Ultimo aggiornamento: November 1, 2026

🗺️ Percorso di quattro anni · Anno 4, Primavera · 🧮 Calcolatore integrato

Informazioni sul corso

Questo corso gratuito ha 10 unità e 6 laboratori. Sono i totali reali, non un programma più lungo accorciato.

Un controllo è un numero o un risultato di codice in una pagina del corso che uno script ricalcola prima della pubblicazione. Il numero stampato e quello ricalcolato devono coincidere.

> Questo è lo schema di un corso gratuito di autoapprendimento scritto da Saving Planets. Non è un corso universitario, non dà crediti accademici e nessuna scuola è coinvolta.
>
> Il suo ambito segue un corso a scelta dell'ultimo anno su aviazione e ambiente. Si basa sulla lezione sui fattori ambientali di MIT 16.885J Aircraft Systems Engineering (gratuita su MIT OpenCourseWare) e su materiale pubblico di NASA, DOE, EIA ed EPA, collegato dove aiuta. Nessuno di loro approva questa pagina.
>
> Cosa aggiungiamo: ogni unità è legata a lavoro reale con una fonte pubblica citata, ogni numero della pagina viene ricalcolato da uno script di verifica prima della pubblicazione e ogni laboratorio funziona in un foglio di calcolo o una simulazione gratuiti.
>
> Seguilo in ordine. Ogni unità ha obiettivi, idee chiave, equazioni, esempi passo per passo, esercizi con soluzioni complete, errori comuni, flashcard e un quiz. I tuoi progressi sono salvati solo in questo browser.

Come questo corso aiuta a salvare il pianeta

Tutto questo corso è una sezione pianeta: l'Alternative Fuels Data Center del DOE afferma che l'aviazione produce circa il 2% di tutta la CO_2 mondiale e il 12% della CO_2 dei trasporti, e le scie aggiungono riscaldamento oltre la CO_2.

Il Sustainable Flight National Partnership della NASA lavora per l'obiettivo del settore aereo di zero emissioni nette di carbonio entro il 2050. Ogni unità termina con una breve sezione con fonti. I valori che non provengono da una fonte sono indicati come valori di esempio o da manuale.

Per gli insegnanti

Puoi insegnare questo corso, oppure lasciare che uno studente lo faccia da solo. È gratis. Saving Planets non dà un voto né crediti scolastici.

- Questa pagina è l'intero corso: 10 unità e 6 laboratori (AERO 470).
- Prevedi 15 settimane, circa 6–9 ore a settimana, comprese le settimane di laboratorio.
- Segui il calendario di 15 settimane. Leggi l'unità, fai la pratica su carta, poi apri la risposta. Nella settimana di laboratorio, fai il laboratorio o la versione a casa.
- Un controllo è un numero o un risultato di codice nella pagina che uno script ricalcola prima della pubblicazione. Il numero che vedi e quello ricalcolato devono coincidere.
- Usa Stampa questa pagina, oppure scarica la guida di studio PDF. Il formulario è verso la fine.
- Chiedi: in che modo questa unità aiuta le persone e il pianeta? Ogni unità ha un riquadro verde con un fatto e la sua fonte.
- Copia il modello di guida per insegnanti e scrivi il nome della classe, il tempo che hai e le domande che farai. Apri il modello di guida per insegnanti

Prima di iniziare

Prerequisiti

- Propulsione: spinta, efficienza e TSFC.
- Prestazioni dei velivoli: portanza, resistenza ed equazione di autonomia di Breguet.
- Termodinamica: energia, poteri calorifici ed efficienza del ciclo.
- Capstone Design o Avionics & Systems Engineering: requisiti e compromessi.

Come studiare

- Tieni in ordine le unità: kg, galloni, litri, MJ e Wh.
- Chiediti sempre «per cosa?»: per volo, per passeggero-km, per kg di carburante.
- Distingui la CO_2 di combustione dalla CO_2 del ciclo di vita.
- Verifica ogni risparmio dichiarato rispetto a un riferimento.
- Ricorda gli effetti non CO_2, come le scie di condensazione.
- Fai ogni esercizio su carta prima di aprire la risposta e ripeti i quiz qualche giorno dopo.

Che cosa ti serve

- Un foglio di calcolo (va bene qualsiasi gratuito), oppure Python.
- Un computer o un tablet per la simulazione gratuita PhET Greenhouse Effect.
- Gli appunti gratuiti di MIT 16.885J in un browser web.
- Una calcolatrice.

Programma suggerito di 15 settimane

Circa 6-9 ore a settimana: lettura, esercizi e, nelle settimane di laboratorio, il laboratorio.

Settimana	Unità	Argomenti	Lettura
1	Aviazione e clima: contare la CO_2	Contare la CO_2; Laboratorio A	EIA
2	Metriche di efficienza	Metriche di efficienza	NASA SFNP
3	Efficienza aerodinamica	L/D e resistenza indotta	MIT 16.885J
4	Efficienza aerodinamica	Consumo secondo Breguet; Laboratorio B	NASA SFNP
5	Efficienza dei motori	Efficienza dei motori; Laboratorio C	MIT 16.885J
6	Carburanti sostenibili per l'aviazione	Basi dei SAF	DOE AFDC
7	Carburanti sostenibili per l'aviazione	Ciclo di vita dei SAF; Laboratorio D; esercitazione di metà corso	DOE AFDC
8	Scie di condensazione ed effetti non CO_2	Scie di condensazione	NASA-DLR
9	Propulsione elettrica e ibrida	Batterie e autonomia elettrica	NASA SFNP
10	Propulsione elettrica e ibrida	Sistemi ibridi; Laboratorio E	NASA SFNP
11	Aerei a idrogeno	Aerei a idrogeno	MIT 16.885J
12	Operazioni, rumore e qualità dell'aria	Operazioni	NASA SFNP
13	Operazioni, rumore e qualità dell'aria	Rumore e qualità dell'aria	EPA
14	Percorsi verso lo zero netto	Scenari; Laboratorio F	DOE AFDC
15	Percorsi verso lo zero netto	Ripasso; esercitazione per l'esame finale	MIT 16.885J

I tuoi progressi

Spunta unità e laboratori man mano che li finisci, e fai i quiz. Progressi e punteggi sono salvati solo in questo browser e non ci vengono mai inviati.

Unità

Aviazione e clima: contare la CO_2

Da dove vengono le emissioni dell'aviazione, fattori di emissione, CO_2 di combustione rispetto al ciclo di vita e quota dell'aviazione sul totale.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Usare un fattore di emissione per calcolare la CO_2.
- Convertire tra galloni, litri e chilogrammi.
- Spiegare la CO_2 di combustione rispetto a quella del ciclo di vita.
- Indicare la quota dell'aviazione nella CO_2 mondiale.

Concetti chiave

- Bruciare carburante avio trasforma il suo carbonio in CO_2; la massa di CO_2 è circa tre volte quella del carburante perché ogni atomo di carbonio acquista due atomi di ossigeno.
- L'EIA statunitense indica 21.50 lb (9.75 kg) di CO_2 per gallone di carburante avio bruciato.
- La CO_2 del ciclo di vita aggiunge produzione e trasporto del carburante; per i carburanti sostenibili, la coltivazione della materia prima può assorbire CO_2.
- L'Alternative Fuels Data Center del DOE afferma che l'aviazione rappresenta il 2% di tutta la CO_2 e il 12% della CO_2 dei trasporti nel mondo.
- L'aviazione riscalda il clima anche con effetti non CO_2, come le scie e gli NOx.

Equazioni chiave

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

```
m_CO_2=EF× V_fuel
```

Emissioni dal volume di carburante

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

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

Fattore EIA del carburante avio

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

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

Conversione di volume

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

Rapporto di massa CO_2/carbonio

Esempi svolti passo passo

Esempio 1.1 Un volo brucia 5000 galloni di carburante avio. CO_2?

1. 5000 × 9.75.

Risposta: 48,750 kg (48.75 t).

Esempio 1.2 Verifica i valori EIA in libbre e chilogrammi.

1. 21.50 × 0.45359237.

Risposta: 9.75 kg, coerente.

Esempio 1.3 Quanti litri sono 5000 galloni?

1. 5000 × 3.785.

Risposta: 18,927 L.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. CO_2 da 1000 galloni?

   9750 kg.

2. Rapporto di massa tra CO_2 e carbonio?

   44/12 = 3.67.

3. Quota dell’aviazione nella CO_2 dei trasporti (DOE)?

   12%.

4. Cosa aggiunge il ciclo di vita?

Effetti di produzione, trasporto e materia prima.

Errori concettuali comuni

Mito: La CO_2 pesa meno del carburante.

In realtà: Pesa circa tre volte di più.

Mito: L'aviazione emette solo CO_2.

In realtà: Contano anche le scie e gli NOx.

Mito: La CO_2 del ciclo di vita e quella di combustione sono uguali.

In realtà: Differiscono, soprattutto per i SAF.

Flashcard

Fattore di emissione

CO_2 per unità di carburante.

CO_2 di combustione

Dalla combustione.

CO_2 del ciclo di vita

Totale dal pozzo alla scia.

Effetti non CO_2

Scie, NOx, fuliggine.

Jet A

Carburante avio standard.

t CO_2

Tonnellata di CO_2.

Quiz di autoverifica

1. CO_2 da 5000 gal...

48,750 kg

4875 kg

9750 kg

487,500 kg

48,750 kg. × 9.75.

2. Fattore EIA…

9.75 kg/gal

3.16 kg/gal

21.5 kg/gal

1 kg/gal

9.75 kg/gal. EIA.

3. Quota dell’aviazione in tutta la CO_2…

2%

12%

25%

0.2%

2%. DOE.

4. Litri in 5000 gal…

18,927

1321

5000

37,854

18,927. × 3.785.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

L’EIA statunitense indica 21.50 lb (9.75 kg) di CO_2 per gallone di carburante avio.

L’Alternative Fuels Data Center del DOE afferma che l’aviazione rappresenta il 2% di tutta la CO_2 mondiale e il 12% di tutta la CO_2 dei trasporti.

Su Saving Planets: Soluzioni · Osservazione della Terra

Fonti: 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)

Risorse di apprendimento gratuite

- U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php): Tabella 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/): Lezione gratuita del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Metriche di efficienza

Carburante e CO_2 per passeggero-chilometro, intensità energetica e come confrontare equamente gli aerei.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare il carburante per passeggero-km.
- Calcolare la CO_2 per passeggero-km.
- Applicare un guadagno di efficienza percentuale.
- Confrontare equamente gli aerei.

Concetti chiave

- Le emissioni totali ingannano; normalizza per passeggeri e distanza.
- Il coefficiente di riempimento conta: i posti vuoti aumentano le emissioni per passeggero.
- L'intensità energetica (MJ per passeggero-km) confronta carburanti diversi su un'unica scala.
- Un guadagno di efficienza riduce il carburante per unità di trasporto, non necessariamente il totale se il traffico cresce.
- Il Sustainable Flight National Partnership della NASA punta a miglioramenti di efficienza energetica del 25–30% negli aerei da trasporto di nuova generazione.

Equazioni chiave

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

Carburante per passeggero-km

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

CO_2 per passeggero-km

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

`m^=m(1-g)`

Dopo un guadagno frazionario g

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

LF=_paxn_seats

Fattore di carico

Esempi svolti passo passo

Esempio 2.1 5000 galloni trasportano 180 passeggeri per 2000 km (valori di esempio). Litri per passeggero-km?

1. 18,927/(180 × 2000).

Risposta: 0.0526 L.

Esempio 2.2 CO_2 per passeggero-km?

1. 48,750/360,000.

Risposta: 0.135 kg (135 g).

Esempio 2.3 Un guadagno di efficienza del 25% sullo stesso viaggio. Nuova CO_2?

1. 48,750 × 0.75.

Risposta: 36,563 kg.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Stesso volo con 150 passeggeri: g di CO_2 per pkm?

   162.5 g.

2. Coefficiente di riempimento, 180 posti su 200?

   0.9.

3. Un guadagno del 30% su 48750 kg?

   34,125 kg.

4. Perché normalizzare?

   Per confrontare equamente viaggi e aerei diversi.

Errori concettuali comuni

Mito: Gli aerei più grandi emettono sempre di più per passeggero.

In realtà: Spesso meno per passeggero.

Mito: L’efficienza riduce le emissioni totali.

In realtà: Solo se il traffico non cresce più in fretta.

Mito: Posti uguali a passeggeri.

In realtà: Usa il coefficiente di riempimento.

Flashcard

Passeggero-km

Un passeggero trasportato per un km.

Fattore di carico

Passeggeri diviso posti.

Intensità energetica

MJ per pkm.

Effetto rimbalzo

Crescita che compensa l’efficienza.

Riferimento

Caso di riferimento.

Normalizzazione

Confronto per unità.

Quiz di autoverifica

1. L per pkm...

0.0526

0.526

5.26

0.00526

0.0526. 18,927/360,000.

2. g di CO_2 per pkm...

135

13.5

1350

48.75

135. 48,750/360,000.

3. Dopo un guadagno del 25%...

36,563 kg

12,188 kg

48,750 kg

60,938 kg

36,563 kg. × 0.75.

4. Obiettivo SFNP...

25–30%

2–3%

50–70%

100%

25–30%. NASA.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che il Sustainable Flight National Partnership mira a consentire miglioramenti di efficienza energetica del 25–30% negli aerei da trasporto di nuova generazione in grado di usare il

100% di carburante sostenibile per l’aviazione e volare su traiettorie ottimali.

Le metriche per passeggero di questa unità sono il modo in cui si misurano tali guadagni.

Su Saving Planets: Prestazioni dei velivoli · Soluzioni

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

Risorse di apprendimento gratuite

- 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/): Lezione gratuita del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Efficienza aerodinamica

L/D, resistenza indotta e allungamento alare, ali ad alto allungamento e controventate, e consumo dall'equazione di Breguet.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare la frazione di carburante con Breguet.
- Mostrare come L/D riduce il carburante.
- Calcolare il coefficiente di resistenza indotta.
- Spiegare perché ali lunghe e snelle fanno risparmiare carburante.

Concetti chiave

- Secondo Breguet, la frazione di carburante è 1 − exp(−Rc/(V·L/D)).
- Un L/D più alto significa meno carburante per la stessa autonomia.
- La resistenza indotta C_Di = C_L²/(πeAR) diminuisce all'aumentare dell'allungamento.
- Le ali molto snelle richiedono controventature (progetti controventati) per restare leggere e rigide.
- Il fulcro della partnership della NASA è un dimostratore X-plane in scala reale che prova un progetto aerodinamico ultraefficiente.

Equazioni chiave

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

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

Frazione di carburante

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

`C_D_i=(C_L^2)/(π eAR)`

Resistenza indotta

$$AR = b^2/S$$

`AR=b^2/S`

Allungamento

$$L/D = C_L/C_D$$

`L/D=C_L/C_D`

Efficienza aerodinamica

Esempi svolti passo passo

Esempio 3.1 3000 km a 230 m/s, c = 0.6 /h, L/D = 17 (valori da manuale). Frazione di carburante?

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

Risposta: 0.120.

Esempio 3.2 Lo stesso con L/D = 20.

1. 1 − e^(−0.1087).

Risposta: 0.103: il 14.2% di carburante in meno.

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

1. 0.25/(π × 0.85 × 9).

Risposta: 0.0104.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. C_Di con AR = 12?

   0.0078.

2. Con AR = 19 (classe controventata)?

   0.0049.

3. Allungamento per b = 36 m, S = 120 m^2?

   10.8.

4. Perché controventare un’ala snella?

   Per mantenerla leggera e rigida.

Errori concettuali comuni

Mito: La resistenza è tutta attrito.

In realtà: La resistenza indotta è grande in crociera.

Mito: Le ali più lunghe sono gratis.

In realtà: Limiti di peso e di gate.

Mito: Il carburante cresce linearmente con L/D.

In realtà: Segue l’esponenziale.

Flashcard

L/D

Rapporto portanza/resistenza.

Resistenza indotta

Resistenza dovuta alla portanza.

Allungamento

b^2/S.

Fattore di Oswald

Efficienza di apertura e.

Ala controventata

Ala snella con montanti.

Frazione di carburante

Carburante sul peso al decollo.

Quiz di autoverifica

1. Frazione di carburante, L/D 17...

0.120

0.103

0.128

0.017

0.120. Breguet.

2. Carburante risparmiato con L/D 20…

14.2%

17.6%

3%

30%

14.2%. Confronta le frazioni.

3. C_Di AR 9…

0.0104

0.104

0.00104

0.0078

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

4. Un AR più alto…

riduce la resistenza indotta

la aumenta

nessun effetto

aumenta solo l’attrito

riduce la resistenza indotta. Formula.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che il fulcro del suo Sustainable Flight National Partnership sarà un dimostratore X-plane in scala reale costruito per provare un progetto aerodinamico ultraefficiente, per orientare la prossima generazione di aerei a corridoio singolo.

La NASA prevede il primo volo del dimostratore non prima della fine del 2026.

Su Saving Planets: Aerodinamica I · Prestazioni dei velivoli

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

Risorse di apprendimento gratuite

- 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/): Lezione gratuita del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Efficienza dei motori

Efficienza termica, propulsiva e globale, rapporto di by-pass e nuclei motore avanzati.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare il rendimento propulsivo.
- Combinare rendimento termico e propulsivo.
- Spiegare perché un alto rapporto di by-pass fa risparmiare carburante.
- Collegare l'efficienza al TSFC.

Concetti chiave

- L'efficienza globale è l'efficienza termica per l'efficienza propulsiva.
- L'efficienza propulsiva 2/(1 + V_e/V_0) aumenta quando la velocità di scarico si avvicina a quella di volo.
- I turbofan ad alto by-pass muovono più aria più lentamente, aumentando l'efficienza propulsiva.
- Nuclei più caldi, a pressione più alta e compatti aumentano l'efficienza termica.
- Il lavoro Hybrid Thermally Efficient Core della NASA sviluppa nuclei di turbina ad alta densità di potenza per aerei da trasporto di nuova generazione.

Equazioni chiave

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

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

Rendimento propulsivo

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

`_o=_th_p`

Rendimento globale

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

Consumo di carburante per spinta

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

`BPR= m_bypass/ m_core`

Rapporto di by-pass

Esempi svolti passo passo

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

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

Risposta: 0.730.

Esempio 4.2 Abbassa V_e a 300 m/s (by-pass più alto).

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

Risposta: 0.868.

Esempio 4.3 Con η_th = 0.5, efficienza globale a V_e = 300?

1. 0.5 × 0.868.

Risposta: 0.434.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. η_p a V_e = 350 m/s?

   0.793.

2. Globale a V_e = 400, η_th = 0.5?

   0.365.

3. Risparmio di carburante passando da 0.365 a 0.434 globale?

   Il 15.9% di carburante in meno per lo stesso lavoro.

4. Cos'è il rapporto di by-pass?

   Portata di by-pass sulla portata del nucleo.

Errori concettuali comuni

Mito: Uno scarico più veloce è più efficiente.

In realtà: Riduce l’efficienza propulsiva.

Mito: L’efficienza termica è tutto.

In realtà: Quella propulsiva conta altrettanto.

Mito: Il by-pass è gratis.

In realtà: Fan più grandi aggiungono peso e resistenza.

Flashcard

Rendimento propulsivo

Frazione utile della potenza di spinta.

Rendimento termico

Efficienza del ciclo.

Rendimento globale

Prodotto delle due.

Rapporto di by-pass

Aria del fan su aria del nucleo.

TSFC

Carburante per spinta per unità di tempo.

Nucleo del motore

Compressore, combustore, turbina.

Quiz di autoverifica

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. Globale...

0.434

0.868

0.5

0.25

0.434. 0.5 × 0.868.

4. Alto by-pass...

aumenta η_p

riduce η_p

aumenta V_e

nessun effetto

aumenta η_p. Getto più lento.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che il suo lavoro Hybrid Thermally Efficient Core accelera lo sviluppo e la dimostrazione di tecnologie avanzate per turbine in un nucleo ad alta densità di potenza per aerei

commerciali di nuova generazione.

Entrambe le efficienze di questa unità incidono direttamente sul carburante bruciato per passeggero.

Su Saving Planets: Propulsione · Termodinamica

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

Risorse di apprendimento gratuite

- 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/): Lezione gratuita del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Carburanti sostenibili per l’aviazione

Cosa sono i SAF, filiere di produzione, limiti di miscelazione, riduzioni sul ciclo di vita e obiettivi nazionali.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Definire i SAF.
- Calcolare il risparmio sul ciclo di vita di una miscela.
- Dimensionare i risparmi a livello di obiettivi.
- Spiegare i limiti di miscelazione.

Concetti chiave

- Il DOE definisce i SAF come un carburante alternativo prodotto da materie prime non petrolifere che riduce l’inquinamento atmosferico del trasporto aereo.
- I SAF possono essere miscelati a livelli tra il 10% e il 50%, a seconda della materia prima e della filiera di produzione (ASTM D7566).
- I SAF miscelati funzionano negli aerei e nelle infrastrutture esistenti.
- Il risparmio sul ciclo di vita scala con la frazione di miscela per la riduzione propria del SAF.
- Il SAF Grand Challenge punta a 3 miliardi di galloni nel 2030 e 35 miliardi nel 2050 con almeno il 50% di riduzione sul ciclo di vita.

Equazioni chiave

$$s = b \times r$$

`s=b× r`

Risparmio della miscela = miscela × riduzione del SAF

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

`m_saved=V× EF× r`

CO_2 risparmiata per volume di SAF

$$b \leq 0.5$$

Miscela massima (dipende dalla filiera)

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

$EF = 9.75\ kg/gal$

Fattore EIA

Esempi svolti passo passo

Esempio 5.1 Una miscela al 50% di SAF con il 50% di riduzione sul ciclo di vita. Risparmio complessivo?

1. 0.5 × 0.5.

Risposta: 25%.

Esempio 5.2 3 miliardi di galloni con il 50% di riduzione, usando il fattore EIA come riferimento (semplificato).

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

Risposta: Circa 14.6 milioni di tonnellate di CO_2 all'anno.

Esempio 5.3 Lo stesso per 35 miliardi di galloni.

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

Risposta: Circa 171 milioni di tonnellate.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Una miscela al 10% con l'80% di riduzione?

   8%.

2. Voli con SAF secondo l'ICAO, tramite il DOE?

   Oltre 360000 in 46 aeroporti.

3. Perché il limite di miscelazione?

   Le proprietà del carburante devono rispettare le specifiche Jet A.

4. I SAF richiedono nuovi motori?

Le miscele funzionano negli aerei esistenti.

Errori concettuali comuni

Mito: I SAF hanno zero emissioni.

In realtà: Bruciano producendo CO_2; il risparmio è sul ciclo di vita.

Mito: Qualsiasi miscela va bene.

In realtà: I limiti dipendono dalla filiera.

Mito: I SAF incidono solo sulla CO_2.

In realtà: NASA e DLR hanno trovato meno cristalli di ghiaccio nelle scie.

Flashcard

SAF

Carburante sostenibile per l'aviazione.

HEFA

Filiera degli esteri e acidi grassi idrotrattati.

Limite di miscelazione

Quota massima di SAF.

ASTM D7566

Specifica del carburante avio sintetico.

Riduzione sul ciclo di vita

Taglio rispetto al carburante fossile.

Carburante drop-in

Funziona nei sistemi esistenti.

Quiz di autoverifica

1. Risparmio della miscela...

25%

50%

100%

75%

25%. 0.5 × 0.5.

2. Risparmi al 2030...

≈ 14.6 Mt

≈ 1.5 Mt

≈ 146 Mt

≈ 29 Mt

≈ 14.6 Mt. × 9.75 × 0.5.

3. Intervallo di miscela...

10–50%

0–5%

90–100%

illimitato

10–50%. DOE.

4. Obiettivo 2050...

35 miliardi di gal

3 miliardi di gal

360000 gal

46 miliardi di gal

35 miliardi di gal. DOE.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

L'Alternative Fuels Data Center del DOE afferma che oltre 360000 voli commerciali hanno usato SAF in 46 aeroporti (secondo l'ICAO), e il SAF Grand Challenge punta a 3 miliardi di galloni nel 2030

e 35 miliardi di galloni nel 2050 con almeno il 50% di riduzione sul ciclo di vita.

Il DOE osserva che tutti e tre gli impianti statunitensi esistenti usano la filiera HEFA, mentre sono attesi impianti alcohol-to-jet.

Su Saving Planets: Soluzioni · Chimica Generale I

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

Risorse di apprendimento gratuite

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

☐ **Ho finito questa unità**

Scie di condensazione ed effetti non CO_2

Come si formano le scie di condensazione, perché riscaldano, fuliggine e cristalli di ghiaccio, e come carburanti e rotte le riducono.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Spiegare la formazione delle scie.
- Calcolare le riduzioni dei cristalli di ghiaccio.
- Descrivere il riscaldamento non CO_2.
- Indicare le opzioni di mitigazione.

Concetti chiave

- Le scie si formano quando lo scarico caldo e umido si mescola con aria fredda e l'acqua condensa e congela sulle particelle di fuliggine.
- Le scie persistenti possono estendersi in cirri che intrappolano il calore uscente.
- Meno particelle di fuliggine significano cristalli di ghiaccio meno numerosi e più grandi che scompaiono prima.
- NASA e DLR hanno rilevato che carburanti sostenibili a combustione più pulita producevano il 50%–70% di cristalli di ghiaccio in meno in crociera.
- Aggirare l'aria sovrasatura di ghiaccio può evitare le scie persistenti.

Equazioni chiave

$$N = EI \times m_f$$

`N=EI× m_f`

Cristalli di ghiaccio da indice di emissione e carburante

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

`N^=N(1-r)`

Dopo una riduzione r

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

Intervallo NASA-DLR

$$\Delta T \propto F$$

Esempi svolti passo passo

Esempio 6.1 Un indice di emissione di esempio di 10^{15} cristalli di ghiaccio per kg di carburante. Con una riduzione del 50%?

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

Risposta: 5×10^{14} per kg.

Esempio 6.2 Con una riduzione del 70%?

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

Risposta: 3×10^{14} per kg.

Esempio 6.3 Un volo brucia 15000 kg di carburante in crociera (esempio). Cristalli con la riduzione del 70%?

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

Risposta: 4.5×10^{18}.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Perché le scie riscaldano di notte?

   Intrappolano l’infrarosso uscente senza luce solare da riflettere.

2. Cosa innesca il ghiaccio delle scie?

   Fuliggine e altre particelle.

3. Riduzione da 5×10^{14} a 3×10^{14}?

   40%.

4. Una soluzione operativa?

   Aggirare l’aria sovrasatura di ghiaccio.

Errori concettuali comuni

Mito: Le scie sono solo acqua, quindi innocue.

In realtà: Possono aggiungere riscaldamento.

Mito: Tutte le scie persistono.

In realtà: Solo in aria sovrasatura di ghiaccio.

Mito: Conta solo la CO_2.

In realtà: Gli effetti non CO_2 sono significativi.

Flashcard

Scia di condensazione

Traccia di condensazione.

Cirri da scia

Scie persistenti estese.

Sovrasaturazione di ghiaccio

Aria in grado di far crescere ghiaccio.

Fuliggine

Particelle di carbonio.

Indice di emissione

Quantità per kg di carburante.

Forzante non CO_2

Riscaldamento oltre la CO_2.

Quiz di autoverifica

1. Riduzione del 50%...

5×10^{14}

5×10^{15}

10^{14}

0

5×10^{14}. × 0.5.

2. Intervallo NASA-DLR...

50%–70%

5%–7%

90%–100%

20%

50%–70%. NASA.

3. Cristalli per volo...

4.5×10^{18}

4.5×10^{14}

3×10^{14}

1.5×10^{19}

4.5×10^{18}. × 15,000.

4. Il ghiaccio delle scie si forma su...

particelle di fuliggine

CO_2

azoto

ozono

particelle di fuliggine. Nucleazione.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA riferisce che carburanti avio a combustione più pulita prodotti da fonti sostenibili possono generare il 50%–70% in meno di scie di cristalli di ghiaccio alla quota di crociera, secondo una

ricerca congiunta di NASA e DLR (Centro aerospaziale tedesco).

La NASA osserva che le scie di cristalli di ghiaccio possono restare per ore nell'alta atmosfera e influire sul modo in cui la Terra si riscalda e si raffredda.

Su Saving Planets: Osservazione della Terra · Trasmissione del calore

Fonti: 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/)

Risorse di apprendimento gratuite

- 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/): Studio della 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/): Lezione gratuita del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Propulsione elettrica e ibrida

Densità energetica delle batterie, efficienza della catena di trazione, autonomia elettrica e dove aiutano i sistemi ibridi.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Confrontare la densità energetica di batterie e carburante.
- Tenere conto dell’efficienza della catena di trazione.
- Calcolare l’autonomia di un aereo elettrico.
- Individuare le missioni adatte.

Concetti chiave

- Il carburante avio immagazzina circa 43 MJ/kg (11944 Wh/kg); le batterie attuali immagazzinano alcune centinaia di Wh/kg (valori da manuale).
- Le catene di trazione elettriche convertono l’energia in modo molto più efficiente (circa il 90%) delle turbine (circa il 35%), riducendo il divario (valori da manuale).
- L’autonomia elettrica a batteria è R = (e η/g)(L/D)(m_b/m).
- Le batterie non si alleggeriscono scaricandosi, a differenza del carburante.
- La NASA afferma che la propulsione elettrificata offre nuove possibilità per ridurre il consumo di carburante ed energia, dai piccoli aerei passeggeri agli aerei a corridoio singolo.

Equazioni chiave

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

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

Autonomia a batteria

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

Rapporto di densità energetica

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

`e=250\ Wh/kg=9×10^5\ J/kg`

Batteria di esempio

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

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

Conversione

Esempi svolti passo passo

Esempio 7.1 Carburante avio a 43 MJ/kg in Wh/kg, e rapporto con una batteria da 250 Wh/kg?

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

Risposta: 47.8 volte.

Esempio 7.2 Correggi per l'efficienza: turbina 0.35, elettrico 0.9.

1. $47.8 \times 0.35/0.9$.

Risposta: Circa 18.6 volte.

Esempio 7.3 Autonomia con e = 250 Wh/kg, $\eta = 0.8$, L/D = 15, frazione di batteria 0.3.

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

Risposta: Circa 330 km.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Autonomia se l'energia della batteria raddoppia a 500 Wh/kg?

   Circa 661 km.

2. 250 Wh/kg in J/kg?

   9×10^5.

3. Perché gli ibridi aiutano?

   La potenza elettrica aiuta decollo e salita mentre il carburante fornisce l'autonomia.

4. Migliori prime missioni?

   Voli regionali brevi e voli di addestramento.

Errori concettuali comuni

Mito: Le batterie eguaglieranno presto il carburante avio.
In realtà: Il divario resta ampio anche dopo l'efficienza.

Mito: Elettrico significa zero emissioni.
In realtà: Dipende dalla rete elettrica.

Mito: Il peso della batteria cala in volo.
In realtà: Resta costante.

Flashcard

Energia specifica

Energia per massa.

Efficienza della catena di trazione

Efficienza dalla batteria all'albero.

Ibrido-elettrico

Carburante più potenza elettrica.

Frazione di batteria

Massa della batteria sulla massa dell'aereo.

Wh/kg

Unità di energia specifica delle batterie.

Intensità della rete

CO_2 per kWh.

Quiz di autoverifica

1. Rapporto di energia...

47.8

4.78

478

18.6

47.8. 11,944/250.

2. Corretto per l'efficienza...

18.6

47.8

2.6

100

18.6. × 0.35/0.9.

3. Autonomia elettrica...

≈ 330 km

≈ 33 km

≈ 3300 km

≈ 660 km

≈ 330 km. Formula.

4. Autonomia con energia raddoppiata...

≈ 661 km

≈ 330 km

≈ 1320 km

≈ 165 km

≈ 661 km. Lineare.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che la propulsione elettrificata offre nuove possibilità per ridurre il consumo di carburante ed energia nell'aviazione, dai piccoli aerei passeggeri agli aerei a corridoio singolo, con nuove tecnologie, concetti, velivoli di prova e strutture a terra.

L'equazione di autonomia di questa unità mostra perché i primi aerei elettrici volano su rotte brevi. Le densità energetiche qui sono valori da manuale.

Su Saving Planets: Circuiti · Soluzioni

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

Risorse di apprendimento gratuite

- 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/): Lezione gratuita del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Aerei a idrogeno

Energia dell’idrogeno per massa e volume, dimensionamento dei serbatoi, emissioni di acqua e compromessi di progetto.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Confrontare idrogeno e carburante avio per massa e volume.
- Dimensionare il volume di un serbatoio di idrogeno.
- Calcolare l’acqua prodotta.
- Spiegare i compromessi di progetto.

Concetti chiave

- L’idrogeno contiene circa 120 MJ/kg, 2.8 volte il carburante avio, ma l’idrogeno liquido ha solo circa 70.8 kg/m³ (valori da manuale).
- Per litro, l’idrogeno liquido contiene circa 8.5 MJ contro circa 34.4 MJ del carburante avio, quindi i serbatoi sono circa quattro volte più grandi.
- Bruciare idrogeno o usarlo in una cella a combustibile produce acqua, circa 8.9 kg per kg di idrogeno, e nessuna CO_2 a bordo.
- I serbatoi criogenici sono ingombranti e pesanti, e plasmano l’intero aereo.
- L’idrogeno verde dipende da elettricità pulita per l’elettrolisi.

Equazioni chiave

$$e_v = \rho\, e_m$$

`e_v=ρ e_m`

Energia per volume

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

`V=(E)/(e_v)`

Volume del serbatoio

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

`m_H_20=8.94 m_H_2`

Acqua dall’idrogeno

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

`_H_2e_jet=120/43`

Rapporto di massa

Esempi svolti passo passo

Esempio 8.1 Idrogeno contro carburante avio per massa?

1. 120/43.

Risposta: 2.79 volte di più per kg.

Esempio 8.2 Energia volumetrica dell’idrogeno liquido?

1. 70.8 × 120/1000.

Risposta: 8.50 MJ/L.

Esempio 8.3 Rapporto di volume del serbatoio rispetto al carburante avio (0.8 kg/L, da manuale)?

1. 34.4/8.50.

Risposta: Circa 4.05 volte più grande.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Acqua da 100 kg di idrogeno?

   Circa 894 kg.

2. Energia volumetrica del carburante avio?

   0.8 × 43 = 34.4 MJ/L.

3. Perché i serbatoi di idrogeno sono pesanti?

   Pareti criogeniche isolate.

4. Quando l’idrogeno è a basse emissioni di carbonio?

   Quando è prodotto con energia pulita.

Errori concettuali comuni

Mito: L’idrogeno è leggero, quindi i serbatoi sono piccoli.
In realtà: Una bassa densità implica serbatoi grandi.

Mito: Gli aerei a idrogeno non emettono nulla.
In realtà: Emettono vapore acqueo, che può formare scie.

Mito: Tutto l’idrogeno è verde.
In realtà: Oggi la maggior parte è prodotta da gas fossile.

Flashcard

LH_2

Idrogeno liquido.

Criogenico

Stoccaggio a temperature molto basse.

Cella a combustibile

Fonte di energia elettrochimica.

Elettrolisi

Scissione dell’acqua con l’elettricità.

Energia volumetrica

Energia per volume.

Idrogeno verde

Prodotto con energia pulita.

Quiz di autoverifica

1. Rapporto di massa...

2.79

0.36

4.05

120

2.79. 120/43.

2. MJ/L di LH_2...

8.50

34.4

120

0.85

8.50. 70.8 × 0.12.

3. Rapporto dei serbatoi...

≈ 4

≈ 0.25

≈ 1

≈ 40

≈ 4. 34.4/8.5.

4. Acqua per kg di H_2...

≈ 8.9 kg

≈ 1 kg

≈ 18 kg

0

≈ 8.9 kg. 18.015/2.016.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il Sustainable Flight National Partnership della NASA copre tecnologie avanzate dei velivoli, operazioni efficienti e carburanti sostenibili per l'aviazione; questa unità aggiunge l'idrogeno come ulteriore opzione, in cui il volume del serbatoio è la principale sfida progettuale.

I valori dell'idrogeno in questa unità sono valori da manuale, non dati NASA.

Su Saving Planets: Chimica Generale I · Termodinamica

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

Risorse di apprendimento gratuite

- 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/): Lezione gratuita del MIT.
- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Operazioni, rumore e qualità dell’aria

Rullaggio e traiettorie efficienti, aritmetica dei decibel, rumore aeroportuale, qualità dell’aria locale e benzina avio al piombo.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Stimare il risparmio di carburante in rullaggio.
- Sommare livelli sonori in decibel.
- Applicare la legge dell’inverso del quadrato.
- Spiegare il problema del carburante al piombo.

Concetti chiave

- Le operazioni contano: rullaggio con un motore, discese continue e traiettorie ottimali riducono il carburante con gli aerei di oggi.
- I decibel si sommano in modo logaritmico: due sorgenti uguali sono più forti di 3 dB, non del doppio del numero.
- In campo libero, il livello sonoro cala di circa 6 dB per ogni raddoppio della distanza.
- NOx, particolato e CO dei motori incidono sulla qualità dell’aria vicino agli aeroporti.
- L’EPA afferma che la maggior parte degli aerei che usano carburante al piombo sono aerei a pistoni con 2–10 passeggeri; gli aerei di linea non usano carburante al piombo.

Equazioni chiave

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

`L=10_1010^L_i/10`

Somma di livelli sonori

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

`Δ L=20_10(r_2/r_1)`

Propagazione sferica

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

`m_f= m_ft`

Carburante consumato

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

`m_CO_2=3.16 m_f`

CO_2 per kg di carburante (da manuale)

Esempi svolti passo passo

Esempio 9.1 Due sorgenti da 80 dB insieme?

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

Risposta: 83.0 dB.

Esempio 9.2 Calo di livello raddoppiando la distanza?

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

Risposta: 6.02 dB.

Esempio 9.3 Rullare 10 minuti con un motore invece di due a 0.1 kg/s ciascuno (esempio). Carburante e CO_2 risparmiati?

1. 0.1 × 600 = 60 kg.
2. 60 × 3.16.

Risposta: 60 kg di carburante, circa 190 kg di CO_2.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Dieci sorgenti uguali da 70 dB?

   80 dB.

2. Calo quando la distanza quadruplica?

   12.0 dB.

3. Carburante per due motori in 10 minuti?

120 kg.

4. Quali aerei usano carburante al piombo (EPA)?

   Soprattutto aerei a pistoni.

Errori concettuali comuni

Mito: I decibel si sommano linearmente.
In realtà: Si sommano in modo logaritmico.

Mito: Le operazioni non possono ridurre le emissioni.
In realtà: Riducono il carburante già oggi.

Mito: Gli aerei di linea bruciano carburante al piombo.
In realtà: L'EPA dice che gli aerei di linea no.

Flashcard

Decibel

Misura logaritmica del suono.

Legge dell'inverso del quadrato

L'intensità cala con r^2.

Rullaggio con un motore

Rullare con un solo motore.

Discesa continua

Discesa al minimo senza livellamenti.

NOx

Ossidi di azoto.

Avgas

Benzina avio.

Quiz di autoverifica

1. Two 80 dB...

83.0 dB

160 dB

80 dB

86 dB

83.0 dB. +3 dB.

2. Raddoppio della distanza...

−6.02 dB

−3 dB

−10 dB

−20 dB

−6.02 dB. 20 log 2.

3. CO_2 risparmiata in rullaggio...

≈ 190 kg

≈ 60 kg

≈ 19 kg

≈ 600 kg

≈ 190 kg. 60 × 3.16.

4. Utenti del carburante al piombo...

aerei a pistoni

aerei di linea

razzi

solo elicotteri

aerei a pistoni. EPA.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

L’EPA afferma che la maggioranza degli aerei alimentati con carburante al piombo sono aerei a pistoni, che di solito trasportano 2–10 passeggeri, e che i jet per il trasporto commerciale non usano carburante al piombo.

L’EPA ha emesso una determinazione finale secondo cui le emissioni di piombo di alcuni motori aeronautici mettono in pericolo la salute e il benessere pubblici, il che obbliga EPA e FAA a fissare norme.

Su Saving Planets: Soluzioni · Prestazioni dei velivoli

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

Risorse di apprendimento gratuite

- U.S. EPA: Regulations for lead emissions from aircraft (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-lead-emissions-aircraft): Pagina dell’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/): Lezione gratuita del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Percorsi verso lo zero netto

Crescita del traffico, efficienza, SAF, nuovi aerei e compensazioni combinati in scenari verso il 2050.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Proiettare la crescita del traffico.
- Combinare le riduzioni in modo moltiplicativo.
- Costruire un semplice scenario a cunei.
- Discutere gli strumenti di policy.

Concetti chiave

- Emissioni = traffico × energia per unità di traffico × carbonio per energia.
- La crescita si compone: il 3% annuo raddoppia il traffico in circa 24 anni (tasso di esempio).
- Le riduzioni si moltiplicano: (1 − guadagno di efficienza) × (1 − risparmio SAF sul ciclo di vita).
- Le emissioni residue richiedono nuovi aerei, più SAF o assorbimenti.
- Il DOE osserva che il CORSIA dell'ICAO limita la CO_2 netta dell'aviazione internazionale ai livelli del 2020 fino al 2035.

Equazioni chiave

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

`E=T×MJ/T×(CO_2)/(MJ)`

Identità delle emissioni

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

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

Crescita del traffico

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

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

Riduzioni combinate

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

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

Tempo di raddoppio

Esempi svolti passo passo

Esempio 10.1 Il traffico cresce del 3% annuo dal 2026 al 2050 (esempio). Fattore di crescita?

1. 1.03^{24}.

Risposta: 2.03.

Esempio 10.2 Con un guadagno di efficienza del 25%, emissioni rispetto a oggi?

1. 2.033 × 0.75.

Risposta: 1.52.

Esempio 10.3 Aggiungi SAF con un risparmio del 50% sul ciclo di vita su tutta la flotta.

1. 1.525 × 0.5.

Risposta: 0.762, ancora il 76% del livello attuale.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Tempo di raddoppio al 3%?

   23.4 anni.

2. Risparmio necessario per passare da 0.762 a 0?

   Tutto il resto: nuovi aerei, più SAF e assorbimenti.

3. Anni dal 2026 al 2050?

   24.

4. Cosa limita il CORSIA?

   La CO_2 netta dell'aviazione internazionale ai livelli del 2020 fino al 2035.

Errori concettuali comuni

Mito: Le riduzioni si sommano.

In realtà: Si moltiplicano.

Mito: L'efficienza da sola raggiunge lo zero netto.

In realtà: La crescita la supera.

Mito: Le compensazioni riducono le emissioni al motore.

In realtà: Compensano altrove.

Flashcard

Zero netto

Emissioni bilanciate da assorbimenti.

Cuneo

Fetta di un piano di riduzione.

CORSIA

Meccanismo di compensazione dell'ICAO.

Crescita del traffico

Aumento dei passeggeri-km.

Assorbimento

Rimuovere CO_2 dall'aria.

Scenario

Insieme coerente di ipotesi.

Quiz di autoverifica

1. Fattore di crescita...

2.03

1.72

1.03

3.0

2.03. 1.03^{24}.

2. Con l’efficienza...

1.52

2.03

0.76

1.0

1.52. × 0.75.

3. Con anche i SAF...

0.762

0.25

1.52

0

0.762. × 0.5.

4. Anno obiettivo dello zero netto...

2050

2030

2035

2100

2050. NASA.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che il suo Sustainable Flight National Partnership lavora con industria, università e altre agenzie verso l'obiettivo del settore aereo di zero emissioni nette di carbonio entro il 2050.

Il DOE osserva che il CORSIA dell'ICAO limita la CO_2 netta dell'aviazione internazionale ai livelli del 2020 fino al 2035.

Su Saving Planets: Soluzioni · Capstone Design

Fonti: 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)

Risorse di apprendimento gratuite

- 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): Pagina SAF del DOE.

☐ **Ho finito questa unità**

Esercizi

Questi esercizi stanno dentro ogni unità. Falli su carta, poi apri la risposta.

1. Aviazione e clima: contare la CO_2
   4 esercizi
2. Metriche di efficienza
   4 esercizi
3. Efficienza aerodinamica
   4 esercizi
4. Efficienza dei motori
   4 esercizi
5. Carburanti sostenibili per l'aviazione
   4 esercizi
6. Scie di condensazione ed effetti non CO_2
   4 esercizi
7. Propulsione elettrica e ibrida
   4 esercizi
8. Aerei a idrogeno
   4 esercizi
9. Operazioni, rumore e qualità dell'aria
   4 esercizi
10. Percorsi verso lo zero netto
    4 esercizi

Il laboratorio (Sustainable aviation lab)

Il laboratorio è la parte pratica del corso. Qui è gratuito e solo per esercitarsi, senza crediti.

Ogni laboratorio si svolge in un foglio di calcolo o in una simulazione gratuita, quindi senza rischi legati a carburanti, batterie o idrogeno. Non maneggiare carburanti, batterie o gas in pressione per questo corso. Fai pause dallo schermo, siediti con una buona postura e tieni i cavi lontani dai passaggi.

Riferimento per la sicurezza: OSHA: Walking-working surfaces (slip, trip and fall hazards) (https://www.osha.gov/walking-working-surfaces)

Laboratorio A: Calcolatore della CO_2 di un volo

SETTIMANA 1

Obiettivo: Costruisci un foglio di calcolo che trasformi il carburante bruciato in CO_2 e CO_2 per passeggero-km.

$$m = 9.75V$$

`m=9.75V`

Fattore EIA

Procedimento

1. Inserisci il carburante in galloni per tre voli di esempio.
2. Calcola la CO_2 con i 9.75 kg/gal dell'EIA.
3. Dividi per passeggeri × km.
4. Confronta voli brevi e lunghi.

Tabella dei dati

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

Valori d'esempio calcolati.

Calcolo di esempio

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

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

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

Legame con il pianeta: EIA: 9.75 kg di CO_2 per gallone di carburante avio. U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio B: L/D e consumo di carburante

SETTIMANA 4

Obiettivo: Osserva come l’efficienza aerodinamica cambia il carburante per un viaggio di 3000 km.

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

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

Frazione di carburante

Procedimento

1. Inserisci R = 3000 km, V = 230 m/s, c = 0.6 /h.
2. Calcola la frazione di carburante per L/D = 15, 17 e 20.
3. Calcola il risparmio rispetto a L/D = 17.
4. Aggiungi gli effetti dell’allungamento sulla resistenza indotta.

Tabella dei dati

L/D	Frazione di carburante
15	0.135
17	0.120
20	0.103

Valori d’esempio calcolati.

Calcolo di esempio

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

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

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/)

Legame con il pianeta: Il dimostratore X-plane della NASA prova un progetto aerodinamico ultraefficiente. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio C: Esploratore dell’efficienza propulsiva

SETTIMANA 5

Obiettivo: Calcola l’efficienza propulsiva e globale per diverse velocità di scarico.

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

_p=2/(1+V_e/V_0)

Rendimento propulsivo

Procedimento

1. Inserisci V_0 = 230 m/s e η_th = 0.5.
2. Calcola η_p per V_e = 400, 350 e 300 m/s.
3. Calcola l’efficienza globale.
4. Collegala al rapporto di by-pass.

Tabella dei dati

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

Valori d’esempio calcolati.

Calcolo di esempio

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

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

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/)

Legame con il pianeta: NASA: Hybrid Thermally Efficient Core sviluppa nuclei di turbina ad alta densità di potenza. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio D: Calcolatore di miscele SAF

SETTIMANA 7

Obiettivo: Calcola i risparmi sul ciclo di vita per diverse miscele e riduzioni dei SAF.

$$s = b \times r$$

s=b× r

Risparmio della miscela

Procedimento

1. Inserisci miscele del 10%, 30% e 50%.
2. Inserisci una riduzione SAF sul ciclo di vita del 50%, poi dell'80%.
3. Calcola il risparmio e la CO_2 risparmiata ogni 1000 galloni.
4. Confronta con gli obiettivi del Grand Challenge.

Tabella dei dati

Miscela	Risparmio con r = 50%	kg di CO_2 risparmiati per 1000 gal
10%	5%	487.5
30%	15%	1462.5
50%	25%	2437.5

Valori d'esempio calcolati.

Calcolo di esempio

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

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

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

Legame con il pianeta: DOE: i SAF possono essere miscelati dal 10% al 50% a seconda della filiera. U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio E: Autonomia di un aereo elettrico

SETTIMANA 10

Obiettivo: Calcola l’autonomia elettrica a batteria per diverse densità energetiche.

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

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

Autonomia elettrica

Procedimento

1. Inserisci η = 0.8, L/D = 15, frazione di batteria 0.3.
2. Calcola l’autonomia per 250, 400 e 500 Wh/kg.
3. Confronta con una rotta regionale di 300 km.
4. Modifica la frazione di batteria.

Tabella dei dati

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

Valori d’esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. 400 × 3600 × 0.8/9.80665 × 15 × 0.3 = 529 km.
2. 500 Wh/kg raddoppiano l’autonomia ottenuta con 250 Wh/kg.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

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/)

Legame con il pianeta: NASA: la propulsione elettrificata può ridurre il consumo di carburante ed energia. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio F: Modello a cunei verso lo zero netto

SETTIMANA 14

Obiettivo: Esplora il riscaldamento in PhET Greenhouse Effect, poi costruisci uno scenario aeronautico 2026–2050.

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

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

Emissioni dello scenario

Procedimento

1. In PhET Greenhouse Effect, aggiungi gas serra e osserva come risponde la temperatura.
2. Inserisci una crescita del traffico del 3% per 24 anni.
3. Applica un guadagno di efficienza del 25% e un risparmio SAF del 50%.
4. Trova il tasso di crescita al quale le due misure mantengono stabili le emissioni.

Tabella dei dati

Caso	Emissioni rispetto a oggi
Solo crescita	2.03
+ efficienza	1.52
+ SAF	0.762

Valori d'esempio calcolati.

Calcolo di esempio

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

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

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

Legame con il pianeta: NASA: l'obiettivo del settore aereo è zero emissioni nette di carbonio entro il 2050. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Serie di esercizi per gli esami

Cronometrati: circa 10 minuti per problema. Poi confronta con le soluzioni complete.

Esercizi di preparazione all'esame intermedio (unità 1–5)

1. CO_2 da 2000 galloni di carburante avio?
    1. 2000 × 9.75.

    Risposta: 19,500 kg.

2. g di CO_2 per passeggero-km per 19500 kg, 150 passeggeri, 1000 km?
    1. 19,500,000/150,000.

    Risposta: 130 g.

3. Frazione di carburante per 3000 km con L/D = 15 (valori dell'unità 3)?
    1. 1 − e^(−0.1449).

    Risposta: 0.135.

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

    Risposta: 0.833.

5. Risparmio di una miscela al 40% con il 70% di riduzione sul ciclo di vita?
    1. 0.4 × 0.7.

    Risposta: 28%.

Serie finale di esercizi (unità 1–10)

1. Cristalli di ghiaccio dopo un taglio del 60% da 10^{15} per kg?
    1. 10^{15} × 0.4.

Risposta: 4 × 10¹⁴ per kg.

2. Autonomia elettrica con 300 Wh/kg (valori dell’unità 7)?

    1. 330.4 × 1.2.

    Risposta: Circa 396 km.

3. Volume di idrogeno liquido per 1000 MJ?

    1. 1000/8.50.

    Risposta: 118 L.

4. Tre sorgenti uguali da 75 dB?

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

    Risposta: 79.8 dB.

5. Fattore di crescita al 2% per 24 anni?

    1. 1.02^{24}.

    Risposta: 1.61.

6. Emissioni rispetto a oggi con crescita del 2%, efficienza del 25% e SAF al 50%?

    1. 1.608 × 0.75 × 0.5.

    Risposta: 0.603.

Formulario

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

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

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

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

$$s = b\,r$$

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

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

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

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

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

Costanti

Costante	Valore
Gravità standard	$g = 9.80665\ m/s^2$
CO_2 del carburante avio (EIA)	9.75 kg di CO_2 per gallone (21.50 lb)
Potere calorifico del carburante avio (valore da manuale)	43 MJ/kg
Potere calorifico dell'idrogeno (valore da manuale)	120 MJ/kg
Densità dell'idrogeno liquido (valore da manuale)	$70.8\ kg/m^3$
Gallone	3.785411784 L

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

Testi e fonti gratuiti

Usa queste lezioni, pagine di dati e simulazioni gratuite insieme al corso.

- 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/): Appunti gratuiti del MIT.
- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): Programma della NASA.
- U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel): Dati SAF del DOE.
- U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php): Fattori di emissione dell'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/): Studio della NASA sulle scie.
- PhET: Greenhouse Effect (https://phet.colorado.edu/en/simulations/greenhouse-effect): Bilancio radiativo.

Glossario

Allungamento
Apertura alare al quadrato divisa per la superficie alare.

Avgas
Benzina avio per motori a pistoni.

Limite di miscelazione
Quota massima di SAF nel carburante avio.

CORSIA
Meccanismo di compensazione del carbonio dell'ICAO.

Scia di condensazione

Scia di condensazione di cristalli di ghiaccio.

Decibel
Misura logaritmica del suono.

Propulsione elettrificata
Potenza elettrica o ibrida per aerei.

Fattore di emissione
CO_2 per unità di carburante.

Intensità energetica
Energia per passeggero-km.

Resistenza indotta
Resistenza causata dalla portanza.

Emissioni sul ciclo di vita
CO_2 dal pozzo alla scia.

Idrogeno liquido
Idrogeno criogenico come carburante.

Fattore di carico
Passeggeri diviso posti.

Zero netto
Emissioni bilanciate da assorbimenti.

Effetti non CO_2
Riscaldamento da scie, NOx e particolato.

Passeggero-km
Un passeggero trasportato per un km.

Rendimento propulsivo
Quota della potenza del getto che produce spinta.

SAF
Carburante sostenibile per l'aviazione.

Fuliggine
Particelle di carbonio nello scarico.

Energia specifica
Energia per unità di massa.

Griglia di autovalutazione

Non si assegnano voti né crediti. Usala per valutare onestamente a che punto sei in ogni unità.

Livello	Come si presenta
4 · Padronanza	Contabilizza gli effetti CO_2 e non CO_2 con unità e riferimenti corretti, combina correttamente le riduzioni e spiega con parole semplici i compromessi tra le opzioni.
3 · Competente	Risolve le serie di esercizi e d'esame con piccoli errori e controlla le unità.
2 · In sviluppo	Segue gli esempi svolti ma confonde la CO_2 di combustione e quella del ciclo di vita, o somma le riduzioni invece di moltiplicarle.
1 · Principiante	Cita risparmi senza riferimenti né unità; deve rivedere le unità.

Pesi suggeriti se vuoi un punteggio

Parte	Peso
Esercizi	20%
Laboratori	25%
Serie di esercizi di metà corso	25%
Serie di esercizi finale	30%

Punta al livello 3 o superiore in ogni unità prima di passare al corso successivo.

Corsi correlati

- Progetto finale (velivolo o CubeSat) AERO 490
- Propulsione AERO 410
- Dinamica del volo e controlli AERO 420
- Tutti i corsi