Última actualización: November 1, 2026

🗺️ Ruta de cuatro años · Año 4, Primavera · 🧱 Calculadora integrada

Sobre este curso

Este curso gratuito tiene 10 unidades y 6 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 una optativa de último curso sobre aviación y medio ambiente. Se basa en la clase sobre factores ambientales de MIT 16.885J Aircraft Systems Engineering (gratis en MIT OpenCourseWare) y en material público de la NASA, el DOE, la EIA y la EPA, que enlazamos donde ayuda. Ninguno de ellos respalda esta página.
>
> Lo que añadimos: cada unidad se vincula a trabajo real con una fuente pública citada, cada número de la página se recalcula con un script de comprobación antes de publicarse y cada práctica funciona en una hoja de cálculo o simulación gratuitas.
>
> 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

Todo este curso es una sección planeta: el Alternative Fuels Data Center del DOE indica que la aviación produce alrededor del 2% de todo el CO_2 mundial y el 12% del CO_2 del transporte, y las estelas añaden calentamiento más allá del CO_2.

El Sustainable Flight National Partnership de la NASA trabaja hacia el objetivo del sector aéreo de cero emisiones netas de carbono para 2050. Cada unidad termina con una breve sección con fuentes. Los valores que no proceden de una fuente se marcan como valores de ejemplo o de libro.

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 6 laboratorios (AERO 470).
- 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

- Propulsión: empuje, eficiencia y TSFC.
- Actuaciones del avión: sustentación, resistencia y ecuación de alcance de Breguet.
- Termodinámica: energía, poderes caloríficos y eficiencia del ciclo.
- Capstone Design o Avionics & Systems Engineering: requisitos y compromisos.

Cómo estudiar

- Mantén las unidades en orden: kg, galones, litros, MJ y Wh.
- Pregunta siempre «¿por qué unidad?»: por vuelo, por pasajero-km, por kg de combustible.
- Separa el CO_2 de combustión del CO_2 de ciclo de vida.
- Comprueba cada ahorro declarado frente a una referencia.
- Recuerda los efectos no CO_2, como las estelas.
- Haz cada ejercicio en papel antes de abrir la respuesta, y repite los cuestionarios unos días después.

Qué necesitas

- Software de hoja de cálculo (sirve cualquiera gratuito), o Python.
- Un ordenador o tableta para la simulación gratuita PhET Greenhouse Effect.
- Los apuntes gratuitos de MIT 16.885J en un navegador web.
- Una calculadora.

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	Aviación y clima: contar el CO_2	Contar el CO_2; Práctica A	EIA
2	Métricas de eficiencia	Métricas de eficiencia	NASA SFNP
3	Eficiencia aerodinámica	L/D y resistencia inducida	MIT 16.885J
4	Eficiencia aerodinámica	Consumo según Breguet; Práctica B	NASA SFNP
5	Eficiencia de los motores	Eficiencia de los motores; Práctica C	MIT 16.885J
6	Combustibles de aviación sostenibles	Fundamentos de los SAF	DOE AFDC
7	Combustibles de aviación sostenibles	Ciclo de vida de los SAF; Práctica D; práctica de examen parcial	DOE AFDC
8	Estelas de condensación y efectos no CO_2	Estelas de condensación	NASA-DLR
9	Propulsión eléctrica e híbrida	Baterías y alcance eléctrico	NASA SFNP
10	Propulsión eléctrica e híbrida	Sistemas híbridos; Práctica E	NASA SFNP
11	Aviones de hidrógeno	Aviones de hidrógeno	MIT 16.885J
12	Operaciones, ruido y calidad del aire	Operaciones	NASA SFNP
13	Operaciones, ruido y calidad del aire	Ruido y calidad del aire	EPA
14	Trayectorias hacia las cero emisiones netas	Escenarios; Práctica F	DOE AFDC
15	Trayectorias hacia las cero emisiones netas	Repaso; práctica para el final	MIT 16.885J

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

Aviación y clima: contar el CO_2

De dónde vienen las emisiones de la aviación, factores de emisión, CO_2 de combustión frente a ciclo de vida y la cuota de la aviación en el total.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Usar un factor de emisión para calcular el CO_2.
- Convertir entre galones, litros y kilogramos.
- Explicar el CO_2 de combustión frente al de ciclo de vida.
- Indicar la cuota de la aviación en el CO_2 mundial.

Conceptos clave

- Quemar queroseno convierte su carbono en CO_2; la masa de CO_2 es unas tres veces la del combustible porque cada átomo de carbono gana dos átomos de oxígeno.
- La EIA de EE. UU. da 21.50 lb (9.75 kg) de CO_2 por galón de queroseno quemado.
- El CO_2 de ciclo de vida añade la producción y el transporte del combustible; en los combustibles sostenibles, el cultivo de la materia prima puede absorber CO_2.
- El Alternative Fuels Data Center del DOE indica que la aviación supone el 2% de todo el CO_2 y el 12% del CO_2 del transporte en el mundo.
- La aviación también calienta el clima mediante efectos no CO_2, como las estelas y los NOx.

Ecuaciones clave

$$m_{CO_2} = EF \times V_{fuel}$$

```
m_CO_2=EF× V_fuel
```

Emisiones a partir del volumen de combustible

$$EF = 9.75\ \mathrm{kg/gal}$$

```
EF=9.75\ kg/gal
```

Factor de la EIA para queroseno

$$1\ \mathrm{gal} = 3.785\ \mathrm{L}$$

```
1\ gal=3.785\ L
```

Conversión de volumen

$$\frac{44}{12} \approx 3.67$$

Relación de masas CO_2/carbono

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 1.1 Un vuelo quema 5000 galones de queroseno. ¿CO_2?

1. 5000 × 9.75.

Respuesta: 48,750 kg (48.75 t).

Ejemplo 1.2 Comprueba los valores de la EIA en libras y kilogramos.

1. 21.50 × 0.45359237.

Respuesta: 9.75 kg, coherente.

Ejemplo 1.3 ¿Cuántos litros son 5000 galones?

1. 5000 × 3.785.

Respuesta: 18,927 L.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿CO_2 de 1000 galones?

   9750 kg.

2. ¿Relación de masas de CO_2 a carbono?

   44/12 = 3.67.

3. ¿Cuota de la aviación en el CO_2 del transporte (DOE)?

   12%.

4. ¿Qué añade el ciclo de vida?

Efectos de producción, transporte y materia prima.

Ideas erróneas comunes

Mito: El CO_2 pesa menos que el combustible.

En realidad: Pesa unas tres veces más.

Mito: La aviación solo emite CO_2.

En realidad: Las estelas y los NOx también cuentan.

Mito: El CO_2 de ciclo de vida y el de combustión son iguales.

En realidad: Difieren, sobre todo en los SAF.

Tarjetas de estudio

Factor de emisión

CO_2 por unidad de combustible.

CO_2 de combustión

Procedente de la quema.

CO_2 de ciclo de vida

Total del pozo a la estela.

Efectos no CO_2

Estelas, NOx, hollín.

Jet A

Queroseno estándar.

t CO_2

Tonelada de CO_2.

Cuestionario de autoevaluación

1. CO_2 de 5000 gal...

48,750 kg

4875 kg

9750 kg

487,500 kg

48,750 kg. × 9.75.

2. Factor de la EIA...

9.75 kg/gal

3.16 kg/gal

21.5 kg/gal

1 kg/gal

9.75 kg/gal. EIA.

3. Cuota de la aviación en todo el CO_2...

2%

12%

25%

0.2%

2%. DOE.

4. Litros en 5000 gal...

18,927

1321

5000

37,854

18,927. × 3.785.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La EIA de EE. UU. indica 21.50 lb (9.75 kg) de CO_2 por galón de queroseno.

El Alternative Fuels Data Center del DOE indica que la aviación supone el 2% de todo el CO_2 mundial y el 12% de todo el CO_2 del transporte.

En Saving Planets: Soluciones · Observación de la Tierra

Fuentes: U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php) · U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php): Tabla de la EIA.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Clase gratuita del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

Métricas de eficiencia

Combustible y CO_2 por pasajero-kilómetro, intensidad energética y cómo comparar aviones de forma justa.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular el combustible por pasajero-km.
- Calcular el CO_2 por pasajero-km.
- Aplicar una mejora de eficiencia porcentual.
- Comparar aviones de forma justa.

Conceptos clave

- Las emisiones totales engañan; normaliza por pasajeros y distancia.
- El factor de ocupación importa: los asientos vacíos elevan las emisiones por pasajero.
- La intensidad energética (MJ por pasajero-km) compara distintos combustibles en una misma escala.
- Una mejora de eficiencia reduce el combustible por unidad de transporte, no necesariamente el total si el tráfico crece.
- El Sustainable Flight National Partnership de la NASA apunta a mejoras de eficiencia energética del 25–30% en los aviones de transporte de próxima generación.

Ecuaciones clave

$$\frac{V_{fuel}}{n_{pax} d}$$

Combustible por pasajero-km

$$\frac{m_{CO_2}}{n_{pax} d}$$

CO_2 por pasajero-km

$$m' = m(1 - g)$$

`m^=m(1-g)`

Tras una mejora fraccionaria g

$$LF = \frac{n_{pax}}{n_{seats}}$$

LF=_paxn_seats

Factor de carga

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 2.1 5000 galones llevan 180 pasajeros 2000 km (valores de ejemplo). ¿Litros por pasajero-km?

1. 18,927/(180 × 2000).

Respuesta: 0.0526 L.

Ejemplo 2.2 ¿CO_2 por pasajero-km?

1. 48,750/360,000.

Respuesta: 0.135 kg (135 g).

Ejemplo 2.3 Una mejora de eficiencia del 25% en el mismo viaje. ¿Nuevo CO_2?

1. 48,750 × 0.75.

Respuesta: 36,563 kg.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Mismo vuelo con 150 pasajeros: ¿g de CO_2 por pkm?

   162.5 g.

2. ¿Factor de ocupación, 180 de 200 asientos?

   0.9.

3. ¿Una mejora del 30% sobre 48750 kg?

   34,125 kg.

4. ¿Por qué normalizar?

   Para comparar distintos viajes y aviones de forma justa.

Ideas erróneas comunes

Mito: Los aviones grandes siempre emiten más por pasajero.

En realidad: A menudo menos por pasajero.

Mito: La eficiencia reduce las emisiones totales.

En realidad: Solo si el tráfico no crece más rápido.

Mito: Asientos igual a pasajeros.

En realidad: Usa el factor de ocupación.

Tarjetas de estudio

Pasajero-km

Un pasajero transportado un km.

Factor de carga

Pasajeros entre asientos.

Intensidad energética

MJ por pkm.

Efecto rebote

Crecimiento que compensa la eficiencia.

Referencia

Caso de referencia.

Normalización

Comparación por unidad.

Cuestionario de autoevaluación

1. L por pkm...

0.0526

0.526

5.26

0.00526

0.0526. 18,927/360,000.

2. g de CO_2 por pkm...

135

13.5

1350

48.75

135. 48,750/360,000.

3. Tras una mejora del 25%...

36,563 kg

12,188 kg

48,750 kg

60,938 kg

36,563 kg. × 0.75.

4. Objetivo del SFNP...

25–30%

2–3%

50–70%

100%

25–30%. NASA.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA indica que el Sustainable Flight National Partnership busca posibilitar mejoras de eficiencia energética del 25–30% en aviones de transporte de próxima generación que puedan usar 100% combustible de aviación sostenible y volar trayectorias óptimas.

Las métricas por pasajero de esta unidad son la forma de medir esas mejoras.

En Saving Planets: Actuaciones de aeronaves · Soluciones

Fuentes: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Clase gratuita del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

Eficiencia aerodinámica

L/D, resistencia inducida y alargamiento, alas de gran alargamiento y arriostradas, y consumo de combustible según la ecuación de Breguet.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular la fracción de combustible con Breguet.
- Mostrar cómo L/D reduce el combustible.
- Calcular el coeficiente de resistencia inducida.
- Explicar por qué las alas largas y esbeltas ahorran combustible.

Conceptos clave

- Según Breguet, la fracción de combustible es 1 − exp(−Rc/(V·L/D)).
- Un L/D mayor significa menos combustible para el mismo alcance.
- La resistencia inducida C_Di = C_L²/(πeAR) baja al aumentar el alargamiento.
- Las alas muy esbeltas necesitan arriostramiento (diseños arriostrados) para seguir siendo ligeras y rígidas.
- La pieza central de la alianza de la NASA es un demostrador X-plane a escala real que prueba un diseño aerodinámico ultraeficiente.

Ecuaciones clave

$$\frac{W_f}{W_i} = 1 - e^{-Rc/(V\ L/D)}$$

`(W_f)/(W_i)=1-e^-Rc/(V L/D)`

Fracción de combustible

$$C_{D_i} = \frac{C_L^2}{\pi e AR}$$

`C_D_i=(C_L^2)/(π eAR)`

Resistencia inducida

$$AR = b^2/S$$

`AR=b^2/S`

Alargamiento

$$L/D = C_L/C_D$$

`L/D=C_L/C_D`

Relación sustentación/resistencia

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 3.1 3000 km a 230 m/s, c = 0.6 /h, L/D = 17 (valores de libro). ¿Fracción de combustible?

1. Rc/(V L/D) = 3 × 10^6 × 1.667 × 10^{-4}/(230 × 17) = 0.1279.
2. 1 − e^(−0.1279).

Respuesta: 0.120.

Ejemplo 3.2 Igual con L/D = 20.

1. 1 − e^(−0.1087).

Respuesta: 0.103: un 14.2% menos de combustible.

Ejemplo 3.3 ¿C_Di con C_L = 0.5, e = 0.85, AR = 9?

1. 0.25/(π × 0.85 × 9).

Respuesta: 0.0104.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿C_Di con AR = 12?

   0.0078.

2. ¿Con AR = 19 (clase arriostrada)?

   0.0049.

3. ¿Alargamiento para b = 36 m, S = 120 m^2?

   10.8.

4. ¿Por qué arriostrar un ala esbelta?

   Para mantenerla ligera y rígida.

Ideas erróneas comunes

Mito: La resistencia es toda fricción.

En realidad: La resistencia inducida es grande en crucero.

Mito: Las alas más largas salen gratis.

En realidad: Límites de peso y de puerta de embarque.

Mito: El combustible escala linealmente con L/D.

En realidad: Sigue la exponencial.

Tarjetas de estudio

L/D

Relación sustentación/resistencia.

Resistencia inducida

Resistencia debida a la sustentación.

Alargamiento

b^2/S.

Factor de Oswald

Eficiencia de envergadura e.

Ala arriostrada

Ala esbelta con montantes.

Fracción de combustible

Combustible sobre peso al despegue.

Cuestionario de autoevaluación

1. Fracción de combustible, L/D 17...

0.120

0.103

0.128

0.017

0.120. Breguet.

2. Combustible ahorrado con L/D 20...

14.2%

17.6%

3%

30%

14.2%. Compara las fracciones.

3. C_Di AR 9...

0.0104

0.104

0.00104

0.0078

0.0104. $C_L^2/(\pi eAR)$.

4. Un AR mayor...

reduce la resistencia inducida

la aumenta

sin efecto

solo aumenta la fricción

reduce la resistencia inducida. Fórmula.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA indica que la pieza central de su Sustainable Flight National Partnership será un demostrador X-plane a escala real construido para probar un diseño aerodinámico ultraeficiente, con el fin de orientar la próxima generación de aviones de pasillo único.

La NASA sitúa el primer vuelo del demostrador no antes de finales de 2026.

En Saving Planets: Aerodinámica I · Actuaciones de aeronaves

Fuentes: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Clase gratuita del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

Eficiencia de los motores

Eficiencia térmica, propulsiva y global, relación de derivación y núcleos de motor avanzados.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular el rendimiento propulsivo.
- Combinar eficiencia térmica y propulsiva.
- Explicar por qué un alto índice de derivación ahorra combustible.
- Relacionar la eficiencia con el TSFC.

Conceptos clave

- La eficiencia global es la eficiencia térmica por la eficiencia propulsiva.
- La eficiencia propulsiva 2/(1 + V_e/V_0) aumenta cuando la velocidad de escape se acerca a la de vuelo.
- Los turbofanes de alta derivación mueven más aire más despacio, lo que eleva la eficiencia propulsiva.
- Núcleos más calientes, de mayor presión y compactos elevan la eficiencia térmica.
- El trabajo Hybrid Thermally Efficient Core de la NASA desarrolla núcleos de turbina de alta densidad de potencia para aviones de transporte de próxima generación.

Ecuaciones clave

$$\eta_p = \frac{2}{1 + V_e/V_0}$$

`_p=(2)/(1+V_e/V_0)`

Rendimiento propulsivo

$$\eta_o = \eta_{th}\eta_p$$

`_o=_th_p`

Eficiencia global

$$TSFC \propto \frac{V_0}{\eta_o}$$

Consumo de combustible por empuje

$$BPR = \dot{m}_{bypass}/\dot{m}_{core}$$

`BPR= m_bypass/ m_core`

Índice de derivación

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 4.1 V_0 = 230 m/s, V_e = 400 m/s. η_p?

1. 2/(1 + 400/230).

Respuesta: 0.730.

Ejemplo 4.2 Baja V_e a 300 m/s (mayor derivación).

1. 2/(1 + 300/230).

Respuesta: 0.868.

Ejemplo 4.3 Con η_th = 0.5, ¿eficiencia global con V_e = 300?

1. 0.5 × 0.868.

Respuesta: 0.434.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿η_p con V_e = 350 m/s?

   0.793.

2. ¿Global con V_e = 400, η_th = 0.5?

   0.365.

3. ¿Ahorro de combustible al pasar de 0.365 a 0.434 global?

   Un 15.9% menos de combustible para el mismo trabajo.

4. ¿Qué es la relación de derivación?

   Flujo másico derivado sobre flujo del núcleo.

Ideas erróneas comunes

Mito: Un escape más rápido es más eficiente.

En realidad: Reduce la eficiencia propulsiva.

Mito: La eficiencia térmica lo es todo.

En realidad: La propulsiva importa igual.

Mito: La derivación sale gratis.

En realidad: Fanes más grandes añaden peso y resistencia.

Tarjetas de estudio

Rendimiento propulsivo

Fracción útil de la potencia de empuje.

Eficiencia térmica

Eficiencia del ciclo.

Eficiencia global

Producto de ambas.

Índice de derivación

Aire del fan sobre aire del núcleo.

TSFC

Combustible por empuje y por tiempo.

Núcleo del motor

Compresor, cámara de combustión, turbina.

Cuestionario de autoevaluación

1. η_p a 400...

0.730

0.868

0.575

1.0

0.730. 2/(1 + 1.739).

2. η_p a 300...

0.868

0.730

0.5

0.95

0.868. 2/(1 + 1.304).

3. Global...

0.434

0.868

0.5

0.25

0.434. 0.5 × 0.868.

4. Alta derivación...

eleva η_p

reduce η_p

eleva V_e

sin efecto

eleva η_p. Chorro más lento.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA indica que su trabajo Hybrid Thermally Efficient Core acelera el desarrollo y la demostración de tecnologías avanzadas de turbinas en un núcleo de alta densidad de potencia

para aviones comerciales de próxima generación.

Ambas eficiencias de esta unidad influyen directamente en el combustible quemado por pasajero.

En Saving Planets: Propulsión · Termodinámica

Fuentes: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Clase gratuita del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

Combustibles de aviación sostenibles

Qué es el SAF, vías de producción, límites de mezcla, reducciones de ciclo de vida y objetivos nacionales.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Definir el SAF.
- Calcular el ahorro de ciclo de vida de una mezcla.
- Dimensionar el ahorro a nivel de objetivos.
- Explicar los límites de mezcla.

Conceptos clave

- El DOE define el SAF como un combustible alternativo fabricado a partir de materias primas no petrolíferas que reduce la contaminación del aire del transporte aéreo.
- El SAF puede mezclarse en proporciones de entre el 10% y el 50%, según la materia prima y la vía de producción (ASTM D7566).
- El SAF mezclado funciona en los aviones e infraestructuras existentes.
- El ahorro de ciclo de vida escala con la fracción de mezcla por la reducción propia del SAF.
- El SAF Grand Challenge apunta a 3 mil millones de galones en 2030 y 35 mil millones en 2050 con al menos un 50% de reducción de ciclo de vida.

Ecuaciones clave

$$s = b \times r$$

`s=b× r`

Ahorro de la mezcla = mezcla × reducción del SAF

$$m_{saved} = V \times EF \times r$$

`m_saved=V× EF× r`

CO_2 ahorrado por volumen de SAF

$$b \leq 0.5$$

Mezcla máxima (según la vía)

$$EF = 9.75\ \mathrm{kg/gal}$$

$EF=9.75\ kg/gal$

Factor de la EIA

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 5.1 Una mezcla al 50% de SAF con un 50% de reducción de ciclo de vida. ¿Ahorro global?

1. 0.5 × 0.5.

Respuesta: 25%.

Ejemplo 5.2 3 mil millones de galones con un 50% de reducción, usando el factor de la EIA como referencia (simplificado).

1. $3 \times 10^9 \times 9.75 \times 0.5$.

Respuesta: Unos 14.6 millones de toneladas de CO_2 al año.

Ejemplo 5.3 Igual para 35 mil millones de galones.

1. $35 \times 10^9 \times 9.75 \times 0.5$.

Respuesta: Unos 171 millones de toneladas.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Una mezcla al 10% con un 80% de reducción?

   8%.

2. ¿Vuelos con SAF según la OACI, vía el DOE?

   Más de 360000 en 46 aeropuertos.

3. ¿Por qué el límite de mezcla?

   Las propiedades del combustible deben cumplir las especificaciones Jet A.

4. ¿El SAF necesita motores nuevos?

   Las mezclas funcionan en los aviones existentes.

Ideas erróneas comunes

Mito: El SAF tiene cero emisiones.

En realidad: Se quema a CO_2; el ahorro es de ciclo de vida.

Mito: Cualquier mezcla sirve.

En realidad: Los límites dependen de la vía.

Mito: El SAF solo afecta al CO_2.

En realidad: La NASA y el DLR hallaron menos cristales de hielo en las estelas.

Tarjetas de estudio

SAF

Combustible sostenible de aviación.

HEFA

Vía de ésteres y ácidos grasos hidroprocesados.

Límite de mezcla

Cuota máxima de SAF.

ASTM D7566

Especificación del queroseno sintético.

Reducción de ciclo de vida

Recorte frente al combustible fósil.

Combustible de sustitución directa

Funciona en los sistemas existentes.

Cuestionario de autoevaluación

1. Ahorro de la mezcla...

25%

50%

100%

75%

25%. 0.5 × 0.5.

2. Ahorro en 2030...

≈ 14.6 Mt

≈ 1.5 Mt

≈ 146 Mt

≈ 29 Mt

≈ 14.6 Mt. × 9.75 × 0.5.

3. Rango de mezcla...

10–50%

0–5%

90–100%

ilimitado

10–50%. DOE.

4. Objetivo para 2050...

35 mil millones de gal

3 mil millones de gal

360000 gal

46 mil millones de gal

35 mil millones de gal. DOE.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El Alternative Fuels Data Center del DOE indica que más de 360000 vuelos comerciales han usado SAF en 46 aeropuertos (según la OACI), y el SAF Grand Challenge apunta a 3 mil millones de

galones en 2030 y 35 mil millones de galones en 2050 con al menos un 50% de reducción de ciclo de vida.

El DOE señala que las tres plantas existentes en EE. UU. usan la vía HEFA, y se esperan plantas de alcohol a queroseno.

En Saving Planets: Soluciones · Química General I

Fuentes: U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel): Página de SAF del DOE.
- U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php): Factores de la EIA.

☐ **Terminé esta unidad**

Estelas de condensación y efectos no CO_2

Cómo se forman las estelas, por qué calientan, hollín y cristales de hielo, y cómo los combustibles y las rutas las reducen.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Explicar la formación de las estelas.
- Calcular reducciones de cristales de hielo.
- Describir el calentamiento no CO_2.
- Nombrar opciones de mitigación.

Conceptos clave

- Las estelas se forman cuando el escape caliente y húmedo se mezcla con aire frío y el agua se condensa y congela sobre partículas de hollín.
- Las estelas persistentes pueden extenderse en cirros que atrapan el calor saliente.
- Menos partículas de hollín significan cristales de hielo menos numerosos y más grandes que desaparecen antes.
- La NASA y el DLR hallaron que los combustibles sostenibles de combustión más limpia producían entre un 50%–70% menos cristales de hielo en crucero.
- Rodear el aire sobresaturado de hielo puede evitar las estelas persistentes.

Ecuaciones clave

$$N = EI \times m_f$$

`N=EI× m_f`

Cristales de hielo a partir del índice de emisión y el combustible

$$N' = N(1 - r)$$

`N^=N(1-r)`

Tras una reducción r

$$r \in [0.5, 0.7]$$

Rango NASA-DLR

$$\Delta T \propto F$$

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 6.1 Un índice de emisión de ejemplo de 10^{15} cristales de hielo por kg de combustible. ¿Con una reducción del 50%?

1. $10^{15} \times 0.5$.

Respuesta: 5×10^{14} por kg.

Ejemplo 6.2 ¿Con una reducción del 70%?

1. $10^{15} \times 0.3$.

Respuesta: 3×10^{14} por kg.

Ejemplo 6.3 Un vuelo quema 15000 kg de combustible en crucero (ejemplo). ¿Cristales con la reducción del 70%?

1. $3 \times 10^{14} \times 15{,}000$.

Respuesta: 4.5×10^{18}.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Por qué las estelas calientan de noche?

   Atrapan el infrarrojo saliente sin luz solar que reflejar.

2. ¿Qué siembra el hielo de las estelas?

   El hollín y otras partículas.

3. ¿Reducción de 5×10^{14} a 3×10^{14}?

   40%.

4. ¿Una solución operativa?

   Rodear el aire sobresaturado de hielo.

Ideas erróneas comunes

Mito: Las estelas son solo agua, así que son inofensivas.

En realidad: Pueden añadir calentamiento.

Mito: Todas las estelas persisten.

En realidad: Solo en aire sobresaturado de hielo.

Mito: Solo importa el CO_2.

En realidad: Los efectos no CO_2 son significativos.

Tarjetas de estudio

Estela de condensación

Rastro de condensación.

Cirros de estela

Estelas persistentes extendidas.

Sobresaturación de hielo

Aire capaz de hacer crecer hielo.

Hollín

Partículas de carbono.

Índice de emisión

Cantidad por kg de combustible.

Forzamiento no CO_2

Calentamiento aparte del CO_2.

Cuestionario de autoevaluación

1. Reducción del 50%...

5×10^{14}

5×10^{15}

10^{14}

0

5×10^{14}. × 0.5.

2. Rango NASA-DLR...

50%–70%

5%–7%

90%–100%

20%

50%–70%. NASA.

3. Cristales por vuelo...

4.5×10^{18}

4.5×10^{14}

3×10^{14}

1.5×10^{19}

4.5×10^{18}. × 15,000.

4. El hielo de las estelas se forma sobre...

partículas de hollín

CO_2

nitrógeno

ozono

partículas de hollín. Nucleación.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA informa de que los combustibles de aviación de combustión más limpia hechos de fuentes sostenibles pueden producir entre un 50%–70% menos estelas de cristales de hielo a altitud

de crucero, según investigación conjunta de la NASA y el DLR (Centro Aeroespacial Alemán).

La NASA señala que las estelas de cristales de hielo pueden permanecer horas en la alta atmósfera y afectar a cómo se calienta y enfría la Tierra.

En Saving Planets: Observación de la Tierra · Transferencia de calor

Fuentes: NASA: NASA-DLR study finds sustainable aviation fuel can reduce contrails (2021) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-dlr-study-finds-sustainable-aviation-fuel-can-reduce-contrails/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA: NASA-DLR study finds sustainable aviation fuel can reduce contrails (2021) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-dlr-study-finds-sustainable-aviation-fuel-can-reduce-contrails/): Estudio de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Clase gratuita del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

Propulsión eléctrica e híbrida

Densidad energética de las baterías, eficiencia del tren motor, alcance eléctrico y dónde ayudan los sistemas híbridos.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Comparar la densidad energética de baterías y combustible.
- Tener en cuenta la eficiencia del tren motor.
- Calcular el alcance de un avión eléctrico.
- Identificar las misiones adecuadas.

Conceptos clave

- El queroseno almacena unos 43 MJ/kg (11944 Wh/kg); las baterías actuales almacenan unos cientos de Wh/kg (valores de libro).
- Los trenes motores eléctricos convierten la energía con mucha más eficiencia (alrededor del 90%) que las turbinas (alrededor del 35%), lo que reduce la diferencia (valores de libro).
- El alcance eléctrico con baterías es R = (e η/g)(L/D)(m_b/m).
- Las baterías no se aligeran al descargarse, a diferencia del combustible.
- La NASA indica que la propulsión electrificada ofrece nuevas posibilidades para reducir el uso de combustible y energía, desde pequeños aviones de pasajeros hasta aviones de pasillo único.

Ecuaciones clave

$$R = \frac{e\eta}{g}\frac{L}{D}\frac{m_b}{m}$$

`R=e/gL/D(m_b)/(m)`

Alcance con baterías

$$\frac{e_{fuel}}{e_{batt}}$$

Relación de densidades energéticas

$$e = 250\ \mathrm{Wh/kg} = 9\times10^{5}\ \mathrm{J/kg}$$

`e=250\ Wh/kg=9×10^5\ J/kg`

Batería de ejemplo

$$1\ \mathrm{Wh} = 3600\ \mathrm{J}$$

```
1\ Wh=3600\ J
```

Conversión

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 7.1 ¿Queroseno a 43 MJ/kg en Wh/kg, y relación con una batería de 250 Wh/kg?

1. $43 \times 10^6/3600 = 11{,}944$ Wh/kg.
2. 11,944/250.

Respuesta: 47.8 veces.

Ejemplo 7.2 Ajusta por eficiencia: turbina 0.35, eléctrico 0.9.

1. $47.8 \times 0.35/0.9$.

Respuesta: Unas 18.6 veces.

Ejemplo 7.3 Alcance con e = 250 Wh/kg, $\eta = 0.8$, L/D = 15, fracción de batería 0.3.

1. $9 \times 10^5 \times 0.8/9.80665 \times 15 \times 0.3$.

Respuesta: Unos 330 km.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Alcance si la energía de la batería se duplica a 500 Wh/kg?

   Unos 661 km.

2. ¿250 Wh/kg en J/kg?

   9×10^5.

3. ¿Por qué ayudan los híbridos?

   La potencia eléctrica refuerza el despegue y el ascenso mientras el combustible aporta el alcance.

4. ¿Mejores primeras misiones?

   Vuelos regionales cortos y de entrenamiento.

Ideas erróneas comunes

Mito: Las baterías pronto igualarán al queroseno.

En realidad: La diferencia es grande incluso tras la eficiencia.

Mito: Eléctrico significa cero emisiones.

En realidad: Depende de la red eléctrica.

Mito: El peso de la batería baja en vuelo.

En realidad: Se mantiene constante.

Tarjetas de estudio

Energía específica

Energía por masa.

Eficiencia del tren motor

Eficiencia de la batería al eje.

Híbrido-eléctrico

Combustible más potencia eléctrica.

Fracción de batería

Masa de batería sobre masa del avión.

Wh/kg

Unidad de energía específica de baterías.

Intensidad de la red

CO_2 por kWh.

Cuestionario de autoevaluación

1. Relación de energía...

47.8

4.78

478

18.6

47.8. 11,944/250.

2. Ajustada por eficiencia...

18.6

47.8

2.6

100

18.6. × 0.35/0.9.

3. Alcance eléctrico...

≈ 330 km

≈ 33 km

≈ 3300 km

≈ 660 km

≈ 330 km. Fórmula.

4. Alcance con energía doble...

≈ 661 km

≈ 330 km

≈ 1320 km

≈ 165 km

≈ 661 km. Lineal.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA indica que la propulsión electrificada ofrece nuevas posibilidades para reducir el uso de combustible y energía en la aviación, desde pequeños aviones de pasajeros hasta aviones de pasillo único, mediante nuevas tecnologías, conceptos, aviones de prueba e instalaciones en tierra.

La ecuación de alcance de esta unidad muestra por qué los primeros aviones eléctricos vuelan rutas cortas. Las densidades energéticas aquí son valores de libro.

En Saving Planets: Circuitos · Soluciones

Fuentes: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Clase gratuita del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

Aviones de hidrógeno

Energía del hidrógeno por masa y volumen, dimensionado de depósitos, emisiones de agua y compromisos de diseño.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Comparar hidrógeno y queroseno por masa y volumen.
- Dimensionar el volumen de un depósito de hidrógeno.
- Calcular el agua producida.
- Explicar los compromisos de diseño.

Conceptos clave

- El hidrógeno contiene unos 120 MJ/kg, 2.8 veces el queroseno, pero el hidrógeno líquido tiene solo unos 70.8 kg/m³ (valores de libro).
- Por litro, el hidrógeno líquido contiene unos 8.5 MJ frente a unos 34.4 MJ del queroseno, así que los depósitos son unas cuatro veces mayores.
- Quemar hidrógeno o usarlo en una pila de combustible produce agua, unos 8.9 kg por kg de hidrógeno, y nada de CO_2 en el avión.
- Los depósitos criogénicos son voluminosos y pesados, y condicionan todo el avión.
- El hidrógeno verde depende de electricidad limpia para la electrólisis.

Ecuaciones clave

$$e_v = \rho\, e_m$$

```
e_v=ρ e_m
```

Energía por volumen

$$V = \frac{E}{e_v}$$

```
V=(E)/(e_v)
```

Volumen del depósito

$$m_{H_2O} = 8.94\, m_{H_2}$$

```
m_H_20=8.94 m_H_2
```

Agua a partir de hidrógeno

$$\frac{e_{H_2}}{e_{jet}} = \frac{120}{43}$$

`_H_2e_jet=120/43`

Relación de masa

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 8.1 ¿Hidrógeno frente a queroseno por masa?

1. 120/43.

Respuesta: 2.79 veces más por kg.

Ejemplo 8.2 ¿Energía volumétrica del hidrógeno líquido?

1. 70.8 × 120/1000.

Respuesta: 8.50 MJ/L.

Ejemplo 8.3 ¿Relación de volumen de depósito frente al queroseno (0.8 kg/L, de libro)?

1. 34.4/8.50.

Respuesta: Unas 4.05 veces mayor.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Agua de 100 kg de hidrógeno?

   Unos 894 kg.

2. ¿Energía volumétrica del queroseno?

   0.8 × 43 = 34.4 MJ/L.

3. ¿Por qué pesan los depósitos de hidrógeno?

   Paredes criogénicas aisladas.

4. ¿Cuándo es el hidrógeno bajo en carbono?

   Cuando se produce con energía limpia.

Ideas erróneas comunes

Mito: El hidrógeno es ligero, así que los depósitos son pequeños.

En realidad: Una densidad baja implica depósitos grandes.

Mito: Los aviones de hidrógeno no emiten nada.

En realidad: Emiten vapor de agua, que puede formar estelas.

Mito: Todo el hidrógeno es verde.

En realidad: La mayor parte hoy se produce a partir de gas fósil.

Tarjetas de estudio

LH_2

Hidrógeno líquido.

Criogénico

Almacenamiento muy frío.

Pila de combustible

Fuente de energía electroquímica.

Electrólisis

Separar el agua con electricidad.

Energía volumétrica

Energía por volumen.

Hidrógeno verde

Producido con energía limpia.

Cuestionario de autoevaluación

1. Relación de masas...

2.79

0.36

4.05

120

2.79. 120/43.

2. MJ/L de LH_2...

8.50

34.4

120

0.85

8.50. 70.8 × 0.12.

3. Relación de depósitos...

≈ 4

≈ 0.25

≈ 1

≈ 40

≈ 4. 34.4/8.5.

4. Agua por kg de H_2...

≈ 8.9 kg

≈ 1 kg

≈ 18 kg

0

≈ 8.9 kg. 18.015/2.016.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El Sustainable Flight National Partnership de la NASA abarca tecnologías avanzadas de vehículos, operaciones eficientes y combustibles de aviación sostenibles; esta unidad añade el hidrógeno como opción adicional, donde el volumen del depósito es el principal reto de diseño.

Los valores del hidrógeno en esta unidad son valores de libro, no cifras de la NASA.

En Saving Planets: Química General I · Termodinámica

Fuentes: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Clase gratuita del MIT.
- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 9 · SEMANAS 12–13

Operaciones, ruido y calidad del aire

Rodaje y trayectorias eficientes, aritmética de decibelios, ruido aeroportuario, calidad del aire local y gasolina de aviación con plomo.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Estimar el ahorro de combustible en rodaje.
- Sumar niveles sonoros en decibelios.
- Aplicar la ley del inverso del cuadrado.
- Explicar el problema del combustible con plomo.

Conceptos clave

- Las operaciones importan: el rodaje con un motor, los descensos continuos y las trayectorias óptimas reducen el combustible con los aviones actuales.
- Los decibelios se suman de forma logarítmica: dos fuentes iguales suenan 3 dB más, no el doble del número.
- Al aire libre, el nivel sonoro baja unos 6 dB por cada duplicación de la distancia.
- Los NOx, las partículas y el CO de los motores afectan a la calidad del aire cerca de los aeropuertos.
- La EPA indica que la mayoría de los aviones que usan combustible con plomo son aviones de motor de pistón que llevan 2–10 pasajeros; los reactores comerciales no usan combustible con plomo.

Ecuaciones clave

$$L = 10 \log_{10} \sum 10^{L_i/10}$$

`L=10_1010^L_i/10`

Suma de niveles sonoros

$$\Delta L = 20 \log_{10}(r_2/r_1)$$

`Δ L=20_10(r_2/r_1)`

Propagación esférica

$$m_f = \dot{m}_f t$$

`m_f= m_ft`

Combustible usado

$$m_{CO_2} = 3.16\, m_f$$

`m_CO_2=3.16 m_f`

CO_2 por kg de combustible (de libro)

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 9.1 ¿Dos fuentes de 80 dB juntas?

1. $10 \log_{10}(2 \times 10^8)$.

Respuesta: 83.0 dB.

Ejemplo 9.2 ¿Bajada de nivel al duplicar la distancia?

1. $20 \log_{10} 2$.

Respuesta: 6.02 dB.

Ejemplo 9.3 Rodar 10 minutos con un motor en lugar de dos a 0.1 kg/s cada uno (ejemplo). ¿Combustible y CO_2 ahorrados?

1. 0.1 × 600 = 60 kg.
2. 60 × 3.16.

Respuesta: 60 kg de combustible, unos 190 kg de CO_2.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Diez fuentes iguales de 70 dB?

   80 dB.

2. ¿Bajada cuando la distancia se cuadruplica?

   12.0 dB.

3. ¿Combustible de dos motores en 10 minutos?

120 kg.

4. ¿Qué aviones usan combustible con plomo (EPA)?

   Sobre todo aviones de motor de pistón.

Ideas erróneas comunes

Mito: Los decibelios se suman linealmente.

En realidad: Se suman de forma logarítmica.

Mito: Las operaciones no pueden reducir emisiones.

En realidad: Reducen el combustible ya hoy.

Mito: Los aviones comerciales queman combustible con plomo.

En realidad: La EPA dice que los reactores comerciales no.

Tarjetas de estudio

Decibelio

Medida logarítmica del sonido.

Ley del inverso del cuadrado

La intensidad cae con r^2.

Rodaje con un motor

Rodar con un solo motor.

Descenso continuo

Descenso al ralentí sin tramos nivelados.

NOx

Óxidos de nitrógeno.

Avgas

Gasolina de aviación.

Cuestionario de autoevaluación

1. Two 80 dB...

83.0 dB

160 dB

80 dB

86 dB

83.0 dB. +3 dB.

2. Duplicar la distancia...

−6.02 dB

−3 dB

−10 dB

−20 dB

−6.02 dB. 20 log 2.

3. CO_2 ahorrado en rodaje...

≈ 190 kg

≈ 60 kg

≈ 19 kg

≈ 600 kg

≈ 190 kg. 60 × 3.16.

4. Usuarios de combustible con plomo...

aviones de pistón

aviones comerciales

cohetes

solo helicópteros

aviones de pistón. EPA.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La EPA indica que la mayoría de los aviones que funcionan con combustible con plomo son aviones de motor de pistón, que suelen llevar 2–10 pasajeros, y que los reactores de transporte comercial no usan combustible con plomo.

La EPA ha emitido una determinación final de que las emisiones de plomo de ciertos motores de aviación ponen en peligro la salud y el bienestar públicos, lo que obliga a la EPA y la FAA a fijar normas.

En Saving Planets: Soluciones · Actuaciones de aeronaves

Fuentes: U.S. EPA: Regulations for lead emissions from aircraft (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-lead-emissions-aircraft)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- U.S. EPA: Regulations for lead emissions from aircraft (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-lead-emissions-aircraft): Página de la EPA.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Clase gratuita del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 10 · SEMANAS 14–15

Trayectorias hacia las cero emisiones netas

Crecimiento del tráfico, eficiencia, SAF, nuevos aviones y compensaciones combinados en escenarios hacia 2050.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Proyectar el crecimiento del tráfico.
- Combinar reducciones de forma multiplicativa.
- Construir un escenario sencillo por cuñas.
- Analizar instrumentos de política.

Conceptos clave

- Emisiones = tráfico × energía por unidad de tráfico × carbono por energía.
- El crecimiento se compone: un 3% anual duplica el tráfico en unos 24 años (tasa de ejemplo).
- Las reducciones se multiplican: (1 − mejora de eficiencia) × (1 − ahorro de ciclo de vida del SAF).
- Las emisiones restantes requieren nuevos aviones, más SAF o absorciones.
- El DOE señala que el CORSIA de la OACI limita el CO_2 neto de la aviación internacional a los niveles de 2020 hasta 2035.

Ecuaciones clave

$$E = T \times \frac{MJ}{T} \times \frac{CO_2}{MJ}$$

`E=T×MJ/T×(CO_2)/(MJ)`

Identidad de emisiones

$$T_n = T_0(1+g)^n$$

`T_n=T_0(1+g)^n`

Crecimiento del tráfico

$$E' = E(1-a)(1-b)$$

`E^=E(1-a)(1-b)`

Reducciones combinadas

$$n_2 = \frac{\ln 2}{\ln(1+g)}$$

`n_2=(2)/((1+g))`

Tiempo de duplicación

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 10.1 El tráfico crece un 3% anual de 2026 a 2050 (ejemplo). ¿Factor de crecimiento?

1. 1.03^{24}.

Respuesta: 2.03.

Ejemplo 10.2 Con una mejora de eficiencia del 25%, ¿emisiones respecto a hoy?

1. 2.033 × 0.75.

Respuesta: 1.52.

Ejemplo 10.3 Añade SAF con un ahorro de ciclo de vida del 50% en toda la flota.

1. 1.525 × 0.5.

Respuesta: 0.762, aún el 76% del nivel actual.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Tiempo de duplicación al 3%?

   23.4 años.

2. ¿Ahorro necesario para pasar de 0.762 a 0?

   Todo el resto: nuevos aviones, más SAF y absorciones.

3. ¿Años de 2026 a 2050?

   24.

4. ¿Qué limita el CORSIA?

El CO_2 neto de la aviación internacional a los niveles de 2020 hasta 2035.

Ideas erróneas comunes

Mito: Las reducciones se suman.

En realidad: Se multiplican.

Mito: La eficiencia sola alcanza las cero emisiones netas.

En realidad: El crecimiento la supera.

Mito: Las compensaciones reducen las emisiones en el motor.

En realidad: Compensan en otro lugar.

Tarjetas de estudio

Cero emisiones netas

Emisiones equilibradas con absorciones.

Cuña

Porción de un plan de reducción.

CORSIA

Mecanismo de compensación de la OACI.

Crecimiento del tráfico

Aumento de pasajeros-km.

Absorción

Retirar CO_2 del aire.

Escenario

Conjunto coherente de supuestos.

Cuestionario de autoevaluación

1. Factor de crecimiento...

2.03

1.72

1.03

3.0

2.03. 1.03^{24}.

2. Con eficiencia...

1.52

2.03

0.76

1.0

1.52. × 0.75.

3. Con SAF también...

0.762

0.25

1.52

0

0.762. × 0.5.

4. Año objetivo de cero netas...

2050

2030

2035

2100

2050. NASA.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA indica que su Sustainable Flight National Partnership trabaja con la industria, el mundo académico y otras agencias hacia el objetivo del sector aéreo de cero emisiones netas de carbono para 2050.

El DOE señala que el CORSIA de la OACI limita el CO_2 neto de la aviación internacional a los niveles de 2020 hasta 2035.

En Saving Planets: Soluciones · Capstone Design

Fuentes: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/) · U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel): Página de SAF del DOE.

☐ **Terminé esta unidad**

Problemas

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

1. Aviación y clima: contar el CO_2
   4 problemas
2. Métricas de eficiencia
   4 problemas
3. Eficiencia aerodinámica
   4 problemas
4. Eficiencia de los motores
   4 problemas
5. Combustibles de aviación sostenibles
   4 problemas
6. Estelas de condensación y efectos no CO_2
   4 problemas
7. Propulsión eléctrica e híbrida
   4 problemas
8. Aviones de hidrógeno
   4 problemas
9. Operaciones, ruido y calidad del aire
   4 problemas
10. Trayectorias hacia las cero emisiones netas
    4 problemas

El laboratorio (Sustainable aviation lab)

El laboratorio es la parte práctica del curso. Aquí es gratuito y solo para practicar, sin créditos.

Cada práctica se hace en una hoja de cálculo o una simulación gratuita, así que no hay riesgos de combustible, baterías ni hidrógeno. No manipules combustibles, baterías ni gases a presión en este curso. Haz pausas de pantalla, siéntate con buena postura y mantén los cables fuera de las zonas de paso.

Referencia de seguridad: OSHA: Walking-working surfaces (slip, trip and fall hazards) (https://www.osha.gov/walking-working-surfaces)

Práctica A: Calculadora de CO_2 de un vuelo

SEMANA 1

Objetivo: Construye una hoja de cálculo que convierta el combustible quemado en CO_2 y CO_2 por pasajero-km.

$$m = 9.75V$$

`m=9.75V`

Factor de la EIA

Procedimiento

1. Introduce el combustible en galones para tres vuelos de ejemplo.
2. Calcula el CO_2 con los 9.75 kg/gal de la EIA.
3. Divide entre pasajeros × km.
4. Compara vuelos cortos y largos.

Tabla de datos

Combustible (gal)	**CO_2 (kg)**
1000	9750
5000	48,750
20,000	195,000

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. 5000 × 9.75 = 48,750 kg.
2. 20,000 × 9.75 = 195,000 kg.

> **Seguridad**
>
> - Solo ordenador.

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php)

Vínculo con el planeta: EIA: 9.75 kg de CO_2 por galón de queroseno. U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php)

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

Práctica B: L/D y consumo de combustible

SEMANA 4

Objetivo: Observa cómo la relación sustentación/resistencia cambia el combustible para un viaje de 3000 km.

$$W_f/W_i = 1 - e^{-Rc/(V\,L/D)}$$

```
W_f/W_i=1-e^-Rc/(V L/D)
```

Fracción de combustible

Procedimiento

1. Introduce R = 3000 km, V = 230 m/s, c = 0.6 /h.
2. Calcula la fracción de combustible para L/D = 15, 17 y 20.
3. Calcula el ahorro respecto a L/D = 17.
4. Añade los efectos del alargamiento sobre la resistencia inducida.

Tabla de datos

L/D	Fracción de combustible
15	0.135
17	0.120
20	0.103

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. 1 − e^(−0.1449) = 0.135.
2. 1 − e^(−0.1087) = 0.103.

> **Seguridad**
>
> - Solo ordenador.

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/)

Vínculo con el planeta: El demostrador X-plane de la NASA prueba un diseño aerodinámico ultraeficiente. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

Práctica C: Explorador de eficiencia propulsiva

SEMANA 5

Objetivo: Calcula la eficiencia propulsiva y global para varias velocidades de escape.

$$\eta_p = 2/(1 + V_e/V_0)$$

_p=2/(1+V_e/V_0)

Rendimiento propulsivo

Procedimiento

1. Introduce V_0 = 230 m/s y η_th = 0.5.
2. Calcula η_p para V_e = 400, 350 y 300 m/s.
3. Calcula la eficiencia global.
4. Relaciónala con la relación de derivación.

Tabla de datos

V_e (m/s)	η_p	η_o
400	0.730	0.365
350	0.793	0.397
300	0.868	0.434

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. 2/(1 + 350/230) = 0.793.
2. 0.5 × 0.793 = 0.397.

> **Seguridad**
>
> - Solo ordenador.

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/)

Vínculo con el planeta: NASA: Hybrid Thermally Efficient Core desarrolla núcleos de turbina de alta densidad de potencia. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

Práctica D: Calculadora de mezclas de SAF

SEMANA 7

Objetivo: Calcula el ahorro de ciclo de vida para distintas mezclas y reducciones del SAF.

$$s = b \times r$$

s=b× r

Ahorro de la mezcla

Procedimiento

1. Introduce mezclas del 10%, 30% y 50%.
2. Introduce una reducción de ciclo de vida del SAF del 50% y luego del 80%.
3. Calcula el ahorro y el CO_2 ahorrado por cada 1000 galones.
4. Compara con los objetivos del Grand Challenge.

Tabla de datos

Mezcla	Ahorro con r = 50%	kg de CO_2 ahorrados por 1000 gal
10%	5%	487.5
30%	15%	1462.5
50%	25%	2437.5

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. 0.3 × 0.5 = 15%.
2. 9750 × 0.25 = 2437.5 kg.

> **Seguridad**
>
> - Solo ordenador.

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

Vínculo con el planeta: DOE: el SAF puede mezclarse del 10% al 50% según la vía. U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

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

Práctica E: Alcance de un avión eléctrico

SEMANA 10

Objetivo: Calcula el alcance eléctrico con baterías para varias densidades energéticas.

$$R = (e\eta/g)(L/D)(m_b/m)$$

`R=(e/g)(L/D)(m_b/m)`

Alcance eléctrico

Procedimiento

1. Introduce η = 0.8, L/D = 15, fracción de batería 0.3.
2. Calcula el alcance para 250, 400 y 500 Wh/kg.
3. Compara con una ruta regional de 300 km.
4. Cambia la fracción de batería.

Tabla de datos

e (Wh/kg)	Alcance (km)
250	330
400	529
500	661

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. 400 × 3600 × 0.8/9.80665 × 15 × 0.3 = 529 km.
2. 500 Wh/kg duplican el alcance de 250 Wh/kg.

> **Seguridad**
>
> - Solo ordenador.

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/)

Vínculo con el planeta: NASA: la propulsión electrificada puede reducir el uso de combustible y energía. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

Práctica F: Modelo de cuñas hacia cero emisiones netas

SEMANA 14

Objetivo: Explora el calentamiento en PhET Greenhouse Effect y luego construye un escenario de aviación 2026–2050.

$$E = (1+g)^n(1-a)(1-b)$$

`E=(1+g)^n(1-a)(1-b)`

Emisiones del escenario

Procedimiento

1. En PhET Greenhouse Effect, añade gases de efecto invernadero y observa cómo responde la temperatura.
2. Introduce un crecimiento del tráfico del 3% durante 24 años.
3. Aplica una mejora de eficiencia del 25% y un ahorro de SAF del 50%.
4. Halla la tasa de crecimiento con la que ambas medidas mantienen las emisiones estables.

Tabla de datos

Caso	Emisiones frente a hoy
Solo crecimiento	2.03
+ eficiencia	1.52
+ SAF	0.762

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. $1.03^{24} = 2.033$.
2. $2.033 \times 0.75 \times 0.5 = 0.762$.

> **Seguridad**
>
> - Solo ordenador.

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

PhET: Greenhouse Effect (https://phet.colorado.edu/en/simulations/greenhouse-effect)

Vínculo con el planeta: NASA: el objetivo del sector aéreo es cero emisiones netas de carbono para 2050. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

- [ ] **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. ¿CO_2 de 2000 galones de queroseno?
    1. 2000 × 9.75.

    Respuesta: 19,500 kg.

2. ¿g de CO_2 por pasajero-km para 19500 kg, 150 pasajeros, 1000 km?
    1. 19,500,000/150,000.

    Respuesta: 130 g.

3. ¿Fracción de combustible para 3000 km con L/D = 15 (valores de la unidad 3)?
    1. 1 − e^(−0.1449).

    Respuesta: 0.135.

4. ¿η_p con V_0 = 250, V_e = 350 m/s?
    1. 2/(1 + 1.4).

    Respuesta: 0.833.

5. ¿Ahorro de una mezcla al 40% con un 70% de reducción de ciclo de vida?
    1. 0.4 × 0.7.

    Respuesta: 28%.

Serie final de práctica (unidades 1–10)

1. ¿Cristales de hielo tras un recorte del 60% desde 10^{15} por kg?
    1. 10^{15} × 0.4.

Respuesta: 4 × 10¹⁴ por kg.

2. ¿Alcance eléctrico con 300 Wh/kg (valores de la unidad 7)?

    1. 330.4 × 1.2.

    Respuesta: Unos 396 km.

3. ¿Volumen de hidrógeno líquido para 1000 MJ?

    1. 1000/8.50.

    Respuesta: 118 L.

4. ¿Tres fuentes iguales de 75 dB?

    1. 75 + 10 $\log_{10} 3$.

    Respuesta: 79.8 dB.

5. ¿Factor de crecimiento al 2% durante 24 años?

    1. 1.02²⁴.

    Respuesta: 1.61.

6. ¿Emisiones frente a hoy con un 2% de crecimiento, un 25% de eficiencia y un 50% de SAF?

    1. 1.608 × 0.75 × 0.5.

    Respuesta: 0.603.

Hoja de fórmulas

$$m_{CO_2} = 9.75 V_{gal},\; m_{CO_2} = 3.16 m_f$$

$$\mathrm{CO_2/pkm} = m_{CO_2}/(n_{pax} d)$$

$$W_f/W_i = 1 - e^{-Rc/(V\,L/D)},\; C_{D_i} = C_L^2/(\pi e A R)$$

$$\eta_p = 2/(1 + V_e/V_0),\; \eta_o = \eta_{th}\eta_p$$

$$s = b\,r$$

$$N = EI\,m_f,\; N' = N(1 - r)$$

$$R = (e\eta/g)(L/D)(m_b/m)$$

$$e_v = \rho e_m,\; m_{H_2O} = 8.94 m_{H_2}$$

$$L = 10\log_{10}\sum 10^{L_i/10},\; \Delta L = 20\log_{10}(r_2/r_1)$$

$$E = (1+g)^n(1-a)(1-b)$$

Constantes

Constante	Valor
Gravedad estándar	$g = 9.80665\ m/s^2$
CO_2 del queroseno (EIA)	9.75 kg de CO_2 por galón (21.50 lb)
Poder calorífico del queroseno (valor de libro)	43 MJ/kg
Poder calorífico del hidrógeno (valor de libro)	120 MJ/kg
Densidad del hidrógeno líquido (valor de libro)	$70.8\ kg/m^3$
Galón	3.785411784 L

Fuente: NIST: CODATA value, standard acceleration of gravity (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?gn)

Textos y fuentes gratuitos

Usa estas clases, páginas de datos y simulaciones gratuitas junto con el curso.

- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Apuntes gratuitos del MIT.
- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): Programa de la NASA.
- U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel): Datos de SAF del DOE.
- U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php): Factores de emisión de la EIA.
- NASA: NASA-DLR study finds sustainable aviation fuel can reduce contrails (2021) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-dlr-study-finds-sustainable-aviation-fuel-can-reduce-contrails/): Estudio de la NASA sobre estelas.
- PhET: Greenhouse Effect (https://phet.colorado.edu/en/simulations/greenhouse-effect): Balance de radiación.

Glosario

Alargamiento
Envergadura al cuadrado entre superficie alar.

Avgas
Gasolina de aviación para motores de pistón.

Límite de mezcla
Cuota máxima de SAF en el queroseno.

CORSIA
Mecanismo de compensación de carbono de la OACI.

Estela de condensación
Estela de condensación formada por cristales de hielo.

Decibelio
Medida logarítmica del sonido.

Propulsión electrificada
Potencia eléctrica o híbrida para aviones.

Factor de emisión
CO_2 por unidad de combustible.

Intensidad energética
Energía por pasajero-km.

Resistencia inducida
Resistencia causada por la sustentación.

Emisiones de ciclo de vida
CO_2 del pozo a la estela.

Hidrógeno líquido
Hidrógeno criogénico como combustible.

Factor de carga
Pasajeros entre asientos.

Cero emisiones netas
Emisiones equilibradas con absorciones.

Efectos no CO_2
Calentamiento por estelas, NOx y partículas.

Pasajero-km
Un pasajero transportado un km.

Rendimiento propulsivo
Parte de la potencia del chorro que produce empuje.

SAF
Combustible sostenible de aviación.

Hollín
Partículas de carbono en el escape.

Energía específica
Energía por unidad de masa.

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	Contabiliza los efectos del CO_2 y no CO_2 con unidades y referencias correctas, combina bien las reducciones y explica con palabras sencillas los compromisos entre opciones.
3 · Competente	Resuelve las series de práctica y de examen con pequeños errores y comprueba las unidades.
2 · En desarrollo	Sigue los ejemplos resueltos pero confunde el CO_2 de combustión y el de ciclo de vida, o suma las reducciones en lugar de multiplicarlas.
1 · Inicial	Cita ahorros sin referencias ni unidades; necesita repasar las unidades.

Ponderación sugerida si quieres una nota

Parte	Peso
Problemas de práctica	20%
Prácticas	25%
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

- Proyecto final (aeronave o CubeSat) AERO 490
- Propulsión AERO 410
- Dinámica de vuelo y control AERO 420
- Todos los cursos