

## IEE2514/IEE3514 Comunicaciones Digitales

### Aspectos generales

**Horario:** Martes y jueves de 10:00 a 11:20 (M-J:2).

- Primera clase: jueves 3 de agosto.
- Última clase: jueves 16 de noviembre.

**Lugar:** Una mitad de las clases serán tanto presenciales como transmitidas simultáneamente por YouTube *streaming*. La otra mitad de las clases serán dictadas exclusivamente por *streaming* (en vivo).

La agenda de clases será llevada en el calendario Google del curso (accesible via Classroom, ver más abajo). El calendario indicará la URL del *stream* de cada clase.

Como herramienta para el estudio, todas las clases quedarán disponibles en una *playlist* privada en YouTube, pero ello siempre y cuando la participación a clases en vivo, tanto presencial como online, se mantenga sana.

Las fechas de las clases presenciales son:

- Del jueves 3 de agosto al jueves 24 de agosto inclusive.
- Del martes 26 de septiembre al jueves 5 de octubre inclusive.
- Del martes 7 de noviembre al jueves 16 de noviembre inclusive.
- La sala de las clases será informada oportunamente.
- Estar preparado para interactuar con el profesor via Google Hangouts durante las clases es obligatorio. El teléfono celular es suficiente para ello.

**Contacto con el profesor:** Por email y Google Hangouts a `obe@uc.cl`.

- Favor usar redacción clara y concisa e indicar nombre del alumno y del curso en alguna parte del mensaje.

**Web del curso:** En Google Classroom (<http://classroom.google.com>)

- Código de suscripción: `8ek3zwb`.
- Todos los alumnos UC deben suscribirse usando su cuenta Gmail UC. Alumnos externos deben usar su cuenta Google institucional o en su defecto una cuenta Gmail clásica con el visto bueno del profesor.

**Atención de Alumnos:** A solicitud individual y en horario y modalidad por definir en cada caso.

**Créditos:** 10

**Carácter:** Curso perteneciente al *minor* en Electrónica y Telecomunicaciones (versión nivel 2000) o bien optativo de profundización o postgrado (versión nivel 3000).

**Requisitos:** IEE 2513 *Comunicaciones* o equivalente.

**LatinaUC:** Laboratorio de Tecnologías Inalámbricas UC

- <http://www.latina.uc.cl>
- <https://twitter.com/LatinaUC>
- <https://www.facebook.com/LatinaUC>

## Descripción

Este curso enseña los conceptos fundamentales de comunicaciones digitales y entrega los conocimientos necesarios para analizar y diseñar sistemas de comunicaciones digitales eficientes. Se estudia como procesar óptimamente señales recibidas bajo ruido para minimizar la probabilidad de error, así como diseño óptimo de señales y transmisión digital espectralmente eficiente en canales con ancho de banda limitado.

## Objetivos

El objetivo de este curso es dotar a los alumnos con el conocimiento teórico y las herramientas matemáticas necesarias para comprender y modelar la capa física de sistemas de comunicaciones digitales modernos, y capacitarlos para analizar problemas y diseñar soluciones en este ámbito. Los alumnos aprenderán los compromisos que ello involucra en términos de eficiencia espectral, eficiencia energética y complejidad de implementación.

Al finalizar el curso el alumno será capaz de:

- Comprender los aspectos fundamentales que inciden en la eficiencia espectral, eficiencia energética y complejidad de implementación de sistemas de comunicaciones modernos.
- Comparar las modulaciones digitales lineales usadas comúnmente en sistemas de portadora única, en términos de sus características espectrales y de su probabilidad de error.
- Simular computacionalmente sistemas de comunicaciones digitales.
- Distinguir las diferencias y requerimientos técnicos de sistemas de comunicaciones digitales de banda ancha vs. aquellos de banda angosta.
- Comprender las ventajas de modulaciones multi-portadora para aplicaciones de banda ancha.
- Escoger el mejor tipo de modulación para una aplicación determinada de comunicaciones digitales, y diseñar los parámetros fundamentales que definen la capa física.

## Contenido

1. *Recepción óptima*: receptor de correlación, casos binario y  $M$ -ario, implementación como filtro adaptado, optimalidad del filtro adaptado, formulación del receptor óptimo en términos de envolventes complejas.
2. *Representación geométrica de señales*: expansión en serie de señales con funciones base ortonormales, espacio de señales, formulación geométrica del receptor óptimo.
3. *Diseño de señales*: FSK y PSK binario coherente, probabilidad de error de bit, repaso de  $M$ -PAM y  $M$ -QAM coherente, probabilidad de error de símbolo, comparación de desempeño de distintas modulaciones, cota de la unión, características espectrales.
4. *Comunicaciones digitales de banda ancha*: Modelación discreta del canal de banda ancha, canales dispersivos, interferencia intersimbólica, teorema de Nyquist para cero ISI, nociones de ecualización.
5. *Modulación multitono (OFDM)*: multiplexación por división en frecuencia, caso ortogonal, implementación digital mediante transformada rápida de Fourier, ancho de banda de coherencia y número de sub-portadoras, intervalo de guarda y prefijo cíclico.

## Programa

Clase	Contenido
Clase 1	Introducción. Un poco de historia. Motivación: ¿Por qué comunicar información en formato digital? Ocho preguntas fundamentales a responder en el curso.
Clase 2	Demodulación óptima. Descripción del problema. Caso binario. Detección con una muestra. Criterios MAP y de máxima verosimilitud.
Clase 3	Detección con $K$ muestras y extensión a la detección con señales continuas. Deducción del receptor de correlación.
Clase 4	Generalización M-aria y relación con el filtro adaptado.
Clase 5	Detector óptimo con envolventes complejas. Ejemplificación con detección de modulación FSK binaria coherente y cálculo de probabilidad de error.
Clase 6	Proyecto: Discusión de las etapas 1 y 2.
Clase 7	Interpretación geométrica de señales. Representación vectorial de señales continuas como combinación lineal de funciones ortonormales.
Clase 8	Representación geométrica de ruido. Deducción de la representación geométrica del receptor de correlación.
Clase 9	Análisis y comentarios sobre la representación geométrica del receptor de correlación. Relación con el proyecto del curso. Probabilidad de error de BFSK utilizando la representación geométrica.
Clase 10	Probabilidad de error de FSK por proyección de vectores.
Clase 11	Probabilidad de error de otras modulaciones M-arias. Cota de la Unión (Union Bound).
Clase 12	Características espectrales de señales modulantes.
Clase 13	Características espectrales (continuación). Introducción a comunicaciones digitales con canales de ancho de banda limitado.
Clase 14	Modelamiento de señales a través de canales con respuesta al impulso $h(t)$ . Interferencia intersimbólica y diagrama de ojo.
Clase 15	Discusión del Proyecto: Etapas 3 y 4. ¿Por qué simular hasta tener aproximadamente 100 errores?
Clase 16	Criterio de cero ISI de Nyquist.
Clase 17	Transmisión a través de canales con ancho de banda limitado: uso de pulsos sinc( $\cdot$ ).
Clase 18	Transmisión a través de canales con ancho de banda limitado: pulso coseno elevado. Relación entre tasa de transmisión y ancho de banda bajo criterio de cero ISI. Pulso raíz de coseno elevado.
Clase 19	Canales con distorsión. Introducción a equalizadores. Repaso de filtros lineales discretos.
Clase 20	Nociones de ecualizadores MSLE, ZF, MMSE y DFE.
Clase 21	Nociones Propagación inalámbrica. Pérdida de potencia con distancia en el espacio libre (ecuación de Friis). Pérdida de potencia con distancia en entornos con obstáculos, exponente de pérdida. Desvanecimiento de sombra.
Clase 22	Proyecto: Discusión de las etapas 5 y 6.

Clase	Contenido
Clase 23	Desvanecimiento local. Modelo de desvanecimiento Rayleigh. Análisis de la envolvente de una portadora pura transmitida por un canal con desvanecimiento Rayleigh.
Clase 24	Distribución estadística de la razón señal a ruido en canales con desvanecimiento Rayleigh. Probabilidad de error media en función de la razón señal a ruido media de un canal con desvanecimiento.
Clase 25	Canales dispersivos. Modelamiento del canal inalámbrico estático con propagación de múltiples trayectorias. $\tau_{\text{RMS}}$ . Relación entre $\tau_{\text{RMS}}$ , tasa de datos e ISI (interpretación en el dominio del tiempo). Relación entre $\tau_{\text{RMS}}$ y selectividad en frecuencia (interpretación en el dominio de la frecuencia).
Clase 26	Proyecto: Discusión de la etapa 7.
Clase 27	Introducción a modulación multi-portadora. Modulación OFDM.
Clase 28	Implementación de modulador OFDM en base a la transformada rápida de Fourier. Intervalo de guarda y prefijo cíclico. Ecualización de señales OFDM en el dominio de la frecuencia.
Clase 29	Relación entre la transformada de Fourier del receptor OFDM con el filtro adaptado. Optimalidad del receptor OFDM.
Clase 30	Implementación del modulador y demodulador OFDM con prefijo cíclico y ecualizador en frecuencia. Relación entre $\tau_{\text{RMS}}$ , tamaño del prefijo cíclico y número de subportadoras.

## Metodología

Clases expositivas complementadas con tareas y con un proyecto semestral dividido en varias etapas. Importante: el proyecto es individual y requiere el uso de Matlab. Cada alumno debe disponer o tener acceso a una licencia de dicho software.

## Evaluación

Proyecto 60 %, tareas 30 % y asistencia 10 %.

El proyecto será individual y consistirá en implementar un simulador de un sistema de comunicaciones digitales. Su desarrollo será por etapas. Se estima que habrá siete u ocho etapas, las que serán sucesivamente acumulativas. Cada etapa tendrá un puntaje de acuerdo a su dificultad y cantidad de trabajo y requerirá una entrega breve y sencilla para evaluar el trabajo. La nota del proyecto,  $P$ , será proporcional a la suma de los puntajes de todas las etapas con respecto al puntaje total máximo posible.

Las tareas serán individuales y ocasionales, y seguirán una agenda que no interfiera con el proyecto. Su propósito es reforzar aspectos de la materia que no son cubiertos por el proyecto, y podrán incluir ejercicios teóricos, experimentos computacionales, mini-proyectos computacionales, búsquedas bibliográficas, presentaciones o controles en clase, etc. Se calculará una nota de tareas,  $T$ , proporcional a la suma de los puntajes de las tareas con respecto al puntaje de tareas máximo posible.

La asistencia será evaluada de la siguiente forma. En momentos arbitrarios de algunas clases el

profesor anotará a los alumnos presentes (si clase presencial) y solicitará el envío de información por Hangouts para determinar a los asistentes por *streaming*. Los alumnos presentes recibirán 1 punto. Se calculará una nota de asistencia,  $A$ , proporcional a la suma de los puntajes de asistencia con respecto al puntaje de asistencia máximo posible.

La aprobación del curso está condicionada a cumplir con los siguientes criterios:

1.  $A \geq 5,5$ . Equivale a tener al menos 75 % de asistencia.
2. Se debe lograr al menos 50 % del puntaje en el 75 % de las tareas.
3. “Cumplir satisfactoriamente” con la entrega de la última etapa del proyecto.

En caso de cumplirse los criterios anteriores, la nota final  $F$  será

$$F = 0,6P + 0,3T + 0,1A.$$

De lo contrario, la nota final será calculada como  $F = \min\{0,6P + 0,3T + 0,1A; 3,9\}$

## Compromiso con el Código de Honor de la Universidad

Este curso adscribe al Código de Honor de la Pontificia Universidad Católica de Chile y todo estudiante del curso declara conocerlo y respetarlo:

“Como miembro de la comunidad de la Pontificia Universidad Católica de Chile me comprometo a respetar los principios y normativas que la rigen. Asimismo, prometo actuar con rectitud y honestidad en las relaciones con los demás integrantes de la comunidad y en la realización de todo trabajo, particularmente en aquellas actividades vinculadas a la docencia, el aprendizaje y la creación, difusión y transferencia del conocimiento. Además, velaré por la integridad de las personas y cuidaré los bienes de la Universidad.”

## Relación con otras materias

El curso recurre intensivamente a herramientas matemáticas vistas en *IEE2103 Señales y Sistemas* y *EYP1113 Probabilidades y Estadísticas*, y profundiza conceptos de comunicaciones digitales tratados en *IEE2513 Comunicaciones*. El curso es requisito recomendado para *IEE3584 Comunicaciones Inalámbricas* (dictado en segundo semestre de años pares).

## Referencias

- [1] C. Oberli, *Apuntes de Comunicaciones Digitales*, 2017-2 ed., Aug. 2016. [Online]. Available: [www.latina.uc.cl](http://www.latina.uc.cl)
- [2] S. Haykin, *Communication Systems*, 4th ed. Wiley, 2001.
- [3] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed. McGraw-Hill, 2000.

- [4] R. McDonough and A. D. Whalen, *Detection of Signals in Noise*, 2nd ed. Academic Press, 1995.
- [5] H. Harada and R. Prasad, *Simulation and Software Radio for Mobile Communications*. Artech House, 2002.