Ultimo aggiornamento: November 1, 2026

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 programma segue un corso semestrale dell'ultimo anno di progettazione di veicoli spaziali per ingegneri aerospaziali. Riprende argomenti e livello di MIT 16.851 Satellite Engineering (gratuito su MIT OpenCourseWare), e usa il Systems Engineering Handbook gratuito della NASA e il rapporto Small Spacecraft Technology State of the Art, che colleghiamo dove sono utili. Nessuno di questi autori, atenei o enti approva questa pagina.
>
> Cosa aggiungiamo: ogni unità è legata a un lavoro reale con una fonte pubblica citata (le missioni Landsat 9, Europa Clipper e PACE della NASA e la rassegna della NASA sulle tecnologie per piccoli veicoli spaziali), ogni numero della pagina viene ricalcolato da uno script di verifica prima della pubblicazione, e ogni laboratorio ha una simulazione gratuita o un foglio di calcolo.
>
> 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

I satelliti di osservazione della Terra sono la progettazione spaziale resa utile: potenza, termica, puntamento e comunicazioni devono funzionare per anni affinché gli scienziati seguano foreste, acqua, colture e clima.

Una buona progettazione significa anche lunga vita e meno detriti in orbita. 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 430).
- 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

- Meccanica orbitale: orbite, periodi e Δv.
- Termodinamica: basi di trasmissione del calore e irraggiamento.
- Circuiti: potenza, tensione e corrente.
- Dinamica del volo e controlli e Strutture aerospaziali: controllo d'assetto, rigidezza e carichi.

Come studiare

- Parti sempre dai requisiti e tieni un bilancio (massa, potenza, Δv, collegamento) per ogni sottosistema.
- Prevedi margini e indica dove si trovano.
- Segui le unità: watt contro wattora, kelvin per l'irraggiamento, decibel per i collegamenti.
- Confronta ogni risposta con l'ordine di grandezza di una missione reale.
- Disegna il veicolo spaziale e la sua orbita prima di calcolare qualsiasi cosa.
- Fai ogni esercizio su carta prima di aprire la risposta e ripeti i quiz qualche giorno dopo.

Che cosa ti serve

- Un computer o un tablet per le simulazioni PhET gratuite Blackbody Spectrum e Circuit Construction Kit.
- Un foglio di calcolo (va bene qualsiasi gratuito), oppure Python.
- Le pagine delle missioni NASA e il rapporto Small Spacecraft Technology 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	Requisiti di missione e ingegneria dei sistemi	Requisiti e bilanci; Laboratorio A	NASA SE Handbook
2	Orbite e ambiente spaziale	Orbite e ambiente; Laboratorio B	MIT 16.851
3	Generazione di potenza: pannelli solari	Pannelli solari; Laboratorio C	NASA SST SOA
4	Accumulo di energia e bilancio di potenza	Batterie e bilancio di potenza; Laboratorio D	NASA SST SOA
5	Controllo termico	Controllo termico; Laboratorio E	MIT 16.851
6	Strutture, meccanismi e carichi di lancio	Strutture e carichi di lancio	MIT 16.851
7	Propulsione e bilancio del delta-v	Bilanci di Δv; esercitazione per il parziale	MIT 16.851
8	Sottosistema di determinazione e controllo d’assetto	Requisiti dell’ADCS	MIT 16.851
9	Sottosistema di determinazione e controllo d’assetto	Sensori, attuatori e momento angolare	NASA SST SOA
10	Comunicazioni e gestione dei dati	Bilanci di collegamento	MIT 16.851
11	Comunicazioni e gestione dei dati	Gestione dei dati; Laboratorio F	NASA Landsat 9
12	Affidabilità, prove e fine vita	Affidabilità e ridondanza	NASA SE Handbook
13	Affidabilità, prove e fine vita	Prove e calibrazione	NASA Landsat 9
14	Affidabilità, prove e fine vita	Operazioni e smaltimento	NASA SE Handbook
15	Affidabilità, prove e fine vita	Ripasso; esercitazione per l’esame finale	MIT 16.851

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

Requisiti di missione e ingegneria dei sistemi

Obiettivi di missione, requisiti, ciclo di vita del progetto, studi di compromesso, bilanci dei sottosistemi e margini di progetto.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Trasformare gli obiettivi di missione in requisiti misurabili.
- Costruire un bilancio di massa con margine.
- Condurre un semplice studio di compromesso pesato.
- Spiegare perché i margini si riducono nel corso di un progetto.

Concetti chiave

- Una missione inizia con degli obiettivi; i requisiti li rendono misurabili e verificabili (un numero, un'unità e una prova).
- I progetti attraversano fasi dal concetto alle operazioni, con revisioni che verificano il rispetto dei requisiti.
- Ogni risorsa ha un bilancio: massa, potenza, Δv, dati, puntamento e costo, ciascuno con un margine.
- I primi progetti hanno margini ampi (spesso 20–30%, valori da manuale) perché le stime sono incerte; i margini si riducono man mano che l'hardware matura.
- Gli studi di compromesso valutano le opzioni secondo criteri pesati; i pesi contano quanto i punteggi.

Equazioni chiave

$$m_{alloc} = m_{est}(1 + M)$$

`m_alloc=m_est(1+M)`

Massa con margine

$$S = \sum w_i s_i$$

`S= w_is_i`

Punteggio di compromesso pesato

$$\text{Margin} = \frac{\text{Capability} - \text{Need}}{\text{Need}}$$

`Margin=-NeedNeed`

Margine di prestazione

$$\sum w_i = 1$$

`w_i=1`

I pesi sommano a uno

Esempi svolti passo passo

Esempio 1.1 Una stima della massa a secco è 800 kg. Alloca con un margine del 20% (valori di esempio).

1. 800 × 1.20.

Risposta: 960 kg.

Esempio 1.2 La NASA afferma che Landsat 9 doveva acquisire almeno 400 scene al giorno e ne acquisisce 740. Trova il margine.

1. (740 − 400)/400.

Risposta: 85% sopra il requisito (740/400 = 1.85).

Esempio 1.3 L'opzione A ottiene 8 (costo) e 6 (prestazioni); B ottiene 5 e 9. Pesi 0.4 e 0.6. Quale vince?

1. A = 3.2 + 3.6 = 6.8.
2. B = 2.0 + 5.4 = 7.4.

Risposta: Vince B, 7.4 a 6.8.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Alloca 1200 kg con un margine del 25%.

   1500 kg.

2. Se i pesi si invertono in 0.6/0.4, chi vince?

A: 7.2 vs B: 6.6.

3. Che cosa rende verificabile un requisito?

   Un valore misurabile e una prova o un’analisi per controllarlo.

4. Perché prevedere un margine?

   Le stime crescono man mano che i progetti maturano.

Errori concettuali comuni

Mito: I requisiti sono desideri.
In realtà: Sono misurabili e verificabili.

Mito: I margini sono uno spreco.
In realtà: Assorbono crescita e sorprese.

Mito: Gli studi di compromesso sono oggettivi.
In realtà: I pesi contengono un giudizio.

Flashcard

Requisito

Esigenza misurabile e verificabile.

Bilancio

Allocazione di una risorsa.

Margine

Riserva oltre la stima.

Studio di compromesso

Confronto pesato.

Ciclo di vita

Fasi dal concetto allo smaltimento.

Verifica

Prova che un requisito è soddisfatto.

Quiz di autoverifica

1. 800 kg + 20%...

960 kg

820 kg

1000 kg

640 kg

960 kg. Moltiplica.

2. Scene di Landsat 9 al giorno...

740

400

100

7400

740. NASA.

3. Vincitore del compromesso...

B

A

parità

nessuno dei due

B. 7.4 > 6.8.

4. I margini nel tempo...

si riducono

si alzino

spariscono all'inizio

sono fissi

si riducono. Maturità.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che i requisiti del programma Landsat 9 includevano l'acquisizione di almeno 400 scene al giorno e una vita di progetto di 5 anni; Landsat 9 acquisisce 740 scene al giorno, quasi il doppio del minimo, e porta abbastanza carburante per operare almeno 10 anni.

Superare requisiti come questi prolunga un archivio delle terre emerse che, osserva la NASA, copre più di cinque decenni e supporta allerte sulla deforestazione, monitoraggio della qualità dell'acqua e rapporti sulle colture.

Su Saving Planets: Osservazione della Terra · Soluzioni

Fonti: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Lezioni gratuite del MIT.

Guarda la lezione

Lecture 21: Systems Engineering for Space Shuttle Payloads (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2005/resources/lecture-21/) (in inglese)

MIT 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2005), MIT OpenCourseWare. Licenza: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condizioni d'uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

☐ **Ho finito questa unità**

Orbite e ambiente spaziale

Scegliere un’orbita, periodo e velocità, orbite eliosincrone e geostazionarie, tracce al suolo e strisciate, eclissi, vuoto, radiazione e ossigeno atomico.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare periodo e velocità orbitali.
- Contare le orbite al giorno.
- Stimare la durata dell’eclissi in orbita bassa.
- Elencare i pericoli ambientali per orbita.

Concetti chiave

- Periodo T = 2π√(a³/μ); velocità circolare v = √(μ/a).
- Le orbite eliosincrone sono quasi polari e precedono una volta all’anno, così il satellite attraversa l’equatore alla stessa ora locale ogni giorno.
- Le orbite basse attraversano l’ombra della Terra; la frazione di eclissi di un’orbita circolare con il Sole nel piano orbitale è circa (2/2π)·asin(R_E/a).
- L’ambiente spaziale comprende vuoto, temperature estreme, fasce di radiazione, ossigeno atomico in orbita bassa e detriti.
- Orbite più alte vedono più Terra ma richiedono ottiche e antenne più grandi per la stessa risoluzione e velocità dati.

Equazioni chiave

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

T=2π^3/μ

Periodo orbitale

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

v=μ/a

Velocità circolare

$$f_e \approx \frac{\sin^{-1}(R_E/a)}{\pi}$$

Frazione di eclissi (caso peggiore)

$$N = \frac{86400}{T}$$

`N=86400/T`

Orbite al giorno

Esempi svolti passo passo

Esempio 2.1 Landsat 9 vola a 705 km. Trova il suo periodo.

1. a = 6378.137 + 705 = 7083.1 km.
2. T = 2π√(7083.1³/398,600.4).

Risposta: T = 98.9 min (la NASA indica 99 min).

Esempio 2.2 Trova orbite al giorno e velocità.

1. 86,400/5932.7 s.
2. v = √(398,600.4/7083.1).

Risposta: 14.56 orbite/giorno; 7.50 km/s.

Esempio 2.3 Stima l'eclissi nel caso peggiore.

1. asin(6378.1/7083.1) = 1.121 rad.
2. f = 1.121/π = 0.357.

Risposta: Circa 35.3 min per orbita.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Perché quasi polare?

   Per coprire tutto il globo.

2. Inclinazione di Landsat 9?

   98.2°.

3. Principale pericolo di erosione in orbita bassa?

L’ossigeno atomico.

4. L’eclissi si riduce a quota più alta?

   Sì, la frazione cala.

Errori concettuali comuni

Mito: Lo spazio è freddo, quindi i veicoli spaziali gelano.
In realtà: Le parti al sole possono surriscaldarsi; l’equilibrio conta.

Mito: Più in alto è sempre meglio.
In realtà: Risoluzione e collegamenti ne risentono.

Mito: Eliosincrona significa sempre al sole.
In realtà: Solo le versioni alba–tramonto evitano l’eclissi.

Flashcard

Periodo

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

Eliosincrona

Stessa ora locale di attraversamento.

Eclissi

Tempo nell’ombra della Terra.

Striscia di ripresa

Larghezza al suolo ripresa.

Ossigeno atomico

Erode le superfici in LEO.

Fasce di radiazione

Particelle cariche intrappolate.

Quiz di autoverifica

1. Periodo di Landsat 9…

≈99 min

24 h

45 min

12 h

≈99 min. NASA.

2. Orbite al giorno...

≈14.5

1

100

3

≈14.5. 86,400/T.

3. Eclissi peggiore a 705 km...

≈35 min

0

60 min

5 min

≈35 min. Calcolato.

4. Eliosincrona dà...

la stessa ora locale

nessuna eclissi

Vista dalla GEO

resistenza nulla

la stessa ora locale. Precessione.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA colloca Landsat 9 in un'orbita quasi polare eliosincrona a 705 km, con inclinazione di 98.2°, periodo di 99 minuti, circa 14.5 orbite al giorno, una strisciata di 185 km e un passaggio all'equatore verso le 10:12 ora locale.

Con Landsat 8 osserva lo stesso luogo ogni 8 giorni. L'illuminazione alla stessa ora del giorno è ciò che permette agli scienziati di confrontare immagini nell'arco di decenni.

Su Saving Planets: Meccanica orbitale · Osservazione della Terra

Fonti: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Lezioni gratuite del MIT.
- NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/): Pagina della missione NASA.

☐ **Ho finito questa unità**

Generazione di potenza: pannelli solari

Flusso solare e distanza, efficienza delle celle, angolo solare, potenza a inizio e fine vita, dimensionamento dei pannelli e potenza specifica.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare la potenza del pannello per metro quadrato.
- Applicare la legge del coseno e dell'inverso del quadrato.
- Dimensionare un pannello per un carico.
- Confrontare le tecnologie delle celle.

Concetti chiave

- Il flusso solare vicino alla Terra è circa 1361 W/m² (valore da manuale) e cala con l'inverso del quadrato della distanza dal Sole.
- La potenza cala con il coseno dell'angolo tra la normale al pannello e il Sole.
- La rassegna NASA sui piccoli veicoli spaziali riporta celle spaziali multigiunzione con efficienza nominale del 30% (fino al 34%), contro circa il 20% del silicio a giunzione singola.
- Il degrado da radiazione, contaminazione e invecchiamento riduce la potenza a fine vita, quindi i pannelli si dimensionano per l'EOL.
- La potenza specifica (W/kg) spesso determina la fattibilità; la NASA osserva che le missioni a pannelli solari si concentrano attorno a 30 W/kg.

Equazioni chiave

$$P = S\eta A\cos\theta$$

`P=S Aθ`

Potenza del pannello

$$S(r) = \frac{1361}{r^2}$$

`S(r)=(1361)/(r^2)`

Inverso del quadrato (r in UA)

$$A = \frac{P}{S\eta f_d}$$

`A=(P)/(S f_d)`

Area del pannello

$$SP = \frac{P}{m}$$

SP=P/m

Potenza specifica

Esempi svolti passo passo

Esempio 3.1 Trova la potenza per m² di celle al 30% rivolte al Sole a 1 UA.

1. 1361 × 0.30.

Risposta: 408.3 W/m².

Esempio 3.2 Trova l'area per 2 kW con un fattore di degrado e riempimento di 0.85 (valore di esempio).

1. 2000/(1361 × 0.30 × 0.85).

Risposta: 5.76 m².

Esempio 3.3 Trova il flusso solare su Giove (5.2 UA).

1. 1361/5.2².

Risposta: 50.3 W/m², 27 volte meno.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Potenza per m² inclinata di 30°?

   353.6 W/m².

2. Flusso su Marte (1.524 UA)?

   586 W/m².

3. Potenza per m² per silicio al 20%?

272.2 W/m².

4. Massa del pannello per 2 kW a 30 W/kg?

   66.7 kg.

Errori concettuali comuni

Mito: La distanza conta poco.

In realtà: Il flusso cala come 1/r².

Mito: La potenza BOL basta.

In realtà: Dimensiona per la fine vita.

Mito: Conta solo l'efficienza.

In realtà: Contano anche massa e volume ripiegato.

Flashcard

Flusso solare

≈1361 W/m² a 1 UA.

Cella multigiunzione

Bandgap sovrapposti, ~30%.

BOL/EOL

Inizio/fine vita.

Perdita del coseno

$P \propto \cos \theta$.

Inverso del quadrato

$S \propto 1/r^2$.

Potenza specifica

W/kg.

Quiz di autoverifica

1. 30% a 1 UA per m²...

408 W

1361 W

136 W

30 W

408 W. Moltiplica.

2. Flusso su Giove...

≈50 W/m²

1361

500

5

≈50 W/m². 1/r².

3. η nominale multigiunzione (NASA)...

30%

10%

50%

86%

30%. Rapporto SOA.

4. L'inclinazione riduce la potenza di...

cos θ

sin θ

θ²

niente

cos θ. Coseno.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA descrive Europa Clipper come un veicolo a energia solare che, con i pannelli dispiegati, supera i 100 piedi (circa 30 metri) di apertura; è stato lanciato il 14 ott. 2024 e percorrerà 1.8 miliardi di miglia per raggiungere Giove nell'aprile 2030.

Su Giove la luce solare è circa 27 volte più debole che sulla Terra, ed è per questo che i pannelli di Clipper sono così grandi: la legge dell'inverso del quadrato di questa unità, in scala di missione.

Su Saving Planets: Soluzioni · Meccanica orbitale

Fonti: NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/) · NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/): Capitolo gratuito della NASA sulla potenza.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Stringhe in serie e in parallelo.

☐ **Ho finito questa unità**

Accumulo di energia e bilancio di potenza

Elenchi dei carichi, bilancio energetico al sole e in eclissi, dimensionamento della batteria con profondità di scarica, energia specifica, gestione e distribuzione della potenza.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Costruire un elenco dei carichi e la potenza media sull'orbita.
- Dimensionare una batteria per l'eclissi.
- Calcolare la massa della batteria dall'energia specifica.
- Spiegare i limiti della profondità di scarica.

Concetti chiave

- Il bilancio di potenza somma ogni carico per modalità; il pannello deve alimentare i carichi al sole e ricaricare la batteria per l'eclissi.
- Energia della batteria = carico × durata dell'eclissi ÷ profondità di scarica (DoD) ammessa.
- Una DoD bassa allunga la vita a cicli; in orbita bassa ci sono circa 15 cicli al giorno, quindi la DoD è spesso tenuta bassa (indicazione da manuale).
- La rassegna NASA riporta celle Li-ion commerciali di circa 150–270 Wh/kg e 3.6 V medi.
- La gestione e distribuzione della potenza regola la tensione del bus, commuta i carichi e isola i guasti.

Equazioni chiave

$$E = \frac{P_e t_e}{DoD}$$

`E=(P_et_e)/(DoD)`

Energia della batteria

$$m_b = \frac{E}{e_{sp}}$$

`m_b=_sp`

Massa della batteria

$$P_{avg} = \frac{P_d t_d + P_e t_e}{T}$$

`P_avg=(P_dt_d+P_et_e)/(T)`

Carico medio sull’orbita

$$Ah = \frac{Wh}{V}$$

`Ah=Wh/V`

Capacità

Esempi svolti passo passo

Esempio 4.1 Un carico di 500 W deve superare l’eclissi di 35.3 minuti dell’unità 2. Trova l’energia consumata.

1. 500 × 35.28/60.

Risposta: 294 Wh.

Esempio 4.2 Dimensiona la batteria per una DoD del 30% (valore di esempio).

1. 294/0.30.

Risposta: 980 Wh.

Esempio 4.3 Trova la massa della batteria a 150 Wh/kg a livello di pacco.

1. 980/150.

Risposta: 6.53 kg.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Capacità a 28 V?

   35 Ah.

2. Massa usando celle da 260 Wh/kg?

   3.77 kg (solo celle).

3. Cicli al giorno a 14.56 orbite/giorno?

Circa 14.6.

4. Perché non il 100% di DoD?

   La vita a cicli crolla.

Errori concettuali comuni

Mito: Watt e wattora sono la stessa cosa.
In realtà: Potenza contro energia.

Mito: La scarica profonda va bene.
In realtà: Accorcia la vita.

Mito: Energia delle celle = energia del pacco.
In realtà: I pacchi aggiungono massa per struttura e gestione.

Flashcard

Elenco dei carichi

Potenza per sottosistema e modalità.

DoD

Frazione della capacità usata.

Energia specifica

Wh/kg.

PMAD

Gestione e distribuzione della potenza.

Eclissi

Niente energia solare.

Potenza media sull'orbita

Carico pesato nel tempo.

Quiz di autoverifica

1. Energia d'eclissi...

294 Wh

500 Wh

35 Wh

1000 Wh

294 Wh. P × t.

2. Batteria al 30% di DoD...

980 Wh

294 Wh

88 Wh

3000 Wh

980 Wh. Dividi.

3. Tensione di una cella Li-ion...

3.6 V

1.5 V

12 V

28 V

3.6 V. NASA.

4. Massa della batteria...

6.53 kg

65 kg

0.65 kg

1 kg

6.53 kg. 980/150.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La rassegna NASA sulle tecnologie per piccoli veicoli spaziali elenca celle agli ioni di litio 18650 con eredità di volo su missioni NASA, tra cui celle LG Chem INR18650-MJ1 da 260 Wh/kg per la missione PACE della NASA e celle LG Chem ICR18650 B3 da 191–205 Wh/kg per Europa Clipper.

PACE, lanciata nel febbraio 2024, misura fitoplancton, aerosol e nubi per aiutare a monitorare la salute degli oceani, la qualità dell'aria e il clima. Le sue batterie la mantengono operativa durante ogni eclissi.

Su Saving Planets: Oceani · Circuiti

Fonti: NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/) · NASA Science: PACE (Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem) (https://science.nasa.gov/mission/pace/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/): Capitolo gratuito della NASA sulla potenza.
- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Lezioni gratuite del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Controllo termico

Bilancio radiativo, assorbività ed emissività, temperatura di equilibrio, dimensionamento dei radiatori, rivestimenti, riscaldatori e isolamento multistrato.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare una temperatura di equilibrio.
- Dimensionare un radiatore.
- Scegliere i rivestimenti in base ad α/ε.
- Spiegare riscaldatori e isolamento.

Concetti chiave

- Nel vuoto il calore esce soprattutto per irraggiamento: Q = εσAT⁴.
- La luce solare assorbita è αSA_proj; il rapporto α/ε di una superficie ne fissa la temperatura di equilibrio.
- Una sfera nera a 1 UA con α = ε si assesta vicino a (S/4σ)^¼ ≈ 278 K.
- I radiatori smaltiscono il calore di scarto; vernici bianche e specchi hanno α/ε basso e restano freddi al sole.
- L'isolamento multistrato blocca l'irraggiamento; i riscaldatori tengono calde batterie e propellente in eclissi.

Equazioni chiave

$$Q = \varepsilon \sigma A T^4$$

`Q=σ AT^4`

Calore irraggiato

$$T = \left(\frac{\alpha S}{4 \varepsilon \sigma} \right)^{1/4}$$

`T=((α S)/(4σ))^1/4`

Equilibrio di una sfera

$$A_r = \frac{Q}{\varepsilon \sigma T^4}$$

`A_r=(Q)/(σ T^4)`

Area del radiatore

$$Q_{abs} = \alpha S A_p$$

`Q_abs=α SA_p`

Luce solare assorbita

Esempi svolti passo passo

Esempio 5.1 Trova la temperatura di equilibrio di una sfera a 1 UA con α = ε.

1. T = (1361/(4 × 5.6704 × 10⁻⁸))^¼.

Risposta: T = 278.3 K (5 °C).

Esempio 5.2 Dimensiona un radiatore per smaltire 500 W a 290 K con ε = 0.85 (ignorando la luce solare assorbita).

1. A = 500/(0.85 × 5.6704 × 10⁻⁸ × 290⁴).

Risposta: A = 1.47 m².

Esempio 5.3 Come varia la temperatura di equilibrio con α/ε?

1. T ∝ (α/ε)^¼.

Risposta: Raddoppiare α/ε moltiplica T per 2^¼ = 1.189.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. T per α/ε = 2?

   331 K.

2. Radiatore a 260 K per 500 W?

   2.27 m².

3. Che cosa fa l’MLI?

   Blocca il flusso di calore radiativo.

4. Perché riscaldatori in eclissi?

   Per tenere i componenti sopra le temperature minime.

Errori concettuali comuni

Mito: Lo spazio porta via il calore per conduzione.
In realtà: Vuoto: domina l'irraggiamento.

Mito: Il nero è sempre caldo.
In realtà: Dipende da α/ε.

Mito: La termica è un ripensamento.
In realtà: Guida disposizione e potenza.

Flashcard

Assorbività α

Frazione di luce solare assorbita.

Emissività ε

Capacità di irraggiare.

MLI

Isolamento multistrato.

Radiatore

Superficie che smaltisce calore.

Riscaldatore

Tiene caldi i componenti.

σ

5.6704×10^{-8} W/(m²·K⁴).

Quiz di autoverifica

1. Sfera a 1 UA...

278 K

373 K

200 K

0 K

278 K. Calcolato.

2. Q = …

$\varepsilon\sigma AT^4$

$hA\Delta T$

$kA\Delta T/L$

$mc\Delta T$

$\varepsilon\sigma AT^4$. Irraggiamento.

3. Esempio di area del radiatore…

1.47 m^2

14.7 m^2

0.15 m^2

5 m^2

1.47 m^2. Calcolato.

4. Superficie a basso α/ε…

resta fredda

si scalda

nessun effetto

brilla

resta fredda. Equilibrio.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA spiega che il Thermal Infrared Sensor di Landsat 9 misura la temperatura della superficie terrestre e contiene un radiatore del criorefrigeratore, uno schermo terrestre, e un corpo nero più una vista dello spazio profondo per la calibrazione.

Qui la progettazione termica è lo strumento: TIRS misura il calore della Terra, che secondo la NASA aiuta a seguire e gestire l'uso dell'acqua, solo perché i suoi rivelatori sono mantenuti freddi e stabili.

Su Saving Planets: Termodinamica · Osservazione della Terra

Fonti: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: Thermal Control (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/thermal-control/): Capitolo gratuito della NASA sulla termica.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): Irraggiamento termico.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Strutture, meccanismi e carichi di lancio

Carichi di lancio, carichi di progetto quasi statici, requisiti di rigidezza e frequenza naturale, materiali, elementi dispiegabili e piattaforme con eredità di volo.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare un carico di lancio quasi statico.
- Calcolare una frequenza naturale.
- Spiegare i requisiti di rigidezza.
- Valutare eredità di volo contro progetto nuovo.

Concetti chiave

- Il lancio sottopone il veicolo ad accelerazione costante, vibrazioni, acustica e urti; la progettazione parte da fattori di carico quasi statici (spesso diversi g, valori da manuale).
- I lanciatori richiedono che la frequenza fondamentale del veicolo resti sopra un minimo per non accoppiarsi con il razzo.
- Per un semplice modello massa-molla, f = (1/2π)√(k/m): la rigidezza alza la frequenza, la massa la abbassa.
- Il nido d’ape in alluminio e i compositi danno rigidezza con poca massa; i meccanismi dispiegano pannelli, antenne e bracci.
- Riutilizzare una piattaforma già volata (eredità) riduce rischio e tempi.

Equazioni chiave

$$F = n\,m\,g_0$$

`F=n m g_0`

Carico quasi statico

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}$$

`f=(1)/(2π)/m`

Pulsazione naturale

$$\sigma = F/A$$

Tensione

$$k = \frac{EA}{L}$$

k=EA/L

Rigidezza assiale

Esempi svolti passo passo

Esempio 6.1 Trova il carico di progetto per un veicolo di 1000 kg a 6 g (valori di esempio).

1. 6 × 1000 × 9.80665.

Risposta: 58.8 kN.

Esempio 6.2 Uno strumento di 100 kg su un supporto di rigidezza 10^6 N/m (valori di esempio). Trova f.

1. $(1/2\pi)\sqrt{(10^6/100)}$.

Risposta: f = 15.9 Hz.

Esempio 6.3 Quanto deve essere rigido il supporto per raddoppiare f?

1. $f \propto \sqrt{k}$.

Risposta: 4 × 10^6 N/m (31.8 Hz).

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. f se la massa raddoppia?

   11.3 Hz.

2. Carico a 4 g per 500 kg?

   19.6 kN.

3. Perché una frequenza minima?

   Per evitare l’accoppiamento con la dinamica del lanciatore.

4. Che cos’è una piattaforma con eredità?

   Una piattaforma spaziale collaudata in volo.

Errori concettuali comuni

Mito: La resistenza è l’unico obiettivo.
In realtà: La rigidezza spesso guida il progetto.

Mito: Più pesante è più sicuro.
In realtà: La massa abbassa la frequenza e costa al lancio.

Mito: Gli elementi dispiegabili sono semplici.
In realtà: Sono frequenti punti singoli di guasto.

Flashcard

Carico quasi statico

g costante equivalente.

Pulsazione naturale

$(1/2\pi)\sqrt{(k/m)}$.

Nido d’ape

Pannello leggero e rigido.

Dispiegabile

Si apre in orbita.

Eredità

Progetto collaudato in volo.

Bus

Piattaforma del veicolo spaziale.

Quiz di autoverifica

1. 6 g su 1000 kg...

58.8 kN

6 kN

9.8 kN

588 kN

58.8 kN. nmg.

2. Esempio di f…

15.9 Hz

100 Hz

1 Hz

159 Hz

15.9 Hz. Formula.

3. Raddoppiare f richiede k ×…

4

2

√2

8

4. f ∝ √k.

4. L’eredità riduce…

il rischio

sempre la massa

della potenza

l’orbita

il rischio. Collaudato.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che Northrop Grumman ha progettato e costruito il veicolo Landsat 9 adattando la piattaforma LEOStar usata per Landsat 8, ha integrato entrambi gli strumenti e ha condotto le prove a livello di satellite.

Riutilizzare una piattaforma collaudata è una scelta progettuale che riduce il rischio e aiuta a mantenere continuo l'archivio Landsat, che secondo la NASA è il più lungo archivio satellitare continuo della superficie terrestre.

Su Saving Planets: Strutture aerospaziali · Osservazione della Terra

Fonti: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Lezioni gratuite del MIT.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): Rassegna tecnologica gratuita della NASA.

☐ **Ho finito questa unità**

Propulsione e bilancio del delta-v

Bilanci di Δv per inserzione in orbita, mantenimento della posizione, assetto e smaltimento; l'equazione del razzo per la massa di propellente; le fionde gravitazionali; e le scelte di propulsione.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Costruire un bilancio di Δv.
- Calcolare la massa di propellente dal Δv.
- Calcolare il Δv dal propellente.
- Spiegare le fionde gravitazionali.

Concetti chiave

- Un bilancio di Δv elenca ogni manovra: inserzione, mantenimento dell'orbita, controllo d'assetto, prevenzione delle collisioni e smaltimento, più un margine.
- Propellente necessario: m_p = m_0(1 − e^(−Δv/v_e)).
- I propulsori a monopropellente sono semplici; il bipropellente dà Isp più alto; l'elettrico dà Isp molto alto con spinta bassa.
- Le fionde gravitazionali prendono in prestito quantità di moto da un pianeta per cambiare velocità e direzione senza propellente.
- Il propellente residuo può estendere una missione oltre la sua vita di progetto.

Equazioni chiave

$$m_p = m_0 \left(1 - e^{-\Delta v / v_e}\right)$$

`m_p=m_0(1-e^-Δ v/v_e)`

Massa di propellente

$$\Delta v = v_e \ln \frac{m_0}{m_f}$$

`Δ v=v_e(m_0)/(m_f)`

Equazione del razzo

$$v_e = I_{sp} g_0$$

`v_e=I_spg_0`

Velocità di scarico

$$\Delta v_{tot} = \sum \Delta v_i (1 + M)$$

`Δ v_tot=Δ v_i(1+M)`

Bilancio con margine

Esempi svolti passo passo

Esempio 7.1 Un veicolo di 1000 kg necessita di 100 m/s con Isp 300 s (valori di esempio). Trova il propellente.

1. v_e = 2942 m/s.
2. m_p = 1000(1 − e^(−100/2942)).

Risposta: 33.4 kg.

Esempio 7.2 Quale Δv danno 50 kg di propellente?

1. 2942 ln(1000/950).

Risposta: 150.9 m/s.

Esempio 7.3 Bilancio: 60 m/s di correzione d’inserzione, 30 m/s di mantenimento della posizione, 10 m/s di smaltimento, 20% di margine.

1. 100 × 1.2.

Risposta: 120 m/s.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Propellente per 120 m/s?

   39.9 kg.

2. v_e per Isp 220 s?

   2157 m/s.

3. Che cosa fa risparmiare una fionda gravitazionale?

   Propellente a parità di Δv.

4. Perché prevedere il Δv di smaltimento?

   Per lasciare l'orbita in modo responsabile.

Errori concettuali comuni

Mito: Il propellente cresce linearmente con il Δv.
In realtà: Esponenzialmente.

Mito: Le fionde gravitazionali sono energia gratis.
In realtà: Si scambia quantità di moto con il pianeta.

Mito: Lo smaltimento è facoltativo.
In realtà: Protegge le orbite per gli altri.

Flashcard

Budget di Δv

Somma delle manovre.

Mantenimento della posizione

Mantenere un'orbita.

Monopropellente

Un solo propellente, semplice.

Bipropellente

Combustibile + ossidante.

Fionda gravitazionale

Spinta da sorvolo planetario.

Smaltimento

Rientro o orbita cimitero a fine vita.

Quiz di autoverifica

1. m_p per 100 m/s...

33.4 kg

100 kg

3.3 kg

334 kg

33.4 kg. Formula.

2. Δv da 50 kg…

151 m/s

50 m/s

500 m/s

15 m/s

151 m/s. Eq. del razzo.

3. Bilancio con margine…

120 m/s

100 m/s

80 m/s

200 m/s

120 m/s. ×1.2.

4. Il passaggio di Clipper vicino alla Terra a dic. 2026 è…

una fionda gravitazionale

un atterraggio

un rifornimento

un lancio

una fionda gravitazionale. NASA.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che Europa Clipper ha sorvolato Marte nel 2025 e ripasserà vicino alla Terra il 3 dic. 2026 per una fionda gravitazionale che le darà una spinta per il resto del viaggio verso Giove, dove compirà 49 sorvoli ravvicinati di Europa.

Le fionde gravitazionali fanno durare una dotazione fissa di propellente, lo stesso obiettivo del bilancio di Δv di questa unità per satelliti terrestri come Landsat 9, che secondo la NASA porta carburante per almeno 10 anni.

Su Saving Planets: Meccanica orbitale · Propulsione

Fonti: NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/) · NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Lezioni gratuite del MIT.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): Rassegna tecnologica gratuita della NASA.

☐ **Ho finito questa unità**

Sottosistema di determinazione e controllo d’assetto

Requisiti di puntamento dai carichi utili, sensori e attuatori, coppie di disturbo, bilanci di momento angolare ed errore di puntamento al suolo.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Ricavare un requisito di puntamento dalla risoluzione al suolo.
- Calcolare l’errore al suolo dall’errore angolare.
- Costruire un bilancio di momento angolare.
- Scegliere sensori e attuatori.

Concetti chiave

- I carichi utili fissano il puntamento: il pixel di un sensore d’immagine sottende un angolo di (pixel al suolo)/(quota).
- Errore al suolo ≈ quota × errore angolare (piccoli angoli).
- Sensori: sensori stellari, sensori solari, magnetometri, giroscopi; attuatori: ruote di reazione, attuatori magnetici, propulsori.
- I disturbi (gradiente di gravità, resistenza, pressione solare, magnetici) accumulano un momento angolare H = τt che le ruote devono immagazzinare.
- Il momento angolare viene scaricato con attuatori magnetici o propulsori prima che le ruote saturino.

Equazioni chiave

$$\theta = \frac{x}{h}$$

Angolo del pixel

$$e = h\theta$$

Errore al suolo

$$H = \tau t$$

H=τ t

Momento angolare accumulato

$$1'' = \frac{\pi}{648000}\ \mathrm{rad}$$

`1^=(π)/(648000) rad`

Secondo d’arco

Esempi svolti passo passo

Esempio 8.1 Landsat 9 ha pixel da 30 m da 705 km. Trova l’angolo per pixel.

1. 30/705000 rad.

Risposta: 4.26 × 10^{-5} rad = 8.78 secondi d’arco.

Esempio 8.2 Di quanto sposta l’immagine un errore di puntamento di 0.01° da 705 km?

1. 705,000 × 0.0001745.

Risposta: 123 m, circa quattro pixel.

Esempio 8.3 Un disturbo di 10^{-5} N·m agisce per un quarto di un’orbita di 98.9 minuti (valore di esempio). Trova il momento angolare.

1. 10^{-5} × 1483 s.

Risposta: 0.0148 N·m·s.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Angolo per un pixel da 15 m?

   4.39 secondi d’arco.

2. Errore al suolo per 0.001°?

   12.3 m.

3. Quale sensore dà l’assetto assoluto?

   Un sensore stellare.

4. Come si desaturano le ruote in LEO?

   Con attuatori magnetici o propulsori.

Errori concettuali comuni

Mito: La conoscenza del puntamento equivale al controllo.

In realtà: Sono bilanci separati.

Mito: Le ruote possono assorbire momento angolare all’infinito.

In realtà: Saturano.

Mito: I piccoli angoli non contano.

In realtà: La quota li moltiplica.

Flashcard

Precisione di puntamento

Errore di controllo.

Conoscenza del puntamento

Errore di misura.

Sensore stellare

Assetto dalle stelle.

Attuatore magnetico

Bobina che reagisce con il campo terrestre.

Gradiente di gravità

Coppia mareale.

Scarico del momento

Desaturare le ruote.

Quiz di autoverifica

1. Angolo del pixel Landsat...

8.78"

1°

0.1"

60"

8.78". 30/705 km.

2. 0.01° a 705 km…

123 m

12 m

1.2 km

1 m

123 m. hθ.

3. H = …

τt

Iα

τ/t

mv

τt. Momento angolare.

4. Sensore d’assetto assoluto…

sensore stellare

giroscopio

ruota

riscaldatore

sensore stellare. Stelle.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA indica per Landsat 9 una risoluzione spaziale di 30 m per le bande visibili e infrarosso a onda corta, 15 m pancromatica e 100 m termica, da 705 km.

Tenere fermo un pixel da 30 m da quella quota richiede un controllo al livello del secondo d’arco, motivo per cui le immagini Landsat si sovrappongono negli anni per rilevare i cambiamenti.

Su Saving Planets: Dinamica del volo e controlli · Osservazione della Terra

Fonti: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Lezioni gratuite del MIT.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): Rassegna tecnologica gratuita della NASA.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Comunicazioni e gestione dei dati

Volume di dati, velocità di downlink, bilancio di collegamento in decibel, attenuazione nello spazio libero, guadagno d’antenna, ed elaborazione e memoria di bordo.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare l’attenuazione nello spazio libero.
- Calcolare il guadagno di un’antenna parabolica.
- Costruire un semplice bilancio di collegamento.
- Stimare il volume di dati giornaliero.

Concetti chiave

- L’attenuazione nello spazio libero L = 20 $\log_{10}(4\pi d/\lambda)$ dB cresce con distanza e frequenza.
- Guadagno della parabola G = $\eta(\pi D/\lambda)^2$; parabole più grandi e frequenze più alte danno fasci più stretti e intensi.
- Bilancio di collegamento: potenza ricevuta = potenza trasmessa + guadagni − perdite (tutto in dB); il margine rispetto a quanto serve al ricevitore deve essere positivo.
- Volume di dati = immagini × bit per immagine; velocità × tempo di contatto deve superarlo.
- I computer di comando e gestione dati memorizzano i dati, eseguono il software e gestiscono i guasti.

Equazioni chiave

$$L = 20 \log_{10} \frac{4\pi d}{\lambda}$$

`L=20_10(4π d)/()`

Attenuazione nello spazio libero

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

`G=((π D)/())^2`

Guadagno della parabola

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L$$

`P_r=P_t+G_t+G_r-L`

Bilancio di collegamento (dB)

$$\lambda = c/f$$

Lunghezza d’onda

Esempi svolti passo passo

Esempio 9.1 Trova l’attenuazione in banda X (8.2 GHz) a 2000 km (c = 3 × 10⁸ m/s).

1. λ = 0.03659 m.
2. $20 \log_{10}(4\pi \times 2 \times 10^6/0.03659)$.

Risposta: L = 176.7 dB.

Esempio 9.2 Trova il guadagno di una parabola da 3 m a 8.2 GHz con η = 0.55 (valore di esempio).

1. $0.55 \times (\pi \times 3/0.03659)^2$.

Risposta: G = 45.6 dBi.

Esempio 9.3 Che cosa succede all’attenuazione se la distanza raddoppia?

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

Risposta: +6.0 dB (182.8 dB a 4000 km).

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Lunghezza d’onda a 8.2 GHz?

   3.66 cm.

2. Variazione di guadagno per una parabola da 6 m?

   +6.0 dB.

3. Scene di Landsat 9 al giorno?

   Circa 740.

4. Bit per pixel per l’OLI di Landsat 9?

14.

Errori concettuali comuni

Mito: I decibel si sommano come i watt.

In realtà: I dB si sommano per i prodotti.

Mito: Una frequenza più alta è sempre peggio.

In realtà: L'attenuazione sale ma sale anche il guadagno della parabola.

Mito: Il volume di dati è piccolo.

In realtà: Spesso guida il progetto delle stazioni di terra.

Flashcard

Attenuazione di tratta

Perdita per dispersione in dB.

Guadagno d'antenna

Concentrazione del fascio.

Margine di collegamento

Ricevuto meno richiesto.

Banda X

≈8 GHz.

C&DH

Comando e gestione dei dati.

Volume di dati

Bit al giorno.

Quiz di autoverifica

1. Attenuazione a 2000 km in banda X...

176.7 dB

100 dB

50 dB

250 dB

176.7 dB. Formula.

2. Guadagno di una parabola da 3 m...

45.6 dBi

10 dBi

90 dBi

3 dBi

45.6 dBi. Formula.

3. Distanza doppia...

+6 dB di perdita

+3 dB

×2 dB

nessuna

+6 dB di perdita. 20 log 2.

4. Il bilancio di collegamento usa...

somme in dB

solo prodotti di watt

volt

joule

somme in dB. Unità logaritmiche.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che Europa Clipper porta nove strumenti scientifici più un esperimento di gravità che usa il suo sistema di telecomunicazioni, e mostra la sua antenna ad alto guadagno da 10 piedi

(3 metri) installata nell’agosto 2023.

Più vicino a casa, la NASA riferisce che Landsat 9 registra dati a 14 bit e acquisisce più di 700 scene al giorno. Portare a terra così tanti dati ogni giorno è prima di tutto un problema di progettazione delle comunicazioni.

Su Saving Planets: Osservazione della Terra · Circuiti

Fonti: NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/) · NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Lezioni gratuite del MIT.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): Rassegna tecnologica gratuita della NASA.

☐ **Ho finito questa unità**

Affidabilità, prove e fine vita

Tassi di guasto e affidabilità, ridondanza, prove ambientali, calibrazione e verifica, operazioni e smaltimento responsabile.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare l’affidabilità da un tasso di guasto.
- Calcolare il beneficio della ridondanza.
- Descrivere le prove ambientali.
- Pianificare lo smaltimento a fine vita.

Concetti chiave

- Con un tasso di guasto costante λ, l’affidabilità R(t) = e^(−λt) e il tempo medio tra guasti è 1/λ.
- Due unità in parallelo: R = 1 − (1 − R_1)²; la ridondanza scambia massa e costo con affidabilità.
- «Prova come voli»: prove di vibrazione, acustiche, di urto, di vuoto termico ed elettromagnetiche prima del lancio.
- La calibrazione mantiene accurati i dati scientifici nel tempo; l’intercalibrazione con altri satelliti collega gli archivi.
- A fine vita i veicoli spaziali vanno deorbitati o spostati in un’orbita di smaltimento per limitare i detriti.

Equazioni chiave

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

`R(t)=e^- t`

Affidabilità

$$R_p = 1 - (1 - R)^2$$

`R_p=1-(1-R)^2`

Due in parallelo

$$MTBF = 1/\lambda$$

`MTBF=1/`

Tempo medio tra guasti

$$R_s = \prod R_i$$

`R_s= R_i`

Sistema in serie

Esempi svolti passo passo

Esempio 10.1 Un’unità ha λ = 10^{-5} all’ora (valore di esempio). Trova la sua affidabilità a 5 anni.

1. t = 43,800 h.
2. e^(−0.438).

Risposta: R = 0.645.

Esempio 10.2 Aggiungi un’unità ridondante in parallelo.

1. 1 − 0.355^2.

Risposta: R = 0.874.

Esempio 10.3 Trova l’MTBF.

1. $1/10^{-5}$ h.

Risposta: 100000 h = 11.4 anni.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Affidabilità a 10 anni di una sola unità?

   0.416.

2. Sistema in serie di 0.95 e 0.90?

   0.855.

3. Indica una prova ambientale prima del lancio.

   Vuoto termico o vibrazione.

4. Perché intercalibrare?

   Per mantenere coerenti gli archivi tra satelliti.

Errori concettuali comuni

Mito: La ridondanza è gratuita.

In realtà: Costa massa, potenza e denaro.

Mito: Le prove dimostrano rischio zero.

In realtà: Riducono il rischio.

Mito: Lo smaltimento è compito di qualcun altro.

In realtà: Si progetta fin dall'inizio.

Flashcard

Affidabilità

Probabilità di funzionare.

Tasso di guasto λ

Guasti all'ora.

Ridondanza

Unità di riserva.

Prova di vuoto termico

Condizioni spaziali a terra.

Calibrazione

Mantenere accurate le misure.

Smaltimento

Deorbitazione a fine vita.

Quiz di autoverifica

1. R a 5 anni...

0.645

0.95

0.5

0.1

0.645. e^(−0.438).

2. Coppia in parallelo...

0.874

0.645

0.416

1

0.874. 1 − 0.355².

3. MTBF...

100,000 h

10^{-5} h

1000 h

1 h

100,000 h. 1/λ.

4. Scopo del sorvolo dal basso di Landsat...

intercalibrazione

un rifornimento

attracco

smaltimento

intercalibrazione. NASA.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA riferisce che subito dopo il lancio Landsat 9 ha volato direttamente sotto Landsat 8 in un «sorvolo dal basso» unico nella missione, acquisendo 2396 immagini dal 12 al 16 novembre 2021, così che gli esperti di calibrazione potessero confrontare le misure dei due satelliti e garantire la continuità dei dati.

La NASA osserva che calibrazione di bordo e ridondanza aiutano Landsat 9 ad acquisire dati accurati e affidabili per tutta la vita della missione: ingegneria dell'affidabilità al servizio di un archivio planetario.

Su Saving Planets: Osservazione della Terra · Soluzioni

Fonti: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Lezioni gratuite del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Esercizi

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

1. Requisiti di missione e ingegneria dei sistemi
   4 esercizi
2. Orbite e ambiente spaziale
   4 esercizi
3. Generazione di potenza: pannelli solari
   4 esercizi
4. Accumulo di energia e bilancio di potenza
   4 esercizi
5. Controllo termico
   4 esercizi
6. Strutture, meccanismi e carichi di lancio
   4 esercizi
7. Propulsione e bilancio del delta-v
   4 esercizi
8. Sottosistema di determinazione e controllo d'assetto
   4 esercizi
9. Comunicazioni e gestione dei dati
   4 esercizi
10. Affidabilità, prove e fine vita
    4 esercizi

Il laboratorio (Spacecraft design lab)

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

Ogni laboratorio si svolge in una simulazione gratuita o in un foglio di calcolo, quindi non ci sono rischi fisici. Non costruire, caricare né modificare pacchi batteria 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: Bilanci di massa e potenza con margine

SETTIMANA 1

Obiettivo: Costruisci in un foglio di calcolo un bilancio di massa e potenza per un piccolo satellite di osservazione della Terra e applica i margini.

$$m_{alloc} = m_{est}(1 + M)$$

```
m_alloc=m_est(1+M)
```

Allocazione con margine

Procedimento

1. Elenca i sottosistemi: carico utile, struttura, potenza, termica, ADCS, propulsione, comunicazioni, C&DH.
2. Inserisci stime di massa di esempio per un totale di 800 kg e stime di potenza per un totale di 500 W.
3. Applica un margine del 20% a ciascun totale.
4. Ripeti il compromesso pesato a due opzioni dell'unità 1 e cambia i pesi.

Tabella dei dati

Bilancio	Stima	Con margine del 20%
Massa a secco	800 kg	960 kg
Potenza	500 W	600 W

Valori di esempio.

Calcolo di esempio

1. 800 × 1.2 = 960 kg.
2. 500 × 1.2 = 600 W.

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

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

Legame con il pianeta: NASA: Landsat 9 acquisisce 740 scene al giorno a fronte di un requisito di 400 scene. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

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

Laboratorio B: Calcolatore di periodo orbitale ed eclissi

SETTIMANA 2

Obiettivo: Calcola periodo ed eclissi nel caso peggiore per diverse quote di orbita bassa.

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

T=2π^3/μ

Periodo orbitale

Procedimento

1. Inserisci quote di 400, 705 e 1000 km.
2. Calcola a, T e orbite al giorno.
3. Calcola la frazione di eclissi e i minuti.
4. Confronta 705 km con i valori NASA per Landsat 9.

Tabella dei dati

Quota (km)	T (min)	Eclissi (min)
400	92.6	36.1
705	98.9	35.3
1000	105.1	34.9

Valori calcolati nel caso peggiore (Sole nel piano orbitale).

Calcolo di esempio

1. T(400) = 2π√(6778.1³/398600.4) = 92.6 min.
2. Eclissi(705) = 0.357 × 98.9 = 35.3 min.

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

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Legame con il pianeta: La NASA indica per Landsat 9 705 km e un periodo di 99 minuti. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

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

Laboratorio C: Celle solari in serie e in parallelo

SETTIMANA 3

Obiettivo: Collega sorgenti come batterie in PhET Circuit Construction Kit per vedere stringhe in serie e in parallelo, poi dimensiona pannelli in tutto il sistema solare.

$$A = \frac{P}{S \eta f_d}$$

`A=(P)/(S f_d)`

Area del pannello

Procedimento

1. In PhET Circuit Construction Kit, collega sorgenti in serie e in parallelo e annota tensione e corrente.
2. In un foglio di calcolo, calcola l’area del pannello per 500 W con η = 0.30 e f_d = 0.85.
3. Ripeti a 1, 1.524 e 5.2 UA.
4. Spiega perché le missioni verso i pianeti esterni richiedono pannelli enormi.

Tabella dei dati

Distanza (UA)	Area per 500 W (m²)
1	1.44
1.524	3.35
5.2	39.0

Valori d’esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. 500/(1361 × 0.3 × 0.85) = 1.44 m².
2. 1.44 × 5.2² = 39.0 m².

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

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi browser e foglio di calcolo.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc) · NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/)

Legame con il pianeta: NASA: i pannelli dispiegati di Europa Clipper superano i 30 metri di apertura. NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/)

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

Laboratorio D: Dimensionamento della batteria per l’eclissi

SETTIMANA 4

Obiettivo: Dimensiona batterie per diversi carichi durante un’eclissi di 35.3 minuti.

$$E = \frac{P_e t_e}{DoD}$$

`E=(P_et_e)/(DoD)`

Energia della batteria

Procedimento

1. Usa l’eclissi a 705 km del Laboratorio B.
2. Inserisci carichi di 300, 500 e 800 W.
3. Calcola l’energia della batteria al 30% di DoD e la massa a 150 Wh/kg.
4. Ripeti con il 20% di DoD e discuti la vita a cicli.

Tabella dei dati

Carico (W)	Batteria (Wh)	Massa (kg)
300	588	3.92
500	980	6.53
800	1568	10.45

Valori d’esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. 300 × 0.588 h/0.3 = 588 Wh.
2. 1568/150 = 10.45 kg.

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

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/)

Legame con il pianeta: La NASA elenca celle 18650 da 260 Wh/kg con eredità di volo sulla missione PACE. NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/)

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

Laboratorio E: Bilancio radiativo e dimensionamento del radiatore

SETTIMANA 5

Obiettivo: Esplora l’irraggiamento termico in PhET Blackbody Spectrum, poi calcola temperature di equilibrio e aree dei radiatori.

$$T = \left(\frac{\alpha S}{4\varepsilon\sigma}\right)^{1/4}$$

T=((α S)/(4σ))^1/4

Equilibrio di una sfera

Procedimento

1. In PhET Blackbody Spectrum, confronta gli spettri a 250, 290 e 6000 K.
2. Calcola le temperature della sfera per α/ε = 0.5, 1 e 2.
3. Calcola l’area del radiatore per 500 W a 250, 290 e 320 K con ε = 0.85.
4. Scegli una temperatura del radiatore e spiega il compromesso.

Tabella dei dati

Caso	Risultato
α/ε = 0.5	234.0 K
α/ε = 1	278.3 K
α/ε = 2	331.0 K
Radiatore a 250 K	2.66 m²
Radiatore a 320 K	0.99 m²

Valori calcolati.

Calcolo di esempio

1. T = 278.3 × 0.5^¼ = 234.0 K.
2. A = 500/(0.85σ × 320⁴) = 0.99 m².

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

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi browser e foglio di calcolo.

PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum) · NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: Thermal Control (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/thermal-control/)

Legame con il pianeta: NASA: il TIRS di Landsat 9 usa un radiatore del criorefrigeratore e un corpo nero di bordo. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

☐ **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio F: Bilancio del collegamento in downlink

SETTIMANA 11

Obiettivo: Costruisci un bilancio di collegamento in decibel e osserva come distanza e dimensione dell’antenna cambiano il margine.

$$L = 20 \log_{10} \frac{4\pi d}{\lambda}$$

`L=20_10(4π d)/()`

Attenuazione nello spazio libero

Procedimento

1. Usa f = 8.2 GHz e c = 3 × 10⁸ m/s.
2. Calcola l’attenuazione a 1000, 2000 e 4000 km.
3. Somma potenza trasmessa, guadagni di entrambe le antenne e altre perdite.
4. Trova la dimensione della parabola che ripristina il margine a 4000 km.

Tabella dei dati

Distanza (km)	Attenuazione (dB)
1000	170.7
2000	176.7
4000	182.8

Valori calcolati.

Calcolo di esempio

1. λ = 0.03659 m.
2. 20 $\log_{10}$(4π × 10⁶/0.03659) = 170.7 dB.

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

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/)

Legame con il pianeta: NASA: Europa Clipper porta un’antenna ad alto guadagno da 3 metri. NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/)

- [ ] **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. Alloca una stima di 500 kg con margine del 30%.
    1. 500 × 1.3.

    Risposta: 650 kg.

2. Trova il periodo di un’orbita circolare a 550 km.
    1. a = 6928.1 km.
    2. $T = 2\pi\sqrt{(a^3/\mu)}$.

    Risposta: 95.6 min.

3. Area del pannello per 1 kW a 1 UA, $\eta = 0.30$, $f_d = 0.85$?
    1. $1000/(1361 \times 0.3 \times 0.85)$.

    Risposta: 2.88 m^2.

4. Batteria per 400 W per 35 min al 25% di DoD?
    1. $400 \times 35/60/0.25$.

    Risposta: 933 Wh.

5. Radiatore per 300 W a 300 K, $\varepsilon = 0.9$?
    1. $300/(0.9\sigma \times 300^4)$.

    Risposta: 0.73 m^2.

Serie finale di esercizi (unità 1–10)

1. Frequenza naturale per $k = 4 \times 10^5$ N/m, m = 40 kg?
    1. $(1/2\pi)\sqrt{(10^4)}$.

Risposta: 15.9 Hz.

2. Propellente per 200 m/s su 800 kg con Isp 230 s?

    1. 800(1 − e^(−200/2255.5)).

    Risposta: 67.9 kg.

3. Errore al suolo per 0.005° da 600 km?

    1. 600,000 × 8.727 × 10⁻⁵.

    Risposta: 52.4 m.

4. Attenuazione a 1500 km, 8.2 GHz?

    1. 20 $\log_{10}$(4π × 1.5 × 10⁶/0.03659).

    Risposta: 174.2 dB.

5. Affidabilità per λ = 2 × 10⁻⁶ /h in 7 anni?

    1. e^(−0.1226).

    Risposta: 0.885.

6. Coppia in parallelo di unità da 0.885?

    1. 1 − 0.115².

    Risposta: 0.987.

Formulario

$$m_{alloc} = m_{est}(1+M),\ S = \sum w_i s_i$$

$$T = 2\pi\sqrt{a^3/\mu},\ v = \sqrt{\mu/a},\ f_e \approx \sin^{-1}(R_E/a)/\pi$$

$$P = S\eta A\cos\theta,\ S = 1361/r^2$$

$$E = P_e t_e/DoD,\ m_b = E/e_{sp}$$

$$Q = \varepsilon\sigma A T^4,\ T = (\alpha S/4\varepsilon\sigma)^{1/4}$$

$$F = nmg_0,\ f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}$$

$$m_p = m_0(1 - e^{-\Delta v/v_e})$$

$$\theta = x/h,\ e = h\theta,\ H = \tau t$$

$$L = 20\log_{10}(4\pi d/\lambda),\ G = \eta(\pi D/\lambda)^2$$

$$R = e^{-\lambda t},\ R_p = 1-(1-R)^2$$

Costanti

Costante	Valore
μ della Terra	398,600.4418 km^3/s^2
Raggio terrestre (equatoriale)	6378.137 km
Flusso solare a 1 UA (valore da manuale)	1361 W/m^2
Costante di Stefan–Boltzmann	$\sigma = 5.670374419 \times 10^{-8}$ $W/(m^2 \cdot K^4)$
Velocità della luce	299792458 m/s (3×10^8 usato negli esempi)
Gravità standard	$g_0 = 9.80665$ m/s^2

Fonte: NIST: CODATA value, Stefan–Boltzmann constant (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma)

Testi e simulazioni gratuiti

Usa queste lezioni gratuite, riferimenti NASA e simulazioni insieme al corso.

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Lezioni gratuite del MIT sull'ingegneria dei satelliti.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): Rassegna tecnologica gratuita della NASA.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/): Capitolo gratuito della NASA sulla potenza.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): Irraggiamento termico in modo interattivo.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Circuiti in modo interattivo.

Glossario

ADCS
Sottosistema di determinazione e controllo d'assetto.

Guadagno d'antenna
Concentrazione del fascio rispetto all'isotropo.

Bus
Piattaforma del veicolo che porta il carico utile.

C&DH
Comando e gestione dei dati.

Profondità di scarica
Frazione della capacità della batteria usata.

Eclissi
Tempo nell'ombra di un pianeta.

Emissività
Capacità di irraggiare calore.

Fine vita
Prestazioni dopo il degrado.

Fionda gravitazionale
Sorvolo planetario che cambia la velocità.

Eredità
Progetto collaudato in volo.

Bilancio di collegamento
Somma di guadagni e perdite in un collegamento radio.

Margine
Riserva oltre il fabbisogno.

Isolamento multistrato
Coperta termica che blocca l'irraggiamento.

Attenuazione di tratta
Perdita per dispersione del segnale.

Carico utile
Strumenti per cui esiste la missione.

Ridondanza
Hardware di riserva.

Requisito
Esigenza misurabile e verificabile.

Flusso solare
Potenza solare per unità di area.

Potenza specifica
Potenza per unità di massa.

Orbita eliosincrona
Orbita che attraversa alla stessa ora locale ogni giorno.

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	Parte dai requisiti, tiene bilanci coerenti con margini, controlla unità e ordini di grandezza, e spiega con parole semplici i compromessi tra sottosistemi.
3 · Competente	Risolve gli esercizi con errori occasionali su unità o margini.
2 · In sviluppo	Segue gli esempi svolti ma confonde potenza ed energia, o dB e valori lineari.
1 · Principiante	Inserisce numeri nelle formule senza requisito né bilancio; deve rivedere l'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

- Dinamica del volo e controlli AERO 420
- Trasmissione del calore AERO 440
- Propulsione AERO 410
- Tutti i corsi