Última actualización: November 1, 2026

🗺️ Ruta de cuatro años · Año 4, Otoño

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 curso de último año de un semestre en aviónica e ingeniería de sistemas. Se basa en los temas y la profundidad de MIT 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (gratis en MIT OpenCourseWare) y del NASA Systems Engineering Handbook, que enlazamos donde ayudan. Ni el MIT ni la NASA respaldan esta página.
>
> Lo que añadimos: cada unidad se vincula a trabajo real con una fuente pública citada (Landsat 9, Hubble, Dragonfly y el sistema de tráfico aéreo de la FAA), cada número de la página se recalcula con un script de comprobación antes de publicarse, y cada práctica tiene una simulación gratuita o una hoja de cálculo.
>
> Síguelo en orden. Cada unidad tiene objetivos, ideas clave, ecuaciones, ejemplos paso a paso, práctica con respuestas completas, errores comunes, tarjetas de estudio y un cuestionario. Tu progreso se guarda solo en este navegador.

Cómo ayuda este curso a salvar el planeta

Los satélites de observación de la Tierra, las naves meteorológicas y un tráfico aéreo eficiente dependen de una aviónica que funcione durante años sin reparaciones y de una ingeniería de sistemas que haga que miles de piezas se comporten como una sola.

Buenos requisitos, redundancia y pruebas son lo que permite a un satélite seguir midiendo bosques, hielo y océanos mucho después de su vida de diseño. 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 450).
- 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

- Circuitos: tensión, corriente, resistencia y señales digitales.
- Probabilidad y estadística: reglas de probabilidad, distribución exponencial y varianza.
- Dinámica de vuelo y control: realimentación, sensores y actuadores.
- Introducción a la programación: bucles, funciones y temporización.

Cómo estudiar

- Empieza cada problema por el requisito al que sirve.
- Dibuja diagramas de bloques e interfaces antes de calcular nada.
- Mantén las probabilidades como números entre 0 y 1 y comprueba que sigan ahí.
- Controla las unidades: bits, bytes, segundos, hercios, decibelios.
- Pregunta «¿qué pasa si esta pieza falla?» para cada bloque que dibujes.
- Haz cada ejercicio en papel antes de abrir la respuesta, y repite los cuestionarios unos días después.

Qué necesitas

- Un ordenador o tableta para la simulación gratuita PhET Circuit Construction Kit: DC.
- Software de hoja de cálculo (sirve cualquiera gratuito), o Python.
- El NASA Systems Engineering Handbook gratuito en un navegador web.
- Una calculadora.

Calendario sugerido de 15 semanas

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

Semana	Unidad	Temas	Lectura
1	El ciclo de vida de la ingeniería de sistemas y los requisitos	Ciclo de vida y requisitos	NASA SE Handbook
2	Arquitectura, interfaces e integración	Arquitectura e interfaces; Práctica A	MIT 16.842
3	Fiabilidad y redundancia	Modelos de fiabilidad	NASA SE Handbook
4	Fiabilidad y redundancia	Redundancia; Práctica B	NASA Hubble
5	Análisis de seguridad: AMFE y árboles de fallos	AMFE y árboles de fallos; Práctica C	NASA SE Handbook
6	Aviónica digital y buses de datos	Aviónica digital	MIT 16.842
7	Aviónica digital y buses de datos	Buses de datos; Práctica D; práctica para el parcial	NASA Landsat 9
8	Sensores de navegación: IMU, GNSS, cámaras y lidar	Sensores de navegación	NASA Dragonfly
9	Fusión de sensores y el filtro de Kalman	Fusión de sensores y filtros de Kalman; Práctica E	MIT 16.842
10	Comunicación y vigilancia: ADS-B	Comunicación y ADS-B	FAA ADS-B
11	Software de vuelo en tiempo real	Software en tiempo real	MIT 16.842
12	Software de vuelo en tiempo real	Protección ante fallos; Práctica F	NASA Hubble
13	Integración, verificación y operaciones	Integración y verificación	NASA SE Handbook
14	Integración, verificación y operaciones	Bancos de pruebas e inyección de fallos	NASA Dragonfly
15	Integración, verificación y operaciones	Repaso; práctica para el final	MIT 16.842

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

UNIDAD 1 · SEMANA 1

El ciclo de vida de la ingeniería de sistemas y los requisitos

Partes interesadas, el modelo en V, fases del ciclo de vida y revisiones, buenos requisitos, medidas de desempeño técnico y márgenes.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Describir el modelo en V.
- Redactar requisitos verificables.
- Calcular márgenes frente a un requisito.
- Seguir una medida de desempeño técnico.

Conceptos clave

- La ingeniería de sistemas convierte las necesidades de las partes interesadas en un sistema que funciona, a tiempo y dentro del presupuesto, durante toda su vida.
- El modelo en V baja por el lado izquierdo (requisitos, arquitectura, diseño) y sube por el derecho (integración, verificación, validación).
- Un buen requisito es necesario, claro, factible y verificable, con un número, una unidad y un método de prueba.
- Las medidas de desempeño técnico como masa, potencia y tasa de datos se siguen frente a asignaciones con margen.
- Las revisiones (concepto, diseño preliminar, diseño crítico) habilitan cada fase; los estudiantes de MIT 16.842 preparan un diseño al nivel de una revisión de diseño preliminar.

Ecuaciones clave

$$\text{Margin} = \frac{C - N}{N}$$

```
Margin=(C-N)/(N)
```

Margen sobre la necesidad

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

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

Asignación con margen

$$S = \sum w_i s_i$$

```
S= w_is_i
```

Puntuación ponderada de compromiso

$$\sum w_i = 1$$

`w_i=1`

Los pesos suman uno

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 1.1 La NASA exige que Landsat 9 recoja al menos 400 escenas al día; recoge 740. Halla el margen.

1. (740 − 400)/400.

Respuesta: 85% por encima del requisito.

Ejemplo 1.2 Una caja de aviónica se estima en 12 kg. Asigna con un 25% de margen (valores de ejemplo).

1. 12 × 1.25.

Respuesta: 15 kg.

Ejemplo 1.3 La opción A puntúa 7 (coste) y 8 (fiabilidad); B puntúa 9 y 6. Pesos 0.3 y 0.7. ¿Cuál gana?

1. A = 2.1 + 5.6 = 7.7.
2. B = 2.7 + 4.2 = 6.9.

Respuesta: A, 7.7 frente a 6.9.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. La vida de diseño de Landsat 9 es de 5 años y los consumibles duran 10 años. ¿Razón?

   2.

2. Asigna 400 W de potencia con un 30% de margen.

   520 W.

3. Reescribe «la radio debe ser rápida» como requisito verificable.

   Por ejemplo: «La radio deberá transmitir en enlace descendente al menos 300 Mbit/s, verificado mediante prueba».

4. ¿Qué lado de la V contiene la verificación?

   El lado derecho.

Ideas erróneas comunes

Mito: Los requisitos describen el diseño.
En realidad: Dicen qué se necesita, no cómo.

Mito: El margen es desperdicio.
En realidad: Absorbe el crecimiento y las sorpresas.

Mito: Verificación y validación son lo mismo.
En realidad: Verificación: bien construido; validación: se construyó lo correcto.

Tarjetas de estudio

Modelo en V

Descomponer bajando, integrar y verificar subiendo.

Requisito

Necesidad verificable.

TPM

Medida de desempeño técnico seguida.

PDR

Revisión de diseño preliminar.

Verificación

Bien construido.

Validación

Se construyó lo correcto.

Cuestionario de autoevaluación

1. Margen de Landsat 9...

85%

74%

40%

185%

85%. (740 − 400)/400.

2. 12 kg + 25%...

15 kg

13 kg

12.25 kg

16 kg

15 kg. Multiplica.

3. Ganador del compromiso...

A

B

empate

ninguno

A. 7.7 > 6.9.

4. Un buen requisito es...

verificable

vago

un diseño

opcional

verificable. Comprobable.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA enumera los requisitos de Landsat 9, entre ellos al menos 400 escenas al día y una vida de diseño de 5 años; Landsat 9 recoge 740 escenas al día, casi el doble del mínimo, y lleva combustible suficiente para operar al menos 10 años.

Junto con Landsat 8, observa el mismo lugar cada 8 días, lo que permite alertas casi semanales de deforestación tropical, seguimiento de la calidad del agua e informes de cultivos, frutos de requisitos escritos y cumplidos con margen.

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

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

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manual gratuito de la NASA, secciones 3–4.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Clases gratuitas del MIT.

Ver la clase

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

Arquitectura, interfaces e integración

Arquitectura funcional y física, control de interfaces, diagramas N², ingeniería de sistemas basada en modelos y por qué las interfaces crecen rápido.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Asignar funciones a componentes.
- Contar las interfaces potenciales.
- Leer un diagrama N².
- Explicar la ingeniería de sistemas basada en modelos.

Conceptos clave

- Una arquitectura funcional dice qué hace el sistema; una arquitectura física dice qué cajas lo hacen.
- Cada par de componentes podría necesitar una interfaz, así que las interfaces potenciales crecen como n(n − 1)/2.
- Un diagrama N² pone los componentes en la diagonal y los datos o la energía entre ellos fuera de la diagonal.
- Los documentos de control de interfaces fijan conectores, señales, temporización y formatos de datos para que los equipos construyan en paralelo.
- La NASA indica que la actualización de su manual incluye la ingeniería de sistemas basada en modelos (MBSE), que mantiene requisitos, arquitectura y análisis en un único modelo conectado.

Ecuaciones clave

$$I = \frac{n(n-1)}{2}$$

`I=(n(n-1))/(2)`

Interfaces bidireccionales potenciales

$$N_{cells} = n(n-1)$$

`N_cells=n(n-1)`

Celdas N² fuera de la diagonal

$$B = \sum_i r_i$$

`B=_i r_i`

Carga total del bus

$$U = B/B_{max}$$

`U=B/B_max`

Utilización del bus

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 2.1 Un conjunto de aviónica tiene 8 cajas. ¿Cuántas interfaces potenciales?

1. 8 × 7/2.

Respuesta: 28.

Ejemplo 2.2 Añade 4 cajas (n = 12).

1. 12 × 11/2.

Respuesta: 66, más del doble.

Ejemplo 2.3 Tres cajas envían 20, 35 y 15 kbit/s por un bus de 100 kbit/s. ¿Utilización?

1. 70/100.

Respuesta: 70%.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Celdas N^2 fuera de la diagonal para n = 8?

   56.

2. ¿Interfaces para n = 4?

   6.

3. ¿Por qué mantener la utilización del bus por debajo del 100%?

Margen para crecimiento, reintentos y fluctuación de tiempos.

4. ¿Qué es un ICD?

   Documento de control de interfaces.

Ideas erróneas comunes

Mito: Las interfaces crecen linealmente.

En realidad: Crecen aproximadamente como n^2.

Mito: La arquitectura es solo una lista de piezas.

En realidad: Incluye funciones y conexiones.

Mito: La MBSE reemplaza a los ingenieros.

En realidad: Conecta su trabajo.

Tarjetas de estudio

Arquitectura

Funciones asignadas a componentes.

Diagrama N²

Matriz de interfaces.

ICD

Documento de control de interfaces.

MBSE

Ingeniería de sistemas basada en modelos.

Integración

Unión de componentes.

Carga del bus

Suma de tasas de datos.

Cuestionario de autoevaluación

1. Interfaces para 8 cajas...

28

56

16

64

28. n(n − 1)/2.

2. Para 12 cajas...

66

132

24

144

66. 12 × 11/2.

3. Utilización del bus...

70%

35%

100%

7%

70%. 70/100.

4. MBSE significa...

ingeniería de sistemas basada en modelos

presupuesto de masa

línea base de la misión

error medio del bus

ingeniería de sistemas basada en modelos. NASA.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA dice que su Systems Engineering Handbook se actualizó para incluir la ingeniería de sistemas basada en modelos, aprovechando lecciones de misiones y percances.

Unas interfaces claras permiten que los equipos de instrumentos y de la nave construyan en paralelo, y así es como misiones de observación de la Tierra como Landsat 9 llegan a órbita a tiempo.

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

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 4.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Clases gratuitas del MIT.

Ver la clase

Session 8: Systems Integration and Interface Management (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/resources/session-8-systems-integration-and-interface-management/) (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**

Fiabilidad y redundancia

Tasas de fallo, fiabilidad exponencial, MTBF, sistemas en serie y en paralelo, redundancia modular triple, sistemas k de n y disponibilidad.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular la fiabilidad a partir de una tasa de fallo.
- Combinar bloques en serie y en paralelo.
- Calcular la fiabilidad de una votación 2 de 3.
- Calcular la disponibilidad.

Conceptos clave

- Con una tasa de fallo constante λ, la fiabilidad cae como e^(−λt) y el tiempo medio entre fallos es 1/λ.
- Los sistemas en serie fallan si falla cualquier pieza, así que las fiabilidades se multiplican.
- Los sistemas en paralelo (redundantes) fallan solo si fallan todas las piezas.
- La redundancia modular triple vota 2 de 3; supera a una unidad sola al principio de su vida, pero no cuando R cae por debajo de 0.5.
- La disponibilidad es la fracción del tiempo en que un sistema funciona: MTBF/(MTBF + MTTR).

Ecuaciones clave

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

`R(t)=e^- t`

Fiabilidad exponencial

$$R_s = \prod R_i,\ R_p = 1 - \prod (1 - R_i)$$

`R_s= R_i,\ R_p=1-(1-R_i)`

Serie y paralelo

$$R_{2/3} = 3R^2 - 2R^3$$

`R_2/3=3R^2-2R^3`

Votación dos de tres

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

`A=(MTBF)/(MTBF+MTTR)`

Disponibilidad

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 3.1 Una unidad tiene $\lambda = 10^{-5}$ por hora. ¿Fiabilidad en 10000 h?

1. e^(−0.1).

Respuesta: 0.905.

Ejemplo 3.2 ¿Dos unidades así en paralelo?

1. $1 - (1 - 0.9048)^2$.

Respuesta: 0.991.

Ejemplo 3.3 ¿Tres unidades votando 2 de 3?

1. $3(0.9048)^2 - 2(0.9048)^3$.

Respuesta: 0.975.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿MTBF para $\lambda = 10^{-5}$ /h?

   100,000 h.

2. ¿Unidad sola, doble y TMR a 50000 h?

   0.607, 0.845, 0.657.

3. ¿Disponibilidad con MTBF de 1000 h y MTTR de 2 h?

   0.998.

4. El Hubble necesita uno de tres giroscopios funcionando. ¿Qué modelo?

   1 de 3 (paralelo).

Ideas erróneas comunes

Mito: La redundancia siempre ayuda.

En realidad: La TMR pierde frente a una unidad sola cuando R < 0.5.

Mito: El MTBF es una vida garantizada.

En realidad: Es una media; muchos fallan antes.

Mito: La fiabilidad en serie se suma.

En realidad: Se multiplica.

Tarjetas de estudio

Tasa de fallo

Fallos por hora.

MTBF

Tiempo medio entre fallas.

Redundancia

Unidades de respaldo.

TMR

Redundancia modular triple, votación 2 de 3.

Disponibilidad

Fracción del tiempo en funcionamiento.

k de n

Funciona si funcionan k de n.

Cuestionario de autoevaluación

1. R(10,000 h)...

0.905

0.990

0.1

0.5

0.905. e^(−0.1).

2. Par en paralelo...

0.991

0.819

0.905

1

0.991. 1 − 0.0952^2.

3. TMR...

0.975

0.905

0.991

0.857

0.975. $3R^2 - 2R^3$.

4. MTBF...

100,000 h

10,000 h

1000 h

10^{-5} h

100,000 h. 1/λ.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA dice que el Hubble recibió seis giroscopios nuevos en 2009, que tres seguían operativos y que, cuando uno dio lecturas erróneas, la NASA pasó el Hubble al modo de un giroscopio manteniendo otro en reserva.

Lanzado en 1990, el Hubble ha más que duplicado su vida de diseño prevista; la redundancia planificada décadas antes mantiene en órbita un observatorio operativo en lugar de un sustituto.

En Saving Planets: Dinámica de vuelo y control · Diseño de naves espaciales

Fuentes: NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manual gratuito de la NASA.
- NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/): Artículo de la NASA sobre los giroscopios del Hubble.

☐ **Terminé esta unidad**

Análisis de seguridad: AMFE y árboles de fallos

Peligros, análisis de modos de fallo y efectos, números de prioridad de riesgo, árboles de fallos con puertas Y y O, y diseño crítico para la seguridad.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Hacer un AMFE sencillo.
- Calcular un número de prioridad de riesgo.
- Evaluar puertas Y y O.
- Elegir mitigaciones.

Conceptos clave

- El AMFE trabaja de abajo arriba: para cada pieza, enumera cómo puede fallar, el efecto y cómo se detectará.
- Un número de prioridad de riesgo multiplica las puntuaciones de severidad, ocurrencia y detección (cada una de 1–10, escala de libro).
- Un árbol de fallos trabaja de arriba abajo desde un evento no deseado; las puertas O añaden riesgo, las puertas Y (redundancia) lo reducen.
- Para probabilidades pequeñas e independientes, una puerta O es casi la suma y una puerta Y es el producto.
- Las lecciones de los accidentes moldean la práctica; la NASA indica que su manual se basó en el Columbia Accident Investigation Board y otros informes.

Ecuaciones clave

$$RPN = S \times O \times D$$

```
RPN=S× O× D
```

Número de prioridad de riesgo

$$P_{OR} = 1 - \prod (1 - p_i)$$

```
P_OR=1-(1-p_i)
```

Puerta O

$$P_{AND} = \prod p_i$$

```
P_AND= p_i
```

Puerta Y

$$P_{OR} \approx \sum p_i$$

Aproximación de eventos raros

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 4.1 Un fallo de sensor puntúa S = 8, O = 4, D = 5. ¿NPR?

1. 8 × 4 × 5.

Respuesta: 160.

Ejemplo 4.2 Cualquiera de dos fallos ($p = 10^{-3}$ y 2×10^{-3}) causa pérdida de datos. ¿Probabilidad?

1. 1 − (0.999)(0.998).

Respuesta: 2.998×10^{-3}.

Ejemplo 4.3 La pérdida requiere ambos fallos (diseño redundante).

1. $10^{-3} \times 2 \times 10^{-3}$.

Respuesta: 2×10^{-6}.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Una mejor detección baja D a 2. ¿Nuevo NPR?

   64.

2. ¿Aproximación de eventos raros para la puerta O?

   3×10^{-3}.

3. ¿Qué puerta crea la redundancia?

   AND.

4. ¿Descendente o ascendente: árbol de fallos?

   Descendente.

Ideas erróneas comunes

Mito: El NPR es una probabilidad.

En realidad: Es una puntuación de clasificación.

Mito: Las puertas O multiplican.

En realidad: Las puertas Y multiplican.

Mito: Las piezas redundantes fallan de forma independiente.

En realidad: Las causas comunes pueden hacer fallar a ambas.

Tarjetas de estudio

FMEA

Análisis de modos de fallo y efectos.

RPN

Severidad × ocurrencia × detección.

Árbol de fallos

Lógica descendente del fallo.

Puerta O

Cualquier entrada causa el evento.

Puerta Y

Se necesitan todas las entradas.

Causa común

Un evento que hace fallar varias piezas.

Cuestionario de autoevaluación

1. RPN...

160

17

40

320

160. 8 × 4 × 5.

2. Puerta O...

≈ 3×10^{-3}

2×10^{-6}

10^{-3}

0.5

≈ 3×10^{-3}. 1 − ∏(1 − p).

3. Puerta Y...

2×10^{-6}

3×10^{-3}

10^{-3}

2×10^{-3}

2×10^{-6}. Producto.

4. El AMFE trabaja...

de abajo arriba

de arriba abajo

de lado

al azar

de abajo arriba. Pieza por pieza.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA dice que las lecciones documentadas por el Columbia Accident Investigation Board, el NASA Integrated Action Team y otros, además de percances en operaciones en tierra y vuelos espaciales comerciales, dieron forma a su manual de ingeniería de sistemas.

Las mismas herramientas de seguridad protegen a los satélites que siguen incendios forestales, tormentas y hielo marino. Las probabilidades de esta unidad son valores de ejemplo.

En Saving Planets: Soluciones · Observación de la Tierra

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 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Clases gratuitas del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

Aviónica digital y buses de datos

Datos binarios, conversión analógico-digital, cuantificación, buses de datos serie (ARINC 429, MIL-STD-1553), temporización de mensajes y volumen de datos.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular la resolución y la SNR de un ADC.
- Calcular el tiempo de transmisión de un mensaje.
- Comparar tipos de bus.
- Estimar el volumen de datos.

Conceptos clave

- Un conversor de N bits divide su rango de entrada en 2^N niveles; un paso es el bit menos significativo.
- La SNR de cuantificación ideal es de unos 6.02N + 1.76 dB.
- ARINC 429 es un bus de un transmisor y muchos receptores a 100 kbit/s en alta velocidad (valor de libro); MIL-STD-1553 es un bus de comando/respuesta a 1 Mbit/s (valor de libro).
- El tiempo de un mensaje es el número de bits dividido por la tasa de bits; la sobrecarga y los intervalos se suman.
- Una mayor resolución radiométrica (más bits) muestra diferencias más finas pero genera más datos.

Ecuaciones clave

$$\Delta V = \frac{V_{FS}}{2^N}$$

`Δ V=_FS2^N`

Paso del ADC

$$SNR \approx 6.02N + 1.76 \text{ dB}$$

SNR de cuantificación

$$t = \frac{bits}{R_b}$$

`t=(bits)/(R_b)`

Tiempo de transmisión

$$L = 2^N$$

L=2^N

Número de niveles

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 5.1 Un ADC de 12 bits abarca 10 V. ¿Tamaño del paso?

1. 10/4096.

Respuesta: 2.44 mV.

Ejemplo 5.2 ¿Su SNR ideal?

1. 6.02 × 12 + 1.76.

Respuesta: 74.0 dB.

Ejemplo 5.3 ¿Cuánto tarda una palabra ARINC 429 de 32 bits a 100 kbit/s?

1. 32/100,000.

Respuesta: 0.32 ms.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Landsat 9 tiene una resolución radiométrica de 14 bits. ¿Niveles?

   16,384.

2. ¿SNR para 8 bits?

   49.9 dB.

3. ¿La misma palabra de 32 bits en un bus de 1 Mbit/s?

   0.032 ms.

4. ¿Paso para 16 bits en 10 V?

0.153 mV.

Ideas erróneas comunes

Mito: Más bits significa automáticamente más precisión.

En realidad: El ruido y la calibración también la limitan.

Mito: La tasa de bits es igual a la tasa de datos útiles.

En realidad: La sobrecarga se lleva una parte.

Mito: Un solo bus sirve para todo.

En realidad: Elige según temporización, integridad y coste.

Tarjetas de estudio

ADC

Conversor analógico-digital.

LSB

Paso del bit menos significativo.

ARINC 429

Bus de aviónica unidireccional.

MIL-STD-1553

Bus de comando/respuesta.

Cuantificación

Redondeo a niveles.

Tasa de bits

Bits por segundo.

Cuestionario de autoevaluación

1. Paso de 12 bits en 10 V...

2.44 mV

24.4 mV

0.244 mV

10 mV

2.44 mV. 10/4096.

2. SNR de 12 bits...

74.0 dB

72 dB

49.9 dB

98 dB

74.0 dB. 6.02N + 1.76.

3. Tiempo de palabra ARINC...

0.32 ms

3.2 ms

32 ms

0.032 ms

0.32 ms. $32/10^5$.

4. Niveles de 14 bits...

16,384

4096

65,536

14

16,384. 2^{14}.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA indica para Landsat 9 una resolución radiométrica de 14 bits, 11 bandas espectrales y más de 700 escenas al día, cada una de 185 km por 180 km.

Los pasos radiométricos finos permiten a los científicos ver cambios sutiles en la calidad del agua y la salud de la vegetación, a costa de más datos que la aviónica debe almacenar y enviar.

En Saving Planets: Observación de la Tierra · Circuitos

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

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Clases gratuitas del MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manual gratuito de la NASA.

☐ **Terminé esta unidad**

Sensores de navegación: IMU, GNSS, cámaras y lidar

Giroscopios y acelerómetros, deriva de la navegación inercial, medición de distancia por navegación satelital, y sensores de visión y lidar para la autonomía.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular la deriva por un sesgo del acelerómetro.
- Relacionar el error de tiempo con el error de distancia.
- Comparar las fortalezas de los sensores.
- Explicar por qué se combinan sensores.

Conceptos clave

- Una unidad de medición inercial (IMU) mide velocidades de rotación (giroscopios) y fuerza específica (acelerómetros).
- Integrar dos veces convierte un pequeño sesgo del acelerómetro en un error de posición que crece con t².
- La navegación por satélite mide la distancia a partir del tiempo de viaje de la señal; 1 µs de error de reloj son unos 300 m de distancia.
- Las cámaras y el lidar miden directamente el entorno, dando información de posición y peligros que no deriva.
- Ningún sensor basta por sí solo: las IMU son rápidas pero derivan; los sensores externos son más lentos pero acotados.

Ecuaciones clave

$$e = \tfrac{1}{2} b t^2$$

```
e=12bt^2
```

Error de posición por sesgo del acelerómetro

$$\rho = c\,\Delta t$$

```
ρ=c Δ t
```

Distancia a partir del tiempo de viaje

$$\theta_e = \omega_b t$$

```
θ_e=ω_bt
```

Error de rumbo por sesgo del giroscopio

$$b = 10^{-3} g$$

`b=10^-3g`

Sesgo de ejemplo de 1 mili-g

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 6.1 Un sesgo de acelerómetro de 1 mili-g (9.807 × 10^{-3} m/s^2) sigue sin corregir durante 60 s. ¿Error de posición?

1. ½ × 9.807 × 10^{-3} × 60^2.

Respuesta: 17.7 m.

Ejemplo 6.2 ¿Tras 600 s?

1. ½ × 9.807 × 10^{-3} × 600^2.

Respuesta: 1765 m, 100 veces peor con 10 veces el tiempo.

Ejemplo 6.3 El reloj de un receptor tiene un desfase de 1 µs. ¿Error de distancia?

1. 299,792,458 × 10^{-6}.

Respuesta: 300 m.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Error tras 10 s con el mismo sesgo?

   0.49 m.

2. ¿Sesgo de giroscopio de 0.01°/h durante 10 h?

   0.1° de rumbo.

3. ¿Por qué Dragonfly necesita lidar en Titán?

Para medir la altitud y la pendiente del terreno y detectar peligros.

4. ¿Error de reloj para 3 m de distancia?

   10 ns.

Ideas erróneas comunes

Mito: Las IMU nunca necesitan corrección.

En realidad: Sus errores crecen con el tiempo.

Mito: El GNSS funciona en todas partes.

En realidad: No en interiores, bajo el agua ni en Titán.

Mito: La deriva crece linealmente.

En realidad: La deriva por sesgo crece con t^2.

Tarjetas de estudio

IMU

Giroscopios y acelerómetros.

Navegación a estima

Navegación por integración.

GNSS

Navegación por satélite.

Lidar

Telemetría láser.

Sesgo

Desplazamiento constante del sensor.

Pseudodistancia

Distancia que incluye el error de reloj.

Cuestionario de autoevaluación

1. Error a 60 s...

17.7 m

0.59 m

1765 m

35 m

17.7 m. ½bt².

2. Error a 600 s…

1765 m

177 m

17.7 km

600 m

1765 m. 100×.

3. Error de reloj de 1 µs…

300 m

3 m

30 km

0.3 m

300 m. c Δt.

4. Sensor que deriva…

IMU

lidar

correlación con mapa mediante cámara

GNSS

IMU. Integración.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA dice que la reciente prueba de «primer vuelo» de Dragonfly ejecutó el software de vuelo y una aviónica similar a la de vuelo con datos simulados de sus cámaras de navegación, unidades de medición inercial y lidar.

El lidar mide la altitud y la pendiente del terreno e identifica peligros, lo que permite al giroavión elegir un lugar de aterrizaje seguro en Titán, adonde debe llegar en 2034.

En Saving Planets: Dinámica de vuelo y control · Observación de la Tierra

Fuentes: NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): Artículo de la NASA sobre Dragonfly.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Clases gratuitas del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 7 · SEMANA 9

Fusión de sensores y el filtro de Kalman

Combinación de mediciones ruidosas, ponderación por la inversa de la varianza, el filtro de Kalman escalar y su ciclo de predicción y actualización.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Fusionar dos mediciones según su varianza.
- Calcular una ganancia de Kalman.
- Ejecutar un paso de predicción y actualización.
- Explicar por qué la fusión supera a cualquiera de los sensores.

Conceptos clave

- Dos estimaciones independientes se combinan mejor ponderando cada una por la inversa de su varianza.
- La varianza fusionada es menor que cualquiera de las varianzas de entrada.
- El filtro de Kalman predice el estado hacia delante y luego lo corrige con una medición usando la ganancia K.
- K = P/(P + R): confía más en la medición cuando la predicción es incierta (P grande) y el sensor es bueno (R pequeño).
- Los sistemas de navegación fusionan predicciones rápidas de la IMU con actualizaciones más lentas de cámara, lidar o GNSS.

Ecuaciones clave

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

Varianza fusionada

$$K = \frac{P}{P + R}$$

K=(P)/(P+R)

Ganancia de Kalman escalar

$$\hat{x}^+ = \hat{x}^- + K(z - \hat{x}^-)$$

x^+= x^-+K(z- x^-)

Actualización

$$P^{+} = (1 - K)P$$

P^+=(1-K)P

Varianza actualizada

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 7.1 Se fusionan sensores con σ = 4 m y 3 m. ¿σ fusionada?

1. $\sigma^2 = 16 \times 9/25 = 5.76$.
2. $\sigma = \sqrt{5.76}$.

Respuesta: 2.4 m.

Ejemplo 7.2 Varianza de predicción P = 16 m², medición R = 9 m². ¿Ganancia?

1. 16/25.

Respuesta: 0.64.

Ejemplo 7.3 Predicción 100 m, medición 105 m. ¿Actualización y nueva varianza?

1. x = 100 + 0.64 × 5 = 103.2 m.
2. P = 0.36 × 16.

Respuesta: 103.2 m con varianza 5.76 m².

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Fusiona dos sensores iguales de σ = 2 m.

   σ = 1.41 m.

2. ¿Ganancia si R = 0?

   1: confiar plenamente en la medición.

3. ¿Ganancia si R es enorme?

Cerca de 0: mantener la predicción.

4. ¿Qué hace crecer P entre actualizaciones?

   El ruido de proceso en la predicción.

Ideas erróneas comunes

Mito: Promediar los sensores por igual.

En realidad: Pondera por la inversa de la varianza.

Mito: La fusión no puede superar al mejor sensor.

En realidad: Supera a ambos.

Mito: Los filtros de Kalman eliminan todo error.

En realidad: Minimizan la varianza bajo ciertas hipótesis.

Tarjetas de estudio

Fusión de sensores

Combinación de mediciones.

Ganancia de Kalman

Peso de la medición.

Covarianza

Incertidumbre de la estimación.

Predicción

Propagar el estado.

Actualización

Corregir con una medición.

Innovación

Medición menos predicción.

Cuestionario de autoevaluación

1. σ fusionada...

2.4 m

3.5 m

1 m

5 m

2.4 m. √5.76.

2. Ganancia de Kalman...

0.64

0.36

1.78

0.5

0.64. P/(P + R).

3. Estimación actualizada...

103.2 m

105 m

100 m

102.5 m

103.2 m. 100 + 0.64 × 5.

4. Nueva varianza...

5.76 m^2

16 m^2

9 m^2

25 m^2

5.76 m^2. (1 − K)P.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA informa que el equipo de Dragonfly añadió sensores y capacidades paso a paso, terminando con el lidar, la pieza final necesaria para simular por completo lo que el giroavión encontrará en Titán.

Un emulador de cámara generó cada escena simulada de Titán con tiempos de exposición de entre unos 20 y 70 milisegundos, los que usarán las cámaras, para que el software de fusión viera una temporización realista. Las varianzas de esta unidad son valores de ejemplo.

En Saving Planets: Dinámica de vuelo y control · Diseño de naves espaciales

Fuentes: NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Clases gratuitas del MIT.
- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): Artículo de la NASA sobre Dragonfly.

☐ **Terminé esta unidad**

Comunicación y vigilancia: ADS-B

Radios de aeronaves, alcance con visibilidad directa, pérdida en espacio libre, ADS-B Out e In, y cómo la vigilancia apoya el control del tráfico aéreo.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular el alcance del horizonte radioeléctrico.
- Calcular la pérdida en espacio libre.
- Explicar ADS-B Out e In.
- Poner en escala las cifras de tráfico de la FAA.

Conceptos clave

- La VHF y las frecuencias más altas viajan con visibilidad directa, así que el alcance depende de la altura de las antenas.
- La pérdida en espacio libre crece con la distancia y la frecuencia, 20 $\log_{10}(4\pi d/\lambda)$.
- Con ADS-B Out, una aeronave difunde su posición obtenida por satélite; ADS-B In permite que otras aeronaves y el suelo la reciban.
- La FAA llama al ADS-B en tiempo real el método de vigilancia preferido para el control del tráfico aéreo en el National Airspace System.
- En EE. UU., las aeronaves deben llevar ADS-B Out para volar en el espacio aéreo definido en 14 CFR 91.225.

Ecuaciones clave

$$d \approx 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \ \text{km}$$

Horizonte radioeléctrico (h en m)

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

L=20_10(4π d)/()

Pérdida en espacio libre

$$\lambda = c/f$$

Longitud de onda

$$\bar{n} = N/24$$

$n = N/24$

Vuelos medios por hora

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 8.1 Una aeronave a 10000 m y una antena en tierra a 10 m. ¿Horizonte radioeléctrico?

1. 4.12(100 + 3.162).

Respuesta: 425 km.

Ejemplo 8.2 Pérdida de trayecto a 1090 MHz en 200 km.

1. $\lambda = 0.2750$ m.
2. $20 \log_{10}(4\pi \times 2 \times 10^5 / 0.2750)$.

Respuesta: 139.2 dB.

Ejemplo 8.3 La FAA atiende más de 44000 vuelos al día. ¿Media por hora?

1. 44,000/24.

Respuesta: Unos 1833.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Duplica la distancia: ¿pérdida adicional?

   6.02 dB.

2. ¿Longitud de onda a 1090 MHz?

   0.275 m.

3. ¿Pasajeros por vuelo a partir de 3 millones y 44000?

   Unos 68.

4. ¿Qué requiere ADS-B Out a bordo?

   Un transmisor que difunda la posición.

Ideas erróneas comunes

Mito: El alcance de radio es ilimitado.

En realidad: La visibilidad directa lo limita.

Mito: ADS-B usa radar.

En realidad: Las aeronaves difunden su propia posición.

Mito: La pérdida de trayecto es lineal con la distancia.

En realidad: Crece como $20 \log_{10} d$.

Tarjetas de estudio

ADS-B

Vigilancia dependiente automática por radiodifusión.

ADS-B Out

Difunde su propia posición.

ADS-B In

Recibe tráfico y meteorología.

Pérdida de trayecto

Pérdida por dispersión de la señal.

Horizonte radioeléctrico

Límite de visibilidad directa.

NAS

Sistema Nacional del Espacio Aéreo de EE. UU.

Cuestionario de autoevaluación

1. Horizonte radioeléctrico...

425 km

42.5 km

4250 km

100 km

425 km. 4.12 × 103.2.

2. Pérdida de trayecto...

139.2 dB

119 dB

160 dB

13.9 dB

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

3. Vuelos por hora...

≈ 1833

≈ 440

≈ 44,000

≈ 183

≈ 1833. 44,000/24.

4. ADS-B Out sirve para...

difundir la posición

interferir el radar

seguir solo la meteorología

aterrizar el avión

difundir la posición. FAA.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La FAA dice que ADS-B mejora la seguridad y la eficiencia en el aire y en las pistas, reduce costes y disminuye los efectos nocivos sobre el medio ambiente.

La Air Traffic Organization de la FAA atiende más de 44000 vuelos y más de 3 millones de pasajeros de aerolíneas al día en más de 29 millones de millas cuadradas de espacio aéreo (cifras de FY24), así que pequeñas mejoras de eficiencia se acumulan.

En Saving Planets: Actuaciones de aeronaves · Soluciones

Fuentes: FAA: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) (https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb) · FAA: Air Traffic By The Numbers (https://www.faa.gov/air_traffic/by_the_numbers)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- FAA: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) (https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb): Presentación de la FAA.
- FAA: Air Traffic By The Numbers (https://www.faa.gov/air_traffic/by_the_numbers): Datos de la FAA.

☐ **Terminé esta unidad**

Software de vuelo en tiempo real

Tareas, periodos y plazos, utilización de CPU, planificación de prioridad monótona por frecuencia, tasas de fotogramas, perros guardianes y protección ante fallos.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular la utilización de CPU.
- Aplicar la cota rate-monotonic.
- Relacionar tasa de fotogramas y periodo.
- Describir la protección ante fallos.

Conceptos clave

- El software de vuelo ejecuta tareas periódicas que deben terminar antes de sus plazos, no solo ser rápidas en promedio.
- La utilización es la suma del tiempo de ejecución de cada tarea dividido por su periodo.
- La planificación rate-monotonic da mayor prioridad a los periodos más cortos; está garantizada cuando U ≤ n(2^(1/n) − 1).
- Los temporizadores perro guardián reinician un procesador que deja de responder; la protección ante fallos pone una nave en modo seguro.
- La autonomía importa cuando la ayuda de tierra está lejos; la NASA dice que Dragonfly debe volar sin ayuda en tiempo real desde la Tierra.

Ecuaciones clave

$$U = \sum \frac{C_i}{T_i}$$

`U=(C_i)/(T_i)`

Utilización

$$U \leq n(2^{1/n} - 1)$$

Cota rate-monotonic

$$f = 1/T$$

`f=1/T`

Tasa de fotogramas

$$\text{slack} = 1 - U$$

`slack=1-U`

Capacidad libre

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 9.1 Las tareas tardan 2, 3 y 5 ms con periodos de 10, 20 y 50 ms. ¿Utilización?

1. 0.2 + 0.15 + 0.1.

Respuesta: 0.45.

Ejemplo 9.2 ¿Cota rate-monotonic para tres tareas?

1. 3(2^(1/3) − 1).

Respuesta: 0.780, así que 0.45 es planificable con garantía.

Ejemplo 9.3 Las exposiciones de las cámaras de Dragonfly duran unos 20 a 70 ms. ¿Tasas de fotogramas correspondientes?

1. 1/0.07 y 1/0.02.

Respuesta: Unos 14.3 a 50 Hz.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Cota para n = 2?

   0.828.

2. ¿Cota para n = 4?

   0.757.

3. ¿Holgura con U = 0.45?

   0.55.

4. ¿Por qué un modo seguro?

   Para mantener estable el vehículo y esperar ayuda o una solución.

Ideas erróneas comunes

Mito: Ser rápido en promedio basta.

En realidad: Cada plazo importa.

Mito: $U \leq 1$ siempre significa planificable con RMS.

En realidad: Solo la cota lo garantiza.

Mito: Modo seguro significa fallo.

En realidad: Protege la misión.

Tarjetas de estudio

Plazo

Último instante de finalización.

Utilización

Fracción de CPU usada.

Rate-monotonic

Periodo más corto, prioridad más alta.

Perro guardián

Temporizador de reinicio.

Modo seguro

Configuración de protección.

Autonomía

Actuar sin ayuda de tierra.

Cuestionario de autoevaluación

1. Utilización...

0.45

0.10

1.0

0.78

0.45. Sum C/T.

2. Cota RM para n = 3...

0.780

0.693

0.828

1

0.780. n(2^(1/n) − 1).

3. Fotograma de 70 ms...

14.3 Hz

70 Hz

7 Hz

50 Hz

14.3 Hz. 1/0.07.

4. El perro guardián...

reinicia un procesador colgado

cuenta bits

mide giroscopios

enfría cajas

reinicia un procesador colgado. Temporizador.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA informa que el Hubble entró varias veces en modo seguro cuando un giroscopio dio lecturas erróneas, suspendiendo la ciencia mientras esperaba instrucciones; la protección ante fallos lo mantuvo a salvo.

La NASA dice que los ingenieros de Dragonfly introducirán fallos deliberadamente en las pruebas para que el giroavión pueda responder de forma autónoma, porque todo lo que haga en Titán debe ocurrir sin ayuda en tiempo real desde la Tierra.

En Saving Planets: Introducción a la programación · Dinámica de vuelo y control

Fuentes: NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/) · NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Clases gratuitas del MIT.
- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): Artículo de la NASA sobre Dragonfly.

☐ **Terminé esta unidad**

Integración, verificación y operaciones

Integración incremental, métodos de verificación, pruebas con hardware en el bucle, inyección de fallos, puesta en servicio y extensión de vida.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Nombrar los cuatro métodos de verificación.
- Planificar una integración incremental.
- Explicar las pruebas con hardware en el bucle.
- Relacionar las operaciones con la vida de la misión.

Conceptos clave

- Los requisitos se verifican mediante prueba, análisis, inspección o demostración.
- La integración avanza paso a paso para poder atribuir un problema a lo último que se añadió.
- El hardware en el bucle y los bancos similares a vuelo ejecutan el software de vuelo real frente a sensores simulados.
- Las pruebas de inyección de fallos demuestran que el sistema responde correctamente cuando algo se rompe.
- Unas buenas operaciones, repuestos y consumibles pueden alargar una misión mucho más allá de su vida de diseño.

Ecuaciones clave

$$t_{arr} = t_{launch} + t_{cruise}$$

```
t_arr=t_launch+t_cruise
```

Año de llegada

$$L_{ext} = \frac{L_{actual}}{L_{design}}$$

```
L_ext=_actualL_design
```

Razón de extensión de vida

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

```
A=(MTBF)/(MTBF+MTTR)
```

Disponibilidad

$$V = \{T, A, I, D\}$$

V=,A,I,D\

Métodos de verificación

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 10.1 La NASA dice que Dragonfly se lanzará no antes de 2028 en un viaje de seis años. ¿Llegada más temprana?

1. 2028 + 6.

Respuesta: 2034, en línea con la NASA.

Ejemplo 10.2 Los consumibles de Landsat 9 duran al menos 10 años frente a una vida de diseño de 5 años. ¿Razón de extensión?

1. 10/5.

Respuesta: 2.

Ejemplo 10.3 Dragonfly pasará tres años volando en Titán. ¿Fin de la misión como pronto?

1. 2034 + 3.

Respuesta: 2037 (calculado).

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Nombrar los cuatro métodos de verificación.

   Prueba, análisis, inspección, demostración.

2. ¿Por qué integrar de forma incremental?

   Para atribuir los problemas al último cambio.

3. El Hubble se lanzó en 1990; ¿en qué año fue su 34.° aniversario?

2024.

4. ¿Qué es la inyección de fallos?

   Provocar fallos deliberadamente en pruebas.

Ideas erróneas comunes

Mito: Probarlo todo al final.

En realidad: Integra y prueba por pasos.

Mito: El análisis vale menos que la prueba.

En realidad: Cada método se ajusta a requisitos distintos.

Mito: La vida de diseño es el final.

En realidad: Las misiones suelen durar más.

Tarjetas de estudio

Verificación por prueba

Medirlo.

Análisis

Demostrar mediante cálculo.

Inspección

Mirarlo.

Demostración

Mostrar que funciona.

HIL

Hardware en el bucle.

Puesta en servicio

Comprobación tras el lanzamiento.

Cuestionario de autoevaluación

1. Llegada de Dragonfly...

2034

2028

2030

2040

2034. 2028 + 6.

2. Razón de Landsat 9...

2

0.5

5

10

2. 10/5.

3. Número de métodos...

4

2

3

6

4. T, A, I, D.

4. Banco de pruebas con software real...

hardware en el bucle

FMEA

Diagrama N^2

estudio de compromisos

hardware en el bucle. HIL.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NASA dice que el equipo de Dragonfly construyó las capacidades de vuelo de forma incremental, desde hacer girar un solo rotor hasta un primer vuelo simulado completo, y planea repetirlo en el sistema de vuelo real.

La NASA señala que la calibración a bordo y la redundancia de Landsat 9 mantienen sus datos precisos y fiables durante la vida de la misión, ampliando el registro más largo de observación de la Tierra.

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

Fuentes: NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/) · NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manual gratuito de la NASA, sección 5.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Clases gratuitas del MIT.

☐ **Terminé esta unidad**

Problemas

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

1. El ciclo de vida de la ingeniería de sistemas y los requisitos
   4 problemas
2. Arquitectura, interfaces e integración
   4 problemas
3. Fiabilidad y redundancia
   4 problemas
4. Análisis de seguridad: AMFE y árboles de fallos
   4 problemas
5. Aviónica digital y buses de datos
   4 problemas
6. Sensores de navegación: IMU, GNSS, cámaras y lidar
   4 problemas
7. Fusión de sensores y el filtro de Kalman
   4 problemas
8. Comunicación y vigilancia: ADS-B
   4 problemas
9. Software de vuelo en tiempo real

4 problemas

10. Integración, verificación y operaciones
    4 problemas

El laboratorio (Avionics and systems lab)

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

Cada práctica se hace en una simulación gratuita o una hoja de cálculo, así que no hay riesgos eléctricos. No abras ni modifiques la electrónica de aviones, drones o vehículos reales para este curso. 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: Crecimiento de interfaces y un diagrama N²

SEMANA 2

Objetivo: Construye un diagrama N² para un pequeño conjunto de aviónica y observa cómo crecen las interfaces potenciales con el número de cajas.

$$I = n(n-1)/2$$

I=n(n-1)/2

Interfaces potenciales

Procedimiento

1. Enumera las cajas: computador de vuelo, IMU, receptor GNSS, radio, pantalla, unidad de potencia, datos de aire, piloto automático.
2. Dibuja una cuadrícula de 8 × 8 con las cajas en la diagonal y marca qué pares intercambian datos.
3. Calcula n(n − 1)/2 para n = 4, 8 y 12.
4. Cuenta tus celdas marcadas y compáralas con el máximo.

Tabla de datos

Cajas n	Interfaces potenciales
4	6
8	28
12	66

Valores calculados.

Cálculo de ejemplo

1. 8 × 7/2 = 28.
2. 12 × 11/2 = 66.

> **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: NASA: la actualización de su manual incluye la ingeniería de sistemas basada en modelos. NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

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

Práctica B: Fiabilidad de unidades simples, dobles y triples

SEMANA 4

Objetivo: Compara en una hoja de cálculo una unidad sola, un par en paralelo y una votación 2 de 3 a lo largo del tiempo.

$$R_{2/3} = 3R^2 - 2R^3$$

R_2/3=3R^2-2R^3

Votación dos de tres

Procedimiento

1. Introduce λ = 10^{-5} por hora.
2. Calcula R = e^(−λt) para t = 1000, 10000 y 50000 h.
3. Calcula el par en paralelo y la votación 2 de 3.
4. Encuentra dónde 2 de 3 cae por debajo de una unidad sola (R = 0.5).

Tabla de datos

t (h)	Simple	Doble	2 de 3
1000	0.990	0.9999	0.9997
10,000	0.905	0.991	0.975
50,000	0.607	0.845	0.657

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. R(50,000) = e^(−0.5) = 0.607.
2. 2 de 3 = $3(0.607)^2 - 2(0.607)^3$ = 0.657.

> **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: NASA: el Hubble puede hacer observaciones científicas con un solo giroscopio en funcionamiento. NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/)

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

Práctica C: Circuitos redundantes

SEMANA 5

Objetivo: Usa PhET Circuit Construction Kit: DC para comparar bombillas en serie y en paralelo cuando una falla.

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

`R_p=(R_1R_2)/(R_1+R_2)`

Resistencia en paralelo

Procedimiento

1. Monta dos bombillas de 10 Ω en serie con una batería de 12 V y luego corta un cable.
2. Vuelve a montarlas en paralelo y corta una rama.
3. Mide la corriente antes y después de cada fallo.
4. Relaciona el resultado con la fiabilidad en serie y en paralelo.

Tabla de datos

Circuito	Resistencia (Ω)	Corriente a 12 V (A)
Paralelo, ambas bien	5	2.4
Paralelo, una fallada	10	1.2
Serie, ambas bien	20	0.6

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. 10 × 10/20 = 5 Ω.
2. 12/5 = 2.4 A.

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

Alternativa en casa o virtual

- Funciona en un navegador web.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc)

Vínculo con el planeta: NASA: la redundancia a bordo de Landsat 9 mantiene sus datos fiables.
NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

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

Práctica D: Resolución del ADC y volumen de datos

SEMANA 7

Objetivo: Calcula el tamaño del paso y la SNR para varias resoluciones de conversor.

$$\Delta V = V_{FS}/2^N$$

```
Δ V=V_FS/2^N
```

Paso del ADC

Procedimiento

1. Introduce un fondo de escala de 10 V.
2. Calcula el paso y la SNR para 8, 12 y 16 bits.
3. Calcula el tiempo de palabra para 32 bits a 100 kbit/s y a 1 Mbit/s.
4. Comenta por qué Landsat 9 usa 14 bits.

Tabla de datos

Bits	Paso (mV)	SNR (dB)
8	39.06	49.9
12	2.441	74.0
16	0.1526	98.1

Valores calculados.

Cálculo de ejemplo

1. 10/256 = 39.06 mV.
2. 6.02 × 16 + 1.76 = 98.1 dB.

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

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

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

Vínculo con el planeta: NASA: Landsat 9 tiene una resolución radiométrica de 14 bits. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

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

Práctica E: Deriva inercial y fusión de sensores

SEMANA 9

Objetivo: Modela la deriva de posición por un sesgo del acelerómetro y luego fusiona dos sensores de posición.

$$e = \tfrac{1}{2} b t^2$$

e=12bt^2

Deriva por sesgo

Procedimiento

1. Introduce b = 9.807 × 10⁻³ m/s² (1 mili-g).
2. Calcula el error a 10, 60 y 600 s.
3. Fusiona sensores de σ = 4 m y 3 m y calcula la ganancia de Kalman para P = 16, R = 9.
4. Añade ruido con una columna de números aleatorios y observa el filtro.

Tabla de datos

t (s)	Error (m)
10	0.49
60	17.65
600	1765

Valores de ejemplo calculados.

Cálculo de ejemplo

1. ½ × 9.807 × 10⁻³ × 100 = 0.49 m.
2. σ fusionada = √5.76 = 2.4 m.

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

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

Vínculo con el planeta: NASA: la prueba de Dragonfly usó datos simulados de cámara, IMU y lidar. NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

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

Práctica F: Planificabilidad rate-monotonic

SEMANA 12

Objetivo: Calcula cotas de utilización y prueba conjuntos de tareas en una hoja de cálculo.

$$U \leq n(2^{1/n} - 1)$$

Cota rate-monotonic

Procedimiento

1. Calcula la cota para n = 1 a 4.
2. Introduce el conjunto de tareas de la unidad 9 y calcula U.
3. Añade una tarea hasta que U supere la cota.
4. Comenta qué hacer cuando no se cumple la cota.

Tabla de datos

n	Cota
1	1.000
2	0.828
3	0.780
4	0.757

Valores calculados.

Cálculo de ejemplo

1. 2(√2 − 1) = 0.828.
2. 4(2^(1/4) − 1) = 0.757.

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

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/)

Vínculo con el planeta: NASA: Dragonfly debe volar de forma autónoma, sin ayuda en tiempo real desde la Tierra. NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

☐ **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. ¿Interfaces potenciales para 10 cajas?

    1. $10 \times 9/2$.

    Respuesta: 45.

2. ¿Par en paralelo, $\lambda = 2 \times 10^{-5}$ /h durante 5000 h?

    1. $R = e^{\wedge}(-0.1) = 0.905$.
    2. $1 - 0.095^2$.

    Respuesta: 0.991.

3. ¿NPR para S = 6, O = 3, D = 7?

    1. $6 \times 3 \times 7$.

    Respuesta: 126.

4. ¿Paso de un ADC de 10 bits en 5 V?

    1. 5/1024.

    Respuesta: 4.88 mV.

5. ¿SNR ideal para 10 bits?

    1. $6.02 \times 10 + 1.76$.

    Respuesta: 62.0 dB.

Serie final de práctica (unidades 1–10)

1. ¿Deriva tras 30 s con un sesgo de 2 mili-g?

    1. $\frac{1}{2} \times 0.01961 \times 900$.

Respuesta: 8.83 m.

2. Fusiona dos sensores de σ = 5 m.

    1. σ² = 12.5.

    Respuesta: 3.54 m.

3. ¿Ganancia de Kalman para P = 4, R = 1?

    1. 4/5.

    Respuesta: 0.8.

4. ¿Horizonte radioeléctrico desde 1000 m hasta una antena de 10 m?

    1. 4.12(31.62 + 3.162).

    Respuesta: 143.3 km.

5. ¿Utilización para las tareas 1/5, 2/10, 3/30 ms?

    1. 0.2 + 0.2 + 0.1.

    Respuesta: 0.5.

6. ¿Disponibilidad, MTBF 500 h, MTTR 5 h?

    1. 500/505.

    Respuesta: 0.990.

Hoja de fórmulas

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

$$I = n(n-1)/2,\ U_{bus} = B/B_{max}$$

$$R = e^{-\lambda t},\ R_p = 1 - \prod(1 - R_i),\ R_{2/3} = 3R^2 - 2R$$

$$RPN = SOD,\ P_{OR} = 1 - \prod(1 - p_i),\ P_{AND} = \prod$$

$$\Delta V = V_{FS}/2^N,\ SNR = 6.02N + 1.76$$

$$e = \tfrac{1}{2} b t^2,\ \rho = c\Delta t$$

$$\sigma^2 = \sigma_1^2\sigma_2^2/(\sigma_1^2 + \sigma_2^2),\ K = P/(P + R)$$

$$d = 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}),\ L = 20\log_{10}(4\pi d/\lambda)$$

$$U = \sum C_i/T_i \le n(2^{1/n} - 1)$$

$$A = MTBF/(MTBF + MTTR)$$

Constantes

Constante	Valor
Velocidad de la luz	c = 299792458 m/s (exacto)
Gravedad estándar	g = 9.80665 m/s²
Frecuencia de ADS-B (valor de libro)	1090 MHz
ARINC 429 de alta velocidad (valor de libro)	100 kbit/s
MIL-STD-1553 (valor de libro)	1 Mbit/s
Horas por año	8760 h

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

Textos y simulaciones gratuitos

Usa estos textos, clases y simulaciones gratuitos junto con el curso.

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manual gratuito de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Clases gratuitas del MIT.
- FAA: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) (https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb): Presentación de la FAA.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Circuitos y redundancia.
- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): Artículo sobre pruebas de aviónica.
- NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/): La redundancia en la práctica.

Glosario

ADS-B
Vigilancia dependiente automática por radiodifusión.

ARINC 429
Bus de datos de aviónica unidireccional.

Disponibilidad
Fracción del tiempo en que un sistema funciona.

FMEA
Análisis de modos de fallo y efectos.

Árbol de fallos
Lógica de fallos descendente.

Hardware en el bucle
Software y hardware reales con entradas simuladas.

IMU
Unidad de medición inercial.

Documento de control de interfaces
Acuerdo sobre una interfaz.

Filtro de Kalman
Estimador recursivo óptimo.

Lidar
Telemetría láser.

MBSE
Ingeniería de sistemas basada en modelos.

MIL-STD-1553
Bus de datos de comando/respuesta.

MTBF
Tiempo medio entre fallas.

Diagrama N²
Matriz de interfaces.

Planificación rate-monotonic
El periodo más corto recibe la prioridad más alta.

Redundancia
Unidades adicionales de respaldo.

Requisito
Enunciado verificable de una necesidad.

Modo seguro
Configuración de protección de una nave.

Modelo en V
Descomponer y luego integrar y verificar.

Temporizador perro guardián
Reinicia un procesador colgado.

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	Vincula cada decisión de diseño a un requisito, revisa interfaces y casos de fallo, mantiene unidades y probabilidades coherentes y explica los compromisos con palabras sencillas.
3 · Competente	Resuelve las series de práctica y de examen con pequeños errores y comprueba las unidades.
2 · En desarrollo	Sigue los ejemplos resueltos pero confunde fiabilidad en serie y en paralelo, o puertas O e Y.
1 · Inicial	Calcula sin un requisito ni un diagrama de bloques; necesita repasar la unidad.

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

- Transferencia de calor AERO 440
- Proyecto final (aeronave o CubeSat) AERO 490
- Propulsión AERO 410
- Todos los cursos