

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 y
recomendaciones

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 y recomendaciones

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 y
recomendaciones

ELaNAV 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

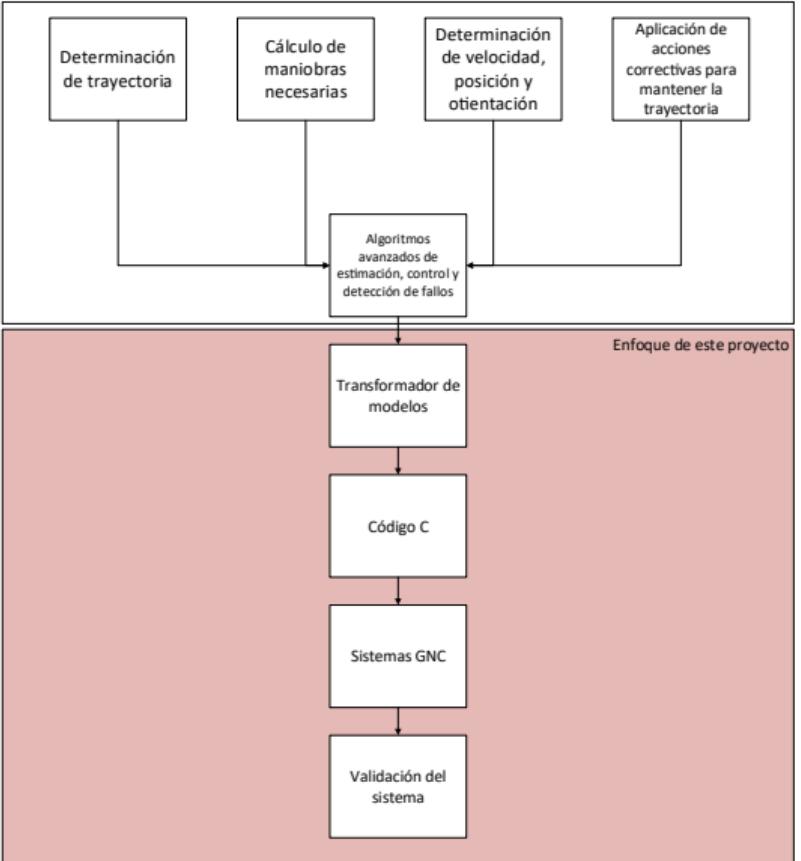
Filtro

IMU

PID

Conclusiones y
recomendaciones

Contexto del problema



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 y
recomendaciones

- El SETEC-Lab no cuenta con un marco de trabajo que permita la implementación de algoritmos de navegación y control en plataformas de hardware embebido que sea configurable y que cuente con mecanismos de medición de su desempeño.

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 y
recomendaciones

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 y
recomendaciones

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 Lazo (HIL).
3. Evaluar 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

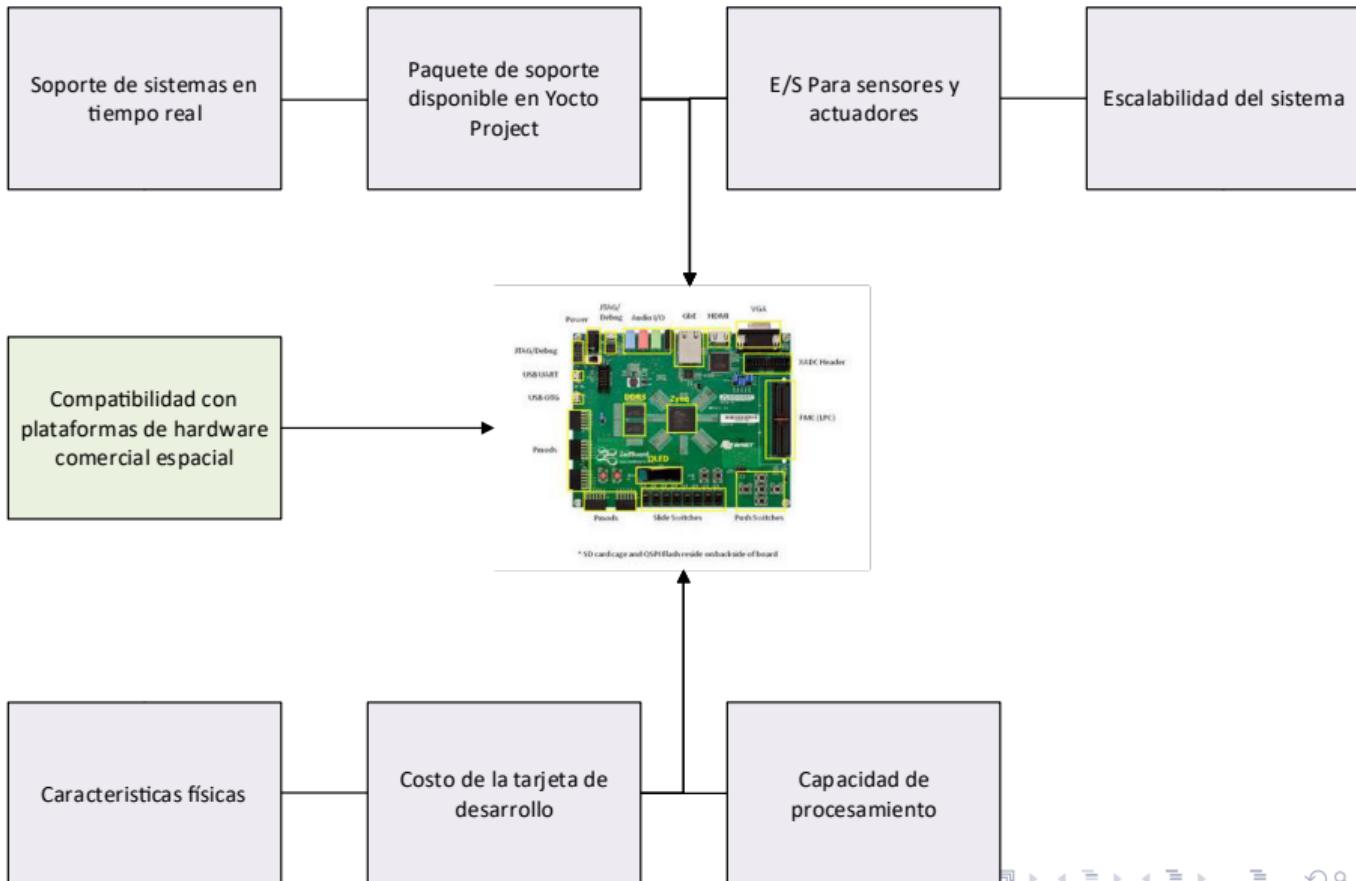
IMU

PID

Conclusiones y
recomendaciones

- ▶ Selección de plataforma de desarrollo para GNC.
- ▶ Diseño de los flujos de trabajo.
- ▶ Evaluación de los flujos de trabajo con casos de estudio orientados a los sistemas GNC.

Selección de plataforma de desarrollo



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 y
recomendaciones

Selección de plataforma de desarrollo

Matriz de Pugh para seleccionar la tarjeta de desarrollo que mejor se adapte a los requerimientos del proyecto

Criterios	Peso	ZCU102	AGX Xavier	TMS320C6678	ZedBoard
Capacidad de procesamiento	15	15	15	8	10
Soporte para sensores	15	15	15	15	15
Soporte para actuadores	10	10	10	10	10
Soporte de sistemas de tiempo real	20	20	20	15	20
Características Físicas	10	4	7	10	10
Costo de la tarjeta	10	7	7	7	10
Escalabilidad del sistema	10	10	6	6	10
Soporte de Yocto Project	10	10	0	0	10
Suma general		80	80	75	95
Posición		3	2	4	1

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

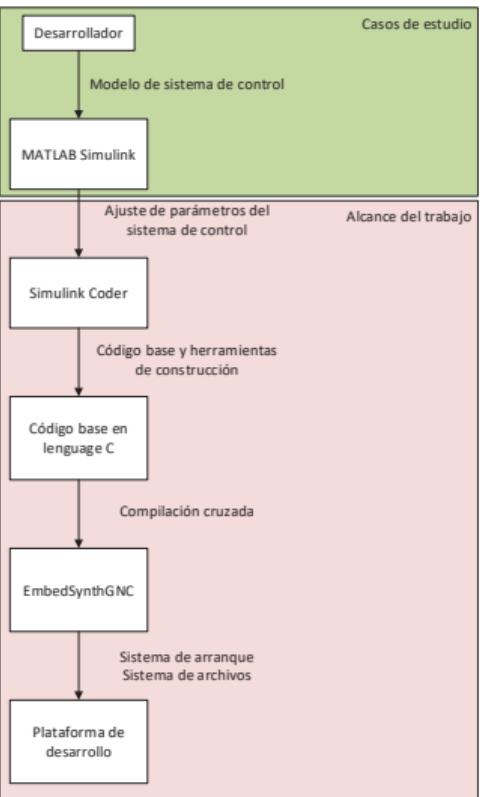
Filtro

IMU

PID

Conclusiones y
recomendaciones

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

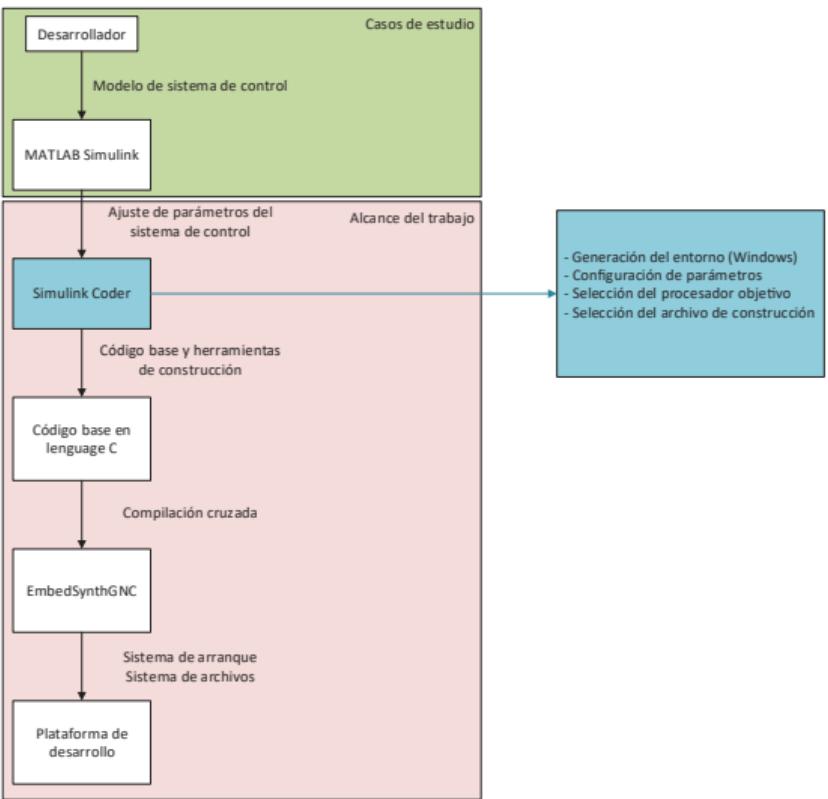
Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones y recomendaciones



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

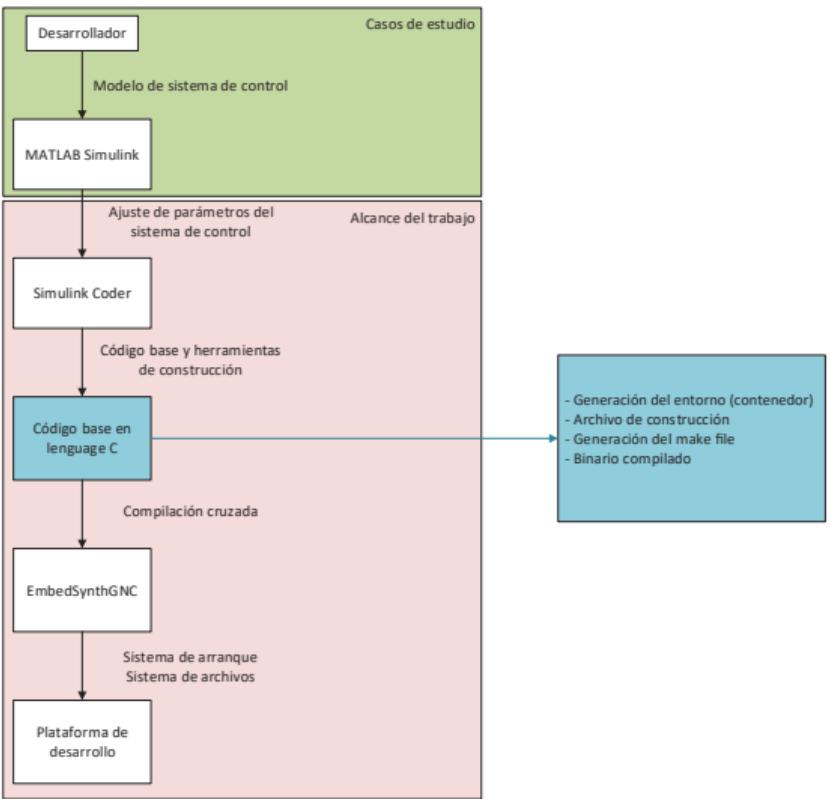
Filtro

IMU

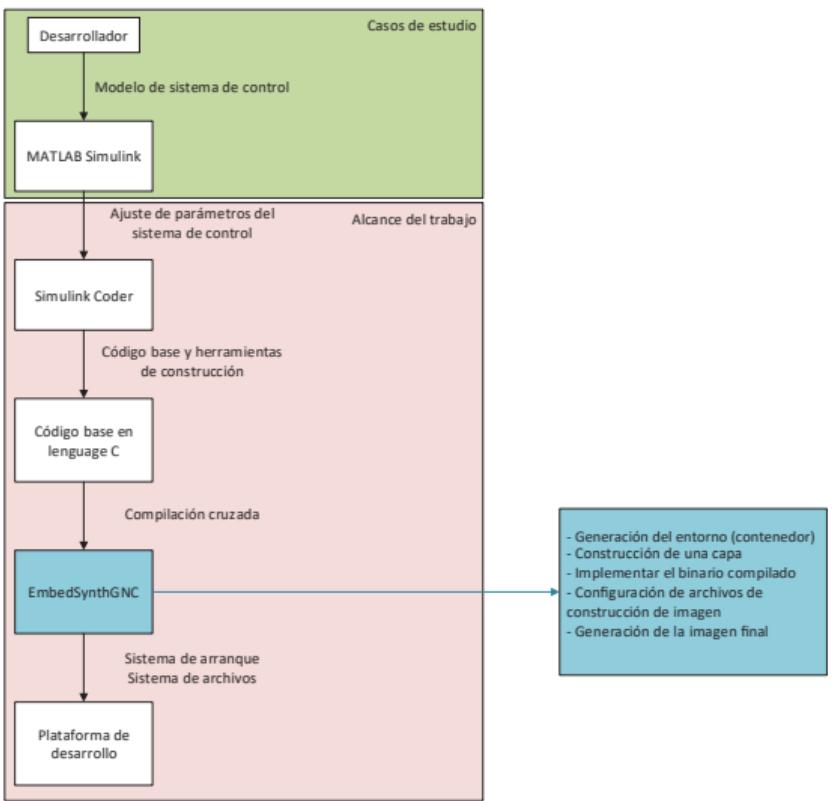
PID

Conclusiones y recomendaciones

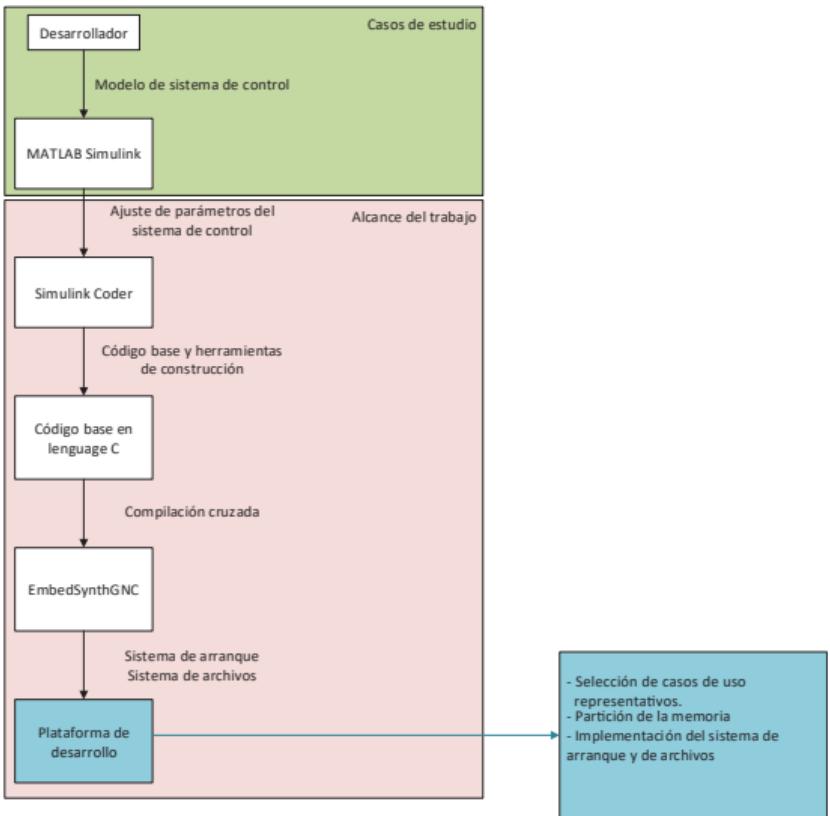
Diseño flujo de trabajo

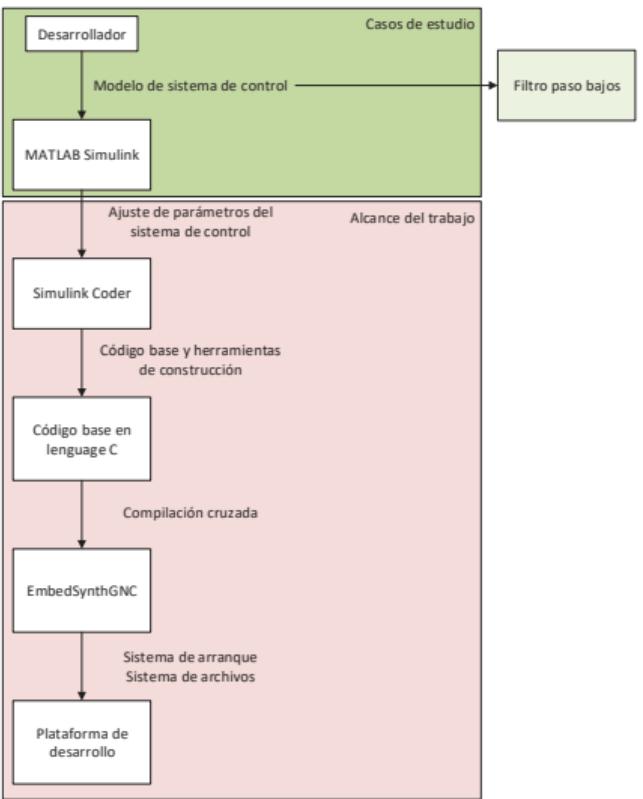


Diseño flujo de trabajo

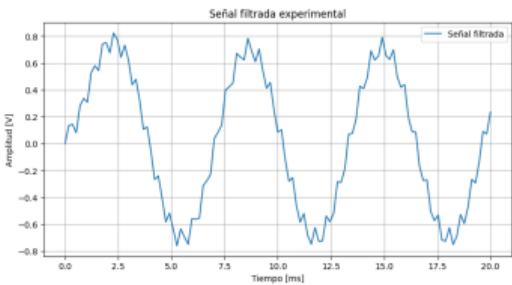
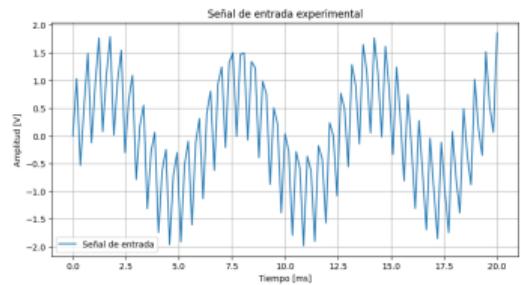
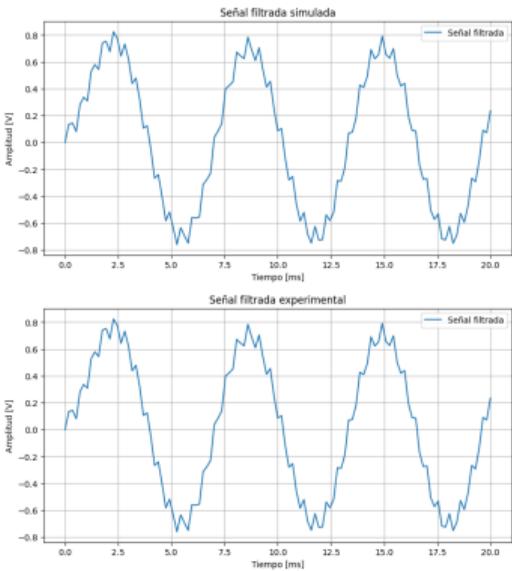
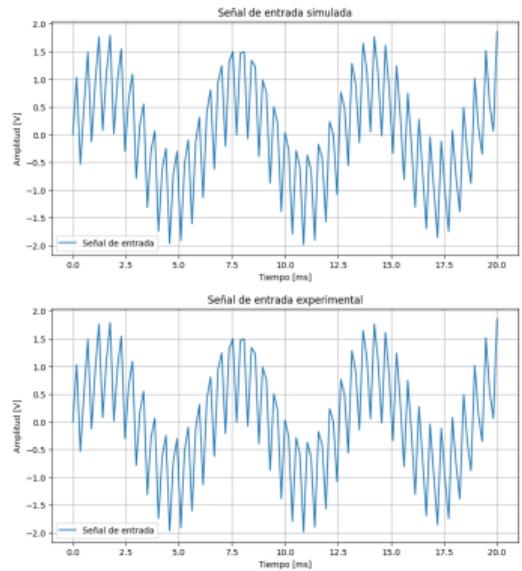


Diseño flujo de trabajo





Caso de uso - Filtro



Métrica

Error promedio absoluto

Error

$1,930 \times 10^{-18}$ [V]

Error cuadrático medio

$2,14 \times 10^{-34}$ [V²]

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

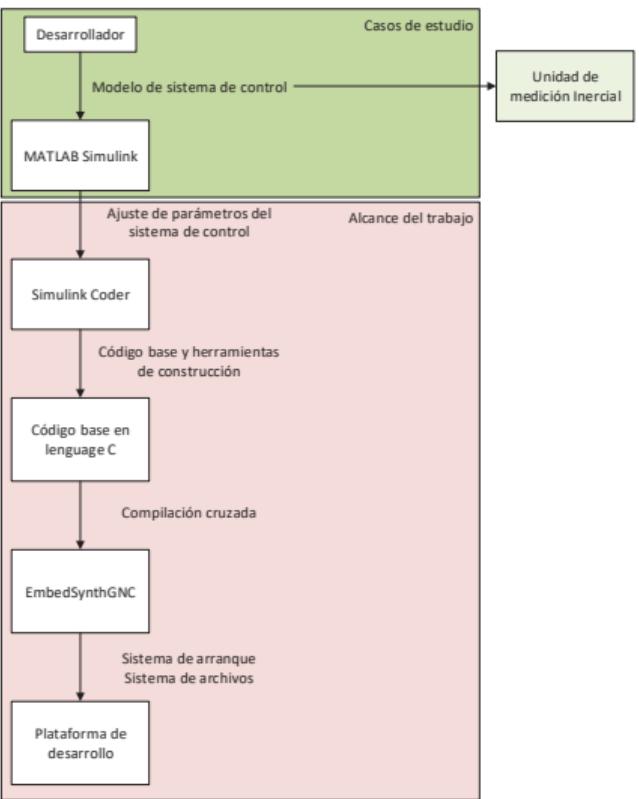
Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones y recomendaciones



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 y recomendaciones

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

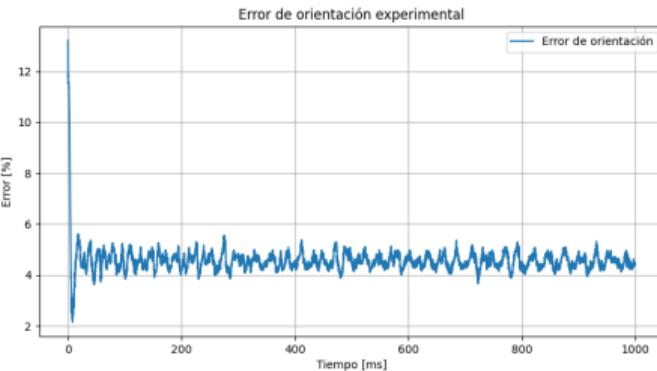
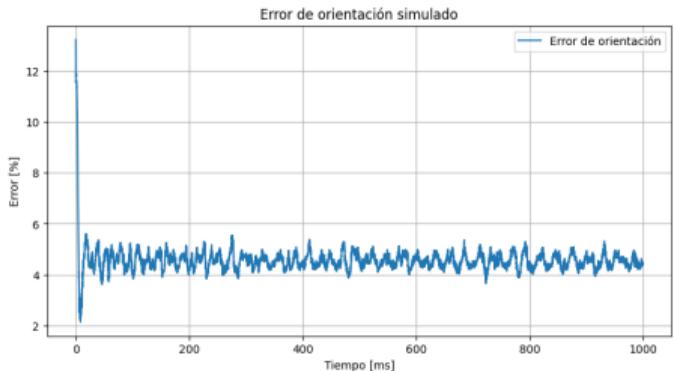
Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones y
recomendaciones



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]

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

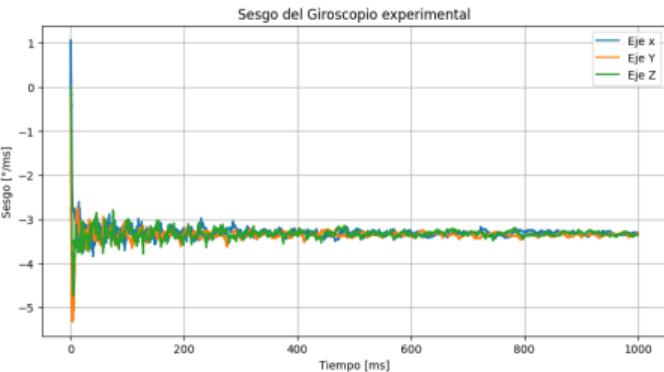
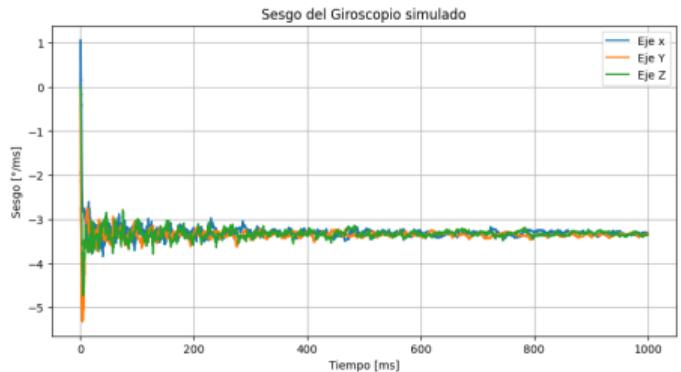
Casos de uso

Filtro

IMU

PID

Conclusiones y
recomendaciones



Métrica

Error promedio absoluto

Error

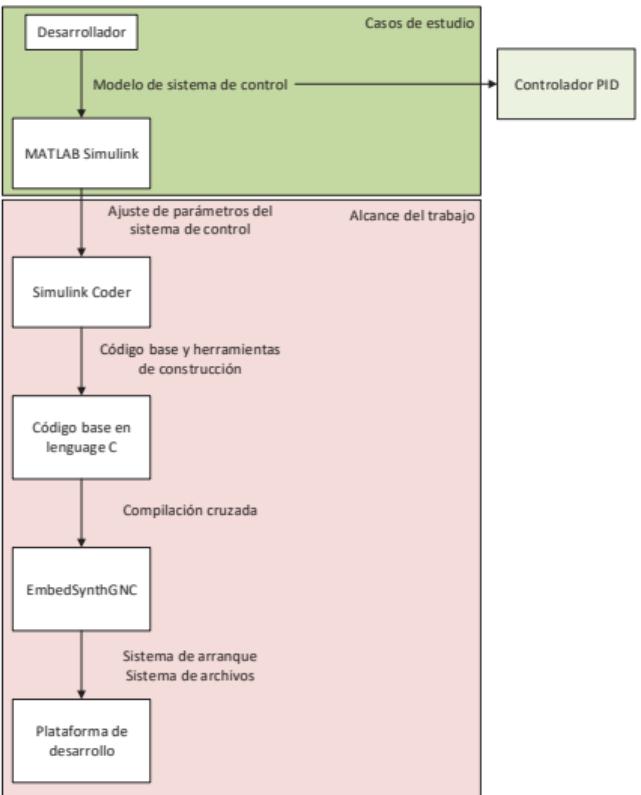
$2,31 \times 10^{-15}$ [grados/s]

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

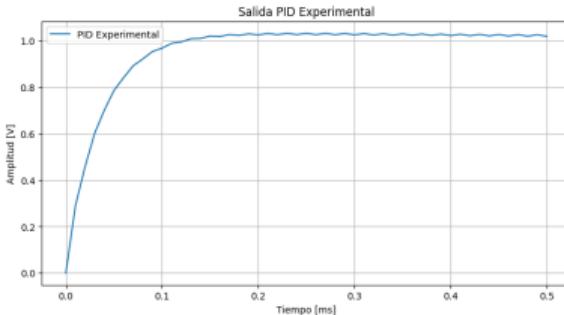
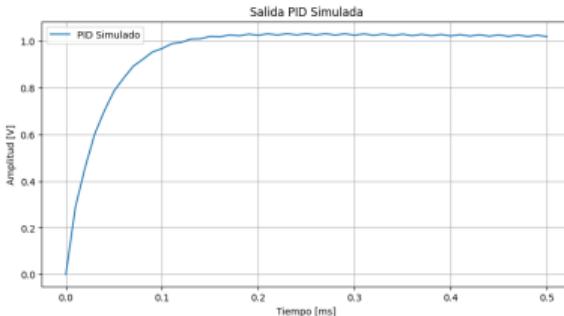
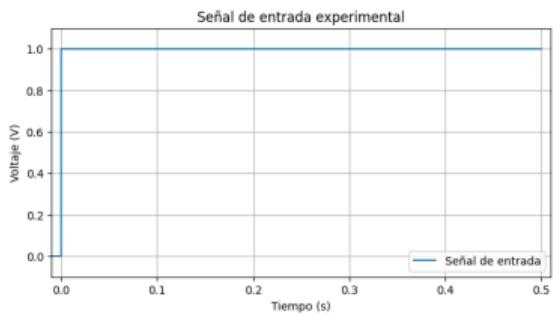
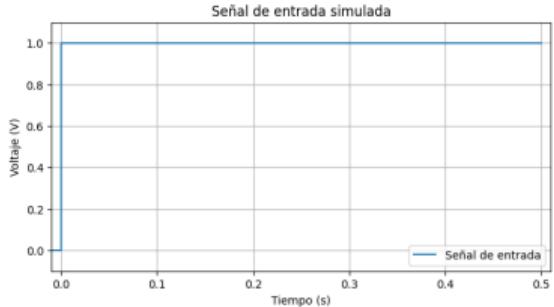
Filtro

IMU

PID

Conclusiones y recomendaciones

Casos de uso - PID



Métrica

Error promedio absoluto
Error cuadrático medio
Raíz del error cuadrático medio

Error

$1,12 \times 10^{-32} [\text{V}]$
$1,01 \times 10^{-34} [\text{V}^2]$
$1,01 \times 10^{-17} [\text{V}]$

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 y recomendaciones

Conclusiones

- ▶ Se seleccionó la plataforma embebida ZedBoard debido a su desempeño y compatibilidad con plataformas espaciales como el computador a bordo ICEPS de EXA.
- ▶ Se desarrolló un entorno de compilación cruzada para convertir el código generado en un archivo binario para la arquitectura ARM.
- ▶ Se desarrolló un entorno de trabajo para la síntesis de archivos de arranque y archivos de sistema para la plataforma embebida ZedBoard.
- ▶ Se desarrollaron tres algoritmos básicos de control como casos de uso para aplicaciones GNC uno orientado al filtrado de señales, otro orientado a estimación de estado y otro a control.

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 y
recomendaciones

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 y recomendaciones

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 y recomendaciones