

Guia docent

205365 - 205365 - Turbulència II: Simulació Avançada, Modelització i Aerodinàmica

Última modificació: 25/09/2026

Unitat responsable: Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Unitat que imparteix: 724 - MMT - Departament de Màquines i Motors Tèrmics.

Titulació: MÀSTER UNIVERSITARI EN ENGINYERIA INDUSTRIAL (Pla 2013). (Assignatura optativa).
MÀSTER UNIVERSITARI EN ENGINYERIA AERONÀUTICA (Pla 2014). (Assignatura optativa).
MÀSTER UNIVERSITARI EN ENGINYERIA ESPACIAL I AERONÀUTICA (Pla 2016). (Assignatura optativa).
MÀSTER UNIVERSITARI EN RECERCA EN ENGINYERIA MECÀNICA (Pla 2024). (Assignatura optativa).
MÀSTER UNIVERSITARI EN ENGINYERIA INDUSTRIAL (Pla 2025). (Assignatura optativa).

Curs: 2026

Crèdits ECTS: 3.0

Idiomes: Anglès

PROFESSORAT

Professorat responsable: Trias Miquel, Francesc Xavier

Altres:

METODOLOGIES DOCENTS

L'assignatura es desenvolupa mitjançant classes magistrals, sessions pràctiques i activitats supervisades de caràcter aplicat.

Les sessions teòriques es recolzen en diapositives, vídeos i exemples procedents de simulacions numèriques i bases de dades de fluxos turbulents.

Les sessions pràctiques es dediquen a la preparació i supervisió dels treballs, incloent-hi l'explicació del codi, la implementació numèrica, el postprocessament dels resultats i la discussió de les dificultats trobades pels estudiants.

Es preveuen almenys dues sessions pràctiques:

Una sobre un solucionador de Navier-Stokes basat en àlgebra i el mètode de pas fraccionari.

Una altra sobre l'equació de Burgers, la resolució espectral i la modelització LES (Large Eddy Simulation)

OBJECTIUS D'APRENENTATGE DE L'ASSIGNATURA

L'assignatura proporciona una visió avançada de la simulació numèrica i la modelització dels fluxos turbulents, amb especial èmfasi en:

la discretització de les equacions de Navier-Stokes incompressibles,
l'acoblament pressió-velocitat,
la modelització de la turbulència,
i les aplicacions aerodinàmiques.

En finalitzar l'assignatura, l'estudiant haurà de ser capaç de:

Formular i analitzar formes discretes de les equacions de Navier-Stokes.

Comprendre els mètodes de projecció per a fluxos incompressibles.

Avaluar la fiabilitat numèrica i el cost computacional.

Comparar estratègies de modelització DNS, RANS, LES i híbrides per a fluxos turbulents i aerodinàmics.

HORES TOTS DE DEDICACIÓ DE L'ESTUDIANTAT

Tipus	Hores	Percentatge
Hores aprenentatge autònom	48,0	64.00
Hores grup gran	27,0	36.00

Dedicació total: 75 h

CONTINGUTS

Mòdul 1. De les equacions de Navier-Stokes als operadors discrets

Descripció:

Revisió de les equacions de Navier-Stokes incompressibles des de la perspectiva de la simulació numèrica. Introducció als operadors diferencials discrets i al seu paper en la preservació de propietats matemàtiques i físiques rellevants. Estudi de productes interns, gradient, divergència, laplaciana, operadors convectius, amb especial èmfasi en les propietats de conservació, consistència i estabilitat.

Activitats vinculades:

Exercicis de construcció i interpretació d'operadors discrets senzills.
Anàlisi de la relació entre els operadors continus i discrets de gradient/divergència.
Problemes curts sobre propietats de conservació, simetria o antisimetria.

Dedicació: 12h 30m

Grup gran/Teoria: 4h 30m

Aprenentatge autònom: 8h

Mòdul 2. Discretització de les equacions de Navier-Stokes

Descripció:

Discretització mitjançant volums finits de les equacions de Navier-Stokes incompressibles. Tractament dels termes convectius, difusius, gradient de pressió. Discretització sobre malles estructurades i no estructurades. Paper de les condicions de contorn, la interpolació, els fluxos numèrics, els errors locals de truncament. Discussió de la consistència, conservació i robustesa numèrica en la discretització d'equacions de flux turbulent.

Activitats vinculades:

Derivació d'aproximacions discretes per a termes seleccionats de les equacions de Navier-Stokes. Exercicis sobre errors locals de truncament o discretització de fluxos. Implementació o anàlisi d'un operador discret senzill per a un problema model de convecció-difusió.

Dedicació: 14h

Grup gran/Teoria: 5h

Aprenentatge autònom: 9h

Mòdul 3. Acoblament pressió-velocitat i mètodes de projecció

Descripció:

Tractament numèric de la incompressibilitat i de l'acoblament entre pressió i velocitat.
Descomposició de Helmholtz-Hodge, els mètodes de pas fraccionari, els mètodes de projecció.
Derivació de l'equació de Poisson per a la pressió, la predicció de velocitats, la correcció de velocitats.
Discussió del cost computacional associat al problema de Poisson i de la seva importància en les simulacions de fluxos incompressibles.

Activitats vinculades:

Derivació de l'algorisme de pas fraccionari per a les equacions de Navier-Stokes incompressibles.
Anàlisi de l'equació de Poisson i del pas de correcció de velocitats.
Treball pràctic associat al Treball 1: solucionador de Navier-Stokes basat en àlgebra i simulació de flux en canal.

Dedicació: 12h 30m

Grup gran/Teoria: 4h 30m

Aprenentatge autònom: 8h

Mòdul 4. Verificació, estabilitat i aspectes computacionals

Descripció:

Fiabilitat numèrica de les simulacions CFD.
Fonts d'error, errors de modelització, errors de discretització, errors residuals del solucionador, errors d'arrodoniment.
Verificació del codi, incloent-hi el mètode de les Solucions Manufacturades (Method of Manufactured Solutions).
Estabilitat dels esquemes d'integració temporal, condició CFL, interpretació del radi espectral.
Introducció breu al cost computacional, als solucionadors lineals i als aspectes d'alt rendiment (HPC) rellevants en simulacions turbulentes.

Activitats vinculades:

Exercicis sobre estabilitat d'esquemes temporals senzills.
Exercicis de verificació mitjançant refinament de malla o solucions manufacturades.
Discussió del cost computacional i la convergència dels solucionadors.

Dedicació: 9h 30m

Grup gran/Teoria: 3h 30m

Aprenentatge autònom: 6h

Mòdul 5. Modelització de la turbulència I: fonaments de DNS, RANS i LES

Descripció:

Introducció a la necessitat de modelitzar la turbulència en simulacions pràctiques.
DNS (Direct Numerical Simulation) com a referència i les seves limitacions computacionals.
Mitjanes de Reynolds.
Problema de tancament. Conceptes bàsics de RANS.
Introducció a LES, filtratge espacial, escales resoltes i no resoltes, tensions de submalla, relació entre resolució de malla i modelització.

Activitats vinculades:

Comparació dels requisits de DNS, RANS i LES per a un flux determinat.
Exercici sobre el problema de tancament.
Anàlisi de camps filtrats o magnituds bàsiques de LES.

Dedicació: 13h 30m

Grup gran/Teoria: 5h

Aprenentatge autònom: 8h 30m

Mòdul 6. Modelització de la turbulència II: simulació avançada i aplicacions aerodinàmiques

Descripció:

Temes avançats de simulació i modelització de la turbulència, models LES de submalla, modelització de paret, enfocaments híbrids RANS/LES, limitacions dels models.

Aplicació a fluxos aerodinàmics, capes límit turbulentes, esteles, fluxos separats, problemes de control de flux.

Discussió sobre configuració de simulacions, postprocessament, interpretació de resultats, comparació entre estratègies de modelització.

Activitats vinculades:

Sessió pràctica vinculada al Treball 2: equació de Burgers, resolució espectral i modelització LES.

Treball computacional o d'anàlisi de dades basat en resultats de simulacions turbulentes.

Elaboració d'un informe breu i/o defensa oral.

Dedicació: 13h

Grup gran/Teoria: 4h 30m

Aprenentatge autònom: 8h 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](#).

Examen parcial: 20%. Prova escrita individual sobre la primera part del curs.

Examen final: 35%. Prova escrita individual que cobreixi els principals continguts teòrics i pràctics de tot el curs.

Treballs: 45%. Dos treballs computacionals avançats (22,5% cadascun) que inclouen informe, implementació numèrica, discussió dels resultats i, si escau, una defensa oral individual.

Treball 1: Solucionador de Navier-Stokes basat en àlgebra. Els estudiants parteixen d'un codi MATLAB proporcionat i implementen i analitzen un mètode de pas fraccionari per a les equacions incompressibles de Navier-Stokes. El treball se centra en la discretització espacial i temporal, l'acoblament pressió-velocitat, la solució de l'equació de Poisson de pressió i la simulació d'un flux de canal. Les possibles

extensions inclouen casos de validació laminar, la relació entre els nombres de Reynolds de volum i fricció, el refinament de la malla, els règims turbulents, els esquemes convectius, l'estabilitat d'integració temporal i el cost computacional. Els estudiants han de presentar un informe i un codi, i el treball pot incloure una defensa oral individual.

Treball 2: Equació de Burgers. Els estudiants resolen l'equació de Burgers en un espai de Fourier per estudiar els mecanismes bàsics de la turbulència, inclosa la cascada d'energia, la interacció entre escales i i el paper dels termes convectius i difusius. El treball comença sense un model de turbulència i després inclou un model LES proposat. Es poden analitzar diferents nombres de Reynolds i resolucions, utilitzant qualsevol

llenguatge de programació. Els estudiants han de presentar un informe i el codi corresponent.

El sistema d'avaluació inclou mecanismes per a la recuperació de resultats no satisfactoris, d'acord amb la normativa acadèmica de la UPC i l'ESEIAAT.

Mecanisme de recuperació: Els estudiants que suspenguin l'assignatura, o que suspenguin l'examen final, tindran l'opció de fer un examen final de recuperació.

Aquest examen es programarà en la data establerta al calendari acadèmic de l'ESEIAAT per a la recuperació d'assignatures optatives. La nota d'aquest examen final de recuperació estarà entre 0 i 10 i substituirà la nota de l'examen final només si és superior. Els treballs no són recuperables. Després de l'examen de recuperació, la nota final es recalcularà com a:

Nota final = $0,2 \cdot \max(\text{examen parcial}, \text{examen de recuperació}) + 0,35 \cdot \max(\text{examen final}, \text{examen de recuperació}) + 0,45 \cdot \text{Treballs}$.

BIBLIOGRAFIA

Bàsica:

- Pope, S. B. Turbulent flows. Repr. with corr. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003. ISBN 0521591252.
- Ferziger, Joel H.; Peric, Milovan; Street, Robert L. Computational methods for fluid dynamics [en línia]. 4th ed. Cham, Switzerland: Springer, 2020 [Consulta: 20/07/2026]. Disponible a: <https://link-springer-com.recursos.biblioteca.upc.edu/book/10.1007/978-3-319-99693-6>. ISBN 9783319996936.
- Versteeg, H. K.; Malalasekera, W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. 2nd ed. London: Pearson, 2007. ISBN 9780131274983.
- Sagaut, Pierre. Large eddy simulation for incompressible flows: an introduction [en línia]. 3rd ed. Berlin: Springer, 2006 [Consulta: 20/07/2026]. Disponible a: <https://link-springer-com.recursos.biblioteca.upc.edu/book/10.1007/b137536>. ISBN 3540263446.

Complementària:

- Davidson, Peter Alan. Turbulence: an introduction for scientists and engineers. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2015. ISBN 9780198722595.
- Tennekes, H.; Lumley, J. L. A first course in turbulence. Cambridge: MIT Press, 1972. ISBN 0262200198.
- Wilcox, David C. Turbulence Modeling for CFD. 3rd ed. La Cañada: DCW Industries, 2006. ISBN 9781928729082.
- Moin, Parviz. Fundamentals of engineering numerical analysis. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN 9780521711234.