

Desarrollo de un conjunto de flujos de trabajo para la implementación de software embebido a bordo de computadoras de guía, navegación y control espacial

David Duarte

Escuela de Ingeniería Electrónica
Tecnológico de Costa Rica

15 de noviembre, 2024

Proyecto Final de
Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones

Agenda

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones

Proyecto Final de
Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones

ELNAV
2025

Proyecto Final de Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

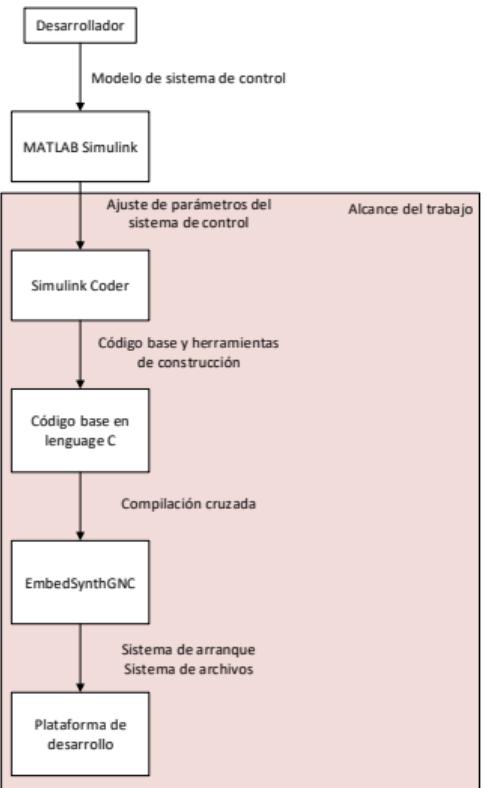
Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones



Proyecto Final de Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones

- Desarrollo de un conjunto de flujos de trabajo para la implementación de software embebido a bordo de computadores de guía y navegación espacial.

Objetivo general

- Desarrollar un conjunto de flujos de trabajo para la implementación de software a bordo de computadoras de guía, navegación y control espacial

Proyecto Final de
Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones

Proyecto Final de Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones

1. Identificar una plataforma de hardware para el desarrollo de un modelo de ingeniería de una computadora de navegación espacial.
2. Establecer flujos de trabajo para el prototipado de algoritmos de control de orientación y navegación para aplicaciones espaciales con hardware en el Loop.
3. Evaluar los casos de uso de una computadora de navegación y control espacial mediante la implementación de una aplicación de referencia demostrativa.

Proyecto Final de Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

Casos de uso

Filtro

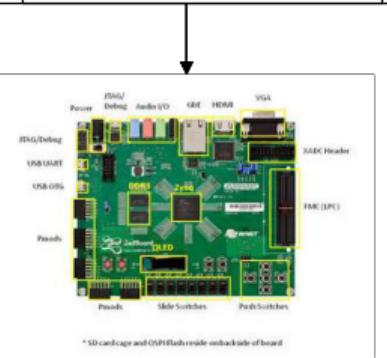
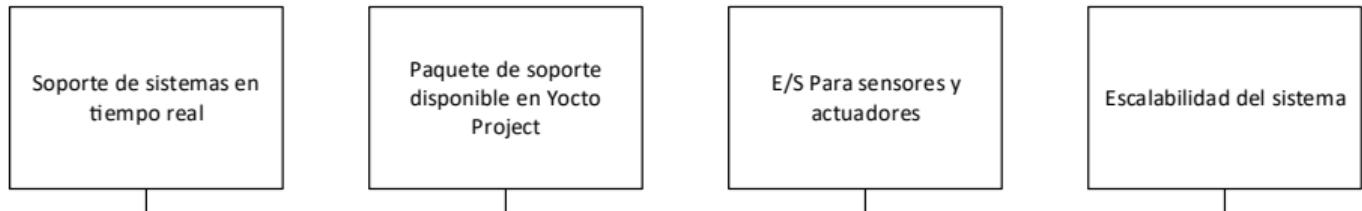
IMU

PID

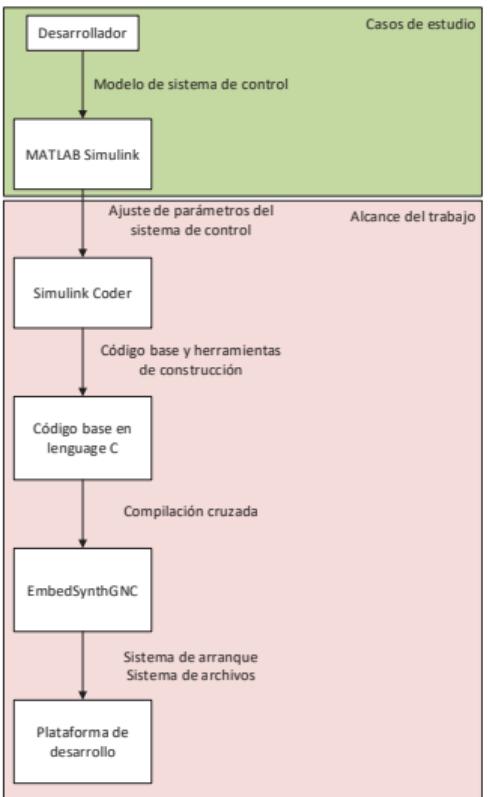
Conclusiones

- ▶ Selección de plataforma de desarrollo
- ▶ Diseño del flujo de trabajo
- ▶ Evaluación del flujo de trabajo con un caso de estudio básico
- ▶ Evaluación del flujo de trabajo con un caso de estudio orientado a los sistemas GNC

Selección de plataforma de desarrollo



Diseño flujo de trabajo



Proyecto Final de
Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

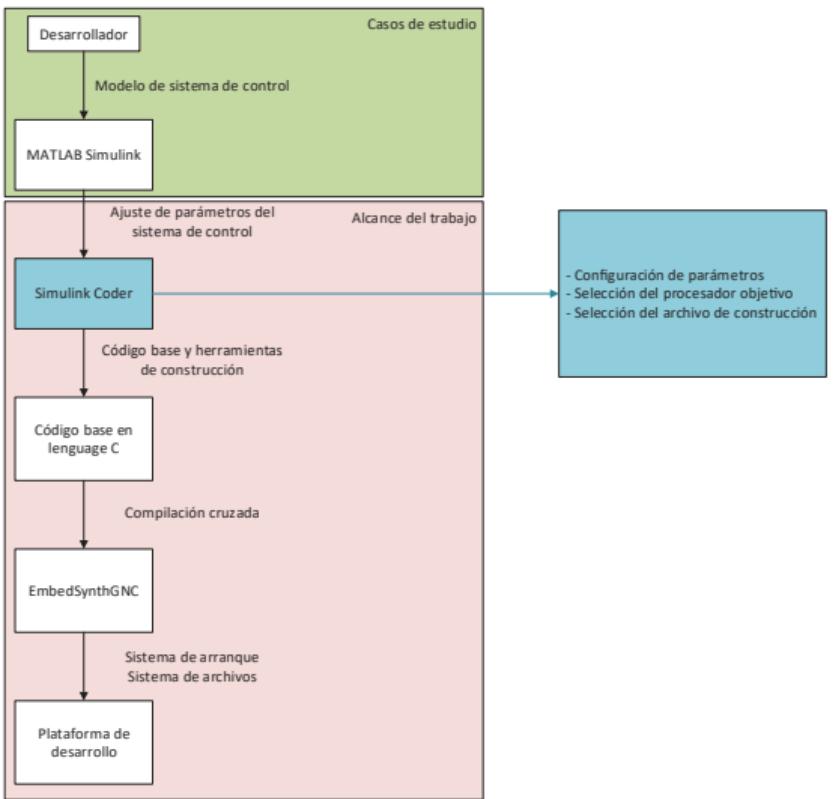
Casos de uso

IMU

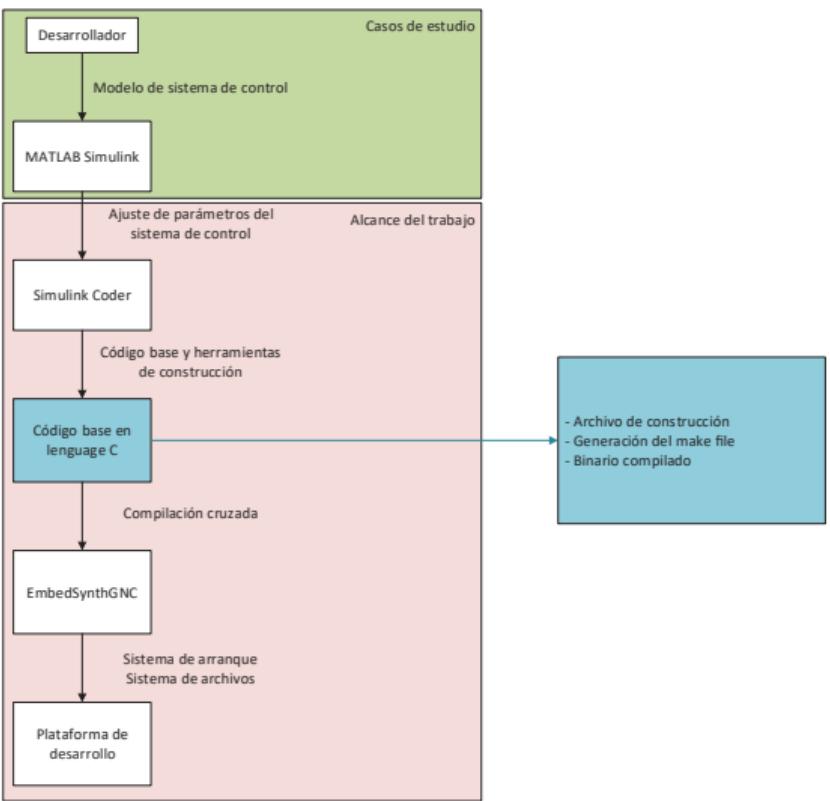
PID

Conclusiones

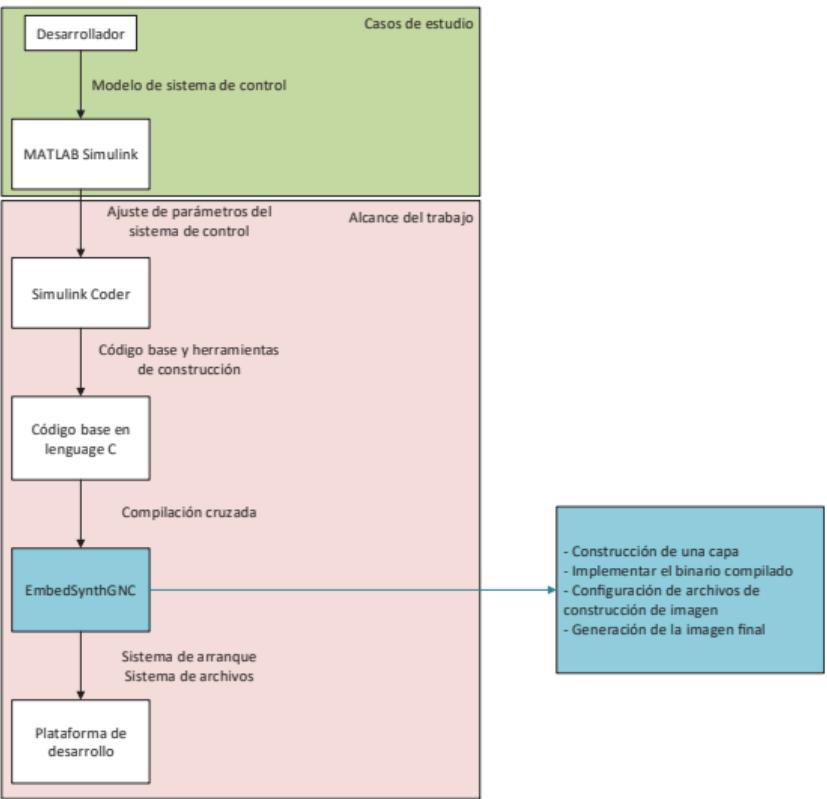
Diseño flujo de trabajo



Diseño flujo de trabajo



Diseño flujo de trabajo



Proyecto Final de
Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

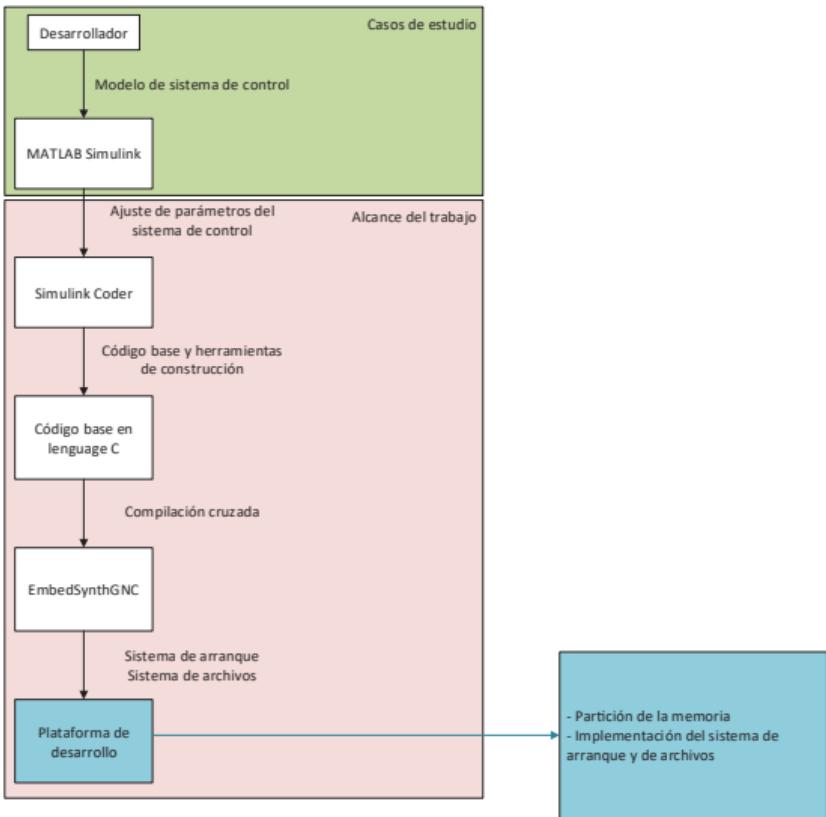
Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones



Proyecto Final de Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

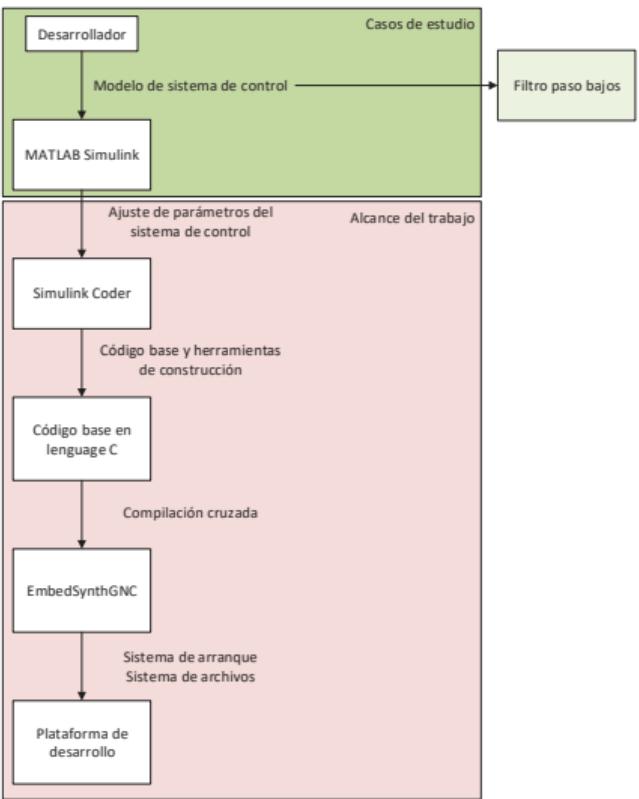
Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones



Proyecto Final de Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones

Caso de uso - Filtro

Proyecto Final de Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Objetivo general

Objetivos específicos

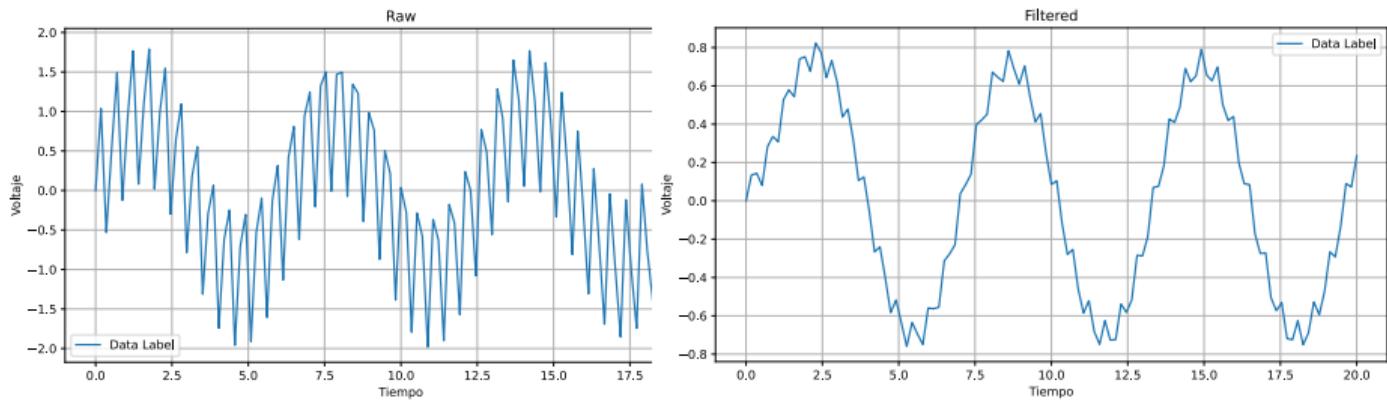
Solución

Casos de uso

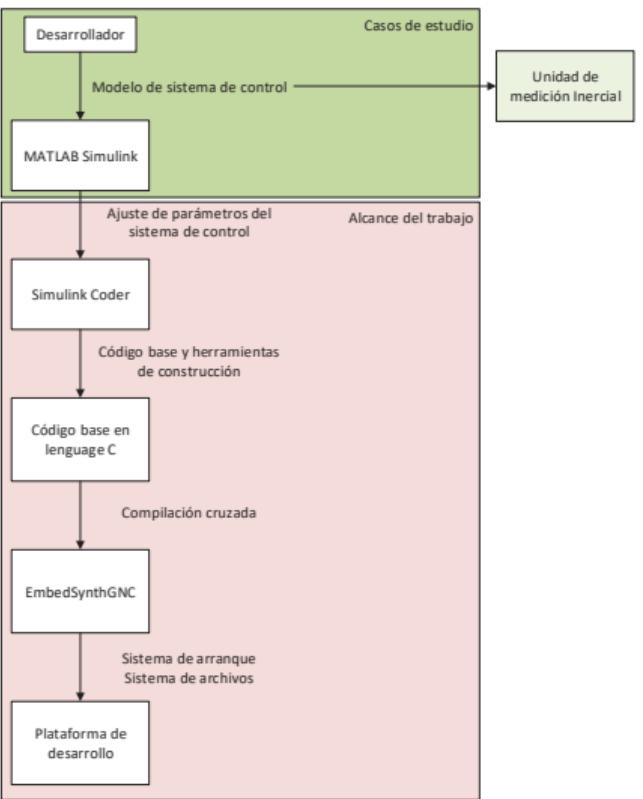
Filtro

PID

Conclusiones



Métrica	Error
Error promedio absoluto	$1,930 \times 10^{-18}$ [V]
Error cuadrático medio	$2,14 \times 10^{-34}$ [V^2]
Raíz del error cuadrático medio	$1,46 \times 10^{-17}$ [V]



Proyecto Final de Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

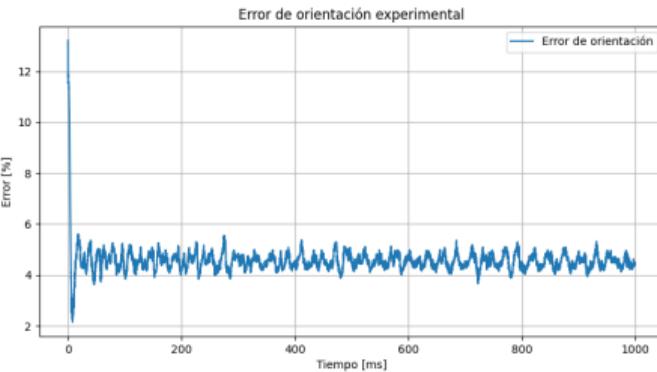
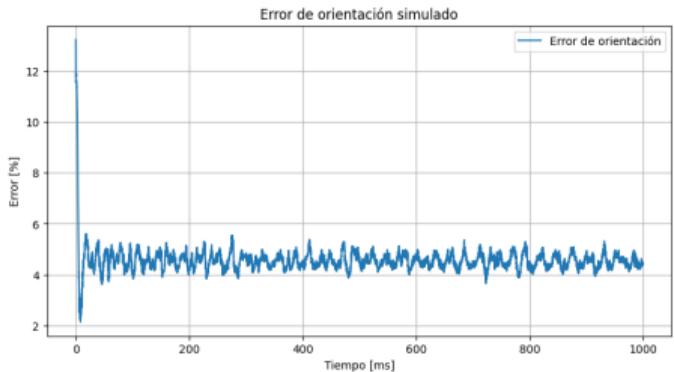
Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones



Métrica

Error promedio absoluto

Error

$1,28 \times 10^{-13}$ [grados]

Error cuadrático medio

$2,12 \times 10^{-13}$ [grados²]

Raíz del error cuadrático medio

$4,51 \times 10^{-26}$ [grados]

Caso de uso - IMU

Proyecto Final de Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

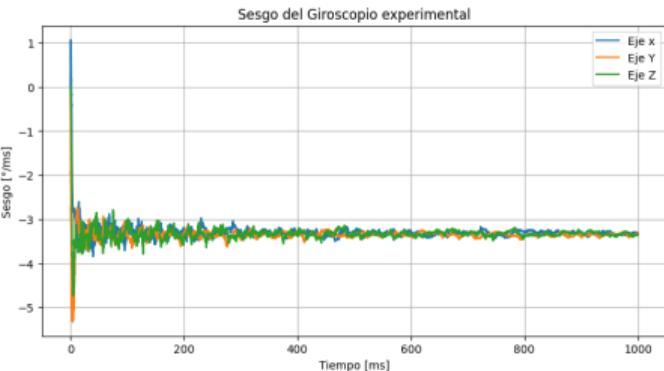
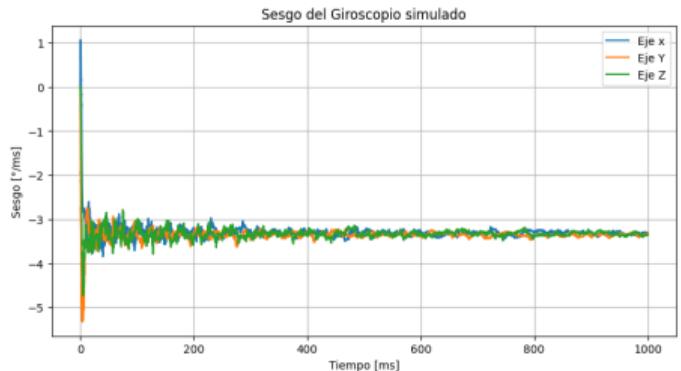
Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones



Métrica

Error promedio absoluto

Error

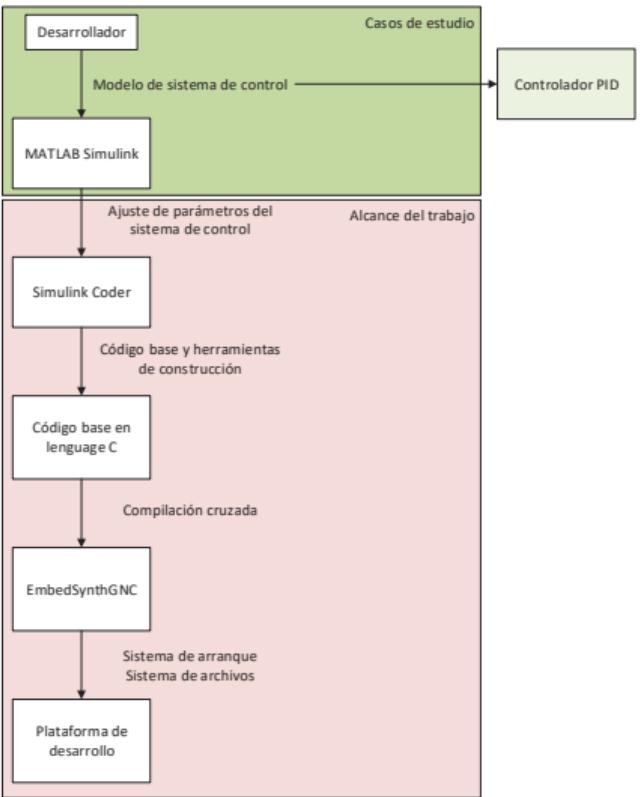
$2,31 \times 10^{-15}$ [grados/s]

Error cuadrático medio

$3,09 \times 10^{-15}$ [grados/s²]

Raíz del error cuadrático medio

$9,56 \times 10^{-30}$ [grados/s]



Proyecto Final de Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones

Caso de uso - PID

Proyecto Final de Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

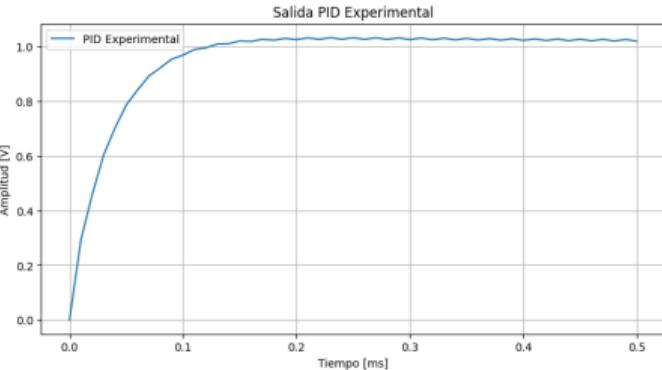
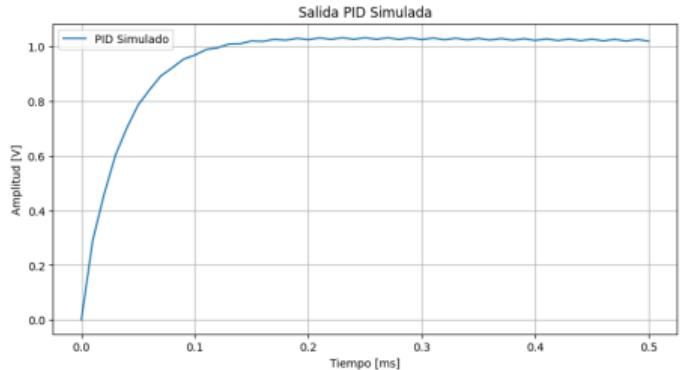
Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones



Métrica

Error promedio absoluto

Error

$$1,12 \times 10^{-32} \text{ [V]}$$

Error cuadrático medio

$$1,01 \times 10^{-34} \text{ [V}^2\text{]}$$

Raíz del error cuadrático medio

$$1,01 \times 10^{-17} \text{ [V]}$$

Conclusiones

- ▶ ZedBoard como plataforma de desarrollo
- ▶ Flujo de trabajo efectivo
- ▶ Precisión en los modelos implementados

Proyecto Final de
Graduación

D. Duarte

Contexto del proyecto

Problema

Síntesis del problema

Objetivo general

Objetivos específicos

Solución

Enfoque metodológico

Selección de plataforma de desarrollo

Diseño flujo de trabajo

Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones