mínimo de usuarios.
Cmax=11; %eje máximo de usuarios.
Y=[Cmin:0.01:Cmax];

%Datos para el servicio de datos
alpha=1; %Factor de utilización de datos.
```

Anexos

```
Gp=32; %Ganancia del proceso de datos.
SNR_req=3.5; %relación Eb/No mínima requerida, en dB.

%Datos del sistema WCDMA
f=2.186; %frecuencia WCDMA para uplink en GHz
BW=5; %ancho de banda en MHz

%Constantes, variables y conversiones
Gmax=40.789; %Ganancia máxima de la antena del satélite, en dB.
Gmaxnat=10^(Gmax/10);
Gmin=22.789; %Ganancia mínima de la antena del satélite, en dB.
eta=0.6;
Capacidad=0;

Pn= -114 + 10*log(BW) + NF; %Potencia de ruido en el receptor en dB
Pn=10.^(Pn/10); %en números naturales

%Ancho de haz a 3dB bajo la ganancia máxima, en grados.
theta3dB=sqrt(eta*48360/Gmaxnat);

%Bucle que calcula la capacidad para los radios de cobertura.
Radio=0;
for R=Rmin:3:Rmax;
    Radio=Radio+1;
    distancia(Radio)=R;

    %Calculo del ángulo boresight (ángulo al borde de la celda)
    theta_rad=atan2(R,h_LEO);
    theta=theta_rad*180/pi; %En grados

    %Hallamos la ganancia de la antena del satélite según el
    ángulo boresight
    %en grados
    G=Gmax-12*((theta/theta3dB).^2);
    Grx(Radio)=max(G, Gmin);
    delta_G=Gmax-Grx(Radio);

    %Perdidas totales
    d=(h_LEO)/cos(theta_rad);
    Lp= 92.45 + 20*log10(f) + 20*log10(d); %Perdidas de
    propagación en el espacio libre en dB

    %Bucle para hallar la Capacidad para los distintos valores de
    potencia
    for k=1:nPtx,

        step=0.01;
        for Nu=1:step:Nusuarios_max,

            Pusuario=Ptx_nat(k)*(1-Pp)/(Nu*alpha); %Potencia
            transmitida para un usuario, en W.
            Pusuario_dB=10*log10(Pusuario)+30; %dBm
            Prx= Pusuario_dB + Gtx + Grx - Lp; %Potencia recibida,
            en dB

            S=10.^(Prx/10);
```


Anexos

```
%DATOS
h_LEO=600; %Altura del satélite, en Km.
h=h_LEO*10.^3; %Altura en m.
Nusuarios_max=200; %Ponemos un numero máximo de usuarios.
NF=5; %Factor de ruido, en dB.
f=2.186; %Frecuencia WCDMA para uplink, en GHz.
BW=5; %ancho de banda en MHz.
R=414*10.^3; %Radio de cobertura en el que trabajamos.
Gtx=4.789; %Ganancia de la antena del usuario, en dB.
Gmax=40.789; %Ganancia máxima de la antena del satélite, en dB.
Gmaxnat=10^(Gmax/10);
Gmin=22.789;
eta=0.6;
Pp=0.1; %Potencia asignada al piloto.
phi=0.25; %factor de ortogonalidad.
Pn= -114 + 10*log(BW) + NF; %Potencia de ruido en el receptor, en dB
Pn=10.^(Pn/10);

%Datos para los servicios de voz.
Ptx_nat_voz=90; %Potencia tx en W
alpha_voz=0.66; %Factor de utilización de voz
Gp_voz=256; %Ganancia de los servicios de voz
SNR_req_voz=7; %relación Eb/No mínima requerida en dB
Capacidad_voz=0;

%Datos para los servicios de datos.
Ptx_nat_datos=90; %Potencia tx, en W
alpha_datos=1; %Factor de utilización de datos
Gp_datos=32; %Ganancia del proceso de datos, en dB.
SNR_req_datos=3.5; %Relación Eb/No mínima requerida, en dB
Capacidad_datos=0;

%Hallamos la ganancia de la antena tx según el ángulo boresight,
%en grados
theta_rad=atan2(R,h); % ángulo boresight (al borde de la celda)
theta=theta_rad*180/pi; % en grados ángulo boresight (al borde de la
celda)
teta3dB=sqrt(eta*48360/Gmaxnat);
G=Gmax-12*((theta/teta3dB).^2);
Grx=max(G, Gmin);
delta_G=Gmax-Grx;

%Perdidas totales
d=(h/10.^3)/cos(theta_rad);
Lp= 92.45 + 20*log10(f) + 20*log10(d); %Perdidas de propagación en el
espacio libre en dB
%Ltotal=Lp + Ishadowing; %Sumo las perdidas por sombra, en dB

%Bucle que calcula la capacidad para los servios de voz.
step=0.05;
for Nu=1:step:Nusuarios_max,
    Pusu_voz=Ptx_nat_voz*(1-Pp)/(Nu*alpha_voz);
    Ptx_dBm_voz=10*log10(Pusu_voz)+30; %en dBm (sumo 30 para pasar de
dB a dBm)
    Prx_voz= Ptx_dBm_voz + Gtx + Grx - Lp; %potencia recibida en dB
    S_voz=10.^(Prx_voz/10);
```

Anexos

```
Presto_voz=(Ptx_nat_voz-Pusu_voz);
Presto_dB_voz=10*log10(Presto_voz)+30;
Presto_recibida_voz=Presto_dB_voz + Gtx + Grx - Lp;
Iintra_voz=(10.^(Presto_recibida_voz/10))*phi;

Pextra_voz=10*log10(Ptx_nat_voz)+30;
Pextra_rx_voz=Pextra_voz + Gtx + Grx -Lp;
Iextra_voz=10.^(Pextra_rx_voz/10);

Itotal_voz=Iintra_voz + Iextra_voz + Pn;

SNR_voz=10*log10(S_voz*Gp_voz/Itotal_voz); %Eb/No conseguida, en
dB

if SNR_voz<SNR_req_voz,
    Capacidad_voz=Nu-1;
    break,
end

end

%Bucle que calcula la capacidad para los servicios de datos.
step=0.05;
for Nu=1:step:Nusuarios_max,
    Pusu_datos=Ptx_nat_datos*(1-Pp)/(Nu*alpha_datos);
    Ptx_dBm_datos=10*log10(Pusu_datos)+30; %en dBm (sumo 30 para pasar
de dB a dBm)
    Prx_datos= Ptx_dBm_datos + Gtx + Grx - Lp; %potencia recibida en
dB
    S_datos=10.^(Prx_datos/10);

    Presto_datos=(Ptx_nat_datos-Pusu_datos);
    Presto_dB_datos=10*log10(Presto_datos)+30;
    Presto_recibida_datos=Presto_dB_datos + Gtx + Grx - Lp;
    Iintra_datos=(10.^(Presto_recibida_datos/10))*phi;

    Pextra_datos=10*log10(Ptx_nat_datos)+30;
    Pextra_rx_datos=Pextra_datos + Gtx + Grx -Lp;
    Iextra_datos=10.^(Pextra_rx_datos/10);

    Itotal_datos=Iintra_datos + Iextra_datos + Pn;

    SNR_datos=10*log10(S_datos*Gp_datos/Itotal_datos); %Eb/No
conseguida, en dB
    if SNR_datos<SNR_req_datos,
        Capacidad_datos=Nu-1;
        break,
    end
end

end

%Ecuaciones de la recta.
i=0;
for data=0.1:0.1:Capacidad_datos,
    i=i+1;
    A(i)=data;
    voz(i)=Capacidad_voz -
((Capacidad_voz/Capacidad_datos)*floor(data));
end
voz(i)=0;
```


Anexos

```
ejex=Capacidad_datos + 0.5;  
ejey=Capacidad_voz + 4;
```

```
voz(1:10:90)
```

```
%Representación grafica del resultado final.  
plot(A,voz);  
title('\bfComparativa real del numero de usuarios de voz frente a  
datos')  
xlabel('\bfCapacidad de Usuarios de Datos')  
ylabel('\bfCapacidad de Usuarios de Voz')  
axis([0,ejex,0,ejey])
```

Anexo D: Presupuesto

1) Ejecución Material

- Compra de ordenador personal (Software incluido)..... 2.299 €
- Alquiler de impresora láser durante 6 meses 50 €
- Material de oficina 120 €
- Total de ejecución material 2.469 €

2) Gastos generales

- 16 % sobre Ejecución Material 395,04 €

3) Beneficio Industrial

- 6 % sobre Ejecución Material 148,14 €

4) Honorarios Proyecto

- 640 horas a 25 €/ hora..... 16.000 €

5) Material fungible

- Gastos de impresión..... 100 €
- Encuadernación..... 6 €

6) Subtotal del presupuesto

- Subtotal Presupuesto..... 18.575 €

7) I.V.A. aplicable

- 16% Subtotal Presupuesto 2.972 €

8) Total presupuesto

- Total Presupuesto..... 21.547 €

Madrid, Febrero de 2010

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Raquel Fernández Llorente
Ingeniero Superior de Telecomunicación

PLIEGO DE CONDICIONES

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un estudio sobre la capacidad del sistema WCDMA con distintas tecnologías de satélites. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los

nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado

en la actualidad “Presupuesto de Ejecución de Contrata” y anteriormente llamado “Presupuesto de Ejecución Material” que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.