

## Guia docent

### 300516 - MO - Mecànica Orbital

Última modificació: 14/01/2026

**Unitat responsable:** Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels

**Unitat que imparteix:** 748 - FIS - Departament de Física.

**Titulació:** GRAU EN ENGINYERIA DE SATÈL·LITS (Pla 2024). (Assignatura obligatòria).

**Curs:** 2025

**Crèdits ECTS:** 5.0

**Idiomes:** Català, Castellà, Anglès

#### PROFESSORAT

---

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

**Altres:** Definit a la infoweb de l'assignatura.

#### CAPACITATS PRÈVIES

---

- Operabilitat sòlida amb els fonaments del càlcul vectorial i matricial, així com del càlcul diferencial i integral, aplicats a problemes físics en diverses dimensions.
- Familiaritat amb l'ús de sistemes de coordenades, canvis de referència i representació vectorial de magnituds físiques.
- Comprensió dels conceptes fonamentals de força, treball, energia, camp gravitatori i potencial, així com els principis de conservació d'energia, moment lineal i moment angular, aplicats a sistemes mecànics.
- Coneixements bàsics de dinàmica de partícules i de moviment sota forces centrals.
- Capacitat per seguir raonaments matemàtics i físics de complexitat mitjana i per interpretar expressions analítiques, així com obtenir solucions mitjançant mètodes numèrics.
- Familiaritat amb l'ús de programari Matlab i Python
- És recomanable haver aprovat Mecànica Clàssica i Matemàtiques Avançades
- És recomanable haver aprovat o cursar simulatàniament Mètodes Numèrics.

#### REQUISITS

---

Cap

#### METODOLOGIES DOCENTS

---

L'assignatura s'impartirà combinant classes expositives (teòriques i de problemes) i sessions pràctiques. A les classes teòriques, el professorat introduirà els conceptes i les lleis necessàries per aplicar-les posteriorment en la resolució dels problemes de cada tema. Es fomentarà la participació activa de l'estudiantat durant les classes.

Els exemples s'escolliran seguint criteris pedagògics (per aclarir els conceptes introduïts) i temàtics (procurant que estiguin relacionats amb la titulació), amb l'objectiu de promoure la motivació i l'interès de l'estudiantat. Així mateix, es fomentarà l'ús de programari específic per tal de resoldre i aplicar el contingut teòric.

L'ús de recursos multimèdia serà també la base d'expressió de les classes, tant teòriques com pràctiques, de manera que es pugui representar de forma visual i més entenedora els exemples proposats.

Les sessions pràctiques estaran orientades a potenciar un paper actiu de l'estudiantat, de manera que pugui desenvolupar i aplicar, de forma individual i/o en petits grups, els continguts treballats a les classes teòriques i de problemes. La majoria de les sessions pràctiques seran de tipus computacional, ja que la resolució de problemes reals en mecànica orbital implica necessàriament l'ús de tècniques numèriques.

En les sessions pràctiques també es fomentarà la discussió, l'anàlisi i l'exposició pública de resultats, com a part essencial del procés de comunicació en l'àmbit científic i tècnic.

## OBJECTIUS D'APRENENTATGE DE L'ASSIGNATURA

- Plantejar i aplicar els principis fonamentals de la mecànica orbital per descriure i analitzar el moviment de satèl·lits artificials i cossos celestes sota l'acció del camp gravitatori, utilitzant principalment el marc de la mecànica newtoniana.
- Conèixer i utilitzar els conceptes bàsics del problema dels dos cossos, les lleis de Kepler i les principals magnituds orbitals, així com la classificació de les òrbites i la relació entre vectors d'estat i elements orbitals.
- Plantejar i resoldre problemes de propagació orbital mitjançant formulacions analítiques i mètodes numèrics elementals, incloent la resolució de l'equació de Kepler i la determinació de temps de vol.
- Analitzar l'efecte de les principals perturbacions orbitals (no-esfericitat terrestre, fricció atmosfèrica, perturbacions de tercers cossos) i avaluar-ne l'impacte sobre l'evolució temporal de les òrbites.
- Definir i aplicar el concepte de maniobra orbital, identificar i calcular òrbites de transferència i canvis d'òrbita coplanars i no coplanars, així com analitzar estratègies bàsiques de transferència orbital.
- Formular i resoldre el problema de Lambert, comprendre les seves solucions clàssiques i modernes, i interpretar gràfiques 'pork-chop' per a la planificació de trajectòries.
- Comprendre i aplicar l'aproximació de còniques enllaçades per a l'anàlisi de trajectòries lunars i interplanetàries, incloent la definició i l'ús de l'esfera d'influència.
- Introduir els fonaments del problema restringit dels tres cossos, identificar i analitzar els punts de Lagrange i el constant de Jacobi, així com el seu paper en el disseny de trajectòries espacials.
- Analitzar i comprendre el principi de les assistències gravitatòries, i la seva aplicació en missions interplanetàries.
- Desenvolupar la capacitat d'interpretar i analitzar trajectòries reals de missions espacials, utilitzant models orbitals simplificats i criteris d'enginyeria.

## HORES TOTALES DE DEDICACIÓ DE L'ESTUDIANTAT

| Tipus                      | Hores | Percentatge |
|----------------------------|-------|-------------|
| Hores grup petit           | 8,0   | 6.40        |
| Hores aprenentatge autònom | 70,0  | 56.00       |
| Hores grup gran            | 47,0  | 37.60       |

**Dedicació total:** 125 h

## CONTINGUTS

### Introducció. Marc general.

#### Descripció:

- Espai-temps newtonià enfront del marc relativista. Mecànica analítica.
- Repàs de la mecànica de forces centrals: lleis de Kepler i de Newton.
- Sistemes de referència inercials i no inercials.

#### Objectius específics:

- Comprendre el marc físic i matemàtic de la mecànica orbital.
- Identificar les hipòtesis bàsiques i les limitacions de la formulació newtoniana.
- Reconèixer el paper de les lleis de Kepler i de Newton com a base del moviment orbital.
- Distingir entre sistemes de referència inercials i no inercials en contextos orbitals.

#### Activitats vinculades:

- Pràctica 1
- Examen de mig quadrimestre
- Examen final

#### Dedicació: 2h

Grup gran/Teoria: 1h

Aprenentatge autònom: 1h

### El problema dels dos cossos

**Descripció:**

- Hipòtesis simplificadores.
- Equació del moviment.
- Constants del moviment.
- Equació de Kepler.
- Òrbites còniques: circular, el·líptica, parabòlica i hiperbòlica.
- Determinació orbital. Elements orbitals clàssics i Two-Line Elements (TLE).
- Posició orbital en funció del temps.

**Objectius específics:**

- Formular i resoldre el problema dels dos cossos sota hipòtesis ideals.
- Identificar i utilitzar les constants del moviment en camps de forces centrals.
- Analitzar i classificar les òrbites còniques en funció dels seus paràmetres.
- Resoldre l'equació de Kepler i determinar la posició orbital en funció del temps.
- Relacionar els vectors d'estat amb els elements orbitals clàssics i els TLE.

**Activitats vinculades:**

Pràctica 1  
Examen de mig quadrimestre  
Examen final

**Dedicació:** 27h

Grup gran/Teoria: 10h  
Grup petit/Laboratori: 2h  
Aprenentatge autònom: 15h

### Perturbacions orbitals

**Descripció:**

- No-esfericitat de la Terra. Pertorbacions de tercers cossos. Fricció atmosfèrica. Pressió de radiació solar. Interaccions magnètiques. Deixalles espacials.
- Equacions variacionals de Gauss i mètodes numèrics d'estimació.

**Objectius específics:**

- Identificar les principals fonts de perturbacions orbitals en missions reals.
- Analitzar l'efecte de les perturbacions sobre l'evolució temporal de les òrbites.
- Aplicar les equacions variacionals de Gauss per estimar canvis orbitals.
- Introduir mètodes numèrics per a l'anàlisi de la dinàmica orbital pertorbada.

**Activitats vinculades:**

Pràctica 2  
Examen de mig quadrimestre  
Examen final

**Dedicació:** 18h

Grup gran/Teoria: 7h  
Grup petit/Laboratori: 1h  
Aprenentatge autònom: 10h

### Maniobres orbitals

**Descripció:**

- Canvis coplanars. Transferència de Hohmann. Transferència bi-el·líptica.
- Canvis de pla orbital.
- Rendezvous orbital.
- Vol en formació i disseny de constel·lacions.

**Objectius específics:**

- Comprendre el concepte de maniobra orbital i el seu impacte sobre l'òrbita.
- Analitzar i calcular transferències coplanars i no coplanars.
- Aplicar els principis bàsics del rendezvous orbital.
- Introduir els fonaments del vol en formació i del disseny de constel·lacions.

**Activitats vinculades:**

Pràctica 2  
Examen de mig quadrimestre  
Examen final

**Dedicació:** 15h

Grup gran/Teoria: 5h

Grup petit/Laboratori: 1h

Aprenentatge autònom: 9h

### Problema de Lambert

**Descripció:**

- Plantejament del problema.
- Solucions clàssiques.
- Solucions modernes.
- Gràfiques pork-chop.

**Objectius específics:**

- Formular el problema de Lambert com un problema orbital de contorn.
- Comprendre les solucions clàssiques i modernes del problema.
- Analitzar trajectòries en funció del temps de vol i de l'energia requerida.
- Interpretar gràfiques pork-chop per a la planificació de missions.

**Activitats vinculades:**

Pràctica 3  
Examen final

**Dedicació:** 23h

Grup gran/Teoria: 8h

Grup petit/Laboratori: 2h

Aprenentatge autònom: 13h

### Trajectòries interplanetàries

**Descripció:**

- Aproximació de còniques enllaçades.
- Esfera d'influència (SOI).
- Trajectòries de transferència lunar.
- Transferències interplanetàries.

**Objectius específics:**

- Comprendre l'aproximació de còniques enllaçades per a trajectòries interplanetàries.
- Definir i utilitzar el concepte d'esfera d'influència.
- Analitzar trajectòries de transferència lunar i interplanetària.
- Integrar conceptes orbitals en el disseny preliminar de missions espacials.

**Activitats vinculades:**

Pràctica 4  
Examen final

**Dedicació:** 20h

Grup gran/Teoria: 8h  
Grup petit/Laboratori: 1h  
Aprenentatge autònom: 11h

### El problema dels tres cossos

**Descripció:**

- Problema restringit circular dels tres cossos.
- Punts de Lagrange.
- Assistències gravitatòries en 2D i 3D.
- Constant de Jacobi.
- Problema de N cossos.

**Objectius específics:**

- Introduir el problema restringit circular dels tres cossos.
- Identificar i analitzar els punts de Lagrange i les seves propietats dinàmiques.
- Comprendre el significat físic del constant de Jacobi.
- Analitzar el principi de les assistències gravitatòries en 2D i 3D.
- Reconèixer les limitacions del problema dels dos cossos i la necessitat de models de N cossos

**Activitats vinculades:**

Pràctica 3  
Examen final

**Dedicació:** 20h

Grup gran/Teoria: 8h  
Grup petit/Laboratori: 1h  
Aprenentatge autònom: 11h

## ACTIVITATS

### Pràctica 1

**Descripció:**

Anàlisi computacional i representació del moviment orbital, centrada en la relació entre vectors d'estat i elements orbitals clàssics per a òrbites keplerianes (còniques). Propagació numèrica d'òrbites i visualització de les seves principals característiques.

**Objectius específics:**

- Calcular i relacionar vectors d'estat i elements orbitals per a òrbites còniques.
- Propagar òrbites en el temps mitjançant models keplerians.
- Visualitzar trajectòries orbitals i analitzar-ne els principals paràmetres.
- Aplicar mètodes numèrics a la resolució de l'equació de Kepler i a l'anàlisi orbital bàsica.

**Material:**

Ordinador personal i eines de càlcul científic adequades (per exemple, entorns basats en Python o MATLAB i/o programari especialitzat en anàlisi orbital).

**Lliurament:**

Lliurament individual o en grup de resultats computacionals, figures i un breu informe tècnic i/o exposició oral, segons les indicacions del professorat.

**Dedicació:** 2h

Grup petit/Laboratori: 2h

### Pràctica 2

**Descripció:**

Anàlisi computacional de perturbacions orbitals i maniobres orbitals, centrada en l'estimació numèrica dels efectes perturbadors sobre les òrbites de satèl·lits i en l'avaluació dels requeriments de  $\Delta V$  per a maniobres bàsiques

**Objectius específics:**

- Calcular i analitzar els efectes de les perturbacions orbitals sobre el moviment de satèl·lits mitjançant mètodes numèrics.
- Analitzar dades històriques de TLE de satèl·lits reals per estimar les taxes de variació dels elements orbitals clàssics.
- Avaluar escenaris de decaïment orbital i reentrada utilitzant models simplificats i eines disponibles.
- Calcular els requeriments de  $\Delta V$  associats a maniobres i transferències orbitals bàsiques.
- Relacionar els efectes perturbadors i les estratègies de maniobra amb restriccions reals de missions de satèl·lits.

**Material:**

Ordinador personal i eines de càlcul científic adequades (per exemple, entorns basats en Python o MATLAB i/o programari especialitzat en anàlisi orbital i bases de dades).

**Lliurament:**

Lliurament individual o en grup de resultats computacionals, figures i un breu informe tècnic i/o exposició oral, segons les indicacions del professorat.

**Dedicació:** 2h

Grup petit/Laboratori: 2h

### Pràctica 3

**Descripció:**

Anàlisi computacional del problema de Lambert per al disseny de transferències orbitals. Resolució numèrica de problemes orbitals de contorn que connecten dos vectors de posició en un temps de vol determinat, i avaluació de la viabilitat de les transferències i dels requeriments energètics.

**Objectius específics:**

- Formular el problema de Lambert a partir de vectors de posició inicials i finals i d'un temps de vol especificat.
- Calcular solucions de transferència orbital mitjançant resolutors clàssics i moderns del problema de Lambert.
- Analitzar trajectòries de transferència en termes de requeriments de  $\Delta V$ , geometria i temps de vol.
- Generar i interpretar gràfiques pork-chop per a l'anàlisi preliminar de missions i finestres de transferència.
- Avaluar l'adequació de diferents opcions de transferència per a la planificació de missions.

**Material:**

Ordinador personal i eines de càlcul científic adequades (per exemple, entorns basats en Python o MATLAB i/o programari especialitzat en anàlisi orbital).

**Lliurament:**

Lliurament individual o en grup de resultats computacionals, figures i un breu informe tècnic, segons les indicacions del professorat.

**Dedicació:** 2h

Grup petit/Laboratori: 2h

### Pràctica 4

**Descripció:**

Anàlisi computacional de dades de navegació de missions espacials mitjançant l'ús de rutines bàsiques de SPICE. Obtenció, processament i interpretació d'informació d'efemèrides i trajectòries de missions espacials històriques, amb èmfasi en la comprensió del moviment real de les naus espacials a partir de dades de vol.

**Objectius específics:**

- Obtenir efemèrides de planetes i naus espacials utilitzant rutines bàsiques de SPICE.
- Obtenir i processar dades de navegació i trajectòria de missions històriques (p. ex., Voyager, Cassini, New Horizons).
- Representar i analitzar trajectòries de naus espacials en diferents sistemes de referència.
- Interpretar dades reals de missions en el context de la dinàmica orbital i interplanetària.
- Familiaritzar-se amb eines professionals de navegació utilitzades en l'anàlisi de missions espacials.

**Material:**

Ordinador personal i eines de càlcul científic adequades (per exemple, entorns basats en MATLAB), accés a kernels SPICE i biblioteques bàsiques de SPICE per al tractament de trajectòries i efemèrides.

**Lliurament:**

Lliurament individual o en grup de resultats computacionals, figures i un breu informe tècnic, segons les indicacions del professorat.

**Dedicació:** 2h

Grup petit/Laboratori: 2h

### Examen de mig quadrimestre

**Descripció:**

Durant la setmana d'exàmens de mig quadrimestre es realitzarà un examen individual de teoria i problemes sobre els continguts treballats fins al moment.

**Objectius específics:**

Comprovar els coneixements adquirits sobre els continguts inclosos, tant per part del professorat com de l'estudiantat.  
Desenvolupar la capacitat de comunicar-se amb claredat i eficàcia per escrit, justificant la resolució dels problemes i responnent a preguntes teòriques i pràctiques.

**Material:**

Enunciat de l'examen en paper, calculadora i formulari.

**Lliurament:**

Es lliurarà l'examen resolt individualment per a la seva avaluació.

**Dedicació:** 1h 30m

Activitats dirigides: 1h 30m

### Examen final

**Descripció:**

Durant la setmana d'exàmens de final de quadrimestre es realitzarà un examen individual de teoria i problemes sobre tots els continguts treballats a l'assignatura.

**Objectius específics:**

Comprovar els coneixements adquirits sobre els continguts inclosos, tant per part del professorat com de l'estudiantat.  
Desenvolupar la capacitat de comunicar-se amb claredat i eficàcia per escrit, justificant la resolució dels problemes i responnent a preguntes teòriques.

**Material:**

Enunciat de l'examen en paper, calculadora i formulari.

**Lliurament:**

Es lliurarà l'examen resolt individualment per a la seva avaluació.

**Dedicació:** 1h 30m

Activitats dirigides: 1h 30m

## SISTEMA DE QUALIFICACIÓ

La nota final s'obtindrà a partir de:

Dos exàmens parcials (mig i final de quadrimestre): 50%

Pràctiques, lliurables de problemes i programes: 40%

Projecte: 10%

## NORMES PER A LA REALITZACIÓ DE LES PROVES.

Un examen, pràctica, lliurable o projecte no presentat es puntuarà amb una nota de zero. Els exàmens es realitzaran de manera individual. Els lliurables, pràctiques i projecte es podrà realitzar en grup segons indicacions del professorat.

## BIBLIOGRAFIA

---

### **Bàsica:**

- Curtis, Howard D. Orbital mechanics for engineering students . Fourth edition. ISBN 978-0128240250.
- Bate, Roger R; Mueller, Donald D; White, Jerry E. Fundamentals of astrodynamics . New York : Dover, cop. 1971. ISBN 0486600610.
- Vallado, David A; McClain, Wayne D. Fundamentals of astrodynamics and applications . 4a ed. Hawthorne : Microcosm Press, cop. 2013. ISBN 978- 1881883180.

### **Complementària:**

- Roy, A. E. Orbital motion . 4th ed. Bristol [etc.] : Institute of Physics, 2005. ISBN 978-0750310154.