

Diseño y Construcción de una Computadora de Vuelo para Vehículos Autónomos con Tolerancia a Fallas

Federico Ignacio Nuñez Frau - 98211

Director: Dr. Ing. Claudio Pose (FIUBA)

Co-Director: Ing. Leonardo Garberoglio (UTN-FRSN)

DD/MM/2024



Contenidos

- 1 Introducción y Motivación**
- 2 Sistemas Tolerantes a Fallas**
- 3 Diseño y Construcción de la Computadora de Vuelo**
- 4 Sistema Implementado**
- 5 Resultados**
- 6 Conclusiones**

Introducción y Motivación

Vehículos Autónomos

Vehículos Autónomos

- Los vehículos autónomos no cuentan con una tripulación ni un piloto a bordo. Estos son comandados de forma remota, o bien tienen la capacidad de hacerlo por sí solos.

Vehículos Autónomos

- Los vehículos autónomos no cuentan con una tripulación ni un piloto a bordo. Estos son comandados de forma remota, o bien tienen la capacidad de hacerlo por sí solos.
- Gran variedad de sensores + computadora central = sistema de navegación y reconocimiento del entorno.

Vehículos Autónomos

- Los vehículos autónomos no cuentan con una tripulación ni un piloto a bordo. Estos son comandados de forma remota, o bien tienen la capacidad de hacerlo por sí solos.
- Gran variedad de sensores + computadora central = sistema de navegación y reconocimiento del entorno.



Vehículos Autónomos

- Originalmente desarrollados para uso en aplicaciones militares.

Vehículos Autónomos

- Originalmente desarrollados para uso en aplicaciones militares.



Vehículos Autónomos

- Originalmente desarrollados para uso en aplicaciones militares.
- Desarrollo y mantenimiento menos costoso frente a vehículos tripulados.



Vehículos Autónomos

- Originalmente desarrollados para uso en aplicaciones militares.
- Desarrollo y mantenimiento menos costoso frente a vehículos tripulados.
- Motivación: Realizar tareas que de otra forma pondrían en riesgo a la tripulación.



Vehículos Autónomos



Vehículos Autónomos

- Cada vez tienen mayor presencia en zonas civiles.

- COMPLETAR CON EJEMPLOS DE ACCIDENTES DE DRONES

Vehículos Autónomos

- Cada vez tienen mayor presencia en zonas civiles.
- La incorporación de drones permite realizar tareas costosas, riesgosas o críticas de forma segura.

- COMPLETAR CON EJEMPLOS DE ACCIDENTES DE DRONES

Vehículos Autónomos

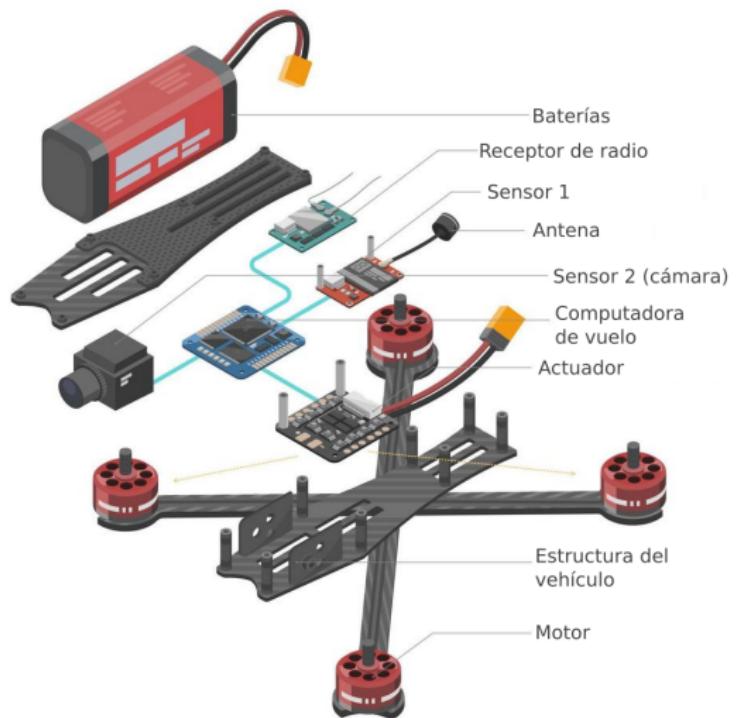
- Cada vez tienen mayor presencia en zonas civiles.
- La incorporación de drones permite realizar tareas costosas, riesgosas o críticas de forma segura.
- Teniendo esto en cuenta, la confiabilidad es un aspecto que toma mayor relevancia.
- COMPLETAR CON EJEMPLOS DE ACCIDENTES DE DRONES

Computadora de Vuelo

- Los drones se componen de varios elementos.

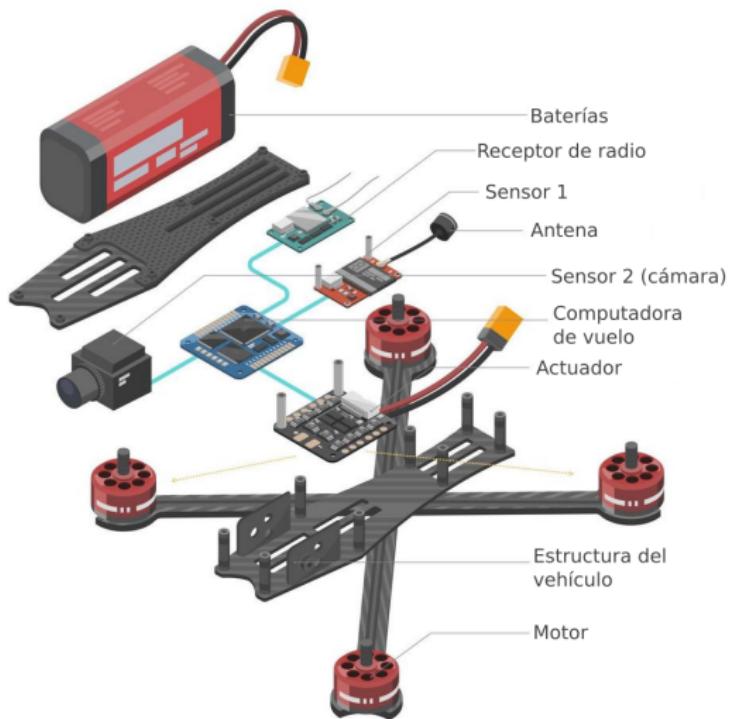
Computadora de Vuelo

- Los drones se componen de varios elementos.



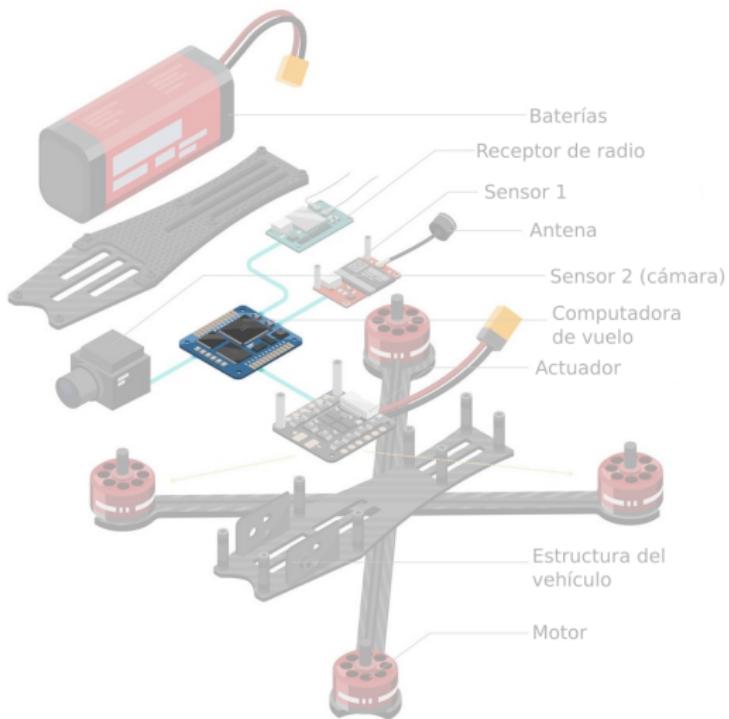
Computadora de Vuelo

- Los drones se componen de varios elementos.
- Todos ellos son susceptible de manifestar fallas.



Computadora de Vuelo

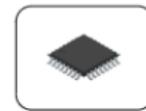
- Los drones se componen de varios elementos.
- Todos ellos son susceptible de manifestar fallas.
- En este trabajo se abordan aspectos relacionados a la **computadora de vuelo**.



Computadora de Vuelo

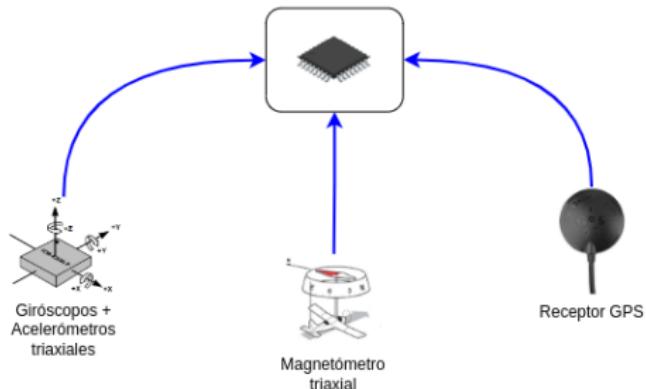
Computadora de Vuelo

- Se encarga de ejecutar los algoritmos de guiado, navegación y control para estabilizar el vehículo y guiarlo en su trayectoria.



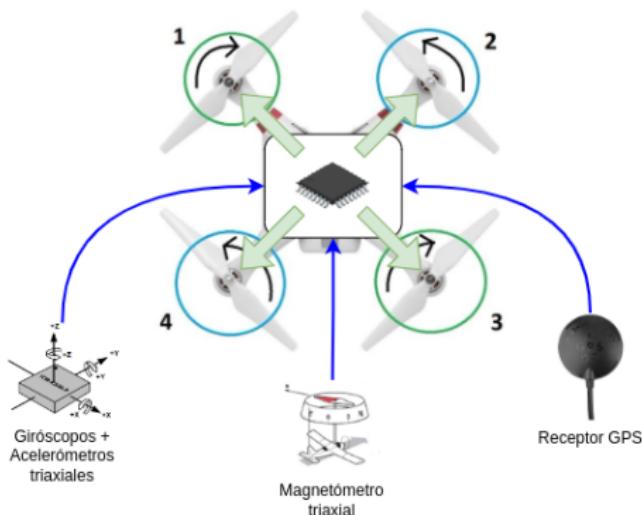
Computadora de Vuelo

- Se encarga de ejecutar los algoritmos de guiado, navegación y control para estabilizar el vehículo y guiarlo en su trayectoria.
- Adquiere datos de los sensores del vehículo.



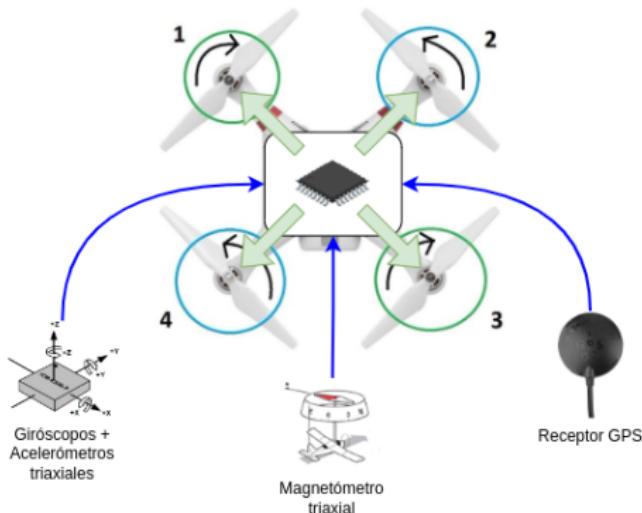
Computadora de Vuelo

- Se encarga de ejecutar los algoritmos de guiado, navegación y control para estabilizar el vehículo y guiarlo en su trayectoria.
- Adquiere datos de los sensores del vehículo.
- Actúa sobre los motores.



Computadora de Vuelo

- Se encarga de ejecutar los algoritmos de guiado, navegación y control para estabilizar el vehículo y guiarlo en su trayectoria.
- Adquiere datos de los sensores del vehículo.
- Actúa sobre los motores.
- La computadora de vuelo es el elemento central en un vehículo aéreo no tripulado.



Tolerancia a Fallas

- Cada vez tienen mayor presencia en zonas civiles.

Tolerancia a Fallas

- Cada vez tienen mayor presencia en zonas civiles.
- Teniendo esto en cuenta, la **confiabilidad** es un aspecto que toma mayor relevancia.

Tolerancia a Fallas

- Cada vez tienen mayor presencia en zonas civiles.
- Teniendo esto en cuenta, la **confiabilidad** es un aspecto que toma mayor relevancia.
- En vehículos aéreos como aviones comerciales y militares se utilizan técnicas de **tolerancia a fallas**.

Tolerancia a Fallas

- Cada vez tienen mayor presencia en zonas civiles.
- Teniendo esto en cuenta, la **confiabilidad** es un aspecto que toma mayor relevancia.
- En vehículos aéreos como aviones comerciales y militares se utilizan técnicas de **tolerancia a fallas**.



Tolerancia a Fallas

- Cada vez tienen mayor presencia en zonas civiles.
- Teniendo esto en cuenta, la **confiabilidad** es un aspecto que toma mayor relevancia.
- En vehículos aéreos como aviones comerciales y militares se utilizan técnicas de **tolerancia a fallas**.
- También en drones de uso militar.



Tolerancia a Fallas

- Cada vez tienen mayor presencia en zonas civiles.
- Teniendo esto en cuenta, la **confiabilidad** es un aspecto que toma mayor relevancia.
- En vehículos aéreos como aviones comerciales y militares se utilizan técnicas de **tolerancia a fallas**.
- También en drones de uso militar.



- El aspecto más importante en aviones comerciales: $10^{-9}/h$ de vuelo.

Tolerancia a Fallas

- Cada vez tienen mayor presencia en zonas civiles.
- Teniendo esto en cuenta, la **confiabilidad** es un aspecto que toma mayor relevancia.
- En vehículos aéreos como aviones comerciales y militares se utilizan técnicas de **tolerancia a fallas**.
- También en drones de uso militar.



- El aspecto más importante en aviones comerciales: $10^{-9}/h$ de vuelo.
- Aviones militares: $10^{-7}/h$ de vuelo.

Tolerancia a Fallas

- Cada vez tienen mayor presencia en zonas civiles.
- Teniendo esto en cuenta, la **confiabilidad** es un aspecto que toma mayor relevancia.
- En vehículos aéreos como aviones comerciales y militares se utilizan técnicas de **tolerancia a fallas**.
- También en drones de uso militar.



- El aspecto más importante en aviones comerciales: $10^{-9}/h$ de vuelo.
- Aviones militares: $10^{-7}/h$ de vuelo.
- Drones militares: $10^{-5}/h$ de vuelo.

Tolerancia a Fallas

- Cada vez tienen mayor presencia en zonas civiles.
- Teniendo esto en cuenta, la **confiabilidad** es un aspecto que toma mayor relevancia.
- En vehículos aéreos como aviones comerciales y militares se utilizan técnicas de **tolerancia a fallas**.
- También en drones de uso militar.



- El aspecto más importante en aviones comerciales: $10^{-9}/h$ de vuelo.
- Aviones militares: $10^{-7}/h$ de vuelo.
- Drones militares: $10^{-5}/h$ de vuelo.
- ¿Drones civiles/comerciales?

Objetivos

- 1 Estudiar** las características de los sistemas con tolerancia a fallas aplicados en vehículos aéreos, tanto tripulados como no tripulados.
- 2 Entender** los requerimientos para implementar un sistema con tolerancia a fallas.
- 3 Diseñar** una computadora de vuelo para vehículos aéreos no tripulados, para ser enviada a fabricar.
- 4 Desarrollar** un firmware que demuestre la capacidad de ser utilizada en un sistema con tolerancia a fallas.

Sistemas Tolerantes a Fallas

Confiabilidad

Confiabilidad

Probabilidad de que un sistema pueda cumplir con su función de manera correcta en un intervalo de tiempo $[t_0; t]$, dado que sí podía hacerlo en t_0 .

- $R(t) = \mathbb{P}(\text{no ocurra ninguna falla en } [t_0; t])$
- Incrementar esta probabilidad equivale a incrementar la confiabilidad.
- Se busca **evitar** la ocurrencia de fallas en el sistema.
- Esto tiene algunos inconvenientes:
 - 1 Uso de componentes que pueden ser muy costosos.
 - 2 Dificultades en la etapa de diseño del sistema.
 - 3 Errores de diseño no tenidos en cuenta pueden llegar a causar fallas.

Tolerancia a Fallas

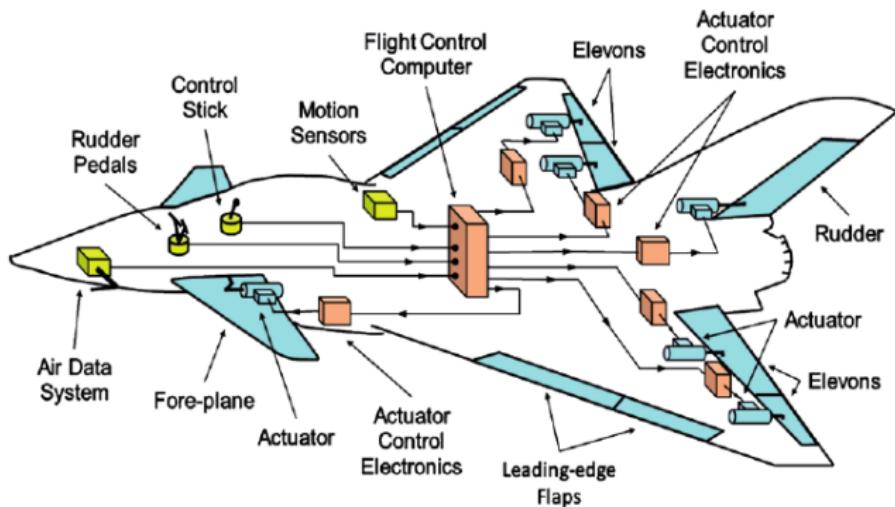
- Una decisión más conservadora consiste en **tolerar** fallas.

Sistema Tolerante a Fallas

No es aquel donde no ocurren fallas. Al contrario, se acepta que las fallas pueden ocurrir. En consecuencia, incluyen mecanismos para que, a pesar de la ocurrencia de una falla, el sistema pueda seguir cumpliendo su función.

- Una de las técnicas más comunes es el uso de **redundancias**.
- Esta consiste en el uso de varias réplicas que realicen las mismas tareas dentro del sistema.
- Por ejemplo, sensores, actuadores, computadoras de vuelo, etc.

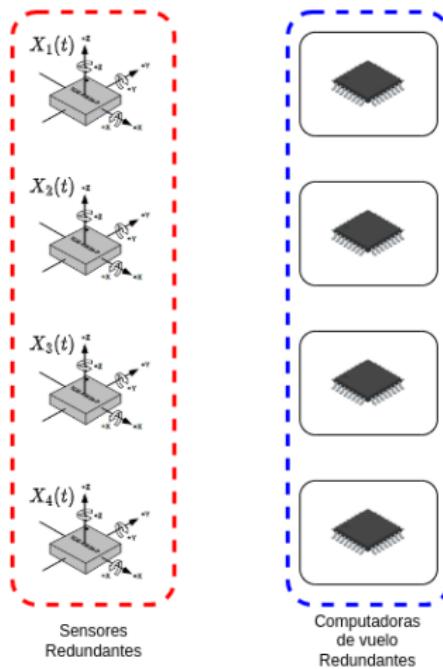
Tolerancia a Fallas: Avión



- Sensores x4
- Actuadores x4
- Computadora de vuelo x4

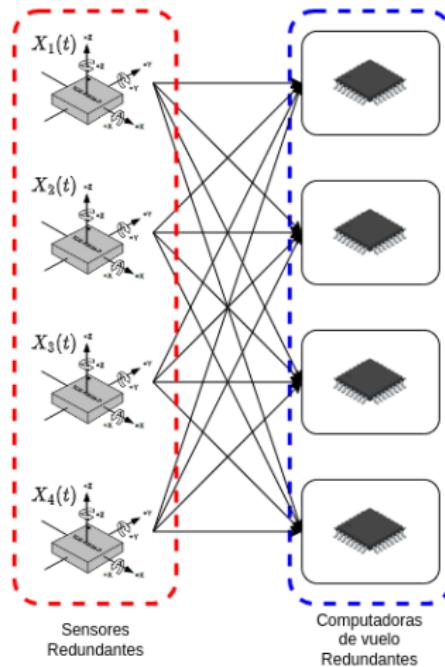
Tolerancia a Fallas: Avión

Tolerancia a Fallas: Avión



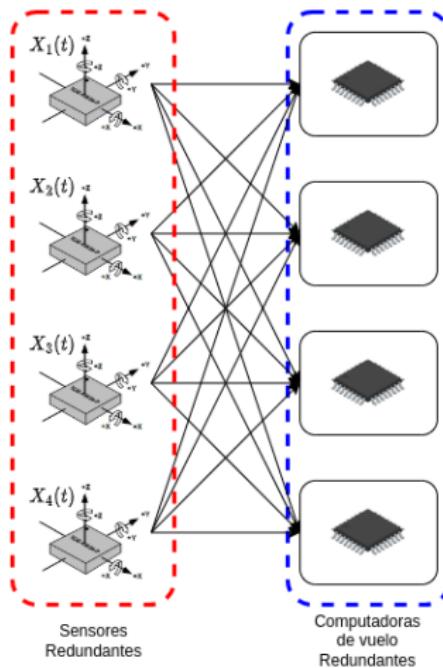
Tolerancia a Fallas: Avión

- Todas las computadoras de vuelo adquieren datos de **todos** los sensores redundantes.



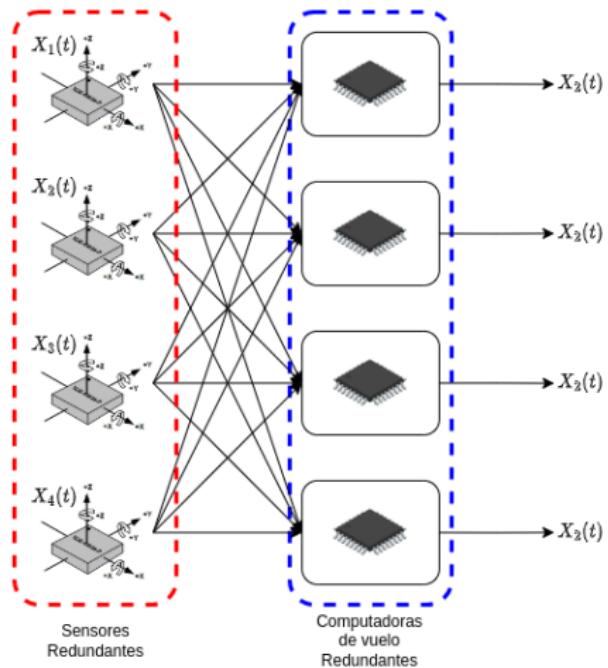
Tolerancia a Fallas: Avión

- Todas las computadoras de vuelo adquieren datos de **todos** los sensores redundantes.
- A partir de la **comparación de valores**, se detectan fallas de los sensores.



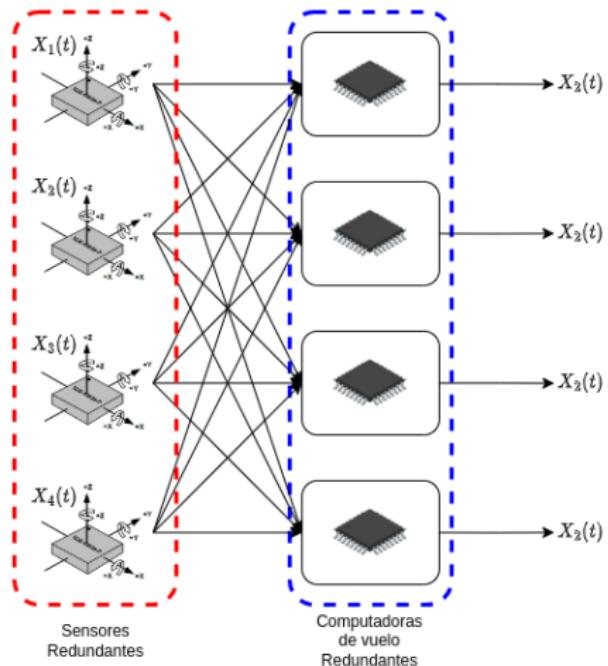
Tolerancia a Fallas: Avión

- Todas las computadoras de vuelo adquieren datos de **todos** los sensores redundantes.
- A partir de la **comparación de valores**, se detectan fallas de los sensores.
- Para tolerar la falla, cada computadora de vuelo selecciona **un único valor**.

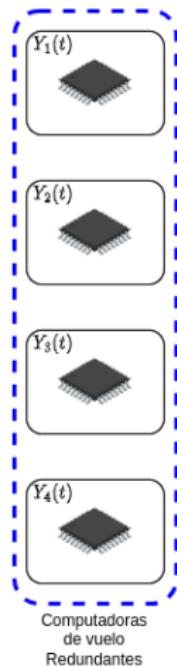


Tolerancia a Fallas: Avión

- Todas las computadoras de vuelo adquieren datos de **todos** los sensores redundantes.
- A partir de la **comparación de valores**, se detectan fallas de los sensores.
- Para tolerar la falla, cada computadora de vuelo selecciona **un único valor**.
- Para ello hay un intercambio entre las 4 computadoras de vuelo.

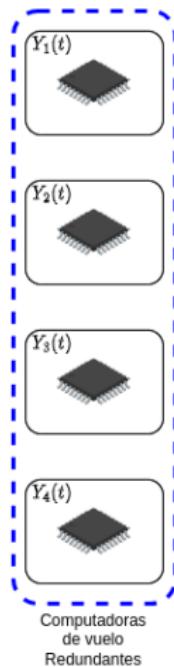


Tolerancia a Fallas: Avión



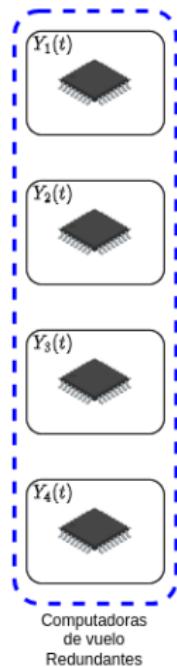
Tolerancia a Fallas: Avión

- Se calcula la señal a aplicar a los actuadores.



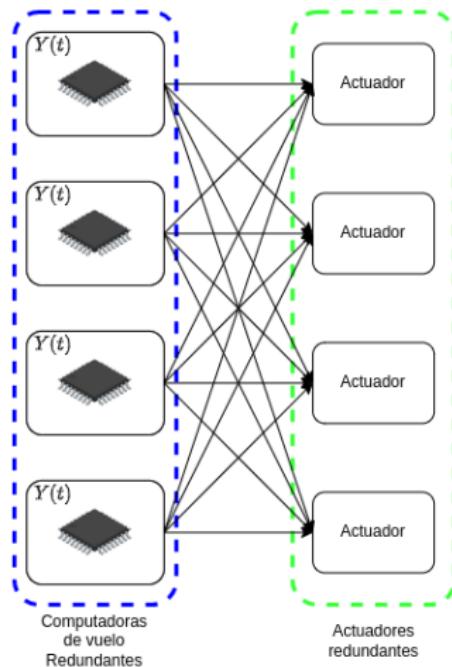
Tolerancia a Fallas: Avión

- Se calcula la señal a aplicar a los actuadores.
- Se realiza un nuevo intercambio para tolerar fallas de las computadoras de vuelo.



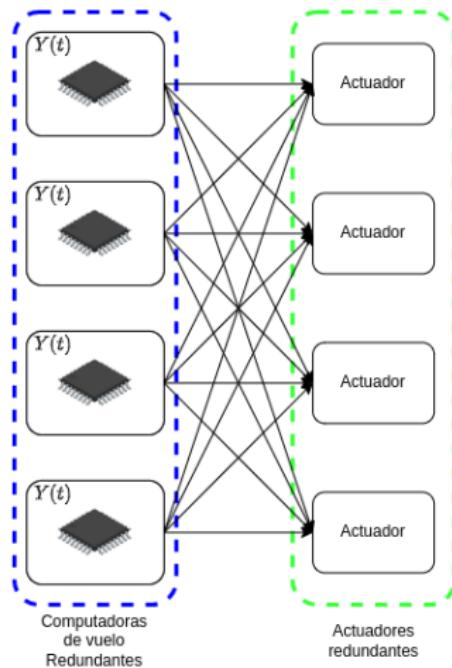
Tolerancia a Fallas: Avión

- Se calcula la señal a aplicar a los actuadores.
- Se realiza un nuevo intercambio para tolerar fallas de las computadoras de vuelo.
- Se decide por **un único valor** de señal $Y(t)$.

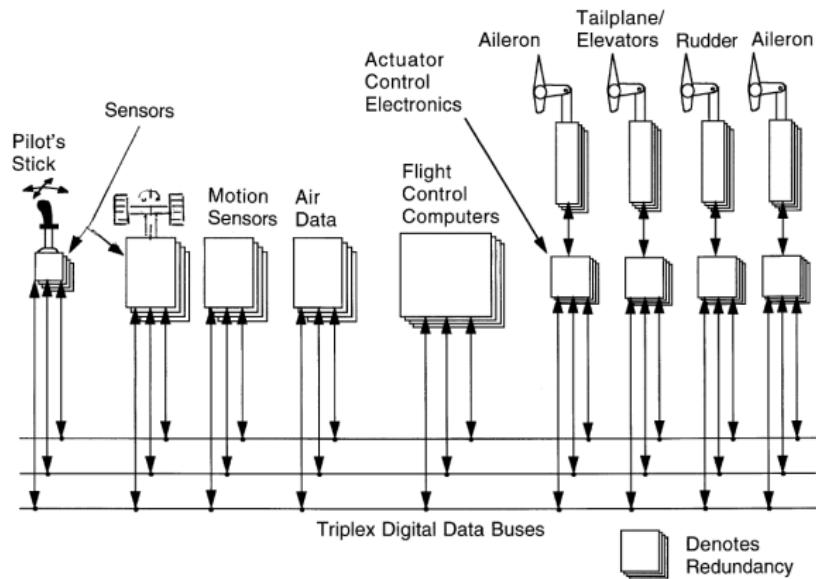


Tolerancia a Fallas: Avión

- Se calcula la señal a aplicar a los actuadores.
- Se realiza un nuevo intercambio para tolerar fallas de las computadoras de vuelo.
- Se decide por **un único valor** de señal $Y(t)$.
- Se aplica la señal a los actuadores.



Tolerancia a Fallas: Avión



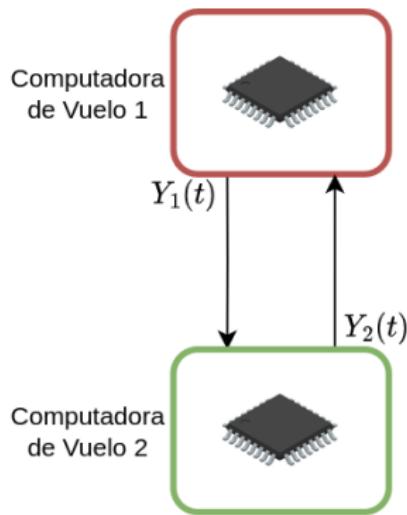
- Se utiliza un **bus de comunicaciones** redundante.
- Acceso al medio por turnos: *time-division multiple access*.

Tolerancia a Fallas: Drones

- Existen algunas computadoras de vuelo comerciales que ofrecen la posibilidad de trabajar con redundancias.
- Sin embargo sus costos son muy elevados.
- Pueden encontrarse varios trabajos de computadoras de vuelo redundantes que utilizan componentes económicos y accesibles.
- Los trabajos que se tomaron como referencia utilizan configuraciones variadas: redundancia doble, triple y cuádruple.
- Se mencionan las características comunes.

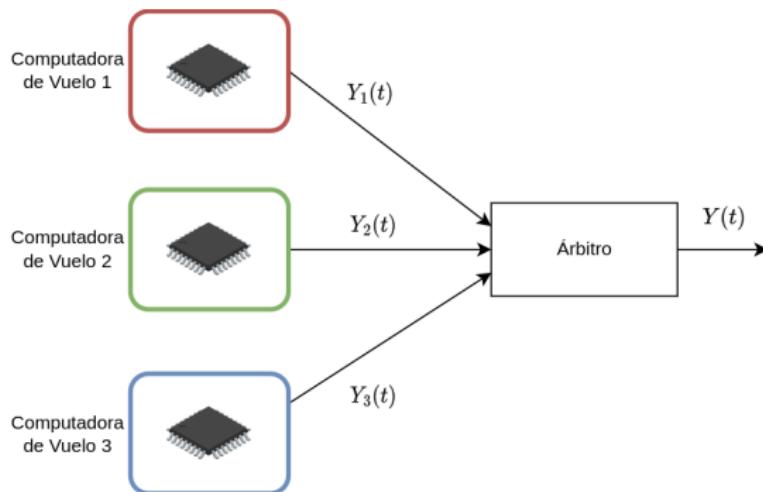
Tolerancia a Fallas: Redundancia Doble

- Configuración Simple.
- La comparación permite detectar si ocurrió una falla o no.
- Pero **no se puede saber cuál de ellas lo hizo!**
- Cada réplica debería ejecutar una rutina para detectar la falla.
- Esto puede perjudicar el determinismo temporal del sistema de control.



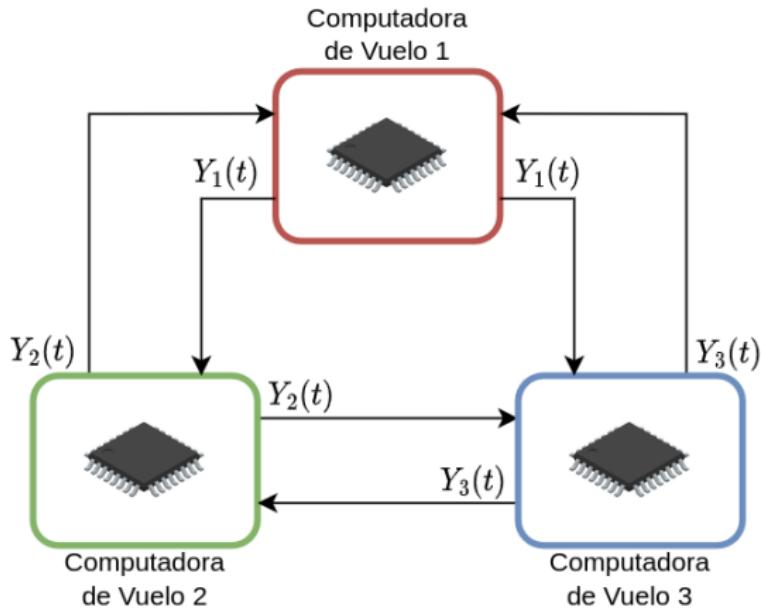
Tolerancia a Fallas: Redundancia Triple

- Se asume que una sola de ellas fallará de forma simultánea.
- La comparación sí permite detectar cuál falló: 2 de 3.
- Punto Singular de Falla: ¿Qué sucede si falla el Árbitro?
- Este debe ser altamente confiable, volviéndolo muy costoso.



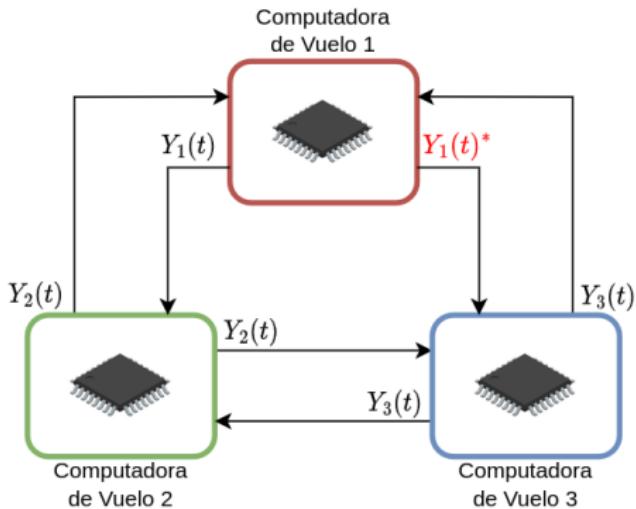
Tolerancia a Fallas: Redundancia Triple

- Puede eliminarse el árbitro utilizando la siguiente configuración.
- Esta configuración es como la del caso del avión.



Problema del Consenso

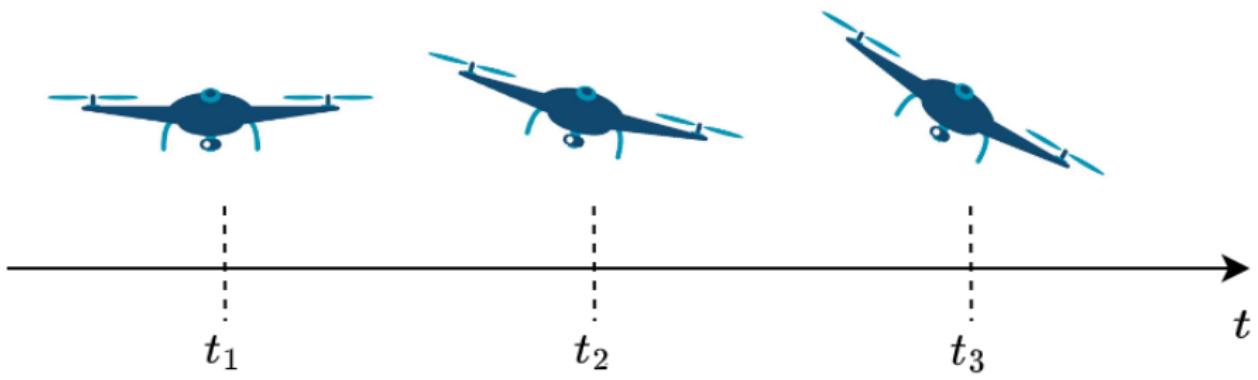
- Si todas las réplicas utilizan los mismos valores de entrada.
- Entonces llegan a la misma conclusión acerca del valor seleccionado.
- Que pasa si...



- La configuración no tolera este comportamiento.
- Este problema se denomina: *The Byzantine General's Problem*.
- Leslie Lamport, Rober Shostak y Marshall Pease, 1982.
- Se requieren $3m + 1$ réplicas para tolerar m "traidores".

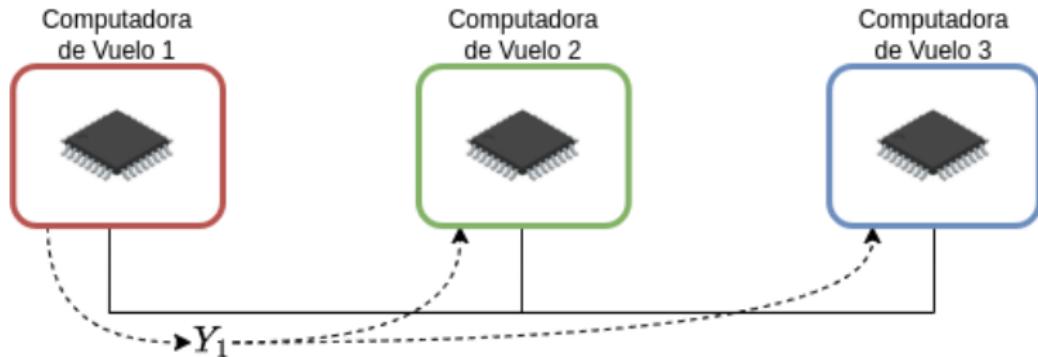
Problema del Sincronismo

- Las tareas de estimación de la pose del vehículo, y de cálculo de la señal a aplicar sobre los motores tienen requerimientos temporales fuertes.
- Periódicamente debe obtenerse un nuevo valor, acorde al estado en el que se encuentra el vehículo para mantenerlo estable y guiarlo.
- Para que las comparaciones entre réplicas tengan sentido, los resultados deben corresponder al mismo instante temporal.
- Esto se logra a través de una **sincronización** entre las réplicas.



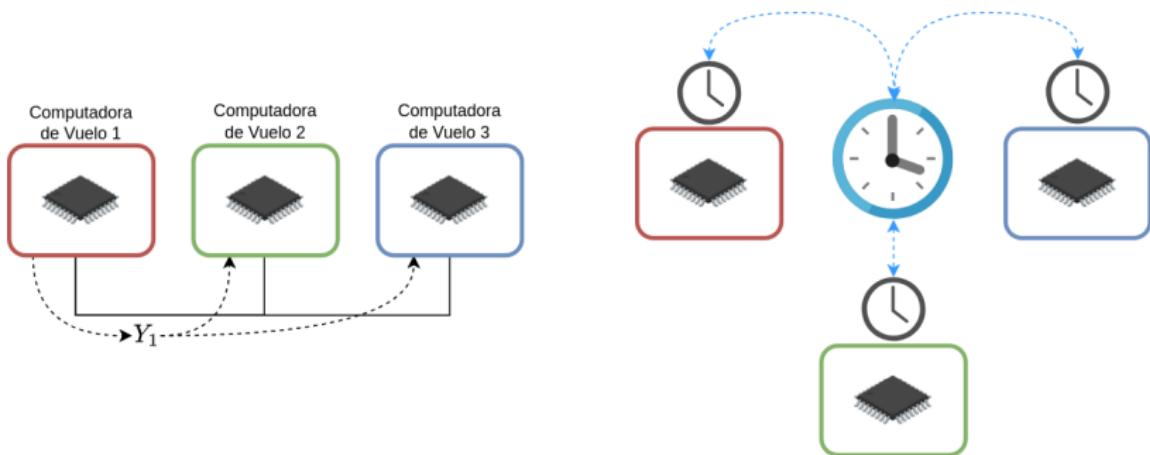
Solución Sencilla: Bus de Comunicaciones + Sincronización

- Una solución sencilla es utilizar un bus de comunicaciones.
- Cada mensaje es recibido por todas las réplicas.
- No hay “traidores”.
- Las colisiones pueden perjudicar el determinismo.
- Se aprovecha la sincronización para ordenar el uso del bus, acceso al medio TDMA.
- Esto es lo que ocurría en el caso del avión.



Requerimientos del Sistema

- 1 Uso de un bus de comunicaciones.
- 2 Funcionamiento sincronizado de las réplicas.



Diseño y Construcción de la Computadora de Vuelo

Objetivos

Objetivos

- 1 Incorporar interfaz de comunicación dedicada a la tolerancia a fallas.

Objetivos

- 1** Incorporar interfaz de comunicación dedicada a la tolerancia a fallas.
- 2** Actualizar componentes.

Objetivos

- 1** Incorporar interfaz de comunicación dedicada a la tolerancia a fallas.
- 2** Actualizar componentes.
- 3** Incorporar conectores necesarios para integración de sensores y módulos externos.

Objetivos

- 1** Incorporar interfaz de comunicación dedicada a la tolerancia a fallas.
- 2** Actualizar componentes.
- 3** Incorporar conectores necesarios para integración de sensores y módulos externos.
- 4** Mantener las dimensiones reducidas.

Antecedentes

- En el Laboratorio de Automática y Robótica (LAR) se han desarrollado computadoras de vuelo.

Antecedentes

- En el Laboratorio de Automática y Robótica (LAR) se han desarrollado computadoras de vuelo.

Primera Versión

- LPC-1769, Cortex M3, 120 MHz, sin unidad de punto flotante.
- Sensores IMU, Barómetro y Magnetómetro fuera de fabricación.
- Dimensiones: 93x93 mm.



V1: 2013

Antecedentes

- En el Laboratorio de Automática y Robótica (LAR) se han desarrollado computadoras de vuelo.

Primera Versión

- LPC-1769, Cortex M3, 120 MHz, sin unidad de punto flotante.
- Sensores IMU, Barómetro y Magnetómetro fuera de fabricación.
- Dimensiones: 93x93 mm.



Segunda Versión

- Mismas prestaciones que la versión 1.
- Se redujeron las dimensiones a 100x60mm.
- Se removió el magnetómetro.



V1: 2013

V2: 2015

Antecedentes

- En el Laboratorio de Automática y Robótica (LAR) se han desarrollado computadoras de vuelo.

Primera Versión

- LPC-1769, Cortex M3, 120 MHz, sin unidad de punto flotante.
- Sensores IMU, Barómetro y Magnetómetro fuera de fabricación.
- Dimensiones: 93x93 mm.



V1: 2013

Segunda Versión

- Mismas prestaciones que la versión 1.
- Se redujeron las dimensiones a 100x60mm.
- Se removió el magnetómetro.



V2: 2015

Tercera Versión

- STM32F722, Cortex M7, 216 MHz, con unidad de punto flotante.
- Se actualizaron los sensores.
- Se removió la fuente comutada.
- Conectores más pequeños.
- Dimensiones: 80x60 mm.
- USB 2.0, memoria uSD.



V3: 2018

Antecedentes

- En el Laboratorio de Automática y Robótica (LAR) se han desarrollado computadoras de vuelo.

Primera Versión

- LPC-1769, Cortex M3, 120 MHz, sin unidad de punto flotante.
- Sensores IMU, Barómetro y Magnetómetro fuera de fabricación.
- Dimensiones: 93x93 mm.



V1: 2013

Segunda Versión

- Mismas prestaciones que la versión 1.
- Se redujeron las dimensiones a 100x60mm.
- Se removió el magnetómetro.



V2: 2015

Tercera Versión

- STM32F722, Cortex M7, 216 MHz, con unidad de punto flotante.
- Se actualizaron los sensores.
- Se removió la fuente comutada.
- Conectores más pequeños.
- Dimensiones: 80x60 mm.
- USB 2.0, memoria uSD.



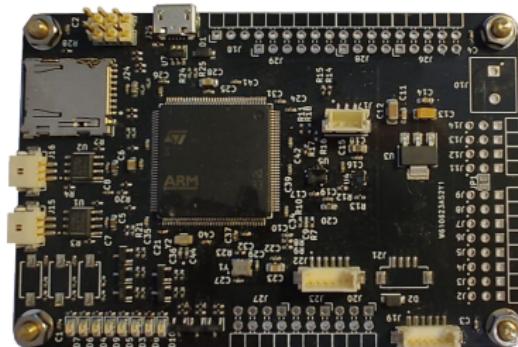
V3: 2018

V4: 2024

Componentes y Funcionalidades

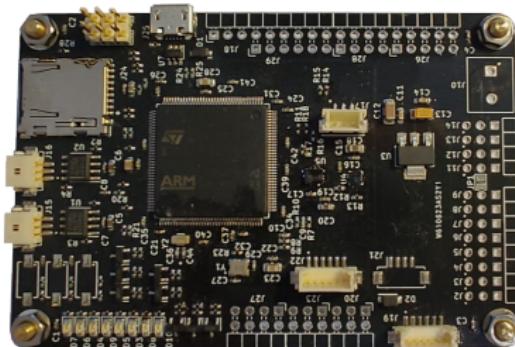
V4: 2024

Componentes y Funcionalidades



V4: 2024

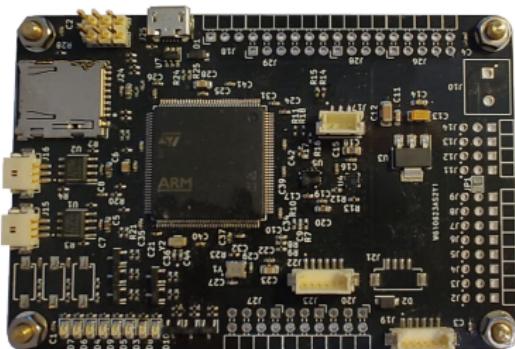
Componentes y Funcionalidades



- Microcontrolador STM32F746ZG, Cortex M7, 216 MHz.

V4: 2024

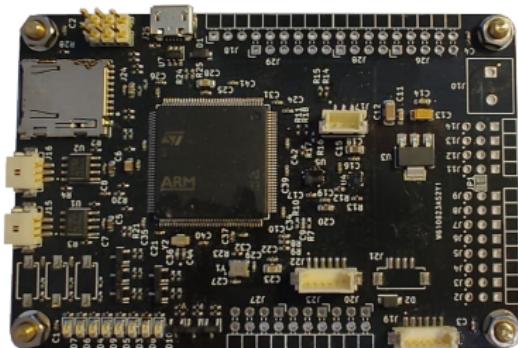
Componentes y Funcionalidades



- Microcontrolador STM32F746ZG, Cortex M7, 216 MHz.
- Sensores: IMU y Barómetro (magnetómetro externo).

V4: 2024

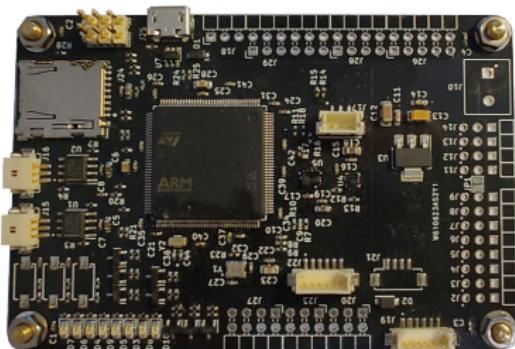
Componentes y Funcionalidades



- Microcontrolador STM32F746ZG, Cortex M7, 216 MHz.
- Sensores: IMU y Barómetro (magnetómetro externo).
- Interfaz CAN x2.

V4: 2024

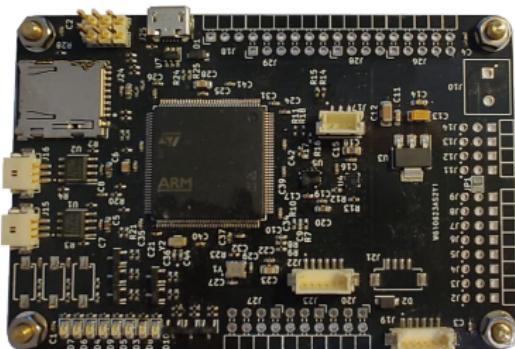
Componentes y Funcionalidades



- Microcontrolador STM32F746ZG, Cortex M7, 216 MHz.
- Sensores: IMU y Barómetro (magnetómetro externo).
- Interfaz CAN x2.
- Interfaces varias: UART, SPI, I2C, USB, DSM Spektrum y PPM.

V4: 2024

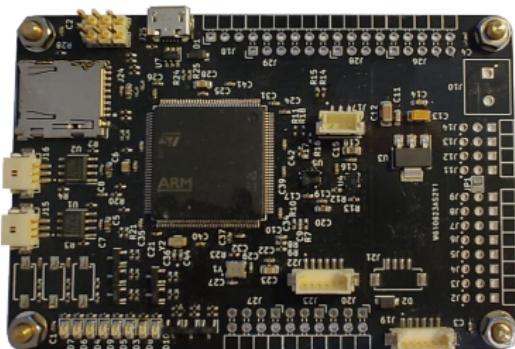
Componentes y Funcionalidades



- Microcontrolador STM32F746ZG, Cortex M7, 216 MHz.
- Sensores: IMU y Barómetro (magnetómetro externo).
- Interfaz CAN x2.
- Interfaces varias: UART, SPI, I2C, USB, DSM Spektrum y PPM.
- Slot para memoria uSD.

V4: 2024

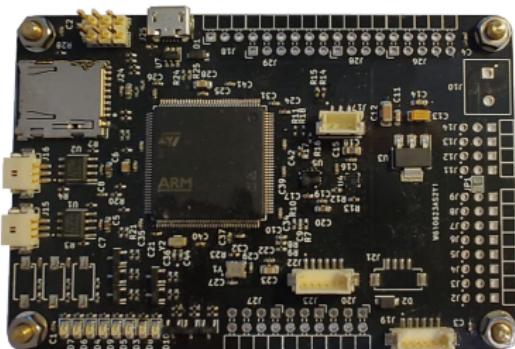
Componentes y Funcionalidades



V4: 2024

- Microcontrolador STM32F746ZG, Cortex M7, 216 MHz.
- Sensores: IMU y Barómetro (magnetómetro externo).
- Interfaz CAN x2.
- Interfaces varias: UART, SPI, I2C, USB, DSM Spektrum y PPM.
- Slot para memoria uSD.
- PCB de 4 capas, diseñado usando KiCad.

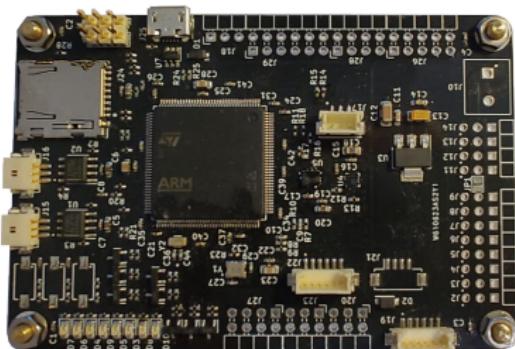
Componentes y Funcionalidades



V4: 2024

- Microcontrolador STM32F746ZG, Cortex M7, 216 MHz.
- Sensores: IMU y Barómetro (magnetómetro externo).
- Interfaz CAN x2.
- Interfaces varias: UART, SPI, I2C, USB, DSM Spektrum y PPM.
- Slot para memoria uSD.
- PCB de 4 capas, diseñado usando KiCad.
- Todos los componentes en una sola cara.

Componentes y Funcionalidades



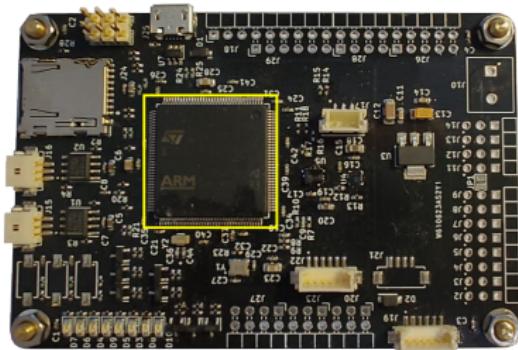
V4: 2024

- Microcontrolador STM32F746ZG, Cortex M7, 216 MHz.
- Sensores: IMU y Barómetro (magnetómetro externo).
- Interfaz CAN x2.
- Interfaces varias: UART, SPI, I2C, USB, DSM Spektrum y PPM.
- Slot para memoria uSD.
- PCB de 4 capas, diseñado usando KiCad.
- Todos los componentes en una sola cara.
- Se fabricaron 3 placas.

Microcontrolador

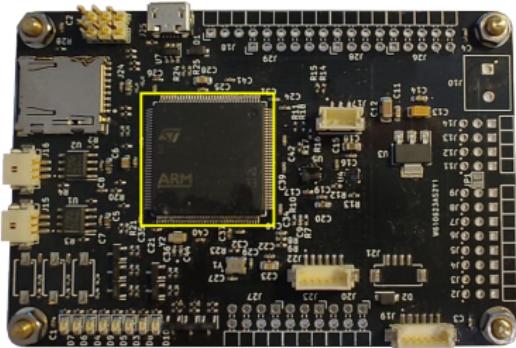
Microcontrolador

- Mejorar la performance.

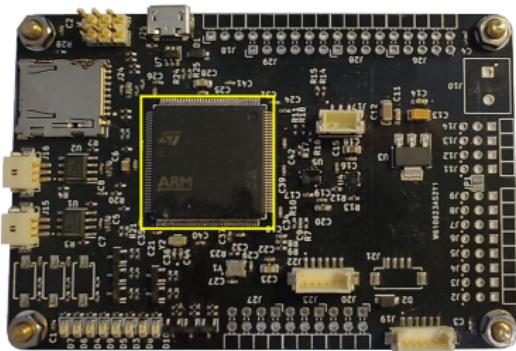


Microcontrolador

- Mejorar la performance.
- Tener retrocompatibilidad con el firmware de la V3.

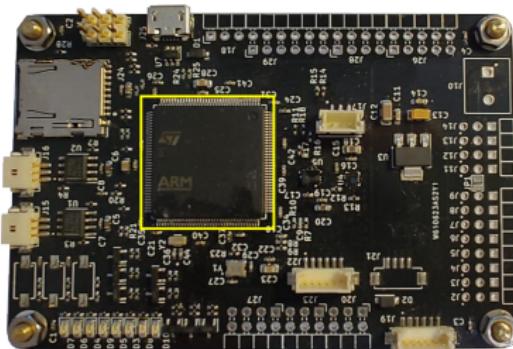


Microcontrolador



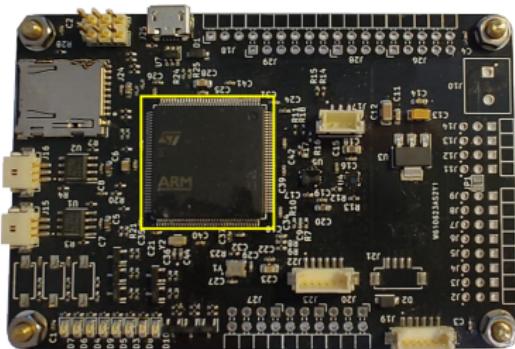
- Mejorar la performance.
- Tener retrocompatibilidad con el firmware de la V3.
- Serie STM32H7: Cortex M7, 550 MHz, longevidad 10 años.

Microcontrolador



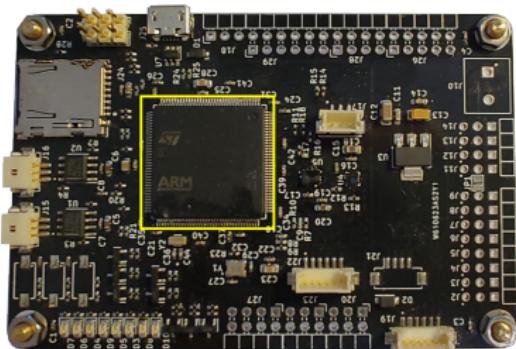
- Mejorar la performance.
- Tener retrocompatibilidad con el firmware de la V3.
- Serie STM32H7: Cortex M7, 550 MHz, longevidad 10 años.
- La selección final se vio afectada por el faltante de componentes en 2022, ninguno de la serie STM32H7 se encontraba disponible.

Microcontrolador



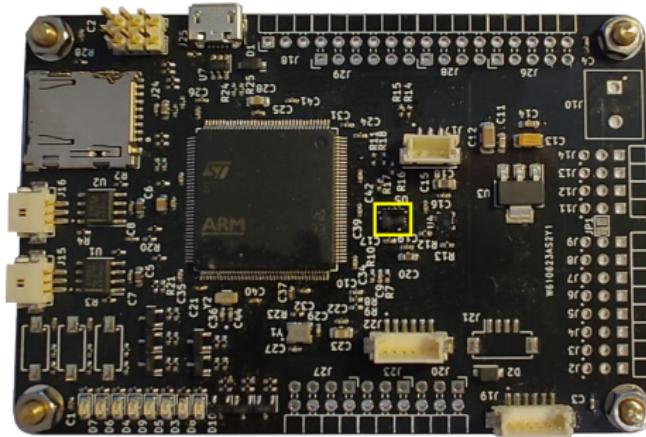
- Mejorar la performance.
- Tener retrocompatibilidad con el firmware de la V3.
- Serie STM32H7: Cortex M7, 550 MHz, longevidad 10 años.
- La selección final se vio afectada por el faltante de componentes en 2022, ninguno de la serie STM32H7 se encontraba disponible.
- Se seleccionó un modelo similar al anterior: STM32F746ZG.

Microcontrolador



- Mejorar la performance.
- Tener retrocompatibilidad con el firmware de la V3.
- Serie STM32H7: Cortex M7, 550 MHz, longevidad 10 años.
- La selección final se vio afectada por el faltante de componentes en 2022, ninguno de la serie STM32H7 se encontraba disponible.
- Se seleccionó un modelo similar al anterior: STM32F746ZG.
- Flash: 1024 kB, SRAM: 320 kB.
- Longevidad 10 años, hasta enero 2034.
- En la actualidad se reemplazó por el STM32F777ZIT6, compatible pin a pin.

Unidad de Medición Inercial (IMU)



COMPLETAR CON UNA FOTO
HACIENDO ZOOM A LA IMU PARA QUE SE VEA QUE ES MUY PEQUEÑA.

Unidad de Medición Inercial (IMU)

- Acelerómetros y giróscopos triaxiales.
- Permite medir aceleración lineal y velocidad angular en una terna solidaria al componente.
- El sensor principal para mantener la estabilidad del vehículo.
- Las mediciones pueden utilizarse para estimar la orientación del vehículo respecto de una terna inercial.

Unidad de Medición Inercial (IMU)

- Se hizo una búsqueda de alternativas.
- Especificaciones más relevantes:
 - Variación del offset con el tiempo de acelerómetros.
 - Variación del offset con el tiempo de giróscopos.
 - Error factor de escala de giróscopos.
 - Ruido de giróscopos.
- Sin embargo de todas las alternativas, solo 1 de ellas tenía una hoja con todas las especificaciones.



- Modelo ICM42688p, del mismo fabricante de la V3.
- Tener reutilización del firmware.
- Menor ruido y error de factor de escala para giróscopos.

Barómetro

Magnetómetro

Interfaz CAN

Alimentación

Interfaz uSD

Interfaz USB

Montaje

Sistema Implementado

Resultados

Conclusiones