Última actualización: November 1, 2026

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

Sobre este curso

Este curso gratuito tiene 10 unidades y 6 laboratorios. Son los totales reales, no un programa más largo recortado.

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

> Este es el esquema de un curso gratuito de autoestudio escrito por Saving Planets. No es un curso universitario, no otorga créditos académicos y ninguna institución participa.
>
> Su alcance sigue un proyecto final aeroespacial de un semestre de último año. Se basa en el enfoque concebir-diseñar-implementar-operar de MIT 16.83X Space Systems Engineering (gratis en MIT OpenCourseWare) y en el NASA Systems Engineering Handbook, que enlazamos donde ayudan. Ni el MIT ni la NASA respaldan esta página.
>
> Lo que añadimos: dos itinerarios paralelos (un pequeño dron eléctrico o un CubeSat 3U), cada unidad vinculada a trabajo real con una fuente pública citada, cada número de la página recalculado con un script de comprobación antes de publicarse, y cada práctica en una hoja de cálculo gratuita.
>
> Trabájalo en orden, solo o en equipo. Cada unidad tiene objetivos, ideas clave, ecuaciones, ejemplos paso a paso, práctica con respuestas completas, errores comunes, tarjetas y un cuestionario. Tu progreso se guarda solo en este navegador.

Cómo ayuda este curso a salvar el planeta

Los equipos de proyecto final construyen los satélites y aeronaves que miden y protegen el planeta: los CubeSats estudiantiles vuelan gracias al CubeSat Launch Initiative de la NASA, y pequeños satélites como PREFIRE estudian cómo el Ártico pierde calor.

En el lado de las aeronaves, el Sustainable Flight National Partnership de la NASA busca mejoras de eficiencia energética del 25–30%. Cada unidad termina con una sección breve con fuentes. Los valores que no provienen de una fuente se marcan como valores de ejemplo o de libro.

Para docentes

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

- Esta página es el curso completo: 10 unidades y 6 laboratorios (AERO 490).
- Calcula 15 semanas, unas 6 a 9 horas por semana, incluidas las semanas de laboratorio.
- Sigue el calendario de 15 semanas. Lee la unidad, haz la práctica en papel y luego abre la respuesta. En una semana de laboratorio, haz el laboratorio o la versión en casa.
- Una comprobación es un número o un resultado de código en la página que un script vuelve a calcular antes de publicar. El número que ves y el recalculado tienen que coincidir.
- Usa Imprimir esta página, o descarga la guía de estudio en PDF. La hoja de fórmulas está cerca del final.
- Pregunta: ¿cómo ayuda esta unidad a las personas y al planeta? Cada unidad tiene un recuadro verde con un dato y su fuente.
- Copia la plantilla de guía docente y escribe el nombre de tu clase, el tiempo que tienes y las preguntas que harás. Abrir la plantilla de guía docente

Antes de empezar

Requisitos previos

- Aviónica e ingeniería de sistemas: requisitos, fiabilidad y verificación.
- Diseño de naves espaciales: presupuestos de potencia, térmico y de enlace.
- Actuaciones de aeronaves: sustentación, resistencia, alcance y ascenso.
- Estructuras aeroespaciales: esfuerzos, factores de seguridad y márgenes.

Cómo estudiar

- Lleva un único cuaderno de diseño u hoja de cálculo del que salgan todos los números.
- Vincula cada decisión de diseño a un requisito.
- Cierra los presupuestos con margen antes de añadir detalle.
- Haz revisiones semanales breves, incluso si trabajas solo.
- Escribe sobre la marcha: cada unidad añade una sección a tu informe final.
- Haz cada ejercicio en papel antes de abrir la respuesta, y repite los cuestionarios unos días después.

Qué necesitas

- Software de hoja de cálculo (sirve cualquiera gratuito), o Python.
- El NASA Systems Engineering Handbook gratuito en un navegador web.
- Software de presentaciones gratuito para tus revisiones de diseño.
- Una calculadora.

Calendario sugerido de 15 semanas

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

Semana	Unidad	Temas	Lectura
1	Misión, partes interesadas y requisitos	Misión y requisitos; Práctica A	NASA SE Handbook
2	Generación y selección de conceptos	Selección del concepto; Práctica B	MIT 16.83X
3	Itinerario de aeronave: dimensionamiento de peso y alcance	Dimensionamiento de peso de la aeronave	NASA SFNP
4	Itinerario de aeronave: dimensionamiento de peso y alcance	Alcance y bucle de dimensionamiento; Práctica C	MIT 16.83X
5	Itinerario de aeronave: carga alar y potencia	Carga alar y potencia	NASA SFNP
6	Itinerario CubeSat: dimensionamiento y órbita	Dimensionamiento y órbita del CubeSat; Práctica D	NASA PREFIRE
7	Itinerario CubeSat: presupuestos de potencia y de enlace	Presupuestos de potencia y enlace; Práctica E; práctica para el parcial	NASA SST SOA
8	Comprobaciones estructurales y térmicas	Comprobaciones estructurales y térmicas	MIT 16.83X
9	Coste, calendario y riesgo	EDT y calendario	NASA SE Handbook
10	Coste, calendario y riesgo	Valor ganado y riesgo; Práctica F	NASA SE Handbook
11	Prototipo, pruebas y verificación	Planificación del prototipo	MIT 16.83X
12	Prototipo, pruebas y verificación	Pruebas	NASA CSLI
13	Prototipo, pruebas y verificación	Cierre de la verificación	NASA SE Handbook
14	Revisiones de diseño e informe final	Revisión crítica de diseño	MIT 16.83X

Semana	Unidad	Temas	Lectura
15	Revisiones de diseño e informe final	Informe final; práctica final	NASA SE Handbook

Tu progreso

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

Unidades

Misión, partes interesadas y requisitos

Elegir un itinerario, definir la misión, identificar a las partes interesadas, redactar requisitos verificables y fijar asignaciones con margen.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Redactar una declaración de misión de una frase.
- Enumerar las partes interesadas y sus necesidades.
- Redactar requisitos verificables.
- Calcular el margen frente a una asignación.

Conceptos clave

- Elige un itinerario: un pequeño dron eléctrico que lleve un sensor, o un CubeSat 3U que observe la Tierra.
- Una declaración de misión dice quién necesita qué y por qué; los requisitos la hacen medible.
- Las partes interesadas incluyen usuarios, financiadores, autoridades de lanzamiento o del espacio aéreo y el propio equipo.
- Cada requisito tiene un número, una unidad y un método de verificación (prueba, análisis, inspección o demostración).
- Las asignaciones llevan margen desde el principio, porque las estimaciones crecen a medida que madura el diseño.

Ecuaciones clave

$$\text{Margin} = \frac{A - E}{E}$$

```
Margin=(A-E)/(E)
```

Margen de la asignación sobre la estimación

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

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

Asignación con margen

$$m_{3U} \approx 3 \times 1.33\ \text{kg}$$

Masa admitida de un 3U (valor de libro)

$$\sum w_i = 1$$

`w_i=1`

Los pesos suman uno

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 1.1 Un CubeSat 3U tiene una asignación de 4.0 kg (valor de libro) y una estimación de 3.4 kg. ¿Margen?

1. (4.0 − 3.4)/3.4.

Respuesta: 17.6%.

Ejemplo 1.2 El sensor de un dron se estima en 0.8 kg. Asigna con un 25% de margen (valores de ejemplo).

1. 0.8 × 1.25.

Respuesta: 1.0 kg.

Ejemplo 1.3 Redacta un requisito verificable de autonomía para el dron.

1. Número, unidad, método.

Respuesta: «El dron deberá volar al menos 30 minutos a 15 m/s, verificado mediante prueba en vuelo».

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Margen si la estimación crece a 3.8 kg?

   5.26%.

2. ¿Tres unidades de 1.33 kg (valor de libro)?

   3.99 kg, unos 4 kg.

3. Nombra cuatro partes interesadas de un CubeSat estudiantil.

Por ejemplo: los usuarios científicos, la universidad, el proveedor de lanzamiento y el regulador de radio.

4. ¿Es verificable «el CubeSat deberá ser fiable»?

   No; añade un número y un método.

Ideas erróneas comunes

Mito: Los requisitos describen el diseño.

En realidad: Expresan necesidades, no soluciones.

Mito: El margen puede añadirse después.

En realidad: Es más barato mantenerlo desde el principio.

Mito: Basta con una parte interesada.

En realidad: Las partes interesadas olvidadas causan sorpresas tardías.

Tarjetas de estudio

Declaración de misión

Quién necesita qué y por qué.

Parte interesada

Cualquiera con una necesidad o voz.

Requisito

Necesidad verificable.

Asignación

Parte presupuestada.

Margen

Reserva sobre la estimación.

Itinerario

Camino de proyecto dron o CubeSat.

Cuestionario de autoevaluación

1. Margen de masa...

17.6%

15%

0.6%

85%

17.6%. (4.0 − 3.4)/3.4.

2. 0.8 kg + 25%...

1.0 kg

0.85 kg

1.25 kg

0.6 kg

1.0 kg. Multiplica.

3. Métodos de verificación...

prueba, análisis, inspección, demostración

adivinar, esperar, aguardar, enviar

coste, calendario, riesgo, alcance

PDR, CDR, TRR, FRR

prueba, análisis, inspección, demostración. Cuatro métodos.

4. La declaración de misión dice...

quién necesita qué y por qué

el tamaño de los tornillos

solo el presupuesto

solo la fecha de lanzamiento

quién necesita qué y por qué. Propósito.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El CubeSat Launch Initiative de la NASA ofrece oportunidades a CubeSats construidos por instituciones educativas y organizaciones sin ánimo de lucro de EE. UU., incluidos museos y centros de ciencia, para volar en próximos lanzamientos; la NASA dice haber lanzado más de 150 CubeSats.

La NASA dice que su convocatoria de oportunidades de asociación suele publicarse cada agosto con propuestas en noviembre, así que un proyecto final puede plantearse como una propuesta real.

En Saving Planets: Diseño de naves espaciales · Aviónica e ingeniería de sistemas

Fuentes: NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manual gratuito de la NASA.
- NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/): NASA CSLI.

☐ **Terminé esta unidad**

Generación y selección de conceptos

Lluvia de ideas, cuadros morfológicos, matrices de Pugh, matrices de decisión ponderadas y sensibilidad a los pesos.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Generar varios conceptos.
- Construir un cuadro morfológico.
- Puntuar conceptos en una matriz ponderada.
- Comprobar la sensibilidad a los pesos.

Conceptos clave

- Genera muchos conceptos antes de juzgar ninguno; primero cantidad, luego calidad.
- Un cuadro morfológico enumera opciones para cada función y las combina en conceptos.
- Una matriz de Pugh compara conceptos con una referencia usando +, 0 y −.
- Una matriz de decisión ponderada multiplica las puntuaciones por los pesos y las suma.
- Si pequeños cambios en los pesos cambian el ganador, la decisión necesita más datos.

Ecuaciones clave

$$S = \sum w_i s_i$$

`S= w_is_i`

Puntuación ponderada

$$N = \prod n_i$$

`N= n_i`

Combinaciones morfológicas

$$P = n_+ - n_-$$

`P=n_+-n_-`

Puntuación neta de Pugh

$$\sum w_i = 1$$

$w_i=1$

Pesos normalizados

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 2.1 El concepto A puntúa 6 (coste), 9 (desempeño), 5 (riesgo); B puntúa 8, 6, 8. Pesos 0.3, 0.5, 0.2. ¿Ganador?

1. A = 1.8 + 4.5 + 1.0 = 7.3.
2. B = 2.4 + 3.0 + 1.6 = 7.0.

Respuesta: A, 7.3 frente a 7.0.

Ejemplo 2.2 Cambia los pesos a 0.4, 0.3, 0.3.

1. A = 2.4 + 2.7 + 1.5 = 6.6.
2. B = 3.2 + 1.8 + 2.4 = 7.4.

Respuesta: Gana B: la elección es sensible a los pesos.

Ejemplo 2.3 Un cuadro tiene 3 opciones de potencia, 2 estructuras y 4 sensores. ¿Combinaciones?

1. 3 × 2 × 4.

Respuesta: 24.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Pugh: 4 más, 1 menos. ¿Neto?

   +3.

2. ¿Combinaciones para 2 × 3 × 3 × 2?

   36.

3. ¿Por qué comprobar la sensibilidad a los pesos?

   Para ver si el ganador es robusto.

4. ¿Por qué una lluvia de ideas antes de puntuar?

   Juzgar pronto mata las buenas ideas.

Ideas erróneas comunes

Mito: La puntuación más alta siempre acierta.

En realidad: Comprueba la sensibilidad y las hipótesis.

Mito: Los pesos son objetivos.

En realidad: Codifican un juicio.

Mito: Un concepto basta.

En realidad: Compara varios.

Tarjetas de estudio

Cuadro morfológico

Opciones por función.

Matriz de Pugh

Comparar con una referencia.

Referencia

Concepto de referencia.

Matriz ponderada

Puntuaciones por pesos.

Sensibilidad

Cómo cambian los resultados con las entradas.

Selección

Elegir un concepto.

Cuestionario de autoevaluación

1. Puntuación de A...

7.3

7.0

6.6

20

7.3. Suma ponderada.

2. Puntuación de B...

7.0

7.3

7.4

22

7.0. Suma ponderada.

3. Tras reponderar...

gana B

gana A

empate

ninguno

gana B. 7.4 > 6.6.

4. Combinaciones...

24

9

12

48

24. 3 × 2 × 4.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El Sustainable Flight National Partnership de la NASA trabaja en tres áreas: tecnologías avanzadas de vehículos, operaciones eficientes de aerolíneas y combustibles de aviación sostenibles.

Sopesar opciones entre áreas así es un problema de selección de conceptos: los pesos correctos dependen de lo que valoran las partes interesadas, incluidas las emisiones.

En Saving Planets: Soluciones · Actuaciones de aeronaves

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

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiales gratuitos del proyecto final del MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manual gratuito de la NASA.

Ver la clase

Session 4: System Architecture and Concept Generation (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/resources/session-4-system-architecture-and-concept-generation/) (en inglés)

MIT 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015), MIT OpenCourseWare. Licencia: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condiciones de uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

☐ **Terminé esta unidad**

Itinerario de aeronave: dimensionamiento de peso y alcance

Estimación del peso al despegue a partir de fracciones de peso, la ecuación de alcance de Breguet y cómo las mejoras de eficiencia cambian alcance y combustible.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Estimar el peso al despegue a partir de fracciones.
- Aplicar la ecuación de alcance de Breguet.
- Mostrar cómo L/D cambia el alcance.
- Iterar un bucle de dimensionamiento.

Conceptos clave

- El peso al despegue es la carga útil dividida entre uno menos las fracciones de vacío y de energía.
- Si las fracciones de vacío y de energía se acercan a 1, el diseño no cierra.
- Para aviones a reacción, el alcance de Breguet es (V/c)(L/D) ln(W_i/W_f).
- El alcance es proporcional a L/D, así que una mejora del 30% en L/D da un 30% más de alcance con la misma fracción de combustible.
- El dimensionamiento es iterativo: estimar, calcular, actualizar fracciones y repetir hasta que el peso converja.

Ecuaciones clave

$$W_0 = \frac{W_{pay}}{1 - W_e/W_0 - W_f/W_0}$$

`W_0=_pay1-W_e/W_0-W_f/W_0`

Peso al despegue

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

`R=V/cL/D(W_i)/(W_f)`

Alcance de Breguet (reactor)

$$R \propto L/D$$

El alcance escala con L/D

$$W = mg$$

$$W=mg$$

Peso

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 3.1 Un dron lleva 1 kg de carga útil con fracción de vacío 0.5 y fracción de batería 0.3 (valores de ejemplo). ¿Masa al despegue?

1. $1/(1 - 0.5 - 0.3)$.

Respuesta: 5 kg.

Ejemplo 3.2 Un avión de transporte vuela a 230 m/s con c = 0.6 por hora, L/D = 17 y W_i/W_f = 1.25 (valores de libro). ¿Alcance?

1. $c = 1.667 \times 10^{-4}\ s^{-1}$.
2. $R = (230/1.667 \times 10^{-4}) \times 17 \times \ln 1.25 = 1.38 \times 10^{6} \times 17 \times 0.2231$.

Respuesta: Unos 5235 km.

Ejemplo 3.3 Aumenta L/D un 30%.

1. El alcance escala con L/D.

Respuesta: Unos 6805 km.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Masa al despegue si la fracción de batería sube a 0.35?

   6.67 kg.

2. ¿Peso del dron de 5 kg?

   49.0 N.

3. ¿Por qué las fracciones no pueden sumar 1?

   No quedaría nada para la carga útil.

4. ln 1.25?

   0.223.

Ideas erróneas comunes

Mito: Más batería siempre significa más alcance.

En realidad: También sube el peso; importa la fracción.

Mito: Breguet sirve para aviones eléctricos.

En realidad: Las baterías no se aligeran; usa una forma energética.

Mito: Una pasada basta.

En realidad: Iterar hasta que el peso converja.

Tarjetas de estudio

Fracción de vacío

Peso en vacío sobre peso al despegue.

Fracción de combustible

Combustible sobre peso al despegue.

Breguet

Ecuación del alcance.

L/D

Relación sustentación/resistencia.

TSFC

Consumo específico de combustible por empuje.

Bucle de dimensionamiento

Iterar hasta converger.

Cuestionario de autoevaluación

1. Masa al despegue del dron...

5 kg

2 kg

1.25 kg

10 kg

5 kg. 1/0.2.

2. Alcance del avión de transporte...

≈ 5235 km

≈ 523 km

≈ 52,000 km

≈ 1380 km

≈ 5235 km. Breguet.

3. Con +30% de L/D...

≈ 6805 km

≈ 5235 km

≈ 4027 km

≈ 10,470 km

≈ 6805 km. × 1.3.

4. El alcance escala con...

L/D

c

W_f

la resistencia

L/D. Breguet.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

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

Su pieza central es un demostrador X-plane a escala real que prueba un diseño aerodinámico ultraeficiente, con primer vuelo no antes de finales de 2026; una mayor L/D es justo la palanca que premia la ecuación de Breguet de esta unidad.

En Saving Planets: Actuaciones de aeronaves · Soluciones

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

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiales gratuitos del proyecto final del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

Itinerario de aeronave: carga alar y potencia

Dimensionamiento por restricciones: carga alar a partir de la velocidad de pérdida, superficie alar y potencia de ascenso para una pequeña aeronave eléctrica.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Hallar la carga alar a partir de la velocidad de pérdida.
- Dimensionar la superficie alar.
- Calcular la potencia de ascenso.
- Dibujar un diagrama de restricciones sencillo.

Conceptos clave

- La velocidad de pérdida fija la carga alar máxima: W/S = ½ρV_s²C_Lmax.
- La superficie alar resulta del peso dividido por la carga alar.
- La potencia en el eje para ascender cubre la resistencia (W V/(L/D)) más el término de ascenso (W × velocidad de ascenso), dividido por la eficiencia propulsiva.
- Cada requisito traza una línea en un gráfico de W/S frente a potencia/peso; el punto de diseño está en la región que los cumple todos.
- Los drones pequeños vuelan a bajos números de Reynolds, así que comprueba los datos de perfiles a pequeña escala.

Ecuaciones clave

$$\frac{W}{S} = \frac{1}{2}\rho V_s^2 C_{L,max}$$

`W/S=12ρ V_s^2C_L,max`

Carga alar de pérdida

$$S = \frac{W}{W/S}$$

`S=(W)/(W/S)`

Superficie alar

$$P = \frac{W}{\eta}\left(\frac{V}{L/D} + RC\right)$$

`P=(W)/()((V)/(L/D)+RC)`

Potencia de ascenso

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

q=12ρ V^2

Presión dinámica

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 4.1 Pérdida a 12 m/s, C_Lmax = 1.2, nivel del mar. ¿Carga alar?

1. ½ × 1.225 × 144 × 1.2.

Respuesta: 105.8 N/m².

Ejemplo 4.2 ¿Superficie alar para el dron de 5 kg?

1. 49.03/105.84.

Respuesta: 0.463 m².

Ejemplo 4.3 ¿Potencia de ascenso a 15 m/s, L/D = 10, ascenso de 2 m/s, η = 0.7?

1. 49.03 × (1.5 + 2) = 171.6 W.
2. 171.6/0.7.

Respuesta: 245 W.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Carga alar para una pérdida a 10 m/s?

   73.5 N/m².

2. ¿Potencia sin el término de ascenso?

   105.1 W.

3. ¿Presión dinámica a 15 m/s?

137.8 Pa.

4. ¿Por qué la pérdida fija un W/S máximo?

   Un W/S mayor necesita una velocidad de pérdida mayor.

Ideas erróneas comunes

Mito: Las alas más grandes siempre son mejores.

En realidad: Añaden peso y resistencia.

Mito: La potencia de ascenso es pequeña.

En realidad: Puede dominar en drones pequeños.

Mito: $\eta = 1$.

En realidad: Las hélices y los motores pierden energía.

Tarjetas de estudio

Carga alar

Peso por superficie alar.

C_Lmax

Coeficiente de sustentación máximo.

Diagrama de restricciones

Requisitos en un gráfico.

Tasa de ascenso

Velocidad vertical.

Rendimiento propulsivo

Fracción de potencia útil.

Velocidad de pérdida

Velocidad estable mínima.

Cuestionario de autoevaluación

1. W/S...

105.8 N/m²

88.2

1058

10.6

105.8 N/m². ½ρV²C_L.

2. Superficie alar...

0.463 m²

4.63 m²

0.0463 m²

1 m²

0.463 m². W/(W/S).

3. Potencia de ascenso...

245 W

171.6 W

49 W

490 W

245 W. Divide por η.

4. El punto de diseño está...

donde se cumplen todas las restricciones

en cualquier línea

en el origen

fuera

donde se cumplen todas las restricciones. Región factible.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El Sustainable Flight National Partnership de la NASA también apunta a operaciones eficientes de aerolíneas y trayectorias óptimas, donde las decisiones de potencia y ascenso se cruzan con el consumo de combustible.

Pequeños drones eléctricos bien dimensionados como en esta unidad ya se usan para inspeccionar cultivos, bosques y costas. Los valores de esta unidad son valores de ejemplo.

En Saving Planets: Actuaciones de aeronaves · Aerodinámica I

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

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiales gratuitos del proyecto final del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

Itinerario CubeSat: dimensionamiento y órbita

Formatos de CubeSat, masa admitida, periodo orbital, pasadas por día y fracción de eclipse en órbita terrestre baja.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Dimensionar el presupuesto de masa de un CubeSat 3U.
- Calcular el periodo orbital.
- Calcular las órbitas por día.
- Calcular el eclipse en el peor caso.

Conceptos clave

- Los CubeSats vienen en unidades (U) de 10 cm; un 3U mide unos 10 × 10 × 34 cm (valor de libro).
- La masa admitida es de unos 1.33 kg por U (valor de libro); confírmala con el proveedor de lanzamiento.
- El periodo orbital depende solo del semieje mayor: T = 2π√(a³/μ).
- En el peor caso (Sol en el plano de la órbita), la fracción de eclipse es asin(R_E/a)/π.
- Las órbitas bajas decaen más rápido por la resistencia; la mayoría de los CubeSats estudiantiles reentran en pocos años.

Ecuaciones clave

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

T=2π^3/μ

Periodo orbital

$$f_e = \frac{1}{\pi}\sin^{-1}\frac{R_E}{a}$$

f_e=(1)/(π)^-1(R_E)/(a)

Fracción de eclipse en el peor caso

$$n = 1440/T$$

n=1440/T

Órbitas por día (T en min)

$$a = R_E + h$$

a=R_E+h

Semieje mayor

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 5.1 ¿Periodo a 500 km de altitud?

1. a = 6878.1 km.
2. T = 2π√(6878.1³/398,600.4).

Respuesta: 94.6 min.

Ejemplo 5.2 ¿Órbitas por día?

1. 1440/94.6.

Respuesta: 15.2.

Ejemplo 5.3 ¿Eclipse en el peor caso?

1. asin(6378.1/6878.1)/π = 0.378.
2. 0.378 × 94.6.

Respuesta: 35.8 min.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Masa admitida de un 3U a 1.33 kg/U?

   3.99 kg.

2. ¿Tiempo iluminado por órbita?

   58.9 min.

3. ¿El periodo depende de la masa del CubeSat?

No.

4. ¿Por qué decaen las órbitas bajas?

   Resistencia atmosférica.

Ideas erróneas comunes

Mito: Los satélites más pesados orbitan más despacio.

En realidad: El periodo depende solo de a.

Mito: El eclipse siempre es del 50%.

En realidad: Depende de la altitud y del ángulo del Sol.

Mito: Usar la altitud en la ley de Kepler.

En realidad: Usa a = R_E + h.

Tarjetas de estudio

CubeSat

Satélite pequeño estándar en unidades de 10 cm.

3U

CubeSat de tres unidades.

Período

Tiempo por órbita.

Fracción de eclipse

Parte de la órbita en sombra.

Semieje mayor

R_E + h para órbitas circulares.

Decaimiento

Pérdida de órbita por resistencia.

Cuestionario de autoevaluación

1. Periodo...

94.6 min

90 min

100 min

84.4 min

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

2. Órbitas por día...

15.2

14.5

16

24

15.2. 1440/T.

3. Eclipse...

35.8 min

47 min

20 min

0 min

35.8 min. 0.378 × 94.6.

4. Masa de un 3U...

≈ 4 kg

≈ 1.33 kg

≈ 12 kg

≈ 40 kg

≈ 4 kg. 3 × 1.33.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA dice que PREFIRE usa un par de diminutos satélites, CubeSats lanzados en mayo de 2024, para medir una parte poco estudiada de la energía radiante que emite la Tierra, en busca de pistas sobre la pérdida de hielo marino, el deshielo de los casquetes y el calentamiento del Ártico.

La NASA llama al Ártico la región que se comporta como el termostato del planeta, expulsando el exceso de energía recibido en los trópicos; por eso importa allí un par de pequeños satélites.

En Saving Planets: Observación de la Tierra · Mecánica orbital

Fuentes: NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/): NASA PREFIRE.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): Informe gratuito de la NASA.

☐ **Terminé esta unidad**

Itinerario CubeSat: presupuestos de potencia y de enlace

Producción de los paneles solares, potencia media orbital, dimensionamiento de la batería para el eclipse, pérdida de trayecto de un enlace UHF y volumen de datos diario.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular la producción de los paneles al sol.
- Calcular la potencia media orbital.
- Dimensionar una batería para el eclipse.
- Estimar la pérdida de trayecto y los datos por día.

Conceptos clave

- La potencia de los paneles es flujo solar × eficiencia de las células × área × cos(ángulo).
- La generación media orbital se reduce con la fracción de eclipse (y en la práctica con el apuntamiento).
- La batería cubre la carga durante el eclipse; limitar la profundidad de descarga alarga su vida en ciclos.
- La pérdida en espacio libre crece como $20 \log_{10}(4\pi d/\lambda)$; las bandas UHF de radioaficionado son comunes en CubeSats estudiantiles.
- El volumen de datos por día es tasa de bits × tiempo de pasada × número de pasadas.

Ecuaciones clave

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

`P=S Aθ`

Producción de los paneles

$$\bar{P} = P(1 - f_e)$$

`P=P(1-f_e)`

Generación media orbital

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

`E=(P_et_e)/(DoD)`

Capacidad de la batería

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

L=20_10(4π d)/()

Pérdida de trayecto

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 6.1 Paneles de 0.06 m² con células del 28% miran al Sol (valores de ejemplo). ¿Producción?

1. 1361 × 0.28 × 0.06.

Respuesta: 22.9 W.

Ejemplo 6.2 ¿Media orbital con la fracción de eclipse de 0.378 de la unidad 5?

1. 22.86 × 0.622.

Respuesta: 14.2 W.

Ejemplo 6.3 ¿Batería para 8 W durante un eclipse de 35.8 min con un 30% de profundidad de descarga?

1. 8 × 35.75/60 = 4.77 Wh.
2. 4.77/0.3.

Respuesta: 15.9 Wh.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Pérdida de trayecto a 437 MHz en 1000 km?

   λ = 0.686 m; L = 145.3 dB.

2. ¿Datos por día a 9600 bit/s, cuatro pasadas de 10 minutos?

   23.04 Mbit = 2.88 MB.

3. ¿Producción con un ángulo solar de 60°?

11.4 W.

4. ¿Por qué limitar la profundidad de descarga?

   Más ciclos antes de que la batería se desgaste.

Ideas erróneas comunes

Mito: La potencia solar es constante a lo largo de la órbita.

En realidad: El eclipse y el apuntamiento la reducen.

Mito: Batería = energía del eclipse.

En realidad: Divide por la DoD.

Mito: Más bits por segundo es gratis.

En realidad: Necesita más margen de enlace.

Tarjetas de estudio

Potencia media en órbita

Generación en una órbita completa.

DoD

Profundidad de descarga.

Pérdida de trayecto

Pérdida por dispersión.

UHF

Banda de frecuencia ultraalta.

Pasada

Tiempo en que una estación terrena ve el satélite.

Volumen de datos

Bits descargados por día.

Cuestionario de autoevaluación

1. Producción de los paneles...

22.9 W

2.29 W

229 W

38 W

22.9 W. SηA.

2. Media orbital...

14.2 W

22.9 W

8.6 W

11.4 W

14.2 W. × 0.622.

3. Batería...

15.9 Wh

4.77 Wh

47.7 Wh

8 Wh

15.9 Wh. ÷ 0.3.

4. Pérdida de trayecto...

145.3 dB

125 dB

165 dB

14.5 dB

145.3 dB. 20 $\log_{10}(4\pi d/\lambda)$.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El informe de la NASA sobre naves pequeñas dice que cuando se publicó su primera edición en 2013 se habían lanzado en todo el mundo 247 CubeSats y otras 105 naves pequeñas de menos de 50 kg, menos del 2% de la masa lanzada a órbita.

La NASA dice que desde entonces las naves pequeñas se han convertido en el principal medio de acceso al espacio para instituciones comerciales, gubernamentales, privadas y académicas, así que presupuestos de potencia y enlace cuidadosos sostienen hoy una gran parte de la observación de la Tierra.

En Saving Planets: Diseño de naves espaciales · Observación de la Tierra

Fuentes: NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): Informe gratuito de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiales gratuitos del proyecto final del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

Comprobaciones estructurales y térmicas

Factores de carga, márgenes de seguridad, cargas de lanzamiento y vuelo, y una primera estimación de equilibrio térmico para ambos itinerarios.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular una carga de diseño a partir de un factor de carga.
- Calcular un margen de seguridad.
- Estimar la temperatura de equilibrio.
- Decidir qué necesita análisis detallado.

Conceptos clave

- Las cargas de diseño son el peso por un factor de carga (lanzamiento o maniobra), por un factor de seguridad.
- El margen de seguridad MS = admisible/(FS × aplicada) − 1 debe ser positivo.
- El aluminio 6061-T6 fluye cerca de 276 MPa (valor de libro), una elección común tanto para drones como para estructuras de CubeSat.
- Una primera estimación térmica equilibra la luz solar absorbida con el infrarrojo emitido; para α = ε un cuerpo iluminado cerca de la Tierra queda en promedio cerca de 278 K.
- Las comprobaciones a mano encuentran los casos críticos; luego los modelos de elementos finitos y térmicos los refinan.

Ecuaciones clave

$$F = nmg$$

`F=nmg`

Carga a partir del factor de carga

$$MS = \frac{\sigma_{allow}}{FS \cdot \sigma} - 1$$

`MS=σ_allowFS·σ-1`

Margen de seguridad

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

`T=((α S)/(4σ))^1/4`

Temperatura de equilibrio media

$$\sigma = F/A$$

Esfuerzo normal

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 7.1 Un CubeSat de 4 kg soporta 10 g (factor de carga de ejemplo). ¿Carga?

1. 10 × 4 × 9.80665.

Respuesta: 392 N.

Ejemplo 7.2 Un raíl soporta 80 MPa; el límite elástico es 276 MPa; FS = 1.25. ¿MS?

1. 276/(1.25 × 80) − 1.

Respuesta: 1.76, positivo.

Ejemplo 7.3 ¿Temperatura de equilibrio media con α = ε?

1. (1361/(4 × 5.670374419 × 10⁻⁸))^¼.

Respuesta: 278 K.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿MS si el esfuerzo sube a 200 MPa?

   0.10.

2. ¿Carga a 6 g sobre 5 kg?

   294 N.

3. En °C, ¿cuánto son 278.3 K?

   5.2 °C.

4. ¿Por qué un factor de seguridad?

   Incertidumbre en cargas, materiales y análisis.

Ideas erróneas comunes

Mito: MS = 0 está bien.

En realidad: Mantenlo positivo.

Mito: El espacio es frío, así que no hay problema térmico.

En realidad: Las partes iluminadas pueden sobrecalentarse.

Mito: Las comprobaciones a mano sustituyen al análisis.

En realidad: Lo guían.

Tarjetas de estudio

Factor de carga

Múltiplo del peso.

Factor de seguridad

Multiplicador sobre las cargas.

Margen de seguridad

Admisible sobre requerido menos uno.

Límite de fluencia

Esfuerzo que produce deformación permanente.

Temperatura de equilibrio

Absorbido = emitido.

FEA

Análisis por elementos finitos.

Cuestionario de autoevaluación

1. Carga...

392 N

39 N

3920 N

40 N

392 N. nmg.

2. MS...

1.76

2.76

0.76

−0.24

1.76. 276/100 − 1.

3. T de equilibrio...

278 K

255 K

300 K

373 K

278 K. (S/4σ)^¼.

4. El MS debe ser...

positivo

negativo

cero

mayor que 10

positivo. Definición.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA dice que los dos CubeSats de PREFIRE miden la emisión en el infrarrojo lejano de la Tierra, la misma radiación que esta unidad equilibra en su estimación térmica.

La NASA informa que la misión PREFIRE se amplió para que los dos satélites operen al menos hasta septiembre de 2026, ampliando su enfoque de los polos a todo el planeta, fruto de un diseño que sobrevivió al lanzamiento y a la órbita.

En Saving Planets: Estructuras aeroespaciales · Transferencia de calor

Fuentes: NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiales gratuitos del proyecto final del MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manual gratuito de la NASA.

Ver la clase

Lecture 5: Orbiter Structure + Thermal Protection System (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2005/resources/lecture-5/) (en inglés)

MIT 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2005), MIT OpenCourseWare. Licencia: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condiciones de uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

☐ **Terminé esta unidad**

Coste, calendario y riesgo

Estructuras de desglose del trabajo, calendarios por ruta crítica, valor ganado, matrices de riesgo y planes de mitigación.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Construir una estructura de desglose del trabajo.
- Hallar la ruta crítica.
- Calcular CPI, SPI y la estimación al finalizar.
- Puntuar y mitigar riesgos.

Conceptos clave

- Una estructura de desglose del trabajo divide el proyecto en entregables que se pueden estimar y asignar.
- La ruta crítica es la cadena más larga de tareas dependientes; cualquier retraso en ella retrasa el proyecto.
- El valor ganado compara el valor planificado, el valor ganado y el coste real.
- CPI = EV/AC y SPI = EV/PV; valores por debajo de 1 significan sobrecoste o retraso.
- Los riesgos se puntúan como probabilidad × consecuencia y se siguen con responsables y mitigaciones.

Ecuaciones clave

$$CPI = EV / AC$$

`CPI=EV/AC`

Índice de desempeño de costes

$$SPI = EV / PV$$

`SPI=EV/PV`

Índice de desempeño del calendario

$$EAC = BAC / CPI$$

`EAC=BAC/CPI`

Estimación al finalizar

$$R = L \times C$$

R=L× C

Puntuación de riesgo

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 8.1 PV = $50k, EV = $45k, AC = $48k (valores de ejemplo). ¿CPI y SPI?

1. CPI = 45/48.
2. SPI = 45/50.

Respuesta: CPI = 0.9375, SPI = 0.90.

Ejemplo 8.2 El presupuesto al finalizar es de $100k. ¿EAC?

1. 100/0.9375.

Respuesta: $106.7k.

Ejemplo 8.3 Tareas en secuencia duran 3, 4, 5 y 2 semanas en un cuatrimestre de 15 semanas. ¿Holgura?

1. Ruta = 14 semanas.
2. 15 − 14.

Respuesta: 1 semana.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Puntuación de riesgo para probabilidad 4 y consecuencia 5?

   20 de 25.

2. ¿Qué significa CPI = 1.1?

   Por debajo del presupuesto.

3. ¿Variación al finalizar para un EAC de $106.7k?

−$6.7k.

4. ¿Qué es una EDT?

   Estructura de desglose del trabajo.

Ideas erróneas comunes

Mito: Gastar según el plan significa ir a tiempo.

En realidad: Compara el valor ganado, no el gasto.

Mito: Todas las tareas son críticas.

En realidad: Solo lo es la ruta más larga.

Mito: Los riesgos desaparecen al listarlos.

En realidad: Necesitan responsables y acciones.

Tarjetas de estudio

WBS

Estructura de desglose del trabajo.

Ruta crítica

Cadena dependiente más larga.

Valor ganado

Valor del trabajo realizado.

CPI

EV/AC.

SPI

EV/PV.

Matriz de riesgos

Probabilidad × consecuencia.

Cuestionario de autoevaluación

1. CPI…

0.9375

0.90

1.067

0.96

0.9375. EV/AC.

2. SPI...

0.90

0.9375

1.11

0.96

0.90. EV/PV.

3. EAC...

$106.7k

$100k

$93.8k

$111k

$106.7k. BAC/CPI.

4. Holgura...

1 semana

0 semanas

14 semanas

3 semanas

1 semana. 15 − 14.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El Systems Engineering Handbook de la NASA incluye una sección completa sobre gestión técnica transversal, junto al diseño del sistema y la realización del producto.

Los proyectos que cumplen presupuesto y calendario se lanzan antes, y los datos de observación de la Tierra empiezan a llegar antes. Los costes de esta unidad son valores de ejemplo.

En Saving Planets: Soluciones · Aviónica e ingeniería de sistemas

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

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manual gratuito de la NASA, sección 6.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiales gratuitos del proyecto final del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

Prototipo, pruebas y verificación

Matrices de verificación, planificación de pruebas, estadística de mediciones, comparación de resultados con predicciones y cierre de requisitos.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Construir una matriz de verificación.
- Calcular la media y la desviación típica.
- Comparar una medición con una asignación.
- Cerrar o eximir un requisito.

Conceptos clave

- Una matriz de verificación enumera cada requisito, su método, la prueba o el análisis y el resultado.
- Repite las mediciones para estimar la media y la dispersión; informa de ambas.
- Compara los resultados con las predicciones; las grandes diferencias revelan pronto errores del modelo.
- Prueba como vuelas: usa configuraciones y procedimientos similares a los de vuelo.
- El 16.83X del MIT sigue las fases concebir, diseñar, implementar y operar, y termina con pruebas en el entorno previsto.

Ecuaciones clave

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum x_i$$

```
x=1n x_i
```

Media

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

```
s=((x_i- x)^2)/(n-1)
```

Desviación estándar muestral

$$\text{Margin} = \frac{A - \bar{x}}{\bar{x}}$$

```
Margin=(A- x)/( x)
```

Margen medido

$$e = \frac{x_m - x_p}{x_p}$$

`e=(x_m-x_p)/(x_p)`

Error de predicción

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 9.1 Cinco mediciones de masa: 3.38, 3.42, 3.40, 3.45, 3.35 kg. ¿Media?

1. Sum 17.00/5.

Respuesta: 3.40 kg.

Ejemplo 9.2 ¿Desviación típica muestral?

1. Desviaciones −0.02, 0.02, 0, 0.05, −0.05.
2. √(0.0058/4).

Respuesta: 0.038 kg.

Ejemplo 9.3 ¿Margen frente a la asignación de 4.0 kg?

1. (4.0 − 3.40)/3.40.

Respuesta: 17.6%: el requisito se cierra.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Previsto 3.30 kg, medido 3.40 kg. ¿Error?

   +3.03%.

2. ¿Por qué repetir mediciones?

   Para estimar la dispersión y detectar errores.

3. ¿Qué significa «probar como se vuela»?

   Usar hardware y procedimientos similares a los de vuelo.

4. ¿Quién aprueba una exención?

   El comité de revisión del proyecto o el cliente.

Ideas erróneas comunes

Mito: Una medición basta.

En realidad: Informa de la media y la dispersión.

Mito: Las pruebas demuestran que un diseño es perfecto.

En realidad: Muestran que cumple los requisitos en condiciones de prueba.

Mito: Los datos discrepantes son malos.

En realidad: Te enseñan algo sobre el modelo.

Tarjetas de estudio

Matriz de verificación

Tabla de requisito a evidencia.

Media

Promedio.

Desviación estándar

Dispersión.

Probar como se vuela

Pruebas similares al vuelo.

Exención

Excepción aprobada.

CDIO

Concebir, diseñar, implementar, operar.

Cuestionario de autoevaluación

1. Media...

3.40 kg

3.38 kg

3.45 kg

17 kg

3.40 kg. Sum/n.

2. Desviación típica...

0.038 kg

0.38 kg

0.0058 kg

0.1 kg

0.038 kg. Fórmula muestral.

3. Margen...

17.6%

15%

0.6%

−15%

17.6%. (4 − 3.4)/3.4.

4. Error de predicción...

+3.03%

−3.03%

+0.1%

+30%

+3.03%. 0.1/3.3.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

MIT OpenCourseWare describe el 16.83X como un modelo de concebir-diseñar-implementar-operar, con una fase final en la que el sistema se prueba y se prepara para su entorno previsto.

El CubeSat Launch Initiative de la NASA pone en vuelo satélites estudiantiles que superan este tipo de pruebas, convirtiendo proyectos finales en instrumentos operativos en órbita.

En Saving Planets: Aviónica e ingeniería de sistemas · Probabilidad y estadística

Fuentes: MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/) · NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiales gratuitos del proyecto final del MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manual gratuito de la NASA, sección 5.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 10 · SEMANAS 14–15

Revisiones de diseño e informe final

Revisiones de diseño preliminar y crítica, presentación de compromisos y presupuestos, respuesta a preguntas y redacción del informe final.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Planificar una revisión de diseño.
- Presentar presupuestos con márgenes.
- Seguir las acciones de la revisión.
- Redactar un informe final claro.

Conceptos clave

- Una revisión de diseño preliminar muestra que el concepto cumple los requisitos con margen; una revisión crítica de diseño muestra que el diseño detallado está listo para construirse.
- Empieza por los requisitos, luego el diseño, luego presupuestos, riesgos, planes de prueba y temas abiertos.
- Cada revisión produce acciones con responsables y fechas límite.
- El informe final cuenta la historia desde la necesidad hasta el diseño verificado, con números que remiten a la hoja de cálculo.
- Hablar con honestidad de lo que no funcionó es parte de la buena ingeniería.

Ecuaciones clave

$$t_{talk} = n_{slides} \times t_{slide}$$

```
t_talk=n_slides× t_slide
```

Duración de la presentación

$$\text{Closure} = \frac{n_{closed}}{n_{total}}$$

```
Closure=_closedn_total
```

Cierre de acciones

$$\text{Margin} = \frac{A - E}{E}$$

```
Margin=(A-E)/(E)
```

Margen del presupuesto

$$\text{Coverage} = \frac{n_{verified}}{n_{req}}$$

`Coverage=_verifiedn_req`

Cobertura de verificación

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 10.1 Una revisión de 20 minutos a 1.5 minutos por diapositiva. ¿Diapositivas?

1. 20/1.5.

Respuesta: Unas 13.

Ejemplo 10.2 Una revisión deja 12 acciones; 9 están cerradas. ¿Cierre?

1. 9/12.

Respuesta: 75%.

Ejemplo 10.3 30 de 32 requisitos están verificados. ¿Cobertura?

1. 30/32.

Respuesta: 93.75%.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Diapositivas para una revisión de 30 minutos a 2 min cada una?

   15.

2. ¿Qué sigue a la PDR?

   CDR.

3. ¿Cierre con 11 de 12 cerradas?

   91.7%.

4. ¿Por qué mostrar los temas abiertos?

   Los revisores pueden ayudar y genera confianza.

Ideas erróneas comunes

Mito: Las revisiones son exámenes.

En realidad: Ayudan al proyecto.

Mito: Más diapositivas es mejor.

En realidad: La claridad gana al volumen.

Mito: Ocultar los problemas.

En realidad: Muéstralos con planes.

Tarjetas de estudio

PDR

Revisión de diseño preliminar.

CDR

Revisión crítica de diseño.

Acción

Tarea surgida de una revisión.

Informe final

Historia de la necesidad a la verificación.

Cobertura

Proporción de requisitos verificados.

Lecciones aprendidas

Qué hacer de otra manera.

Cuestionario de autoevaluación

1. Diapositivas...

≈ 13

20

30

5

≈ 13. 20/1.5.

2. Cierre...

75%

9%

25%

133%

75%. 9/12.

3. Cobertura...

93.75%

30%

96%

6.25%

93.75%. 30/32.

4. La CDR muestra...

un diseño listo para construir

la primera idea

el lanzamiento hecho

solo el presupuesto

un diseño listo para construir. Diseño crítico.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA dice que su Sustainable Flight National Partnership apoya el objetivo de la comunidad aeronáutica de cero emisiones netas de carbono para 2050.

La NASA dice que la misión ampliada de PREFIRE ahora observa todo el planeta; revisiones e informes sólidos son la vía por la que diseños de estudiantes y profesionales alcanzan ese tipo de impacto.

En Saving Planets: Soluciones · Observación de la Tierra

Fuentes: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/) · NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manual gratuito de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiales gratuitos del proyecto final del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

Problemas

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

1. Misión, partes interesadas y requisitos
   4 problemas
2. Generación y selección de conceptos
   4 problemas
3. Itinerario de aeronave: dimensionamiento de peso y alcance
   4 problemas
4. Itinerario de aeronave: carga alar y potencia
   4 problemas
5. Itinerario CubeSat: dimensionamiento y órbita
   4 problemas
6. Itinerario CubeSat: presupuestos de potencia y de enlace
   4 problemas
7. Comprobaciones estructurales y térmicas
   4 problemas
8. Coste, calendario y riesgo
   4 problemas
9. Prototipo, pruebas y verificación
   4 problemas
10. Revisiones de diseño e informe final

4 problemas

El laboratorio (Design studio)

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

Cada práctica es una herramienta de diseño en hoja de cálculo, así que no hay peligros. No construyas ni vueles un dron real, no cargues baterías de litio ni manipules hardware de lanzamiento para este curso sin supervisión cualificada y normas locales. Toma descansos de la pantalla, mantén una buena postura y aparta los cables de los pasillos.

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

Práctica A: Seguimiento de requisitos y márgenes

SEMANA 1

Objetivo: Construye la hoja de cálculo de requisitos que usará todo tu proyecto, con márgenes en vivo.

$$\text{Margin} = (A - E)/E$$

```
Margin=(A-E)/E
```

Margen

Procedimiento

1. Enumera 10–20 requisitos con número, unidad y método de verificación.
2. Introduce una asignación de masa de 4.0 kg (valor de libro para un 3U) o una asignación de 5 kg para el dron.
3. Introduce estimaciones de 3.4, 3.6 y 3.8 kg y calcula el margen.
4. Colorea en rojo los márgenes inferiores al 10%.

Tabla de datos

Estimación (kg)	Margen
3.4	17.6%
3.6	11.1%
3.8	5.26%

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. (4.0 − 3.6)/3.6 = 11.1%.
2. (4.0 − 3.8)/3.8 = 5.26%.

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

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

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

Vínculo con el planeta: El CubeSat Launch Initiative de la NASA ha lanzado más de 150 CubeSats. NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/)

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

Práctica B: Matriz de selección de conceptos con sensibilidad

SEMANA 2

Objetivo: Puntúa dos conceptos y comprueba cómo los pesos cambian el ganador.

$$S = \sum w_i s_i$$

`S= w_is_i`

Puntuación ponderada

Procedimiento

1. Introduce las puntuaciones de la unidad 2: A (6, 9, 5), B (8, 6, 8).
2. Puntúa con tres conjuntos de pesos.
3. Grafica el ganador frente al peso del desempeño.
4. Escribe un párrafo defendiendo tu elección.

Tabla de datos

Pesos (coste, desemp., riesgo)	A	B
0.3, 0.5, 0.2	7.3	7.0
0.4, 0.3, 0.3	6.6	7.4
0.2, 0.6, 0.2	7.6	6.8

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. A = 0.2 × 6 + 0.6 × 9 + 0.2 × 5 = 7.6.
2. B = 0.2 × 8 + 0.6 × 6 + 0.2 × 8 = 6.8.

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

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/)

Vínculo con el planeta: El SFNP de la NASA abarca vehículos, operaciones y combustibles sostenibles. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

Práctica C: Bucle de dimensionamiento del dron

SEMANA 4

Objetivo: Dimensiona la masa al despegue del itinerario dron para varias fracciones de batería.

$$W_0 = W_{pay}/(1 - f_e - f_b)$$

```
W_0=W_pay/(1-f_e-f_b)
```

Masa al despegue

Procedimiento

1. Introduce 1 kg de carga útil y una fracción de vacío de 0.5.
2. Calcula la masa al despegue para fracciones de batería de 0.25, 0.30 y 0.35.
3. Añade la superficie alar a partir de W/S = 105.84 N/m².
4. Elige un punto de diseño y justifícalo.

Tabla de datos

Fracción de batería	Masa al despegue (kg)
0.25	4.0
0.30	5.0
0.35	6.67

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. 1/(1 − 0.5 − 0.25) = 4.0 kg.
2. 1/(1 − 0.5 − 0.35) = 6.67 kg.

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

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/)

Vínculo con el planeta: El SFNP de la NASA apunta a mejoras de eficiencia energética del 25–30%. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

Práctica D: Órbita y eclipse del CubeSat

SEMANA 6

Objetivo: Calcula el periodo y el eclipse en el peor caso para altitudes candidatas.

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

T=2π^3/μ

Período

Procedimiento

1. Introduce altitudes de 400, 500 y 600 km.
2. Calcula T y las órbitas por día.
3. Calcula los minutos de eclipse en el peor caso.
4. Elige una altitud y anota el compromiso con la vida útil por resistencia.

Tabla de datos

Altitud (km)	T (min)	Eclipse (min)
400	92.6	36.1
500	94.6	35.8
600	96.7	35.5

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. T(600) = 2π√(6978.1³/398600.4) = 96.7 min.
2. Eclipse(400) = 0.390 × 92.6 = 36.1 min.

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

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/)

Vínculo con el planeta: NASA: los CubeSats de PREFIRE se lanzaron en mayo de 2024. NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/

prefire/)

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

Práctica E: Presupuesto de potencia y datos

SEMANA 7

Objetivo: Cierra los presupuestos de potencia y datos del CubeSat con margen.

$$V = R_b t_p n_p$$

V=R_bt_pn_p

Volumen de datos diario

Procedimiento

1. Introduce una producción de paneles de 22.9 W y una media orbital de 14.2 W.
2. Enumera las cargas y compáralas con la media orbital.
3. Calcula los datos por día a 9600 bit/s para 2, 4 y 6 pasadas de diez minutos.
4. Compáralos con los datos diarios de tu carga útil.

Tabla de datos

Pasadas por día	Datos (Mbit)
2	11.52
4	23.04
6	34.56

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. 9600 × 600 × 2 = 11.52 Mbit.
2. 9600 × 600 × 6 = 34.56 Mbit.

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

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/)

Vínculo con el planeta: NASA: las naves pequeñas son ahora el principal medio de acceso al espacio para muchos grupos. NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/

smallsat-institute/sst-soa/)

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

Práctica F: Seguimiento del valor ganado

SEMANA 10

Objetivo: Sigue el desempeño en coste y calendario en tres fechas de estado.

$$CPI = EV/AC,\ SPI = EV/PV$$

`CPI=EV/AC,\ SPI=EV/PV`

Índices de desempeño

Procedimiento

1. Introduce PV, EV y AC para tres fechas.
2. Calcula CPI y SPI.
3. Calcula el EAC con BAC = $100k.
4. Escribe un estado de una línea para cada fecha.

Tabla de datos

PV, EV, AC ($k)	CPI	SPI
20, 20, 22	0.909	1.00
50, 45, 48	0.9375	0.90
80, 76, 80	0.95	0.95

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. 20/22 = 0.909.
2. 76/80 = 0.95.

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

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

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

Vínculo con el planeta: El manual de la NASA cubre la gestión técnica transversal. NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

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

Series de práctica para exámenes

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

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

1. ¿Margen de una asignación de 4.0 kg sobre una estimación de 3.6 kg?
    1. 0.4/3.6.

    Respuesta: 11.1%.
2. ¿Masa al despegue para 2 kg de carga útil, vacío 0.45, batería 0.3?
    1. 2/0.25.

    Respuesta: 8 kg.
3. ¿Carga alar para una pérdida a 14 m/s, C_{Lmax} 1.3?
    1. ½ × 1.225 × 196 × 1.3.

    Respuesta: 156.1 N/m².
4. ¿Periodo a 400 km?
    1. a = 6778.1 km.

    Respuesta: 92.6 min.
5. ¿Alcance de Breguet con L/D = 20 en lugar de 17 (valores de la unidad 3)?
    1. 5235 × 20/17.

    Respuesta: 6159 km.

Serie final de práctica (unidades 1–10)

1. ¿Panel de 0.09 m² con un 30% de eficiencia?
    1. 1361 × 0.3 × 0.09.

    Respuesta: 36.7 W.
2. ¿Batería para 10 W durante 36 min con un 25% de DoD?

1. 10 × 0.6/0.25.

Respuesta: 24 Wh.

3. ¿MS para 100 MPa, límite elástico 276 MPa, FS 1.4?

    1. 276/140 − 1.

    Respuesta: 0.971.

4. ¿EAC con BAC $200k, EV 60, AC 64?

    1. CPI = 0.9375.
    2. 200/0.9375.

    Respuesta: $213.3k.

5. ¿Media y desviación típica muestral de 2, 4, 6?

    1. Media 4.
    2. √(8/2).

    Respuesta: 4 y 2.

6. ¿Cobertura de verificación, 45 de 50?

    1. 45/50.

    Respuesta: 90%.

Hoja de fórmulas

$$\text{Margin} = (A - E)/E,\ m_{alloc} = m_{est}(1 + M)$$

$$S = \sum w_i s_i,\ N = \prod n_i$$

$$W_0 = W_{pay}/(1 - f_e - f_b),\ R = (V/c)(L/D)\ln(W_i$$

$$W/S = \tfrac{1}{2}\rho V_s^2 C_{L,max},\ P = W(V/(L/D) + RC)/\eta$$

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

$$P = S\eta A\cos\theta,\ E = P_e t_e/DoD,\ L = 20\log_{10}(4\pi d$$

$$F = nmg,\ MS = \sigma_{allow}/(FS\,\sigma) - 1$$

$$CPI = EV/AC,\ SPI = EV/PV,\ EAC = BAC$$

$$\bar{x} = \sum x_i/n,\ s = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2/(n-1)}$$

$$\text{Coverage} = n_{verified}/n_{req}$$

Constantes

Constante	Valor
Parámetro gravitacional de la Tierra (valor de libro)	$\mu = 398{,}600.4418\ km^3/s^2$
Radio ecuatorial de la Tierra (valor de libro)	6378.137 km
Gravedad estándar	$g = 9.80665\ m/s^2$
Constante solar (valor de libro)	$1361\ W/m^2$
Densidad del aire a nivel del mar (valor de libro)	$1.225\ kg/m^3$
Velocidad de la luz	c = 299792458 m/s (exacto)

Fuente: NIST: CODATA value, speed of light in vacuum (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c)

Textos y recursos gratuitos

Usa estos manuales, clases y páginas de misiones gratuitos junto con el curso.

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manual gratuito de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiales gratuitos del proyecto final del MIT.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): Informe gratuito de la NASA sobre naves pequeñas.
- NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/): Oportunidades de lanzamiento de la NASA.
- NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/): Misión CubeSat de la NASA.
- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): Aviación sostenible en la NASA.

Glosario

Acción
Tarea asignada en una revisión.

Asignación
Parte presupuestada de un recurso.

Ecuación de Breguet
Ecuación de alcance de una aeronave.

CDR

Revisión crítica de diseño.

CPI
Índice de desempeño del coste.

Diagrama de restricciones
Requisitos representados frente a la carga alar.

Ruta crítica
Cadena más larga de tareas dependientes.

CubeSat
Satélite pequeño construido en unidades de 10 cm.

Profundidad de descarga
Parte de la capacidad de la batería utilizada.

Valor ganado
Valor presupuestado del trabajo realizado.

Fracción de eclipse
Parte de una órbita en sombra.

Margen de seguridad
Admisible sobre requerido menos uno.

Cuadro morfológico
Opciones para cada función.

PDR
Revisión de diseño preliminar.

Matriz de Pugh
Comparación con un concepto de referencia.

Requisito
Enunciado verificable de una necesidad.

SPI
Índice de desempeño del calendario.

Matriz de verificación
Tabla de requisito a evidencia.

Carga alar
Peso por superficie alar.

Estructura de desglose del trabajo
Proyecto dividido en entregables.

Rúbrica de autoevaluación

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

Nivel	Cómo se ve
4 · Dominio	Entrega un diseño que vincula cada número a un requisito, cierra todos los presupuestos con margen, verifica los requisitos con evidencias y presenta con claridad compromisos, riesgos y lecciones.
3 · Competente	Cierra la mayoría de los presupuestos con margen y presenta un diseño claro con pequeñas lagunas.
2 · En desarrollo	Tiene un concepto y algunos presupuestos, pero una trazabilidad de requisitos débil o márgenes ausentes.
1 · Inicial	Presenta un diseño sin requisitos, presupuestos ni verificación; necesita repasar las unidades.

Ponderación sugerida si quieres una nota

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

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

Cursos relacionados

- Aviónica e ingeniería de sistemas AERO 450
- Aviación sostenible AERO 470
- Propulsión AERO 410
- Todos los cursos