

ÍNDICE

PRÓLOGO	17
Capítulo 1: INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS RADIOELÉCTRICOS	19
1.1. Radiocomunicación: Términos y definiciones fundamentales	19
1.2. Servicios de radiocomunicación	21
1.3. Estaciones radioeléctricas	23
1.4. Modos de explotación	23
1.5. Gestión de las frecuencias radioeléctricas	24
1.5.1. Consideraciones generales	24
1.5.2. Atribución, adjudicación y asignación de bandas de frecuencias ..	24
1.5.3. Nomenclatura de las bandas de frecuencias	25
1.5.4. Cuadro de atribución de frecuencias	27
1.6. Parámetros y características de una radiocomunicación	30
1.6.1. Parámetros de Emisión	30
1.6.2. Denominación de las emisiones	32
1.6.3. Características de propagación	35
1.6.4. Parámetros y características de recepción	38
1.6.5. Parámetros de explotación	39
Capítulo 2: FUNDAMENTOS DE LOS ENLACES RADIOELÉCTRICOS	41
2.1. Introducción	41
2.2. Fundamentos de la radiación electromagnética	42
2.2.1. Caracterización del elemento radiante	42
2.2.2. Campo producido por una antena transmisora	43
2.2.3. Propiedades generales de los campos electromagnéticos en el es- pacio libre	44
2.2.4. Características de radiación de una antena	45
2.2.5. Ganancias de una antena	46
2.2.6. Diagramas de radiación de una antena	51

2.3.	Campo en condiciones de espacio libre	52
2.3.1.	Antena isótropa: Concepto de PIRE	52
2.3.2.	Antenas lineales	53
2.3.2.1.	Dipolo elemental	53
2.3.2.2.	Dipolo corto	55
2.3.2.3.	Dipolo en $\lambda/2$: Concepto de PRA	55
2.4.	Campo producido por antenas próximas al suelo	57
2.4.1.	Antena isótropa próxima al suelo	57
2.4.2.	Dipolo elemental ideal próximo al suelo	58
2.4.3.	Monopolo elemental	59
2.4.4.	Antena monopolo	60
2.4.4.1.	Antena vertical corta (AVC)	61
2.4.4.2.	Monopolo en $\lambda/4$	62
2.5.	Caracterización de la antena como receptora	63
2.5.1.	Introducción	63
2.5.2.	Superficie equivalente de una antena receptora	63
2.5.3.	Longitud efectiva y circuito equivalente de una antena receptora	65
2.6.	Potencia recibida	69
2.7.	Fórmulas de Friis para el enlace	70
2.7.1.	Enlace radioeléctrico en condiciones de espacio libre	70
2.7.2.	Enlace radioeléctrico a través de un medio cualquiera	73
2.7.3.	Relación entre la pérdida básica y la intensidad de campo	75
2.8.	Modelo energético de un sistema de radiocomunicación	76
2.8.1.	Constitución del modelo	76
2.8.2.	Potencias	77
2.8.3.	Pérdidas y ganancias	77
2.8.4.	Balance de un enlace radioeléctrico	80
2.9.	Discriminación y aislamiento de polarización	81
2.10.	Ruido en los sistemas radioeléctricos	82
2.10.1.	Introducción	82
2.10.2.	Factor y temperatura equivalente de ruido de un sistema receptor	83
2.10.3.	Temperatura equivalente de ruido de una antena ideal	87
2.10.3.1.	Influencia de la atenuación atmosférica	90
2.10.3.2.	Lóbulos de la antena a diferente temperatura	90
2.11.	Interferencia	91
2.12.	Tipos de sistemas radioeléctricos	94
2.12.1.	Sistemas limitados en potencia	94
2.12.2.	Sistemas limitados por interferencia	96
2.13.	Distribuciones estadísticas de la propagación radioeléctrica	99
2.13.1.	Distribución normal del campo	99
2.13.2.	Distribución de Rayleigh	103
2.13.3.	Distribución Rayleigh + Log-normal	105
2.13.4.	Distribución Nakagami-Rice	108
2.14.	Concepto de mes más desfavorable	109
Capítulo 3: RADIOPROPAGACIÓN		113
3.1.	Introducción	113
3.2.	Influencia del terreno	113

3.3.	Características del suelo. Coeficiente de reflexión	115
3.4.	Modelo de propagación de Tierra Plana	118
3.5.	Propagación por onda de superficie	122
3.6.	Influencia de la troposfera en la propagación	125
3.6.1.	Índice de refracción. Curvatura de los rayos	126
3.6.2.	Trayectoria de los rayos	128
3.6.3.	Geometría del trayecto respecto al suelo	132
3.6.4.	Variación de ΔN a lo largo de la ruta	140
3.7.	Modelo de Tierra Curva	141
3.7.1.	Distancia de visibilidad	141
3.7.2.	Modelo de reflexión	143
3.8.	Propagación por difracción	150
3.8.1.	Zonas de Fresnel	150
3.9.	Representación de perfiles	153
3.10.	Difracción en obstáculos	157
3.10.1.	Obstáculo aislado	158
3.10.2.	Dos obstáculos aislados	164
3.10.2.1.	Método EMP	165
3.10.2.2.	Método Epstein-Peterson	166
3.10.2.3.	Método de la Recomendación UIT-R P.526	166
3.10.3.	Múltiples obstáculos	168
3.11.	Difracción sobre Tierra esférica	170
3.12.	Atenuación por vegetación	173
3.13.	Atenuación por gases atmosféricos	175
3.14.	Atenuación por lluvia	177
3.14.1.	Radioenlaces terrenales	177
3.14.2.	Radioenlaces por satélite	181
3.15.	Despolarización	184
3.16.	Propagación por dispersión troposférica	186
3.17.	Métodos empíricos de predicción de propagación	191
3.17.1.	Método de la Recomendación UIT-R P.1546	192
3.17.1.1.	Presentación de las curvas	193
3.17.1.2.	Utilización de las curvas	193
3.17.2.	Método de Okumura-Hata	207
3.17.3.	Método COST 231 para medio urbano	210
3.17.4.	Propagación en un medio heterogéneo	214
3.18.	Métodos de predicción para sistemas de acceso inalámbrico en la gama de frecuencias 20-50 GHz	217
3.18.1.	Introducción	217
3.18.2.	Estimación de la cobertura de un nodo	218
3.18.3.	Efecto de la lluvia	220
3.19.	Desvanecimiento	221
3.19.1.	Tipos de desvanecimientos	222
3.19.2.	Desvanecimiento multitrayecto	223
3.19.3.	Estadísticas del desvanecimiento en enlaces fijos	225
3.19.4.	Desvanecimientos profundos	225
3.19.5.	Métodos de cálculo de la probabilidad de desvanecimiento	227
3.19.6.	Desvanecimiento por reflexión en el suelo	229
3.19.7.	Desvanecimiento selectivo	232

3.19.7.1. Modelos de la FTM.....	232
3.19.7.2. Modelo de tres rayos simplificado.....	233
3.19.7.3. Modelo de dos rayos ficticios.....	237
3.20. Caracterización en banda ancha de los canales radioeléctricos para sistemas móviles.....	240
3.20.1. Canales multitrayecto.....	240
3.20.2. Modelos de canales multitrayecto.....	244
3.20.3. Modelo determinístico de dispersores.....	244
3.20.4. Caracterización de los canales multitrayecto.....	249
3.20.4.1. Funciones de sistema.....	249
3.20.4.2. Caracterización de Canales Prácticos.....	253
3.20.4.3. Anchura de banda de coherencia y tiempo de coherencia de un canal multitrayecto.....	257
3.21. Caracterización de canales multitrayecto de banda estrecha.....	261
3.21.1. Introducción.....	261
3.21.2. Señales respuesta de los canales de banda estrecha.....	263
3.21.3. Estadísticas de las señales respuesta.....	265
Capítulo 4: RADIOCOMUNICACIÓN POR ONDA IONOSFÉRICA	271
4.1. Introducción.....	271
4.2. La ionosfera y sus características.....	273
4.3. Fundamentos de la propagación ionosférica.....	275
4.4. Ionogramas.....	279
4.5. Geometría de la reflexión ionosférica: Teorema de equivalencia. Ley de la secante.....	280
4.6. Modos de propagación. Frecuencias máximas y parámetros ionosféricos.....	285
4.7. Predicción de las MUF.....	287
4.7.1. Introducción.....	287
4.7.2. Datos necesarios para la predicción de las MUF.....	288
4.7.3. Métodos de predicción de las MUF.....	289
4.7.3.1. Capa E.....	289
4.7.3.2. Capa F1.....	290
4.7.3.3. Capa F2.....	290
4.7.4. Disponibilidad de modos.....	290
4.7.5. MUF de explotación.....	291
4.8. Representación de las MUF.....	291
4.9. Predicción de la pérdida básica de propagación en enlaces ionosféricos.....	292
4.10. Intensidad de campo y potencia de recepción.....	294
4.11. Relación señal/ruido para una radiocomunicación HF.....	295
4.12. Factor de ruido en HF.....	296
4.12.1. Ruido atmosférico.....	296
4.12.2. Ruido artificial.....	297
4.13. Frecuencia mínima utilizable (LUF) y fiabilidad básica de un circuito HF.....	298

Capítulo 5: RADIOENLACES TERRENALES Y REDES INALÁMBRICAS	299
5.1. Introducción.....	299
5.1.1. Consideraciones generales.....	299
5.1.2. Ventajas e inconvenientes de los radioenlaces.....	301
5.2. Estructura general de un radioenlace.....	302
5.2.1. Equipos.....	302
5.2.2. Elementos de reserva.....	303
5.2.3. Sistema de supervisión.....	304
5.3. Planes de frecuencias: Bandas y asignación de frecuencias.....	304
5.3.1. Generalidades.....	304
5.3.2. Bandas de frecuencias.....	305
5.3.3. Planes de disposición de radiocanales.....	306
5.3.3.1. Ejemplo de plan de canalización.....	307
5.4. Diagrama de bloques de los equipos.....	308
5.5. Dispositivos de microondas y antenas.....	312
5.5.1. Circuitos de acoplo y alimentadores.....	312
5.5.2. Antenas.....	313
5.5.3. Repetidores pasivos.....	316
5.6. Parámetros básicos de un radioenlace.....	320
5.6.1. Relación portadora/ruido.....	321
5.7. Anchura de banda de una transmisión por radioenlace digital.....	322
5.8. Datos de propagación necesarios para el cálculo de radioenlaces.....	323
5.8.1. Condiciones de diseño de un radioenlace.....	323
5.8.2. Cálculo de las alturas de las antenas.....	324
5.8.3. Pérdidas adicionales.....	326
5.8.4. Despolarización.....	327
5.8.5. Potencia recibida en condiciones normales de propagación y margen del enlace.....	327
5.9. Sistemas de modulación y codificación de canal.....	327
5.9.1. Revisión de los sistemas de modulación empleados en los radioenlaces digitales.....	327
5.9.2. Probabilidad de error.....	334
5.9.3. Potencia umbral.....	339
5.9.4. Efectos del desvanecimiento multitrayecto sobre los radioenlaces digitales.....	340
5.9.5. Interferencia entre símbolos.....	342
5.9.6. Codificación de canal y formatos TCM.....	345
5.10. Trayecto y conexiones digitales ficticios de referencia.....	348
5.11. Parámetros de calidad de errores de disponibilidad.....	349
5.11.1. Criterios de indisponibilidad.....	353
5.12. Objetivos de indisponibilidad.....	355
5.13. Objetivos de calidad de fidelidad de un radioenlace.....	356
5.14. Proyecto de radioenlace digital. Comprobación de objetivos de calidad y disponibilidad.....	358
5.14.1. Introducción.....	358
5.14.2. Cálculos de indisponibilidad de un radioenlace.....	359
5.14.3. Cálculos de calidad de un radioenlace.....	363

5.14.4. Signatura de un receptor	364
5.14.5. Cálculo del porcentaje de tiempo P_{TS} utilizando firmas	366
5.14.6. Cálculo del porcentaje de tiempo P_{TT} utilizando el margen neto de desvanecimiento	370
5.14.7. Ejemplo de comprobación del cumplimiento de los objetivos de calidad	371
5.15. Diversidad	372
5.15.1. Diversidad de espacio	373
5.15.2. Diversidad de frecuencia	374
5.15.3. Diversidad cuádruple	374
5.15.4. Diversidad de trayecto	375
5.15.5. Diversidad de ángulo	375
5.15.6. Tratamiento de la señal en los sistemas de diversidad	375
5.15.6.1. Selección por conmutación	376
5.15.6.2. Selección por combinación	376
5.15.7. Mejora por diversidad	380
5.15.7.1. Factor de mejora para diversidad de espacio	380
5.15.7.2. Factor de mejora para diversidad de frecuencia	380
5.16. Otras técnicas de mitigación de desvanecimientos y de protección	381
5.16.1. Control de potencia	381
5.16.2. Adaptación de modulación y codificación de canal	382
5.16.3. Sistema anti-reflectante	383
5.16.4. Cancelación de la interferencia contrapolar	384
5.16.5. Protección de los radiocanales. Redundancia de equipos	385
5.17. Interferencias de RF en radioenlaces	387
5.17.1. Clases de interferencias	387
5.17.2. Cálculo de la relación portadora/interferencia	389
5.17.3. Interferencias en radioenlaces digitales	390
5.17.4. Control de las interferencias	392
5.18. Sistemas y redes Wi-Fi	394
5.18.1. Introducción	394
5.18.2. Estandarización de las redes Wi-Fi	395
5.18.3. Certificación Wi-Fi	397
5.18.4. Características generales de redes Wi-Fi	398
5.18.4.1. Tipos de redes	398
5.18.4.2. Servicios de red	399
5.18.4.3. Equipamiento y antenas	401
5.18.4.4. Redes en malla	402
5.18.5. Gestión del acceso a los recursos radio	403
5.18.5.1. Bandas de frecuencias	403
5.18.5.2. Control de acceso al medio	404
5.18.6. Introducción a las tecnologías OFDM y MIMO	406
5.18.6.1. Tecnología MIMO	410
5.18.7. Modalidades de capa física	412
5.18.7.1. Modalidades del estándar inicial y 802.11b	412
5.18.7.2. Modalidades 802.11a y 802.11g	417
5.18.7.3. Modalidades 802.11n, 802.11ac y 802.11ad	419
5.18.7.4. Otras características de la transmisión radio	420

5.19. Sistemas y redes WiMAX.....	421
5.19.1. Introducción.....	421
5.19.2. Estandarización de WiMAX.....	422
5.19.3. Arquitectura de red.....	423
5.19.4. El MAC de IEEE 802.16.....	425
5.19.5. La capa física de WiMAX.....	426
5.19.5.1. OFDM.....	427
5.19.5.2. Capa física OFDMA.....	430
5.19.6. Cobertura de redes WiMAX.....	433
Capítulo 6: SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIÓN POR SATÉLITE.....	435
6.1. Consideraciones generales.....	435
6.1.1. Objeto.....	435
6.1.2. Breve reseña histórica.....	435
6.1.3. Aspectos operacionales y económicos.....	437
6.2. Estructura de un sistema de telecomunicación por satélite.....	438
6.3. Recursos de un sistema de telecomunicación por satélite.....	440
6.4. Geometría del enlace por satélite.....	443
6.4.1. Órbitas.....	443
6.4.2. Cobertura geométrica.....	444
6.4.3. Distancia satélite-estación terrena y parámetros de orientación..	446
6.4.4. Eclipses del satélite y conjunción con el Sol.....	449
6.5. Acceso múltiple.....	450
6.5.1. Acceso múltiple por distribución de frecuencia (FDMA).....	451
6.5.2. Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA).....	452
6.5.3. Comparación FDMA/TDMA.....	458
6.5.4. Acceso múltiple aleatorio (ALOHA).....	458
6.6. Trayecto digital ficticio de referencia para el servicio fijo por satélite...	459
6.7. Objetivos de calidad y disponibilidad.....	460
6.7.1. Disponibilidad.....	460
6.7.2. Calidad.....	460
6.8. Subsistema de comunicaciones de un satélite.....	461
6.9. Estaciones terrenas.....	465
6.9.1. Generalidades.....	465
6.9.2. Clasificación.....	465
6.9.3. Temperatura equivalente de ruido de la estación terrena y relación G/T.....	467
6.9.4. Características de la antena.....	472
6.9.5. Amplificador de salida.....	472
6.10. Calidad de un sistema de telecomunicaciones por satélite.....	472
6.10.1. Introducción.....	472
6.10.2. Modelo de sistema.....	473
6.10.3. Balances de los enlaces.....	474
6.10.4. Calidad para sistemas digitales.....	477
6.10.5. Ejemplos de enlaces.....	477
6.10.6. Concepto de degradación por enlace ascendente.....	478
6.11. Contorno de coordinación.....	479
6.12. Sistemas VSAT. Conectividad.....	481

Capítulo 7: SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES.....	485
7.1. Introducción.....	485
7.2. Composición de un sistema de comunicaciones móviles.....	487
7.3. Clasificación de los sistemas de comunicaciones móviles.....	488
7.4. Multiacceso y canalización.....	488
7.4.1. Multiacceso.....	488
7.5. Características de calidad.....	489
7.6. Clases de canales en comunicaciones móviles.....	491
7.6.1. Canales símplex.....	492
7.6.2. Canales símplex a dos frecuencias.....	492
7.6.3. Canales semidúplex.....	493
7.6.4. Sistemas dúplex.....	493
7.7. Sistemas PMR.....	493
7.8. Sistemas de concentración de enlaces.....	496
7.9. Sistemas de telefonía móvil pública.....	497
7.9.1. Introducción.....	497
7.9.2. Sistemas celulares.....	498
7.9.3. Geometría celular.....	499
7.9.4. División celular.....	503
7.9.5. Sectorización.....	503
7.9.6. Generalidades sobre el funcionamiento de un sistema celular....	505
7.10. Calidad de recepción en los sistemas móviles.....	506
7.11. Sistemas de telefonía móvil celular digital.....	508
7.11.1. Estructura de un sistema de radiocomunicaciones móviles digi- tales.....	508
7.11.2. Acceso múltiple TDMA.....	510
7.11.3. Acceso múltiple CDMA.....	512
7.12. Sistema de telefonía móvil digital GSM.....	517
7.12.1. Introducción.....	517
7.12.2. Arquitectura del sistema GSM.....	519
7.12.3. Servicios de Telecomunicación en GSM.....	521
7.12.4. Subsistema radio. Canales.....	521
7.12.4.1. Canales de tráfico.....	522
7.12.4.2. Canal de señalización.....	523
7.12.5. Canales físicos. Tramas.....	524
7.12.6. Multiplexación de los canales lógicos en canales físicos.....	527
7.12.6.1. Multitrama de 26 tramas.....	528
7.12.6.2. Multitrama de 51 tramas.....	530
7.12.7. Modulación GMSK.....	530
7.12.8. Codificación de canal.....	534
7.12.9. Sistema GPRS.....	535
7.13. Sistema DECT.....	538
7.13.1. Generalidades.....	538
7.13.2. Interfaz radio.....	539
7.14. Sistema TETRA.....	540
7.14.1. Generalidades.....	540
7.14.2. Interfaz radio.....	541

7.14.3. Canales TETRA	541
7.14.4. Sensibilidades de referencia	542
7.15. Sistema UMTS	542
7.15.1. Generalidades	542
7.15.2. Características principales de UTRAN	544
7.15.3. Estructura de la red UMTS	545
7.15.4. Canales UMTS	546
7.16. Sistema HSDPA	549
7.16.1. Características generales	549
7.16.2. Técnicas de retransmisión híbridas con combinación	551
7.16.3. Modulaciones de orden superior	551
7.16.4. Adaptación de la tasa binaria en función del estado del canal radio	552
7.16.5. Planificación de usuarios dependiente del estado del canal radio	553
7.17. Sistema HSUPA	554
7.17.1. Características generales	554
7.17.2. Traspaso con continuidad	556
7.17.3. Combinación de retransmisiones	556
7.17.4. Planificación de usuarios	556
7.17.5. Adaptación de tasa	557
7.18. Sistema LTE	558
7.18.1. Introducción	558
7.18.2. Arquitectura e interfaces	558
7.18.3. Interfaz radio	559
7.18.4. Estructura de la capa física	562
7.18.5. Canales físicos	565
7.18.6. Señales físicas	569
7.18.7. Capacidad LTE	571
7.18.8. Cobertura de enlaces LTE	575
7.19. Proyecto de sistemas móviles	578
7.19.1. Consideraciones generales	578
7.19.2. Intensidad de campo necesaria en los servicios móviles	579

Capítulo 8: SISTEMAS DE RADIODIFUSIÓN DIGITAL 583

8.1. Introducción a los sistemas de radiodifusión	583
8.2. Redes de frecuencia única con OFDM	585
8.3. Sistemas de radiodifusión sonora digital	587
8.4. Sistemas de televisión digital DVB	589
8.4.1. Introducción	589
8.4.2. Sistema DVB-T	589
8.4.3. Codificación de fuente	590
8.4.4. Multiplexación y codificación de canal	591
8.4.5. Emisiones de DVB-T	592
8.4.6. Planificación de DVB-T	595
8.4.7. Sistema DVB-H para el servicio de televisión móvil	599
8.4.8. Radiodifusión digital por satélite	601
8.4.9. Segunda generación de sistemas DVB de radiodifusión digital ..	604

Apéndice: ORGANISMOS DE NORMALIZACIÓN DE SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES.....	611
BIBLIOGRAFÍA.....	613
ÍNDICE TEMÁTICO.....	615