



# Guía Docente

## TERMODINÁMICA APLICADA

---



**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**CURSO 2022-2023**



## I.- IDENTIFICACIÓN

|                                 |                                            |
|---------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>NOMBRE DE LA ASIGNATURA:</b> | <b>Termodinámica Aplicada</b>              |
| <b>NÚMERO DE CRÉDITOS:</b>      | <b>6</b>                                   |
| <b>CARÁCTER:</b>                | <b>Obligatoria</b>                         |
| <b>MATERIA:</b>                 | <b>Termodinámica e Ingeniería Térmica</b>  |
| <b>MÓDULO:</b>                  | <b>Ingeniería Industrial</b>               |
| <b>TITULACIÓN:</b>              | <b>Grado en Ingeniería Química</b>         |
| <b>SEMESTRE/CUATRIMESTRE:</b>   | <b>2º curso, 2º semestre (4º semestre)</b> |
| <b>DEPARTAMENTO:</b>            | <b>Ingeniería Química y de Materiales</b>  |

### PROFESOR/ES RESPONSABLE/S:

|                                     |                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Coordinador de la asignatura</b> | <b>Profesor:</b> JUAN CARLOS DOMÍNGUEZ TORIBIO<br><b>Departamento:</b> Ingeniería Química y de Materiales<br><b>Despacho:</b> QB-533<br><b>e-mail:</b> <a href="mailto:jucdomin@ucm.es">jucdomin@ucm.es</a> |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| Grupo A                        |                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Teoría<br>Seminario<br>Tutoría | <b>Profesor:</b> EDUARDO DÍEZ ALCÁNTARA<br><b>Departamento:</b> Ingeniería Química y de Materiales<br><b>Despacho:</b> QP-110<br><b>e-mail:</b> <a href="mailto:ediezalc@ucm.es">ediezalc@ucm.es</a>        |
|                                | <b>Profesor:</b> JUAN CARLOS DOMÍNGUEZ TORIBIO<br><b>Departamento:</b> Ingeniería Química y de Materiales<br><b>Despacho:</b> QB-533<br><b>e-mail:</b> <a href="mailto:jucdomin@ucm.es">jucdomin@ucm.es</a> |
| Grupo B                        |                                                                                                                                                                                                             |
| Teoría<br>Seminario<br>Tutoría | <b>Profesor:</b> MIGUEL LADERO GALÁN<br><b>Departamento:</b> Ingeniería Química y de Materiales<br><b>Despacho:</b> QA-B64<br><b>e-mail:</b> <a href="mailto:mladerog@ucm.es">mladerog@ucm.es</a>           |
|                                | <b>Profesor:</b> JULIÁN GARCÍA GONZÁLEZ<br><b>Departamento:</b> Ingeniería Química y de Materiales<br><b>Despacho:</b> QB-545<br><b>e-mail:</b> <a href="mailto:jgarcia@ucm.es">jgarcia@ucm.es</a>          |



## I.- OBJETIVOS

### ■ OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este curso es el estudio de distintas aplicaciones de los principios termodinámicos a diferentes operaciones de separación, máquinas térmicas y procesos de la industria química.

El objetivo general es proporcionar al estudiante un conocimiento extenso y profundo sobre los principales métodos de estimación y cálculo de las propiedades termodinámicas relacionadas con el equilibrio entre fases y el equilibrio químico, así como estudiar los métodos de análisis termodinámicos (energéticos y exergéticos) para el diseño de sistemas térmicos más eficientes.

### ■ OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Resolver problemas de fluidos reales utilizando ecuaciones volumétricas de estado.
- Identificar los criterios de equilibrio en sistemas sujetos a diferentes restricciones.
- Identificar las condiciones de equilibrio entre fases.
- Calcular la fugacidad de un compuesto puro.
- Utilizar la fugacidad en el cálculo del equilibrio líquido-vapor.
- Obtener los criterios del equilibrio entre fases en sistemas multicomponentes.
- Distinguir entre mezclas ideales y mezclas no ideales.
- Entender los conceptos de propiedades de exceso y coeficientes de actividad.
- Calcular la fugacidad de un compuesto en una mezcla multicomponente.
- Utilizar modelos de coeficientes de actividad, tanto si se dispone de datos experimentales como cuando se deben predecir en ausencia de datos experimentales.
- Saber elegir el modelo termodinámico más adecuado al sistema en estudio.
- Calcular el punto de burbuja, punto de rocío y vaporización parcial de sistemas ideales y no ideales.
- Comprender la importancia del equilibrio líquido-vapor en la operación de separación de la destilación.
- Calcular la solubilidad de un gas en un líquido.
- Calcular las composiciones de equilibrio cuando se mezclan dos líquidos parcialmente miscibles.
- Calcular las composiciones de equilibrio cuando se mezclan dos líquidos parcialmente miscibles y su vapor.
- Calcular la solubilidad de un soluto en una fase fluida.
- Calcular el equilibrio químico de un sistema monofásico con una sola reacción química.
- Calcular el equilibrio químico de un sistema multifásico con varias reacciones químicas.
- Calcular la entalpía de un compuesto puro en un sistema monofásico y en un sistema bifásico en equilibrio.
- Calcular la entalpía de mezclas multicomponentes en un sistema multifásico en condiciones de equilibrio.
- Calcular la exergía en sistemas cerrados y abiertos.
- Calcular la eficiencia exergética en diferentes sistemas.
- Realizar el análisis exergético de sistemas térmicos para la producción de potencia.
- Conocer el comportamiento del vapor de agua y obtener sus propiedades de tablas, diagramas y correlaciones.



- Comprender los fundamentos de las máquinas térmicas utilizadas en los ciclos de potencia.
- Modelar termodinámicamente los dispositivos empleados para la generación de potencia.
- Calcular el rendimiento térmico en turbinas de vapor y de gas y conocer las modificaciones para mejorar su eficiencia.
- Calcular el coeficiente de operación en sistemas de refrigeración y conocer las modificaciones para mejorar su eficiencia.

### III.- CONOCIMIENTOS PREVIOS Y RECOMENDACIONES

#### ■ CONOCIMIENTOS PREVIOS

#### ■ RECOMENDACIONES

Se recomienda haber cursado la asignatura “*Termodinámica y Cinética Química*” del 2º curso, primer semestre (3<sup>er</sup> semestre).

### IV.- CONTENIDOS

#### ■ BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS CONTENIDOS

Propiedades termodinámicas de los fluidos reales. Termodinámica del equilibrio entre fases. Equilibrio en las reacciones químicas. Análisis exergético de sistemas. Turbinas de vapor y gas. Máquinas frigoríficas.

#### ■ PROGRAMA

#### **BLOQUE 1. EQUILIBRIO ENTRE FASES Y EQUILIBRIO QUÍMICO**

##### **Tema 1: Termodinámica del equilibrio entre fases**

Estado de equilibrio. Criterios de equilibrio. El potencial químico. Equilibrio en un sistema multifásico cerrado. Ecuación de Gibbs-Duhem. La regla de las fases. Fugacidad y coeficiente de fugacidad. Sistemas ideales. Actividad y coeficiente de actividad.

##### **Tema 2: Fugacidad y coeficiente de fugacidad**

Relaciones básicas. Ecuaciones de estado. Expresiones de cálculo.

##### **Tema 3: Coeficientes de actividad de mezclas líquidas**

Coeficientes de actividad a partir de las funciones de exceso. Ecuaciones de Wilson, NRTL y UNIQUAC. Estimación de coeficientes de actividad por métodos de contribución de grupos: UNIFAC. Coeficientes de actividad a partir de medidas experimentales de equilibrio.

##### **Tema 4: Equilibrio líquido-vapor**

Razón de equilibrio líquido-vapor. Razones de equilibrio independientes de la composición. Razones de equilibrio dependientes de la composición. Solubilidad de gases en líquidos. Ley de Henry. Consistencia termodinámica de datos de equilibrio. Diagramas de equilibrio.



**Tema 5: Equilibrio líquido-líquido**

Miscibilidad y estabilidad termodinámica en el equilibrio líquido-líquido. Mezclas binarias. Mezclas ternarias y multicomponentes.

**Tema 6: Equilibrio líquido-sólido**

Solubilidad de sólidos en líquidos. Solubilidad de sólidos y líquidos en fluidos supercríticos.

**Tema 7: Entalpías de mezcla**

Entalpías molares de compuestos puros. Entalpías molares parciales de mezcla. Diagramas entálpicos de mezclas binarias. Entalpías de reacción

**Tema 8: Equilibrio químico**

Equilibrio químico en sistema de una sola fase. La constante de equilibrio. Composiciones de equilibrio. Equilibrio químico de varias reacciones en una sola fase. Combinación de equilibrio químico y equilibrio entre fases.

**BLOQUE 2. TERMOTECNIA**

**Tema 9. Termodinámica del vapor de agua**

Introducción. El agua en estado líquido. Vapor de agua saturado. Vapor de agua recalentado. Tablas, correlaciones y diagramas para el vapor de agua.

**Tema 10: Análisis exergético de sistemas**

Concepto de exergía. Balances exergéticos en sistemas cerrados. Balances exergéticos en sistemas abiertos. Eficacia exergética de equipos. Diagramas de Sankey y de Grassmann.

**Tema 11: Turbinas de vapor**

Introducción. Funcionamiento de una central térmica. El ciclo Rankine. El ciclo Rankine con recalentamiento intermedio del vapor. Ciclo de Rankine regenerativo. Sistemas de cogeneración.

**Tema 12: Turbinas de gas**

Introducción. Aplicaciones de las turbinas de gas. Ciclo de Brayton. Ciclos de Brayton modificados. Ciclos combinados: gas-vapor.

**Tema 13: Máquinas frigoríficas**

Introducción. Refrigeración por compresión de vapor. Tipos de refrigerantes. Sistemas de compresión en cascada. Sistemas de compresión multietapa. Refrigeración por absorción. La bomba de calor. Refrigeración por gas: Ciclo de Brayton inverso.

**V.- COMPETENCIAS**

■ **GENERALES:**

- **CG1-MII1:** Aplicar conceptos de termodinámica aplicada.



■ **ESPECÍFICAS:**

- **CE7-T1:** Aplicar los Principios de la Termodinámica en diferentes tipos de sistemas.
- **CE7-T2:** Plantear los criterios de equilibrio y estabilidad de los sistemas y saber aplicarlos a los equilibrios de fases y al equilibrio químico.
- **CE7-T3:** Calcular los parámetros y variables que definen el equilibrio entre fases y el equilibrio químico.
- **CE7-T9:** Aplicar los Principios de la Termodinámica a diferentes tipos de sistemas industriales y tecnológicos.
- **CE7-T11:** Diseñar algunas instalaciones y dispositivos relacionados con el calor y el frío: turbinas de vapor y gas, máquinas frigoríficas.

■ **TRANSVERSALES:**

- **CT2-III1:** Demostrar capacidad de resolución de problemas.
- **CT5-III1:** Consultar, utilizar y analizar fuentes bibliográficas.
- **CT5-II2** Usar bibliografía y bases de datos especializadas y recursos accesibles a través de Internet.

## VI. – HORAS DE TRABAJO Y DISTRIBUCIÓN POR ACTIVIDAD

| Actividad    | Presencial (horas) | Trabajo autónomo (horas) | Créditos |
|--------------|--------------------|--------------------------|----------|
| Teoría       | 36                 | 49                       | 3,4      |
| Seminarios   | 20                 | 22,5                     | 1,7      |
| Tutorías     | 4                  | 6                        | 0,4      |
| Exámenes     | 6                  | 6,5                      | 0,5      |
| <b>Total</b> | <b>66</b>          | <b>84</b>                | <b>6</b> |

## VII.- METODOLOGÍA

El tiempo lectivo del curso se divide en clases teóricas, seminarios y tutorías.

Las **clases teóricas** consistirán, de forma mayoritaria, en lecciones magistrales en las que se expondrán los conocimientos teóricos necesarios para resolver los ejemplos prácticos que se ven durante el curso.

En los **seminarios** se abordarán tanto la resolución de problemas previamente propuestos como algunos temas de carácter complementario y eminentemente prácticos.



Las **tutorías** se desarrollarán en dos grupos, cada uno de los cuales está formado por la mitad de los estudiantes matriculados en cada grupo. En las tutorías se supervisará el progreso de los estudiantes, resolviendo sus dudas.

Se utilizará el **Campus Virtual** de la UCM como instrumento para poner a disposición de los estudiantes el material que se utilizará en las clases teóricas y de seminario, y como medio de comunicación entre el profesor y los estudiantes.

## VIII.- BIBLIOGRAFÍA

### ■ BÁSICA:

- PRAUSNITZ, J.M.; LICHTENHALER, R.N. GOMES DE ACEVEDO, E., *Termodinámica molecular de los equilibrios de fases*. Prentice-Hall, Inc.; Madrid, 3ª Ed. 2000.
- SMITH, J.M., ABBOTT, M.M., VAN NESS, H.C., *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. McGraw Hill de México; México, 7º Ed. 2015.
- MORAN, M. y SHAPIRO, N., *Fundamentos de Termodinámica Técnica*. Reverté, Barcelona, 2004.
- ÇENGEL, Y.A, BOLES, M. A., *Termodinámica*. Mc Graw-Hill Interamericana, 8ª Ed. 2015.

### ■ COMPLEMENTARIA:

- POLING, B.; PRAUSNITZ, J.M., O'CONNELL, J.O., *The Properties of Gases and Liquids*. McGraw Hill Education Co.; New York, 5ª Ed. 2000.
- HOUGEN, O.A.; WATSON, K.M. y RAGATZ, R.A., *Principios de los Procesos Químicos. Tomo II. Termodinámica*. Reverté; Barcelona. 2ª Ed. 1978.
- WALAS, S.M., *Phase Equilibria in Chemical Engineering*. Butterworth Publishers; Boston, MA. 1985.
- DE LUCAS, A., *Termotecnia Básica para Ingenieros Químicos: Bases de Termodinámica Aplicada*. Ed. Universidad de Castilla-La Mancha, 2004.
- DE LUCAS, A., *Termotecnia Básica para Ingenieros Químicos: Procesos Termodinámicos y Máquinas*. Ed. Universidad de Castilla-La Mancha, 2004.
- WINTERBONE D., TURAN A., *Advanced Thermodynamics for Engineers*. Butterworth-Heinemann, 2ª Ed. 2015.

## IX.- EVALUACIÓN

El rendimiento académico del estudiante así como la calificación final de la asignatura se obtendrá de forma ponderada atendiendo a los porcentajes que se expresan a continuación y que se mantendrán en todas las convocatorias.

**■ EXÁMENES ESCRITOS****70%**

La evaluación de las competencias adquiridas en la asignatura (CG1-MII1, CG4, CE7-T1, CE7-T2, CE7-T9, CE7-T10, CE7-T11, CT1, CT2, CT8) se realizará mediante dos exámenes parciales escritos, de carácter principalmente práctico. El primero de los exámenes parciales se programará aproximadamente a mitad del curso y tendrá como objetivo la evaluación de los contenidos del bloque 1 (equilibrio entre fases y equilibrio químico) del programa de la asignatura. El segundo examen parcial se programará al final del curso, teniendo como objetivo la evaluación del bloque 2 (termotecnia) del programa de la asignatura. Este segundo examen parcial, así como las partes correspondientes a la evaluación del bloque 2 (termotecnia) en los exámenes de las convocatorias ordinaria y extraordinaria, se llevarán a cabo en aulas informáticas, siempre que haya disponibilidad de estas.

Los estudiantes que en los exámenes parciales obtengan una calificación media igual o superior a 5 podrán acceder a la calificación global del curso, siempre que la calificación de cada uno de los exámenes parciales sea igual o superior a 4. Los estudiantes con exámenes parciales con calificación inferior a 4 deberán presentarse obligatoriamente a la evaluación de los contenidos de dicho examen parcial en la convocatoria ordinaria. Los exámenes parciales con calificación superior a 5 darán derecho al estudiante, si así lo desea, a no tener que realizar de nuevo la evaluación de esa parte del programa en el examen de la convocatoria ordinario de la asignatura.

Los estudiantes que deseen realizar el examen correspondiente a la convocatoria ordinaria, aun habiendo aprobado la asignatura por parciales, con objeto de mejorar su calificación, serán calificados con la nota alcanzada en la convocatoria ordinaria, cualquiera que sea esta.

Si bien, los exámenes parciales con calificación superior a 5 permiten liberar materia en caso de que el estudiante tenga que presentarse al examen en su convocatoria ordinaria esto no será así en el caso de tener que presentarse también a la convocatoria extraordinaria. En la convocatoria extraordinaria, el estudiante siempre será examinado de los dos bloques que componen el programa de la asignatura, independiente de que haya obtenido en alguno de los dos exámenes parciales una calificación superior a 5.

**■ TRABAJO PERSONAL****30%**

La evaluación del trabajo de aprendizaje individual realizado por el estudiante se realizará teniendo en cuenta la destreza del estudiante en la resolución de problemas modelo de cada una de las partes de la asignatura.

La evaluación permitirá conocer el grado de consecución de las competencias CG4, CE7-T2, CE7-T11, CT1, CT2, CT5, CT8. El trabajo personal representa el 30% de la evaluación global.





## ■ ASISTENCIA Y PARTICIPACIÓN ACTIVA EN LAS CLASES

Para poder acceder a la evaluación global de la asignatura, el estudiante debe haber participado al menos en el 70% de las actividades presenciales de aula (teoría y seminarios y tutorías).

Las calificaciones de las actividades previstas para la evaluación de la asignatura (exámenes, entrega de problemas, pruebas, etc.) se comunicarán a los estudiantes con la antelación suficiente antes de la realización del examen final, para que puedan planificar adecuadamente el estudio de ésta u otras asignaturas.

En especial, las notas de los exámenes parciales se comunicarán en un plazo máximo de 20 días, salvo en el caso del segundo parcial, en el que el plazo puede ser menor para adaptarse al examen final.

En todo caso, se respetará el plazo mínimo de siete días entre la publicación de las calificaciones y la fecha del examen final de la asignatura.



**PLANIFICACIÓN DE ACTIVIDADES – CRONOGRAMA**

| BLOQUE                                         | ACTIVIDAD | HORAS | GRUPOS | INICIO           | FIN        |
|------------------------------------------------|-----------|-------|--------|------------------|------------|
| 1. Equilibrio entre fases y equilibrio químico | Teoría    | 18    | 1      | 1ª semana        | 8ª semana  |
|                                                | Seminario | 10    | 1      |                  |            |
|                                                | Tutoría   | 2     | 2      | 5ª y 7ª semana   |            |
| 2. Termotecnia                                 | Teoría    | 18    | 1      | 8ª semana        | 15ª semana |
|                                                | Seminario | 10    | 1      |                  |            |
|                                                | Tutoría*  | 2     | 2      | 12ª y 15ª semana |            |

\* Las tutorías programadas están sujetas a posibles modificaciones según la planificación conjunta del curso.



**RESUMEN DE LAS ACTIVIDADES**

| Actividad docente                                                                | Competencias asociadas                                                 | Actividad profesor                                                                       | Actividad estudiante                                           | Procedimiento de evaluación                          | P  | NP   | Total | C   |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----|------|-------|-----|
| <b>Teoría</b>                                                                    | CG1-MII1, CE7-T1, CE7-T2, CE7-T9, CE7-T11                              | Exponer verbalmente las líneas maestras de cada tema del programa.                       | Atender y participar activamente en el desarrollo de la clase. | Exámenes escritos.                                   | 36 | 49   | 85    |     |
| <b>Seminarios</b>                                                                | CG1-MII1, CE7-T1, CE7-T2, CE7-T9, CE7-T11, CT2-III1, CT5-III1, CT5-II2 | Plantear y resolver cuestiones y problemas de carácter numérico.                         | Discutir y resolver cuestiones y problemas propuestos.         | Exámenes escritos.                                   | 20 | 22,5 | 42,5  |     |
| <b>Tutorías</b>                                                                  | CG1-MII1, CE7-T1, CE7-T2, CE7-T9, CE7-T11, CT2-III1, CT5-III1, CT5-II2 | Supervisar el progreso de los estudiantes en su trabajo. Corregir los controles escritos | Desarrollar su trabajo personal y realizar controles escritos. | Controles escritos y entrega de problemas resueltos. | 4  | 6    | 10    | 30% |
| <b>Exámenes</b>                                                                  | CG1-MII1, CE7-T1, CE7-T2, CE7-T9, CE7-T11, CT2-III1                    | Diseñar y corregir los exámenes. Calificar al alumno.                                    | Realizar los exámenes.                                         | Exámenes.                                            | 6  | 6.5  | 12,5  | 70% |
| <b>P : Presenciales; NP: no presenciales (trabajo autónomo); C: calificación</b> |                                                                        |                                                                                          |                                                                |                                                      |    |      |       |     |