



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

PROCESO DE
COORDINACIÓN DE LAS
ENSEÑANZAS PR/CL/001



E.T.S.I Aeronáutica y del
Espacio

ANX-PR/CL/001-01

GUÍA DE APRENDIZAJE

ASIGNATURA

143003033 - Fundamentos Físicos De Los Motores Cohete Por Acel

PLAN DE ESTUDIOS

14IB - Master Universitario En Ingeniería Aeronautica

CURSO ACADÉMICO Y SEMESTRE

2025/26 - Primer semestre

Índice

Guía de Aprendizaje

| | |
|--|----|
| 1. Datos descriptivos..... | 1 |
| 2. Profesorado..... | 1 |
| 3. Conocimientos previos recomendados..... | 2 |
| 4. Competencias y resultados de aprendizaje..... | 2 |
| 5. Descripción de la asignatura y temario..... | 4 |
| 6. Cronograma..... | 6 |
| 7. Actividades y criterios de evaluación..... | 8 |
| 8. Recursos didácticos..... | 10 |

1. Datos descriptivos

1.1. Datos de la asignatura

| | |
|--|--|
| Nombre de la asignatura | 143003033 - Fundamentos Físicos de los Motores Cohete por Acel |
| No de créditos | 3 ECTS |
| Carácter | Optativa |
| Curso | Segundo curso |
| Semestre | Tercer semestre |
| Período de impartición | Septiembre-Enero |
| Idioma de impartición | Castellano |
| Titulación | 14IB - Master Universitario en Ingeniería Aeronautica |
| Centro responsable de la titulación | 14 - E.T.S.I. Aeronáutica Y Del Espacio |
| Curso académico | 2025-26 |

2. Profesorado

2.1. Profesorado implicado en la docencia

| Nombre | Despacho | Correo electrónico | Horario de tutorías * |
|---|-----------------|----------------------------|----------------------------------|
| Jose Javier Honrubia Checa (Coordinador/a) | A176 | javier.honrubia@upm.es | X - 14:00 - 16:00 revisable |
| Claudio Bombardelli | A183 | claudio.bombardelli@upm.es | Sin horario. |
| Luca Volpe | A152 | l.volpe@upm.es | Sin horario. |

* Las horas de tutoría son orientativas y pueden sufrir modificaciones. Se deberá confirmar los horarios de tutorías con el profesorado.

3. Conocimientos previos recomendados

3.1. Asignaturas previas que se recomienda haber cursado

- Mecánica De Fluidos Avanzada

3.2. Otros conocimientos previos recomendados para cursar la asignatura

- primer curso del MUIA

4. Competencias y resultados de aprendizaje

4.1. Competencias

CE-SP-1 - Aptitud para proyectar, construir y seleccionar la planta de potencia más adecuada para un vehículo aeroespacial, incluyendo las plantas de potencia aeroderivadas.

CE-SP-9 - Conocimiento adecuado de los distintos Subsistemas de las Plantas Propulsivas de Vehículos Aeroespaciales.

CG12 - Aplicar los conocimientos adquiridos y su capacidad de resolución de problemas en entornos nuevos o poco conocidos dentro de contextos más amplios (o multidisciplinares) relacionados con su área de estudio.

CG14 - Comunicar sus conclusiones y los conocimientos y razones últimas que las sustentan a públicos especializados y no especializados de un modo claro y sin ambigüedades.

CT1 - Capacidad para comprender los contenidos de clases magistrales, conferencias y seminarios, así como cualquier información y documentación en lengua inglesa.

CT3 - Capacidad para adoptar soluciones creativas que satisfagan adecuadamente las diferentes necesidades planteadas.

CT4 - Capacidad para trabajar de forma efectiva como individuo, organizando y planificando su propio trabajo, de forma independiente o como miembro de un equipo.

CT5 - Capacidad para gestionar la información, identificando las fuentes necesarias, los principales tipos de documentos técnicos y científicos, de una manera adecuada y eficiente.

4.2. Resultados del aprendizaje

RA16 - Determinación de la energía de los iones acelerados por un motor por plasma mediante un RPA.

RA202 - Conocimiento y comprensión de los motores de plasma y su rango de aplicación.

RA5 - Conoce los plasmas en la naturaleza y en particular el entorno espacial. Calcula los parámetros y magnitudes fundamentales de los plasmas

RA10 - Conoce los sistemas propulsivos por plasma y la aplicación de las sondas eléctricas para la medida de las propiedades de los jets de plasma producidos por los mismos

RA120 - Aprender a pensar sobre fenómenos físicos.

RA201 - Conocimiento y comprensión de la Física de Plasmas con una base lo suficientemente amplia y general para poder abordar sus aplicaciones a la propulsión espacial.

RA101 - Conocimiento, comprensión, aplicación y análisis de los sistemas de propulsión espaciales.

5. Descripción de la asignatura y temario

5.1. Descripción de la asignatura

Consta de dos partes dedicadas, respectivamente, a la Física de Plasmas y a la propulsión por plasma. En la primera parte, se describen los fundamentos físicos de los plasmas, sus propiedades y parámetros más importantes. Se estudian las longitudes y tiempos característicos, el movimiento de cargas en campos electromagnéticos, las distribuciones de velocidades, las colisiones entre partículas del plasma y la propagación de ondas electromagnéticas. Se describen las ecuaciones cinéticas (Vlasov, Boltzmann y Fokker-Planck) y magneto-hidrodinámicas (MHD) como herramientas fundamentales para el estudio de la propulsión por plasma.

En la segunda parte, se aborda el estudio de la generación y aceleración de iones y plasmas, con especial énfasis en el modelado analítico y la simulación numérica. Se describen los principales dispositivos de propulsión, incluyendo los motores iónicos, los de efecto Hall y los electromagnéticos. Entre estos últimos, se estudian en detalle los motores tipo Helicon y VASIMR. Finalmente, se describe someramente la generación de energía nuclear en el espacio.

5.2. Temario de la asignatura

1. Tema 1. INTRODUCCION. 1.1. Desarrollo histórico. 1.2. Tipos de propulsión eléctrica. 1.3. Motores electro-térmicos 1.4. Motores electrostáticos. 1.5. Motores electromagnéticos. 1.6. Otros tipos de motores. 1.7. Empuje, empuje específico y eficiencia.
2. Tema 2. CONCEPTO DE PLASMA. 2.1. Definición de plasma. Cuasi-neutralidad. 2.2 Plasmas en la naturaleza. 2.3. Apantallamiento de Debye. 2.4. Frecuencia del plasma. 2.5. Parámetros del plasma. 2.6. Comportamiento individual y comportamiento colectivo.
3. Tema 3. MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS CARGADAS EN CAMPOS EM. 3.1. Movimiento en campo electromagnético uniforme. 3.2. Movimiento en campo electromagnético general. Derivas por campo eléctrico y magnético. 3.3. Efecto espejo. 3.4. Invariantes adiabáticos.
4. Tema 4. INTERACCIÓN DE ELECTRONES E IONES. 4.1. Dispersión Coulombiana. 4.2. Frecuencia de colisiones. 4.3. Conductividades térmica y eléctrica. 4.4. Difusión continua en el espacio de velocidades. 4.5. Ley de Ohm generalizada. 4.6. Difusión y movilidad.
5. Tema 5. IONIZACIÓN. 5.1 Ionización en equilibrio. Ecuación de Saha. 5.2. Ionización de plasmas fuera del equilibrio. 5.3. Procesos de ionización: ionización por impacto y radiativa, recombinación de tres cuerpos y radiativa. 5.4. Modelo corona.
6. Tema 7. DESCRIPCIONES DEL PLASMA. 7.1. Función de distribución de las partículas del plasma. 7.2.

Descripciones microscópica, cinética y fluidodinámica. 7.3. Ecuaciones de movimiento microscópicas. Métodos Particle-In-Cell.

7. Tema 8. ECUACIONES CINÉTICAS. 8.1. Ecuación de Vlasov. 8.2. Ondas de Langmuir y acústicas. Amortiguamiento de Landau. 8.3. Ecuación de Boltzmann. 8.4. Ecuación de Fokker-Planck. 8.5. Propiedades del término de colisiones. Teorema H.

8. Tema 9. EL PLASMA COMO FLUIDO. 9.1. Ecuaciones de la magnetohidrodinámica (MHD). 9.2. Ondas de Alfvén, ondas magnetosónicas. 9.3. Ecuación de inducción. Conservación del flujo magnético. 9.4. Ecuaciones de Braginskii. Coeficientes de transporte.

9. Tema 6. VAINAS ELECTROSTÁTICAS. 6.1. Plasma en contacto con una pared límite. 6.2. Vainas electrostáticas: potencial flotante, corriente de Bohm, ley de Child-Langmuir. 6.3. Solución generalizada.

10. Tema 10. PROPULSIÓN ELECTROSTÁTICA. 11.1. Generación de plasma. 11.2. Aceleración de los iones. 11.3. Confinamiento por campos magnéticos. 11.4. Cátodos huecos. Cálculo del empuje. 11.5. Tipos de rejillas. Modelos numéricos. Erosión.

11. Tema 11. MOTORES DE EFECTO HALL. 12.1. Fundamentos físicos y leyes de escalado. 12.2. Modelo unidimensional. 12.3. Modelo de Braginskii 12.4. Oscilaciones. 12.5. Erosión.

12. Tema 12. MOTORES ELECTROMAGNÉTICOS. 13.1. Motores magneto-plasma-dinámicos. 13.2. Motores de plasma pulsado. 13.3. Motores tipo Helicon. 13.4. Motores tipo VASIMR. 13.5. Física de las toberas magnéticas. 13.6. Motores de inducción pulsada.

13. Tema 13. GENERACIÓN DE ENERGÍA NUCLEAR EN EL ESPACIO. 14.1. Generadores isotópicos y reactores nucleares. 14.2. Potencia de un generador isotópico. 14.3. Sistemas de conversión de potencia: termoeléctrica y dinámica. 14.4. Sistemas utilizados en vuelo.

6. Cronograma

6.1. Cronograma de la asignatura *

| Sem | Actividad tipo 1 | Actividad tipo 2 | Tele-enseñanza | Actividades de evaluación |
|-----|--|------------------|---|---|
| 1 | Tema 1 Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral | | La modalidad no presencial sólo se utilizará para consultas o tutorías. Duración: 00:00 OT: Otras actividades formativas / Evaluación | Presentación de trabajos individuales. Asistencia obligatoria. Esta actividad se realizará preferente, ente durante la segunda mitad del curso, semanas 10 a 15. PI: Técnica del tipo Presentación Individual Evaluación Progresiva Presencial Duración: 00:15 |
| 2 | Tema 2 + resolución de problemas Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral | | | |
| 3 | Tema 3 + resolución de problemas Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral | | | |
| 4 | Tema 4 + resolución de problemas Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral | | | |
| 5 | Tema 5 + resolución de problemas Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral | | | |
| 6 | Tema 6 + resolución de problemas Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral | | | |
| 7 | Tema 7 + resolución de problemas Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral | | | |
| 8 | Tema 8 + resolución de problemas Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral | | | |
| 9 | Tema 9 Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral Examen E1 Duración: 01:00 OT: Otras actividades formativas / Evaluación | | | Examen presencial tipo test E1. Temas 1 a 9 EX: Técnica del tipo Examen Escrito Evaluación Progresiva Presencial Duración: 01:00 |
| 10 | Tema 10, 10.1 a 10.5 + resolución de problemas Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral | | | |

| | | | | |
|----|--|--|--|---|
| 11 | Tema 11, 11.1 a 11.2 + resolución de problemas Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral | | | |
| 12 | Tema 11, 11.3 a 11.5 + resolución de problemas Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral Examen E2 Duración: 01:00 OT: Otras actividades formativas / Evaluación | | | Examen presencial tipo test E2. Temas 10 y 11 EX: Técnica del tipo Examen Escrito Evaluación Progresiva Presencial Duración: 01:00 |
| 13 | Tema 12 . 12.1 a 12.3 + resolución de problemas Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral | | | |
| 14 | Tema 12, 12.4 a 12.6 + resolución de problemas Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral | | | |
| 15 | Tema 13 + resolución de problemas Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral Examen E3 Duración: 01:00 OT: Otras actividades formativas / Evaluación | | | Examen presencial tipo test E3. Temas 12 y 13 EX: Técnica del tipo Examen Escrito Evaluación Progresiva Presencial Duración: 01:00 |
| 16 | | | | |
| 17 | | | | Examen final ordinario EX: Técnica del tipo Examen Escrito Evaluación Global Presencial Duración: 02:00 |

Para el cálculo de los valores totales, se estima que por cada crédito ECTS el alumno dedicará dependiendo del plan de estudios, entre 26 y 27 horas de trabajo presencial y no presencial.

7. Actividades y criterios de evaluación

7.1. Actividades de evaluación de la asignatura

7.1.1. Evaluación (progresiva)

| Sem. | Descripción | Modalidad | Tipo | Duración | Peso en la nota | Nota mínima | Competencias evaluadas |
|------|--|--|------------|----------|-----------------|-------------|---|
| 1 | Presentación de trabajos individuales. Asistencia obligatoria. Esta actividad se realizará preferente, ente durante la segunda mitad del curso, semanas 10 a 15. | PI: Técnica del tipo Presentación Individual | Presencial | 00:15 | 25% | 3.5 / 10 | CT3 CT4 CT5 CG14 CE-SP-9 CG12 |
| 9 | Examen presencial tipo test E1. Temas 1 a 9 | EX: Técnica del tipo Examen Escrito | Presencial | 01:00 | 37% | 3.5 / 10 | CG12 CT1 CT3 CT5 CE-SP-1 |
| 12 | Examen presencial tipo test E2. Temas 10 y 11 | EX: Técnica del tipo Examen Escrito | Presencial | 01:00 | 19% | 3.5 / 10 | CE-SP-9 CT1 CT3 CT5 CE-SP-1 |
| 15 | Examen presencial tipo test E3. Temas 12 y 13 | EX: Técnica del tipo Examen Escrito | Presencial | 01:00 | 19% | 3.5 / 10 | CG12 CT1 CT3 CT5 CE-SP-9 CE-SP-1 |

7.1.2. Prueba evaluación global

| Sem | Descripción | Modalidad | Tipo | Duración | Peso en la nota | Nota mínima | Competencias evaluadas |
|-----|------------------------|-------------------------------------|------------|----------|-----------------|-------------|--|
| 17 | Examen final ordinario | EX: Técnica del tipo Examen Escrito | Presencial | 02:00 | 100% | 5 / 10 | CE-SP-9 CG12 CT1 CT3 CT4 CT5 CG14 CE-SP-1 |

7.1.3. Evaluación convocatoria extraordinaria

| Descripción | Modalidad | Tipo | Duración | Peso en la nota | Nota mínima | Competencias evaluadas |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------|----------|-----------------|-------------|--|
| Examen final extraordinario | EX: Técnica del tipo Examen Escrito | Presencial | 02:00 | 100% | 5 / 10 | CE-SP-9 CG12 CT1 CT3 CT4 CT5 CG14 CE-SP-1 |

7.2. Criterios de evaluación

En la modalidad de evaluación progresiva, la evaluación se realizará mediante exámenes de tipo test y la presentación de trabajos individuales. La asistencia a clase y a la presentación de trabajos es obligatoria. Los exámenes de evaluación progresiva consistirán en cuestiones de contenido teórico y/o problemas que evalúen los resultados de aprendizaje indicados y versarán sobre aquellos contenidos específicos tratados en las lecciones magistrales e ilustrados en las clases de problemas. La calificación se obtendrá promediando la nota de los exámenes tipo test (E1, E2 y E3) con la nota de la presentación individual (P) y el factor de asistencia a clase (F). Este factor se calculará para cada alumno como el número total de asistencias dividido por el número total de clases. La nota final de la asignatura (NF) se calculará como: $NF = (0.37 \times E1 + 0.19 \times E2 + 0.19 \times E3 + 0.25 \times P) \times F$. La nota mínima para los exámenes tipo test y la presentación oral será de 3.5 puntos sobre 10

Alternativamente, si el alumno opta por la prueba de evaluación global, la calificación de la asignatura será la obtenida en dicha prueba. En las dos modalidades, será necesaria una calificación numérica global igual o superior a 5 sobre 10 para aprobar la asignatura.

Los alumnos con calificación final inferior a 5 puntos sobre 10 en la prueba de evaluación global se podrán presentar al examen extraordinario, cuyo contenido será similar al de la prueba de evaluación global.

8. Recursos didácticos

8.1. Recursos didácticos de la asignatura

| Nombre | Tipo | Observaciones |
|--|--------------|---|
| F.F. Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 1, New York: Plenum Press (1984). | Bibliografía | Libro básico de introducción a la Física de Plasmas |
| R.J. Goldston and P.H. Rutherford, Introduction to Plasma Physics, Bristol, U.K., Institute of Physics Publishing (2003). | Bibliografía | Libro de Introducción a la Física de Plasmas |
| S. Ichimaru, Basic Principles of Plasma Physics: A Statistical Approach, Reading, Mass., W.A. Benjamin (1973). | Bibliografía | Libro avanzado de Física de Plasmas |
| S.I. Braginskii, Reviews of Plasma Physics, Volume 1. Edited by M. A. Leontovich. Published by Consultants Bureau, New York, 1969, p.205 | Bibliografía | Ecuaciones de la magnetohidrodinámica (MHD) y coeficientes de transporte en presencia de campos electromagnéticos |
| D.M. Goebel and I. Katz, Fundamentals of Electric Propulsion, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology (2008). | Bibliografía | Fundamentos y descripción de motores de propulsión tónica |
| E. Ahedo, Plasmas for Space Propulsion, Plasma Physics and Controlled Fusion 53, 124037 (2011). | Bibliografía | Descripción de los diferentes tipos de propulsión eléctrica |
| M. Martínez-Sánchez, Space Propulsion, MIT Opencourseware, (2004). | Recursos web | Curso de propulsión eléctrica del MIT |