

# ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN TERMODINÁMICA Y TERMEOECONÓMICA DE SISTEMAS TÉRMICOS

Curso 2016/2017

(Código:28801443)

## 1.PRESENTACIÓN

El perfil del alumno del presente posgrado es el de un profesional que puede ejercer su actividad, dependiendo de su titulación y especialización, en un amplio abanico de campos. Con la superación del presente posgrado, el alumno estará capacitado para desarrollar actividades de investigación y para transferir los resultados de dicha actividad a su entorno profesional, habiendo focalizado dichas capacidades en el área de especialización que el alumno haya decidido dentro de los itinerarios propuestos. Con la realización de un trabajo de investigación dentro de la línea de investigación *Análisis, Simulación y Optimización Termodinámica y Termoeconómica de Sistemas Térmicos*, se pretende que el alumno adquiera y afiance las principales competencias de este tipo de profesionales desde la perspectiva y con la especialización de la generación de energía y de las transformaciones energéticas a partir de sistemas térmicos.

Los trabajos concretos que se podrían desarrollar se seleccionarán a principios del curso (se enumeran algunos temas en el apartado 4), si bien los alumnos también podrán proponer al profesor el desarrollo de algún tema específico, que será aprobado siempre y cuando se inscriba correctamente dentro de la línea propuesta.

## 2.CONTEXTUALIZACIÓN

El estado actual de bienestar y de progreso demanda con cada vez mayor fuerza la generación de energía y, consecuentemente, exige un notable consumo de energía primaria. En efecto, la intensidad energética por unidad de PIB permanece casi constante en los países desarrollados pero aumenta por unidad de población. El consumo de energía primaria en España prácticamente se ha triplicado durante el periodo comprendido entre 1975 y 2005 y, en datos más recientes, ha aumentado más de un 50% desde la década de los 90 hasta la actualidad. Asimismo, en el mismo periodo, el consumo de energía primaria ha aumentado del orden de un 10% en la UE-25 y el consumo mundial un 25% debido a la contribución de países como China o India. Observando el reparto de energía final consumida según fuentes de energía, se observa que, a día de hoy, entorno al 80% de la energía proviene de fuentes fósiles (cerca del 50% del petróleo y el resto del gas natural y del carbón), el 10% es de procedencia nuclear y el resto de origen renovable (incluida la energía hidráulica), dato que tiende al alza año a año. También es reseñable el dato del escaso grado de autoabastecimiento, que en España sólo ronda el 20% (porcentaje alcanzado gracias al aporte de la energía nuclear, la hidráulica y las energías renovables). Cabe destacar, por tanto, que en la actualidad la gran mayoría de la energía consumida en el mundo tiene como origen la combustión, ya que los combustibles fósiles, de los que dependemos fundamentalmente, y algunos combustibles de origen renovable, liberan la energía química asociada a su estructura molecular a través de dicho proceso – y, aunque todavía con incidencia muy escasa, otras energías renovables también generan fluidos con elevada energía térmica (energía solar térmica y energía geotérmica).

Se puede deducir, por tanto, la importancia de formar profesionales que empleen técnicas y dispongan de conocimientos totalmente actualizados que sean capaces de innovar y de mejorar los procesos de producción de energía y de su



transformación.

La presente línea de investigación se centra en el estudio, la simulación y la caracterización de los distintos sistemas y las diferentes tecnologías de transformación y obtención de energía de tipo térmica. La comentada creciente demanda de energía ha requerido la implantación de tecnologías de alto rendimiento, bajo coste de producción, rápida construcción y respetuosas con el medioambiente. Estas tecnologías tomarán un protagonismo cada vez mayor en los años venideros, por lo que su estudio, el diseño de sus componentes y su integración en sistemas más amplios jugarán un papel fundamental en un futuro cercano.

Al igual que la asignatura que da pie a la línea (*Diseño, simulación y optimización de plantas de potencia de ciclo combinado*) la presente línea y el presente trabajo tienen una primera componente de refuerzo de las bases teóricas de la tecnología de las máquinas y elementos involucrados en los sistemas térmicos y otra componente, la principal, de marcado carácter práctico orientado a la investigación.

### Relación con el resto de asignaturas del posgrado

La línea de investigación propuesta es la continuación natural de la asignatura optativa del máster *Diseño, Simulación y Optimización de Plantas de Potencia de Ciclo Combinado*. Por ello, es necesario haber cursado las asignaturas obligatorias del itinerario en Ingeniería Energética. Asimismo se recomienda, por su afinidad, haber cursado las siguientes asignaturas optativas:

- Análisis y explotación de los sistemas eléctricos
- Aplicaciones eléctricas de las energías renovables
- Optimización no lineal
- Simulación numérica de flujos de fluidos en ingeniería
- Métodos computacionales en ingeniería

## 3. REQUISITOS PREVIOS RECOMENDABLES

Para poder realizar el Trabajo Fin de Máster en la presente línea de investigación, el estudiante ha de seleccionar las asignaturas a cursar de acuerdo a las siguientes directrices:

1. *Módulo I* (4 asignaturas). Obligatorias: las 4 asignaturas del Módulo.
2. *Módulo II del Itinerario en Ingeniería Energética* (3 asignaturas). Obligatorias: las 3 asignaturas del Módulo.
3. *Módulo III del Itinerario en Ingeniería Energética* (10 asignaturas). Optativas: tres de las 10 asignaturas del Módulo.

Para la inicialización del trabajo no es condición necesaria que haya tenido que aprobar previamente ninguna de las asignaturas del Master, pero sí que es necesario en la práctica que domine muchos de los conceptos impartidos en algunas de las asignaturas asignadas a la línea de investigación, y fundamentalmente la anteriormente mencionada asignatura del módulo II del Itinerario en Ingeniería Energética *Diseño, Simulación y Optimización de Plantas de Potencia de Ciclo Combinado*

Se considera también como requisito el conocimiento de algún lenguaje de programación en un nivel medio. Los lenguajes de programación con los que se puede trabajar son Visual Basic, C, C++, Fortran, Pascal o Delphi. Este criterio no será excluyente pero sí muy deseable para no aumentar en exceso las horas de trabajo autónomo del alumno. En caso de no cumplirse se podría obviar si el alumno se encuentra matriculado en alguna asignatura o curso de programación.

Además, se considera necesario tener conocimientos de inglés escrito (lectura) a nivel medio.

## 4. RESULTADOS DE APRENDIZAJE

El objetivo principal de la asignatura es que el alumno profundice en el estudio de los sistemas térmicos, tanto de producción de energía como de su transformación, a nivel teórico y fundamentalmente práctico. Más concretamente, los objetivos se pueden vertebrar en tres líneas de trabajo. Por un lado, se pretende que el alumno adquiera un alto grado de comprensión de este tipo de sistemas, presentes en múltiples aplicaciones bien sean de combustible de origen fósil o bien renovable, tanto desde el punto de vista termodinámico como tecnológico, conociendo los distintos tipos de configuraciones y aplicaciones, el porqué de la selección de uno u otro tipo dependiendo del escenario energético en el que vayan concurrir y conjugando los



parámetros termodinámicos con los económicos. Por otro lado, se pretende que el alumno adquiera destreza en el tratamiento numérico y en la simulación de los sistemas térmicos. Finalmente se pretende hacer ver al alumno el estado actual de la tecnología y las líneas de investigación actualmente en desarrollo por la comunidad internacional.

Para la consecución del primer grupo de objetivos, el alumno se centrará en el estudio de una aplicación dada que será la que trate durante la realización de su trabajo, en la que pondrá en práctica los conocimientos adquiridos en las asignaturas anteriormente cursadas del máster.

En relación con el segundo de los objetivos mencionados, el desarrollo del trabajo a ser, en sí mismo, el responsable de proporcionar las competencias necesarias propias de las tareas de investigación. En concreto, se deberá realizar un simulador de la aplicación asignada o propuesta por el propio alumno que permita no sólo la emulación del sistema sino que también permita la optimización o la mejora de algún aspecto del mismo bajo algún criterio. Con ello, el alumno mejorará su preparación en relación con los aspectos relacionados con la aplicación de técnicas propias de la investigación, la resolución de problemas y la destreza en cuanto al empleo de lenguajes de programación.

Los sistemas a simular y a optimizar pueden ser muy diversos, desde simulación de componentes aislados (turbinas, compresores, calderas, colectores solares) hasta sistemas más complejos (turbinas de gas, ciclos de vapor, ciclos combinados, instalaciones solares, instalaciones de cogeneración y refrigeración, entre otras).

Finalmente, en relación con el último grupo de objetivos se verá satisfecho con la presentación y la defensa del trabajo. Este tipo de actividad y su correspondiente evaluación fortalece numerosas competencias, como la comunicación oral y escrita en lengua propia, trabajo de comunicación escrita en lengua extranjera (lectura y síntesis de textos en inglés), aplicación de la informática en el ámbito del estudio (presentaciones en PowerPoint), razonamiento crítico, trabajo de investigación, y capacidad para comunicarse con personas no expertas en la materia.

## 5. CONTENIDOS DE LA ASIGNATURA

### Bloque 1. Definición y motivación de la actividad de investigación objeto del trabajo

Conocimiento detallado de la tecnología que se va a tratar y de las distintas posibilidades existentes para resolver el problema que se plantee en cada caso. Saber distinguir las ventajas e inconvenientes de cada una de las posibles tecnologías. Realizar un breve estudio del estado de la tecnología

### Bloque 2. Definición de la metodología de resolución del problema y selección del sistema computacional para llevarla a la práctica

Definir el tipo de estudio que se va a realizar y las posibles mejoras que deriven de él. Además se deberá indicar el tipo de metodología que se empleará para acometer el estudio, la simulación y el proceso de mejora o de optimización. Realizar un breve estudio de las diferentes metodologías de trabajo.

### Bloque 3. Realización del trabajo

Desarrollo del modelo de simulación e implementación de la herramienta de optimización. Obtención de resultados. Extracción de conclusiones y, llegado el caso, esbozar una prospección tecnológica.

## 6. EQUIPO DOCENTE

- [ANTONIO JOSE ROVIRA DE ANTONIO](#)
- [JOSE DANIEL MARCOS DEL CANO](#)
- [MARIA JOSE MONTES PITA](#)
- [MARTA MUÑOZ DOMINGUEZ](#)
- [FERNANDO VARELA DIEZ](#)

## 7. METODOLOGÍA

El plan diseñado para la realización satisfactoria de este trabajo de máster incluye dos etapas que serán evaluadas



independientemente.

- Etapa de aprendizaje. *Proyecto de trabajo*:
  - Asimilación y análisis del problema a resolver.
  - Concreción de los objetivos del trabajo.
  - Aprendizaje básico de uso de las herramientas computacionales que se utilizarán.
- Etapa de ejecución. *Simulación y Optimización*.
  - Desarrollo e implementación del modelo matemático.
  - Desarrollo e implementación del algoritmo de optimización.
  - Obtención de resultados y análisis de éstos. Conclusiones.

La primera fase del trabajo se iniciará con el repaso y profundización de los conceptos relativos a la tecnología del sistema considerado, su análisis energético y energético, asignación de costes y evaluación de su consumo de recursos naturales y su efecto al medioambiente. Posteriormente se concretarán los objetivos del estudio y finalmente se evaluarán las distintas posibilidades de tratamiento numérico y las distintas herramientas a evaluar en función del alcance de los objetivos.

El estudio de esta primera etapa se realizará mediante documentación proporcionada por el equipo docente, y será un periodo de fuerte interacción con el mismo. Para ello se utilizarán las herramientas de docencia a distancia proporcionadas por la UNED. El tiempo estimado de desarrollo de esta etapa es de 100 horas de trabajo colaborativo/en estrecha relación con el profesor, tras lo cual se realizaría, también con medios telemáticos, una prueba mediante la cual se evaluaría la capacidad del estudiante de proceder a la resolución del problema planteado, y pasar por tanto al desarrollo de la segunda etapa.

La segunda fase del trabajo consistirá en desarrollar los modelos pertinentes para la simulación del sistema, implementar los algoritmos de optimización necesarios y la obtención de los resultados y las conclusiones. Será un trabajo fundamentalmente computacional, tanto de implementación como de ejecución de los códigos y programas. Será, en principio, independiente del profesor, si bien tendrá en ese periodo toda la asistencia informática para llevar a cabo los cálculos y tendrá la posibilidad de consultar dudas puntuales con el equipo docente. Dichos cálculos se realizarán, bien en ordenadores personales, o bien en computadores del departamento de Ingeniería Energética con acceso remoto.

La estimación de horas de trabajo en esta fase de 275. En una primera aproximación se podrían estimar 100 h para el desarrollo del simulador, 75 h para el algoritmo de optimización, 50 h para la obtención de resultados y su estudio y 50 h para la elaboración del trabajo, si bien este reparto puede ser variable en función de cada caso particular a tratar y cada alumno.

Con ello se completan las 375h (15 ECTS) asignadas a ambas tareas.

Conviene, asimismo, indicar que desde un principio se animará al estudiante a que conozca los recursos bibliográficos disponibles en Biblioteca de la UNED, debiéndose entender estos en su doble vertiente: documentación propiamente dicha a la que se puede acceder y procedimientos para llevar a cabo una gestión eficiente en el proceso de obtención de dicha documentación.

## 8.BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

### Comentarios y anexos:

Al existir diferentes temáticas dentro de la línea de investigación, se recomendará a cada alumno los diferentes recursos bibliográficos que le pueden ser de interés.

Asimismo, forman parte de la bibliografía básica los recursos electrónicos de la biblioteca de la UNED, accesibles a través del campo UNED-e. En concreto serán de utilidad los siguientes:

Publicaciones periódicas. Se destacan las de las editoriales siguientes:

- ASME
- Elsevier
- IEEE
- Institution of Mechanical Engineers



- Taylor & Francis
- Wiley
- Otros editores

Publicaciones no periódicas: caben destacar los anales de congresos, principalmente los de ASME y del Institute of Mechanical Engineers.

## 9.BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

ISBN(13): 9780408013508  
 Título: THE EXERGY METHOD OF THERMAL PLANT ANALYSIS  
 Autor/es: Kotas, T. J. ;  
 Editorial: Butterworths

Buscarlo en librería virtual UNED

Buscarlo en bibliotecas UNED

Buscarlo en la Biblioteca de Educación

Buscarlo en Catálogo del Patrimonio Bibliográfico

ISBN(13): 9780852964196  
 Título: THERMAL POWER PLANT. SIMULATION AND CONTROL  
 Autor/es: D. Flynn ;  
 Editorial: IEE

Buscarlo en librería virtual UNED

Buscarlo en bibliotecas UNED

Buscarlo en la Biblioteca de Educación

Buscarlo en Catálogo del Patrimonio Bibliográfico

ISBN(13): 9780878147365  
 Título: COMBINED-CYCLE GAS AND STEAM TURBINE POWER PLANTS  
 Autor/es: Kehlhofer R. ; Bachmann R. ; Nielsen H. ; Warner J. ;  
 Editorial: Pennwell

Buscarlo en librería virtual UNED

Buscarlo en bibliotecas UNED

Buscarlo en la Biblioteca de Educación

Buscarlo en Catálogo del Patrimonio Bibliográfico

ISBN(13): 9781575241975  
 Título: COMBINED POWER PLANTS : INCLUDING COMBINED CYCLE GAS TURBINE (CCGT) PLANTS (Reprint edition (November 2001))  
 Autor/es: Horlock, J. H. ;  
 Editorial: Krieger Publishing Company



Buscarlo en librería virtual UNED

Buscarlo en bibliotecas UNED

Buscarlo en la Biblioteca de Educación

Buscarlo en Catálogo del Patrimonio Bibliográfico

ISBN(13): 9785030000321

Título: STEAM AND GAS TURBINES

Autor/es: Frolov V. ; Kostyuk, A. ;

Editorial: MIR Publishers, Moscow

Buscarlo en librería virtual UNED

Buscarlo en bibliotecas UNED

Buscarlo en la Biblioteca de Educación

Buscarlo en Catálogo del Patrimonio Bibliográfico

ISBN(13): 9788436253167

Título: INGENIERÍA TÉRMICA

Autor/es: Rovira De Antonio, Antonio José ; Muñoz Domínguez, Marta ;

Editorial: Universidd Nacional de Educación a Distancia

Buscarlo en librería virtual UNED

Buscarlo en bibliotecas UNED

Buscarlo en la Biblioteca de Educación

Buscarlo en Catálogo del Patrimonio Bibliográfico

ISBN(13): 9788474841437

Título: TURBOMÁQUINAS TÉRMICAS : FUNDAMENTOS DEL DISEÑO TERMODINÁMICO

Autor/es: Muñoz Domínguez, Marta ; Valdés Del Fresno, Manuel ; Muñoz Torralbo, Manuel ;

Editorial: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

Buscarlo en librería virtual UNED

Buscarlo en bibliotecas UNED

Buscarlo en la Biblioteca de Educación

Buscarlo en Catálogo del Patrimonio Bibliográfico

ISBN(13): 9789681817729

Título: ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE PLANTAS ELÉCTRICAS

Autor/es: Haywood, R. W. ;

Ámbito: GUI - La autenticidad, validez e integridad de este documento puede ser verificada mediante el "Código Seguro de Verificación (CSV)" en la dirección <https://sede.uned.es/valida/>



D2BF9E448B495E5FDE7D46ECA2FB8131

Editorial: LIMUSA

Buscarlo en librería virtual UNED

Buscarlo en bibliotecas UNED

Buscarlo en la Biblioteca de Educación

Buscarlo en Catálogo del Patrimonio Bibliográfico

## Comentarios y anexos:

- J. H. Horlock (1992). Combined Power Plants. 1st edition. Oxford: Pergamon Press.  
El libro presenta, con gran claridad en la exposición, un análisis termodinámico y económico aplicado a plantas de potencia de ciclo combinado.
- Haywood, R.W. "Análisis termodinámico de las plantas eléctricas", 3ª Edición en castellano, Ediciones Limusa, 1986.  
Constituye un buen libro de introducción a los aspectos energéticos de los ciclos de las turbinas de vapor, turbinas de gas y ciclos especiales. Cabe destacar, además, un apéndice dedicado al estudio económico de los ciclos.
- R. Kehlhofer, J. Warner, H. Nielsen, R. Bachmann (1999). Combined Cycle Gas-Steam Turbine Powerplants. 2nd edition. Tulsa, Oklahoma: PennWell.  
El autor ofrece con esta obra práctica y descriptiva un estudio muy interesante en relación con la tecnología de los ciclos combinados gas-vapor, tanto desde el punto de vista termodinámico como desde el relacionado con los componentes individuales y con la operación de este tipo de plantas. Es un libro muy completo en el que además de describir los principios termodinámicos, los diferentes conceptos de ciclo combinado y la actual tecnología en todos sus aspectos (cargas parciales, control, emisiones), cuenta con un capítulo en el que describe el mercado eléctrico, otro en el que describe los ciclos típicos actualmente instalados y otro de tendencias futuras.
- Kostyuk, A., Frolov, V. (1985) "Steam and Gas Turbines". MIR Publishers, Moscow.  
Libro de la escuela soviética de turbomáquinas. Es un libro claro en la exposición de sus contenidos. Es interesante la parte dedicada al estudio de las turbinas de vapor, en la que se encuentran correlaciones originales para el cálculo de pérdidas.
- Kotas, T.J. (1985) "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis", Butterworths.  
Describe la técnica del análisis termodinámico, basada en el concepto de exergía, aplicada al cálculo de centrales térmicas. Es un libro de una gran claridad de exposición, habiéndose convertido ya en un clásico de la termodinámica de las plantas de potencia.
- M. Muñoz, M. Valdés, M. Muñoz (2002). Turbomáquinas Térmicas. Fundamentos del Diseño Termodinámico. Madrid: Ed. Sección de publicaciones ETSII.  
Se trata de un texto sobre diseño termofluidodinámico de turbomáquinas térmicas. Inicia con un primer capítulo introductorio dedicado al análisis del flujo en los procesos de expansión y compresión en conductos. Posteriormente se dedican dos capítulos al estudio de los intercambios de energía en las turbomáquinas, dos capítulos al estudio del flujo bidimensional en turbinas y turbocompresores axiales, uno al estudio del flujo tridimensional y dos al estudio del funcionamiento fuera de diseño y la regulación de estas máquinas. Cada capítulo termina con un ejercicio numérico muy completo relativo a la materia recién explicada.
- Muñoz, M., Rovira, A. (2006). "Ingeniería Térmica". UNED. Madrid.  
Es un texto con una clara orientación pedagógica, ya que pertenece a la colección Unidades Didácticas de la UNED. Como es típico en la colección, está dividido en tres unidades didácticas; siendo la segunda y la tercera de ellas las de interés para el presente trabajo.
- Damian Flynn (editor) (2003). "Thermal Power Plant. Simulation and Control". IEE Power & Energy Series 43.  
Texto escrito por 25 autores dedicado a la simulación de plantas de potencia y de sus sistemas de control y monitorización. Está dividido en cuatro partes, la primera dedicada a la simulación de los sistemas, la segunda a los sistemas de control, la tercera a la operación, la monitorización y la supervisión y la última en la que se discute el futuro de los sistemas de simulación, control y operación de las plantas de potencia.



## 10. RECURSOS DE APOYO AL ESTUDIO

Curso virtual de la asignatura (se accede a través de Campus Uned-e):

En la plataforma virtual se incluirá la siguiente información: orientaciones para el estudio (Guía Didáctica), foros de comunicación con el equipo docente, tablón de anuncios, grupos de trabajo, pruebas de evaluación (enunciado y soluciones), información sobre prácticas, exámenes de cursos pasados, dibujos y fotografías de elementos constructivos, links de interés, respuesta a preguntas frecuentes, etc.

## 11. TUTORIZACIÓN Y SEGUIMIENTO

Puede contactar con el equipo docente en cualquier momento a través de correo electrónico, a través del curso virtual o telefónicamente. A continuación se muestran los datos de contacto y el horario de guardias.

D. Antonio Rovira de Antonio:

Profesor Contratado Doctor

Lunes de 15,00 a 19,00h.

Tel.: 91 398 82 24, Fax: 91 398 76 15; correo electrónico: rovara@ind.uned.es

Departamento de Ingeniería Energética, despacho 2.27, segunda planta.

D. José Daniel Marcos del Cano:

Profesor Contratado Doctor

Martes de 16.00 a 20.00

Teléfono: 91 398 8221; correo electrónico: jdmarcos@ind.uned.es

Departamento de Ingeniería Energética, despacho 0.16, planta cero.

Dña. María José Montes Pita:

Profesora Contratado Doctor

Miércoles de 10.30 a 14.30

Teléfono: 91 398 6465; correo electrónico: mjmontes@ind.uned.es

Dña. Marta Muñoz Domínguez:

Profesora Titular de Universidad

Jueves de 15,00 a 19,00h.

Tel.: 91 398 64 69; correo electrónico: mmunoz@ind.uned.es

Departamento de Ingeniería Energética, despacho 2.24, segunda planta.

D. Fernando Varela Díez:

Profesor Ayudante Doctor

Miércoles de 10:00 a 14:00 horas

Teléfono: 91 398 6468; correo electrónico: fvarela@ind.uned.es

Departamento de Ingeniería Energética, despacho 2.20, segunda planta.

## 12. EVALUACIÓN DE LOS APRENDIZAJES

Constará de los siguientes elementos:

- Una prueba de evaluación a distancia a la finalización de la etapa aprendizaje.
- Trabajo de investigación realizado y convenientemente recogido en el correspondiente informe final. Podrá ser escrito en español o inglés.
- Defensa oral del trabajo de investigación. La defensa oral se podrá realizar de forma presencial o por videoconferencia.





La calificación final de la asignatura dependerá de las calificaciones obtenidas en los elementos de evaluación, y su ponderación a la nota final es la siguiente:

- Prueba de evaluación al final de la Etapa de Aprendizaje (20%)
- Informe final del trabajo de investigación realizado (40%)
- Defensa oral del trabajo de investigación realizado (40%)

Aparte de los criterios objetivos a los que debe responder todo informe final escrito y exposición oral final relativos a un trabajo de investigación en áreas científico-tecnológicas, se tendrá también en cuenta el grado de eficiencia del estudiante en la obtención de documentación relativa al tema y a su aplicación para el trabajo en cuestión.

Las fechas exactas de cada actividad se concretarán en el curso virtual.

### 13.COLABORADORES DOCENTES

Véase equipo docente.

