

# Sistemas de comunicaciones I

Margarita Cabrera  
Francesc Rey Micolau  
Francesc Tarrés Ruiz

Revisión a cargo de  
Francesc Rey Micolau  
Francesc Tarrés Ruiz

PID\_00184994

Material docente de la UOC


**Margarita Cabrera**

Ingeniera en Telecomunicaciones por la Escuela Técnica Superior de Telecomunicaciones de Barcelona (ETSETB), de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), en 1986. Doctora en Telecomunicaciones por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en 1991. Profesora titular de universidad del Departamento de Teoría de la señal y Comunicaciones (TSC) de la UPC. Desde 1990 imparte docencia en los estudios de Telecomunicaciones de la ETSETB, en las temáticas de comunicaciones analógicas y digitales, procesado de señal y matemáticas orientadas a las comunicaciones. Tiene una larga experiencia en participación en proyectos de innovación docente basados en el uso de nuevas tecnologías. Actualmente es responsable del proyecto COMWEB (Comunicaciones en la web), patrocinado por AGAUR y por la UPC y que se desarrolla en el departamento de TSC de la UPC. Web del grupo, incluyendo la página personal: <http://gps-tsc.upc.es/comm2>


**Francesc Rey Micolau**

Ingeniero de Telecomunicaciones por la Escuela Técnica Superior de Telecomunicaciones de Barcelona (ETSETB), de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en 1997. Doctor en Telecomunicaciones por la UPC en el 2006. Actualmente es profesor agregado en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones (TSC) de la UPC. Desde el 2009 ha impartido docencia en los estudios de Telecomunicaciones en la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova i la Geltrú (EPSVG), en la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Aeroespacial de Castelldefels (EETAC) y en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicaciones de Barcelona (ETSETB). Su experiencia docente está centrada en las temáticas de procesamiento de la señal, comunicaciones digitales y comunicaciones espaciales. Sus intereses en investigación se enmarcan también en el área de procesamiento de la señal aplicado a comunicaciones. Tiene una larga experiencia en proyectos de investigación nacionales e internacionales, así como contratos con empresas nacionales y con la Agencia Espacial Europea. Página personal: <http://gps-tsc.upc.es/comm/frey/>


**Francesc Tarrés Ruiz**

Profesor en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), donde actualmente es responsable de las asignaturas de Procesado digital de señal y de Sistemas audiovisuales, en la Escuela Politécnica Superior de Castelldefels (EPSC). Ha colaborado en el diseño de planes de estudio y de contenidos de asignaturas en diversas titulaciones y escuelas del sector de las telecomunicaciones, como Ingeniería la Salle, la Escuela Politécnica del Baix Llobregat y la EUEITT, centrándose en las temáticas de procesado de imagen y sistemas de difusión de contenidos audiovisuales. También ha organizado y participado en cursos de posgrado y másteres para diferentes empresas, como SONY, Televisió de Catalunya, Panasonic, Mitsubishi Electric, Fundación Vodafone, Centro de la Imagen y Tecnología Multimedia, etc. Ha publicado libros de texto en las áreas de procesado digital de señal, sistemas de televisión analógica y digital y sistemas multimedia. Página personal en: [http://gps-tsc.upc.es/GTAV/Tarres/Members\\_Tarres.htm](http://gps-tsc.upc.es/GTAV/Tarres/Members_Tarres.htm)

El encargo y la creación de este material docente han sido coordinados por la profesora: Eugènia Santamaría Pérez (2012)

Primera edición: septiembre 2012  
 © Margarita Cabrera, Francesc Rey Micolau, Francesc Tarrés Ruiz  
 Todos los derechos reservados  
 © de esta edición, FUOC, 2012  
 Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona  
 Diseño: Manel Andreu  
 Realización editorial: Eureka Media, SL  
 Depósito legal: B-19.364-2012



Los textos e imágenes publicados en esta obra están sujetos –excepto que se indique lo contrario– a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 España de Creative Commons. Podéis copiarlos, distribuirlos y transmitirlos públicamente siempre que citéis el autor y la fuente (FUOC. Fundación para la Universitat Oberta de Catalunya), no hagáis de ellos un uso comercial y ni obra derivada. La licencia completa se puede consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.es>

## Introducción

En el módulo “Introducción a los sistemas de comunicaciones”, hemos pretendido proporcionar una visión muy genérica de los sistemas de comunicaciones, identificando los diferentes componentes que forman el sistema, sus características y las funciones que tienen que llevar a cabo los diferentes módulos de procesado de señal al transmisor y al receptor. Las características de los sistemas y las funciones se han presentado en la mayoría de los casos sin justificar y muchos detalles han quedado “ocultos” para favorecer una visión global del sistema. En el resto de módulos de la asignatura, nos centraremos en los principios matemáticos de la modulación y veremos con detalle las diferentes alternativas existentes en función de las características de las aplicaciones. Los temas que se tratan en el resto de módulos pueden considerarse como fundamentales en los sistemas de comunicación digital. Algunos de los temas más específicos o aplicados se dejan para tratarlos con más detalle en asignaturas avanzadas.

En los módulos de comunicaciones analógicas se estudian este tipo de modulaciones bajo dos perspectivas, una perspectiva histórica comentando las modulaciones AM y FM, y una perspectiva más matemática generalizando el concepto de señales banda. Como caso general de estas modulaciones, se presentan las modulaciones I&Q (en fase y en cuadratura), mediante las cuales se pueden modular dos señales paso bajo diferenciadas, trasladando ambas señales a la frecuencia portadora. Se analizan con detalle dos sistemas de modulación con fuente o mensaje de naturaleza analógica (modulaciones AM y FM). Se presenta el mensaje que se tiene que transmitir como un proceso aleatorio y se caracteriza mediante la función de densidad espectral. Se analiza la degradación que provoca el ruido aditivo de canal y se mide mediante el cociente SNR de potencias en detección entre la señal útil y la señal de ruido. La recepción heterodina se presenta como una técnica de sintonización de frecuencias para el diseño de receptores de radiodifusión.

En el módulo “Introducción a los sistemas de comunicaciones digitales” hemos querido completar la introducción hecha en el primer módulo de este curso, incluyendo las especificidades de los sistemas de transmisión digital, y enfatizando la funcionalidad de dos bloques que no se detallan en el curso: el codificador de fuente y el codificador de canal.

En el módulo “Modulaciones digitales en banda base”, se estudian las modulaciones digitales en banda base, particularizando la mayor parte de los desarrollos en las modulaciones de pulsos por amplitud (PAM). En los primeros apartados del módulo se prioriza la definición de los principales parámetros, que resultan fundamentales en el diseño de una modulación M-PAM y se presenta el modulador digital formado básicamente por el codificador de símbo-

los y por el conformador de pulsos. Se estudian pulsos de tipo rectangular y pulsos limitados en banda. Se define formalmente el concepto de interferencia intersimbólica. Se proporcionan las herramientas matemáticas básicas para el análisis de la probabilidad de error. Como técnica sencilla para disminuir el nivel de ISI en la detección, se estudian técnicas básicas de ecualización transversal lineal.

En el módulo “Modulaciones digitales paso banda”, se estudian las modulaciones digitales paso banda y se clasifican en modulaciones lineales de tipos QAM (en fase y en cuadratura) y en modulaciones digitales de frecuencia. Se hace el análisis de la probabilidad de error de las modulaciones de tipos QAM en canales gaussianos, y se proporcionan las expresiones por modulaciones PSK. Se obtienen expresiones que dependen de la energía media transmitida por bit, de manera análoga a los desarrollos hechos con modulaciones PAM. Se lleva a cabo una presentación principalmente descriptiva de las modulaciones CPM, puesto que resultan un tipo de modulaciones angulares relativamente complejas de implementar y de demodular. Se enfatizan los objetivos de utilizar modulaciones de tipos CPM, enfocados a obtener una función de densidad espectral de ancho de banda relativamente reducido.

En el módulo “Multiplexación y sistemas de acceso múltiple”, se tratan las diferentes técnicas para la multiplexación de usuarios. Se presentan de forma breve los principios generales y se proporcionan algunos ejemplos que pretenden ilustrar la naturaleza y esencia de estos mecanismos para compartir los recursos.

## Objetivos

El objetivo general de la asignatura consiste en proporcionar una introducción general a los sistemas de comunicaciones, enfatizando en las técnicas de transmisión analógica y en las técnicas de transmisión digital. Este objetivo se desglosa en los siguientes:

- 1.** Conocer los elementos básicos que constituyen un sistema de comunicaciones, incluyendo los bloques y las funcionalidades del transmisor, el canal de comunicaciones y el receptor. Ser capaz de diferenciar entre las distintas funciones que se realizan en cada uno de los bloques, tanto desde el punto de vista de codificación de la información como desde el punto de vista de las modulaciones y demodulaciones de la señal. Identificar también las causas que puedan introducir distorsión en las señales recibidas.
- 2.** Conocer el análisis de las modulaciones analógicas de manera genérica, que se denominan modulaciones de fase y cuadratura, así como su caracterización como procesos aleatorios. Conocer la medida de la calidad de estas modulaciones mediante el parámetro de relación señal a ruido (SNR, *signal to noise rate*).
- 3.** Caracterizar las modulaciones digitales en banda base a partir de su ancho de banda y de sus prestaciones. Analizar la medida de la calidad de estas modulaciones mediante el parámetro de probabilidad de error de bit (BER, *bit error rate*).
- 4.** Caracterizar las modulaciones digitales paso banda y clasificarlas en modulaciones lineales y modulaciones frecuenciales.
- 5.** Conocer las diferentes alternativas existentes para que varios usuarios puedan compartir los mismos medios y recursos físicos, realizando comunicaciones simultáneas. Identificar las diferencias y las particularidades entre las diferentes estrategias de multiplexación de canales.

## Contenidos

### Módulo didáctico 1

#### **Introducción a los sistemas de comunicaciones**

Margarita Cabrera y Francesc Tarrés Ruiz

1. Introducción a los sistemas de comunicaciones
2. Transmisor, canal y receptor
3. Canal de comunicaciones
4. Modulador (en el transmisor)
5. Desmodulador (en el receptor)

### Módulo didáctico 2

#### **Comunicaciones analógicas: modulaciones AM y FM**

Francesc Rey Micolau y Francesc Tarrés Ruiz

1. Las comunicaciones telegráficas
2. La amplitud modulada
3. Otros esquemas de modulación de amplitud
4. La modulación en frecuencia

### Módulo didáctico 3

#### **Comunicaciones analógicas: señales paso banda**

Margarita Cabrera y Francesc Tarrés Ruiz

1. Modulaciones analógicas paso banda
2. Calidad del sistema de comunicaciones: la relación señal a ruido (SNR)

### Módulo didáctico 4

#### **Introducción a los sistemas de comunicaciones digitales**

Francesc Rey Micolau y Francesc Tarrés Ruiz

1. Introducción a los sistemas de comunicaciones digitales
2. El transmisor digital
3. El receptor digital

### Módulo didáctico 5

#### **Comunicaciones digitales en banda base**

Margarita Cabrera y Francesc Tarrés Ruiz

1. La modulación digital en banda base. Aspectos esenciales
2. Aplicaciones de modulaciones digitales en banda base
3. Modulaciones de pulsos de amplitud (PAM)
4. Probabilidad de error
5. Ocupación espectral de las modulaciones de pulsos
6. Interferencia intersimbólica

### Módulo didáctico 6

#### **Comunicaciones digitales paso banda**

Margarita Cabrera y Francesc Tarrés Ruiz

1. Modulaciones lineales QAM
2. Modulaciones digitales de frecuencia

Módulo didáctico 7

### **Multiplexación y sistemas de acceso múltiple**

Francesc Rey Micolau y Francesc Tarrés Ruiz

1. Conceptos básicos
2. La división en tiempo (TDM/A)
3. La división en frecuencia (FDM/A)
4. La división en código (CDM/A)
5. La división en espacio (SDM/A)
6. La división en polarización (PDM/A)
7. La división en frecuencias ortogonales (OFDM/A)
8. Mecanismos de acceso al medio por contienda: ALOHA (y variantes)
9. Mecanismos de acceso al medio por contienda: CSMA (y variantes)

## Abreviaturas

**ADPCM** *adaptive pulse code modulation*

**AM** *amplitude modulation*

**AMI** *alternate mark inversion*

**APK** *amplitude and phase keying*

**APSK** *amplitude and phase shift keying*

**AWGN** *additive white gaussian noise*

**BCCH** *broadcast control channel*

**BPSK** *binary PSK*

**CC** *convolucional code*

**CCCH** *common control channel*

**CDMA** *code division multiple access*

**COFDM** *coded OFDM*

**CPCH** *common physical channel*

**CP** *cyclic prefix*

**CPFSK** *continuous phase frequency shift keying*

**CPM** *continuous phase modulation*

**CRC** *cyclic redundancy checksum*

**DAB** *digital audio broadcasting*

**DCCH** *dedicated control channel*

**DECT** *digital enhanced cordless telecommunications*

**DeIL** *deinterleaving*

**DL** *down link*

**DPCCH** *dedicated physical control channel*

**DPCH** *dedicated physical channel*

**DPDCH** *dedicated physical data channel*

**DPSK** *differential PSK*

**DRM** *digital radio mondiale*



**DS-CDMA** *direct sequence CDMA*

**DTX** *discontinuous transmission*

**DVB** *digital video broadcasting*

**DSB** *double side band*

**ETSI** *European Telecommunications Institute*

**FDD** *full duplex division*

**fdp** *función de densidad de probabilidad*

**FEC** *forward error correction*

**FIR** *finite impulse response*

**FM** *frequency modulation*

**FSK** *frequency shift keying*

**GMSK** *gaussian MSK*

**GSM** *global system of mobile communications*

**HDB3** *high Density Bipolar of order 3 code*

**ICI** *inter carrier interference*

**IEEE** *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

**IIR** *infinite impulse response*

**IL** *interLeaving*

**ISDN** *integrated Services digital network*

**ISI** *inter symbol interference*

**I&Q** *en fase y en cuadratura*

**LTP** *long term prediction*

**MAI** *multiple access interference*

**MSK** *minimum shift keying*

**NRZ** *non return to zero*

**NRZI** *NRZ inverted*

**N-CDMA** *narrow CDMA*

**OFDM** *orthogonal frequency division multiplex*

**OFDMA** OFDM access

**OVSF** orthogonal variable spreading factor

**PAM** pulse amplitude modulation

**PPM** pulse position modulation

**PSK** phase Shift Keying

**QAM** quadrature amplitude modulation

**QoS** quality of service

**QPSK** quadrature and phase shift keying

**RF** radiofrecuencia

**RPE** regular pulse excited

**RRC** root raised cosinus

**RS-232** recommended standard 232

**RZ** return to zero

**SC** single carrier

**SF** spreading factor

**SER** symbol error rate

**SFN** single frequency network

**SNR** signal to noise rate

**SOFDMA** scalable OFDMA

**TCH** traffic chanel

**TCH/FS** TCH full rate speech

**TDD** time duplex division

**TDMA** time division multiple access

**TTI** transmisión time interval

**UMTS** universal mobile telecommunication system

**USB** universal serial bus

**UTRA** UMTS terrestrial radio access

**VAD** voice activity detector

**VCO** *voltage control oscillator*

**WIMAX** *worldwide interoperability for microwave access*

**WLAN** *wireless local area network*

**W-CDMA** *wideband CDMA*

**ZF** *zero forcing*

## **Bibliografía**

### **Bibliografía básica**

**Carlson, A. B.; Crilly, P. B.; Rutledge, J. C.** (2007). *Sistemas de comunicación*. McGraw-Hill.

**Proakis, J. G.; Salehi, M.** (2002). *Communication systems engineering* (2.<sup>a</sup> ed.). Prentice Hall.

### **Bibliografía complementaria**

**Proakis, J.** (2003). *Digital communications* (4.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.

**Sklar, B.** (2001). *Digital communications: fundamentals and applications* (2.<sup>a</sup> ed.). Prentice Hall.

**Benedetto, S.; Biglieri, E.** (1999). *Principles of digital transmission*. Kluwer Academic Press / Plenum Publishers.