

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN
PROTOTIPO DE CUADRICÓPTERO NO TRIPULADO
PARA TRANSPORTE DE CARGAS LIGERAS**

Autores: Guamán Toapanta Kevin Leonardo
Valdez Quiroga Juan Esteban

Director: Ing. David Loza M. Sc.

Febrero de 2023





Objetivos

Antecedentes y
Justificación

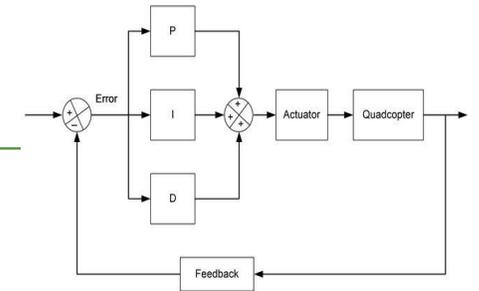
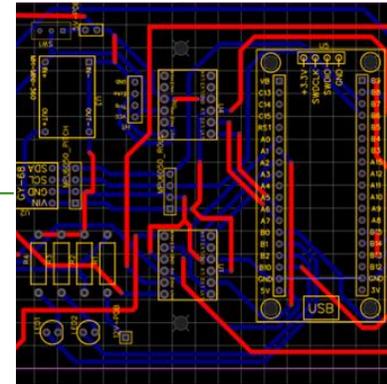
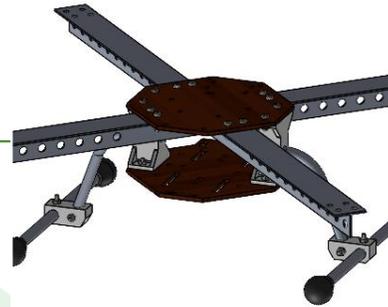
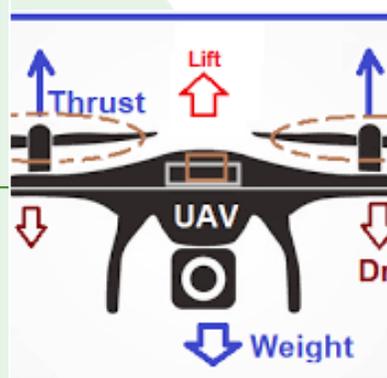
Diseño de un cuadricóptero
de carga

Selección de
componentes de
propulsión

Diseño mecánico
del armazón

Diseño electrónico
del controlador de
vuelo

Programación del
algoritmo de
control



Investigación previa

Metodología

Diseño y
construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Antecedentes



Los vehículos aéreos no tripulados tienen una amplia gama de aplicaciones.



El diseño de cuadricópteros es una tarea multidisciplinaria que supone varios retos interesantes correspondientes a distintas ramas de la ingeniería.



Algunos ejemplos destacados son el reconocimiento aéreo por parte de las Fuerzas Armadas.



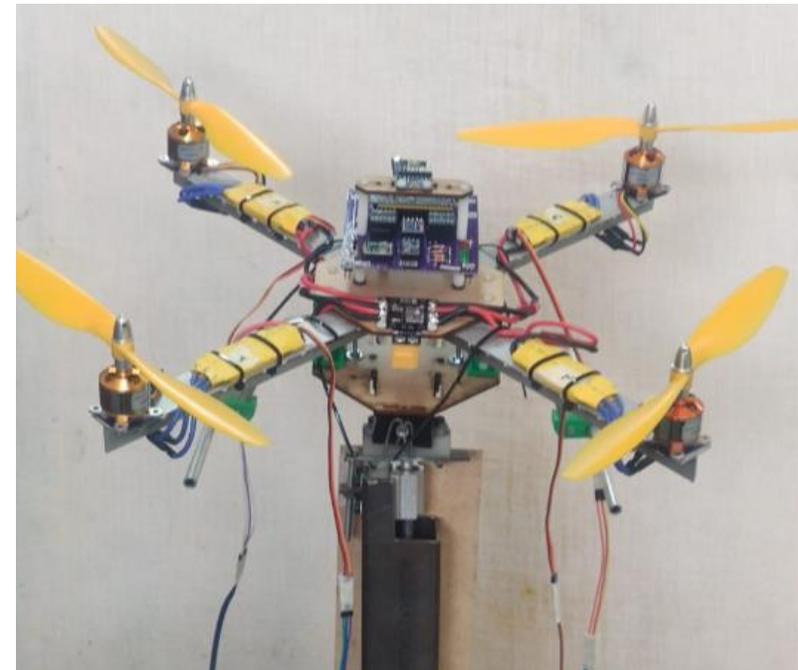
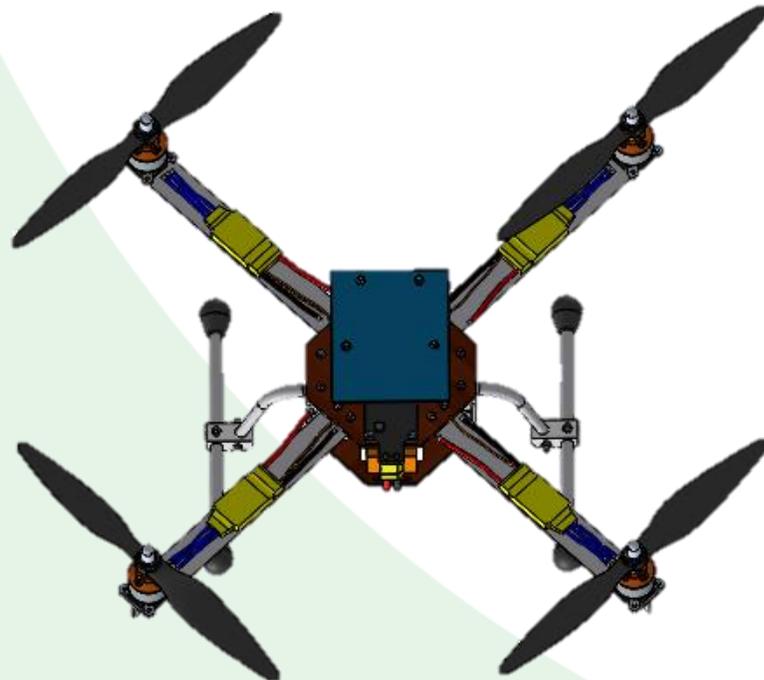
Se han diseñado y construido una cantidad reducida de cuadricópteros en el ámbito académico, militar o de emprendimientos.



Antecedentes y Justificación

Justificación e Importancia

- El uso de cuadricópteros y otros UAVs está en constante crecimiento. Sin embargo, en Ecuador se utilizan únicamente drones fabricados en el extranjero



Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

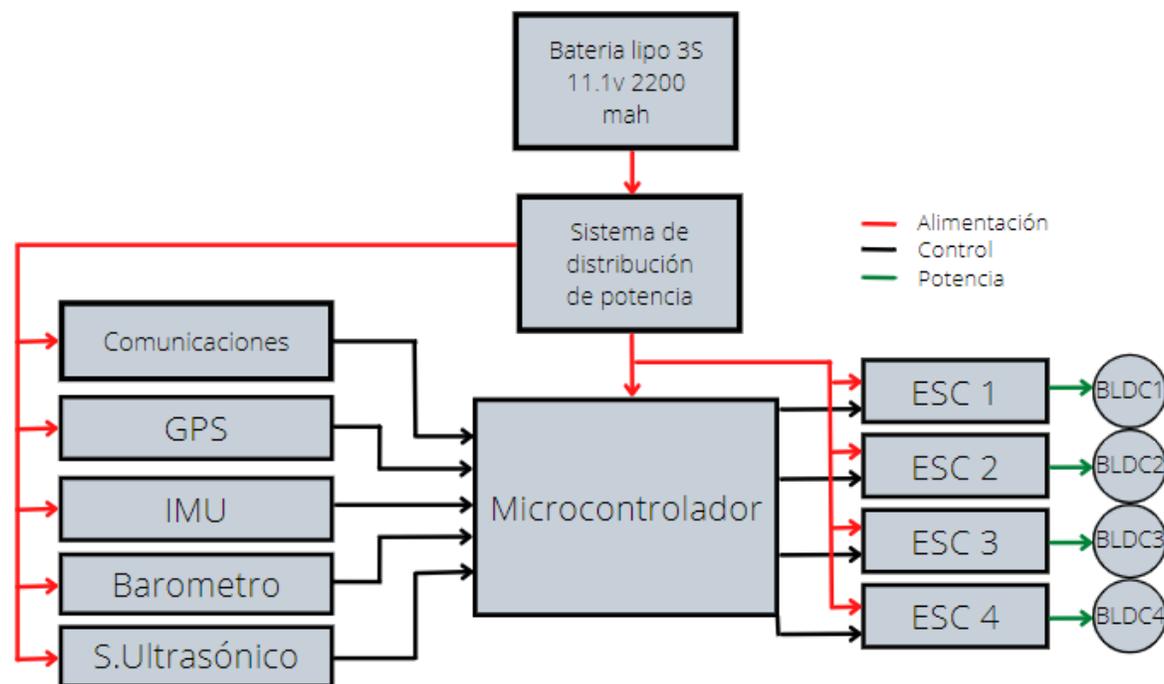
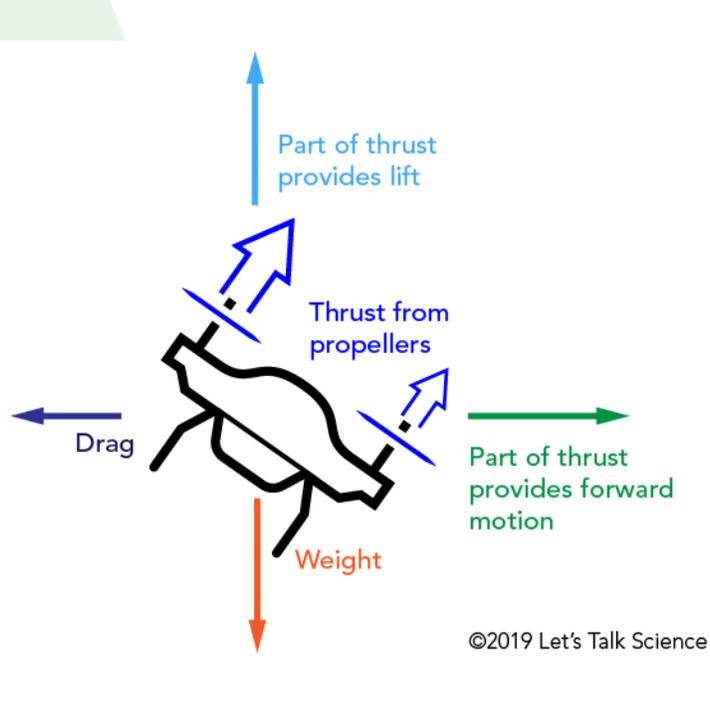
Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Principio de funcionamiento de un cuadricóptero





Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

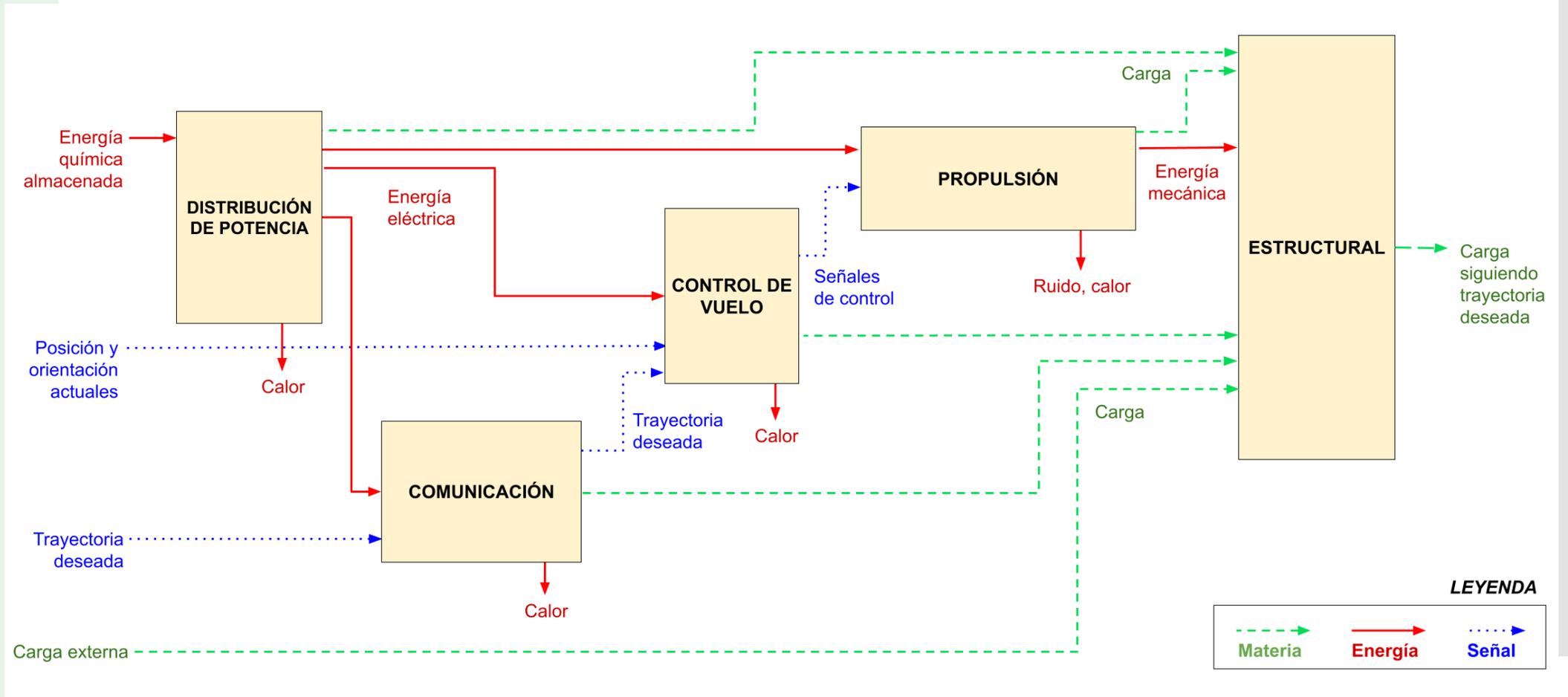
Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Subsistemas que conforman un cuadricóptero





Antecedentes y
Justificación

Requerimientos de desempeño

Parámetro de desempeño	Magnitud
Capacidad de carga	200 g
Razón empuje/peso	2
Tiempo de vuelo sin carga	8 minutos
Tiempo de vuelo con carga	6 minutos
Alcance de radiocontrol	50 m
Altura máxima de vuelo	15 m

Investigación previa

Metodología

Diseño y
construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Subsistema de propulsión

Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

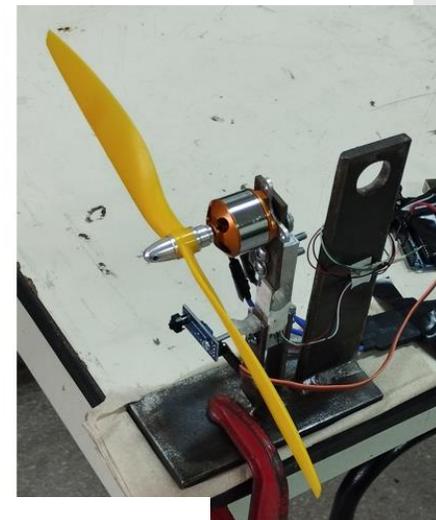
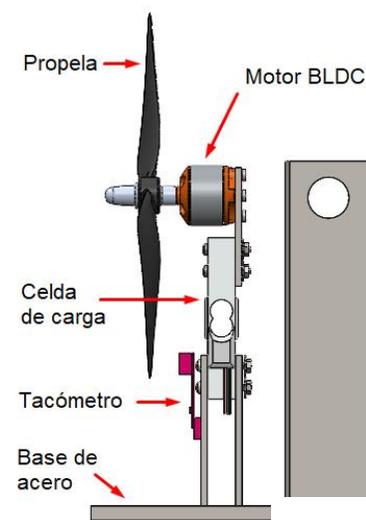
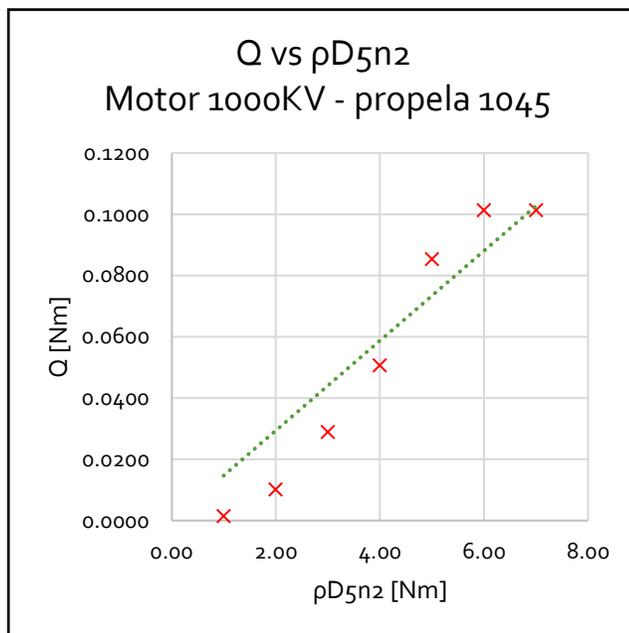
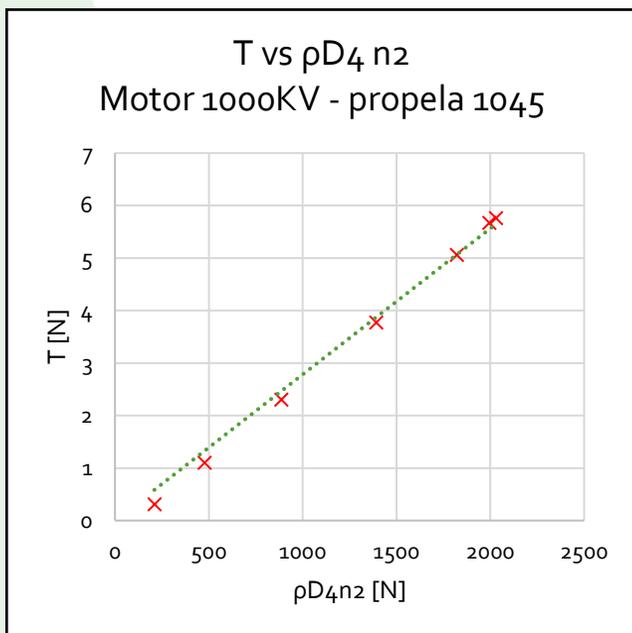
Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



$$T = K_T \rho D^4 n^2$$

$$Q = K_Q \rho D^5 n^2$$

Propela	Paso [in]	K_T	K_Q
1045	4.5	0.00282	0.0001693
1047	4.7	0.00314	0.0001733
1050	5	0.00238	0.0001270

Motor	Razón empuje/peso		Tiempo de vuelo [min]	
	Con carga	Sin carga	Con carga	Sin carga
1000 KV	1.964	2.357	6.643	7.889
1400 KV	2.332	2.799	4.822	5.756



Subsistema de distribución de potencia

Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

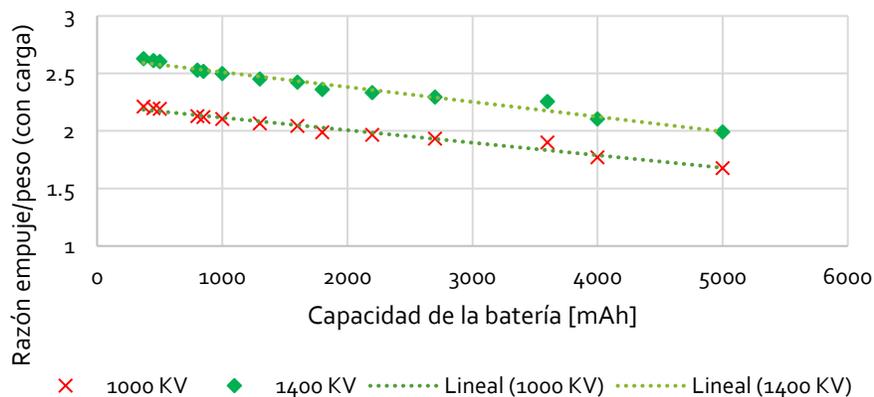
Pruebas y Resultados

Conclusiones

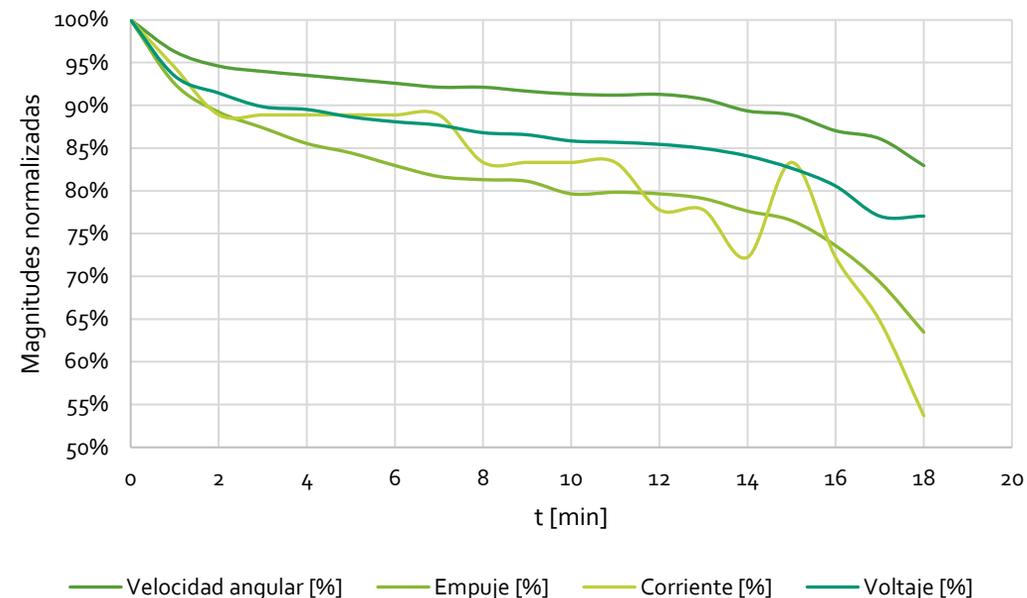
Recomendaciones

Trabajos futuros

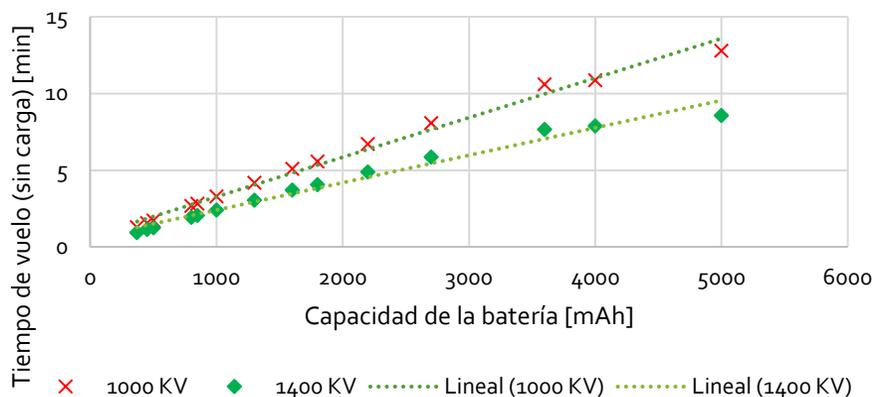
Razón empuje/peso vs. capacidad de batería



Magnitudes normalizadas vs. t



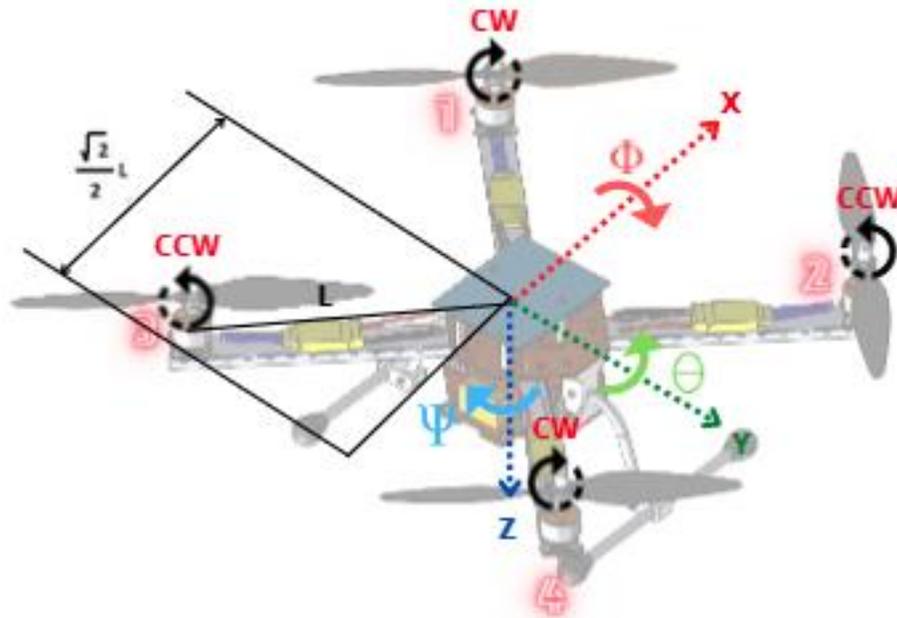
Tiempo de vuelo vs. capacidad de batería



Componentes seleccionados:

- Batería de 2200 mAh
- PDB Matek XT60
- ESCs de 40 A

Modelo matemático no lineal



$$\begin{bmatrix} \Sigma M_x \\ \Sigma M_y \\ \Sigma M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \right)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \omega_x$$

$$\frac{d\theta}{dt} = f_2(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \omega_y$$

$$\frac{d\psi}{dt} = f_3(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \omega_z$$

$$\frac{d\omega_x}{dt} = f_4(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \frac{(I_y - I_z)}{I_x} \omega_y \omega_z + \frac{K_{XY}}{I_x} (u_1^2 + u_3^2 - u_2^2 - u_4^2)$$

$$\frac{d\omega_y}{dt} = f_5(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \frac{(I_z - I_x)}{I_y} \omega_z \omega_x + \frac{K_{XY}}{I_y} (u_1^2 + u_2^2 - u_3^2 - u_4^2)$$

$$\frac{d\omega_z}{dt} = f_6(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \omega_x \omega_y + \frac{K_z}{I_z} (u_1^2 + u_4^2 - u_2^2 - u_3^2)$$

$$-(T_1 + T_2 + T_3 + T_4) + [0 \ 0 \ 1]R^{-1}(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m \cdot g \end{bmatrix} = m \frac{dv_z(t)}{dt}$$

$$mg \cdot \cos(\phi) \cos(\theta) - (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) = m \frac{dv_z(t)}{dt}$$

Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

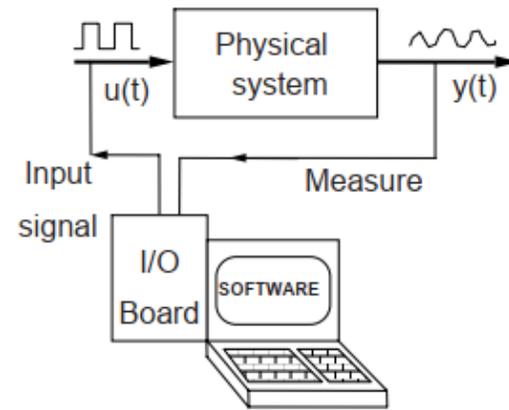
Recomendaciones

Trabajos futuros



Identificación en lazo abierto y linealización

Antecedentes y Justificación



$$\frac{u(s)}{n(s)} = \frac{1}{\tau_m \cdot s + 1}$$

Metodología

Diseño y construcción

$$\frac{\phi(s)}{U_\phi(s)} = \frac{2u_0K_{XY}}{I_x \cdot s^2 \cdot (\tau_m \cdot s + 1)}$$

$$\frac{\theta(s)}{U_\theta(s)} = \frac{2u_0K_{XY}}{I_y \cdot s^2 \cdot (\tau_m \cdot s + 1)}$$

$$\frac{\omega_z(s)}{U_{\omega z}(s)} = \frac{2u_0K_Z}{I_z \cdot s \cdot (\tau_m \cdot s + 1)}$$

$$\frac{v_z(s)}{U_{vz}(s)} = \frac{2u_0K_{xy}}{m \cdot s \cdot (\tau_m \cdot s + 1)}$$

Entrada y salida normalizadas vs. tiempo
Ts=100 [ms] - 1ra iteración



Investigación previa

Pruebas y Resultados

Conclusiones

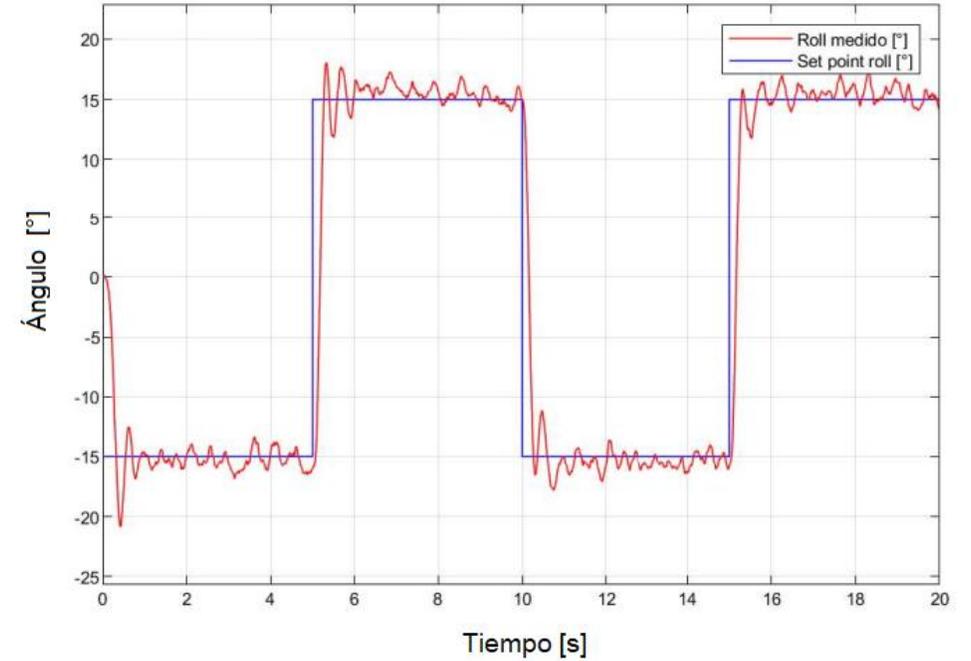
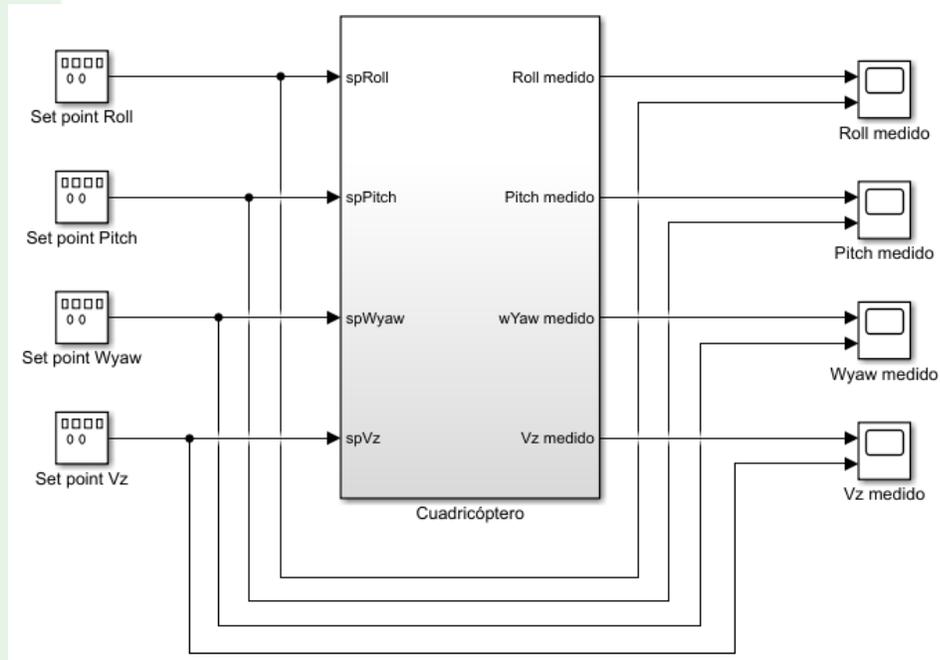
Recomendaciones

Trabajos futuros



Antecedentes y
Justificación

Simulación dinámica



Investigación previa

Metodología

Diseño y
construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Subsistema de control de vuelo

Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

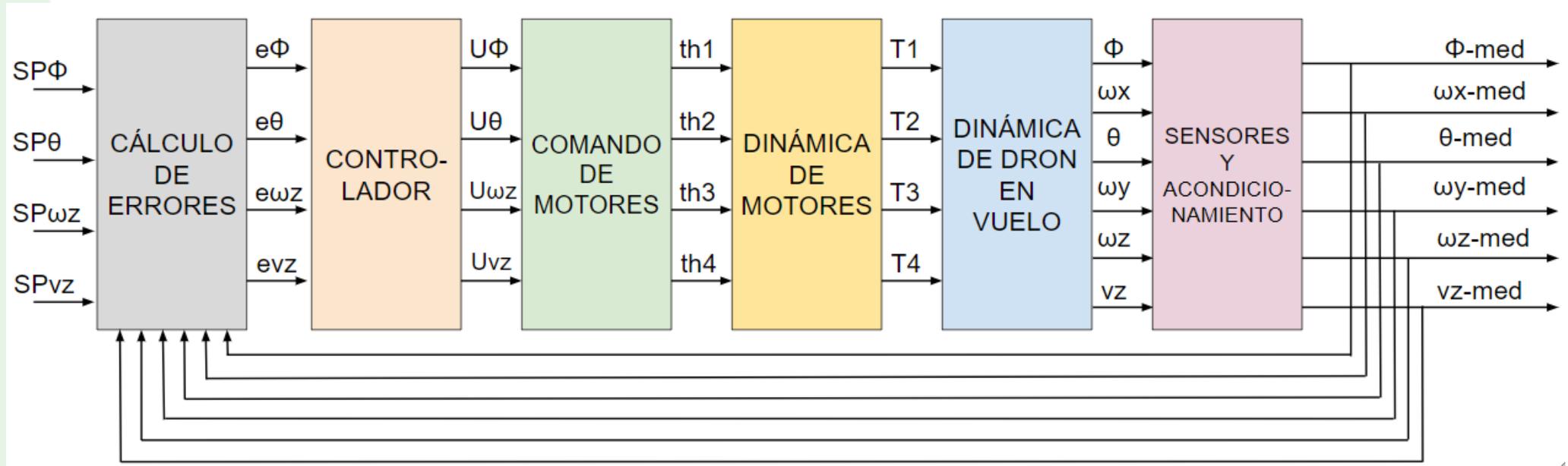
Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

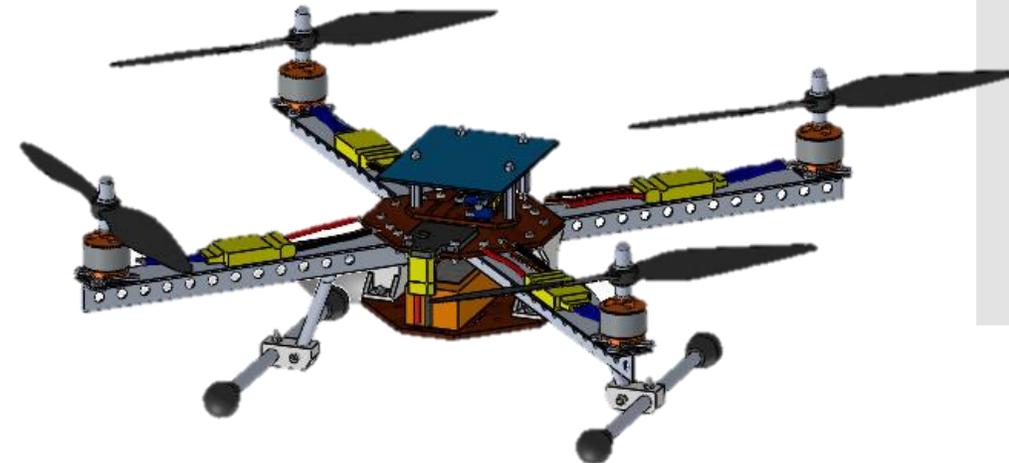
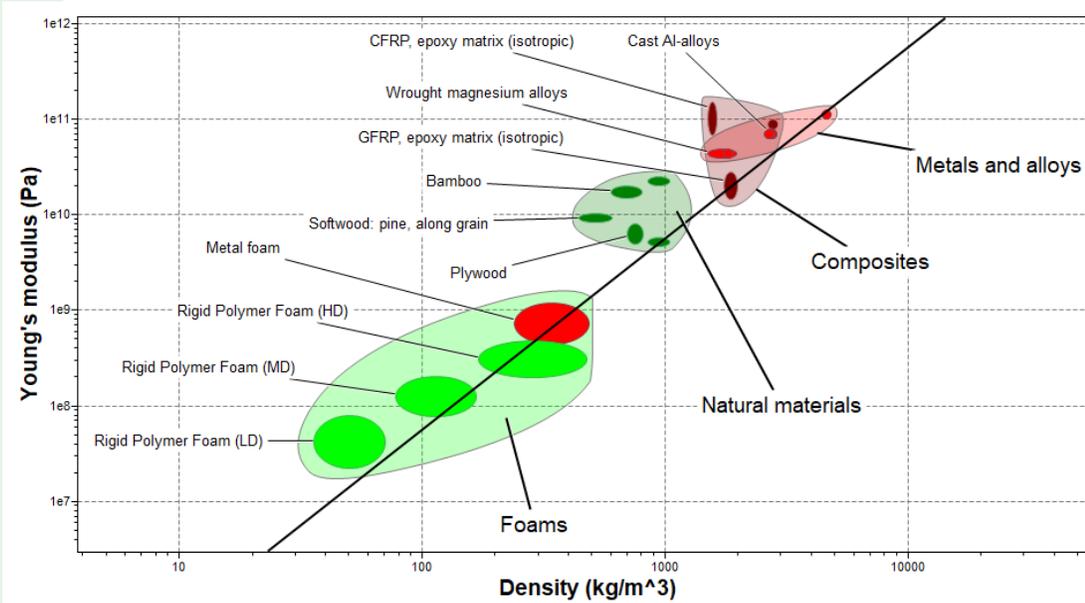
Trabajos futuros





Subsistema estructural

Antecedentes y Justificación



Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Material	Sección transversal	Factor de forma	Deflexión [mm]	Factor de seguridad	Masa del brazo [g]
Aluminio	Tipo T 25.4 x 19 x 1 mm	9.17	0.17	9.11	24.20
Madera MDF	Rectangular 50x5 mm	0.1	8.25	1.85	38.73
Espuma de poliuretano	Rectangular 50x23 mm	0.46	0.985	1.30	6.53
Fibra de vidrio	Rectangular 50x1.3 mm	0.026	8.624	1.78	24.97



Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

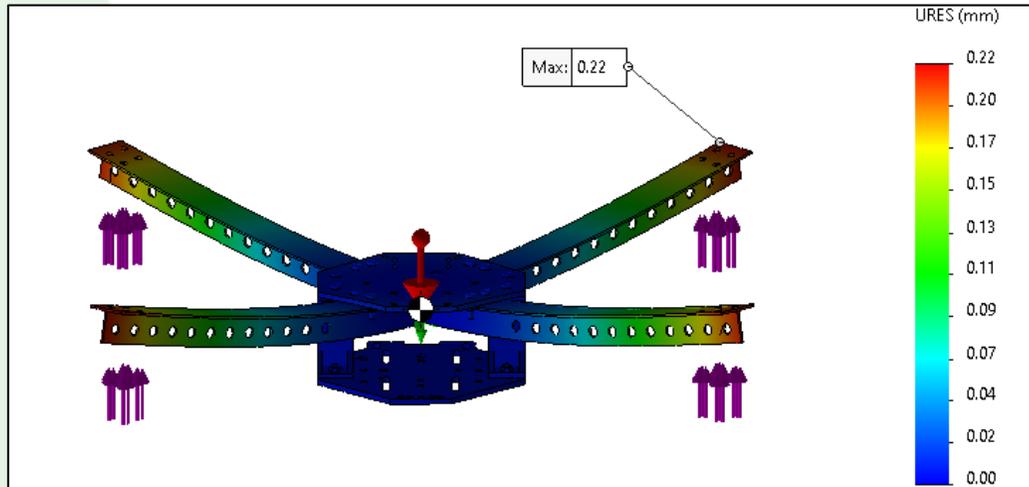
Pruebas y Resultados

Conclusiones

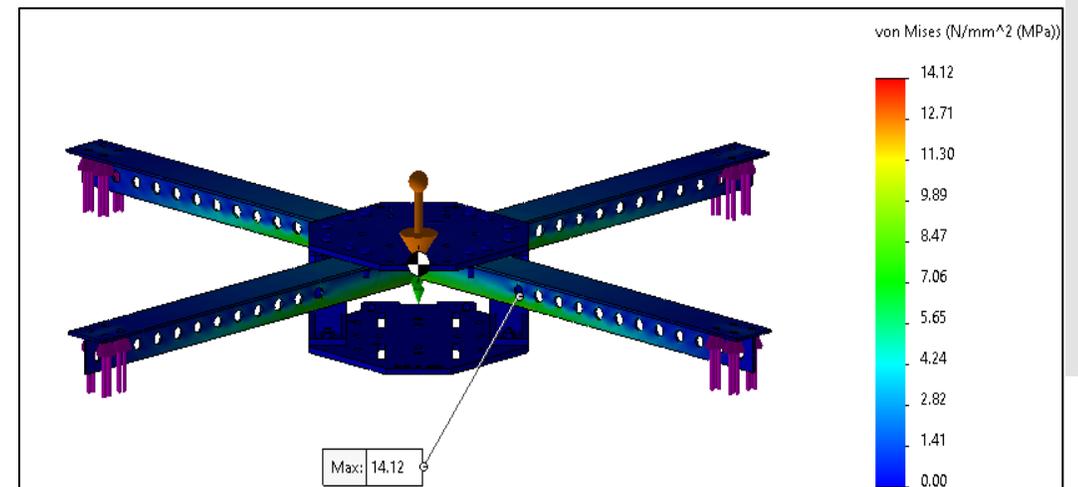
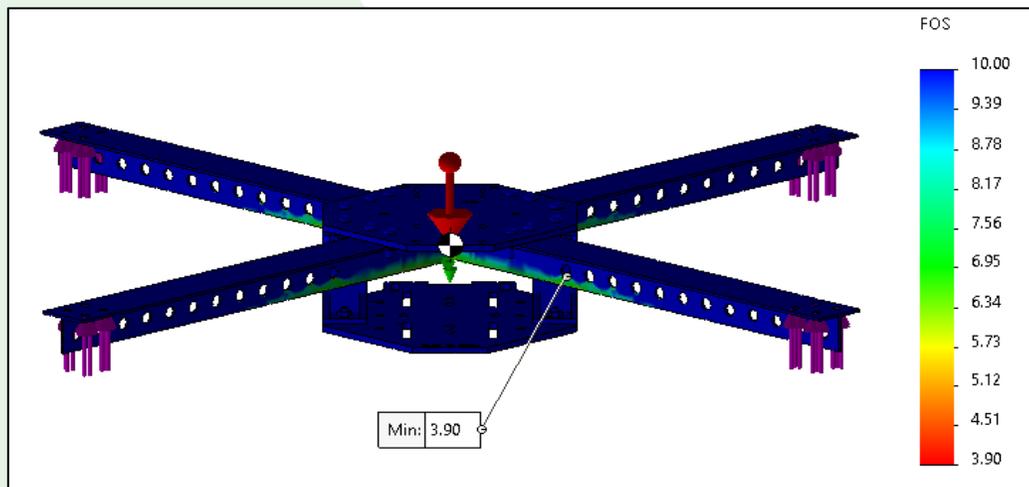
Recomendaciones

Trabajos futuros

Diseño mecánico del marco: análisis FEM



Parámetro	Valor
Esfuerzo máximo	14.12 MPa
Deflexión máxima	0.22 mm
Factor de seguridad mínimo	3.90





Antecedentes y
Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y
construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Diseño mecánico del marco: análisis FEM



Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

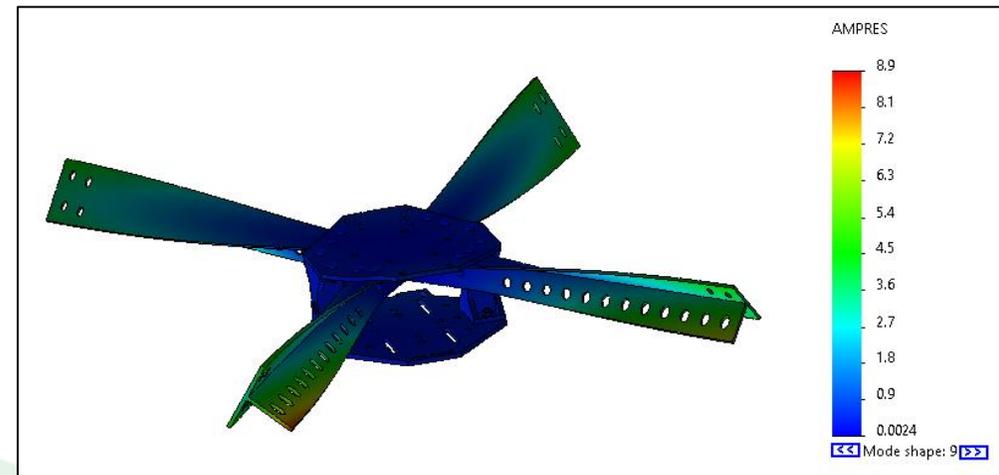
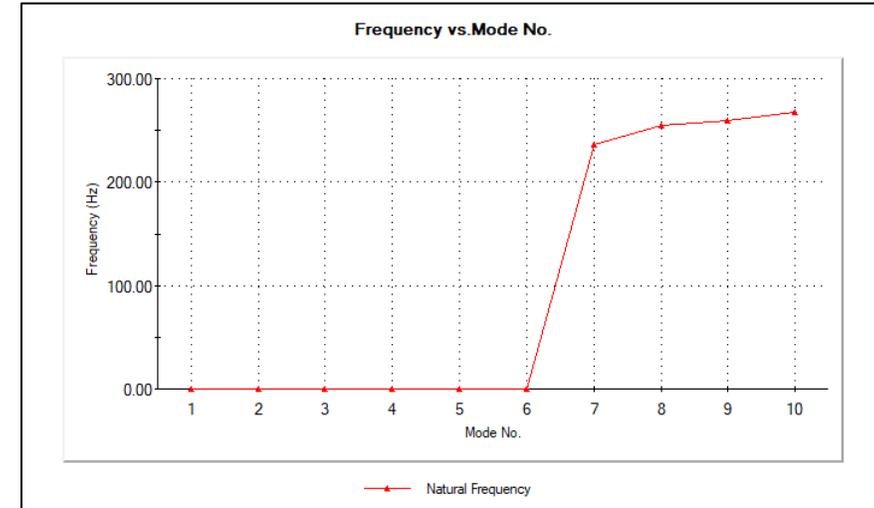
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Diseño mecánico del marco: análisis de vibraciones

Modo normal	Frecuencia natural [Hz]
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	235.79
8	254.85
9	259.00
10	267.42





Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

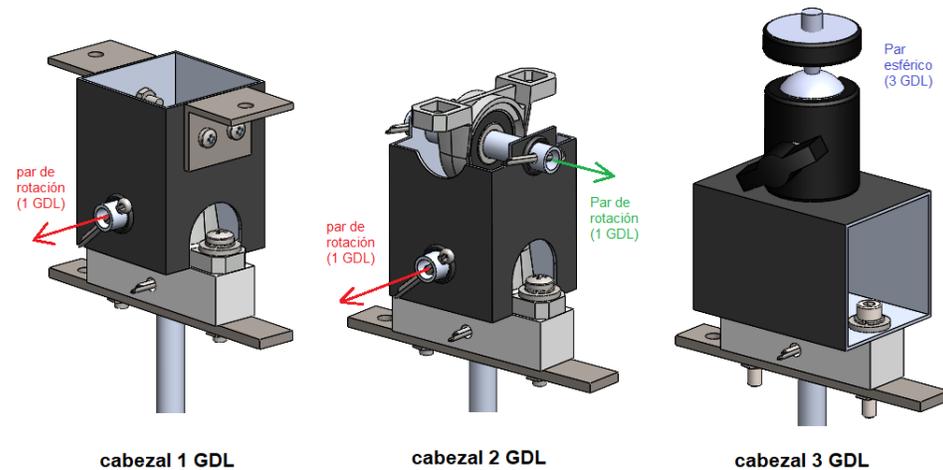
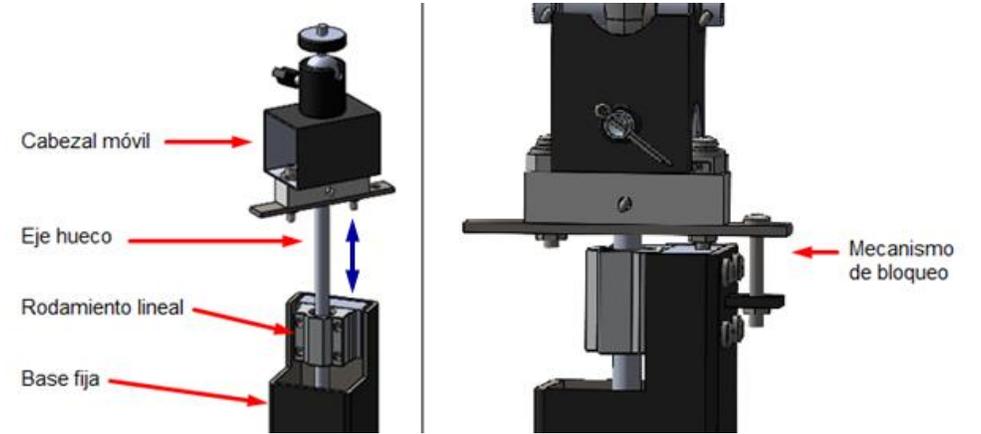
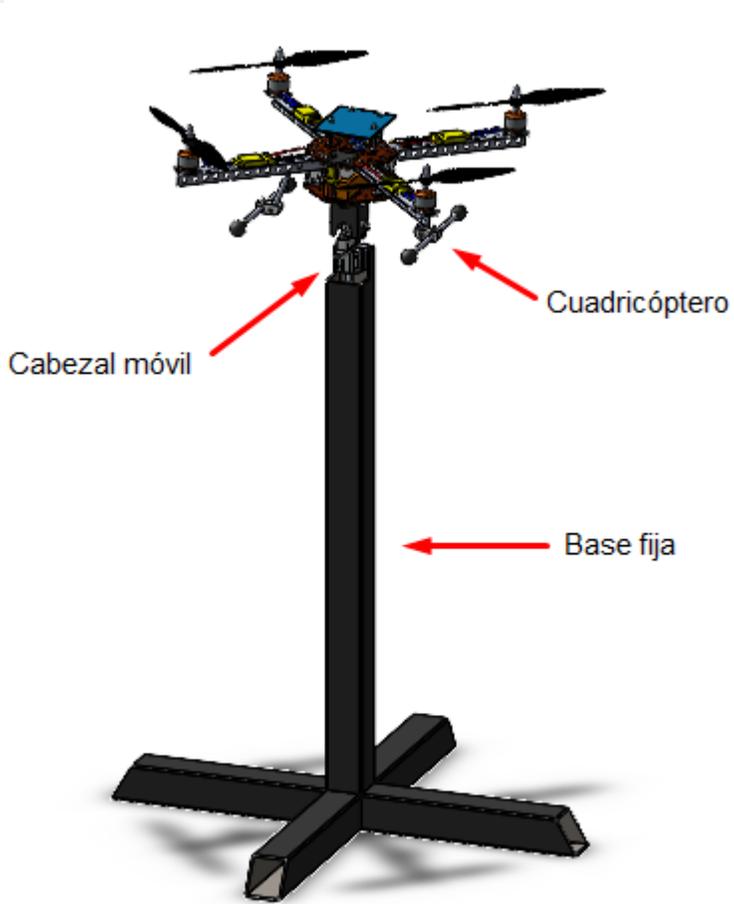
Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Diseño del banco de pruebas





Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

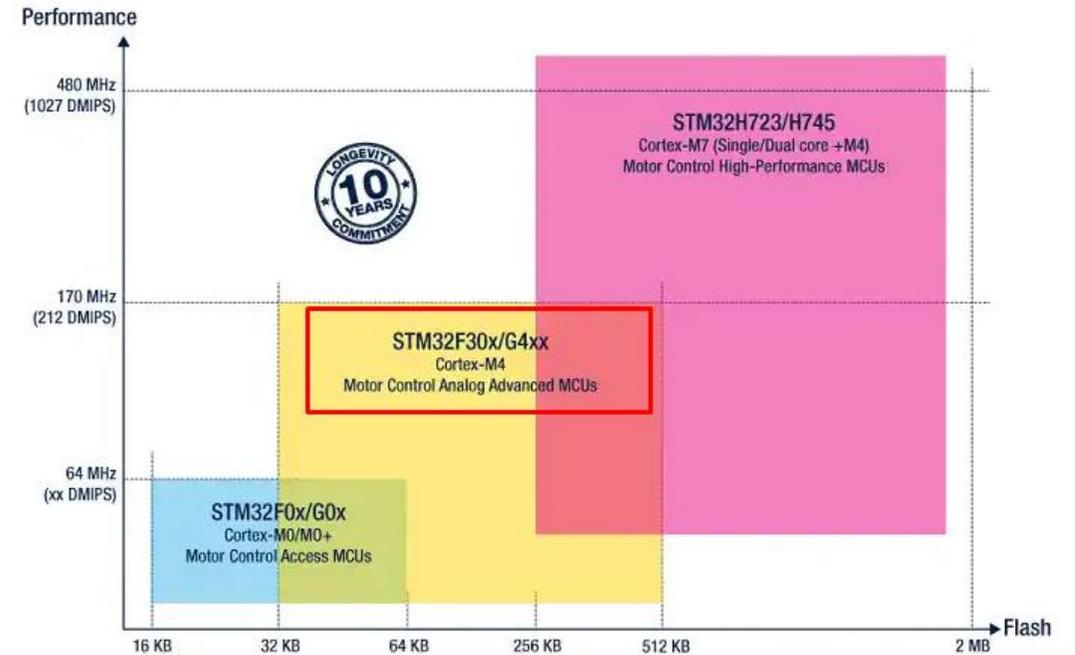
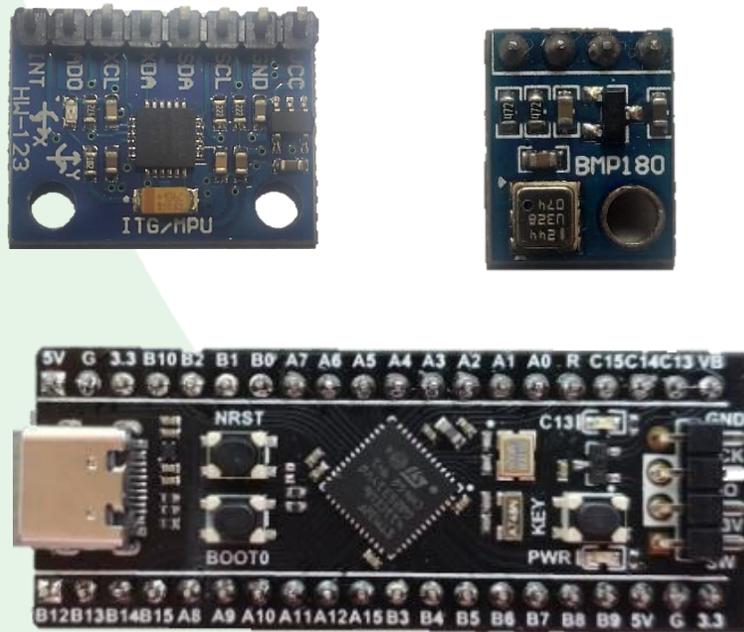
Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Subsistema de control de vuelo



(STM32, s.f.)



Antecedentes y
Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y
construcción

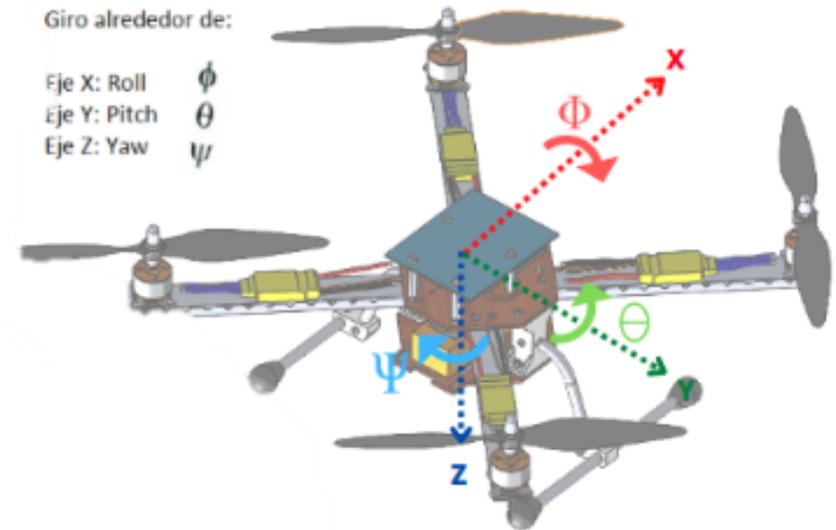
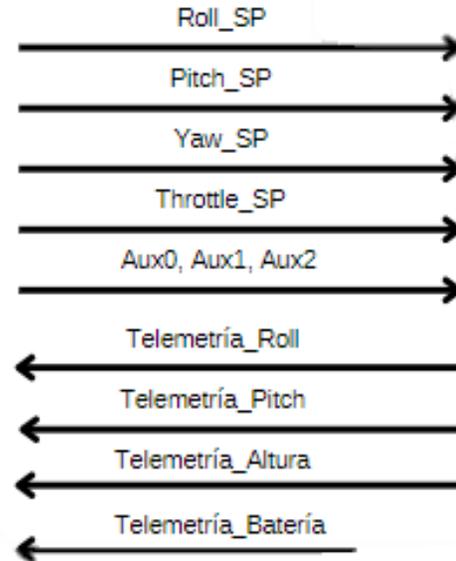
Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Subsistema de comunicaciones





Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

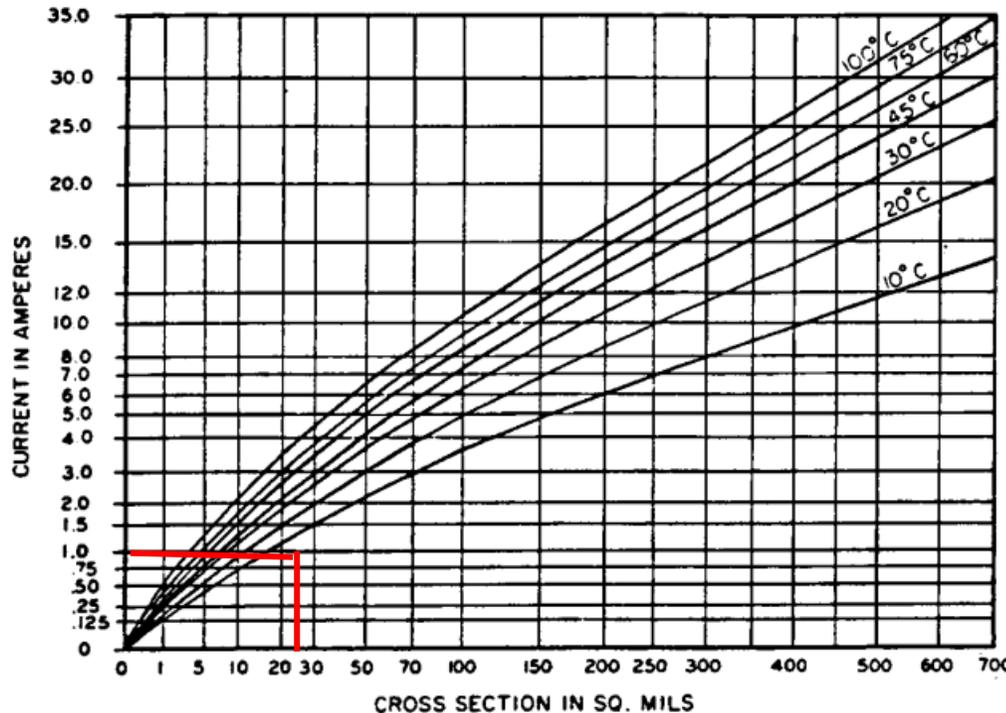
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Diseño electrónico del controlador de vuelo

(For use in determining current carrying capacity and sizes of etched copper conductors for various temperature rises above ambient.)



IPC2221A: Generic Standard on Printed Board Design (p.41), por IPC, 2003, IPC task Group.

Control Remoto

$K = 0.048$

$$\text{Área} = \left(\frac{A_{max}}{(K * \Delta T^B)} \right)^{\frac{1}{C}}$$

$B = 0.44$

$C = 0.725$

A_{max} : Amperaje máximo dentro del circuito

ΔT : Variación de temperatura del circuito en el ambiente

d : onzas de cobre del material base (FR4)

$$A_{max} = 1 [A]$$

$$d = 1 [onz]$$

$$\Delta T = 5$$

$$\text{Área} = \left(\frac{A_{max}}{(K * \Delta T^B)} \right)^{\frac{1}{C}} = 24.818 [mils^2]$$

$$\text{Width} = \frac{\text{Area}}{(1.378 * d)} = 18.011 [mils] = 0.457 [mm] \text{ (ancho minimo)}$$



Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

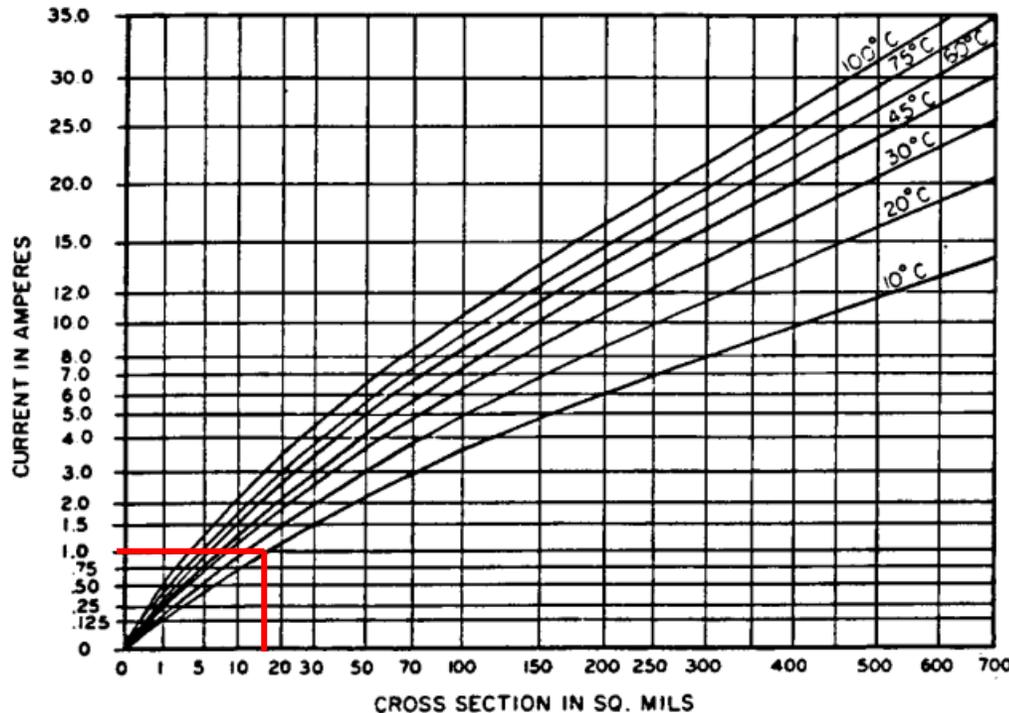
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Diseño electrónico del controlador de vuelo

(For use in determining current carrying capacity and sizes of etched copper conductors for various temperature rises above ambient.)



Controlador de Vuelo

$K = 0.048$

$$\text{Área} = \left(\frac{A_{max}}{(K * \Delta T^B)} \right)^{\frac{1}{C}}$$

$B = 0.44$

$C = 0.725$

A_{max} : Amperaje máximo dentro del circuito

ΔT : Variación de temperatura del circuito en el ambiente

d : onzas de cobre del material base (FR4)

$$A_{max} = 1 [A]$$

$$d = 1 [onz]$$

$$\Delta T = 10$$

$$\text{Área} = \left(\frac{A_{max}}{(K * \Delta T^B)} \right)^{\frac{1}{C}} = 16.296 [\text{mils}^2]$$

$$\text{Width} = \frac{\text{Area}}{(1.378 * d)} = 11.826 [\text{mils}] = 0.3 [\text{mm}] \text{ (ancho mínimo)}$$

IPC2221A: Generic Standard on Printed Board Design (p.41), por IPC, 2003, IPC task Group.



Diseño electrónico del controlador de vuelo

Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

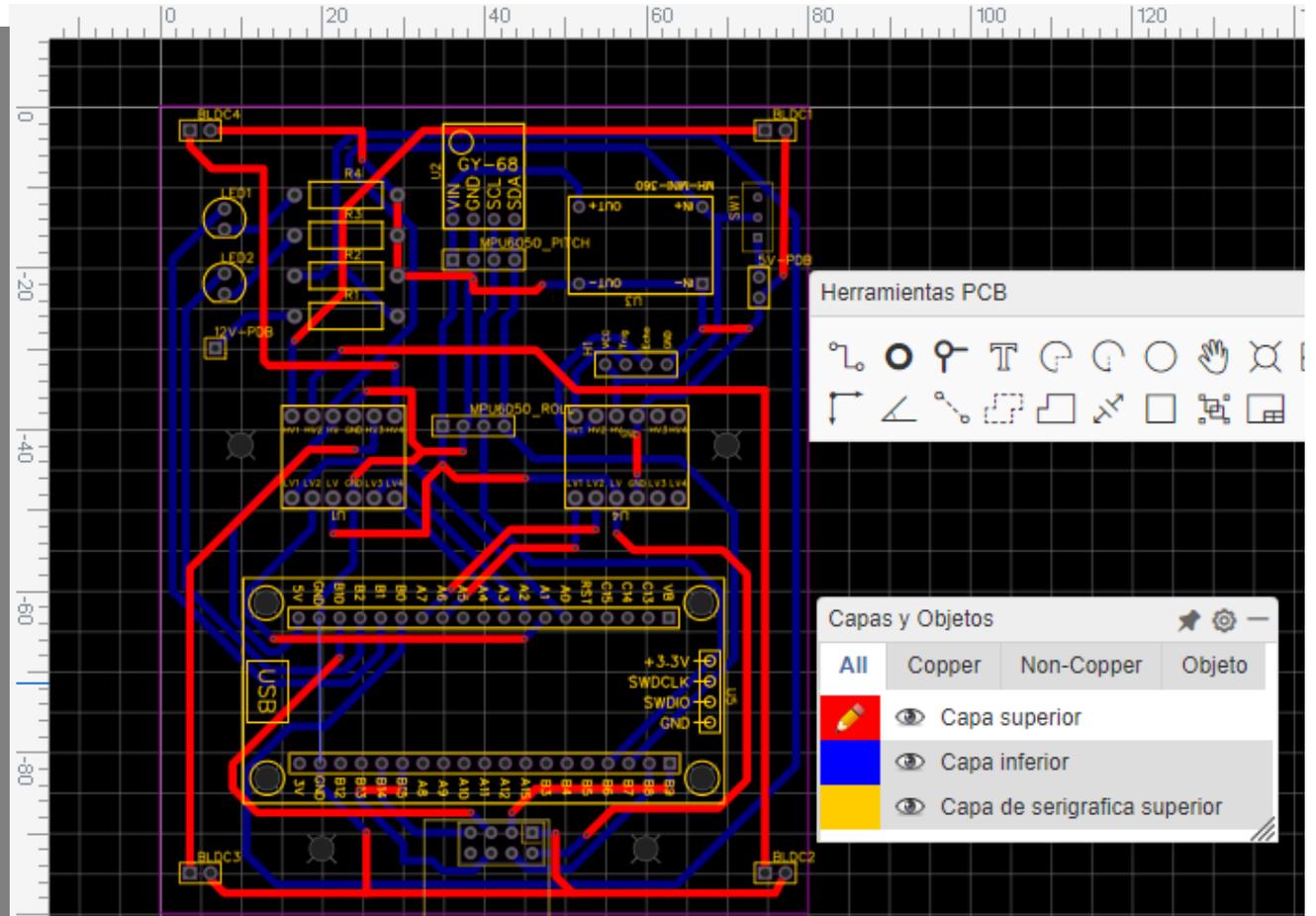
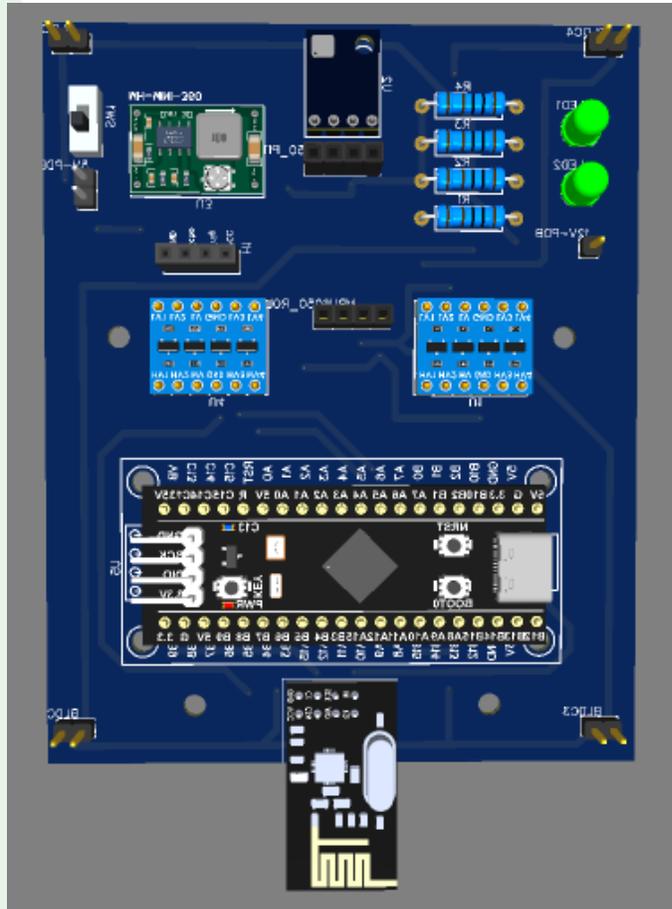
Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros





Diseño electrónico del controlador de vuelo

Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

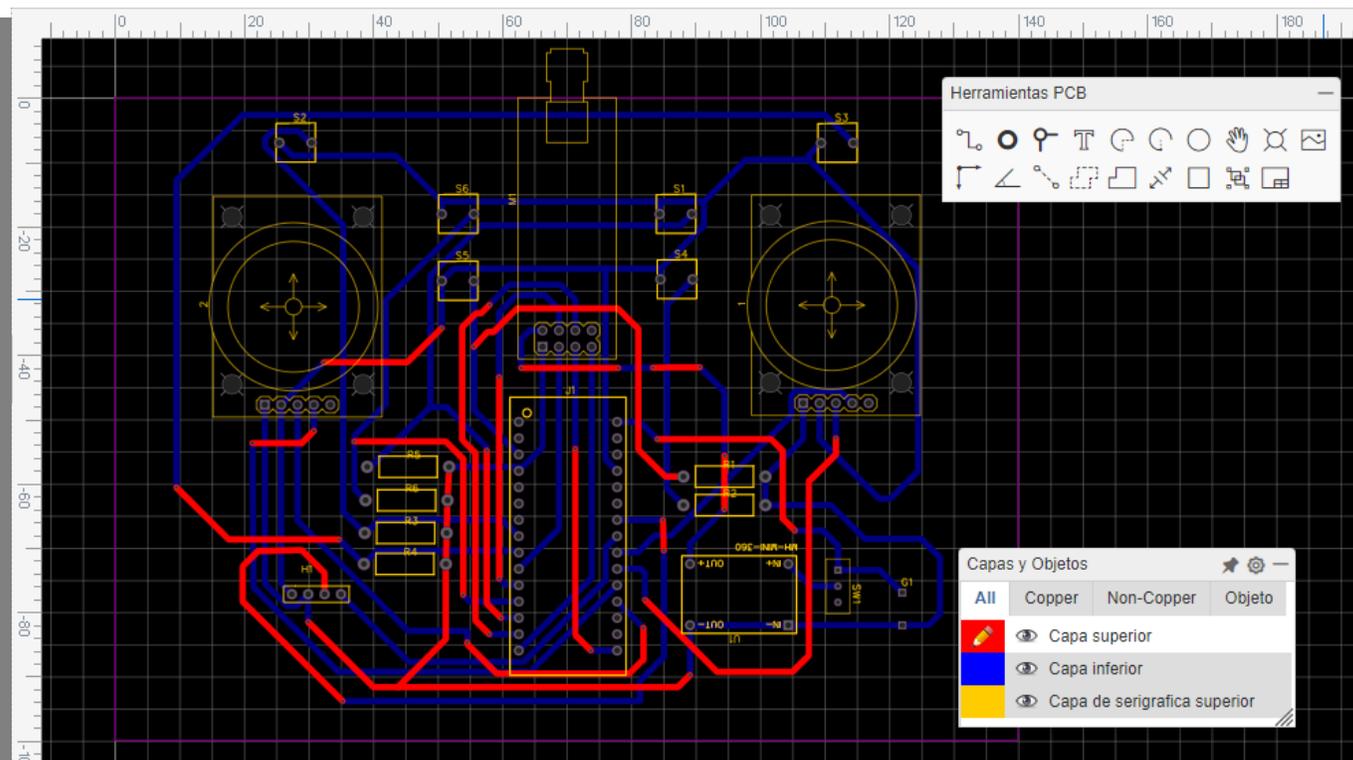
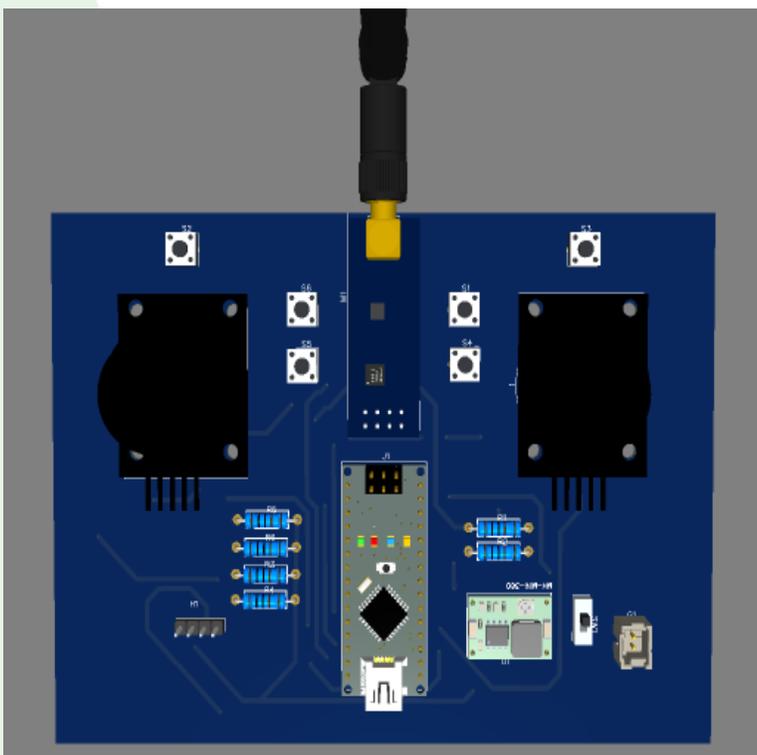
Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros





Programación del controlador de vuelo

Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

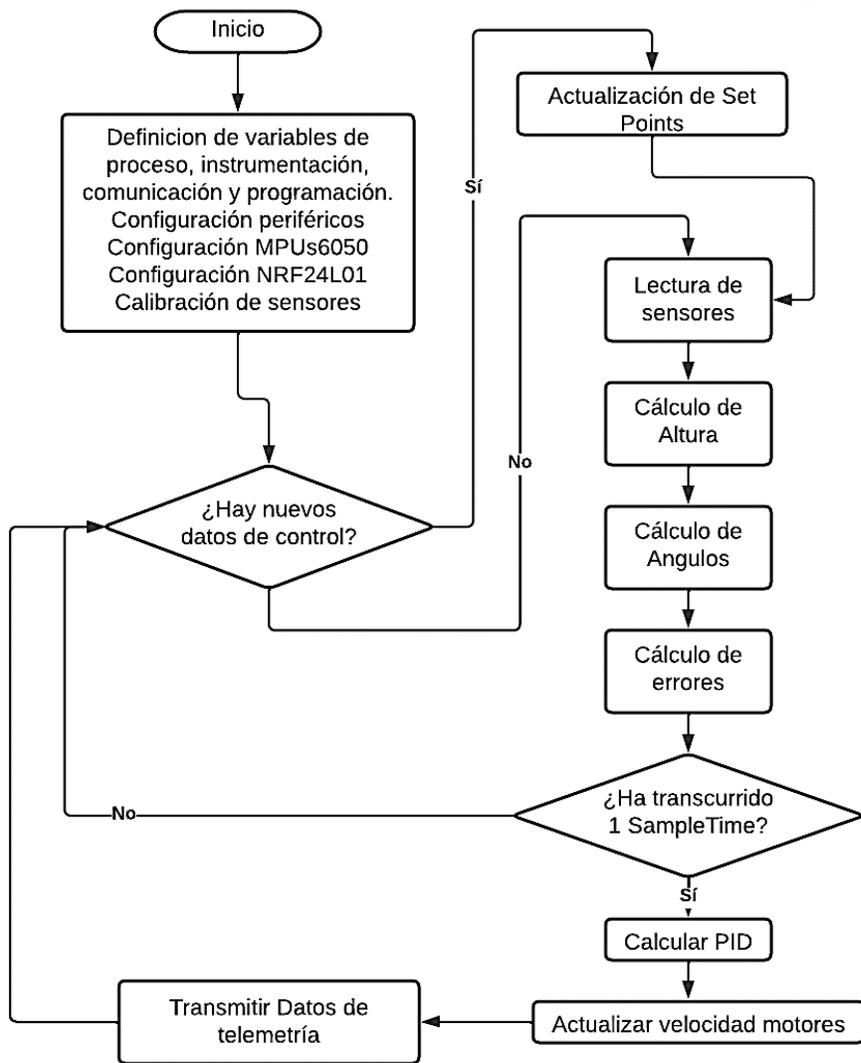
Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Función	Tiempo de ejecución [ms]
Lectura BMP180	8.5
Lectura MPU6050	1
Cálculo de Ángulos	0.25
Cálculo de set points	0.25
Cálculo de Errores	0.25
Ejecución PID	0.25
Lectura NRF24L01	2
Escritura de Telemetría	0.25
Escritura NRF24L01	2
Otros	1.75
Total	16.5



Programación del controlador de vuelo

Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

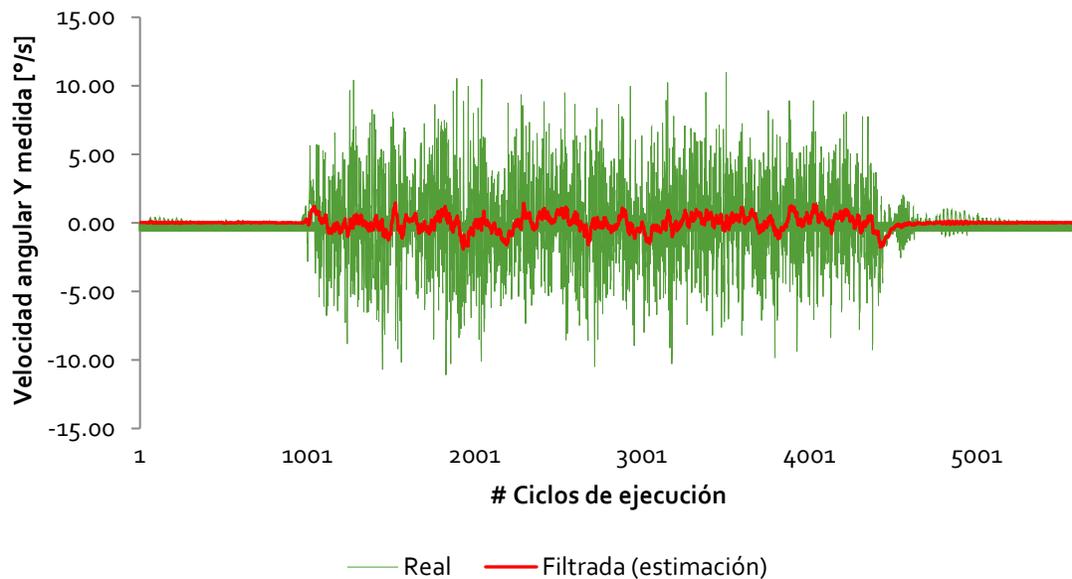
Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Velocidad angular medida vs. # ciclos de ejecución
Ancho de pulso de entrada 1400 us,
frecuencia 250 Hz



DLPF_CFG	Accelerometer (F _s = 1kHz)		Gyroscope		
	Bandwidth (Hz)	Delay (ms)	Bandwidth (Hz)	Delay (ms)	Fs (kHz)
0	260	0	256	0.98	8
1	184	2.0	188	1.9	1
2	94	3.0	98	2.8	1
3	44	4.9	42	4.8	1
4	21	8.5	20	8.3	1
5	10	13.8	10	13.4	1
6	5	19.0	5	18.6	1
7	RESERVED		RESERVED		8

$$gyro_{angle} = gyro_{angle} * 0.998 + acc_{angle} * 0.002$$

$$Velocidad_{angular} = 0.7 * Velocidad_{angular} + 0.3 * RAW_{angular}$$

$$Angulo = 0.9 * Angulo + angulo_{gyro} * 0.1$$



Antecedentes y
Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y
construcción

**Pruebas y
Resultados**

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Manufactura y ensamblaje





Manufactura y ensamblaje

Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

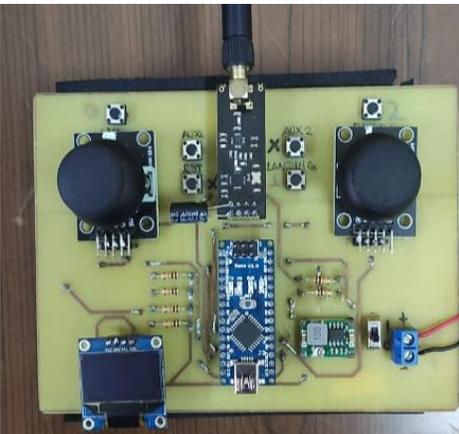
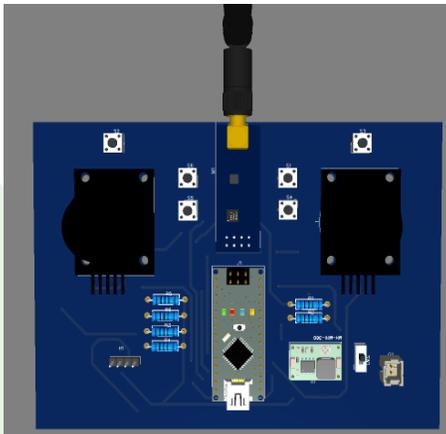
Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros





Manufactura y ensamblaje

Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

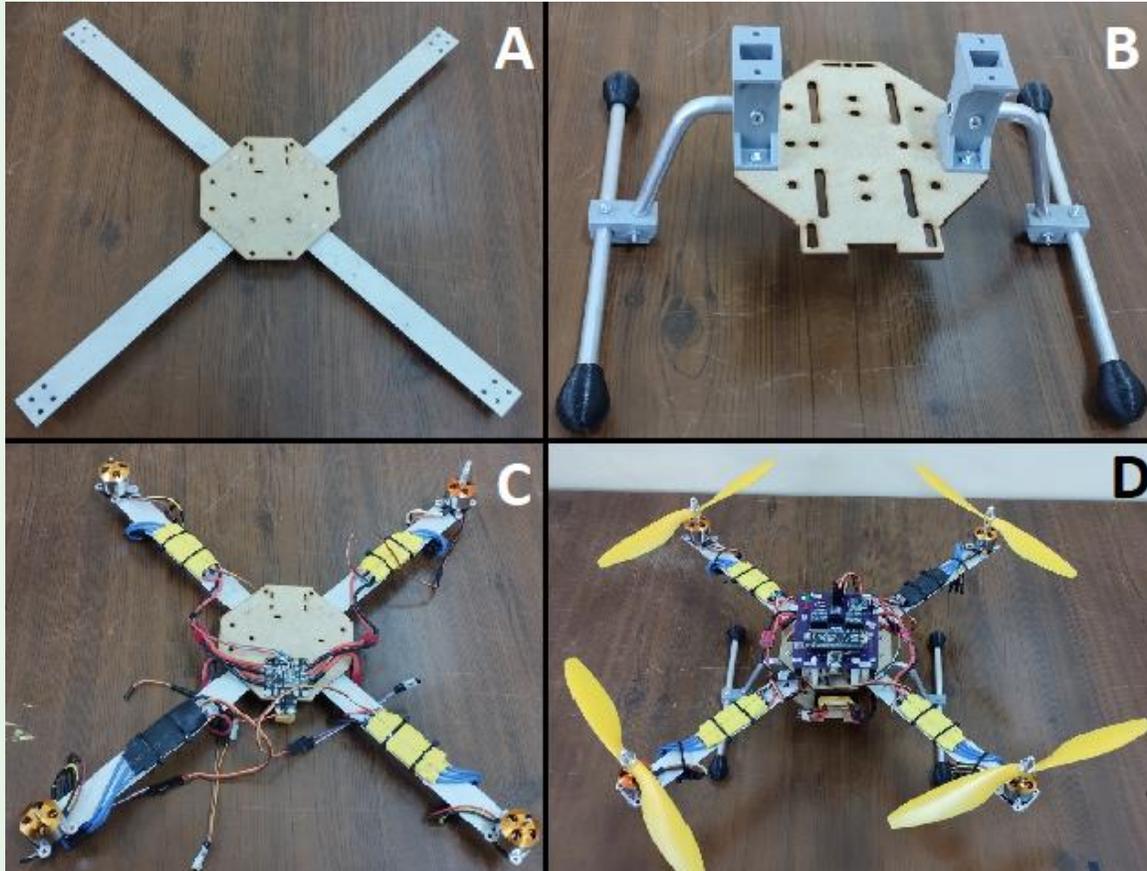
Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros





Antecedentes y
Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y
construcción

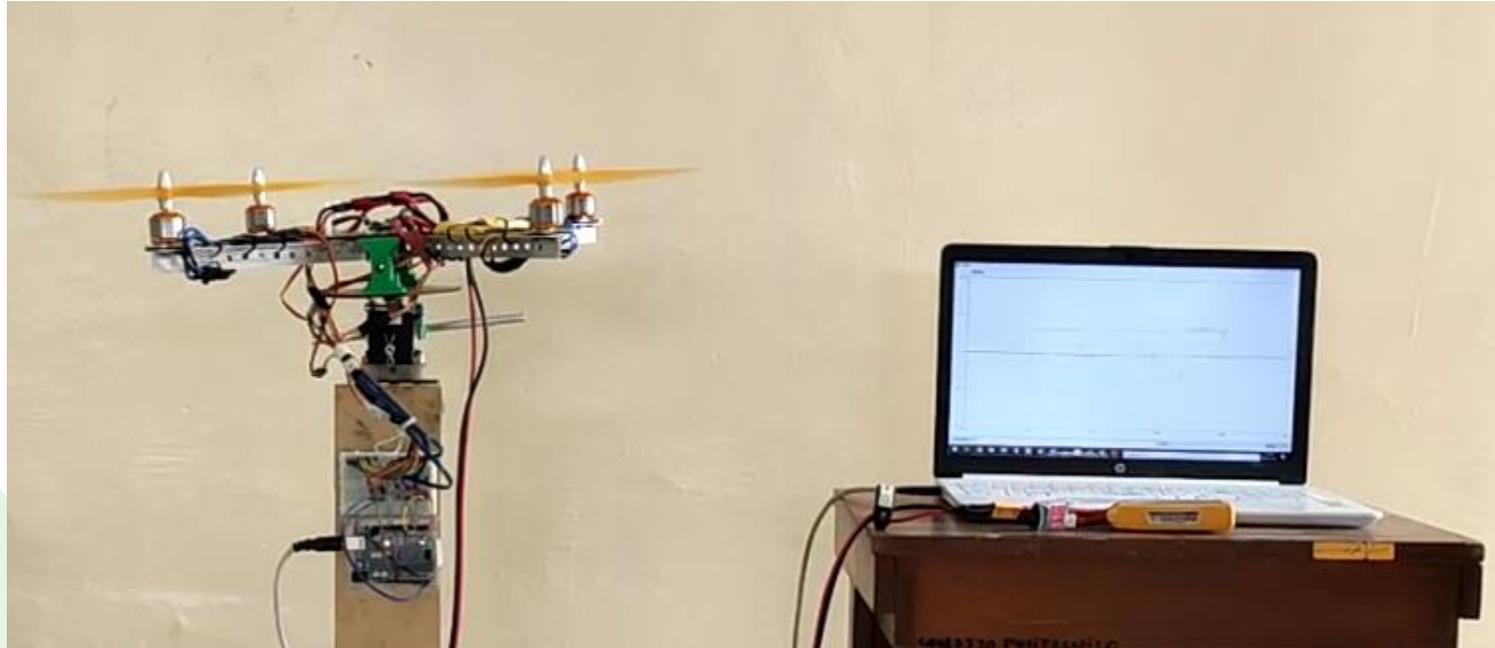
**Pruebas y
Resultados**

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Calibración de lazos de control



	Lazo interno (velocidad angular)			Lazo externo (ángulo)
	Kp	Ki	Kd	Kp
Roll	1	0.02	20	15
Pitch	1	0.02	20	15
Velocidad Yaw	1.1	0.02	0	-



Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

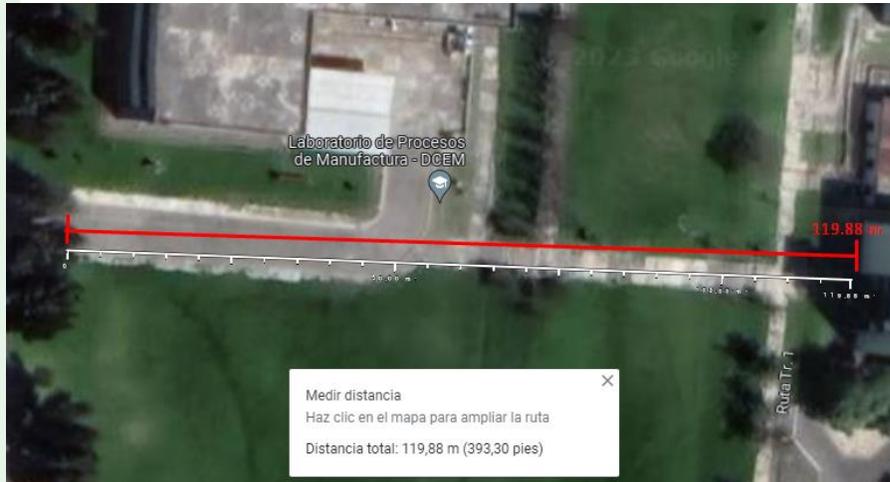
Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Pruebas de alcance de radiofrecuencia



Tipo transmisión	Alcance [m]
Comandos remotos	120
Telemetría	60



Antecedentes y Justificación

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

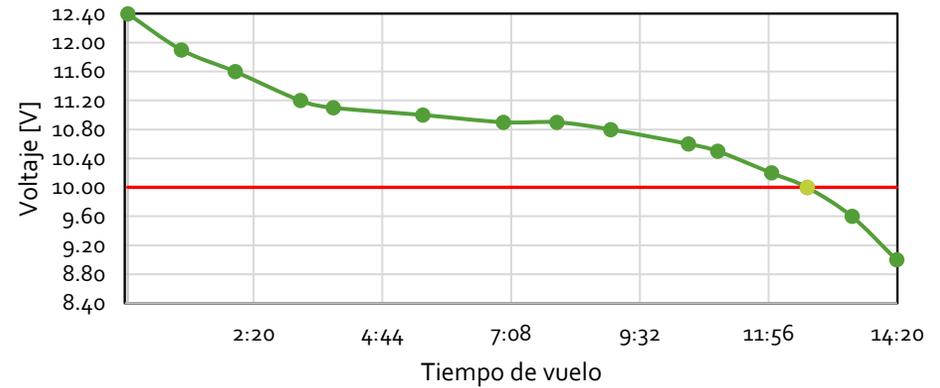
Recomendaciones

Trabajos futuros

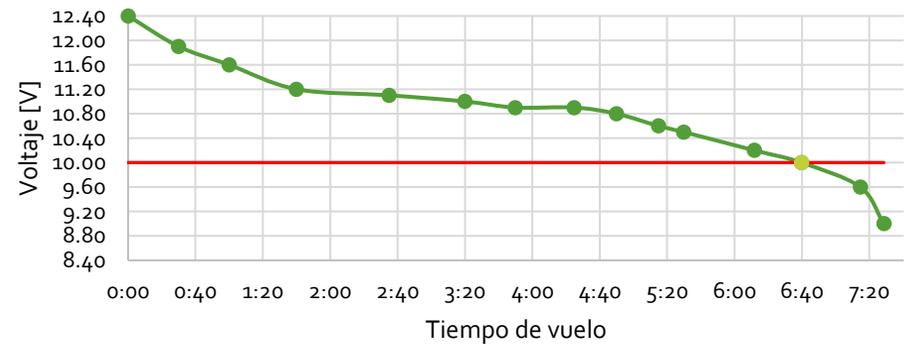
Pruebas de vuelo



Volataje de la bateria vs Tiempo de vuelo



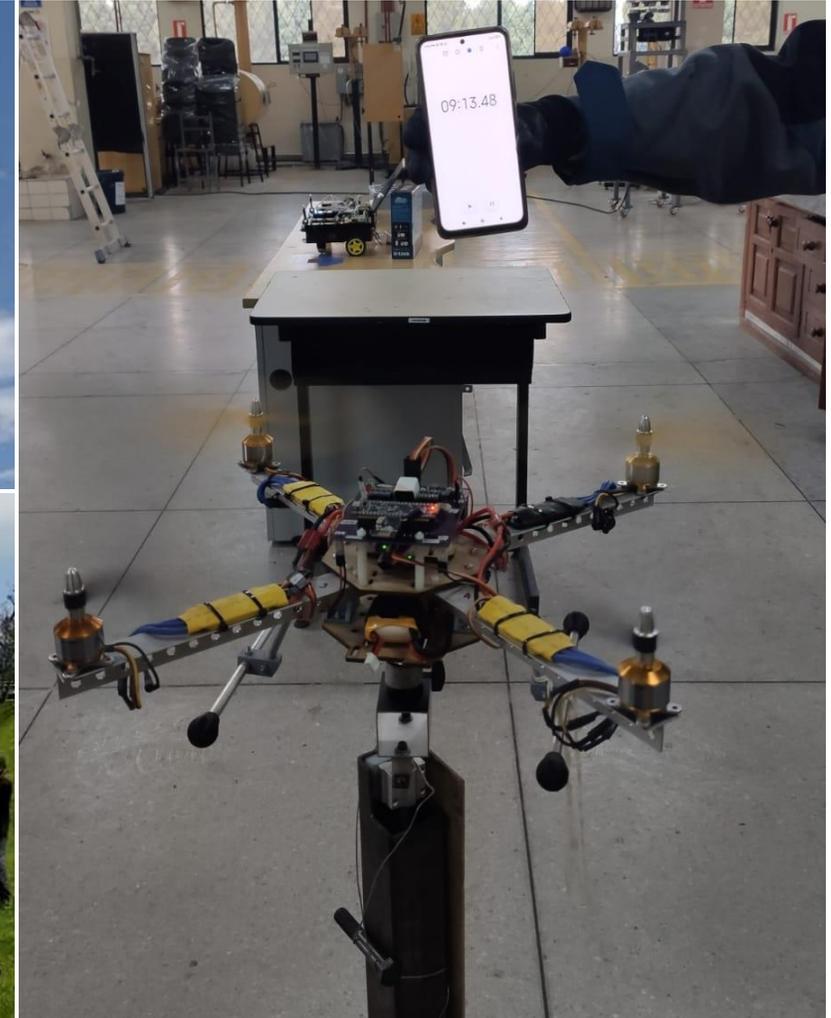
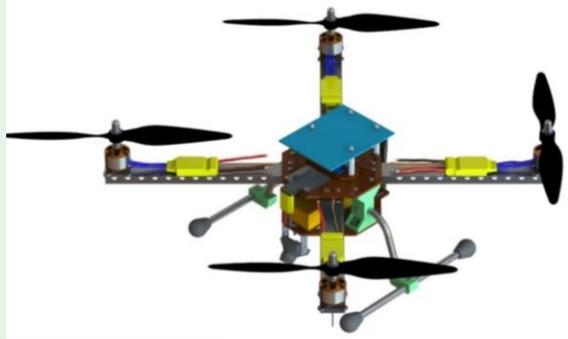
Volataje de la bateria vs Tiempo de vuelo con carga





Conclusiones y recomendaciones

Antecedentes y Justificación



Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros





**Gracias por
su atención**