

# Teoría de la Comunicación

Apuntes de clase

Javier Rodrigo López <sup>1</sup>

17 de febrero de 2021



<sup>1</sup>Correo electrónico: [javiolonchelo@gmail.com](mailto:javiolonchelo@gmail.com)



UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID



## Introducción

---

Imagen de la portada: *Le magie noire*, por René Magritte.

Esta asignatura es básica para cualquier ingeniería de Telecomunicaciones. Se basa principalmente en las matemáticas explicadas en Señales y Sistemas. Por ello, para las prácticas de laboratorio usaremos MATLAB.

El Bloque 1 representa el 40 %

La evaluación del laboratorio se realizará a partir de los informes de las prácticas (50 %) y del examen (50 %).

Teoría 90 % + LAB 10 %

Repasar presentación en powerpoint para completar introducción.

# Índice general

Introducción . . . . .	2
<b>1. Modelo de sistema de comunicación</b> . . . . .	<b>7</b>
1.1. Definiciones básicas . . . . .	7
1.2. Esquema funcional de un sistema de comunicación . . . . .	7
1.2.1. Fuentes de información . . . . .	7
1.2.2. Transmisor . . . . .	8
<b>2. Caracterización de señales</b> . . . . .	<b>9</b>
2.1. Representaciones logarítmicas . . . . .	9
2.2. Caracterización Temporal . . . . .	10
2.3. Caracterización Espectral . . . . .	10
2.3.1. Densidad espectral de potencia . . . . .	10
2.4. Señales habituales . . . . .	10
2.4.1. Señal triangular . . . . .	10
2.4.2. Señal cuadrada . . . . .	10
<b>3. Ruido térmico</b> . . . . .	<b>11</b>
3.1. Caracterización del ruido térmico . . . . .	11
3.2. Caracterización del ruido en cuadripolos y dipolos . . . . .	11
3.3. Fórmula de Fris . . . . .	11
3.4. Modelo de un Analizador de Espectros . . . . .	11
<b>4. Distorsión</b> . . . . .	<b>13</b>
4.1. Tipos de distorsión . . . . .	13
4.2. Distorsión lineal . . . . .	13
4.3. Distorsión no lineal . . . . .	13
<b>5. Modulaciones analógicas</b> . . . . .	<b>15</b>
5.1. Concepto de modulación y tipos . . . . .	15
5.2. Modulaciones lineales: AM, DBL . . . . .	15
5.3. Modulaciones angulares: FM . . . . .	15
5.4. Calidad . . . . .	15
<b>6. Conversión A/D y codificación PCM</b> . . . . .	<b>17</b>
6.1. Elementos de un sistema de comunicaciones digitales . . . . .	17
6.2. Conversión A/D . . . . .	17
6.3. Cuantificación uniforme y no uniforme . . . . .	17
6.4. Multiplex por División en el Tiempo (TDM) . . . . .	17
<b>7. Transmisión digital por canales de ancho de banda limitado</b> . . . . .	<b>19</b>
7.1. Modelo de Transmisión Digital . . . . .	19
7.2. Ancho de banda de señales banda base . . . . .	19
7.3. Interferencia entre símbolos (ISI) . . . . .	19
7.4. Criterio de Nyquist . . . . .	19
7.5. Filtrado en coseno alzado . . . . .	19
7.6. Diagrama de ojos . . . . .	19
7.7. Códigos de línea . . . . .	19
<b>8. Transmisión digital banda base con ruido</b> . . . . .	<b>21</b>
8.1. Representación geométrica de señales . . . . .	21

8.2. Implementaciones del receptor: correlador, filtro atrapado . . . . .	21
8.3. Teoría de la Detección (receptor binario óptimo) . . . . .	21
8.4. Probabilidad de error en sistemas binarios . . . . .	21
8.5. Ejemplos de expresiones de probabilidad de error para varias señalizaciones binarias . . . . .	21

<b>9. Modulaciones digitales</b>	<b>23</b>
9.1. Modulaciones lineales. Fórmulas básicas . . . . .	23
9.2. ASK . . . . .	23
9.3. PSK . . . . .	23
9.4. QAM y APK . . . . .	23
9.5. FSK . . . . .	23
9.6. Comparación entre modulaciones digitales . . . . .	23

Javier Rodrigo López

# Capítulo 1

## Modelo de sistema de comunicación

### 1.1 Definiciones básicas

---

La **ITU** (Unión Internacional de Telecomunicaciones) nos indica la terminología que debemos usar en el ámbito de las telecomunicaciones.

**Canal de transmisión:** Conjunto de medios necesarios para asegurar la transmisión de señales en un sentido entre dos puntos.

**Señal:** Fenómeno físico en el cual pueden variar una o más características para **representar información**.

- **Canal de frecuencia:** Parte del espectro de frecuencias que se destina a ser utilizado para la transmisión de señales y que puede determinarse por su frecuencia central y el ancho de banda asociado.

**Telecomunicación:** Tota transmisión, emisión o recepción de señales que representan signos, escritura, imágenes y sonidos o **información de cualquier naturaleza** por hilo, ondas electromagnéticas, medios ópticos u otros sistemas electromagnéticos.

**Teoría de la comunicación:** Tiene por objeto encontrar las técnicas más adecuadas que, con los condicionantes económicos, tecnológicos... permiten optimizar el **consumo de ancho de banda** (BW) y **potencia** ( $P$ ) para poder transmitir una determinada información con una **calidad determinada**.

### 1.2 Esquema funcional de un sistema de comunicación

---

FALTA AÑADIR IMAGEN

#### 1.2.1. Fuentes de información

Las diferentes fuentes de información pueden clasificarse como:

**Analógica** La información a transmitir es una señal continua en el tiempo. Cabe mencionar que las señales analógicas pueden digitalizarse. Por ejemplo, una forma de conseguirlo sería mediante cuantificación y codificación PCM (explicado más adelante, falta añadir una referencia cuando lleguemos a esa parte del temario, en el Tema 6).

**Digital** La información consiste en símbolos pertenecientes a un alfabeto finito, que se envían secuencialmente en intervalos discretos de tiempo. Los **símbolos** son los posibles valores que puede tomar. Por ejemplo, una señal digital binaria tiene dos símbolos.

### 1.2.2. Transmisor

El transmisor convierte la señal de información (fuente) en señales eléctricas o electromagnéticas (formas de onda) adecuadas para su transmisión a través del medio físico (canal de comunicaciones).

Existen varios tipos de transmisiones:

- Transmisión **banda base**  $\longleftrightarrow$  Transmisión paso banda (**modulación**).
  - En banda base: Se emite la información en la misma banda que ocupa, como se generó la fuente.
  - Con modulación: La banda ocupada por la información se traslada a otra más alta. Esto se hace para:
    - Adaptar la banda transmitida a los requerimientos del canal.
    - Multiplexar señales. Es decir, permitir que varias compartan el mismo canal de comunicaciones. **FDM** (Multiplex por división en frecuencia).
  
- Transmisión **analógica**  $\longleftrightarrow$  Transmisión **digital**

#### Modulación

La señal moduladora modula una señal portadora (sinusoidal en nuestro caso)

$$S_{\text{moduladora}}(t)$$

$$x_p(t) = A \sin(\omega t + \phi)$$

$$\omega_c = 2\pi f_c$$

[Representación del espectro del seno]

Portadora	Analógica	Digital
Senoidal	AM <sup>1</sup>	ASK
	FM	FSK
	PM	PSK
Cuadrada	PAM o PCM	
	PPM	
	PWM	

<sup>1</sup>Modulación en amplitud



## Capítulo 2

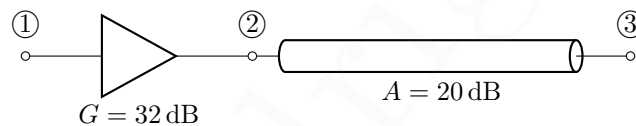
# Caracterización de señales

### 2.1 Representaciones logarítmicas

#### Ejercicio 1

Tenemos un canal de transmisión con un amplificador que ofrece una ganancia  $G$  de 32 dB y un cable muy largo que afecta aplicando una atenuación  $A$  de 20 dB a la señal. A la entrada del amplificador (punto 1), introducimos un tono con amplitud de pico 2 V. Sabemos que la resistencia es de  $50\Omega$ .

Rellena la tabla con los valores que se piden para cada parte del canal de transmisión.



#### Solución

Las respuestas han sido coloreadas de color verde en la tabla, y a continuación puedes observar la resolución del ejercicio. Existen numerosas formas de llegar al resultado. Esta solución es la que se me ocurrió según lo resolvía.

Magnitud	①	②	③
$x_p$ [V]	2 V	79.62 V	7.96 V
$p$ [W]	0.04 W	7.94 W	0.794 W
$P$ [dBW]	-14 dBW	18 dBW	-2 dBW
$P$ [dBm]	16 dBm	48 dBm	18 dBm

Podemos calcular  $p_1$  sabiendo que la potencia de un tono es la siguiente:

$$p_1 = \frac{x_p^2}{2R} = \frac{2^2}{2 \cdot 50} = 0.04 \text{ W}$$

Por lo tanto:

$$P_1[\text{dBW}] = 10 \log(0.04) = -14 \text{ dBW}$$

$$P_1[\text{dBm}] = 10 \log(40) = 16 \text{ dBm}$$

De aquí, podemos obtener el resto de potencias logarítmicas:

$$P_2[\text{dBW}] = P_1 + G = -14 + 32 = 18 \text{ dBW}$$

$$P_2[\text{dBm}] = P_1 + G = 16 + 32 = 48 \text{ dBm}$$

$$P_3[\text{dBW}] = P_1 - A = 18 - 20 = -2 \text{ dBW}$$

$$P_3[\text{dBm}] = P_1 - A = 48 - 20 = 18 \text{ dBm}$$

He decidido obtener los valores restantes de potencia lineal  $p$  a partir de las potencias logarítmicas  $P$ <sup>1</sup>:

$$\begin{aligned} p_2 &= 10^{\frac{18}{20}} = \boxed{7.94 \text{ W}} \\ p_3 &= 10^{\frac{-2}{20}} = \boxed{0.794 \text{ W}} \end{aligned}$$

Por último, nos queda averiguar los dos restantes valores de pico  $x_p$ . Haremos uso de la ganancia en tensión  $g_v$ :

$$g = \frac{p_2}{p_1} = \frac{V_2^2/R}{V_1^2/R} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 = g_v^2 \quad \Rightarrow \quad g_v = \sqrt{g}$$

Sabiendo que la atenuación es simplemente una ganancia negativa, podemos obtener los valores de pico:

$$\begin{aligned} x_{p2} &= x_{p1} \cdot g_v = x_{p1} \cdot \sqrt{g} = 2 \cdot \sqrt{10^{\frac{32}{10}}} = \boxed{79.62 \text{ V}} \\ x_{p3} &= x_{p2} \cdot a = 79.62 \cdot \sqrt{10^{-\frac{20}{10}}} = \boxed{7.962 \text{ V}} \end{aligned}$$

## 2.2 Caracterización Temporal

---

## 2.3 Caracterización Espectral

---

### 2.3.1. Densidad espectral de potencia

La densidad espectral de potencia  $G_x(f)$  mide la potencia de la señal por unidad de ancho de banda (W/Hz).

En un sistema LTI con respuesta en frecuencia  $H(f)$ , la densidad espectral a la salida se puede calcular como:

$$\boxed{G_y(f) = G_x(f) \cdot |H(f)|^2}$$

#### Ancho de banda

---

El **ancho de banda a 3 dB** se mide entre las frecuencias donde la potencia es la mitad con respecto al máximo.

el **ancho de banda equivalente** es el ancho de un espectro rectangular ficticio que contendría la misma potencia que la señal original. Es decir, que tiene potencia equivalente. [añadir imagen]

El **ancho de banda entre nulos** se explicará con más detalle en el Tema 7 [falta referencia]

#### Ejercicio 2

---

## 2.4 Señales habituales

---

### 2.4.1. Señal triangular

### 2.4.2. Señal cuadrada

---

<sup>1</sup> Recuerda que  $P[\text{dBW}] = 10 \log \left( \frac{p[\text{W}]}{1 \text{ W}} \right) \Rightarrow p = 10^{\frac{P[\text{dBW}]}{10}} \text{ W}$

## Capítulo 3

# Ruido térmico

### 3.1 Caracterización del ruido térmico

---

### 3.2 Caracterización del ruido en cuadripolos y dipolos

---

### 3.3 Fórmula de Fris

---

### 3.4 Modelo de un Analizador de Espectros

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 4

# Distorsión

### 4.1 Tipos de distorsión

---

### 4.2 Distorsión lineal

---

### 4.3 Distorsión no lineal

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 5

# Modulaciones analógicas

5.1 Concepto de modulación y tipos

---

5.2 Modulaciones lineales: AM, DBL

---

5.3 Modulaciones angulares: FM

---

5.4 Calidad

---

Javier Rodrigo López



## Capítulo 6

# Conversión A/D y codificación PCM

6.1 Elementos de un sistema de comunicaciones digitales

---

6.2 Conversión A/D

---

6.3 Cuatificación uniforme y no uniforme

---

6.4 Multiplex por División en el Tiempo (TDM)

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 7

# Transmisión digital por canales de ancho de banda limitado

7.1 Modelo de Transmisión Digital

---

7.2 Ancho de banda de señales banda base

---

7.3 Interferencia entre símbolos (ISI)

---

7.4 Criterio de Nyquist

---

7.5 Filtrado en coseno alzado

---

7.6 Diagrama de ojos

---

7.7 Códigos de línea

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 8

# Transmisión digital banda base con ruido

8.1 Representación geométrica de señales

---

8.2 Implementaciones del receptor: correlador, filtro atrapado

---

8.3 Teoría de la Detección (receptor binario óptimo)

---

8.4 Probabilidad de error en sistemas binarios

---

8.5 Ejemplos de expresiones de probabilidad de error para varias señalizaciones binarias

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 9

# Modulaciones digitales

9.1 Modulaciones lineales. Fórmulas básicas

---

9.2 ASK

---

9.3 PSK

---

9.4 QAM y APK

---

9.5 FSK

---

9.6 Comparación entre modulaciones digitales

---