

## 820762 - TFSA - Turbulència: Fenomenologia, Simulació, Aerodinàmica

Unitat responsable: 240 - ETSEIB - Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona  
Unitat que imparteix: 724 - MMT - Departament de Màquines i Motors Tèrmics  
Curs: 2017  
Titulació: MÀSTER UNIVERSITARI EN ENGINYERIA DE L'ENERGIA (Pla 2013). (Unitat docent Optativa)  
MÀSTER UNIVERSITARI EN ENGINYERIA DE L'ENERGIA (Pla 2013). (Unitat docent Optativa)  
Crèdits ECTS: 5 Idiomes docència: Català, Castellà, Anglès

### Professorat

Responsable: Xavier Trias i Carlos-David Pérez Segarra  
Altres: Ivette Rodríguez, Aleix Baez, Jordi Ventosa

### Horari d'atenció

Horari: A convenir amb l'estudiant.

### Capacitats prèvies

Aspectes fonamentals de termodinàmica, mecànica de fluids i transferència de calor necessaris per a entendre el funcionament de les màquines tèrmiques motores.

### Requisits

Coneixements equivalents a haver superat el curs d'anivellament del màster

### Competències de la titulació a les quals contribueix l'assignatura

#### Específiques:

CEMT-7. Analitzar el comportament d'equips i instal·lacions en operació per tal d'elaborar un diagnòstic valoratiu sobre el seu règim d'explotació i d'establir mesures dirigides a millorar l'eficiència energètica dels mateixos.

CEMT-5. Aplicar criteris tècnics i econòmics en la selecció de l'equip tèrmic més adequat per a una determinada aplicació. Dimensionar equips i instal·lacions tèrmiques. Reconèixer i valorar les aplicacions tecnològiques innovadores en l'àmbit de la producció, transport, distribució, emmagatzematge i ús de l'energia tèrmica.

#### Transversals:

CT3. TREBALL EN EQUIP: Ser capaç de treballar com a membre d'un equip interdisciplinari, ja sigui com un membre més o duent a terme tasques de direcció, amb la finalitat de contribuir a desenvolupar projectes amb pragmatisme i sentit de la responsabilitat, tot assumint compromisos considerant els recursos disponibles.

CT4. ÚS SOLVENT DELS RECURSOS D'INFORMACIÓ: Gestionar l'adquisició, l'estructuració, l'anàlisi i la visualització de dades i informació de l'àmbit d'especialitat, i valorar de forma crítica els resultats d'aquesta gestió.

## 820762 - TFSA - Turbulència: Fenomenologia, Simulació, Aerodinàmica

### Metodologies docents

Durant el desenvolupament de l'assignatura es faran servir les següents metodologies docents:

Classe magistral o conferència (EXP): exposició de coneixements per part del professorat mitjançant classes magistrals o bé per persones externes mitjançant conferències convidades.

Classes participatives (PART): resolució col·lectiva d'exercicis, realització de debats i dinàmiques de grup amb el professor o professora i altres estudiants a l'aula; presentació a l'aula d'una activitat realitzada de manera individual o en grups reduïts.

Treball teòric-pràctic dirigit (TD): realització a l'aula d'una activitat o exercici de caràcter teòric o pràctic, individualment o en grups reduïts, amb l'assessorament del professor o professora.

Projecte, activitat o treball d'abast reduït (PR): aprenentatge basat en la realització, individual o en grup, d'un treball de reduïda complexitat o extensió, aplicant coneixements i presentant resultats.

Projecte o treball d'abast ampli (PA): aprenentatge basat en el disseny, la planificació i realització en grup d'un projecte o treball d'àmplia complexitat o extensió, aplicant i ampliant coneixements i redactant una memòria on s'aboca el plantejament d'aquest i els resultats i conclusions.

Activitats d'Avaluació (EV).

Activitats formatives:

Durant el desenvolupament de l'assignatura es faran servir les següents activitats formatives:

Presencials:

Classes magistrals i conferències (CM): conèixer, comprendre i sintetitzar els coneixements exposats pel professorat mitjançant classes magistrals o bé per conferenciants (presencial).

Classes participatives (CP): participar en la resolució col·lectiva d'exercicis, així com en debats i dinàmiques de grup, amb el professor o professora i altres estudiants a l'aula (presencial).

Presentacions (PS): presentar a l'aula una activitat realitzada de manera individual o en grups reduïts (presencial).

Treball teòric pràctic dirigit (TD): realitzar a l'aula una activitat o exercici de caràcter teòric o pràctic, individualment o en grups reduïts, amb l'assessorament del professor o professora (presencial).

No Presencials:

Projecte, activitat o treball d'abast reduït (PR): dur a terme, individualment o en grup, un treball de reduïda complexitat o extensió, aplicant coneixements i presentant resultats (no presencial).

Projecte o treball d'abast ampli (PA): dissenyar, planificar i dur a terme individualment o en grup un projecte o treball d'àmplia complexitat o extensió, aplicant i ampliant coneixements i redactant una memòria on s'aboca el plantejament d'aquest i els resultats i conclusions (no presencial).

Estudi autònom (EA): estudiar o ampliar els continguts de la matèria de forma individual o en grup, comprenent, assimilant, analitzant i sintetitzant coneixements (no presencial).

### Objectius d'aprenentatge de l'assignatura

Objectius:

Conèixer i entendre la fenomenologia dels fluxes turbulents.

Conèixer i interpretar correctament les eines de tractament estadístic per a fluxes turbulents.

Conèixer els aspectes bàsics sobre modelització de la turbulència.

Realització de diferents pràctiques numèriques per a tal d'entendre millor els diferents aspectes teòrics de l'assignatura.

Resultats de l'aprenentatge:

Podeu consultar a l'arxiu Excel els resultats que es van posar a la memòria VERIFICA

Podeu ampliar i concretar.

Al finalitzar l'assignatura, el/la estudiant:

Tindrà coneixements bàsics de turbulència y del seu espectre d'energia.

Tractament estadístic de fluxes turbulents.

## 820762 - TFSA - Turbulència: Fenomenologia, Simulació, Aerodinàmica

Modelització i resolució de fluxes turbulents.

Aplicació dels coneixements bàsics de mètodes numèrics i turbulència a la millora de l'eficiència energètica per mitja de dissenys aerodinàmics eficients.

### Hores totals de dedicació de l'estudiantat

|                       |                             |         |        |
|-----------------------|-----------------------------|---------|--------|
| Dedicació total: 125h | Hores grup gran:            | 0h      | 0.00%  |
|                       | Hores grup mitjà:           | 0h      | 0.00%  |
|                       | Hores grup petit:           | 30h     | 24.00% |
|                       | Hores activitats dirigides: | 1h 39m  | 1.32%  |
|                       | Hores aprenentatge autònom: | 93h 21m | 74.68% |

## 820762 - TFSA - Turbulència: Fenomenologia, Simulació, Aerodinàmica

### Continguts

|   |  |
|---|--|
| <p><b>Contingut 1. Introducció-repàs de les equacions governants: equacions de Navier-Stokes i conservació de l'energia. Conceptes bàsics. Teoria de la capa límit</b></p>  | <p>Dedicació: 11h<br/>Grup gran: 3h<br/>Aprentatge autònom: 8h</p>                               |
| <p><b>Descripció:</b><br/>Repàs general de les equacions de Navier-Stokes. Principis bàsics, simetries i invariants. Breu introducció a la teoria de la capa límit.</p> <p><b>Activitats vinculades:</b><br/>Classe teòrica</p> <p><b>Objectius específics:</b><br/>Conèixer els principis bàsics de les equacions de Navier-Stokes i el significat físic de cadascun dels seus termes. Aprendre la relació entre les simetries dels operadors i els invariants.<br/>Conèixer els conceptes bàsics sobre teoria de la capa límit necessaris per poder dur a terme simulacions numèriques.</p>                                   |  |
| <p><b>Contingut 2. Introducció a la turbulència. Espectre d'energia. Equacions de Navier-Stokes promitjades. Fluxe promig i termes del tensor de Reynolds. Tractament estadístic: autocorrelacions, PDF,</b></p>  | <p>Dedicació: 35h<br/>Grup gran: 9h<br/>Activitats dirigides: 3h<br/>Aprentatge autònom: 23h</p> |
| <p><b>Descripció:</b><br/>A partir de les equacions de Navier-Stokes introduir la fenomenologia de la turbulència i el seu tractament estadístic. Introducció del concepte de d'espectre d'energia a partir d'un senzill exercici pràctic.</p> <p><b>Activitats vinculades:</b><br/>Classe teòrica</p> <p><b>Objectius específics:</b><br/>Repàs de conceptes estadístics bàsics. Introducció del tractament estadístic de les equacions de Navier-Stokes. Introducció del concepte d'espectre d'energia i el seu lligam amb la realitat més quotidiana.<br/>Introducció a la turbulència i la seva complexitat matemàtica.</p> |  |

## 820762 - TFSA - Turbulència: Fenomenologia, Simulació, Aerodinàmica

|  |  |
|--|--|
| <p>Contingut 3. Mètodes numèrics per a la resolució de les equacions governants. Discretització conservativa. Integració temporal de les equacions. Solvers.</p>   | <p>Dedicació: 31h<br/>Grup gran: 8h<br/>Activitats dirigides: 2h<br/>Aprentatge autònom: 21h</p> |
| <p><b>Descripció:</b><br/>Introducció als mètodes numèrics per a la resolució de fluxes turbulents. Anàlisi de les propietats conservatives de les equacions discretes i deducció que quines propietats han de complir els esquemes numèrics per ser-ne consistents.</p> <p><b>Activitats vinculades:</b><br/>Classe teòrica<br/>Classe pràctica<br/>Treball d'abast ampli</p> <p><b>Objectius específics:</b><br/>Esser capaç de representar de manera algebraica un sistema d'equacions discretitzat.<br/>Entendre el lligam entre les simetries dels operadors discrets i els continus.<br/>Esser capaç de deduir les propietats dels operadors discrets a fi que mantinguin els mateixos invariants que els continus.<br/>Implementar-ho en un codi propi i verificar-ne les propietats conservatives.</p>   |  |
| <p>Contingut 4. Resolució directa de la turbulència (DNS). Diferents formes de modelització de la turbulència: LES i models de regularització</p>  | <p>Dedicació: 21h<br/>Grup gran: 5h<br/>Activitats dirigides: 2h<br/>Aprentatge autònom: 14h</p> |
| <p><b>Descripció:</b><br/>Introducció a la simulació directa de la turbulència. Entendre'm els seus potencials i les seves limitacions.<br/>Introducció a les tècniques de modelització de la turbulència de tipus Large-Eddy Simulation (LES) i els models de regularització del terme convectiu.</p> <p><b>Activitats vinculades:</b><br/>Classe teòrica<br/>Classe pràctica<br/>Treball d'abast reduït<br/>Treball d'abast ampli</p> <p><b>Objectius específics:</b><br/>Conèixer què implica fer simulacions directes de la turbulència. Quina n'és la seva utilitat i quines són les seves limitacions.<br/>Conèixer els principis bàsics que hi han darrera de les tècniques de modelització de la turbulència tipus Large-Eddy Simulation (LES). Breu explicació dels models més emprats en l'actualitat.<br/>Conèixer els principis bàsics que hi han darrera de les tècniques de modelització de la turbulència basades en la regularització del terme convectiu.</p> |  |

## 820762 - TFSA - Turbulència: Fenomenologia, Simulació, Aerodinàmica

Contingut 5. Aplicació de tècniques de simulació a l'estudi de fluxes al voltant d'obstacles, al voltant d'un cilindre, al voltant d'un perfil aerodinàmic i al voltant d'un cotxe simplificat..

Dedicació: 27h

Grup gran: 5h

Activitats dirigides: 8h

Aprenentatge autònom: 14h

**Descripció:**

Aplicació dels coneixements adquirits a algú cas pràctic.

**Activitats vinculades:**

Classe teòrica

Classe pràctica

Treball d'abast ampli

**Objectius específics:**

Conèixer les diferents tecnologies utilitzades depenent del rang de temperatures de treball.

Conèixer els diferents aspectes medio-ambientals i les normatives vigents relacionades amb les instal·lacions solars tèrmiques tan de baixa com d'alta temperatura.

Conèixer les diferent metodologies i programes per al càlcul de instal·lacions solars tèrmiques.

Esser capaç de realitzar el càlcul i dimensionat de diferents tipus de instal·lacions solars tèrmiques com ara: instal·lacions per a l'escalfament d'aigua sanitària, instal·lacions de refrigeració per absorció, plantes termo-solars.

## 820762 - TFSA - Turbulència: Fenomenologia, Simulació, Aerodinàmica

### Planificació d'activitats

|  |   |
|--|---|
| <p>1. Classes de teoria</p>  | <p>Dedicació: 93h<br/>Activitats dirigides: 5h<br/>Aprentatge autònom: 60h<br/>Grup gran: 28h</p> |
| <p><b>Descripció:</b><br/>Metodologia en grup gran. Exposició dels continguts de l'assignatura seguint un model de classe expositiva i participativa. La matèria de l'assignatura s'ha organitzat en 5 àrees temàtiques o temes.</p> <p><b>Material de suport:</b><br/>Bibliografia recomanada. Apunts i transparències. Articles de revistes relacionades amb la temàtica.</p> <p><b>Descripció del lliurament esperat i vincles amb l'avaluació:</b><br/>Aquesta activitat s'avalua conjuntament mitjançant la resta dels treballs del curs i les proves de coneixement.</p> <p><b>Objectius específics:</b><br/>En finalitzar aquesta activitat, l'alumne ha de ser capaç de dominar els coneixements adquirits, consolidar-los i aplicar-los correctament a diferents problemes tècnics. Els coneixements adquirits s'aplicaran a la resta d'activitats/problemes dirigits.</p>              |   |
| <p>2. Resolució numèrica de l'equació de Burgers en l'espai de Fourier</p>   | <p>Dedicació: 7h<br/>Grup gran: 1h<br/>Aprentatge autònom: 4h<br/>Activitats dirigides: 2h</p>    |
| <p><b>Descripció:</b><br/>Treball d'abast ampli on l'estudiant posarà en pràctica els coneixements adquirits. El problema consisteix en resoldre numèricament l'equació de Burgers en l'espai de Fourier.</p> <p><b>Material de suport:</b><br/>Bibliografia recomanada. Apunts i transparències. Articles de revistes relacionades amb la temàtica.</p> <p><b>Descripció del lliurament esperat i vincles amb l'avaluació:</b><br/>Report amb els resultats i el seu anàlisi.</p> <p><b>Objectius específics:</b><br/>Ésser capaç de resoldre numèricament el problema plantejat.<br/>Consolidar els coneixements teòrics adquirits mitjançant el problema pràctic plantejat: espectre d'energia, anàlisi estadística del resultat, propietats conservatives de les equacions...<br/>Entendre la dependència física i numèrica dels diferents paràmetres presents en el problema plantejat.</p> |   |
| <p>3. Implementació d'un codi estructurat bidimensional per a la resolució de les equacions de Navier-Stokes incompressibles</p>   | <p>Dedicació: 6h<br/>Aprentatge autònom: 4h<br/>Activitats dirigides: 2h</p>                      |
| <p><b>Descripció:</b><br/>Treball d'abast ampli on l'estudiant posarà en pràctica els coneixements adquirits. El problema consisteix en implementar un codi propi per poder resoldre les equacions de Navier-Stokes per a fluxes incompressibles. Estarà limitat a malles estructurades cartesianes i fluxes bidimensionals. Es plantejaran almenys un parell de problemes a resoldre: un per convecció forçada i un altre per convecció natural.</p>  |   |

## 820762 - TFSA - Turbulència: Fenomenologia, Simulació, Aerodinàmica

### Material de suport:

Bibliografia recomanada. Apunts i transparències. Articles de revistes relacionades amb la temàtica.

### Descripció del lliurament esperat i vincles amb l'avaluació:

Report amb els resultats i el seu anàlisi. Lliurament del codi font.

### Objectius específics:

Ésser capaç d'implementar un codi propi per a la resolució de les equacions de Navier-Stokes incompressibles.

Entendre el rol que juguem els diferents tipus de discretitzacions espaials. En particular, es demanarà que es verifiquin diferents propietats conservatives: massa, momentum, energia cinètica,...

Implementar almenys un solver lineal per a la resolució de l'equació de Poisson per a la pressió.

Verificar amb les eines donades durant el curs les diferents parts del codi.

Consolidar els coneixements teòrics adquirits mitjançant el problema pràctic plantejat: simetries dels operadors discrets, solvers lineals, discretitzacions temporals, ...

Entendre la dependència física i numèrica dels diferents paràmetres presents en els problemes plantejats.

### 4. Simulació directa de la turbulència (DNS) en el codi propi

Dedicació: 6h

Aprenentatge autònom: 4h

Activitats dirigides: 2h

### Descripció:

Treball d'abast ampli on l'estudiant posarà en pràctica els coneixements adquirits. El problema consisteix en realitzar una simulació directa d'un cas turbulent (DNS), fer-ne el corresponent anàlisi estadístic i comparar-ho amb les solucions de referència aportades. Aquesta es farà sobre la base del codi que el/la alumne haurà implementat prèviament.

### Material de suport:

Bibliografia recomanada. Apunts i transparències. Articles de revistes relacionades amb la temàtica.

### Descripció del lliurament esperat i vincles amb l'avaluació:

Report amb els resultats i el seu anàlisi.

### Objectius específics:

Sobre la base del codi de simulació numèrica de les equacions de Navier-Stokes per a fluxes bidimensionals ser capaç de realitzar una simulació DNS d'un cas turbulent.

Millorar l'eficiència del codi; probablement millorar l'eficiència del solver lineal per a l'equació de Poisson per a la pressió.

Ésser capaç d'implementar les eines d'anàlisi estadístic necessàries per extreure els resultats demanats.

Consolidar els coneixements teòrics adquirits mitjançant el problema pràctic plantejat: anàlisi estadística del resultat, teoria de la capa límit, càlcul del elements del tensor de Reynolds,...

Entendre la dependència física i numèrica dels diferents paràmetres presents en el problema plantejat.

### 5. Resolució numèrica d'un cas de modelització LES per a l'equació de Burgers en l'espai de Fourier

Dedicació: 5h

Aprenentatge autònom: 3h

Activitats dirigides: 2h

### Descripció:

Treball d'abast ampli on l'estudiant posarà en pràctica els coneixements adquirits. El problema consisteix en resoldre numèricament l'equació de Burgers en l'espai de Fourier mitjançant un model de turbulència tipus Large-Eddy Simulation (LES). Aquesta simulació es farà sobre la base del codi implementat anteriorment.



## 820762 - TFSA - Turbulència: Fenomenologia, Simulació, Aerodinàmica

### Material de suport:

Bibliografia recomanada. Apunts i transparències. Articles de revistes relacionades amb la temàtica.

### Descripció del lliurament esperat i vincles amb l'avaluació:

Report amb els resultats i el seu anàlisi.

### Objectius específics:

Ésser capaç de resoldre numèricament el problema plantejat.

Consolidar els coneixements teòrics adquirits mitjançant el problema pràctic plantejat: espectre d'energia, anàlisi estadística del resultat, propietats conservatives de les equacions, modelització de la turbulència, concepte de Large-Eddy Simulation (LES),...

Entendre la dependència física i numèrica dels diferents paràmetres presents en el problema plantejat. En especial, les constants presents en el model de turbulència LES.

### 6. Resolució de les equacions de Navier-Stokes per al fluxe al voltant d'un obstacle

Dedicació: 6h

Aprentatge autònom: 4h

Activitats dirigides: 2h

### Descripció:

Treball d'abast ampli on l'estudiant posarà en pràctica els coneixements adquirits. El problema consisteix en resoldre el fluxe al voltant d'un obstacle. Aquest treball es farà sobre la base del codi implementat prèviament.

### Material de suport:

Bibliografia recomanada. Apunts i transparències. Articles de revistes relacionades amb la temàtica.

### Descripció del lliurament esperat i vincles amb l'avaluació:

Report amb els resultats i el seu anàlisi. Lliurament del codi font final.

### Objectius específics:

Ésser capaç de resoldre numèricament el problema plantejat.

Sobre la base del codi propi desenvolupat i verificat anteriorment, implementar les eines de càlcul necessàries pel problema concret: càlcul dels coeficients d'arrossegament i sustentació, anàlisi freqüencial de les senyals per a diferents punts del domini físic,...

Consolidar els coneixements teòrics adquirits mitjançant el problema pràctic plantejat.

Entendre la dependència física i numèrica dels diferents paràmetres presents en els problemes plantejats. En concret les transicions de estacionari cap a no-estacionari i la transició cap a la turbulència.

### 7. Prova de coneixement

Dedicació: 2h

Grup gran: 2h

### Descripció:

Desenvolupament de proves de coneixement de l'assignatura dels continguts. Inclou aspectes teòrics i desenvolupament de problemes.

### Material de suport:

Bibliografia recomanada. Apunts i transparències. Articles de revistes relacionades amb la temàtica.

### Descripció del lliurament esperat i vincles amb l'avaluació:

Els exàmens es desenvoluparan lliurement i s'entregaran juntament amb l'enunciat degudament emplenat amb les dades personals requerides.

### Objectius específics:

Mostrar el nivell de coneixements assolit en les activitats teòriques i de problemes.

## 820762 - TFSA - Turbulència: Fenomenologia, Simulació, Aerodinàmica

### Sistema de qualificació

Examen escrit: 35%

Trabajos realizados individualmente o en grupos: 55%

Asistencia y participación en las actividades prácticas: 10%

### Bibliografia

#### Bàsica:

Pope, S. B. Turbulent flows. Repr. with corr. Cambridge [etc.]: Cambridge University Press, 2000. ISBN 0521591252.

Berselli, Luigi Carlo; Iliescu, T.; Layton, W. J. Mathematics of large eddy simulation of turbulent flows [en línia]. Berlin: Springer, cop. 2006. Disponible a: <<http://dx.doi.org/10.1007/b137408>>. ISBN 3540263160.

Patankar, Suhas V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: McGraw-Hill, cop. 1980. ISBN 0891165223.

Sagaut, Pierre. Large eddy simulation for incompressible flows : an introduction. 3rd ed. Berlin [etc.]: Springer, cop. 2006. ISBN 3540263446.

#### Complementària:

Saad, Yousef. Iterative methods for sparse linear systems. 2nd ed. Philadelphia: SIAM, cop. 2003. ISBN 0898715342.

Foias, Ciprian [et al.]. Navier-Stokes equations and turbulence. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. ISBN 0521360323.

Frisch, Uriel. Turbulence : the legacy of A.N. Kolmogórov. Cambridge: Cambridge University Press, cop. 1995. ISBN 0521457130.

Wendt, John F.; Anderson, John David. Computational fluid dynamics : an introduction. 2nd ed. Berlin ; New York: Springer, 1996. ISBN 354059471X.

#### Altres recursos:

##### Material audiovisual

Transparencies, proposed problems to be used in class

Recurs

Notes made by the professor of the course

Recurs