Última actualización: November 1, 2026

🗺️ Ruta de cuatro años · Año 1, Otoño · 🧱 Calculadora integrada

Sobre este curso

Este curso gratuito tiene 10 unidades y 4 laboratorios. Son los totales reales, no un programa más largo recortado.

Una comprobación es un número o un resultado de código en una página de curso que un script vuelve a calcular antes de publicar. El número impreso y el recalculado tienen que coincidir.

> Este es el esquema de un curso gratuito de autoestudio escrito por Saving Planets. No es un curso universitario, no otorga créditos académicos y ninguna institución participa.
>
> Su alcance sigue las introducciones de primer año a la ingeniería aeroespacial como MIT 16.00 y el inicio de Unified Engineering del MIT, los cursos introductorios de aeronáutica y astronáutica de Purdue, Georgia Tech y Embry-Riddle, y el libro clásico Introduction to Flight de John D. Anderson Jr. Enlazamos a materiales gratuitos en todo el curso, sobre todo a la Beginner's Guide to Aeronautics de NASA Glenn. Ninguna de estas organizaciones respalda esta página.
>
> Lo que aportamos: cada unidad se conecta con un vuelo más limpio y con las naves que observan nuestro planeta, cada número de la página se recalcula con un script de verificación antes de publicarse, y cuatro prácticas, entre ellas un túnel de viento virtual y un planeador que construyes, hacen reales las ecuaciones.
>
> Síguelo en orden. Cada unidad tiene objetivos, ideas clave, ecuaciones, ejemplos paso a paso, práctica con respuestas completas, errores comunes, tarjetas de estudio y un cuestionario. Tu progreso se guarda solo en este navegador.

Cómo ayuda este curso a salvar el planeta

La ingeniería aeroespacial construye los satélites que miden el clima, los bosques, el hielo y los océanos de la Tierra, y también tiene que reducir su propia huella: cada kilogramo de combustible de aviación quemado produce unos 3.16 kg de CO_2.

Cada unidad termina con una breve sección con fuentes que muestra cómo sus ideas ayudan a las personas y al planeta.

Para docentes

Puedes enseñar este curso o dejar que un estudiante lo haga solo. Es gratis. Saving Planets no pone nota ni da crédito escolar.

- Esta página es el curso completo: 10 unidades y 4 laboratorios (AERO 101).
- Calcula 15 semanas, unas 6 a 9 horas por semana, incluidas las semanas de laboratorio.
- Sigue el calendario de 15 semanas. Lee la unidad, haz la práctica en papel y luego abre la respuesta. En una semana de laboratorio, haz el laboratorio o la versión en casa.
- Una comprobación es un número o un resultado de código en la página que un script vuelve a calcular antes de publicar. El número que ves y el recalculado tienen que coincidir.
- Usa Imprimir esta página, o descarga la guía de estudio en PDF. La hoja de fórmulas está cerca del final.
- Pregunta: ¿cómo ayuda esta unidad a las personas y al planeta? Cada unidad tiene un recuadro verde con un dato y su fuente.
- Copia la plantilla de guía docente y escribe el nombre de tu clase, el tiempo que tienes y las preguntas que harás. Abrir la plantilla de guía docente

Antes de empezar

Requisitos previos

- Álgebra y trigonometría de secundaria; logaritmos y exponenciales.
- La mecánica de Física I (fuerzas, energía, cantidad de movimiento, movimiento circular) ayuda; cúrsala en paralelo si puedes.
- Cálculo I es útil para algunas deducciones, pero no es necesario para los números.

Cómo estudiar

- Usa unidades SI en todo momento y escríbelas en cada línea.
- Dibuja las fuerzas (sustentación, peso, empuje, resistencia) antes de escribir cualquier ecuación.
- Estima primero; los números aeroespaciales tienen tamaños conocidos (aire a nivel del mar ≈ 1.2 kg/m³, órbita baja ≈ 7.7 km/s).
- Resuelve cada ejercicio en papel antes de abrir la respuesta.
- Usa los simuladores de NASA Glenn para comprobar tu intuición.
- Repite los cuestionarios unos días después. La práctica espaciada es mejor que una sesión larga.

Qué necesitas

- Una computadora con navegador web y hoja de cálculo (FoilSim funciona en el navegador).
- Para la práctica del planeador: cartulina o cartón pluma, una regla, tijeras, plastilina o monedas como lastre en la nariz y una cinta métrica.
- Opcional: el cronómetro de un teléfono.

Calendario sugerido de 15 semanas

Unas 6 a 9 horas por semana: lectura, problemas de práctica y, en las semanas de laboratorio, el laboratorio.

Semana	Unidad	Temas	Lectura
1	Historia del vuelo y el proceso de diseño	Historia del vuelo; el proceso de diseño; las cuatro fuerzas	MIT 16.00; Smithsonian
2	La atmósfera	Atmósfera estándar; velocidad del sonido	NASA Glenn: atmósfera
3	Aerodinámica básica: sustentación y resistencia	Ecuaciones de sustentación y resistencia; Bernoulli	NASA Glenn: sustentación y resistencia
4	Aerodinámica básica: sustentación y resistencia	Número de Reynolds y velocidad de pérdida; Práctica D	FAA PHAK
5	Perfiles aerodinámicos y alas	Perfiles, curva de sustentación, alas finitas; Práctica A	NASA FoilSim
6	Actuaciones de aeronaves	Planeo, potencia necesaria, ascenso	NASA Glenn: ángulo de planeo
7	Actuaciones de aeronaves	Alcance y autonomía; práctica para el parcial	FAA PHAK
8	Estabilidad y control	Estabilidad y control; Práctica C	NASA Glenn: rotaciones
9	Fundamentos de propulsión	Propulsión: reactores, ventiladores y hélices	NASA Glenn: propulsión
10	Cohetes y la ecuación del cohete	Empuje de cohetes y la ecuación del cohete	NASA Glenn: cohetes
11	Cohetes y la ecuación del cohete	Etapas y vehículos de lanzamiento; Práctica B	NASA Glenn: cohetes
12	Órbitas y misiones espaciales	Órbitas, leyes de Kepler, órbita geoestacionaria	JPL Basics of Space Flight
13	Órbitas y misiones espaciales	Transferencias de Hohmann y diseño de misiones	JPL Basics of Space Flight
14	Aviación y espacio sostenibles	Aviación y espacio sostenibles	NASA; EPA; DOE

Semana	Unidad	Temas	Lectura
15	Repaso	Repaso y serie de práctica final	Todas las unidades

Tu progreso

Marca las unidades y los laboratorios al terminarlos y haz los cuestionarios. El progreso y las puntuaciones se guardan solo en este navegador y nunca se nos envían.

Unidades

Historia del vuelo y el proceso de diseño

De los hermanos Wright a Artemis: cómo los ingenieros aeroespaciales convierten una misión en requisitos, compromisos y un diseño que vuela.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Resumir los hitos clave de la aviación y el vuelo espacial.
- Describir el ciclo de diseño: requisitos, concepto, diseño preliminar y detallado, pruebas.
- Explicar los estudios de compromiso y por qué el peso lo condiciona todo.
- Nombrar las cuatro fuerzas del vuelo.

Conceptos clave

- El 17 de diciembre de 1903, el Wright Flyer hizo un vuelo de 12 segundos que recorrió 36 m (120 ft); el mejor vuelo de ese día recorrió 260 m (852 ft) en 59 segundos. Los Wright lo lograron probando: construyeron planeadores y su propio túnel de viento antes de añadir un motor.
- Todo diseño empieza con una misión: carga útil, alcance u órbita, costo, seguridad. Los requisitos convierten la misión en números que el diseño debe cumplir.
- El diseño es iterativo: boceto del concepto, dimensionamiento, análisis, prueba, rediseño. Un estudio de compromiso compara opciones con criterios ponderados.
- Sobre un avión actúan cuatro fuerzas: sustentación, peso, empuje y resistencia. En vuelo recto y nivelado estable, sustentación = peso y empuje = resistencia.
- El peso se acumula: más estructura exige más sustentación, un ala más grande, más resistencia, más combustible y otra vez más peso.

Ecuaciones clave

$$L = W, \quad T = D$$

`L=W, T=D`

Vuelo estable, nivelado y sin aceleración

$$W = mg$$

`W=mg`

Peso

$$\text{Score} = \sum_i w_i \, s_i$$

`Score=_i w_i s_i`

Puntuación ponderada de un estudio de compromiso

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 1.1 Una avioneta de 1100 kg vuela en crucero nivelado. ¿Cuánta sustentación debe producir su ala?

1. Vuelo nivelado: L = W = mg.
2. L = 1,100 × 9.81.

Respuesta: 10,791 N ≈ 10.8 kN.

Ejemplo 1.2 Dos conceptos de ala se califican sobre 10 en costo (peso 0.3), eficiencia (0.5) y facilidad de construcción (0.2). El concepto A obtiene 8, 6, 9; B obtiene 5, 9, 6. ¿Cuál gana?

1. A: 0.3(8) + 0.5(6) + 0.2(9) = 7.2.
2. B: 0.3(5) + 0.5(9) + 0.2(6) = 7.2.

Respuesta: Empate en 7.2: el equipo debería probar ambos o revisar las ponderaciones en las que menos confía.

Ejemplo 1.3 El primer vuelo del Wright Flyer recorrió 36 m en 12 s. ¿Cuál fue su velocidad media respecto al suelo?

1. v = 36/12.

Respuesta: 3 m/s respecto al suelo. Volaba contra un fuerte viento de frente, así que su velocidad aerodinámica era mucho mayor.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Un avión de pasajeros de 70000 kg de masa vuela en crucero nivelado. Halla su sustentación.

   L = 70,000 × 9.81 = 686,700 N ≈ 687 kN.

2. En crucero nivelado, los motores de un avión dan 30 kN de empuje. ¿Cuál es su resistencia?

   30 kN, ya que el empuje equilibra la resistencia en vuelo estable.

3. ¿Por qué los hermanos Wright construyeron un túnel de viento?

   Los datos publicados de sustentación no eran fiables, así que midieron ellos mismos muchas formas de ala: probar antes de construir es el corazón del proceso de diseño.

Ideas erróneas comunes

Mito: Los ingenieros diseñan primero el avión y luego le buscan una misión.

En realidad: La misión y sus requisitos van primero.

Mito: En vuelo nivelado el empuje debe equilibrar el peso.

En realidad: El empuje equilibra la resistencia; la sustentación equilibra el peso.

Mito: Ahorrar un poco de peso solo ahorra ese peso.

En realidad: El ahorro de peso se multiplica a través del tamaño del ala, la resistencia y el combustible.

Tarjetas de estudio

Cuatro fuerzas

Sustentación, peso, empuje, resistencia.

Requisitos

Objetivos medibles que un diseño debe cumplir.

Estudio de compromiso

Comparación ponderada de opciones de diseño.

Ciclo de diseño

Concepto → preliminar → diseño detallado → prueba → iteración.

Wright Flyer

Primeros vuelos propulsados y controlados de un avión, 17 dic. 1903.

Espiral del peso

El peso extra hace crecer todo el diseño.

Cuestionario de autoevaluación

1. En vuelo nivelado estable, la sustentación es igual a...

el empuje

la resistencia

el peso

cero

el peso. Las fuerzas verticales se equilibran.

2. El Wright Flyer voló por primera vez el...

1899

1903

1911

1927

1903. 17 de diciembre de 1903, en Kitty Hawk.

3. Un estudio de compromiso...

elige la pieza más barata

compara opciones con criterios ponderados

prueba un prototipo hasta que falla

se hace después de las pruebas de vuelo

compara opciones con criterios ponderados. Clasifica las opciones de forma sistemática.

4. El primer paso del proceso de diseño es...

los planos detallados

la misión y los requisitos

la prueba de vuelo

elegir un motor

la misión y los requisitos. Los requisitos determinan todo lo que sigue.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Las prioridades de diseño cambian con los tiempos. Los requisitos de los aviones nuevos ahora incluyen el consumo de combustible y las emisiones, así que las mismas herramientas de estudio de compromiso ponderan el clima junto con el costo y el rendimiento.

La NASA enumera tres vías principales para que la aviación sea sostenible: tecnología aeronáutica eficiente, combustible de aviación sostenible y mejores operaciones e infraestructura.

En Saving Planets: Artemis II

Fuentes: Smithsonian: el Wright Flyer de 1903 (https://airandspace.si.edu/collection-objects/1903-wright-flyer/nasm_A19610048000) · NASA: aviación sostenible (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- Smithsonian: el Wright Flyer de 1903 (https://airandspace.si.edu/collection-objects/1903-wright-flyer/nasm_A19610048000): La historia y las especificaciones del Wright Flyer.
- MIT OpenCourseWare 16.00: Introduction to Aerospace Engineering and Design (https://ocw.mit.edu/courses/16-00-introduction-to-aerospace-engineering-and-design-spring-2003/): El curso introductorio del MIT centrado en el diseño.
- NASA Glenn: Beginner's Guide to Aeronautics (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/): Empieza aquí para cada tema.

☐ **Terminé esta unidad**

La atmósfera

El aire por el que vuela un avión: cómo cambian con la altitud la temperatura, la presión, la densidad y la velocidad del sonido.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Usar un modelo de atmósfera estándar para hallar T, p y ρ en altitud.
- Aplicar la ley de los gases ideales al aire.
- Calcular la velocidad del sonido y el número de Mach.
- Explicar por qué los aviones de pasajeros vuelan en crucero cerca de 11 km.

Conceptos clave

- Una atmósfera estándar es un modelo promedio ajustado a mediciones. En el modelo de la NASA la troposfera va desde el suelo hasta 11000 m, y la temperatura baja unos 6.5 °C por kilómetro.
- De 11 a 25 km (baja estratosfera) la temperatura del modelo es constante en −56.46 °C, mientras la presión sigue bajando exponencialmente.
- La densidad se obtiene de la ley de los gases ideales, ρ = p/(RT). A 11 km el aire tiene cerca del 30% de la densidad a nivel del mar.
- La velocidad del sonido es a = √(γRT), así que solo depende de la temperatura. Número de Mach M = V/a.
- Un aire menos denso implica menos resistencia a una velocidad dada, por eso los reactores vuelan alto, pero las alas y los motores aún necesitan suficiente aire para funcionar.

Ecuaciones clave

$$T = 15.04 - 0.00649\,h \;\; (^\circ\mathrm{C},\; h \text{ in m})$$

`T=15.04-0.00649 h\ \ (^,\ h in m)`

Ajuste de la NASA de la temperatura en la troposfera

$$p = 101.29\left(\frac{T + 273.1}{288.08}\right)^{5.256} \;\mathrm{kPa}$$

`p=101.29((T+273.1)/(288.08))^5.256 kPa`

Ajuste de la NASA de la presión en la troposfera

$$\rho = \frac{p}{0.2869\,(T + 273.1)}$$

ρ=(p)/(0.2869 (T+273.1))

Densidad (p en kPa, ρ en kg/m³)

$$a = \sqrt{\gamma RT}, \quad M = \frac{V}{a}$$

a=γ RT, M= Va

Velocidad del sonido y número de Mach

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 2.1 Halla T, p y ρ a 5000 m con el modelo de la NASA.

1. T = 15.04 − 0.00649 × 5,000 = −17.41 °C.
2. p = 101.29 × (255.69/288.08)^5.256 = 54.11 kPa.
3. ρ = 54.11/(0.2869 × 255.69).

Respuesta: T ≈ −17.4 °C, p ≈ 54.1 kPa, ρ ≈ 0.738 kg/m³ (60% del nivel del mar).

Ejemplo 2.2 Halla la velocidad del sonido a nivel del mar (15 °C) y a 11 km (−56.5 °C).

1. a = √(1.4 × 287 × 288.15) = 340.3 m/s.
2. a = √(1.4 × 287 × 216.65) = 295.0 m/s.

Respuesta: 340 m/s y 295 m/s.

Ejemplo 2.3 Un avión de pasajeros vuela a 230 m/s de velocidad verdadera a 11 km. ¿Cuál es su número de Mach?

1. M = 230/295.0.

Respuesta: M ≈ 0.78.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla la densidad del aire a 11000 m con el modelo de la NASA (T = −56.46 °C, p = 22.72 kPa).

   ρ = 22.72/(0.2869 × 216.64) ≈ 0.366 kg/m³, cerca del 30% del nivel del mar.

2. Halla la temperatura a 1500 m en el modelo de la NASA.

   $T = 15.04 - 9.74 = 5.3\ °C$.

3. ¿Cuánto es Mach 2 a nivel del mar en m/s?

   $2 \times 340 = 680$ m/s.

4. Halla la densidad a nivel del mar a partir de $p = 101.40$ kPa y $T = 15.04$ °C.

   $\rho = 101.40/(0.2869 \times 288.14) \approx 1.227$ kg/m³.

Ideas erróneas comunes

Mito: La velocidad del sonido depende de la presión.

En realidad: En un gas ideal solo depende de la temperatura.

Mito: Hace cada vez más frío a medida que se sube.

En realidad: La temperatura se estabiliza por encima de 11 km y vuelve a subir más arriba en la estratosfera.

Mito: Un aire menos denso siempre ayuda.

En realidad: Reduce la resistencia pero también la sustentación y el empuje de los motores, así que las alas deben volar más rápido o con coeficientes de sustentación más altos.

Tarjetas de estudio

Atmósfera estándar

Modelo promedio de T, p, ρ según la altitud.

Troposfera

Del suelo a ~11 km; la temperatura baja con la altura.

Gradiente térmico

≈ 6.5 °C por km en la troposfera.

Ley de los gases ideales

$p = \rho RT$.

Velocidad del sonido

$a = \sqrt{(\gamma RT)}$.

Número de Mach

$M = V/a$.

Cuestionario de autoevaluación

1. En la troposfera la temperatura baja aproximadamente...

1 °C/km

6.5 °C/km

15 °C/km

0 °C/km

6.5 °C/km. El gradiente de la NASA es 0.00649 °C/m.

2. La velocidad del sonido a nivel del mar es de aproximadamente...

100 m/s

340 m/s

1,000 m/s

3,000 m/s

340 m/s. √(1.4 × 287 × 288).

3. ¿Qué fracción de la densidad a nivel del mar tiene el aire a 11 km?

90%

60%

30%

5%

30%. 0.366/1.227.

4. El número de Mach es...

V × a

V/a

a/V

V^2/a

V/a. La velocidad dividida entre la velocidad local del sonido.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Los aviones vuelan donde ocurren el tiempo y el clima. La NASA estudia las emisiones de los aviones con modelos informáticos, ensayos de combustión en laboratorio y pruebas de vuelo, porque lo que los motores liberan en altitud importa para la atmósfera.

La misma física atmosférica permite que los satélites conviertan la radiación que miden en perfiles de temperatura del aire.

En Saving Planets: Resistencia atmosférica

Fuentes: NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric) (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/earth-atmosphere-equation-metric/) · NASA: aviación sostenible (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric) (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/earth-atmosphere-equation-metric/): El modelo y las ecuaciones que se usan en esta unidad.
- FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak): Capítulos gratuitos del manual de la FAA sobre la atmósfera y la aerodinámica.

☐ **Terminé esta unidad**

Aerodinámica básica: sustentación y resistencia

De dónde vienen la sustentación y la resistencia, y las dos ecuaciones que dimensionan toda ala: L = ½ρV²SC_L y D = ½ρV²SC_D.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Explicar la sustentación como resultado de desviar un flujo, con diferencias de presión descritas por la ecuación de Bernoulli.
- Usar las ecuaciones de sustentación y resistencia.
- Calcular la presión dinámica, la velocidad de pérdida y el número de Reynolds.
- Distinguir la resistencia de fricción, de presión e inducida.

Conceptos clave

- Un ala desvía el flujo de aire hacia abajo; por la tercera ley de Newton, el aire empuja el ala hacia arriba. De forma equivalente, un flujo más rápido por encima implica menor presión allí (Bernoulli). Ambas describen un mismo flujo.
- La presión dinámica q = ½ρV² fija la escala de toda fuerza aerodinámica. Los coeficientes de sustentación y resistencia C_L y C_D recogen la forma y el ángulo de ataque.
- La sustentación crece con V², así que reducir la velocidad a la mitad exige cuatro veces más coeficiente de sustentación o superficie alar.
- La resistencia proviene de la fricción superficial, la resistencia de presión (de forma) y la resistencia inducida, el costo de generar sustentación con un ala finita.
- El número de Reynolds Re = ρVc/μ compara los efectos inerciales y viscosos; los modelos de túnel de viento deben tenerlo en cuenta para predecir el comportamiento a escala real.

Ecuaciones clave

$$L = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_L$$

`L=12ρ V^2SC_L`

Ecuación de sustentación

$$D = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_D$$

`D=12ρ V^2SC_D`

Ecuación de resistencia

$$p + \tfrac{1}{2}\rho V^2 = \text{const}$$

p+12ρ V^2=const

Ecuación de Bernoulli (a lo largo de una línea de corriente)

$$Re = \frac{\rho V c}{\mu}$$

Re=(ρ Vc)/(μ)

Número de Reynolds

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 3.1 Un avión de 1100 kg con un ala de 16.2 m² vuela nivelado a 55 m/s a nivel del mar (ρ = 1.227 kg/m³). Halla C_L.

1. L = W = 10,791 N.
2. q = ½ × 1.227 × 55² = 1,855 Pa.
3. C_L = 10,791/(1,855 × 16.2).

Respuesta: C_L ≈ 0.36.

Ejemplo 3.2 Con C_L,max = 1.6, halla la velocidad de pérdida de este avión a nivel del mar.

1. V_s = √(2W/(ρSC_L,max)).
2. = √(2 × 10,791/(1.227 × 16.2 × 1.6)).

Respuesta: V_s ≈ 26.1 m/s (unos 51 nudos).

Ejemplo 3.3 Halla el número de Reynolds de una cuerda de 1.5 m a 55 m/s a nivel del mar (μ = 1.789 × 10⁻⁵ kg/(m·s)).

1. Re = 1.227 × 55 × 1.5/(1.789 × 10⁻⁵).

Respuesta: Re ≈ 5.7 millones.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Si la velocidad se duplica con el mismo C_L, ¿cómo cambia la sustentación?

Sustentación ∝ V^2, así que se cuadruplica.

2. Halla la presión dinámica a 230 m/s a 11 km ($\rho = 0.366$ kg/m^3).

   $q = \frac{1}{2} \times 0.366 \times 230^2 \approx 9{,}680$ Pa.

3. Halla la resistencia del avión del ejemplo 3.1 si $C_D = 0.032$.

   $D = 1{,}855 \times 16.2 \times 0.032 \approx 962$ N.

4. ¿Cuánto mayor es la velocidad de pérdida a 1500 m ($\rho = 1.060$ kg/m^3) que a nivel del mar?

   $V_s \propto 1/\sqrt{\rho}$: $\sqrt{(1.227/1.060)} = 1.076$, así que cerca de un 7.6% mayor (≈ 28.0 m/s de velocidad verdadera).

Ideas erróneas comunes

Mito: El aire que pasa por arriba debe encontrarse con el de abajo en el borde de salida (tiempo de tránsito igual).

En realidad: No es así; el flujo superior en realidad llega primero. NASA Glenn incluye el tránsito igual entre las teorías incorrectas de la sustentación.

Mito: La sustentación es solo Bernoulli, o solo Newton.

En realidad: Ambas describen el mismo flujo; las diferencias de presión y la desviación del flujo van juntas.

Mito: La resistencia es solo fricción con el aire.

En realidad: La resistencia de presión y la inducida suelen ser mayores.

Tarjetas de estudio

Presión dinámica

$q = \frac{1}{2}\rho V^2$.

Ecuación de sustentación

$L = qSC_L$.

Ecuación de resistencia

$D = qSC_D$.

Velocidad de pérdida

$V_s = \sqrt{(2W/(\rho SC_{L,max}))}$.

Número de Reynolds

$\rho Vc/\mu$.

Resistencia inducida

Resistencia debida a la sustentación en un ala finita.

Cuestionario de autoevaluación

1. La sustentación es proporcional a…

- V
- V^2
- $\sqrt{V}$
- $1/V$

V^2. A través de la presión dinámica $\frac{1}{2}\rho V^2$.

2. Duplicar la superficie alar a la misma velocidad y C_L…

- reduce la sustentación a la mitad
- duplica la sustentación
- cuadruplica la sustentación
- no tiene efecto

duplica la sustentación. $L \propto S$.

3. El número de Reynolds compara…

- sustentación y resistencia
- efectos inerciales y viscosos
- la velocidad y la velocidad del sonido
- empuje y peso

efectos inerciales y viscosos. $\rho V c/\mu$.

4. La resistencia inducida se debe a…

- la rugosidad de la pintura
- generar sustentación con un ala finita

el escape de los motores

solo las ondas de choque

generar sustentación con un ala finita. Los vórtices de punta de ala inclinan la sustentación hacia atrás.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La resistencia es combustible. En crucero, el empuje de los motores es igual a la resistencia, así que cada newton de resistencia eliminado es combustible que no se quema y CO_2 que no se emite. Necesitar menos energía para volar es la primera de las tres vías de la NASA hacia una aviación sostenible.

La misma física de la sustentación mueve las palas de los aerogeneradores, que convierten la fuerza aerodinámica del viento en electricidad limpia.

En Saving Planets: Física I

Fuentes: NASA Glenn: la ecuación de resistencia (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-equation/) · NASA: aviación sostenible (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Glenn: la ecuación de sustentación (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/lift-equation/): Ecuación y coeficientes de sustentación.
- NASA Glenn: la ecuación de resistencia (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-equation/): Ecuación de resistencia.
- NASA Glenn: la ecuación de Bernoulli (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/bernoullis-equation/): Presión y velocidad.
- NASA Glenn: Bernoulli y Newton (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/bernoulli-and-newton/): Por qué la explicación del tránsito igual es incorrecta.

☐ **Terminé esta unidad**

Perfiles aerodinámicos y alas

Geometría de los perfiles, curva de sustentación, pérdida y por qué las alas largas y esbeltas generan menos resistencia.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Nombrar la geometría de un perfil: cuerda, curvatura, espesor, ángulo de ataque.
- Usar la teoría del perfil delgado: c_l ≈ 2πα.
- Corregir la pendiente de sustentación para un ala finita de alargamiento AR.
- Usar la polar de resistencia C_D = C_D0 + C_L²/(πeAR) para hallar la mejor relación sustentación-resistencia.

Conceptos clave

- Un perfil aerodinámico es la sección transversal de un ala. La curvatura le permite generar sustentación con ángulo de ataque cero; el espesor aporta resistencia estructural y espacio para combustible.
- La teoría del perfil delgado predice una pendiente de sustentación de 2π por radián (unos 0.11 por grado) hasta que el flujo se desprende y el ala entra en pérdida.
- Un ala finita pierde pendiente de sustentación por sus vórtices de punta: a = a_0/(1 + a_0/(πeAR)), con alargamiento AR = b²/S.
- Resistencia total C_D = C_D0 + KC_L² con K = 1/(πeAR). El L/D máximo se da cuando la resistencia inducida iguala a la parásita.
- Un alargamiento alto (planeadores, albatros, alas de aviones de pasajeros modernos) implica menos resistencia inducida y mayor L/D.

Ecuaciones clave

$$c_l = 2\pi\alpha \ (\alpha \text{ in rad})$$

`c_l=2πα\ (α in rad)`

Pendiente de sustentación del perfil delgado

$$a = \frac{a_0}{1 + a_0/(\pi e AR)}, \quad AR = \frac{b^2}{S}$$

`a=(a_0)/(1+a_0/(π eAR)), AR=^2S`

Pendiente de sustentación del ala finita

$$C_D = C_{D0} + \frac{C_L^2}{\pi e A R}$$

`C_D=C_D0+(C_L^2)/(π eAR)`

Polar de resistencia

$$\left(\frac{L}{D}\right)_{\max} = \frac{1}{2\sqrt{C_{D0}K}}, \;\; C_L^* = \sqrt{\frac{C_{D0}}{K}}$$

`( LD)_=12_D0K,\ \ C_L^*=_D0K`

Mejor relación sustentación-resistencia

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 4.1 Teoría del perfil delgado: halla c_l con α = 5°.

1. α = 5π/180 = 0.0873 rad.
2. c_l = 2π × 0.0873.

Respuesta: c_l ≈ 0.548.

Ejemplo 4.2 Halla la pendiente de sustentación de un ala con AR = 8 y e = 0.9.

1. a = 2π/(1 + 2π/(π × 0.9 × 8)) = 6.283/1.278.

Respuesta: 4.92 por rad ≈ 0.086 por grado, un 22% por debajo del valor 2D.

Ejemplo 4.3 Con C_D0 = 0.025, e = 0.8 y AR = 7.5, halla (L/D)max y el C_L en que ocurre.

1. K = 1/(π × 0.8 × 7.5) = 0.0531.
2. (L/D)max = 1/(2√(0.025 × 0.0531)).
3. C_L* = √(0.025/0.0531).

Respuesta: (L/D)max ≈ 13.7 con C_L ≈ 0.69.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla el alargamiento de un ala de 11 m de envergadura y 16.2 m² de superficie.

   AR = 121/16.2 ≈ 7.5.

2. Con $c_l = 2\pi\alpha$, ¿qué ángulo da $c_l = 0.5$?

   $\alpha = 0.5/(2\pi) = 0.0796$ rad ≈ 4.6°.

3. Para el avión del ejemplo 4.3, halla C_D con $C_L = 0.36$.

   $C_D = 0.025 + 0.0531 \times 0.1296 \approx 0.0319$.

4. Si AR sube de 7.5 a 15 (mismos e y C_{D0}), ¿cómo cambia $(L/D)_{max}$?

   K se reduce a la mitad, así que $(L/D)_{max}$ crece en √2 hasta ≈ 19.4.

Ideas erróneas comunes

Mito: Más ángulo de ataque siempre significa más sustentación.
En realidad: Pasado el ángulo de pérdida, el flujo se desprende y la sustentación cae.

Mito: Los perfiles simétricos no pueden generar sustentación.
En realidad: La generan con un ángulo de ataque positivo.

Mito: Los dispositivos de punta de ala eliminan la resistencia inducida.
En realidad: La reducen; solo un ala infinitamente larga no tendría ninguna.

Tarjetas de estudio

Cuerda

Del borde de ataque al borde de salida.

Curvatura

Curvatura de la línea media.

Ángulo de ataque

Ángulo entre la cuerda y el flujo incidente.

Pérdida

Desprendimiento del flujo; la sustentación cae.

Alargamiento

b^2/S.

Polar de resistencia

$C_D = C_{D0} + KC_L^2$.

Cuestionario de autoevaluación

1. La pendiente de sustentación del perfil delgado es...

π por rad

2π por rad

2π por grado

1 por rad

2π por rad. $c_l = 2\pi\alpha$.

2. El alargamiento es...

b/S

b^2/S

S/b

c/b

b^2/S. La envergadura al cuadrado dividida entre la superficie.

3. En el L/D máximo...

resistencia inducida = resistencia parásita

la resistencia es cero

$C_L = 0$

el ala está en pérdida

resistencia inducida = resistencia parásita. Minimizar C_D/C_L da $KC_L^2 = C_{D0}$.

4. Un mayor alargamiento reduce sobre todo...

la fricción superficial

la resistencia inducida

el peso

la resistencia de onda

la resistencia inducida. K = 1/(πeAR).

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Las alas largas y esbeltas son una de las formas más directas de reducir el consumo de combustible, porque la resistencia inducida baja al aumentar el alargamiento. Esa es justamente la vía de la «tecnología aeronáutica eficiente» en el trabajo de la NASA sobre aviación sostenible.

El albatros, que planea durante horas sobre el océano, usa la misma física: un ala larga y delgada con una alta relación sustentación-resistencia.

En Saving Planets: Cálculo II

Fuentes: NASA Glenn: coeficiente de resistencia inducida (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/induced-drag-coefficient/) · NASA: aviación sostenible (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Glenn: FoilSim (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/foilsim/): Explora la curvatura, el espesor y el ángulo de ataque.
- NASA Glenn: coeficiente de resistencia inducida (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/induced-drag-coefficient/): Alargamiento y factor de eficiencia.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04: Unified Engineering (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Las clases de fluidos del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 5 · SEMANAS 6–7

Actuaciones de aeronaves

Cuán lejos, cuánto tiempo, qué tan rápido y con qué pendiente: planeo, ascenso, alcance y autonomía.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Relacionar la relación de planeo con L/D.
- Hallar el empuje y la potencia necesarios en vuelo nivelado.
- Calcular la tasa de ascenso a partir del exceso de potencia.
- Usar la ecuación de alcance de Breguet.

Conceptos clave

- Un planeador con relación sustentación-resistencia L/D avanza L/D metros por cada metro de altura perdido: tan γ = D/L.
- El empuje necesario en vuelo nivelado es igual a la resistencia; la potencia necesaria es resistencia × velocidad. El exceso de potencia se convierte en ascenso: tasa de ascenso = (P_avail − P_req)/W.
- Para un reactor, el alcance sigue la ecuación de Breguet: R = (V/c)(L/D) ln(W_i/W_f). Tres palancas: la eficiencia del motor (V/c), la aerodinámica (L/D) y las estructuras (fracción de peso).
- La autonomía (tiempo en el aire) se maximiza a una velocidad distinta de la del alcance.

Ecuaciones clave

$$\tan\gamma = \frac{D}{L} = \frac{1}{L/D}$$

γ=D/L=1L/D

Ángulo de planeo

$$P_R = DV$$

P_R=DV

Potencia necesaria

$$RC = \frac{P_A - P_R}{W}$$

RC=(P_A-P_R)/(W)

Tasa de ascenso

$$R = \frac{V}{c}\,\frac{L}{D}\,\ln\frac{W_i}{W_f}$$

`R= Vc LD (W_i)/(W_f)`

Ecuación de alcance de Breguet (reactor)

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 5.1 Un velero con L/D = 20 está a 1000 m de altura. ¿Hasta dónde puede planear en aire en calma y con qué ángulo?

1. Distancia = 1000 × 20.
2. γ = arctan(1/20).

Respuesta: 20 km, con un ángulo de planeo de unos 2.9°.

Ejemplo 5.2 Un reactor vuela en crucero a 230 m/s con L/D = 17 y un consumo específico c = 0.6 por hora. Al quemar combustible su peso baja de W_i a W_i/1.25. Halla su alcance.

1. c = 0.6/3,600 = 1.667 × 10^{-4} s^{-1}.
2. R = (230/1.667 × 10^{-4}) × 17 × ln 1.25.

Respuesta: ≈ 5,235 km.

Ejemplo 5.3 El avión del ejemplo 3.1, con la polar del ejemplo 4.3, tiene unos 957 N de resistencia a 55 m/s. ¿Qué potencia exige el vuelo nivelado?

1. P = DV = 957 × 55.

Respuesta: ≈ 52.6 kW (unos 71 hp).

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Un planeador de papel tiene L/D = 5. Lanzado horizontalmente desde 2 m, ¿hasta dónde planea aproximadamente?

   10 m.

2. Un avión que pesa 10800 N tiene 30 kW de exceso de potencia. Halla su tasa de ascenso.

30,000/10,800 ≈ 2.8 m/s.

3. En el ejemplo 5.2, ¿cómo cambia el alcance si L/D sube de 17 a 20?

   Alcance ∝ L/D: 5235 × 20/17 ≈ 6159 km.

4. ¿Hasta dónde puede planear el avión del ejemplo 4.3 desde 1500 m con su mejor L/D de 13.7?

   1,500 × 13.7 ≈ 20.6 km.

Ideas erróneas comunes

Mito: Un planeador más pesado planea más lejos.
En realidad: La relación de planeo depende de L/D, no del peso; el peso cambia la velocidad óptima.

Mito: El alcance solo depende de la carga de combustible.
En realidad: Depende de la eficiencia del motor, de L/D y de la fracción de peso (Breguet).

Mito: Volar más rápido siempre da más alcance.
En realidad: El mejor alcance se logra a una velocidad moderada ligada al mejor L/D.

Tarjetas de estudio

Relación de planeo

Distancia horizontal por unidad de altura = L/D.

Potencia necesaria

$P_R = DV$.

Tasa de ascenso

$(P_A - P_R)/W$.

Alcance de Breguet

$R = (V/c)(L/D) \ln(W_i/W_f)$.

TSFC

Flujo de combustible por unidad de empuje.

Autonomía

Tiempo en el aire.

Cuestionario de autoevaluación

1. La relación de planeo es igual a...

W/D

L/D

T/W

V/a

L/D. Distancia entre altura = L/D.

2. La potencia necesaria en vuelo nivelado es...

L × V

D × V

W/V

T/V

D × V. La resistencia por la velocidad.

3. El alcance de Breguet crece con...

c

L/D

el peso de la estructura

la resistencia

L/D. R ∝ L/D.

4. El ascenso proviene de...

el exceso de potencia

solo más sustentación

solo menos peso

menor velocidad

el exceso de potencia. RC = exceso de potencia/W.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La ecuación de Breguet es la ecuación climática de la aviación: para un viaje dado, el combustible quemado baja cuando los motores son más eficientes, las alas tienen mayor L/D o las estructuras son más ligeras. Con los demás términos fijos, el alcance es proporcional a L/D.

La NASA estima que, con la flota y las operaciones actuales, el tráfico aéreo mundial en 2050 necesitaría más de 620 millones de toneladas de combustible y emitiría cerca de 2000 millones de toneladas de CO_2; por eso importa cada término de la ecuación.

En Saving Planets: CO2M: medir el CO_2 desde el espacio

Fuentes: NASA: aviación sostenible (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/) · FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Glenn: ángulo de planeo (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/glide-angle/): Vuelo de planeo.
- FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak): Capítulo sobre rendimiento de aeronaves.
- NASA Glenn: relación empuje-peso (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/thrust-to-weight-ratio/): Empuje, peso y ascenso.

Ver la clase

Lecture 12: Aircraft Performance (https://ocw.mit.edu/courses/16-687-private-pilot-ground-school-january-iap-2019/resources/lecture-12-aircraft-performance/) (en inglés)

MIT 16.687 Private Pilot Ground School (IAP 2019), MIT OpenCourseWare. Licencia: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condiciones de uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 6 · SEMANA 8

Estabilidad y control

Por qué un avión bien diseñado vuelve solo al vuelo estable, y cómo lo controlan los pilotos y las computadoras.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Nombrar los tres ejes, cabeceo, alabeo y guiñada, y sus superficies de control.
- Explicar la estabilidad estática y dinámica.
- Ubicar el centro de gravedad y el punto neutro; calcular el margen estático.
- Explicar por qué la cola estabiliza un avión.

Conceptos clave

- Un avión gira alrededor de su centro de gravedad: cabeceo (timón de profundidad), alabeo (alerones), guiñada (timón de dirección).
- Estabilidad estática: tras una perturbación, el avión tiende inicialmente a volver. Estabilidad dinámica: el movimiento realmente se amortigua con el tiempo.
- La estabilidad en cabeceo exige que el centro de gravedad esté delante del punto neutro. El margen estático = (x_np − x_cg)/c̄ debe ser positivo.
- Una cola muy detrás del CG funciona como las plumas de una flecha: una perturbación de nariz arriba aumenta la sustentación de la cola y vuelve a bajar la nariz.
- Demasiada estabilidad vuelve al avión lento de respuesta y cuesta resistencia de compensación; algunos cazas modernos se diseñan inestables y los vuela una computadora.

Ecuaciones clave

$$\mathrm{SM} = \frac{x_{np} - x_{cg}}{\bar{c}}$$

```
SM=_np-x_cg c
```

Margen estático

$$x_{cg} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}$$

```
x_cg=( m_ix_i)/( m_i)
```

Centro de gravedad

$$\frac{dC_m}{d\alpha} < 0$$

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 6.1 El punto neutro está al 40% de la cuerda media y el CG al 25%. Halla el margen estático.

1. SM = 0.40 − 0.25.

Respuesta: 0.15, o sea 15%: estable.

Ejemplo 6.2 Un planeador tiene un ala de 50 g en x = 10 cm, una cola de 10 g en x = 40 cm y 20 g de lastre en la nariz en x = 0. Halla el CG.

1. Σmx = 50(10) + 10(40) + 20(0) = 900 g·cm.
2. Σm = 80 g.

Respuesta: x_cg = 11.25 cm desde la nariz.

Ejemplo 6.3 Para el planeador del ejemplo 6.2 (cuerda media 8 cm), el punto neutro está a 13 cm. ¿Es estable?

1. SM = (13 − 11.25)/8.

Respuesta: SM ≈ 0.22: estable. Si quitas el lastre de la nariz, el CG se desplaza hacia atrás, hacia la inestabilidad.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Qué superficie controla el cabeceo?

   El timón de profundidad, en la cola horizontal.

2. CG al 30% de la cuerda, punto neutro al 28%. ¿Es estable?

   SM = −0.02 < 0: estáticamente inestable.

3. En el ejemplo 6.2, ¿qué lastre m en la nariz coloca el CG a 12 cm?

   900/(60 + m) = 12 da m = 15 g.

4. ¿Por qué un avión de papel sin lastre en la nariz encabrita y entra en pérdida?

Su CG está demasiado atrás, cerca o detrás del punto neutro.

Ideas erróneas comunes

Mito: Estáticamente estable significa que la oscilación se amortigua.

En realidad: Eso es estabilidad dinámica; la estabilidad estática es la tendencia inicial.

Mito: Más estabilidad siempre es mejor.

En realidad: Demasiada hace pesados los mandos y desperdicia resistencia de compensación.

Mito: El CG puede estar en cualquier lugar mientras el ala sustente.

En realidad: Un CG retrasado hace inestable al avión.

Tarjetas de estudio

Cabeceo / alabeo / guiñada

Profundidad / alerones / dirección.

Estabilidad estática

Tendencia inicial a volver.

Estabilidad dinámica

La perturbación se amortigua con el tiempo.

Punto neutro

Posición del CG para una estabilidad neutra en cabeceo.

Margen estático

$(x_{np} - x_{cg})/\bar{c}$.

Compensación (trim)

Equilibrado, momento neto nulo.

Cuestionario de autoevaluación

1. Los alerones controlan...

el cabeceo

el alabeo

la guiñada

el empuje

el alabeo. Se deflectan en sentidos opuestos en cada ala.

2. Para la estabilidad en cabeceo, el CG debe estar...

detrás del punto neutro

delante del punto neutro

en la cola

en la punta del ala

delante del punto neutro. Margen estático positivo.

3. Un margen estático de 0.15 significa...

inestable

estable

neutro

en pérdida

estable. Margen positivo.

4. La estabilidad dinámica se refiere a...

la tendencia inicial

el movimiento a lo largo del tiempo

el empuje del motor

solo el peso

el movimiento a lo largo del tiempo. Si las oscilaciones se amortiguan.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Los márgenes de estabilidad cuestan combustible: una cola convencional suele empujar hacia abajo para equilibrar el avión, y el ala debe generar sustentación extra, con resistencia extra, para compensarlo. Reducir esa penalización forma parte de la vía del avión eficiente que describe la NASA.

Las mismas ideas de equilibrio y control mantienen a los satélites de observación de la Tierra apuntando de forma estable para que sus instrumentos puedan cartografiar el planeta.

En Saving Planets: Guía de órbitas

Fuentes: NASA Glenn: rotaciones del avión (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-rotations/) · NASA: aviación sostenible (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Glenn: rotaciones del avión (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-rotations/): Cabeceo, alabeo y guiñada.
- FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak): Capítulos sobre estabilidad y mandos de vuelo.

☐ **Terminé esta unidad**

Fundamentos de propulsión

Cómo las hélices, los reactores y los cohetes generan empuje lanzando masa hacia atrás, y por qué los reactores más grandes y lentos son más eficientes.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Usar la ecuación de empuje por cantidad de movimiento.
- Calcular el rendimiento propulsivo.
- Comparar turborreactores, turbofanes y hélices.
- Definir el impulso específico y el consumo específico de combustible.

Conceptos clave

- Todo motor genera empuje acelerando un flujo de masa: F = ṁ(v_e − v_0) para un motor aerobio (despreciando la masa de combustible y los términos de presión).
- Rendimiento propulsivo η_p = 2/(1 + v_e/v_0): mover mucho aire un poco es más eficiente que mover poco aire mucho. Por eso los turbofanes tienen ventiladores enormes.
- Turborreactor: todo el aire pasa por el núcleo. Turbofán: la mayor parte del aire rodea el núcleo a través del ventilador. Turbohélice: una hélice movida por una turbina de gas.
- El impulso específico I_sp = F/(ṁ_fuel g_0) mide el empuje por flujo de peso de combustible, en segundos.

Ecuaciones clave

$$F = \dot{m}(v_e - v_0)$$

`F= m(v_e-v_0)`

Empuje de un motor aerobio

$$\eta_p = \frac{2}{1 + v_e/v_0}$$

`_p=(2)/(1+v_e/v_0)`

Rendimiento propulsivo

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}_f g_0}$$

`I_sp=(F)/( m_fg_0)`

Impulso específico

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 7.1 Un turbofán mueve 500 kg/s de aire de 250 m/s a 320 m/s. Halla el empuje y el rendimiento propulsivo.

1. F = 500 × 70 = 35,000 N.
2. η_p = 2/(1 + 320/250) = 2/2.28.

Respuesta: F = 35 kN, η_p ≈ 0.88.

Ejemplo 7.2 Un turborreactor genera los mismos 35 kN con 100 kg/s de aire a v_0 = 250 m/s. ¿Qué velocidad de salida necesita y cuánto vale η_p?

1. v_e = 250 + 35,000/100 = 600 m/s.
2. η_p = 2/(1 + 2.4).

Respuesta: v_e = 600 m/s, η_p ≈ 0.59: mucho menos eficiente.

Ejemplo 7.3 Un motor genera 100 kN quemando 2.5 kg/s de combustible. Halla su I_sp.

1. I_sp = 100,000/(2.5 × 9.80665).

Respuesta: ≈ 4079 s. Los motores aerobios superan a los cohetes en esta medida porque no llevan su oxidante.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla el empuje para $\dot{m}$ = 200 kg/s, v_0 = 200 m/s, v_e = 300 m/s.

   20 kN.

2. Halla η_p cuando v_e = v_0.

   1.0, pero el empuje es cero: rendimiento y empuje se compensan.

3. ¿Por qué los aviones de pasajeros usan turbofanes de alto índice de derivación?

   Mueven lentamente una gran masa de aire, lo que eleva el rendimiento propulsivo y reduce el consumo y el ruido.

Ideas erróneas comunes

Mito: Los reactores empujan contra el aire que tienen detrás.

En realidad: Aceleran el aire a través del motor; la reacción a eso es el empuje.

Mito: Una salida más rápida siempre significa un motor mejor.

En realidad: Para la eficiencia, la velocidad de salida debe estar cerca de la velocidad de vuelo.

Mito: El impulso específico es una velocidad.

En realidad: Se mide en segundos; $I_{sp} \times g_0$ es una velocidad de salida efectiva.

Tarjetas de estudio

Empuje por cantidad de movimiento

$F = \dot{m}(v_e - v_0)$.

Rendimiento propulsivo

$2/(1 + v_e/v_0)$.

Turbofán

Ventilador más núcleo; la mayor parte del aire lo rodea.

Índice de derivación

Aire derivado ÷ aire del núcleo.

Impulso específico

$F/(\dot{m}\, g_0)$, en segundos.

TSFC

Flujo de combustible por unidad de empuje.

Cuestionario de autoevaluación

1. Empuje de un motor aerobio ≈

$\dot{m}v_0$

$\dot{m}(v_e - v_0)$

$\dot{m}v_e^2$

ρV^2

$\dot{m}(v_e - v_0)$. Cambio de cantidad de movimiento por segundo.

2. El rendimiento propulsivo es máximo cuando v_e/v_0 es...

grande

cercano a 1

cero

negativo

cercano a 1. $\eta_p = 2/(1 + v_e/v_0)$.

3. En un turbofán de alto índice de derivación, la mayor parte del aire...

pasa por la cámara de combustión

rodea el núcleo

se almacena

se calienta a 2000 K

rodea el núcleo. El flujo del ventilador.

4. El I_{sp} se mide en...

m/s

segundos

newtons

kg

segundos. Empuje por flujo de peso de propulsante.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Un mayor rendimiento propulsivo es un ahorro directo de combustible y de CO_2. Cada kilogramo de combustible de aviación quemado produce unos 3.16 kg de CO_2 (el carbono del combustible

combinado con oxígeno del aire; ver la unidad 10), así que las mejoras de eficiencia se acumulan durante las décadas de servicio de un motor.

El combustible de aviación sostenible, fabricado con residuos y biomasa, se mezcla para igualar las propiedades del combustible de aviación convencional y garantizar una operación segura. La NASA señala que el SAF no libera CO_2 nuevo al ambiente.

En Saving Planets: Química General I

Fuentes: NASA: aviación sostenible (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/) · U.S. DOE: combustibles de aviación sostenibles (https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuels)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Glenn: relación empuje-peso (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/thrust-to-weight-ratio/): Motores y empuje.
- NASA Glenn: impulso específico (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/specific-impulse/): Eficiencia de cohetes y reactores.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04: Unified Engineering (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Clases de propulsión del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

Cohetes y la ecuación del cohete

Por qué es tan difícil llegar a la órbita: la ecuación del cohete de Tsiolkovski, las relaciones de masa y las etapas.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Usa Δv = I_sp g_0 ln(m_0/m_f).
- Calcular las relaciones de masa necesarias.
- Explicar por qué funcionan las etapas.
- Calcular la relación empuje-peso de un cohete.

Conceptos clave

- Un cohete lleva todo su propulsante, combustible y oxidante. Su empuje es F = ṁv_e + (p_e − p_a)A_e.
- La ecuación ideal del cohete: Δv = v_e ln(m_0/m_f), con v_e = I_sp g_0. La velocidad solo crece con el logaritmo de la relación de masa.
- Llegar a la órbita terrestre baja requiere unos 9.4 km/s de Δv al incluir las pérdidas por gravedad y resistencia, así que la mayor parte de la masa de un vehículo de lanzamiento es propulsante.
- Las etapas sueltan tanques y motores vacíos para que las etapas siguientes no carguen peso muerto.
- La relación empuje-peso debe superar 1 para despegar.

Ecuaciones clave

$$\Delta v = I_{sp}\, g_0 \ln \frac{m_0}{m_f}$$

`Δ v=I_sp g_0(m_0)/(m_f)`

Ecuación ideal del cohete (Tsiolkovski)

$$F = \dot{m} v_e + (p_e - p_a) A_e$$

`F= m v_e+(p_e-p_a)A_e`

Empuje del cohete

$$\frac{m_0}{m_f} = e^{\Delta v/(I_{sp} g_0)}$$

`(m_0)/(m_f)=e^Δ v/(I_spg_0)`

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 8.1 Un motor con I_sp = 450 s funciona hasta que $m_0/m_f = 5$. Halla Δv.

1. v_e = 450 × 9.80665 = 4,413 m/s.
2. Δv = 4,413 × ln 5.

Respuesta: ≈ 7,102 m/s.

Ejemplo 8.2 ¿Qué relación de masa necesita una sola etapa para 9.4 km/s con I_sp = 300 s? ¿Y con 450 s?

1. 300 s: e^(9,400/2,942) = e^3.195.
2. 450 s: e^(9,400/4,413) = e^2.130.

Respuesta: ≈ 24.4 frente a ≈ 8.4: cerca del 96% frente al 88% del cohete debe ser propulsante.

Ejemplo 8.3 Un cohete de dos etapas: cada etapa tiene I_sp = 300 s y relación de masa 4. Halla el Δv total.

1. Cada etapa: 2942 × ln 4 = 4078 m/s.
2. Suma las etapas.

Respuesta: ≈ 8157 m/s, el doble de lo que da una sola etapa con relación de masa 4.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla Δv para I_sp = 311 s y $m_0/m_f = 3$.

   311 × 9.80665 × ln 3 ≈ 3,351 m/s.

2. Un cohete de 500000 kg tiene 7.5 MN de empuje. Halla T/W al despegar.

   $7.5 \times 10^6/(500{,}000 \times 9.81) \approx 1.53$.

3. ¿Qué I_sp da Δv = 3000 m/s con relación de masa 2?

   3,000/(9.80665 × ln 2) ≈ 441 s.

Ideas erróneas comunes

Mito: Los cohetes empujan contra el aire.

En realidad: Funcionan mejor en el vacío; empujan sobre sus propios gases de escape.

Mito: El doble de propulsante, el doble de Δv.

En realidad: Δv crece con el logaritmo de la relación de masa.

Mito: La órbita solo necesita 7.7 km/s de Δv.

En realidad: Las pérdidas por gravedad y resistencia elevan el total a unos 9.4 km/s.

Tarjetas de estudio

Ecuación del cohete

$\Delta v = I_sp\ g_0\ \ln(m_0/m_f)$.

Relación de masa

m_0/m_f.

Etapas

Soltar las etapas agotadas.

Empuje-peso

Debe superar 1 al despegar.

Δv hasta LEO

≈ 9.4 km/s incluidas las pérdidas.

I_sp

Segundos de empuje por peso de propulsante.

Cuestionario de autoevaluación

1. Δv depende de la relación de masa a través de...

un cuadrado

un logaritmo

una raíz cuadrada

una recta

un logaritmo. $\ln(m_0/m_f)$.

2. Las etapas ayudan porque…

aumentan el I_sp

sueltan masa muerta

añaden aire

reducen la gravedad

sueltan masa muerta. Los tanques vacíos ya no necesitan ser acelerados.

3. Para despegar, la relación empuje-peso debe ser…

< 1

> 1

= 0

exactamente 1

> 1. El empuje debe superar al peso.

4. La velocidad de salida efectiva para I_sp = 300 s es de unos…

300 m/s

2,940 m/s

30 km/s

9.8 m/s

2,940 m/s. I_sp × g_0.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Cada satélite de observación de la Tierra, desde Landsat hasta las misiones que siguen el nivel del mar y los gases de efecto invernadero, viaja en un cohete dimensionado con esta ecuación. Por eso

cada kilogramo de instrumento es valioso y los satélites se construyen para ser ligeros.

Nuestra calculadora de Delta-v te permite hacer los mismos cálculos para misiones reales.

En Saving Planets: Calculadora de delta-v · Landsat 9

Fuentes: NASA Glenn: ecuación ideal del cohete (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/ideal-rocket-equation/) · NASA Glenn: ecuación de empuje del cohete (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/rocket-thrust-equation/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Glenn: ecuación ideal del cohete (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/ideal-rocket-equation/): Deducción y uso.
- NASA Glenn: ecuación de empuje del cohete (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/rocket-thrust-equation/): Empuje de presión y de cantidad de movimiento.
- NASA Glenn: impulso específico (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/specific-impulse/): Comparación de propulsantes.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 9 · SEMANAS 12–13

Órbitas y misiones espaciales

Órbitas circulares y elípticas, periodos, órbita geoestacionaria y la transferencia de Hohmann, además de cómo las misiones de observación de la Tierra eligen sus órbitas.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular la velocidad y el periodo de una órbita circular.
- Hallar el radio geoestacionario.
- Calcular el Δv y el tiempo de una transferencia de Hohmann.
- Describir las órbitas terrestres comunes y sus usos.

Conceptos clave

- En una órbita circular la gravedad aporta la fuerza centrípeta: v = √(μ/r), con μ = GM.
- Tercera ley de Kepler: T = 2π√(a³/μ). Las órbitas más altas son más lentas y tardan más.
- Una órbita geoestacionaria tiene un periodo de un día sideral (86164 s) y se sitúa sobre el ecuador a un radio de unos 42164 km.
- Una transferencia de Hohmann usa dos encendidos a lo largo de una elipse que toca ambas órbitas circulares; es la transferencia de dos encendidos más eficiente entre órbitas circulares coplanares.
- La órbita terrestre baja (unos 400 km para la ISS), las órbitas polares heliosíncronas para obtener imágenes y la órbita geoestacionaria para la meteorología sirven a misiones distintas.

Ecuaciones clave

$$v = \sqrt{\mu / r}$$

v=μ/r

Velocidad en órbita circular

$$T = 2\pi \sqrt{a^3 / \mu}$$

T=2π^3/μ

Periodo orbital

$$v = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$$

v=μ(2r-1a)

Ecuación vis-viva

$$\Delta v_1 = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}}\left(\sqrt{\frac{2r_2}{r_1+r_2}} - 1\right)$$

```
Δ v_1=μr_1(2r_2r_1+r_2-1)
```

Primer encendido de Hohmann

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 9.1 Halla la velocidad y el periodo de una órbita circular a 400 km de altura.

1. r = 6,771 km.
2. v = √(3.986 × 10^{14}/6.771 × 10^{6}) = 7,673 m/s.
3. T = 2π√(r^3/μ) = 5,545 s.

Respuesta: 7.67 km/s y ≈ 92.4 minutos.

Ejemplo 9.2 Hallar el radio geoestacionario.

1. r = (μT^2/4$π^2$)^(1/3) con T = 86164 s.

Respuesta: ≈ 42164 km del centro de la Tierra (unos 35786 km sobre el ecuador).

Ejemplo 9.3 Halla el Δv de Hohmann desde una órbita circular de 300 km hasta el radio geoestacionario.

1. r_1 = 6,671 km, r_2 = 42,164 km.
2. Δv_1 = 2,428 m/s; Δv_2 = 1,468 m/s.
3. Tiempo de transferencia = la mitad del periodo de la elipse de transferencia.

Respuesta: Total ≈ 3.90 km/s; transferencia ≈ 5.27 horas (sin cambio de plano).

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla v para una órbita circular con r = 7000 km.

   √(3.986 × 10^{14}/7 × 10^{6}) ≈ 7,546 m/s.

2. Si el radio de la órbita se cuadruplica, ¿cómo cambia el periodo?

   T ∝ r^(3/2): 8 veces más largo.

3. ¿Por qué muchos satélites meteorológicos son geoestacionarios?

   Permanecen sobre un mismo punto y pueden obtener imágenes del mismo hemisferio de forma continua.

Ideas erróneas comunes

Mito: Los astronautas flotan porque en órbita no hay gravedad.

En realidad: A 400 km la gravedad es cerca del 89% de su valor en la superficie; están en caída libre.

Mito: Para alcanzar una nave que va delante, basta con acelerar.

En realidad: Acelerar eleva tu órbita y reduce tu velocidad angular.

Mito: Las órbitas más altas necesitan más velocidad.

En realidad: La velocidad circular disminuye con la altura, aunque llegar a órbitas más altas exige más Δv total.

Tarjetas de estudio

Velocidad circular

$\sqrt{(\mu/r)}$.

Tercera ley de Kepler

$T = 2\pi\sqrt{(a^3/\mu)}$.

Vis-viva

$v^2 = \mu(2/r - 1/a)$.

Transferencia de Hohmann

Transferencia elíptica de dos encendidos.

GEO

Periodo = 1 día sideral; r ≈ 42164 km.

Órbita heliosíncrona

Órbita casi polar que pasa sobre cada lugar a aproximadamente la misma hora local.

Cuestionario de autoevaluación

1. La velocidad en órbita circular es...

$\sqrt{(\mu r)}$

√(μ/r)

μ/r²

2πr

√(μ/r). La gravedad aporta la fuerza centrípeta.

2. A 400 km, una nave da la vuelta a la Tierra aproximadamente cada...

24 h

92 min

10 min

1 semana

92 min. ≈ 92.4 minutos.

3. Una transferencia de Hohmann usa...

un encendido

dos encendidos

solo empuje continuo

solo aerofrenado

dos encendidos. Uno en cada extremo de la elipse de transferencia.

4. Radio geoestacionario ≈

6,771 km

42,164 km

384,400 km

20,000 km

42,164 km. Tercera ley de Kepler con un día sideral.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El seguimiento del clima depende de la elección de la órbita. Las órbitas heliosíncronas permiten a Landsat fotografiar el mismo lugar con una iluminación parecida, para que destaquen los cambios en bosques, cultivos y hielo, mientras los satélites meteorológicos geoestacionarios observan de forma continua cómo se forman las tormentas.

Las órbitas también requieren cuidado: los desechos amenazan estas misiones, así que cada vez más naves se diseñan para ser retiradas al final de su vida útil.

En Saving Planets: Guía de órbitas · Calculadora de velocidad orbital · Calculadora de período orbital

Fuentes: NASA JPL: Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/) · Ficha de la NASA sobre la Tierra (en inglés) (https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA JPL: Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/): La introducción gratuita de NASA JPL a las órbitas y las misiones.
- Física I, Unidad 7: gravitación y órbitas: Nuestra unidad de órbitas.

☐ **Terminé esta unidad**

Aviación y espacio sostenibles

Todo junto: la física de reducir el impacto climático de la aviación, desde aviones eficientes hasta combustibles sostenibles y nuevas fuentes de energía, y de mantener el espacio utilizable.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular el CO_2 del combustible quemado.
- Usar la ecuación de Breguet para comparar mejoras de eficiencia.
- Explicar el papel y los límites del combustible de aviación sostenible, las baterías y el hidrógeno.
- Describir la sostenibilidad espacial: desechos y retiro.

Conceptos clave

- Quemar un kilogramo de combustible de aviación tipo queroseno produce unos 3.16 kg de CO_2, una cifra fijada por la química. Las únicas formas de reducirlo son quemar menos combustible o usar combustible cuyo carbono haya salido recientemente del aire.
- La EPA informa que los aviones cubiertos por su norma de gases de efecto invernadero representan el 10% de las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte en EE. UU. y el 3% del total del país.
- Las tres vías de la NASA: tecnología aeronáutica eficiente, combustible de aviación sostenible y mejores operaciones e infraestructura.
- Las baterías actuales almacenan mucha menos energía por kilogramo que el combustible de aviación, así que los aviones eléctricos sirven para vuelos cortos y pequeños; el hidrógeno almacena mucha energía por kilogramo pero necesita tanques grandes.
- La sostenibilidad espacial consiste en planificar el retiro para que las órbitas útiles sigan disponibles para los satélites que vigilan la Tierra.

Ecuaciones clave

$$m_{\mathrm{CO_2}} \approx 3.16\, m_{\mathrm{fuel}}$$

CO_2 de la combustión del combustible de aviación

$$\frac{\mathrm{fuel}_2}{\mathrm{fuel}_1} \approx \frac{(L/D)_1}{(L/D)_2}$$

El combustible varía de forma inversa a L/D (mismo viaje, cambios modestos)

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 10.1 ¿De dónde sale 3.16? Modela el combustible de aviación como $C_{12}H_{23}$ y halla los kg de CO_2 por kg de combustible.

1. Masa molar: 12(12.011) + 23(1.008) = 167.3 g/mol.
2. 12 CO_2 por molécula: 12 × 44.01 = 528.1 g.
3. 528.1/167.3.

Respuesta: ≈ 3.16 kg de CO_2 por kg de combustible.

Ejemplo 10.2 La NASA estima 620 millones de toneladas de combustible en 2050 con la eficiencia actual. ¿Cuánto CO_2 es eso?

1. 620 × 3.16.

Respuesta: ≈ 1959 millones de toneladas, en línea con las «cerca de 2000 megatoneladas» de la NASA.

Ejemplo 10.3 Un vuelo quema 20 t de combustible. Una nueva ala eleva L/D de 17 a 19. Estima el combustible y el CO_2 ahorrados.

1. Combustible ≈ 20 × 17/19 = 17.9 t.
2. Combustible ahorrado ≈ 2.1 t; × 3.16.

Respuesta: ≈ 2.1 t de combustible y ≈ 6.7 t de CO_2 por vuelo (estimación simplificada).

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Un vuelo quema 5000 kg de combustible. ¿Cuánto CO_2 produce?

   ≈ 15,800 kg.

2. Si los motores se vuelven un 15% más eficientes en combustible, ¿en cuánto bajan aproximadamente las emisiones de CO_2 por viaje?

   Cerca de un 15%, ya que el CO_2 es proporcional al combustible quemado.

3. ¿Por qué las baterías actuales no pueden impulsar aviones de largo recorrido?

   Su energía por kilogramo está muy por debajo de la del combustible de aviación, y el compromiso de Breguet hace muy costoso el peso extra.

Ideas erróneas comunes

Mito: El combustible de aviación sostenible no emite CO_2 al quemarse.

En realidad: Emite CO_2 como el combustible convencional; la ventaja es que su carbono salió recientemente del aire, así que las emisiones de ciclo de vida son menores.

Mito: Los aviones eléctricos pronto reemplazarán a todos los reactores.

En realidad: La densidad energética de las baterías los limita, por ahora, a vuelos cortos y pequeños.

Mito: El espacio es demasiado grande para contaminarse.

En realidad: Los desechos en las órbitas más usadas son un peligro real.

Tarjetas de estudio

CO_2 por kg de combustible

≈ 3.16 kg.

SAF

Combustible de aviación sostenible hecho con residuos y biomasa.

Tres vías

Aviones eficientes, SAF, operaciones.

Densidad energética

Energía por kg; baterías ≪ combustible de aviación.

Desechos espaciales

Objetos inservibles que amenazan las órbitas útiles.

Emisiones de ciclo de vida

Todas las emisiones, desde la producción del combustible hasta su uso.

Cuestionario de autoevaluación

1. Quemar 1 kg de combustible de aviación produce aproximadamente...

1 kg CO_2

3.16 kg CO_2

0.3 kg CO_2

10 kg CO_2

3.16 kg CO_2. El carbono del combustible se combina con oxígeno del aire.

2. Las tres vías de la NASA hacia una aviación sostenible son...

tanques de combustible más grandes

aviones eficientes, SAF, operaciones e infraestructura

solo volar más bajo

solo ascensos más lentos

aviones eficientes, SAF, operaciones e infraestructura. Según la lista de la NASA.

3. Si L/D sube un 10%, el combustible para el mismo viaje baja aproximadamente...

1%

9–10%

50%

0%

9–10%. Combustible ∝ 1/(L/D).

4. ¿Qué proporción del total de gases de efecto invernadero de EE. UU. emiten los aviones cubiertos por la norma de la EPA?

0.3%

3%

30%

50%

3%. EPA: el 3% del total nacional.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Esta unidad es el vínculo completo del curso con el planeta: cada ecuación de las unidades 3–7 es una palanca sobre el consumo de combustible, y el consumo de combustible es CO_2. Los ingenieros que saben hacer estos cálculos diseñan los aviones más limpios hacia los que trabajan la NASA y la industria.

La EPA informa que los aviones cubiertos por su norma producen el 10% de las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte en EE. UU., y la NASA señala que EE. UU. se comprometió en 2021 a lograr emisiones netas cero de gases de efecto invernadero en la aviación para 2050.

En Saving Planets: CO2M: medir el CO_2 desde el espacio · Calculadora de delta-v

Fuentes: NASA: aviación sostenible (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/) · EPA: emisiones de gases de efecto invernadero de los aviones (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-greenhouse-gas-emissions-aircraft)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA: aviación sostenible (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/): Panorama y objetivos de la NASA.
- EPA: emisiones de gases de efecto invernadero de los aviones (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-greenhouse-gas-emissions-aircraft): Normas de emisiones y datos de EE. UU.
- U.S. DOE: combustibles de aviación sostenibles (https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuels): Cómo se fabrica el SAF.

☐ **Terminé esta unidad**

Problemas

Estos problemas están dentro de cada unidad. Hazlos en papel y luego abre la respuesta.

1. Historia del vuelo y el proceso de diseño
   3 problemas
2. La atmósfera
   4 problemas
3. Aerodinámica básica: sustentación y resistencia
   4 problemas
4. Perfiles aerodinámicos y alas
   4 problemas
5. Actuaciones de aeronaves
   4 problemas
6. Estabilidad y control
   4 problemas
7. Fundamentos de propulsión

3 problemas

8. Cohetes y la ecuación del cohete
   3 problemas
9. Órbitas y misiones espaciales
   3 problemas
10. Aviación y espacio sostenibles
    3 problemas

Prácticas

Cuatro prácticas ponen el curso en acción: un túnel de viento virtual con FoilSim de la NASA, una calculadora de la ecuación del cohete, un planeador que diseñas y haces volar, y una hoja de cálculo de atmósfera y velocidad de pérdida.

Los datos de ejemplo están señalados como tales. Tus propias mediciones serán distintas, y explicar por qué es parte de la práctica.

Referencia de seguridad: FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak)

Práctica A: túnel de viento virtual con NASA FoilSim

SEMANA 5

Objetivo: Medir la curva de sustentación de un perfil en FoilSim y compararla con la teoría del perfil delgado.

$$c_l \approx 2\pi\alpha$$

Teoría del perfil delgado (α en radianes)

Procedimiento

1. Abre FoilSim y elige un perfil simétrico (curvatura cero) de un 12% de espesor.
2. Anota el coeficiente de sustentación en α = 0°, 2°, 4°, 6° y 8°.
3. Añade una columna con 2πα y compara. Luego añade curvatura y repite.
4. Aumenta α hasta que FoilSim avise de la pérdida; anota el ángulo.

Tabla de datos

α (grados)	Teoría c_l = 2πα
0	0.000
2	0.219
4	0.439
6	0.658
8	0.877

Valores teóricos calculados. Tus lecturas de FoilSim diferirán algo; explica por qué (espesor, supuestos del modelo).

Cálculo de ejemplo

1. 2π × (4π/180) = 0.439.
2. Pendiente teórica: 0.110 por grado. Un ala finita con AR = 8 y e = 0.9 mostraría solo unos 0.086 por grado (unidad 4).

> **Seguridad**
>
> - Ninguna más allá del uso normal de una computadora.

Alternativa en casa o virtual

- Funciona en un navegador web.

NASA Glenn: FoilSim (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/foilsim/)

Vínculo con el planeta: Las pruebas en túnel de viento, reales y virtuales, son la forma en que los diseñadores encuentran alas de baja resistencia que queman menos combustible. NASA: aviación sostenible (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica B: calculadora de la ecuación del cohete

SEMANA 11

Objetivo: Construir una hoja de cálculo que dé Δv a partir de I_sp y la relación de masa, y usarla para dimensionar un cohete de dos etapas.

$$\Delta v = I_{sp}\, g_0 \ln(m_0/m_f)$$

```
Δ v=I_sp g_0(m_0/m_f)
```

Ecuación ideal del cohete

Procedimiento

1. Columnas: I_sp, m_0, m_f, relación de masa, Δv.
2. Rellena filas para I_sp = 300 s y 450 s con relaciones de masa 2, 4 y 8.
3. Añade una hoja de dos etapas: Δv total = suma de las etapas. Halla relaciones de masa por etapa que lleguen a 9.4 km/s.
4. Comprueba un resultado con nuestra calculadora de Delta-v.

Tabla de datos

I_sp (s)	Relación de masa	Δv (m/s)
300	2	2,039
300	4	4,078
300	8	6,118
450	4	6,118
450	8	9,177

Valores calculados (ideal: sin pérdidas por gravedad ni resistencia).

Cálculo de ejemplo

1. 300 × 9.80665 × ln 2 = 2,039 m/s.
2. Cada vez que se duplica la relación de masa se suman los mismos 2039 m/s a 300 s: el logaritmo en acción.
3. Dos etapas a 300 s, cada una con relación de masa 5, dan 2 × 4735 = 9470 m/s, justo por encima de 9.4 km/s.

> **Seguridad**

- Ninguna más allá del uso normal de una computadora. No construyas ni hagas volar motores cohete sin supervisión capacitada y permiso local.

Alternativa en casa o virtual

- Basta con una hoja de cálculo.

Calculadora de Delta-v de Saving Planets · NASA Glenn: ecuación ideal del cohete (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/ideal-rocket-equation/)

Vínculo con el planeta: Cada kilogramo ahorrado en un satélite climático reduce el cohete necesario para lanzarlo. NASA Glenn: ecuación ideal del cohete (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/ideal-rocket-equation/)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica C: diseña, construye y haz volar un planeador

SEMANA 8

Objetivo: Diseñar un planeador de cartulina o espuma, ajustar su CG para un margen estático positivo y luego medir su relación de planeo.

$$L/D \approx \frac{\text{glide distance}}{\text{launch height}}$$

Relación de planeo a partir de un planeo estable

Procedimiento

1. Dibuja un diseño: elige una envergadura y una cuerda que den un alargamiento entre 5 y 8, una cola de alrededor del 20% de la superficie del ala y un palito como fuselaje.
2. Constrúyelo. Encuentra el CG equilibrándolo sobre un dedo; añade lastre en la nariz hasta que el CG quede a un 25% de la cuerda por detrás del borde de ataque del ala.
3. Lánzalo suavemente y nivelado desde una altura medida, en aire en calma, al menos cinco veces; anota cada distancia.
4. Calcula L/D. Luego desplaza el CG hacia atrás en pasos pequeños y anota qué ocurre.

Tabla de datos

Ensayo	Altura (m)	Distancia (m)
1	2.0	9.6
2	2.0	10.4
3	2.0	10.0
Media	2.0	10.0

Datos de ejemplo para practicar, no un resultado medido.

Cálculo de ejemplo

1. L/D medio ≈ 10.0/2.0 = 5.0.
2. Ángulo de planeo = arctan(1/5) ≈ 11.3°.
3. Resultado típico: con el CG demasiado atrás, el planeador encabrita y entra en pérdida (margen estático negativo); demasiado adelante, pica.

> **Seguridad**
>
> - Corta en dirección opuesta a tu cuerpo; un adulto debe manejar cualquier cúter.
> - Hazlo volar lejos de la cara de las personas, en un espacio abierto.

Alternativa en casa o virtual

- Cartulina, cinta adhesiva y una moneda como lastre en la nariz funcionan bien.

NASA Glenn: ángulo de planeo (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/glide-angle/)

Vínculo con el planeta: Los planeadores muestran hasta dónde puede llevarte una buena aerodinámica por sí sola, sin nada de combustible.

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica D: hoja de cálculo de atmósfera y velocidad de pérdida

SEMANA 4

Objetivo: Implementar el modelo atmosférico de la NASA y ver cómo la altitud cambia la densidad, la velocidad del sonido y la velocidad de pérdida.

$$V_s = \sqrt{\frac{2W}{\rho S C_{L,\max}}}$$

V_s=2Wρ SC_L,

Velocidad de pérdida (velocidad verdadera)

Procedimiento

1. Implementa los ajustes de la NASA para la troposfera y la baja estratosfera de 0 a 12 km en pasos de 1 km.
2. Calcula ρ, a y V_s para W = 10791 N, S = 16.2 m², C_L,max = 1.6.
3. Grafica ρ/ρ₀ y V_s en función de la altitud.

Tabla de datos

Altitud (m)	ρ (kg/m³)	V_s (m/s)
0	1.227	26.1
5,000	0.738	33.6
10,000	0.414	44.8

Calculado con el modelo de la NASA.

Cálculo de ejemplo

1. At 5,000 m: √(2 × 10,791/(0.738 × 16.2 × 1.6)) = 33.6 m/s.
2. V_s crece como 1/√ρ: a 10 km es 1.72 veces su valor a nivel del mar.

> **Seguridad**
>
> - Ninguna más allá del uso normal de una computadora.

Alternativa en casa o virtual

- Basta con una hoja de cálculo.

NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric) (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/earth-atmosphere-equation-metric/)

Vínculo con el planeta: La física de la atmósfera estándar también sustenta cómo los satélites miden el aire.

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Series de práctica para exámenes

Cronométrate: unos 10 minutos por problema. Luego compara con las soluciones completas.

Ejercicios de práctica para el parcial (unidades 1–5)

1. Halla ρ a 5000 m con el modelo de la NASA.
    1. $T = -17.41\ °C$; $p = 54.11\ kPa$.
    2. $\rho = 54.11/(0.2869 \times 255.69)$.

    Respuesta: $\approx 0.738\ kg/m^3$.

2. Un avión de 1100 kg ($S = 16.2\ m^2$, $C_{L,max} = 1.6$): halla su velocidad de pérdida a 5000 m.
    1. $V_s = \sqrt{(2 \times 10{,}791/(0.738 \times 16.2 \times 1.6))}$.

    Respuesta: $\approx 33.6\ m/s$.

3. Halla $(L/D)_{max}$ para $C_{D0} = 0.025$, $e = 0.8$, $AR = 7.5$.
    1. $K = 0.0531$; $(L/D)_{max} = 1/(2\sqrt{(C_{D0}\,K)})$.

    Respuesta: ≈ 13.7.

4. Un planeador con $L/D = 13.7$ parte a 1500 m de altura. ¿Qué distancia puede planear?
    1. $1{,}500 \times 13.7$.

    Respuesta: $\approx 20.6\ km$.

Serie de práctica final (todas las unidades)

1. Halla el margen estático para $x_{np} = 0.40\bar{c}$ y $x_{cg} = 0.25\bar{c}$.
    1. $0.40 - 0.25$.

    Respuesta: 0.15 (estable).

2. Un motor acelera 500 kg/s de aire de 250 a 320 m/s. Halla el empuje y η_p.
    1. $F = 500 \times 70$; $\eta_p = 2/(1 + 1.28)$.

Respuesta: 35 kN; ≈ 0.88.

3. Halla Δv para I_sp = 450 s y relación de masa 5.

    1. 4,413 × ln 5.

    Respuesta: ≈ 7,102 m/s.

4. Halla el periodo de una órbita circular a 400 km de altura.

    1. T = 2π√(r³/μ) con r = 6.771 × 10⁶ m.

    Respuesta: ≈ 92.4 min.

5. Halla el Δv de Hohmann desde una órbita de 300 km hasta el radio geoestacionario.

    1. Δv_1 = 2,428 m/s; Δv_2 = 1,468 m/s.

    Respuesta: ≈ 3.90 km/s.

6. Un vuelo quema 20 t de combustible. ¿Cuánto CO_2?

    1. 20 × 3.16.

    Respuesta: ≈ 63 t.

Hoja de fórmulas

$$L = W,\ T = D$$

$$T = 15.04 - 0.00649h,\ p = 101.29\left(\tfrac{T+273.1}{288.08}\right)^{5.256}$$

$$\rho = p/(RT),\ a = \sqrt{\gamma RT},\ M = V/a$$

$$L = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_L,\ D = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_D$$

$$V_s = \sqrt{2W/(\rho S C_{L,\max})}$$

$$Re = \rho V c/\mu$$

$$c_l = 2\pi\alpha$$

$$a = a_0/(1 + a_0/(\pi e AR))$$

$$C_D = C_{D0} + C_L^2/(\pi e AR)$$

$$(L/D)_{\max} = 1/(2\sqrt{C_{D0}K})$$

$$\tan\gamma = 1/(L/D)$$

$$R = (V/c)(L/D)\ln(W_i/W_f)$$

$$\mathrm{SM} = (x_{np} - x_{cg})/\bar{c}$$

$$F = \dot{m}(v_e - v_0),\ \eta_p = 2/(1 + v_e/v_0)$$

$$\Delta v = I_{sp} g_0 \ln(m_0/m_f)$$

$$v = \sqrt{\mu/r},\ T = 2\pi\sqrt{a^3/\mu}$$

$$v^2 = \mu(2/r - 1/a)$$

$$m_{CO_2} \approx 3.16\, m_{fuel}$$

Constantes

Constante	Valor
Gravedad estándar g_0	9.80665 m/s²
Densidad del aire a nivel del mar (modelo NASA)	1.23 kg/m³
Presión a nivel del mar (modelo NASA)	101.3 kPa
Velocidad del sonido, nivel del mar (15 °C)	340 m/s
Constante de los gases del aire R	287 J/(kg·K)
Razón de calores específicos γ (aire)	1.4
GM de la Tierra	3.986 × 10¹⁴ m³/s²
Radio medio de la Tierra	6,371 km

Fuente: NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric) (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/earth-atmosphere-equation-metric/)

Simuladores y referencias

Herramientas y referencias gratuitas para usar junto al curso.

- NASA Glenn: Beginner's Guide to Aeronautics (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/): La referencia gratuita de la NASA para cada ecuación de este curso, con simuladores.
- NASA Glenn: FoilSim (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/foilsim/): Túnel de viento virtual para perfiles (práctica A).
- MIT OpenCourseWare 16.00: Introduction to Aerospace Engineering and Design (https://ocw.mit.edu/courses/16-00-introduction-to-aerospace-engineering-and-design-spring-2003/): El curso de diseño de primer año del MIT.
- FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak): Manual gratuito de la FAA sobre aerodinámica, actuaciones y estabilidad.
- NASA JPL: Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/): Introducción gratuita a las órbitas y las misiones.

Glosario

Ángulo de ataque

Ángulo entre la línea de cuerda y el aire incidente.

Alargamiento
Envergadura al cuadrado dividida por la superficie del ala.

Ecuación de alcance de Breguet
Alcance de un reactor según velocidad, consumo de combustible, L/D y fracción de peso.

Curvatura
Curvatura de la línea media de un perfil.

Centro de gravedad
Punto donde actúa el peso.

Polar de resistencia
C_D en función de C_L.

Presión dinámica
$\frac{1}{2}\rho V^2$.

Órbita geoestacionaria
Órbita ecuatorial con un periodo de un día sideral.

Transferencia de Hohmann
Transferencia elíptica de dos encendidos entre órbitas circulares.

Resistencia inducida
Resistencia causada por producir sustentación con un ala finita.

Número de Mach
La velocidad dividida entre la velocidad local del sonido.

Punto neutro
Posición del CG que da estabilidad neutra en cabeceo.

Rendimiento propulsivo
Fracción de la potencia del chorro que se convierte en potencia de empuje útil.

Número de Reynolds
Cociente entre efectos inerciales y viscosos, $\rho Vc/\mu$.

Ecuación del cohete
$\Delta v = I_sp\ g_0 \ln(m_0/m_f)$.

Impulso específico
Empuje por flujo de peso de propelente, en segundos.

Pérdida
Pérdida de sustentación cuando el flujo se separa del ala.

Atmósfera estándar
Modelo promedio de las propiedades del aire frente a la altitud.

Margen estático
Distancia del CG al punto neutro en cuerdas medias.

Combustible sostenible de aviación
Combustible de aviación hecho a partir de residuos o biomasa.

Rúbrica de autoevaluación

No se otorga nota ni crédito. Úsala para valorar con honestidad dónde estás en cada unidad.

Nivel	Cómo se ve
4 · Dominio	Plantea los problemas a partir de fuerzas y requisitos, comprueba unidades y órdenes de magnitud, y explica los compromisos.
3 · Competente	Resuelve los problemas de práctica con algún error ocasional.
2 · En desarrollo	Sigue los ejemplos resueltos pero le cuesta elegir la ecuación correcta.
1 · Inicial	Sustituye números sin comprobar unidades ni supuestos; repasa la unidad.

Ponderación sugerida si quieres una nota

Parte	Peso
Problemas de práctica	25%
Prácticas	20%
Serie de práctica de mitad de curso	25%
Serie de práctica final	30%

Apunta al nivel 3 o superior en cada unidad antes de pasar al siguiente curso.

Cursos relacionados

- Cálculo II MATH 111
- Dibujo técnico / CAD ENGR 120
- Química General I + Laboratorio CHEM 110 + CHEM 110L
- Todos los cursos