



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA



Universidad  
Rey Juan Carlos

Sistema de control autónomo en FPGAs libres para  
robots

Juan Ordóñez Cerezo

Universidad de Granada

# Índice

1 Contexto

2 Infraestructura

3 Objetivos

4 Robot Balancín

- Diseño del sistema
- Implementación del sistema
- Ensamblado y sistema final

5 Cuadricóptero con visión artificial

- Diseño del sistema
- Implementación de la percepción
- Diseño del control

6 Conclusiones y trabajo futuro

## Robots Autónomos



(a) Roomba



(b) Boston dynamics

## Robótica Educativa





- En este contexto nace IceStudio



- En este contexto nace IceStudio
- Ensalza el uso de FPGAs incluyendo todas sus ventajas

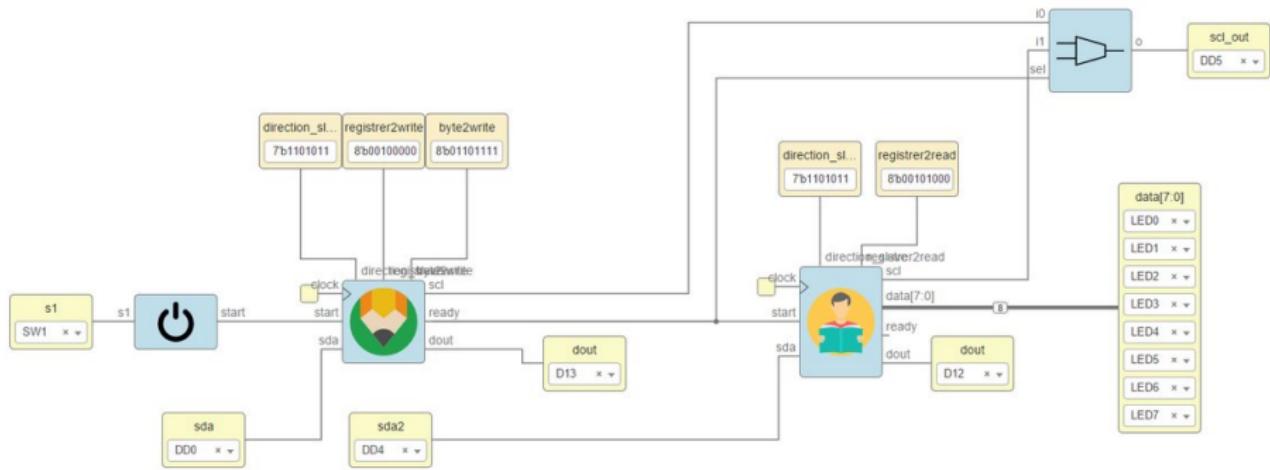


- En este contexto nace IceStudio
- Ensalza el uso de FPGAs incluyendo todas sus ventajas
- Permite implementación hardware de manera gráfica

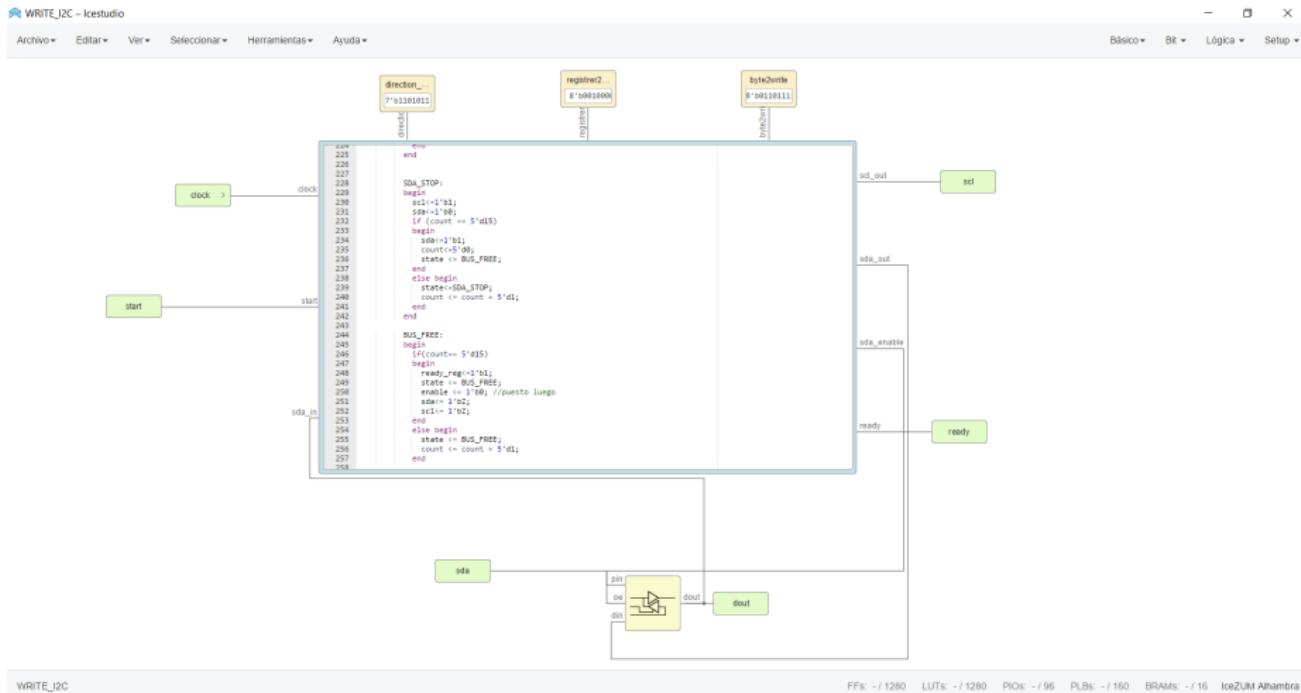


- En este contexto nace IceStudio
- Ensalza el uso de FPGAs incluyendo todas sus ventajas
- Permite implementación hardware de manera gráfica
- Ventaja: Configuración del nivel de abstracción

# IceStudio



IceStudio



- Tarjeta FPGA con Lattice iCE40HK

- Tarjeta FPGA con Lattice iCE40HK
- 4K de memoria

- Tarjeta FPGA con Lattice iCE40HK
- 4K de memoria
- 12 pines digitales

- Tarjeta FPGA con Lattice iCE40HK
- 4K de memoria
- 12 pines digitales
- 3 pines analógicos accesibles mediante i2c

- Tarjeta FPGA con Lattice iCE40HK
- 4K de memoria
- 12 pines digitales
- 3 pines analógicos accesibles mediante i2c

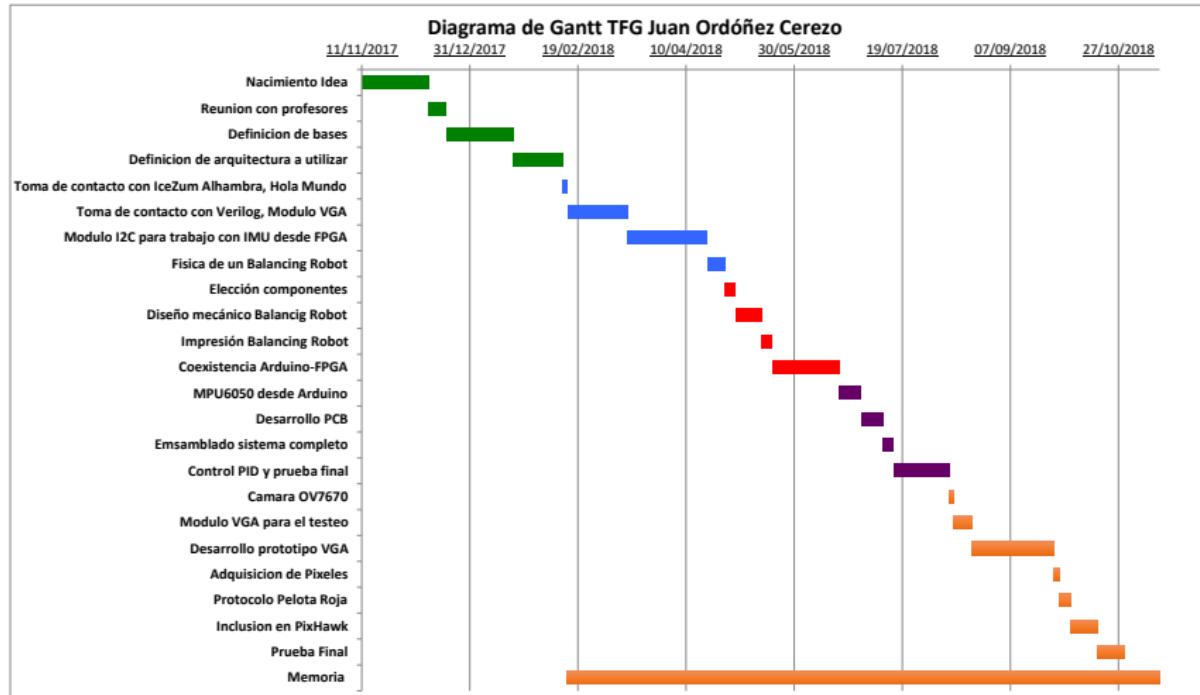
Diseñada y ensamblada en Granada



# IceZum Alhambra



# Planificación y Metodología de trabajo



# Planificación y Metodología de trabajo



(c) GitHub



(d) Appear

# Objetivos

- Comportamientos robóticos mediante lenguajes de implementación hardware

# Objetivos

- Comportamientos robóticos mediante lenguajes de implementación hardware
- Uso de herramientas libres como IceStudio o IceZum Alhambra

# Objetivos

- Comportamientos robóticos mediante lenguajes de implementación hardware
- Uso de herramientas libres como IceStudio o IceZum Alhambra
- Habilidad para el desarrollo de PCBs

# Objetivos

- Comportamientos robóticos mediante lenguajes de implementación hardware
- Uso de herramientas libres como IceStudio o IceZum Alhambra
- Habilidad para el desarrollo de PCBs
- Habilidad para el diseño e impresión de estructuras mecánicas

# Objetivos

- Comportamientos robóticos mediante lenguajes de implementación hardware
- Uso de herramientas libres como IceStudio o IceZum Alhambra
- Habilidad para el desarrollo de PCBs
- Habilidad para el diseño e impresión de estructuras mecánicas
- Entender la importancia de la coexistencia entre microcontrolador y FPGA

# Índice

1 Contexto

2 Infraestructura

3 Objetivos

4 Robot Balancín

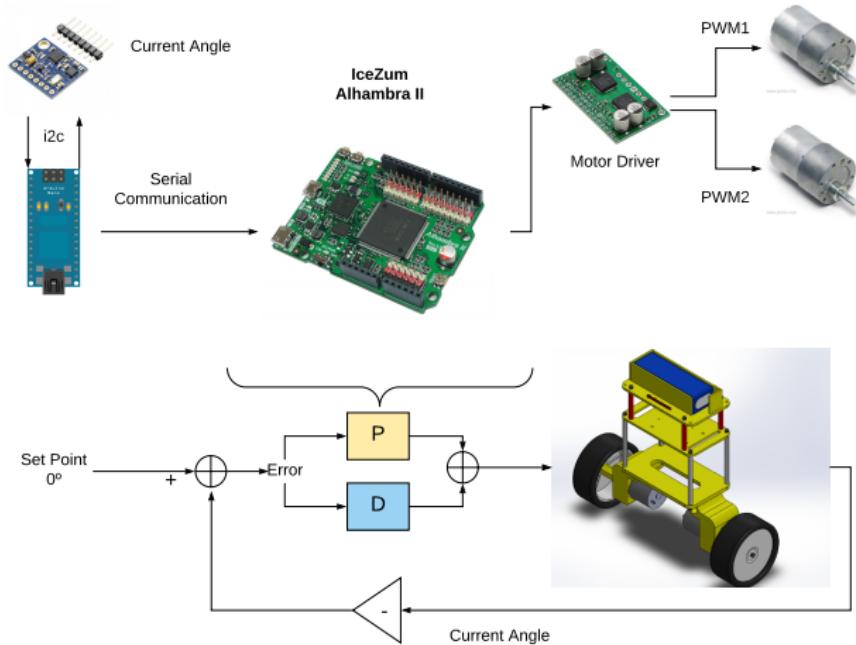
- Diseño del sistema
- Implementación del sistema
- Ensamblado y sistema final

5 Cuadricóptero con visión artificial

- Diseño del sistema
- Implementación de la percepción
- Diseño del control

6 Conclusiones y trabajo futuro

# Diseño del sistema



# Índice

1 Contexto

2 Infraestructura

3 Objetivos

4 Robot Balancín

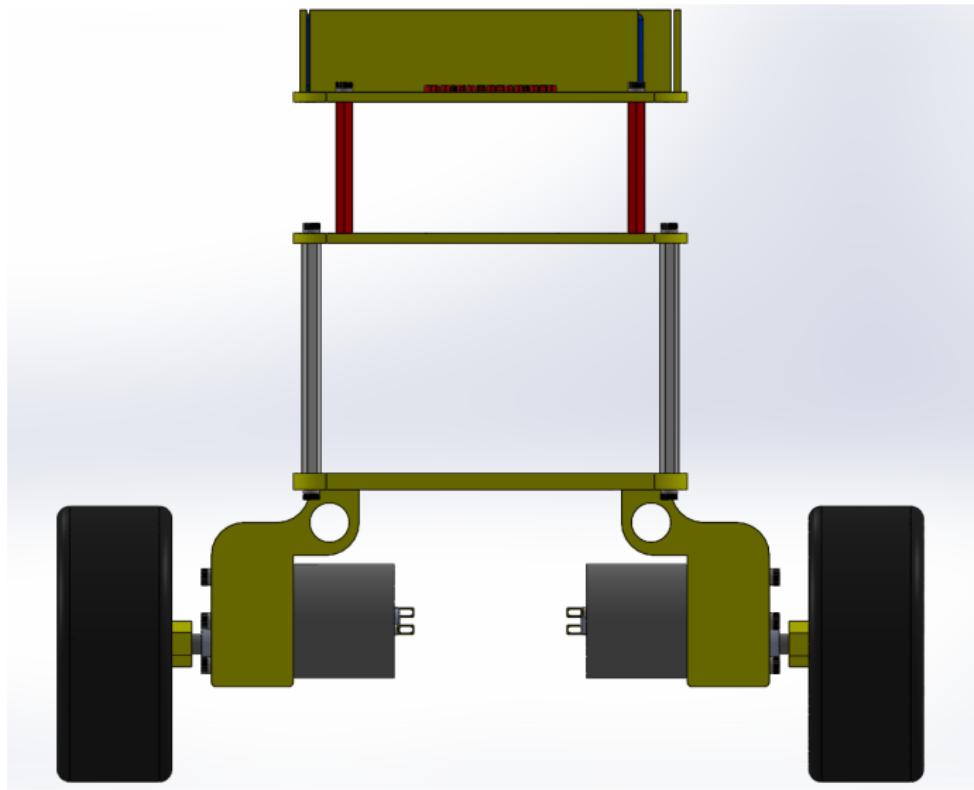
- Diseño del sistema
- **Implementación del sistema**
- Ensamblado y sistema final

5 Cuadricóptero con visión artificial

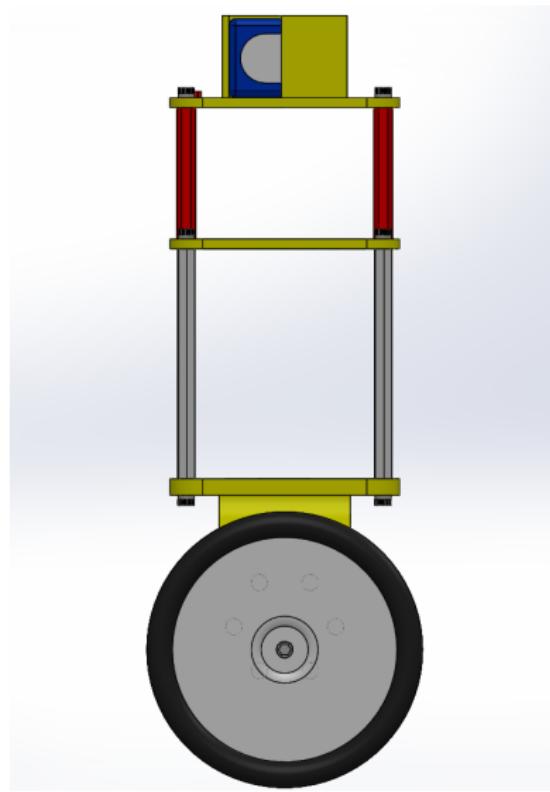
- Diseño del sistema
- Implementación de la percepción
- Diseño del control

6 Conclusiones y trabajo futuro

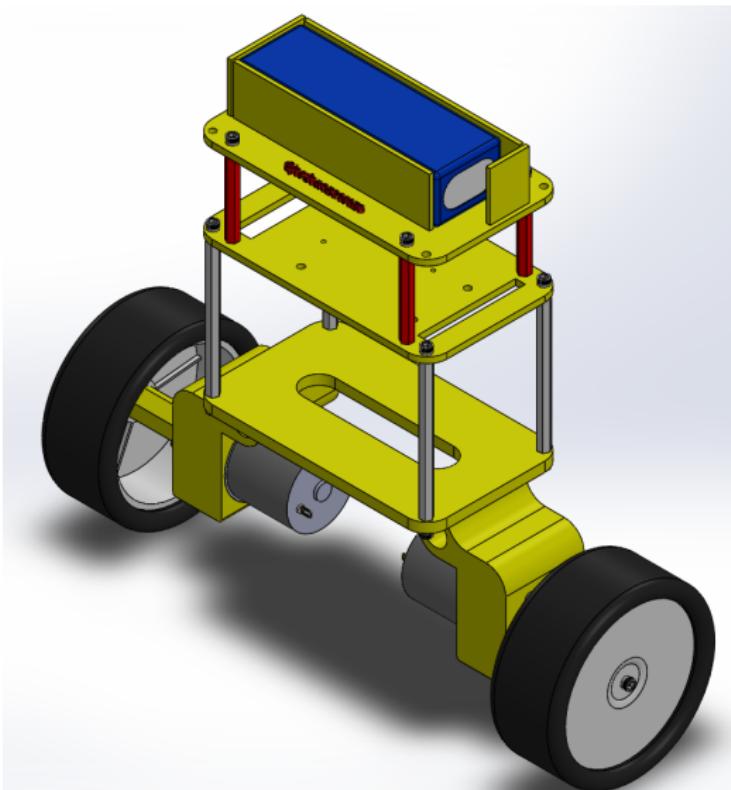
# Estructura mecánica



# Estructura mecánica



# Estructura mecánica



# Estructura mecánica

- ¿Cuál es la mejor opción para facilitar la estabilización?

# Estructura mecánica

- ¿Cuál es la mejor opción para facilitar la estabilización?
- Caracterización matemática del modelo físico

# Estructura mecánica

- ¿Cuál es la mejor opción para facilitar la estabilización?
- Caracterización matemática del modelo físico
- Centro de masas en el centro del eje vertical

# Estructura mecánica

- ¿Cuál es la mejor opción para facilitar la estabilización?
- Caracterización matemática del modelo físico
- Centro de masas en el centro del eje vertical

SE HACE USO DE SOLIDWORKS PARA EL DISEÑO DE LAS PIEZAS Y  
EL CÁLCULO DEL CENTRO DE MASAS



# Estructura mecánica

Propiedades físicas

EnsanBalanceCab.SLDASM

Reemplazar las propiedades de masa... Recalcular

Incluir sólidos/componentes ocultos

Crear operación de centro de masa

Mostrar masa de cordón de soldadura

Información de valores de coordenadas relativas a: -- predeterminado --

Propiedades de masa de EnsanBalanceCab

Configuración: Predeterminado

Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

Masa = 844.98 gramos

Volumen = 537110.62 milímetros cúbicos

Área de superficie = 198034.83 milímetros cuadrados

Centro de masa ( milímetros )

X = -8.46  
Y = 56.93  
Z = 169.98

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )

Medido desde el centro de masa.

Ixx	Iyy	Izz	Px	Py	Pz
-0.07	1.00	0.00	3978306.17	6215169.35	9712137.10
-1.00	-0.07	0.00			
0.00	0.00	1.00			

Momentos de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )

Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas

Lxx	Lyy	Lzz	Lxy	Lxz	Lyz
620279.51	-1540.61	-1001.61			
549490.04	29464270.33	8175944.70			
-1001.61	-1540.76	9772156.46			

Momentos de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )

Medido en el interior de coordenadas de medida.

Ixx	Iyy	Izz	Ixy	Ixz	Iyz
33355089.67	561635.54	1215702.34			
-561835.54	29464270.33	8175944.70			
1215702.34	8175944.70	12571562.45			

Ayuda Imprimir... Copiar al portapapeles

# Obtención ángulo

- Para corregir el ángulo es necesario el conocimiento de éste en cada instante.

# Obtención ángulo

- Para corregir el ángulo es necesario el conocimiento de éste en cada instante.
- Unidad de medida inercial (IMU)

# Obtención ángulo

- Para corregir el ángulo es necesario el conocimiento de éste en cada instante.
- Unidad de medida incencial (IMU)

## MPU6050



# Obtención ángulo

- 6DOF

# Obtención ángulo

- 6DOF
- Acelerómetro y giroscopio

# Obtención ángulo

- 6DOF
- Acelerómetro y giroscopio
- Comunicación I2C

# Obtención ángulo

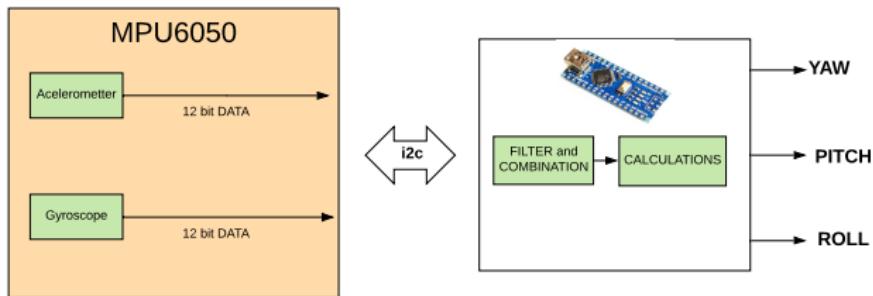
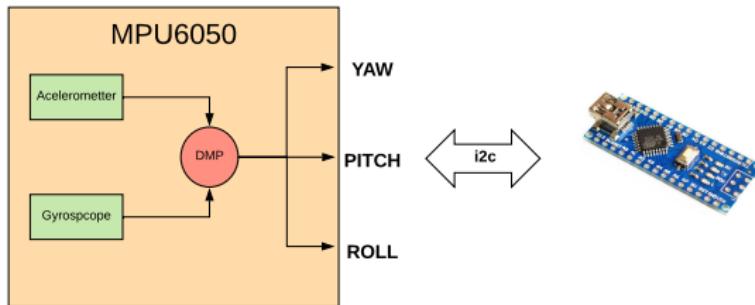
- 6DOF
- Acelerómetro y giroscopio
- Comunicación I2C
- Uso de DMP solo para Arduino

# Obtención ángulo

- 6DOF
- Acelerómetro y giroscopio
- Comunicación I2C
- Uso de DMP solo para Arduino

**MEJOR OPCIÓN CON ARDUINO**

# Obtención ángulo



# Coexistencia microcontrolador-FPGA

- Ángulo obtenido por Arduino-Nano

# Coexistencia microcontrolador-FPGA

- Ángulo obtenido por Arduino-Nano
- FPGA necesita conocer el ángulo

# Coexistencia microcontrolador-FPGA

- Ángulo obtenido por Arduino-Nano
- FPGA necesita conocer el ángulo

## Coexistencia microcontrador-FPGA

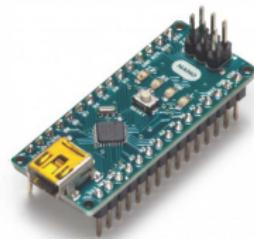
# Coexistencia microcontrolador-FPGA

- Ángulo obtenido por Arduino-Nano
- FPGA necesita conocer el ángulo

**Coexistencia microcontrador-FPGA**

**Paralelizar los procesos que pueden ser paralelizados**

# Coexistencia microcontrolador-FPGA



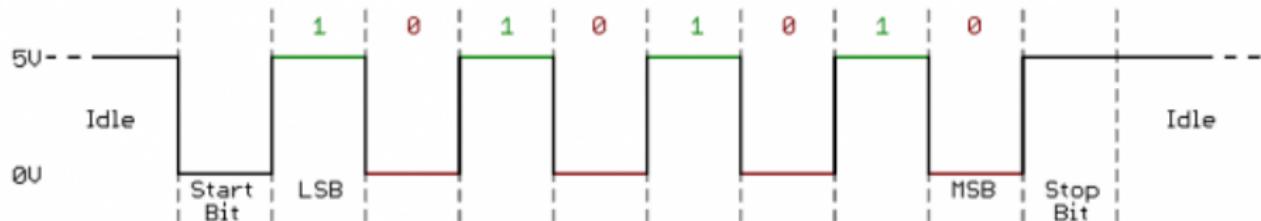
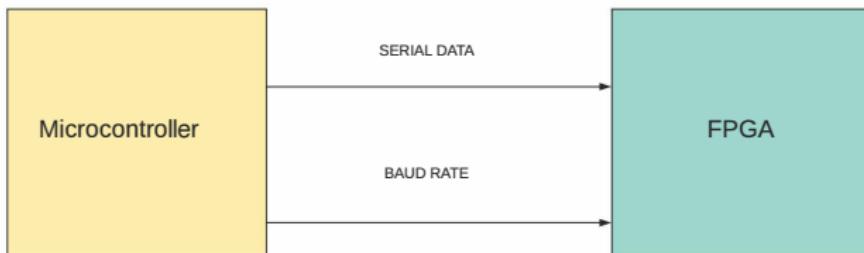
SEQUENTIAL PROCESS

COMMUNICATION

A horizontal arrow pointing from left to right, indicating the direction of communication between the two boards.

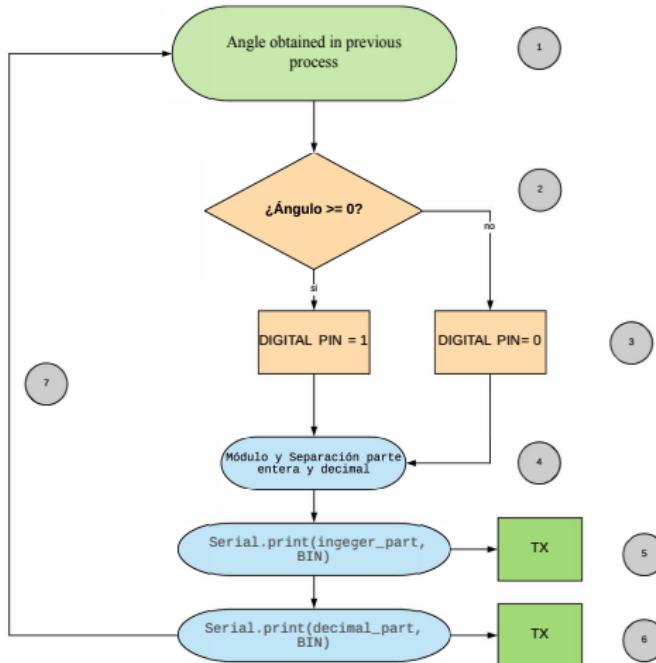
PARALLEL PROCESS

# Coexistencia microcontrolador-FPGA



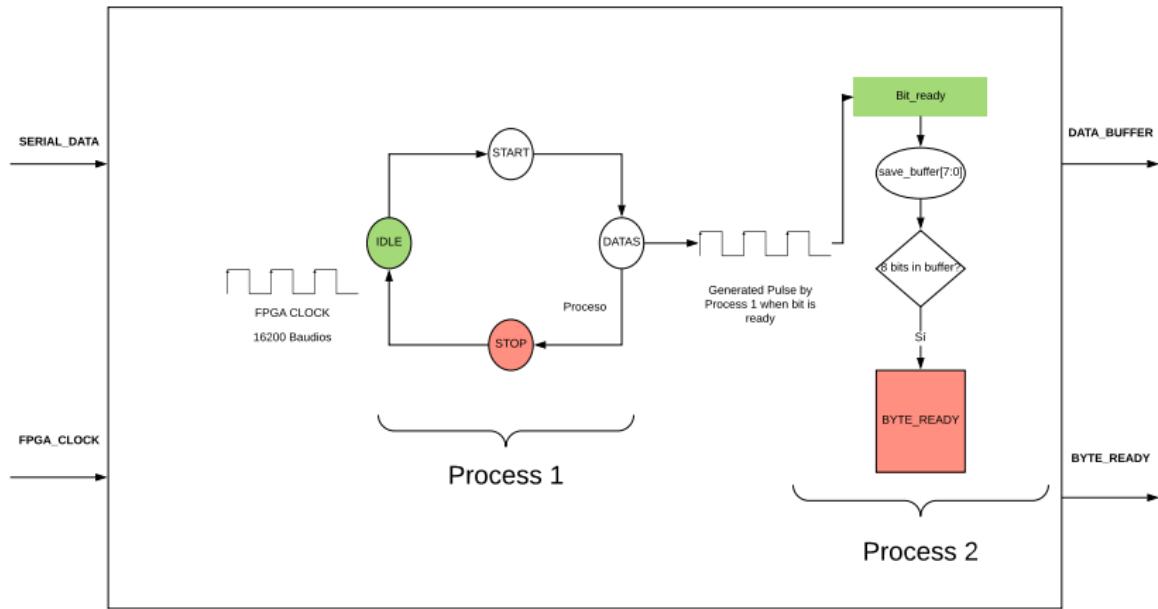
# Coexistencia microcontrolador-FPGA

## Desde el punto de vista del microcontrolador



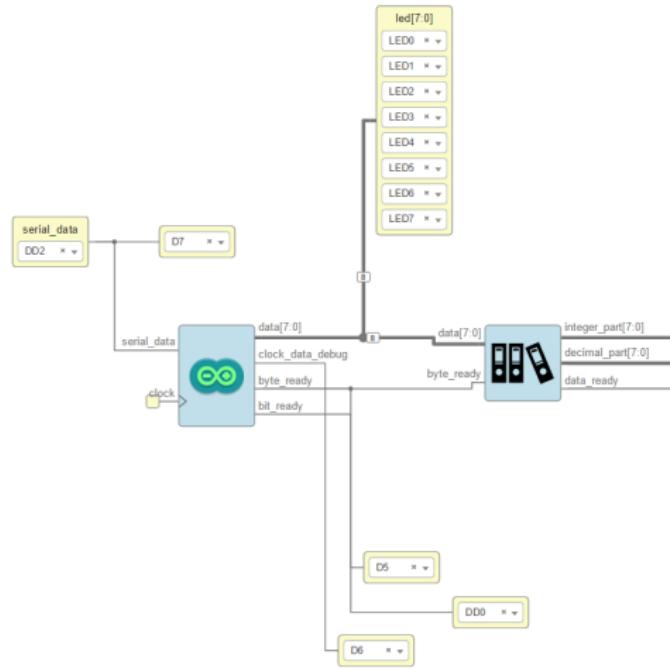
# Coexistencia microcontrolador-FPGA

## Desde el punto de vista de la FPGA



# Coexistencia microcontrolador-FPGA

## Aspecto en IceStudio de la comunicación



# Control PID

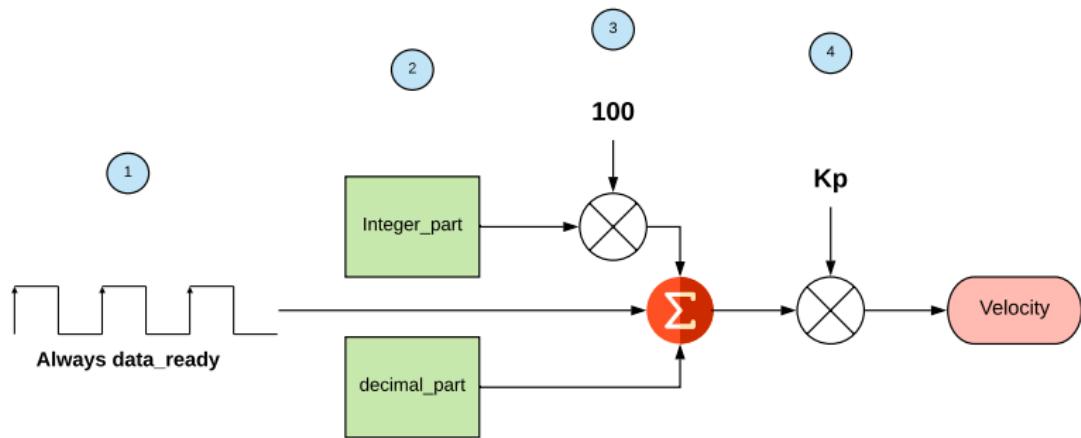
- Necesidad de minimizar el ángulo, en este caso a  $0^\circ$

- Necesidad de minimizar el ángulo, en este caso a  $0^\circ$
- Surgen muchas opciones, lógica fuzzy, algoritmos genéticos, PID

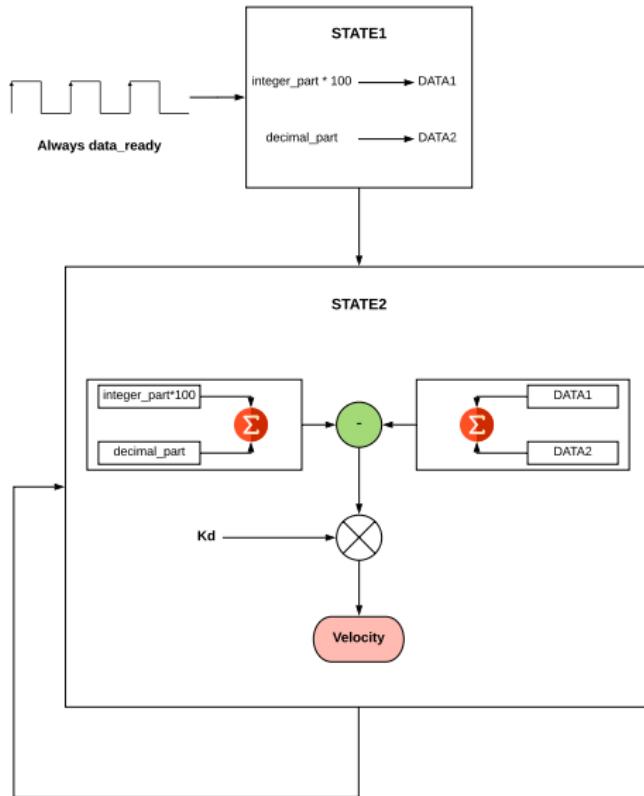
- Necesidad de minimizar el ángulo, en este caso a  $0^\circ$
- Surgen muchas opciones, lógica fuzzy, algoritmos genéticos, PID

**PID por su fácil implementación y posibilidad de paralelismo**

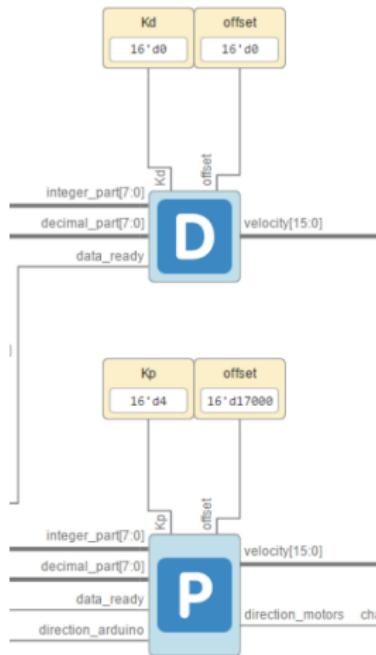
# Control P



# Control D



# Control PD

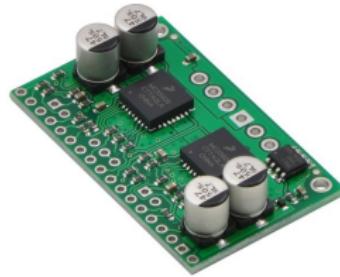


# Control de los motores

- Traducción de la salida del PD, velocidad y sentido de motores DC

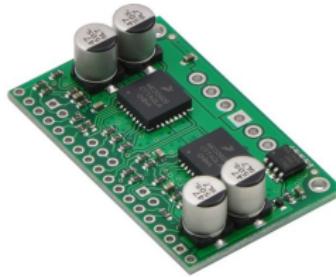
- Traducción de la salida del PD, velocidad y sentido de motores DC

## MC33926



- Traducción de la salida del PD, velocidad y sentido de motores DC

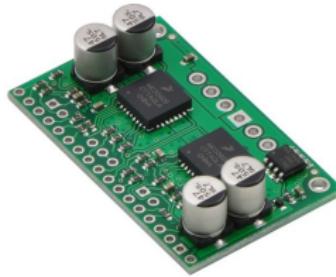
## MC33926



- Como entradas:
  - Señal PWM

- Traducción de la salida del PD, velocidad y sentido de motores DC

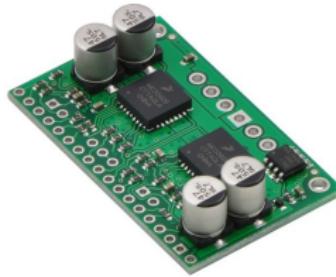
## MC33926



- Como entradas:
  - Señal PWM
  - Sentido de giro

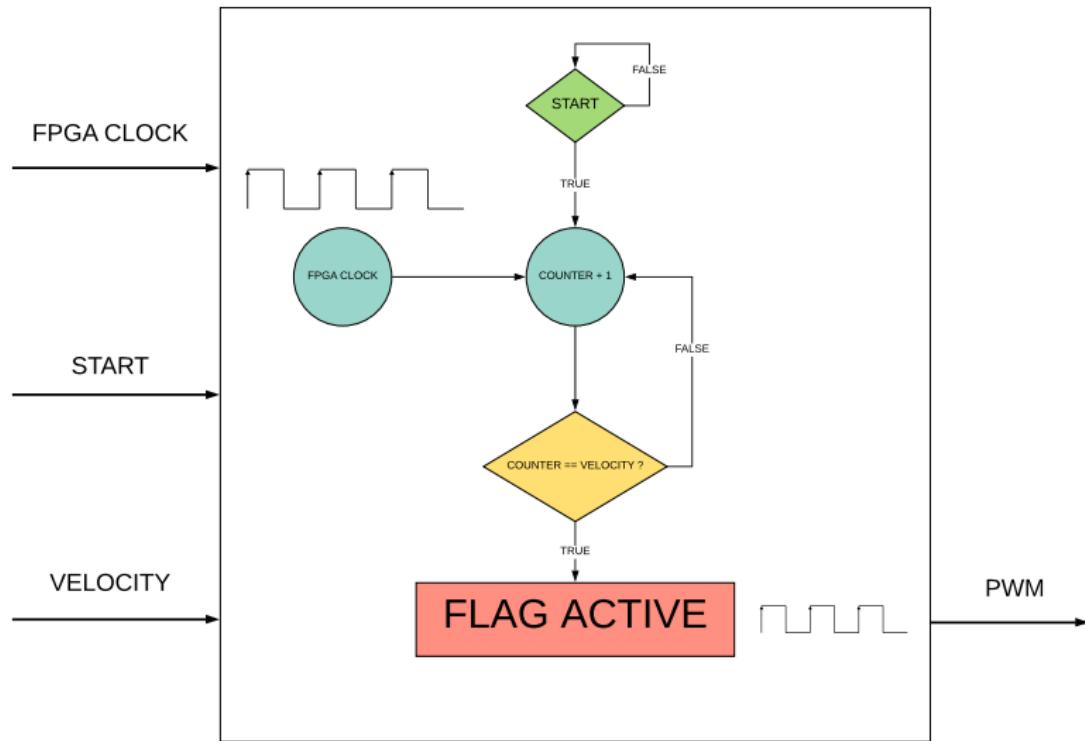
- Traducción de la salida del PD, velocidad y sentido de motores DC

## MC33926

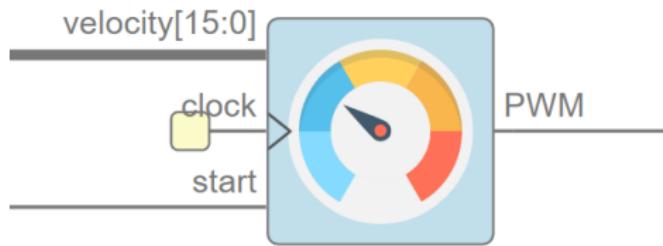


- Como entradas:
  - Señal PWM
  - Sentido de giro
- Como salidas:
  - Movimiento de los motores

# Módulo PWM



# Módulo PWM



# Diseño e Implementación de PCB

- Demasiados cables sueltos y puentes en el sistema final

# Diseño e Implementación de PCB

- Demasiados cables sueltos y puentes en el sistema final
- Necesidad de englobarlo todo en un sistema único y compacto

# Diseño e Implementación de PCB

- Demasiados cables sueltos y puentes en el sistema final
- Necesidad de englobarlo todo en un sistema único y compacto
- Que resuelva problemas de ruido y referencia de tierra.

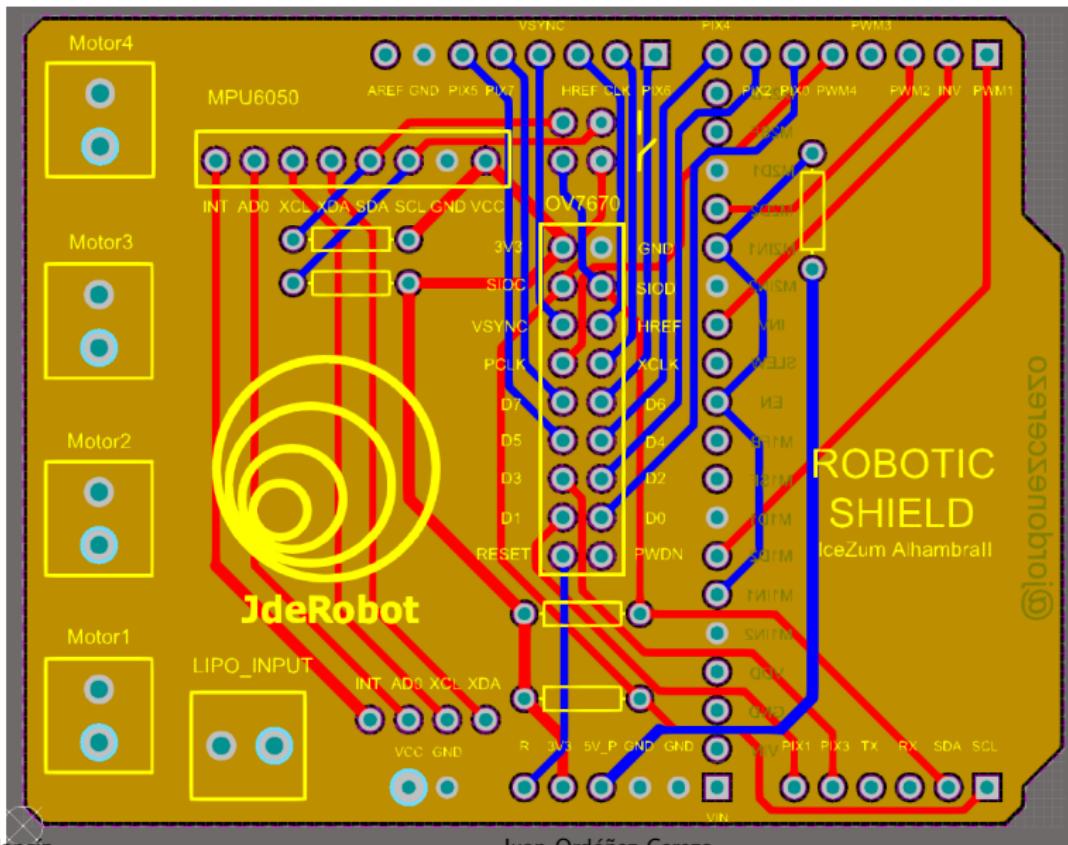
# Diseño e Implementación de PCB

- Demasiados cables sueltos y puentes en el sistema final
- Necesidad de englobarlo todo en un sistema único y compacto
- Que resuelva problemas de ruido y referencia de tierra.

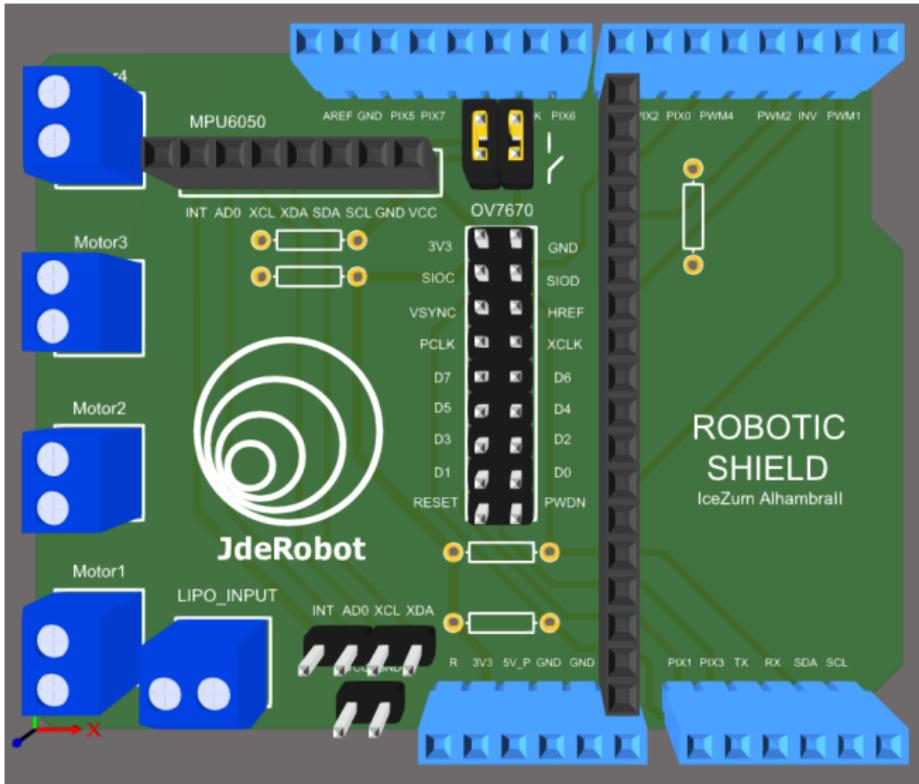
## Printed Circuit Board, PCB



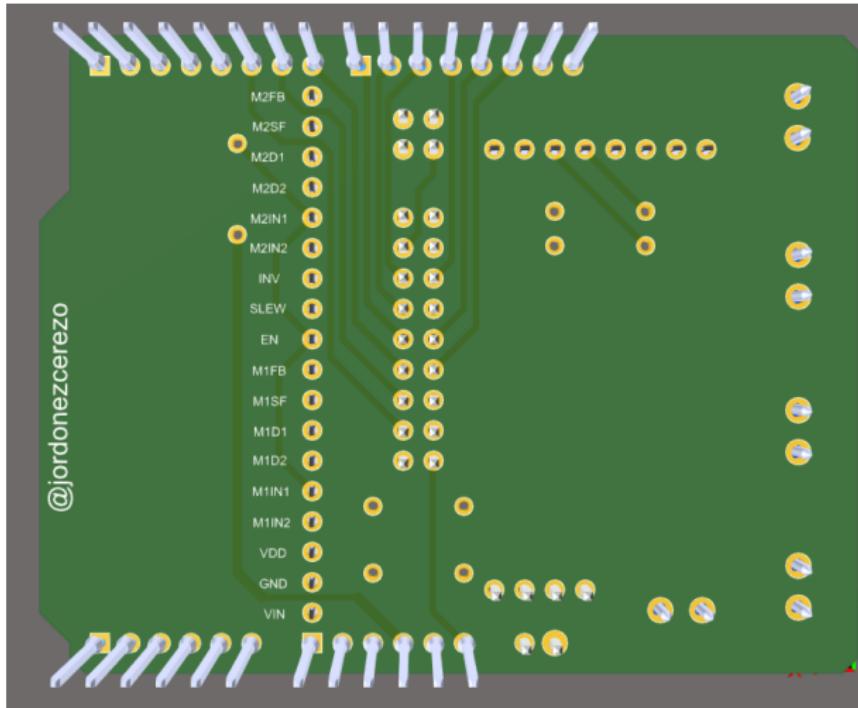
## Diseño e Implementación de PCB



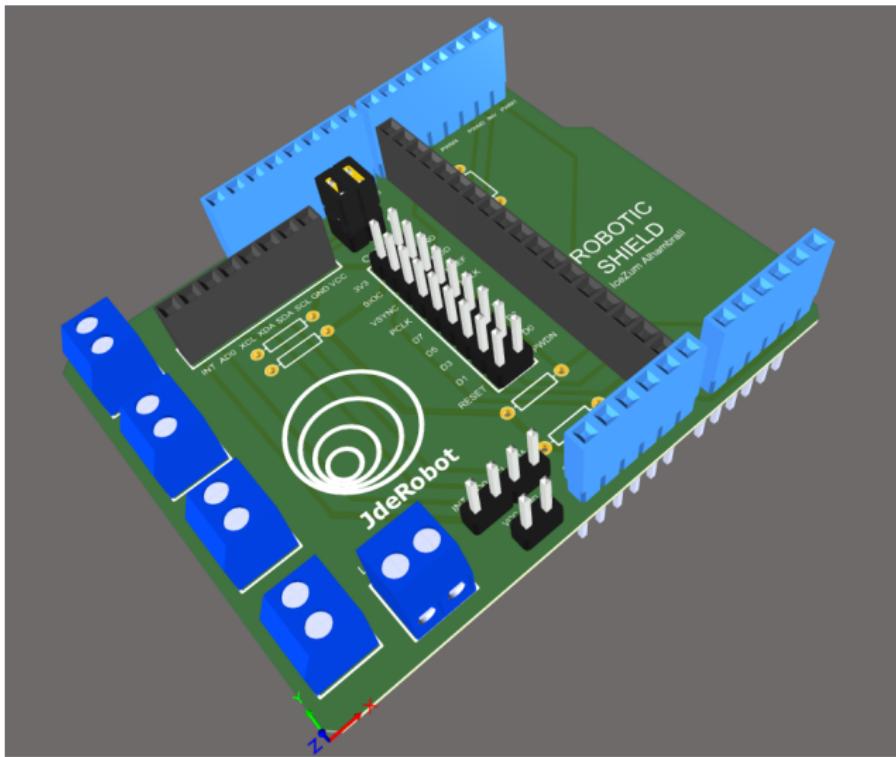
# Diseño e Implementación de PCB



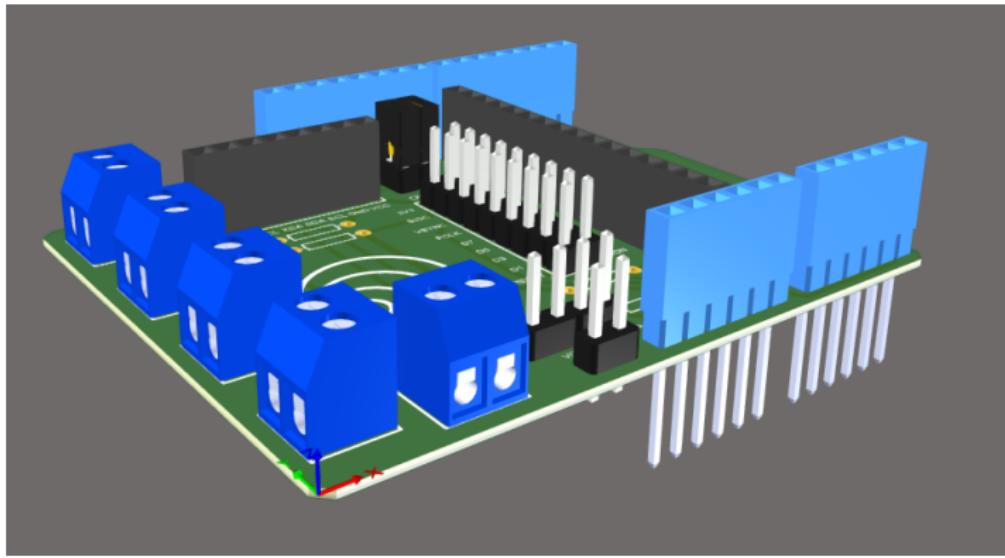
# Diseño e Implementación de PCB



## Diseño e Implementación de PCB



# Diseño e Implementación de PCB



# Índice

1 Contexto

2 Infraestructura

3 Objetivos

4 Robot Balancín

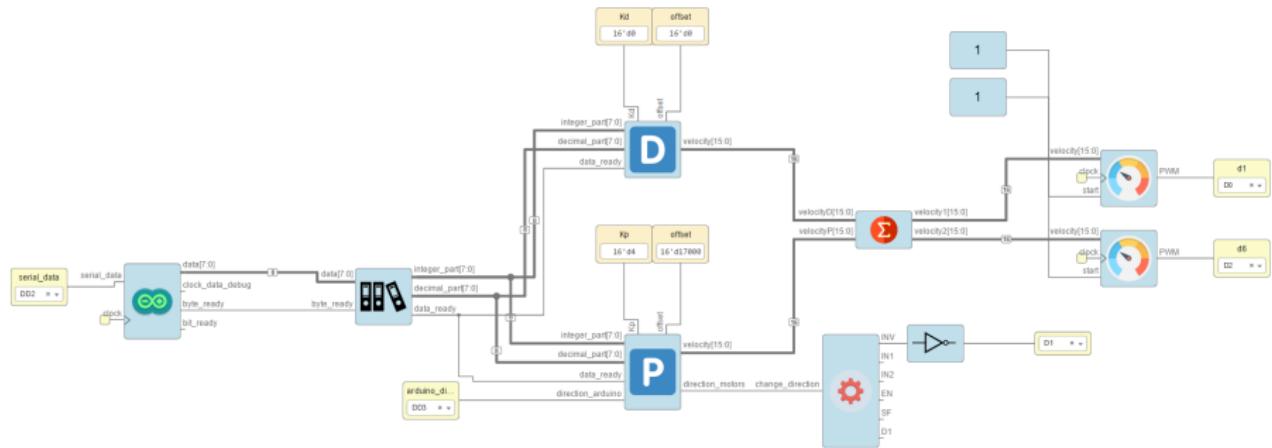
- Diseño del sistema
- Implementación del sistema
- **Ensamblado y sistema final**

5 Cuadricóptero con visión artificial

- Diseño del sistema
- Implementación de la percepción
- Diseño del control

6 Conclusiones y trabajo futuro

# Ensamblado y sistema final



# Ensamblado y sistema final

# Índice

1 Contexto

2 Infraestructura

3 Objetivos

4 Robot Balancín

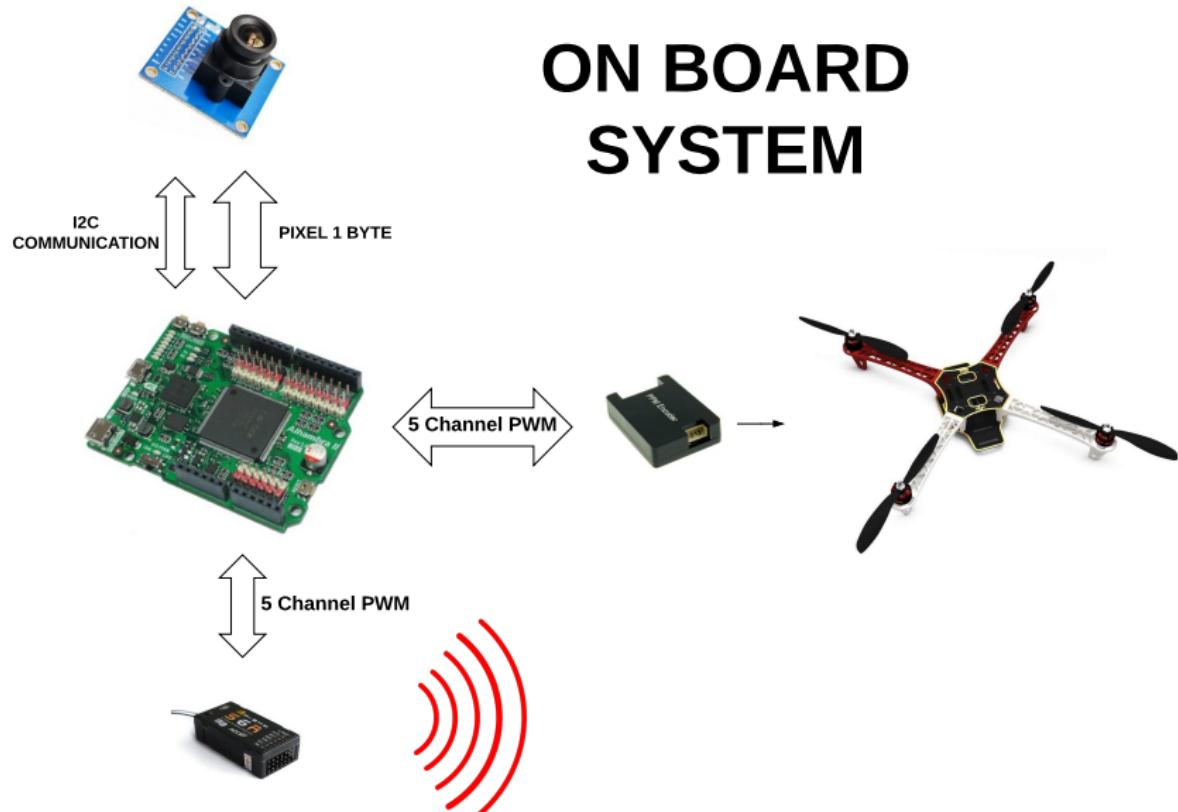
- Diseño del sistema
- Implementación del sistema
- Ensamblado y sistema final

5 Cuadricóptero con visión artificial

- Diseño del sistema
- Implementación de la percepción
- Diseño del control

6 Conclusiones y trabajo futuro

## ON BOARD SYSTEM



# Índice

1 Contexto

2 Infraestructura

3 Objetivos

4 Robot Balancín

- Diseño del sistema
- Implementación del sistema
- Ensamblado y sistema final

5 Cuadricóptero con visión artificial

- Diseño del sistema
- Implementación de la percepción**
- Diseño del control

6 Conclusiones y trabajo futuro

# OV7670



- Transmisión de píxeles mediante 8 bits en paralelo

# OV7670



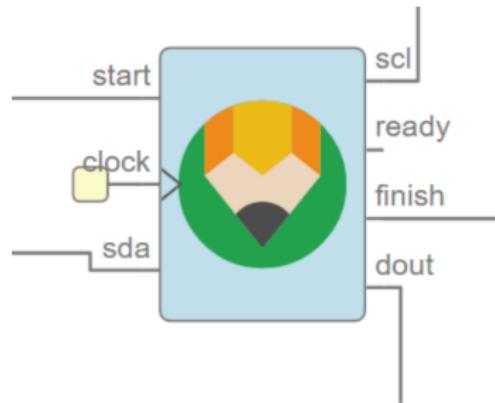
- Transmisión de píxeles mediante 8 bits en paralelo
- Comunicación I2C para la configuración necesaria, 640x480, RGB565, frecuencia de píxeles.



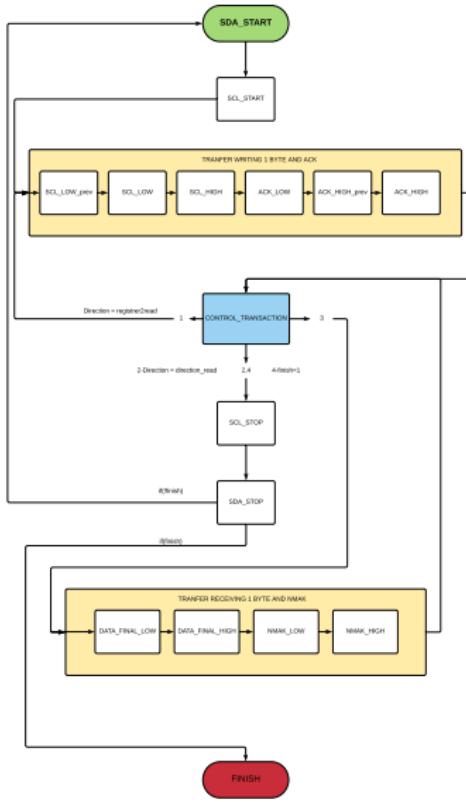
- Transmisión de píxeles mediante 8 bits en paralelo
- Comunicación I2C para la configuración necesaria, 640x480, RGB565, frecuencia de píxeles.

## NECESIDAD DE PROTOCOLO I2C

# Protocolo I2C



# Protocolo I2C



# Reconocimiento del volumen y posición

$$Volumen = Num_{\text{pixeles filtrados}} / Num_{\text{pixeles totales}}$$

# Reconocimiento del volumen y posición

$$Acum_X = \sum \text{columna de píxel filtrado}$$

$$X_{media} = \frac{Acum_X}{Num_{píxeles\ filtrados}}$$

$$Error_X = X_{media} - \frac{anchura}{2}$$

# Reconocimiento del volumen y posición

$$Acum_Y = \sum \text{fila de píxel filtrado}$$

$$Y_{media} = \frac{Acum_Y}{Num_{píxeles\ filtrados}}$$

$$Error_Y = Y_{media} - \frac{altura}{2}$$

# Índice

1 Contexto

2 Infraestructura

3 Objetivos

4 Robot Balancín

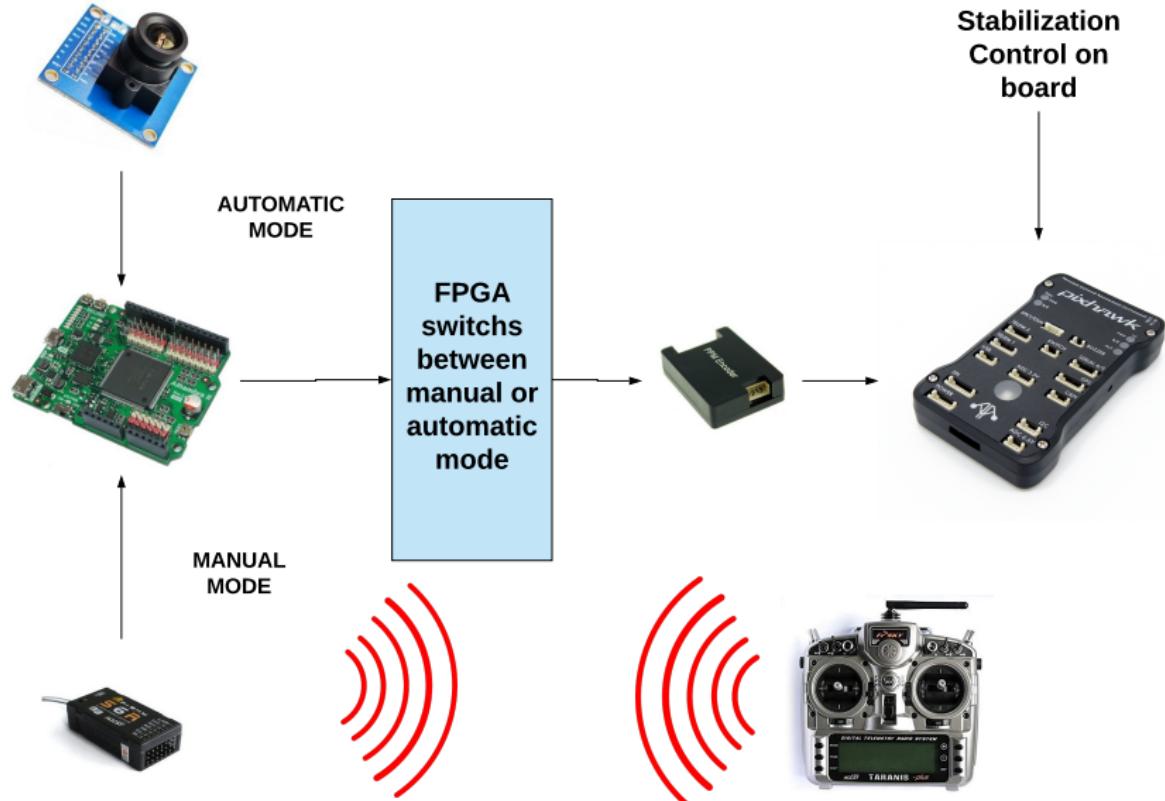
- Diseño del sistema
- Implementación del sistema
- Ensamblado y sistema final

5 Cuadricóptero con visión artificial

- Diseño del sistema
- Implementación de la percepción
- **Diseño del control**

6 Conclusiones y trabajo futuro

# Diseño del control



# Trabajo futuro

- Mejora de la mecánica del robot balancín

# Trabajo futuro

- Mejora de la mecánica del robot balancín
- Integrar una mejora del control PD

# Trabajo futuro

- Mejora de la mecánica del robot balancín
- Integrar una mejora del control PD
- Permitir fallos en el protocolo i2c

# Trabajo futuro

- Mejora de la mecánica del robot balancín
- Integrar una mejora del control PD
- Permitir fallos en el protocolo i2c
- Permitir una comunicación bidireccional en microcontrolador-FPGA

# Trabajo futuro

- Mejora de la mecánica del robot balancín
- Integrar una mejora del control PD
- Permitir fallos en el protocolo i2c
- Permitir una comunicación bidireccional en microcontrolador-FPGA
- Implementación del control a bordo del cuadricóptero

# Conclusiones

- Ser uno de los primeros en trabajar con una plataforma así siempre es importante para un ingeniero

# Conclusiones

- Ser uno de los primeros en trabajar con una plataforma así siempre es importante para un ingeniero
- Dificultades debido a lo anterior

# Conclusiones

- Ser uno de los primeros en trabajar con una plataforma así siempre es importante para un ingeniero
- Dificultades debido a lo anterior
- La unión hace la fuerza, Google groups

# Conclusiones

- Ser uno de los primeros en trabajar con una plataforma así siempre es importante para un ingeniero
- Dificultades debido a lo anterior
- La unión hace la fuerza, Google groups
- En los artículos siempre está la solución

# Conclusiones

- Ser uno de los primeros en trabajar con una plataforma así siempre es importante para un ingeniero
- Dificultades debido a lo anterior
- La unión hace la fuerza, Google groups
- En los artículos siempre está la solución
- Es importante ofrecer a los más pequeños las herramientas para que puedan aprender aspectos importantes

# Conclusiones

- Ser uno de los primeros en trabajar con una plataforma así siempre es importante para un ingeniero
- Dificultades debido a lo anterior
- La unión hace la fuerza, Google groups
- En los artículos siempre está la solución
- Es importante ofrecer a los más pequeños las herramientas para que puedan aprender aspectos importantes

**Tanto el software como el hardware es esencial**

