Guia docent
300038 - LCSF - Laboratori de Comunicacions Sense Fil

Última modificació: 11/05/2026

Unitat responsable: Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels
Unitat que imparteix: 739 - TSC - Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions.

Titulació: GRAU EN ENGINYERIA DE SISTEMES DE TELECOMUNICACIÓ (Pla 2009). (Assignatura obligatòria).

Curs: 2026 **Crèdits ECTS:** 6.0 **Idiomes:** Català, Castellà

PROFESSORAT

Professorat responsable: Definit a la infoweb de l'assignatura.

Altres: Definit a la infoweb de l'assignatura.

CAPACITATS PRÈVIES

- Operativitat amb nombres complexos, matrius, variables i processos aleatoris.
- Anàlisi de senyals i sistemes, analògics i digitals, en el domini temporal i freqüencial. Anàlisi de Fourier.
- Modulacions de portadora única i multiportadora. Operativa amb equivalent pas baix i representacions fasorials.
- Teoria electromagnètica bàsica: propagació en espai lliure, polarització, coeficient de reflexió, efecte doppler...
- Estratègies de codificació de canal.
- Coneixements bàsics de comunicacions, antenes i emissors i receptors.
- Teoria bàsica de teletràfic. Fórmules d'Erlang-B i Erlang-C.

REQUISITS

Prerequisit:
- COMUNICACIONS SENSE FIL

COMPETÈNCIES DE LA TITULACIÓ A LES QUALS CONTRIBUEIX L'ASSIGNATURA

Específiques:
7. CE 22 SIS. Capacidad para aplicar las técnicas en que se basan las redes, servicios y aplicaciones de telecomunicación tanto en entornos fijos como móviles, personales, locales o a gran distancia, con diferentes anchos de banda, incluyendo telefonía, radiodifusión, televisión y datos, desde el punto de vista de los sistemas de transmisión. (CIN/352/2009, BOE 20.2.2009)

Genèriques:
5. ÚS EFICIENT D'EQUIPS I INSTRUMENTACIÓ - Nivell 2: Utilitzar correctament instrumental, equips i programari dels laboratoris d'ús específic o especialitzat, coneixent-ne les prestacions. Realitzar una anàlisi crítica dels experiments i resultats obtinguts. Interpretar correctament manuals i catàlegs. Treballar de manera autònoma, individualment o en grup, al laboratori.

Transversals:
1. APRENENTATGE AUTÒNOM - Nivell 2: Dur a terme les tasques encomanades a partir de les orientacions bàsiques donades pel professorat, decidint el temps que cal emprar per a cada tasca, incloent-hi aportacions personals i ampliant les fonts d'informació indicades.
2. COMUNICACIÓ EFICAÇ ORAL I ESCRITA - Nivell 2: Utilitzar estratègies per preparar i dur a terme les presentacions orals i redactar textos i documents amb un contingut coherent, una estructura i un estil adequats i un bon nivell ortogràfic i gramatical.
3. TERCERA LLENGUA: Conèixer una tercera llengua, que serà preferentment l'anglès, amb un nivell adequat de forma oral i per escrit i amb consonància amb les necessitats que tindran les titulades i els titulats en cada ensenyament.
4. TREBALL EN EQUIP - Nivell 1: Participar en el treball en equip i col·laborar-hi, un cop identificats els objectius i les responsabilitats col·lectives i individuals, i decidir conjuntament l'estratègia que s'ha de seguir.
6. ÚS SOLVENT DELS RECURSOS D'INFORMACIÓ - Nivell 2: Després d'identificar les diferents parts d'un document acadèmic i d'organitzar-ne les referències bibliogràfiques, dissenyar-ne i executar-ne una bona estratègia de cerca avançada amb recursos d'informació especialitzats, seleccionant-hi la informació pertinent tenint en compte criteris de rellevància i qualitat.

METODOLOGIES DOCENTS

El curs combina les següents metodologies docents:
• Aprenentatge autònom: els estudiants treballaran els material d'autoaprenentatge a casa i reservant el lab. fora de l'horari de classe.
• Els estudiants desenvoluparan diferents projectes en equip on hauran d'organitzar la feina autònomament per aconseguir certes fites amb la guia del professor.
• Classes magistrals: part de les classes teòriques s'hauran de concentrar a l'inici del quadrimestre. Els projectes no s'iniciaran fins que els estudiants no disposin dels continguts teòrics necessaris.

OBJECTIUS D'APRENENTATGE DE L'ASSIGNATURA

LCSF pretén proporcionar a l'estudiant una visió completa de la problemàtica que presenten els sistemes de comunicacions sense fils. No tan sols a partir d'un coneixement detallat de les particularitats del medi ràdio sinó també fent molt d'èmfasi en el disseny dels sistemes.

L'assignatura s'estructura en 4 grans mòduls: (a) Propagació, (b) Enginyeria ràdio cel·lular, (c) Planificació de sistemes de telefonia mòbil, (d) Sistemes de radiodifusió (televisió digital). En acabar l'assignatura, l'estudiant ha de ser capaç de:

1. Caracteritzar el comportament estadístic del senyal ràdio (primer i segons moments) i modelar-lo per realitzar càlculs de cobertura i predir la probabilitat d'error en el bit. Ha de ser capaç de fer-ho teòricament i experimentalment a partir de campanyes de mesures. Diferenciar les particularitats de diferents entorns d'operació: urbà, rural, indoor, vies de comunicacions i túnels.
2. Explicar els avantatges dels desplegaments cel·lulars així com els principals procediments que els governen. Mesurar experimentalment paràmetres que regulen aquests procediments. Conèixer les característiques d'un equip estació base en explotació.
3. Dissenyar sistemes cel·lulars per a aconseguir un cert grau de servei en termes de cobertura (probabilitat de SINR i throughput), probabilitat de bloqueig i consum de dades mensual dels usuaris. S'hauran de saber executar tots els passos de planificació d'una xarxa a nivell teòric i amb eines informàtiques de planificació i simulació. S'haurà de conèixer les principals característiques dels sistemes 4G i 5G.
4. Ser capaç de fer dissenys senzills de sistemes digitals de broadcasting (televisió digital terrena, TDT o DVB) basats en OFDM. Ser capaç de mesurar i comprendre els efectes del canal ràdio sobre el senyal OFDM així com les estratègies per compensar-los. Comprendre les particularitats de la planificació en xarxes de freqüència única així com del procés d'ajust de retards interns de transmissió. S'haurà de conèixer la capa física del sistemes DVB-T de 1a i 2a generació.
Gràcies a l'organització de l'assignatura en projectes:
• L'estudiant adquirirà habilitats cooperatives i socials per al bon funcionament del treball en grup. Concretament, treballarà en grup per a la realització dels projectes contemplant totes les seves fases: planificació del projecte, cerca d'informació, tria de solucions, implementació, repartiment de tasques, integració de resultats, redacció de memòries tècniques i presentació, defensa i argumentació de les decisions emprades i resultats assolits.
• Aprendrà a planificar i liderar un projecte i assumir responsabilitats dins del grup.
• Millorar la seva capacitat d'autoaprenentatge.
• Agilitat en la utilització dels equipaments del laboratori de comunicacions sense fils, per calibrar, realitzar mesures, processar i analitzar les dades obtingudes.

HORES TOTALS DE DEDICACIÓ DE L'ESTUDIANTAT

Tipus	Hores	Percentatge
Hores grup gran	26,5	17.67
Hores grup petit	39,5	26.33
Hores aprenentatge autònom	84,0	56.00

Dedicació total: 150 h

CONTINGUTS

- Presentació de l'assignatura

Descripció:
Donar a conèixer a l'estudiant:
· Els continguts de l'assignatura i la bibliografia recomanada per tema.
· Descripció dels projectes i pautes sobre el mode de funcionament dels grups.
· Establiment dels calendaris dels projectes en cada grup.

Objectius específics:
Veure descripció

Dedicació: 0h 30m
Classes teòriques: 0h 30m

- Caracterització del senyal ràdio

Descripció:
En acabar aquesta secció l'alumne haurà de ser capaç de:
• Enumerar i calcular l'efecte de les principals característiques en un medi radio amb pocs reflectors: propagació en espai lliure, reflexió contra el terra, variacions de l'índex de refracció, efecte de la difracció, atenuació per hidro-meteors, gasos i clutter. Haurà de ser capaç de trobar models de propagació de n rajos, calcular les pèrdues per difracció a partir del resultat de les integrals de Fresnel, implicacions de bloquejar diferents percentatges de la 1º zona de Fresnel. Anticipar l'efecte sobre la direcció del front d'ones sota l'efecte d'atmosferes amb diferents gradients de refractivitat.
• Caracteritzar el comportament estadístic del senyal ràdio en condicions multicamí i amb molts reflectors:
- Càlcul del valor mig d'atenuació a partir de models estadístics de propagació en diferents entorns: outdoor (rural, urbà), indoor i túnels. Ha de ser capaç d'explicar les diferències entre els models d'espai lliure, terra plana, Egli, Okumura-Hata, Cost231-Hata i Cost231-Walfish-Ikegami.
- Caracterització de la desviació típica de l'atenuació en presència de zones d'ombra (shadowing). Al final d'aquesta lliçó l'alumne ha de ser capaç de realitzar càlculs de cobertura a partir de qualsevol mètode de propagació i garantint una cobertura perimetral amb qualsevol grau de servei que es defineixi. Haurà de ser capaç de calcular marges per esvaïments amb estadística log-normal, identificar l'enllaç limitant, analitzar les diferències entre balanços a diferents entorns (urbans, rurals, vies de comunicacions, consideracions indoor i desplegaments en túnels) i per a diferents serveis. Calcular el nombre de nodes necessaris per a donar servei en una àrea objectiu
- Caracterització estadística de les desviacions d'atenuació a causa de la propagació multicamí:
1. Identificar condicions de banda ampla i estreta. L'estudiant haurà de ser capaç de interpretar un Power Delay Profile (PDP), seleccionar un model de 'taps' adient a l'entorn avaluat i calcular el delay spread. Haurà de saber preveure el tipus de resposta impulsional en diferents entorns (rural, urbà, muntanyós...).
2. Analitzar amb eficàcia les conseqüències de l'efecte doppler: A nivell temporal: Calcular el temps de coherència del canal, predir la presència d'esvaïments lents o ràpids. L'alumne haurà de ser capaç de diferenciar entre canals de tipus Rayleigh i Rice (vs. Gaussians) i els seus efectes sobre el senyal ràdio (mòdul i fase) i la probabilitat d'error en el bit. Haurà de ser capaç de trobar la distància mínima entre dues antenes per a garantir diversitat espacial i avaluar les variacions en guany per diversitat en funció del nombre d'antenes així com explicar els diferents mètodes de combinació de senyal. A nivell freqüencial: Calcular la desviació en freqüència, i densitat espectral de potència d'acord al model de Jakes.
3. Analitzar amb eficàcia les conseqüències de la propagació multicamí en entorns d'elevat delay spread i avaluar si el canal és selectiu o pla en freqüència. Estimar l'ample de banda de coherència.
• Enumerar els diferents passos que s'han de seguir en una campanya de mesures per ajustar correctament un model de propagació i proposar-ne alternatives minimitzant l'error quadràtic mig entre predicció i mesura. Entendre i aplicar el criteri de Lee per a l'eliminació del short-term fading. Ser capaç d'enunciar i calcular els principals factors de mèrit d'un model de propagació a partir de les mesures: moments de primer i segon ordre de l'error, factor de correlació de Pearson, etc. Obtenir la desviació típica per shadowing a partir de mesures de camp.
• Descriure les particularitats dels desplegaments amb cable radiant i calcular l'atenuació global. Interpretar correctament les especificacions d'aquests elements per a establir comunicacions en túnels i vies de comunicacions ferroviàries.

Objectius específics:
Veure descripció

Activitats vinculades:
• A.1. Projecte 1. Introducció a les campanyes de mesures i ajust de models de propagació
• A.5. Avaluació del comportament del medi ràdio amb Matlab.
• A.6. Examen teòric de mig quadrimestre.

Dedicació: 44h
Grup gran/Teoria: 5h 30m
Grup petit/Laboratori: 13h 30m
Aprenentatge autònom: 25h

- Enginyeria ràdio cel·lular

Descripció:
• L'alumne haurà de poder justificar els avantatges de fer desplegaments cel·lulars així com les diferents tipologies que existeixen.
• Haurà de poder descriure l'arquitectura d'un sistema cel·lular de qualsevol generació (2-5G) així com les funcions dels elements que els composen, circuits pre i post banda base, canvis d'arquitectura amb cloud RAN, etc.
• Haurà de poder descriure i calcular els paràmetres que ajusten els principals procediments que governen els sistemes cel·lulars i els modes bàsics de funcionament associats als usuaris: (de)attach, handover i events de handover, amb especial èmfasi en sistemes 4G i 5G, control de potència en bucle obert i tancat, procediment de paging, la necessitat d'àrees de localització/routing i llistes d'àrees de tracking, timing advance, tipus de scheduling, adaptació a l'enllaç i utilització d'estratègies multiantena per a diversitat en transmissió i multiplexació espacial. L'estudiant haurà de ser capaç d'explicar el grid freqüència-temps dels sistemes OFDMA i els diferents tipus de senyal que s'hi ubiquen.
• Interactuar amb una xarxa real de telefonia mòbil i mesurar diferents KPIs, entendre el seu impacte sobre el procediments de gestió de recursos ràdio. Mesures espectrals i identificació de xarxes comercials i les diferents tecnologies actualment operatives en les bandes cel·lulars sub 6 GHz.

Objectius específics:
Veure descripció

Activitats vinculades:
• A.2. Projecte 2. Procediments i gestió dels recursos ràdio en els sistemes de comunicacions mòbils
• A.6. Examen teòric de mig quadrimestre.

Dedicació: 33h 30m
Grup gran/Teoria: 6h
Grup petit/Laboratori: 7h 30m
Aprenentatge autònom: 20h

- Enginyeria, disseny i planificació de sistemes cel·lulars

Descripció:
• L'alumne haurà de ser capaç de dissenyar sistemes cel·lulars per a aconseguir un cert grau de servei en termes de cobertura (probabilitat de SINR i throughput), probabilitat de bloqueig i consum de dades mensual dels usuaris. S'hauran de saber executar tots els passos de planificació d'una xarxa a nivell teòric i amb eines informàtiques de planificació i simulació. S'haurà de conèixer les principals característiques i especificitats dels sistemes 5G:
- Càlcul d'interferències. Haurà de saber calcular la CIR en desplegaments cel·lulars teòrics i vies de comunicació sota diferents configuracions de reducció i coordinació d'interferències: reus freqüencial bàsic i distàncies cocanal, reus múltiple, variacions de reus fraccional, etc., Explicar l'impacte de la configuració del sistema radiant en azimut i elevació... També haurà de demostrar com procedir amb els càlculs reals amb eines comercials.
- Estudis de dimensionament per a garantir una certa probabilitat de bloqueig i per a garantir un cert volum de dades mensual. Dimensionament de canals de control.
- Elecció d'equips a partir d'especificacions per aconseguir els criteris de qualitat del disseny.

Objectius específics:
Veure descripció

Activitats vinculades:
• A.3. Projecte 3. Planificació d'un sistema cel·lular amb una eina de càlcul de cobertures
• A.6. Examen teòric de final de quadrimestre

Dedicació: 52h
Grup gran/Teoria: 8h
Grup petit/Laboratori: 12h
Aprenentatge autònom: 32h

- Introducció a l'enginyeria dels sistemes de radiodifusió. Televisió Digital Terrestre

Descripció:
Els objectius d'aquest mòdul són:
• Ser capaç de fer dissenys senzills de sistemes digitals de broadcasting (televisió digital terrena, TDT o DVB) basats en OFDM.
• Ser capaç d'explicar la capa física de DVB de primera i segona generació.
• Ser capaç de mesurar amb equipament comercial i comprendre els efectes del canal ràdio sobre el senyal OFDM així com les estratègies per compensar-los.
• Explicar les particularitats de la planificació en xarxes de freqüència única així com del procés d'ajust de retards interns de transmissió.

Objectius específics:
Veure descripció

Activitats vinculades:
• A.4. Projecte 4 opcional. Anàlisi experimental del senyal DVB-T al medi ràdio.
• A.6. Examen teòric de final de quadrimestre

Dedicació: 17h
Grup gran/Teoria: 4h
Grup petit/Laboratori: 3h
Aprenentatge autònom: 10h

ACTIVITATS

A.1. PROJECTE 1. INTRODUCCIÓ A LES CAMPANYES DE MESURES I AJUST DE MODELS DE PROPAGACIÓ

Descripció:
Projecte del mòdul de propagació. El projecte implicarà l'anàlisi d'una campanya de mesures, avaluació de models de propagació existents, aprendre a crear nous models i extracció de la desviació típica de l'atenuació causada pel shadowing. Anàlisi d' efectes multicamí. Mesures sobre cable radiant.

Objectius específics:
• El primer objectiu és que l'alumne aprengui els passos que s'han de seguir en una campanya de mesures per ajustar correctament un model de propagació existent.
• Així mateix haurà de ser capaç de proposar-ne alternatives mitjanant tècniques de regressió i minimitzant l'error quadràtic mig entre predicció i mesura. Haurà de processar amb solvència les mesures capturades i ser capaç d'enunciar i calcular els principals factors de mèrit d'un model de propagació a partir de les mesures: moments de primer i segon ordre de l'error, factor de correlació de Pearson, etc
• Haurà de saber aplicar el criteri de Lee i també caracteritzar estadísticament els esvaïments a llarg termini per utilitzar les conclusions en el disseny de sistemes.
• Un altre objectiu és que l'estudiant es familiaritzi amb software habitual de mesura en entorns de xarxes d'àrea local sense fils.
• L'estudiant ha de poder analitzar els efectes de primer ordre de la propagació multicamí
• L'estudiant haurà de poder explicar les prestacions d'un cable radiant en termes de propagació i desplegament de sistemes ràdio versus la propagació amb antenes clàssiques, així com predir el seu abast en un sistema de comunicacions complet.

Material:
· Software i hardware de mesura.
· Software desenvolupat en Matlab per importar les mesures i facilitar el seu processat
· Especificacions dels equips emissors, antenes i cable radiant.
· Guió del projecte i objectius

Lliurament:
• Redacció d'una memòria basada en l'índex d'objectius del projecte i incloent estudis previs.

Dedicació: 18h 45m
Grup petit/Laboratori: 7h 30m
Aprenentatge autònom: 11h 15m

A.2. PROJECTE 2. PROCEDIMENTS I GESTIÓ DELS RECURSOS RÀDIO EN ELS SISTEMES DE COMUNICACIONS MÒBILS

Descripció:
Projecte associat al mòdul d'enginyeria cel·lular ràdio. Amb ajuda de Matlab, l'estudiant analitzarà la capa física de LTE i anirà creant un grid complet pas a pas. Es compararan diferents configuracions possibles a LTE i el seu impacte al throughput de l'usuari, s'analitzarà l'impacte de la propagació en el grid i les conseqüències directes sobre els procediments de Handover, Scheduling, PCI Planning, etc. També s'avaluarà l'impacte de la categoria de terminal sobre la qualitat de servei. Es realitzaran handovers verticals i es realitzaran anàlisis espectrals i mesures de qualitat sobre xarxes reals amb eines de net monitoring així com visualització dels paràmetres necessaris per a realitzar el (des)registre a la xarxa i garantir la mobilitat en mode idle. També s'analitzarà els problemes en la integració de terminals aeris en la xarxa.

Objectius específics:
Veure descripció del mòdul 2

Material:
• Software Matlab
• Software per a net monitoring en Android i IOS.
• Formularis i plantilles per a compartir resultats entre grups.
• Campanya de mesures realitzada a l'EETAC amb software específic.
• Equipament per a realitzar anàlisi espectral
• Guió del projecte.

Lliurament:
Igual que projecte 1

Dedicació: 18h 45m
Grup petit/Laboratori: 7h 30m
Aprenentatge autònom: 11h 15m

A.3. PROJECTE 3. PLANIFICACIÓ D'UN SISTEMA CELULAR AMB EINA DE CÀLCUL DE COBERTURES

Descripció:
Projecte associat al mòdul de planificació. L'estudiant ha de fer la planificació d'un sistema fent ús d'eines de simulació. El desplegament serà sobre una zona de Catalunya i com a mínim es consideraran tres entorns: urbà, rural i vies de comunicacions. Haurà de ser capaç d'executar totes les etapes de disseny d'un enginyer de planificació ràdio.

Objectius específics:
Són directament el primer punt del tercer mòdul de continguts

Material:
· Balanç de potències de referència per calibrar el que han de preparar els estudiants.
· Manual de l'eina comercial de planificació i tutorial amb els primers passos.
· Guió del projecte i objectius

Lliurament:
Veure projecte 1

Dedicació: 27h
Grup petit/Laboratori: 9h
Aprenentatge autònom: 18h

A.4. PROJECTE 4. ANÀLISI EXPERIMENTAL DEL SENYAL DVB-T AL MEDI RÀDIO.

Descripció:
Projecte associat al mòdul 4. Opcional. Amb instrumentació de laboratori professional (generadors i analitzadors d'ús específic). L'estudiant realitzarà un estudi experimental avançat del senyal OFDM del sistema de televisió digital terrena (TDT).

Objectius específics:
Són directament els del quart mòdul de continguts.

Material:
· Especificacions d'equips, antenes.
· Guió del projecte i objectius

Lliurament:
Presentació oral amb els resultats del experiments.

Dedicació: 12h
Grup petit/Laboratori: 4h
Aprenentatge autònom: 8h

A.5. AVALUACIÓ DEL COMPORTAMENT DEL MEDI RÀDIO AMB MATLAB

Descripció:
L'alumne experimentarà i avaluarà les variacions de comportament per diferents paràmetres d'entrada realistes.
- Impacte de la separació d'antenes en un entorn de terra plana.
- Densitat espectral de potència del senyal en un entorn amb doppler.
- Representació fasorial i esvaïments selectius en freqüència en un entorn amb doppler.

Objectius específics:
Afermar els coneixements teòrics del mòdul de propagació.

Material:
Scripts ja programats en Matlab

Dedicació: 3h
Activitats dirigides: 1h
Aprenentatge autònom: 2h

EXAMEN DE MIG QUADRIMESTRE

Descripció:
Activitat d'avaluació

Dedicació: 1h 30m
Grup gran/Teoria: 1h 30m

EXAMEN FINAL

Descripció:
Activitat d'avaluació

Dedicació: 1h 30m
Grup gran/Teoria: 1h 30m

SISTEMA DE QUALIFICACIÓ

Qualsevol acte de frau acadèmic, plagi, ús o tinença a l'abast de mitjans no autoritzats en qualsevol activitat d'avaluació comportarà la qualificació de zero (0) en la prova o lliurament afectat. A més, d'acord amb la normativa de la Universitat, la possible derivació dels fets per a l'obertura d'un expedient disciplinari implicarà que l'assignatura quedi en l'estat provisional de "pendent d'avaluació" fins a la resolució de l'expedient. La gestió d'aquestes incidències es desplega d'acord amb el **Marc d'actuació per a la integritat acadèmica en l'avaluació de la UPC**.

S'aplicaran els criteris d'avaluació definits a la infoweb de l'assignatura.

NORMES PER A LA REALITZACIÓ DE LES PROVES.

• L'assistència a les sessions de laboratori és obligatòria.
• En finalitzar el projecte, el grup haurà de redactar una memòria basada en l'índex d'objectius. Tanmateix haurà de redactar una autoanàlisi del grup. Ambdós documents s'entregaran dins dels límits establerts.
• Algunes tasques dels projectes es faran cooperativament entre diferents grups.

BIBLIOGRAFIA

Bàsica:
- Goldsmith, A. Wireless communications. New York: Cambridge University Press, 2005. ISBN 9780521837163.
- Rappaport, Theodore S. Wireless communications : principles and practice. 2nd. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. ISBN 0130422320.
- Molisch, Andreas F. Wireless communications. West Sussex, England: John Wiley & Sons, cop. 2005. ISBN 047084888X.

Complementària:
- Mishra, Ajay R. Advanced cellular network planning and optimisation : 2G/2.5G/3G ... evolution to 4G. Chichester: John Wiley, 2007. ISBN 97804700174714.
- Artés Rodríguez, Antonio; Pérez González, Fernando. Comunicaciones digitales. Madrid: Pearson Educación/Prentice Hall, cop. 2007. ISBN 9788483223482.