

**SISTEMA PARA EL DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE
CONTROL ON/OFF, PID Y LQR APLICADAS AL HELICÓPTERO
QUANSER 2 DOF DEL LABORATORIO DE CONTROL DE LA
FACULTAD TECNOLÓGICA**



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Autores

**Cristian Camilo Porras Rodríguez
Jhon Alexander Guatibonza Pérez**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería en Control**

Bogotá D.C. Mayo, 2020

**SISTEMA PARA EL DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE
CONTROL ON/OFF, PID Y LMI APLICADAS AL HELICÓPTERO
QUANSER 2 DOF DEL LABORATORIO DE CONTROL DE LA
FACULTAD TECNOLÓGICA**



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Autores

**Cristian Camilo Porras Rodríguez, 20162383005,
ccporrasr@correo.udistrital.edu.co**

**Jhon Alexander Guatibonza Pérez, 20171383009,
jaguatibonzap@correo.udistrital.edu.co**

**Modalidad
Monografía**

**Presentado para optar al título de:
Ingeniero en Control**

**Director
Msc. Miguel Ricardo Pérez Pereira**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería en Control
Bogotá D.C. Mayo, 2020**

Índice

| | |
|--|------|
| Índice | iv |
| Índice de Figuras | v |
| Índice de Tablas..... | vii |
| Índice de Anexos | viii |
| Resumen | x |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 2. Planteamiento del problema | 2 |
| 3. Justificación..... | 3 |
| 4. Objetivos..... | 4 |
| Objetivo General..... | 4 |
| Objetivos específicos..... | 4 |
| 5. Marco de referencia | 5 |
| 5.1 Antecedentes..... | 5 |
| 5.2 Marco teórico..... | 6 |
| Sistemas didácticos de aprendizaje..... | 6 |
| Helicóptero QUANSER 2 DOF | 7 |
| Sistemas de control..... | 12 |
| Controladores | 14 |
| 6. Metodología..... | 22 |
| 6.1 Verificación de la planta | 22 |
| 6.2 Modelamiento de la planta..... | 30 |
| 6.3 Diseño de los controladores | 36 |
| Control ON/OFF..... | 36 |
| Control PID | 36 |
| Control LQR..... | 38 |
| 6.4 Simulación de los controladores..... | 41 |
| Simulación control ON/OFF | 42 |
| Simulación control PID | 43 |
| Simulación control LQR..... | 45 |
| 6.1 Implementación de los controladores..... | 46 |
| Implementación control ON/OFF..... | 46 |
| Implementación control PID | 48 |
| Implementación control LQR..... | 50 |
| 6.2 Diseño e implementación de la interfaz gráfica..... | 52 |
| 6.5 Guías de usuario, mantenimiento y prácticas de laboratorio | 60 |
| Guía de usuario | 60 |
| Guía de mantenimiento..... | 63 |
| Guías prácticas..... | 64 |
| 7. Resultados..... | 66 |
| 8. Conclusiones..... | 67 |
| 9. Referencias | 68 |
| 10. Anexos..... | 69 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Helicóptero 2 DOF de QUANSER. (QUANSER, 2020)..... | 7 |
| Figura 2. Partes helicóptero QUANSER 2 DOF. (QUANSER, 2020) | 8 |
| Figura 3. Tarjeta de control. (Yarokxy Arjadis Lázaro Mejía, 2016) | 10 |
| Figura 3.1 Bloques utilizados para el funcionamiento del PSoC 5 (Yarokxy Arjadis Lázaro Mejía, 2016)..... | 11 |
| Figura 3.2 Acondicionamiento de señales de salida (Yarokxy Arjadis Lázaro Mejía, 2016)..... | 12 |
| Figura 4. Diagrama lazo abierto (Autores basados en (Ogata, 2010)..... | 13 |
| Figura 5. Diagrama lazo cerrado (Autores basados en (Ogata, 2010)..... | 13 |
| Figura 6. Control ON/OFF. a) Sin brecha diferencial. b) Con brecha diferencial. (Ogata, 2010). . | 15 |
| Figura 6.1. Diagrama de bloques controlador proporcional. | 16 |
| Figura 6.2. Diagrama de bloques controlador integral. | 16 |
| Figura 6.3. Diagrama de bloques controlador proporcional integral..... | 17 |
| Figura 6.4. Diagrama de bloques controlador proporcional derivativo..... | 18 |
| Figura 6.5. Diagrama de bloques controlador PID. | 19 |
| Figura 7. Curva de respuesta a escalón unitario con t_d , t_r , t_p , M_p y t_s . (Ogata, 2010). | 19 |
| Figura 8 Lazo cerrado de control por realimentación de estados (Ogata, 2010)..... | 21 |
| Figura 9. Lazo cerrado de control por realimentación de estados con precompensación (Ogata, 2010)..... | 22 |
| Figura 10. Cable de comunicación. | 22 |
| Figura 10.1 Conexión interna cable de comunicación. | 23 |
| Figura 11. Diagrama de bloque ingreso de datos SIMULINK..... | 24 |
| Figura 12. Diagrama de bloque salida de datos SIMULINK (Autores)..... | 25 |
| Figura 13. Conexión módulo de control con el Pc y las entradas de los encoders (Autores). | 25 |
| Figura 14. Motor pitch desmoteado. | 26 |
| Figura 15. Base del helicóptero, conector encoder y motores..... | 27 |
| Figura 16. Sistema de conexión de cables..... | 27 |
| Figura 17. Base del helicóptero, conector encoder y motores..... | 28 |
| Figura 17.1. Consumo de corriente motor DC. | 28 |
| Figura 17.2. Diagrama general conexión del cableado. | 29 |
| Figura 17.3 Helicóptero QUANSER 2 DOF en funcionamiento. | 30 |
| Figura 18. Diagrama de cuerpo libre Helicóptero QUANSER 2 DO (QUANSER, 2020)..... | 31 |
| Figura 19. Respuesta modelo del ángulo Pitch. a) Lazo abierto. b) Lazo cerrado, (Autor). | 35 |
| Figura 20. Respuesta modelo del ángulo Yaw. a) Lazo abierto. b) Lazo cerrado (Autor)..... | 35 |
| Figura 21. Diagrama de control ON/OFF de Pitch y Yaw simulado en MATLAB. (Autor)..... | 42 |
| Figura 22. Respuesta modelo del ángulo Pitch (a) y Yaw (b) al control ON-OFF. (Autor) | 43 |
| Figura 23. Diagrama de control PID de Pitch y Yaw simulado en MATLAB. (Autor) | 44 |
| Figura 24. Respuesta modelo del ángulo Pitch (a) y Yaw (b) al control PID. (Autor) | 45 |
| Figura 25. Diagrama de control LQR de Pitch y Yaw simulado en MATLAB. (Autor) | 45 |
| Figura 26. Respuesta modelo del ángulo Pitch (a) y Yaw (b) al control LQR. (Autor)..... | 46 |
| Figura 27. Diagrama de control ON/OFF de Pitch y Yaw implementado en SIMULINK.(Autor).47 | 47 |
| Figura 28. Bloque controlador ON-OFF | 47 |
| Figura 29. Parámetros de Configuración bloque Relay..... | 48 |
| Figura 30. Diagrama de control PID de Pitch y Yaw implementado en SIMULINK. (Autor)..... | 49 |

| | |
|---|----------------|
| Figura 31. Bloque controlador PID y realimentación..... | 49 |
| Figura 32. Parámetros de Configuración bloque PID..... | 50 |
| Figura 33. Diagrama de control LQR de Pitch y Yaw implementado en SIMULINK. | 51 |
| Figura 34. Bloque controlador LQR para Pitch (a) y para Yaw (b). | 51 |
| Figura 35. Parámetros de Configuración bloque Gain. | 52 |
| Figura 36. Pantalla principal interfaz de usuario. (Autor)..... | 53 |
| Figura 37. Selector de controlador. (Autor) | 53 |
| Figura 38. Pantalla prueba de funcionamiento interfaz de usuario. (Autor) | 54 |
| Figura 39. Configuración puerto y encendido. (Autor)..... | 54 |
| Figura 40. Muestra de visualización de simulación control PID. (Autor)..... | 55 |
| Figura 41. Visualización pruebas de funcionamiento y controles con la planta. (Autor) | ¡Error! |
| Marcador no definido. | |
| Figura 42. Slider de Modificación Set Point para Pitch y Yaw. (Autor)..... | 56 |
| Figura 43. Bloque de configuración de Set Point Pitch y Yaw en SIMULINK. (Autor)..... | 56 |
| Figura 44. Configuración de parámetro Bloque Constant. (Autor)..... | 56 |
| Figura 45. Pantallas de Controladores GUI (Autor)..... | 57 |
| Figura 46. Pantallas de Simulación de Controladores GUI. (Autor)..... | 58 |
| Figura 47. Ingreso función de transferencia en Pitch y Yaw. (Autor) | 59 |
| Figura 48. Bloques de Funciones de Transferencia para Pitch y Yaw. (Autor) | 59 |
| Figura 49. Parámetros de Configuración Bloque Transfer Fnc. (Autor)..... | 60 |
| Figura 50. Imágenes guía de usuario (Autor). | 61 |
| Figura 51. Pantallas LQR interfaz de usuario. (Autor)..... | 62 |
| Figura 52. Advertencias mantenimiento. (Autor)..... | 63 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Componentes Helicóptero QUANSER 2 DOF. (QUANSER, 2020)..... | 8 |
| Tabla 2. Señales de un sistema. (Autores)..... | 14 |
| Tabla 3. Ventajas y desventajas PID. (Autores)..... | 19 |
| Tabla 4. Cables helicóptero 2 DOF. | 24 |
| Tabla 5 Conexión cables del helicóptero QUANSER 2 DOF..... | 29 |
| Tabla 6. Parámetros Helicóptero 2 DOF (QUANSER, 2020)..... | 35 |

Índice de Anexos

| | |
|--|----|
| Anexo 1 (Guías de usuario, mantenimiento y prácticas de laboratorio) | 69 |
|--|----|

Lista de Abreviaturas y Siglas

| | |
|------|---|
| LQR | Linear–Quadratic Regulator |
| PID | Proporcional Integral Derivativo |
| PI | Proporcional Derivativo |
| PD | Proporcional Derivativo |
| DOF | Degrees of Freedom (Grados de libertad) |
| SISO | Single input single output |
| MIMO | Multiple input Multiple output |
| GUI | Interfaz gráfica de usuario |

Resumen

En el presente proyecto se realiza un sistema de enseñanza práctico para tres estrategias de control, ON/OFF¹, PID² y LQR³ aplicadas en el Helicóptero QUANSER⁴ 2 DOF⁵ de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica con la finalidad de apoyar el aprendizaje de los estudiantes a lo largo de la carrera.

Para el desarrollo de este proyecto, primero se debieron resolver problemas que contenía la planta ya que sin la solución de estos no se podía avanzar. Dichos problemas fueron: el mal estado de uno de los motores y la falta de mantenimiento a la planta, con la solución de estos problemas se procede a realizar la comunicación entre el módulo de control con el PC, para poder verificar las entradas (encoders) y salidas (motores), posterior a esto se halla el modelo de la planta que se utilizará para diseñar las estrategias de control que serán implementadas en el sistema, para verificar que el diseño de los controladores esté bien estos se simularon para así realizar su posterior implementación, de esta forma se dispone a realizar la interfaz de usuario para que el estudiante pueda interactuar con las variables de los controladores, dado que el sistema se plantea como una herramienta de apoyo en la metodología de enseñanza, a manera de anexo se encuentran las guías de usuario, mantenimiento y prácticas de laboratorio del sistema.

Palabras claves: ON/OFF, PID, LQR, Control, MATLAB.

¹ Controlador ON/OFF, también llamado todo o nada.

² Controlador PID (controlador proporcional integral derivativo).

³ Controlador LQR (linear cuadrático óptimo).

⁴ Disponible en internet: <http://www.quanser.com/>.

⁵ Degrees of Freedom (Grados de libertad).

1. Introducción

El laboratorio de control de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica cuenta con un helicóptero QUANSER 2 DOF, el cual es una herramienta didáctica para el desarrollo y análisis de estrategias de control de forma práctica, sin embargo el sistema actualmente no está en uso debido al mal estado de uno de sus motores y la falta de documentación que pueda guiar al estudiante para la realización de prácticas en está, dicha planta posee un módulo de control desarrollado por parte de los estudiantes como proyecto de grado de Tecnología.

Dentro del desarrollo metodológico de la enseñanza de la ingeniería en control, el estudio de las estrategias de control desempeña un papel importante, esté presenta inicialmente algunas dificultades en la comprensión de conceptos por parte de los estudiantes, debido a que muchos de estos conceptos son más relacionados con la implementación en los sistemas físicos, la universidad cuenta con plantas didácticas para realizar estrategias control, sin embargo, muchas de estas no cuentan con la documentación necesaria para implementar estas estrategias y como consecuencia el estudiante no logra asimilar por completo estos conceptos, para esto se dispone a diseñar e implementar un sistema de enseñanza práctico, con él que el estudiante podrá interactuar y conocer los principios de funcionamiento de un sistema de dos grados de libertad, junto con la implementación de controladores de tipo ON/OFF, PID con sus derivaciones y LQR. El desarrollo de guías de usuario, mantenimiento y prácticas, para que el estudiante pueda implementar dichos controladores en la planta, sin embargo, se requiere que él estudiante tenga conocimientos básicos en electrónica para un mayor desempeño de las prácticas.

Parte fundamental de la metodología de aprendizaje de las estrategias de control es la implementación práctica; por medio de esta se aplican todos los conocimientos adquiridos en la teoría con el fin de estabilizar un sistema, al final del proyecto se proponen módulos metodológicos para la ejecución de prácticas de laboratorio sobre las cuales los estudiantes de control profundicen dichos conocimientos.

A continuación, se describen cada una de las etapas que se siguieron para el desarrollo del proyecto; en primera instancia se realizó un estudio y análisis del helicóptero QUANSER 2 DOF, al cual se llevó a cabo un mantenimiento correctivo y preventivo, posterior a esto se halla el modelo de la planta y se linealiza para así poder desarrollar las estrategias de control, se desarrollan los controladores que van a ser implementados que son de tipo ON/OFF, PID y LQR, se validan los controladores por medio de simulación para posteriormente ser implementados; se diseñó e implementó una interfaz gráfica de usuario, en la que se pueden visualizar y modificar las variables de los controladores; y por último se realizó la guía de usuario, mantenimiento y prácticas de laboratorio del sistema de enseñanza práctico con el fin de que el estudiante pueda desarrollar los controladores en la planta.

2. Planteamiento del problema

Hoy en día la enseñanza de las estrategias de control está basada en dos fases, la primera es una aproximación teórica a los sistemas, en la que se estudian los comportamientos de las plantas, teniendo en consideración sus entradas, salidas y las posibles perturbaciones que estos sistemas presenten, para luego obtener los modelos matemáticos que describen el funcionamiento del sistema para posteriormente poder aplicar las diferentes estrategias de control; en segunda instancia se realizan prácticas en plantas físicas, para poder analizar los resultados de la implementación de las estrategias de control y así tener una retroalimentación de lo estudiado en clase.

En la actualidad el laboratorio de control de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas facultad Tecnológica cuenta con un helicóptero QUANSER 2 DOF, el cual es una herramienta didáctica para el desarrollo y análisis de estrategias de control de forma práctica, sin embargo el sistema no se encuentra en uso debido al mal estado de uno de sus motores y la falta de documentación que pueda guiar al estudiante para la realización de éstas, dicha planta posee una tarjeta de control desarrollada por parte de los estudiantes como proyecto de grado de Tecnología; esta tarjeta no se encuentra actualmente en uso.

De lo anterior aparece la siguiente pregunta, ¿Es posible realizar un sistema para el desarrollo de estrategias de Control ON/OFF, PID, y LQR aplicadas al helicóptero QUANSER 2 DOF del Laboratorio de Control de la Facultad Tecnológica, en el que los estudiantes puedan interactuar de una manera intuitiva aplicando lo estudiado?

3. Justificación

El objetivo de los laboratorios prácticos es fomentar una enseñanza más activa, donde se fortalezca el aprendizaje y el trabajo autónomo. De este modo se espera que el alumno: desarrolle habilidades, aprenda técnicas elementales y se familiarice con el manejo de instrumentos y las plantas que se disponen en dichos laboratorios.

El helicóptero QUANSER 2 DOF es una planta didáctica que fue adquirida por la universidad Distrital Francisco José de Caldas para que los estudiantes de tecnología en electrónica, ingeniería en control y carreras afines puedan estudiar las diferentes estrategias de control, en estos momentos esta no se encuentra en funcionamiento, debido a que el helicóptero QUANSER 2 DOF presenta fallas en uno de sus motores, además no cuenta con una interfaz de usuario compatible con el módulo de control en la que el estudiante pueda acceder y de esta manera implementar estrategias de control al helicóptero QUANSER 2 DOF, ni guías de usuario o prácticas que lo apoyen en el desarrollo. Por parte de estudiantes de tecnología en electrónica como proyecto de grado desarrollo de una tarjeta de control para este sistema.

En este trabajo lo que se pretende es crear un sistema para el desarrollo de estrategias de control, luego de solucionar los problemas físicos que presenta la planta, este sistema hará uso de tres estrategias de control como lo son ON/OFF, PID y LQR; El control ON/OFF, también llamado Todo o Nada, el cual usa un algoritmo simple que solamente revisa si la variable de proceso está por encima o por debajo de un set point determinado, este es el control más elemental, fácil de usar, pero es el más inestable; el PID que es un control clásico, fácil de implementar y es el más usado por los estudiantes en el área académica y a nivel industrial, una de las ventajas que posee este control es la manipulación de todas sus variables propias del controlador, además se dispone de varias maneras de sintonización para el ajuste de sus constantes; por otro lado el LQR que es un control robusto, en el que se emplea una señal de realimentación que tiene en consideración la totalidad de los estados que posee el sistema lo que permite llevar a cabo un método de control óptimo.

En consecuencia, el desarrollo y la implementación de un sistema didáctico de enseñanza es de gran importancia para que ayude a los estudiantes a comprender los conceptos fundamentales de las estrategias de control ON/OFF, PID y LQR.

4. Objetivos

Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de enseñanza práctico para las estrategias de control ON/OFF, PID y LQR aplicados al helicóptero QUANSER 2 DOF del laboratorio de control de la facultad tecnológica, que permita al estudiante entender y asimilar los conceptos de los controladores.

Objetivos específicos

- Realizar ajustes, mantenimiento correctivo y preventivo al helicóptero QUANSER 2 DOF.
- Desarrollar los controladores de tipo ON/OFF, PID y LQR a implementar en el sistema.
- Diseñar la interfaz gráfica de usuario que permita al estudiante modificar las variables de los controladores implementados, interactuar con el sistema y asimilar el concepto de los controladores
- Diseñar las guías de usuario, mantenimiento y guías de prácticas por cada controlador (ON/OFF, PID y LQR) para asegurar la correcta utilización del sistema de enseñanza.

5. Marco de referencia

5.1 Antecedentes

En el marco metodológico de la enseñanza existen grandes avances respecto a nuevas formas para validar el aprendizaje, en la actualidad diferentes empresas fabrican líneas de productos didácticos enfocados a la enseñanza de temas relacionados con la ingeniería, como lo son QUANSER®, HUMUSOFT®⁶, LEGO®⁷, entre otras.

Como se describe en el proyecto “instrumento didáctico de auto enseñanza basado en tecnologías de información y comunicación aplicado al área de automatización de procesos. caso de estudio: controladores PID”, la simulación es una herramienta para verificar la solución del problema, sin ningún riesgo se pueden explorar diferentes estructuras de control y simular su respuesta bajo diferentes situaciones (Márquez David A, 2014), este planteamiento es bastante utilizado ya que existen diversos trabajos donde se recurre a este medio como forma de enseñanza; en “diseño e implementación de sistemas de control de posición con actuadores electromecánicos en plantas didácticas” exponen, que muchas universidades, y en especial las de países en desarrollo, no cuentan con el alto presupuesto que se requiere para adquirir este tipo de equipos, (Cabrera Estrada & Rosero Bárcenas, 2015) lo toman como base para el desarrollo de su tesis y construir un modelo didáctico de un helicóptero de dos grados de libertad fabricado por ellos para realizar prácticas de control.

En “comparación de un controlador LQR vs un controlador PID implementados en un helicóptero de dos grados de libertad pivotado”, realizado en la Universidad Distrital emplean un modelo lineal del helicóptero de dos grados de libertad y realizan la comparación de un controlador LQR y un PID, (González Uribe, 2016); en “Implementación de un Controlador para un Helicóptero de Dos Grados de Libertad” muestran la construcción del modelo matemático tomando en cuenta un sistema de ecuaciones de dos entradas y dos salida, es decir toman como un sistema multivariable para el desarrollo del controlador (K. Marlon Soza Mamani, 2017); en el trabajo “control robusto de un helicóptero de dos grados de libertad pivotado” toman como referente la planta QUANSER 2 DOF para implementar controladores robustos (Bejarano Barreto, 2017); en “controlador robusto LMI⁸ para un helicóptero de dos grados de libertad”, usan el helicóptero QUANSER 2 DOF para la implementación de un controlador multivariable LMI y estudiar su respuesta a diferentes perturbaciones (Higuera Martínez, 2015); en “Control del helicóptero 2D usando métodos de control robusto h_∞ ”, donde se diseñó e implementó un Control Robusto H_∞ de 2 grados de libertad usando herramientas de tiempo real y MATLAB⁹ (Bejarano Barreto, 2017) (González, 2011); en “implementación de un control con restricciones para el helicóptero de dos grados de libertad de QUANSER®”, estudian el resultado de implementar restricciones a los controladores PID, LQR y realimentación de estados, al helicóptero QUANSER 2 DOF (Teherán, 2014); en

⁶ Disponible en internet: <http://www.humusoft.cz/>

⁷ Disponible en internet: <https://education.lego.com/>

⁸ Linear matrix inequality

⁹ MATrix LABoratory, «laboratorio de matrices»

“Adaptive Backstepping Control Scheme with Integral Action for Quanser 2-DOF Helicopter” se propone un esquema de control integral de retroceso adaptable para el control de posición del helicóptero 2 DOF (Patel, Deb, Modi, & Shah, 2017); en “Diseño e implementación de una plataforma experimental de dos grados de libertad controlada por dos técnicas: PID y lógica difusa” se presenta el diseño de dos controladores empleando técnicas PID y lógica difusa al helicóptero QUANSER 2 DOF (Solaque Guzmán & Cristancho Cardozo, 2014); en “diseño e implementación de una interfaz de control para el helicóptero QUANSER 2 DOF”, realizan un módulo de control y una interfaz gráfica para el control del helicóptero del laboratorio de control de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica (Yarokxy Arjadis Lázaro Mejía, 2016).

5.2 Marco teórico

Como soporte a todo el desarrollo que se plantea en este proyecto, será necesario poner a disposición del lector los recursos teóricos y bibliográficos necesarios para la comprensión de este documento, todos los temas que se tratarán son relevantes y serán de utilidad en el desarrollo del documento; sin embargo, por la complejidad o extensión de algunos de ellos referencian a textos bibliográficos especializados que desarrollan la teoría en detalle.

Sistemas didácticos de aprendizaje

Interactividad significa en términos muy generales e intuitivos la capacidad de modificar cualquier objeto que representa al sistema y percibir automáticamente el efecto producido. Este objeto puede ser una condición inicial de una variable de estado del sistema, un parámetro o incluso la propia estructura del sistema. Esta forma de pensar interactiva presenta entre otras las siguientes ventajas (Márquez David A, 2014):

- La modificación de las variables interactivas produce inmediatamente la actualización de todas las representaciones gráficas existentes de una forma coherente.
- El proceso de diseño se hace realmente dinámico.
- Se percibe instantáneamente el gradiente del cambio del sistema con respecto a los elementos que se manipulan.
- Esta capacidad interactiva permite identificar mucho más fácilmente los compromisos que se pueden lograr.

Tradicionalmente, el diseño de los sistemas de control se realiza siguiendo un proceso iterativo. Las especificaciones del problema no suelen utilizarse directamente para calcular el valor de los parámetros del sistema ya que no hay una fórmula explícita que los relacione directamente. Esta es la razón de dividir cada iteración en dos fases. La primera, conocida como síntesis consiste en calcular los parámetros desconocidos del sistema basándose para ello en un conjunto de variables de diseño (que están relacionadas con las especificaciones). Durante la segunda fase, llamada análisis, se evalúa el comportamiento del sistema y se compara con las especificaciones. Si no concuerdan, se modifican las variables de diseño y se vuelve a efectuar una nueva iteración. Es posible sin embargo fusionar ambas fases en una sola cuando el efecto de modificar los parámetros produce inmediatamente la actualización del sistema (Márquez David A, 2014).

Helicóptero QUANSER 2 DOF

El helicóptero experimental QUANSER® 2 DOF, de dos grados de libertad que se encuentra en el laboratorio de electrónica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas consiste en el modelo de un helicóptero sobre una base fija con dos hélices que se manejan por motores DC (ver Figura 1. La hélice horizontal de la parte delantera controla la elevación de la nariz del helicóptero sobre el eje yaw¹⁰, y la hélice Vertical o trasera controla la dirección del eje pitch¹¹. (QUANSER, 2020)

Los ángulos de pitch y yaw se miden utilizando encoders de alta resolución, las señales de los motores y del encoder se transmiten a través de un sistema que elimina la posibilidad de que los cables se enreden en el eje yaw y permite que gire libremente unos 360 grados.



Figura 1. Helicóptero 2 DOF de QUANSER. (QUANSER, 2020)

¹⁰ Ángulo de inclinación sobre el eje y.

¹¹ Ángulo de inclinación sobre el eje x.

Componentes generales

En la Tabla 1 se enumera cada uno de los componentes del helicóptero QUANSER 2 DOF y su ubicación en la planta se ve reflejada en la Figura 2.

| # ID | Componente |
|------|-------------------------------------|
| 1 | Hélice trasera. |
| 2 | Protector de la hélice trasera. |
| 3 | Motor trasero. |
| 4 | Encoder. |
| 5 | Punto de equilibrio. |
| 6 | Cuerpo del helicóptero. |
| 7 | Hélice delantera. |
| 8 | motor delantero.. |
| 9 | Protector de la hélice delantera |
| 10 | Circuito Motor / Encoder |
| 11 | Conector del Encoder en el circuito |
| 12 | Conector motor en el circuito |
| 13 | Eje central |
| 14 | Anillo conector |
| 15 | plataforma base |
| 16 | Conector motor delantero |
| 17 | Conector motor trasero |
| 18 | Conector Encoder trasero |
| 19 | Conector Encoder delantero |

Tabla 1. Componentes Helicóptero QUANSER 2 DOF. (QUANSER, 2020)

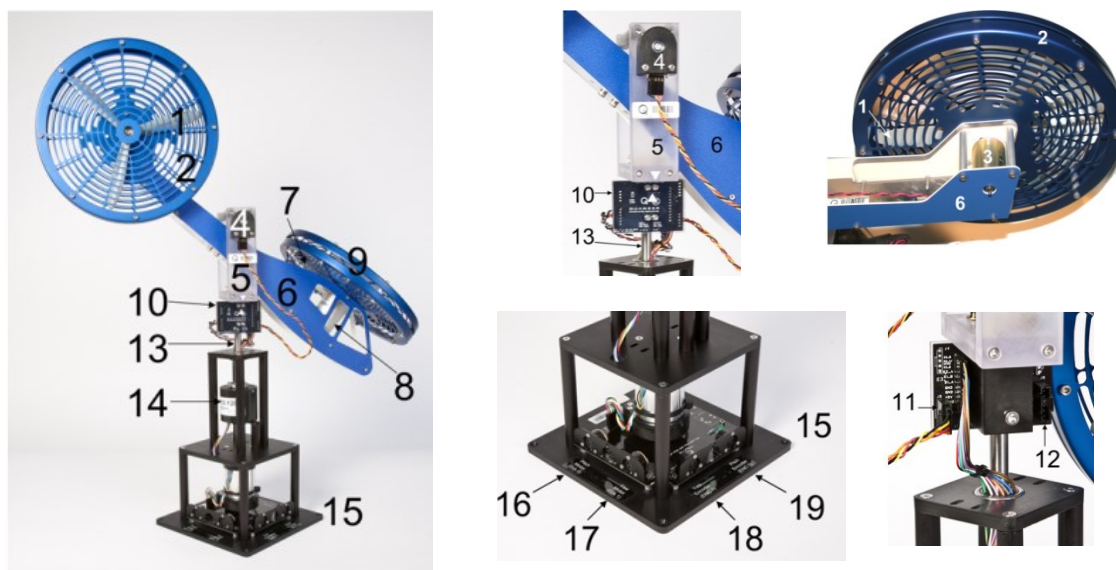


Figura 2. Partes helicóptero QUANSER 2 DOF. (QUANSER, 2020)

Motores DC

El helicóptero QUANSER 2 DOF tiene dos motores DC: el motor de yaw componente #3, que acciona la hélice trasera y el motor de pitch componente #8, que gira la hélice delantera.

El motor de yaw es un motor Faulhaber Serie 2842 Modelo 006C. Tiene una resistencia eléctrica de 1.6Ω y una constante de par de corriente de 0.0109 N.m / A , el voltaje nominal del motor es $\pm 24\text{v}$, tiene una corriente pico de 5^{a} y 3^{a} en continua. El motor de pitch es más grande, es un Pittman Modelo 9234. Tiene una resistencia eléctrica de 0.83Ω y una constante de par de corriente de 0.0182 N.m / A , el voltaje nominal del motor es de 12 V , pero su voltaje máximo puede elevarse hasta 22 V sin daños, tiene una corriente pico de 3^{a} y 1^{a} en continua (QUANSER, 2020).

Hélices

Las hélices de pitch y yaw están montadas directamente sobre el eje del motor, y el escudo de la hélice de aluminio. Las hélices utilizadas para los motores de pitch y yaw son de $20/15 \text{ cm}$ o $8/6$ “. La combinación motor / hélice de pitch tiene una constante de fuerza de empuje identificada de 0.104 N / V y la combinación motor / hélice de yaw tiene una constante de fuerza de empuje de 0.43 N / V (QUANSER, 2020).

Encoders

El experimento del helicóptero QUANSER 2 DOF tiene dos encoders: el encoder que mide el ángulo de inclinación en pitch y el encoder que mide el ángulo de yaw. En modo de cuadratura, el encoder de pitch tiene una resolución de 4096 pulsos por revolución y el encoder de yaw tiene una resolución de 8192 pulsos por revolución. Por lo tanto, la resolución de posición efectiva es 0.0879 grados sobre el eje de pitch y 0.0439 grados sobre el eje de yaw (QUANSER, 2020).

Módulo de control

La Figura 3 muestra la tarjeta de control que está compuesta por un microcontrolador PSoC 5¹² el cual permite la manipulación y adquisición de señales del helicóptero QUANSER 2 DOF, este microcontrolador se adecua con los bloques necesarios para que ofrezca un óptimo funcionamiento y fluidez de la aplicación. Esta tarjeta fue diseñada como proyecto de grado por parte de los estudiantes de tecnología.

El PSoC es un dispositivo que utiliza arquitectura Harvard que hace referencia a la arquitectura de computadora la cual está dividida la memoria de instrucciones y datos, estos dispositivos están diseñados para reemplazar los microcontroladores básicos. El PSoC cuenta con timers, counter, filtros, PGA, comunicación por UART, I2C, ADC, DAC, los cuales varían de acuerdo a su referencia. Estos cuentan con pines como: Digitales I/O, entradas análogas, salidas análogas, entradas analógicas directas, estos se pueden utilizar directamente como entradas análogas para los bloques de capacitancias conmutadas(SC), entrada de referencia, estos pines se pueden utilizar como suministro para un voltaje de referencia AGND externa y para una tensión de referencia VREF, estas referencias externas proporcionan una mayor flexibilidad para los diseños analógicos,

¹² (Programmable System on Chip) (microcontrolador).

también cuenta con comunicación I2C, entrada externa de reloj (EXT CLK), entre otras muchas más herramientas (Cypress, 2020).

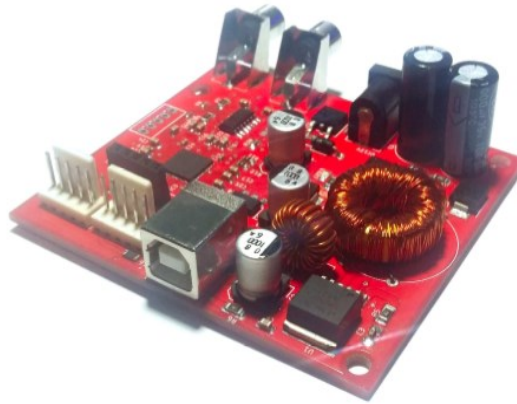


Figura 3. Tarjeta de control. (Yarokxy Arjadis Lázaro Mejía, 2016)

Un PSoC cuenta con hasta 18 bloques digitales dependiendo del modelo, los cuales nueve de tipos básicos y los otros nueve son de comunicaciones (Cypress, 2020). Los módulos de estos bloques son los siguientes:

- PWMs with dead band (8- and 16-bit)
- Counters (8- to 32-bit)
- Timers (8- to 32-bit)
- UART 8-bit with selectable parity (up to 2)
- SPI slave and master (up to 2)
- I2C Master Y slave
- CRC generator (8- to 32-bit)
- IrDA (up to 2)
- Pseudo Random source (PRS) generators (8- to 32-bit) USB, Wireless USB

Los bloques analógicos, se pueden integrar hasta doce bloques, los cuales se encuentran divididos en tres grupos de cuatro bloques: de tiempo continuo, de cambio de capacitor en tiempo continuo y de cambio de capacitor en tiempo discreto, estos módulos están compuestos por (López, Camargo, & César, 2016)(López & Charry, 2016):

Amplificadores:

- Amplificadores de ganancia programable (PGA).
- Amplificadores de instrumentación
- Amplificadores inversores
- Comparador programable
- Marcador de tonos DTMF

Filtros

- Filtro pasa bajos de 2 polos
- Pasa bandas de 2 polos

Conversores D/A

- Conversor D/A de 6,8 y 9 bits
- Multiplicadores de 6 y 8 bits

Conversor analógico digital

- 6-bits Aproximaciones sucesivas (SAR)
- 8-bits Delta sigma
- 11-bits Delta sigma
- 12-bits incremental
- 7-13 bits Variable incremental
- De doble entrada 7-13 bits Variable incremental
- De triple entrada 7-13 bits Variable incremental

Esta tarjeta fue diseñada con los parámetros para establecer la comunicación bidireccional entre la planta y el PC ya que haciendo uso de su puerto UART es posible esta transferencia de datos, además está acondicionada para recibir las señales de los encoders y las salidas que son enviadas a los amplificadores de voltaje.

En la Figura 3.1 se observan los bloques utilizados en la tarjeta de control, para realizar la recepción de los encoders se emplean los bloques encoder1 y encoder2, para las salidas de voltaje los bloques dac_1, dac_2 y dac_ref y para establecer la comunicación el bloque USBUART.

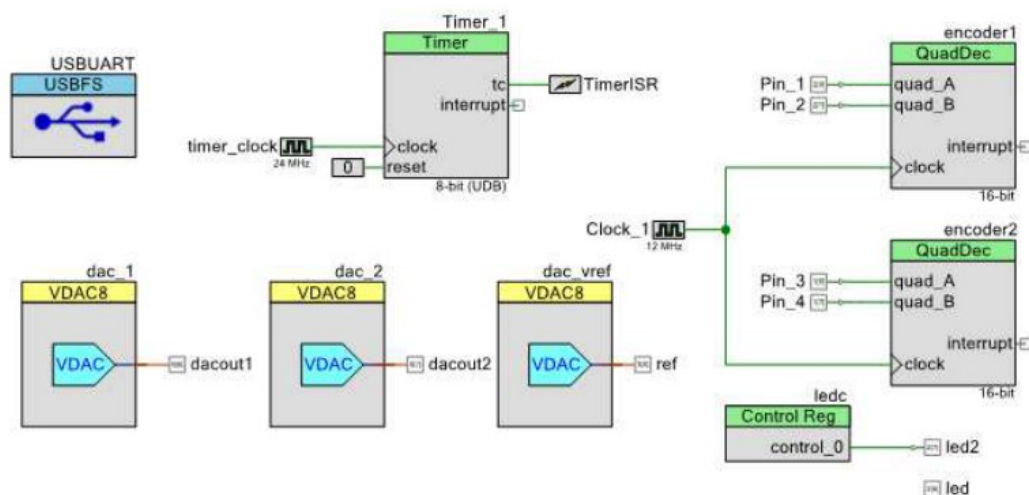


Figura 3.1 Bloques utilizados para el funcionamiento del PSoC 5 (Yarokxy Arjadis Lázaro Mejía, 2016).

Como la salida de los conversores digital análogo varía de 0V a 1V, fue necesario acondicionar la señal para tener una ventana de voltaje de $\pm 5V$, para lo que se empleó la configuración expuesta en la Figura 3.2.

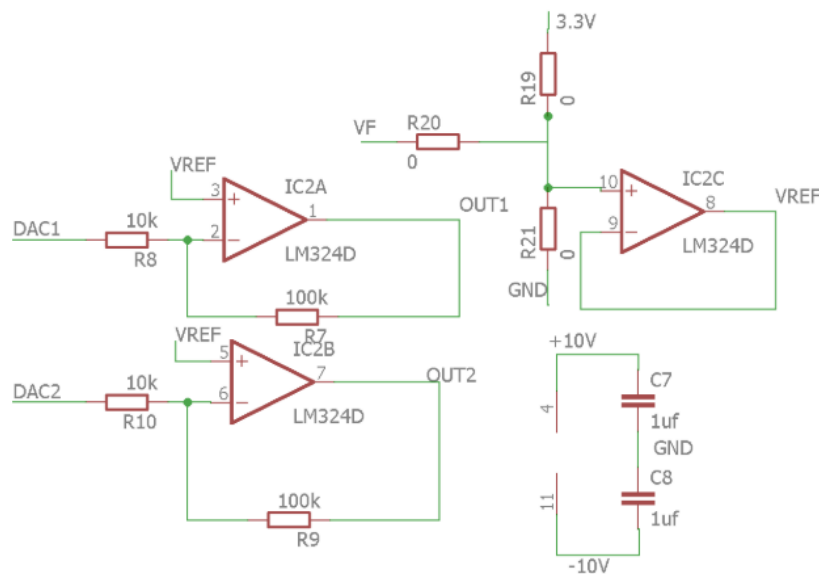


Figura 3.2 Acondicionamiento de señales de salida (Yarokxy Arjadis Lázaro Mejía, 2016).

Sistemas de control

Los estudios de los sistemas se realizan con el fin de obtener respuestas deseadas a partir de ciertas entradas. Si las respuestas no son satisfactorias se diseñan sistemas de control, que se encargan de analizar las características dinámicas de los procesos y mejorar sus salidas, ya sea ajustando ciertos parámetros o introduciendo compensadores, los sistemas de control se consideran eficientes cuando garantizan estabilidad y robustez ante perturbaciones y errores en los modelos. (Hernández, 2010)

Control no realimentado (lazo abierto)

Es un sistema en el cual la señal de salida no afecta la acción del controlador figura 4, por lo tanto, cada entrada corresponde a una condición operativa fija, la efectividad de estos controladores depende de una correcta calibración del mismo. El control en lazo abierto es utilizado en sistemas donde se conoce la relación entre entradas y salidas, además este no debe contar con perturbaciones externas ni internas (Ogata, 2010)

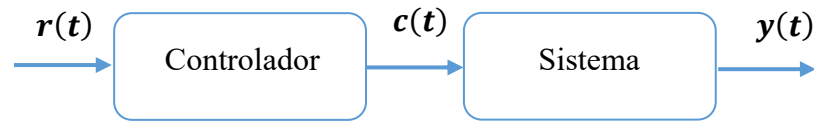


Figura 4. Diagrama lazo abierto (Autores basados en (Ogata, 2010)).

Control realimentado (lazo cerrado)

Este tipo de sistema de control soluciona el problema de los sistemas en lazo abierto, que dependen de las condiciones ambientales. El nombre de lazo cerrado proviene de la señal del sensor que vuelve al controlador, cerrando el lazo de control. Los elementos del sistema de control en lazo cerrado son los mismos que los del sistema en lazo abierto con dos añadidos: (Ogata, 2010)

El sensor mide el estado o variable a controlar en el sistema (posición, temperatura, humedad, etc.) Esto permite conocer el estado del sistema y corregir las desviaciones para que se pueda conseguir la respuesta deseada.

El comparador. Este elemento está representado por un círculo en el esquema. Su función es comparar la señal de referencia $r(t)$ y la señal de realimentación $h(t)$ y calcular el error $e(t)$ que existe entre la respuesta deseada y el estado real del sistema. A partir de ese error se puede conseguir llevar al sistema al estado deseado Figura 5.

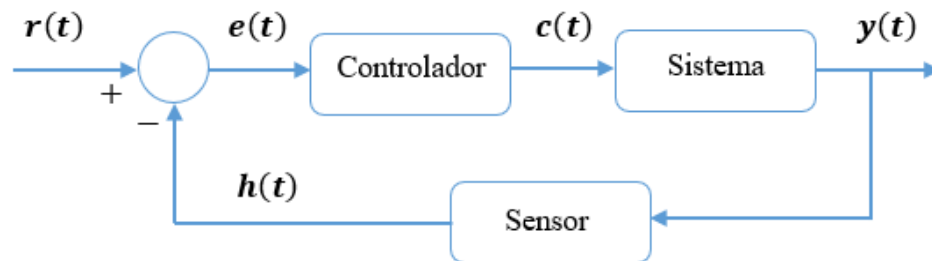


Figura 5. Diagrama lazo cerrado (Autores basados en (Ogata, 2010)).

Este tipo de control conseguirá que el sistema se encuentre en el estado deseado, independientemente de las condiciones ambientales.

Las señales del sistema de control son las siguientes descritas en la Tabla 2.

| Señal | Nombre | Función |
|--------|----------------|--|
| $r(t)$ | Referencia | Es el estado que se desea alcanzar en el sistema. |
| $e(t)$ | Error | Es la diferencia entre el estado deseado y el estado real del sistema a controlar. |
| $c(t)$ | Control | Es la señal que genera el controlador. |
| $y(t)$ | Salida | Es el estado real que ha alcanzado el sistema a controlar. |
| $h(t)$ | Realimentación | Es la medida del estado del sistema. |

Tabla 2. Señales de un sistema. (Autores)

Controladores

Control de dos posiciones o de encendido y apagado (ON/OFF)

Sistema de control de dos posiciones, el elemento de actuación sólo tiene dos posiciones fijas, que, en muchos casos, son simplemente encendido y apagado.

Suponiendo que la señal de salida del controlador es $u(t)$ y que la señal de error es $e(t)$, en el control de dos posiciones, la señal $u(t)$ permanece en un valor ya sea máximo o mínimo (1), dependiendo de si la señal de error es positiva o negativa (Ogata, 2010).

De este modo:

$$\begin{aligned} u(t) &= U_1, \quad \text{para } e(t) > 0 \\ &= U_2, \quad \text{para } e(t) < 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde U_1 y U_2 son constantes, por lo general, el valor mínimo de U_2 es cero o $-U_1$.

La Figura 6 se muestran los diagramas de bloques para dos controladores tipo ON/OFF, en la figura 6(a) se muestra un controlador básico, el rango en el que debe moverse la señal de error antes de que ocurra la conmutación se denomina *brecha diferencial*. En la Figura 6(b) se señala una brecha diferencial, tal brecha hace que la salida del controlador $u(t)$ conserve su valor presente hasta que la señal de error se haya desplazado ligeramente más allá de cero. En algunos casos, la brecha diferencial es el resultado de una fricción no intencionada y de un movimiento perdido; sin embargo, con frecuencia se provoca de manera intencional para evitar una operación demasiado frecuente del mecanismo de encendido y apagado (Ogata, 2010).

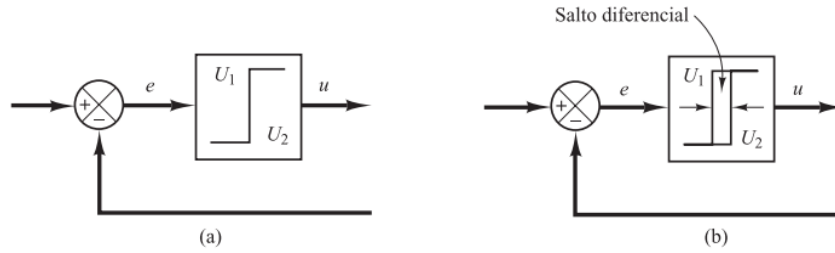


Figura 6. Control ON/OFF. a) Sin brecha diferencial. b) Con brecha diferencial. (Ogata, 2010).

Para reducir la amplitud de la oscilación de salida, debe disminuirse la brecha diferencial. Sin embargo, la reducción de la brecha diferencial aumenta la cantidad de conmutaciones de encendido y apagado por minuto y reduce la vida útil del componente. La magnitud de la brecha diferencial debe determinarse a partir de consideraciones tales como la precisión requerida y la vida del componente (Ogata, 2010).

Control proporcional (P)

La acción de control proporcional constituye un amplificador con ganancia ajustable, la variable medida se resta de la entrada (la variable deseada) para formar una señal de error, la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es (2):

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2)$$

Donde K_p se considera la ganancia proporcional, aplicando la transformada de Laplace (2.1).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.1)$$

A continuación, en Figura 6.1 se observa el diagrama de bloques de un control proporcional (Ogata, 2010).

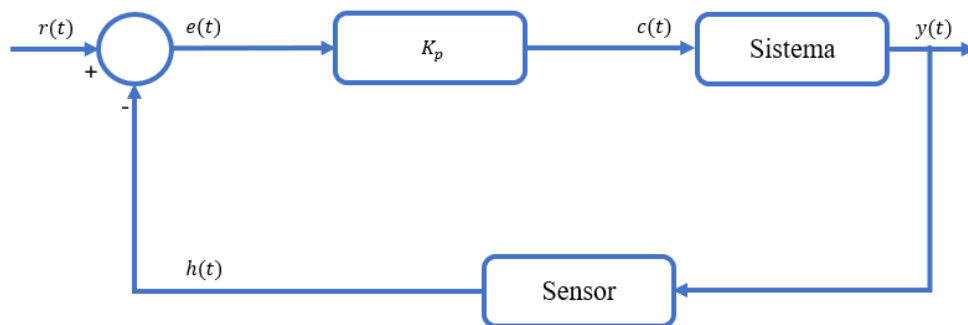


Figura 6.1. Diagrama de bloques controlador proporcional.

Control integral (I)

Un controlador con acción de control integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por perturbaciones exteriores y los cuales no pueden ser corregidos por el control proporcional, el valor de la salida del controlador $u(t)$ se cambia a una razón proporcional a la señal de error $e(t)$ (3).

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (3)$$

Donde K_i es una constante ajustable (3.1), a continuación, en Figura 6.2 se observa el diagrama de bloques de un control integral. (Ogata, 2010)

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.1)$$

Aplicando la transformada de Laplace (3.2)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (3.2)$$

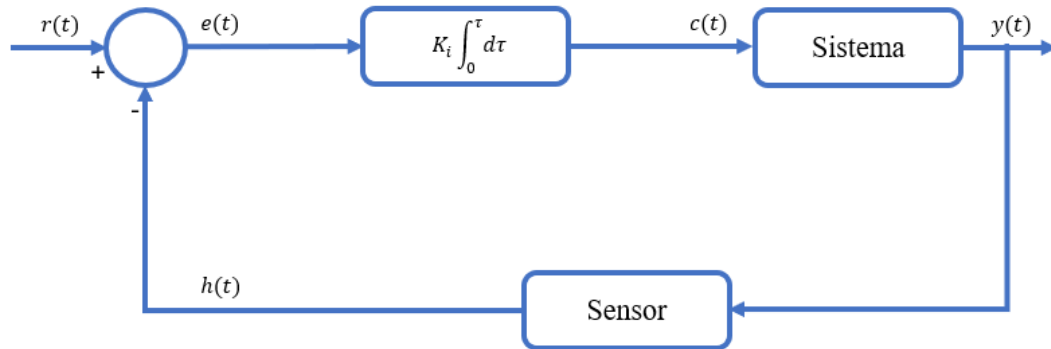


Figura 6.2. Diagrama de bloques controlador integral.

Control proporcional-integral (PI)

La acción de control de un controlador proporcional-integral (PI), es la combinación de dos acciones, que en su conjunto aportan una mejora al sistema, se define mediante (4) (Ogata, 2010).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (4)$$

Aplicando la transformada de Laplace (4.1)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4.1)$$

Donde T_i se denomina tiempo integral, a continuación, en Figura 6.3 se observa el diagrama de bloques de un control proporcional-integral.

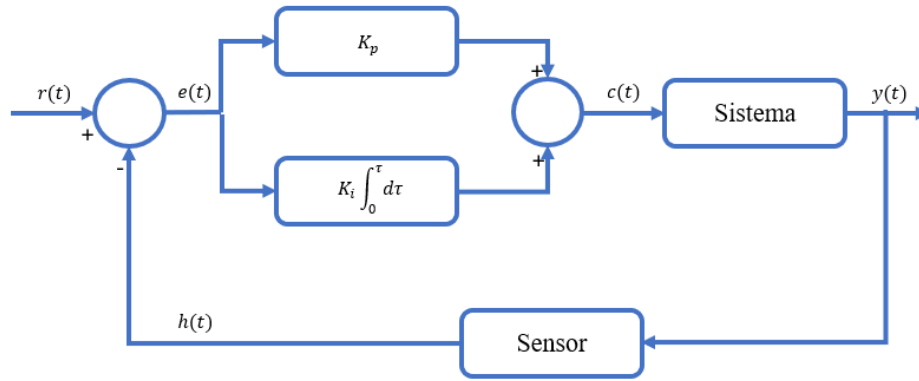


Figura 6.3. Diagrama de bloques controlador proporcional integral.

Control proporcional-derivativo (PD)

La acción de control de un controlador proporcional-derivativo (PD), es la combinación de dos acciones, que en su conjunto aportan una mejora al sistema, se define mediante (5) (Ogata, 2010).

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Aplicando la transformada de Laplace (5.1)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (5.1)$$

Donde T_d es el tiempo derivativo a continuación, en figura 6.4 se observa el diagrama de bloques de un control proporcional-integral.

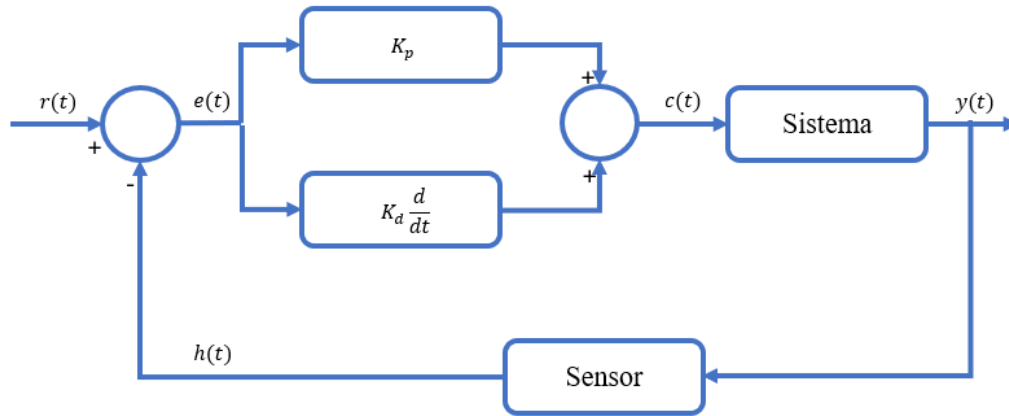


Figura 6.4. Diagrama de bloques controlador proporcional derivativo.

Control proporcional-integral-derivativo (PID)

La combinación de la acción de control proporcional, la acción de control integral y la acción de control derivativo se denomina acción de control proporcional-integral-derivativo, esta acción combinada tiene las ventajas y desventajas de cada una de las tres acciones de control individuales como se observa en la tabla 3. La ecuación de un controlador con esta acción combinada está dada por (6) (Hernández, 2010).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

Aplicando la transformada de Laplace (6.1)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (6.1)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo.

| | Ventajas | Desventajas |
|--------------|--|---|
| Proporcional | Si aumenta k_p la respuesta se hace más rápida y disminuye el error en estado estacionario. | Si existe ruido a la salida, este será amplificado gracias al aumento del k_p . En algunos casos provoca excesiva oscilación. |
| Integral | Cuando se agrega componente k_i se asegura un error en estado estable muy pequeño. Asegura robustez y minimiza la presencia de ruido | Puede que gracias a su acción la respuesta se vuelva lenta y/o oscilatoria |

| | | |
|------------|--|--|
| Derivativo | Con k_d el sistema responde más rápidamente. | Puede maximizar el ruido, debido a su sensibilidad ante él. Nunca puede aplicarse sola porque descontrola el sistema |
|------------|--|--|

Tabla 3. Ventajas y desventajas PID. (Autores)

El diagrama de bloques de un controlador proporcional-integral-derivativo aparece en la Figura 6.5.

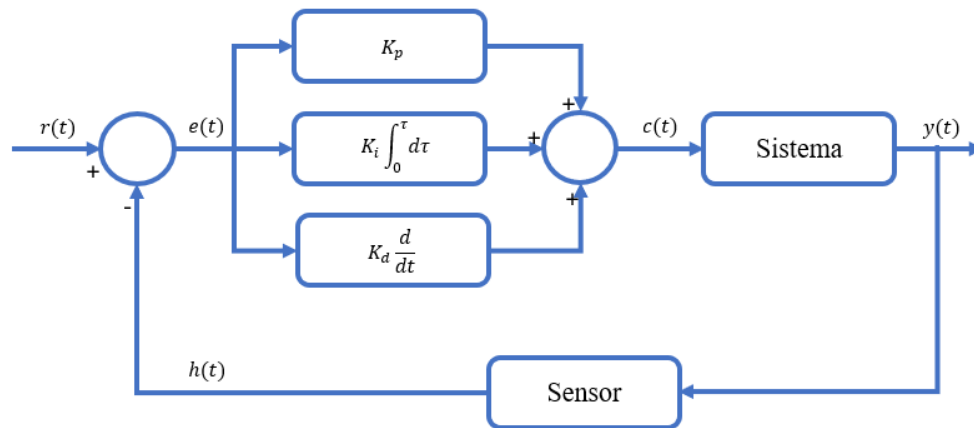


Figura 6.5. Diagrama de bloques controlador PID.

El análisis de los resultados obtenidos al aplicar el control requiere de la observación de parámetros como los que se nombran a continuación, cabe aclarar su definición puede verse de manera gráfica como se ilustra en la Figura 7 (Ogata, 2010).

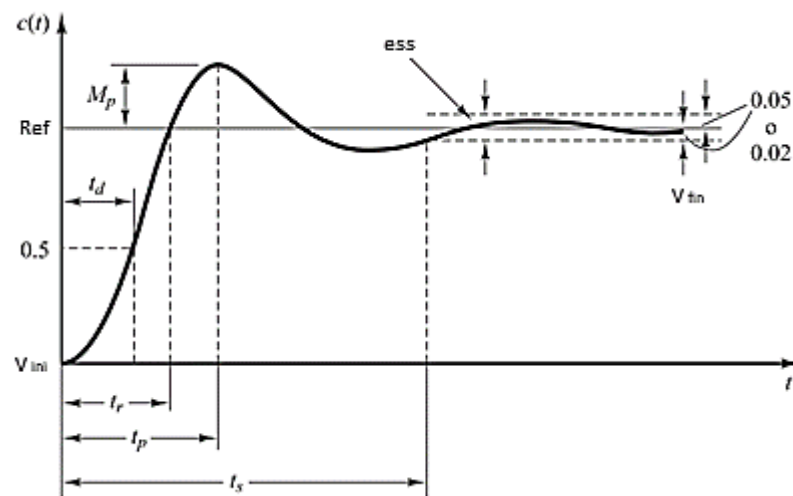


Figura 7. Curva de respuesta a escalón unitario con t_d , t_r , t_p , M_p y t_s . (Ogata, 2010).

Velocidad de respuesta o tiempo de estabilización (t_s): Es el tiempo que toma al sistema alcanzar una magnitud específica alrededor del punto de referencia y que se mantenga dentro de más o menos una ventana dentro de dicha magnitud. Según el criterio dado en t_s puede hallarse como se ve en (6.2), donde τ es el tiempo que transcurre cuando la señal ha llegado al 68,0 % de la amplitud final V_{fin} , también llamado criterio del 2% (Ogata, 2010).

$$t_s = 4\tau \quad (6.2)$$

Error de estado estacionario (e_{ss}): Es la diferencia entre la referencia y el valor actual de la salida después de que ha transcurrido el tiempo de estabilización, puede ser expresado matemáticamente como se ve en (6.3) donde Ref es la referencia del sistema, V_{fin} es el valor en el que se mantiene la curva en estado estable y V_{ini} es la amplitud de la curva de reacción en el tiempo $t = 0$ (Ogata, 2010).

$$e_{ss} = \frac{Ref - V_{fin}}{Ref - V_{ini}} \cdot 100\% \quad (6.3)$$

Máximo sobre impulso (M_p): Es el pico máximo que presenta la respuesta del sistema con respecto a la referencia, la estabilidad del sistema tiene una estrecha relación con este parámetro que debe tener un valor no superior a un porcentaje específico, puede darse en porcentaje y se calcula como se ve en (6.4) (Ogata, 2010).

$$M_p \% = \frac{M_p - ref}{ref} \cdot 100\% \quad (6.4)$$

Control LQR

El control LQR (*Linear Quadratic Regulator*) o control óptimo cuadrático, es una acción de control moderno multivariable que se caracteriza por su robustez tanto en tiempo discreto como en tiempo continuo. proporciona un procedimiento sistemático de calcular la matriz de ganancia de control de realimentación del estado (Ogata, 2010).

Se dice que es una estrategia de control óptima ya que se procura la operación del sistema dinámico al menor costo, es decir que los ajustes del controlador proporcional se encuentran usando un algoritmo matemático que minimiza la función de costo o desviaciones no deseadas (Patel, Deb, Modi, & Shah, 2017).

Para empezar a realizar el análisis de este controlador se tiene que partir de las ecuaciones de estado (7) del sistema a controlar las cuales son de la siguiente manera.

$$\dot{x} = [A][x] + [B][u] \quad (7)$$

$$[y] = [C][x] + [D][u]$$

El control LQR principalmente se basa en la obtención de una matriz de ganancia proporcional que será la encargada de optimizar el proceso.

Tal que (7.2)

$$u = -[k(t)][x(t)] \quad (7.2)$$

Con (7.3)

$$[k(t)] = [R^{-1}] [B]^T [P(t)] \quad (7.3)$$

Para calcular un controlador LQR se minimiza la función de costo J (7.4)

$$J = \int_0^{\infty} ([x]^T [Q] [x] + [u]^T [R] [u]) dt \quad (7.4)$$

Como se observa en (7.5) para encontrar el valor de la matriz $k(t)$, se necesita la matriz de la ecuación de Ricatti $P(t)$ y está descrita de la forma:

$$[\dot{P}] = [A]^T [P] + [P] [A] - [P] [B][R]^{-1} [B]^T [P] + [Q] \quad (7.5)$$

En la figura 8 se muestra el diagrama general del control LQR, se observa que el objetivo es encontrar el vector de ganancias K tal que, al realimentar los estados de la planta, se minimice el error para obtener un control adecuado, en ocasiones, la respuesta en estado estacionario de la planta tiene un error permanente diferente de cero, esto se debe a que, a diferencia de otros métodos de control, LQR no compara la salida de la planta con la referencia (Ogata, 2010).

En este método, se comparan todos los estados multiplicados por la matriz K con la referencia. Por esto, se recomienda añadir una ganancia de precompensación para escalar la referencia y asegurarse de tener un error permanente nulo (Tatiana, 2016), en la figura 9 se muestra el diagrama general de control LQR con esta ganancia incluida.

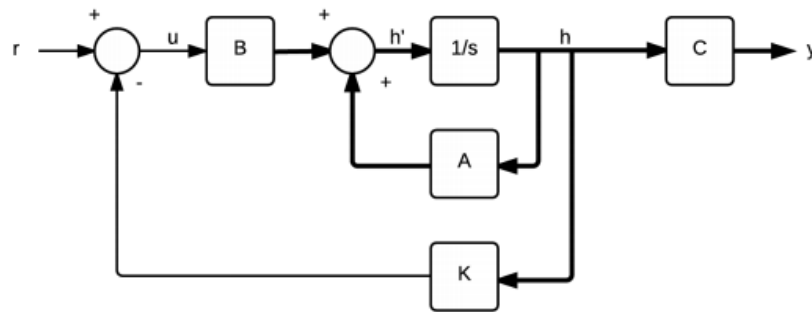


Figura 8 Lazo cerrado de control por realimentación de estados (Ogata, 2010).

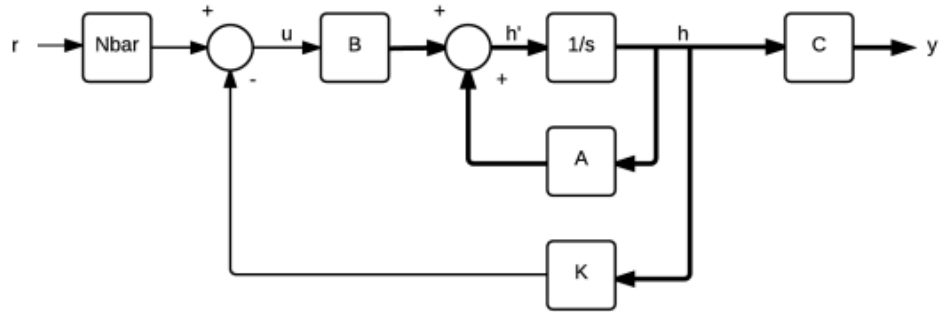


Figura 9. Lazo cerrado de control por realimentación de estados con precompensación (Ogata, 2010).

6. Metodología

A continuación, se describen cada una de las actividades realizadas para la realización del proyecto.

6.1 Verificación de la planta

En primera instancia se procede a realizar la conexión del módulo de control, este es el encargado de acondicionar la señal de los encoders para ser visualizada en el computador y de enviar la señal a los amplificadores de voltaje para mover los motores.

Para esto fue necesario la realización de un cable para establecer la comunicación entre el computador y la tarjeta de control, ya que en el laboratorio de control no contaban con uno, el cable consta de un conector tipo USB-A en uno de sus extremos, para ser conectado en uno de los puertos del computador, y en el otro extremo un conector tipo USB-B que va conectado al módulo de control, ambos son conectores macho como se observa en la figura 10.



Figura 10. Cable de comunicación.

Debido a la disposición del conector hembra en la tarjeta, un cable convencional no funciona para establecer la comunicación, se tienen que invertir las conexiones D + y D -, en la Figura 10.1 se observa cómo se realiza la conexión interna del cable.

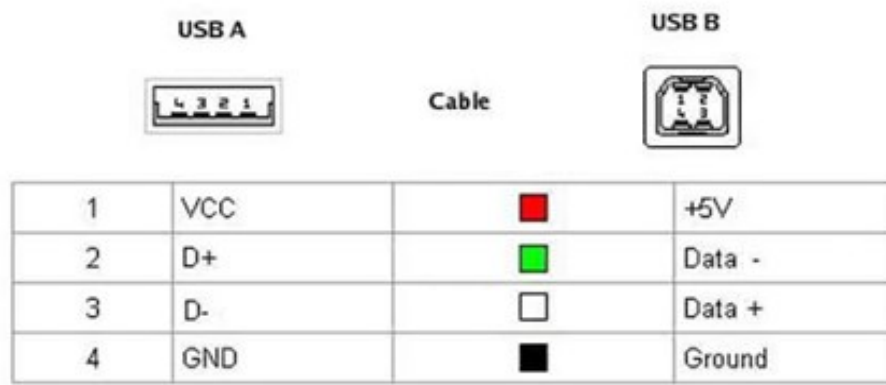




Figura 10.1 Conexión interna cable de comunicación.

Ya con el cable se establece la comunicación de la planta con el computador por medio de la tarjeta de control (ver Figura 13), se realiza un proyecto en SIMULINK¹³ para visualizar los datos entregados por los encoders y también envíe los datos a los amplificadores de voltaje, para las conexiones se usarán los diferentes tipos de cables que hacen parte de la planta los cuales se pueden observar en la tabla 4.

| Cable | Características | Descripción |
|---|---------------------------------|--|
|  | 5-pines-DIN a 5-pines-DIN | Este cable conecta los encoder al módulo de control. |
|  | 5-pines-DIN a RCA | Este cable conecta la salida analoga del módulo de control a la entrada del amplificador de voltaje. |

¹³ SIMULINK: Toolbox de MATLAB.


| | | |
|---|--|---|
|  | <p>4-pines-DIN a 6-pines-DIN</p> | <p>Este cable conecta la salida del amplificador de voltaje con el motor DC</p> |
|---|--|---|

Tabla 4. Cables helicóptero 2 DOF.

La figura 11 y 12 representan el diagrama de bloques necesario para establecer la comunicación entre SIMULINK y el PSoC 5 que se encuentra dentro de la tarjeta de control, se configuran los bloques de comunicación serial, para el de ingreso y salida de datos, el bloque principal donde establecen los parámetros de la comunicación, como son el puerto, la velocidad, la paridad y la cantidad de datos a comunicar, además se agregan bloques adicionales para acondicionar los datos para su ingreso y envío.

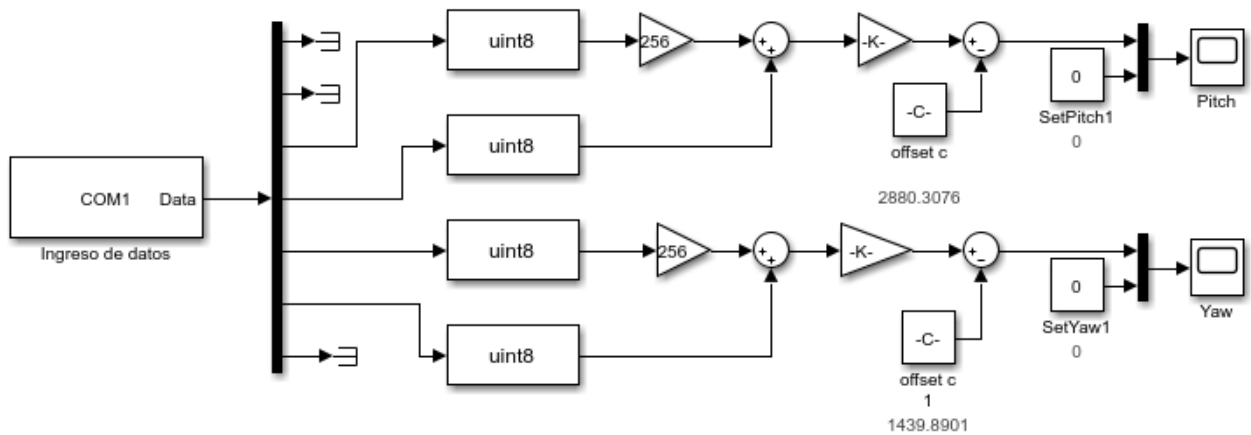


Figura 11. Diagrama de bloque ingreso de datos SIMULINK.

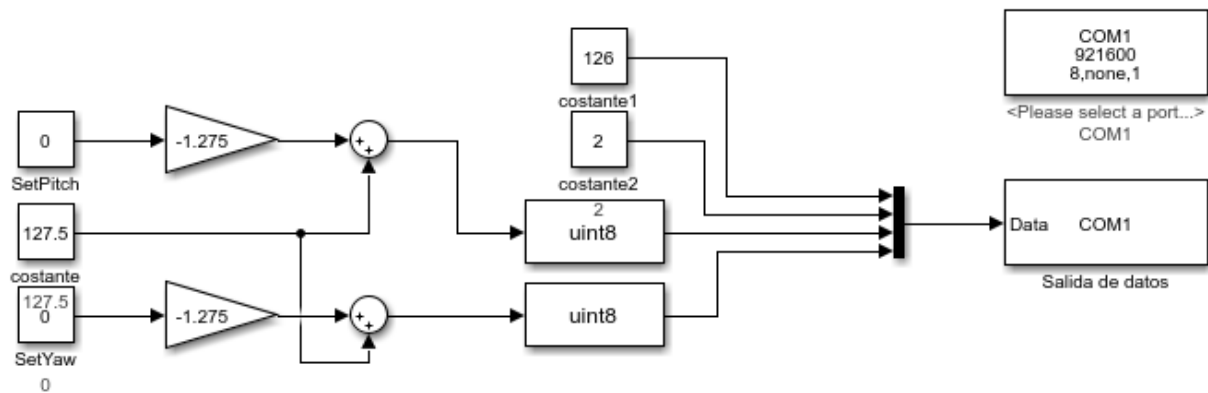


Figura 12. Diagrama de bloque salida de datos SIMULINK (Autores).

Una vez establecida la comunicación, se realiza la verificación total del helicóptero QUANSER 2 DOF, ya que sobre esta planta se desarrollará el sistema de enseñanza práctico y se necesita que este se encuentre en óptimas condiciones para continuar con las posteriores actividades.

Debido a que no se hace uso de esta planta en el laboratorio de control y que está ubicada dentro de un laboratorio donde se dictan clases regularmente, el helicóptero QUANSER 2 DOF se encuentra en malas condiciones, con exceso de polvo y con los cables de los encoders mal conectados.

Se reconectan bien los encoders y se realiza una limpieza superficial de la planta, a continuación, se establece la comunicación para verificar el estado de los encoders y las consignas de voltaje que son enviadas a los amplificadores de voltaje, la conexión inicial que realizó se observa en la figura 13.

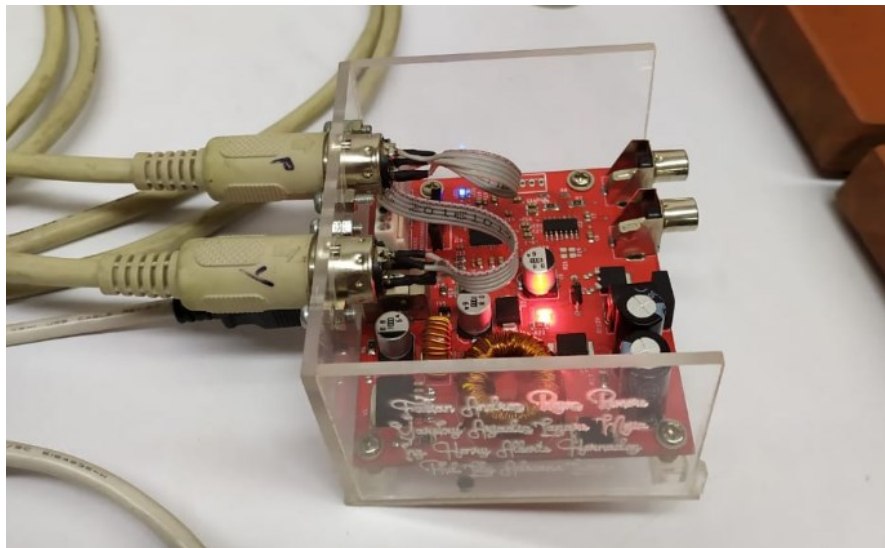


Figura 13. Conexión módulo de control con el Pc y las entradas de los encoders (Autores).

En la cual se verificaron los grados de inclinación respecto a lo visualizado en SIMULINK, y estos concuerdan, al verificar el envío de datos se midieron los voltajes en los conectores de salida respecto al dato establecido en SIMULINK y son correctos, generan un voltaje de 0 a 5 voltios, que posteriormente son enviados a los amplificadores.

Después de verificar que los encoders y el módulo de control se encuentra funcionando, se verifica el estado de los amplificadores de voltaje y los motores, el cableado del motor de pitch se encontró unido con cinta aislante, como se sabía desde un principio uno de los motores del helicóptero se encontraba dañado, este fue desmontado de la planta como se observa en la figura 14 y probado con una fuente de voltaje externa y efectivamente no funcionó, el motor fue enviado a reparación ya que sin él no se puede avanzar en el desarrollo del proyecto.



Figura 14. Motor pitch desmontado.

Mientras el motor era reparado, también era necesario realizarle un mantenimiento al helicóptero QUANSER 2 DOF, ya que este tenía exceso de polvo y su rotación se sentía un poco rígida, lo que afectaría al desempeño de la misma.

Las herramientas utilizadas fueron las siguientes:

- Destornilladores (estrella y pala).
- Llaves Bristol.
- Alcohol isopropílico.
- Lubricante.
- Cepillo.

Se desconectan los cables de los motores y el del encoder del eje pitch, y se separa el helicóptero de la base en el eje yaw retirando 4 tornillos que la aseguran, para dejar la planta dividida en dos partes, en la Figura 15 se observa el conector del encoder de pitch y el conector de los motores, con la estructura del helicóptero desmontado.

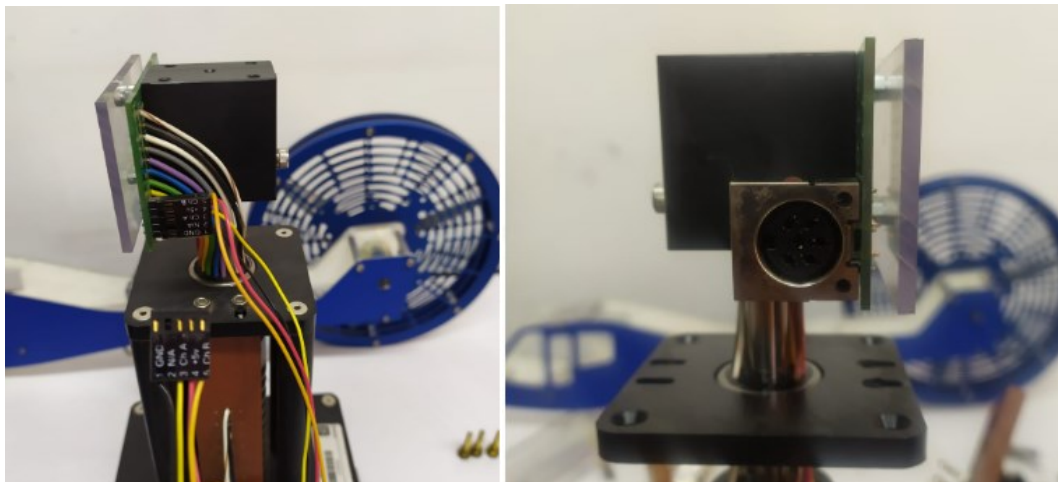


Figura 15. Base del helicóptero, conector encoder y motores.

De esta manera se puede realizar una mejor limpieza del rodamiento y de los conectores, además se pueden quitar los siguientes tornillos para acceder al mecanismo que evita que los cables se enreden en el eje, se puede ver en la Figura 16.

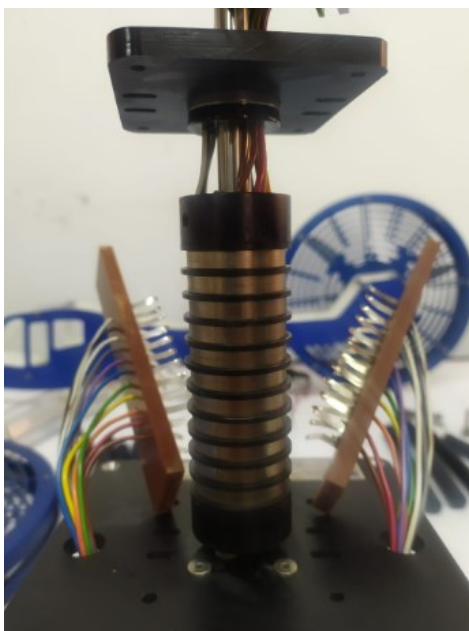


Figura 16. Sistema de conexión de cables.

Se desacoplan las siguientes partes para realizar una limpieza profunda y lubricar las partes que lo necesiten, en la base inferior se encuentra el encoder de yaw y la base del eje como se observa en la Figura 17.

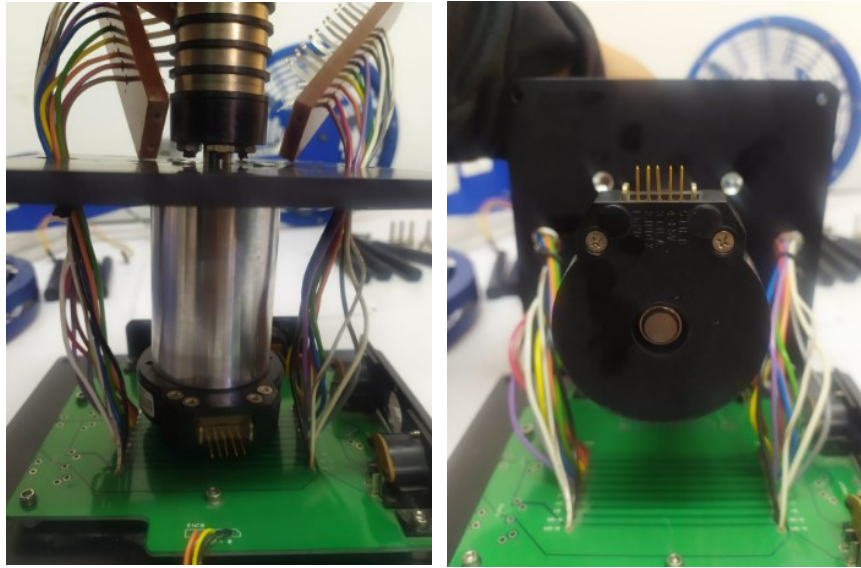


Figura 17. Base del helicóptero, conector encoder y motores.

Esta limpieza se hace con el fin de que la planta tenga un movimiento suave sin fricción en los ejes, posteriormente se acoplan de nuevo las partes ajustando bien los tornillos y conectando de la forma correcta los encoders y los motores.

Al motor reparado se le hicieron pruebas de funcionamiento con una fuente del laboratorio y se verificó el consumo de corriente, como se muestra en la Figura 17.1, dado que la corriente pico del motor es superior a la corriente suministrada por la fuente se presenta una caída de voltaje.



Figura 17.1. Consumo de corriente motor DC.

Con la planta ensamblada se realiza la conexión total con los amplificadores de voltaje y con el módulo de control, a continuación, en la Tabla 5 se describe la entrada y salida de cada uno de los cables.

| Cable # | Salida | Entrada | Señal |
|---------|---|---|--|
| 1 | Módulo de control: salida análoga # 0 | Amplificador pitch: entrada referencia | Comando de señal enviado al amplificador para el motor pitch. |
| 2 | Módulo de control: salida análoga # 1 | Amplificador yaw: entrada referencia | Comando de señal enviado al amplificador para el motor yaw. |
| 3 | Amplificador 0: To - Load (Carga) | 2 DOF Helicóptero: Pitch Motor (D/A 0) | Amplificación de voltaje aplicada al motor DC de pitch. |
| 4 | Amplificador 1: To - Load (Carga) | 2 DOF Helicóptero: Yaw Motor (D/A 1) | Amplificación de voltaje aplicada al motor DC de yaw. |
| 5 | 2 DOF Helicóptero: Pitch Encoder (ENC-0) conector | Módulo de control: Encoder canal #0 | Medición del ángulo en pitch. |
| 6 | 2 DOF Helicóptero: Yaw Encoder (ENC-1) conector | Módulo de control: Encoder canal #1 | Medición del ángulo en yaw |

Tabla 5 Conexión cables del helicóptero QUANSER 2 DOF.

En la Figura 17.2 se muestra un diagrama de conexión indicando el número de cable y la posición donde va conectado.

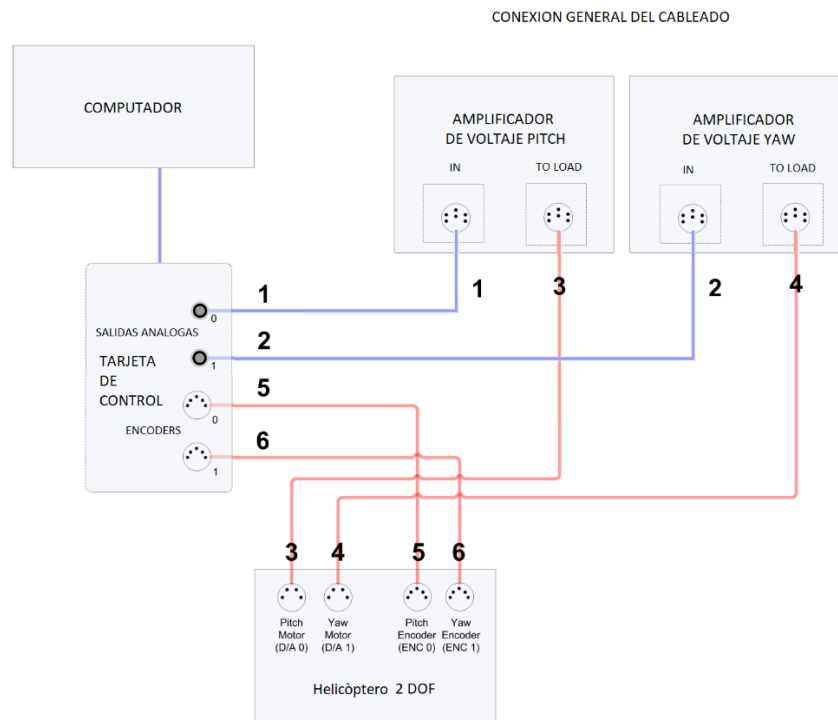


Figura 17.2. Diagrama general conexión del cableado.

Se realizan pruebas de funcionamiento con el helicóptero QUANSER 2 DOF, variando el voltaje que se le suministra a los motores y observando la reacción en la planta, en la Figura 17.3 se observa la planta en el laboratorio de control con los motores encendidos a velocidad media, la conexión de todo el cableado de la planta, con el módulo de control y los amplificadores de voltaje.

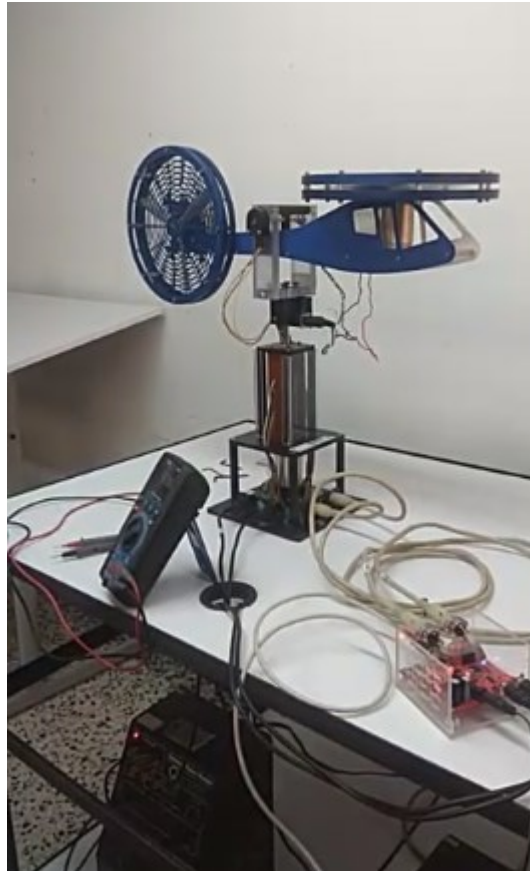


Figura 17.3 Helicóptero QUANSER 2 DOF en funcionamiento.

6.2 Modelamiento de la planta

Cinemática de la planta

En este capítulo se determinan los parámetros de la planta que van a ser usados para el diseño de los controladores.

Este sistema cuenta con dos motores uno ubicado en la parte delantera y el otro en la parte trasera del cuerpo de la estructura como se observó en la Figura 1, este cuenta con un rodamiento que permite que esté rote sobre el eje horizontal o yaw, además este cuenta con un movimiento sobre el eje vertical o pitch que permite el cabeceo de la estructura variando su ángulo de inclinación.

Un helicóptero es un sistema complejo de modelar debido a los efectos dinámicos, aerodinámicos y mecanismos que lo componen e intervienen en su movimiento, usando el diagrama de cuerpo

libre y aplicando las leyes de Newton se puede generar un modelo matemático del comportamiento de la planta; se considera la plataforma como un cuerpo rígido, como se observa en la Figura 18 el diagrama de cuerpo libre del sistema y las fuerzas que actúan sobre él (Bejarano Barreto, 2017).

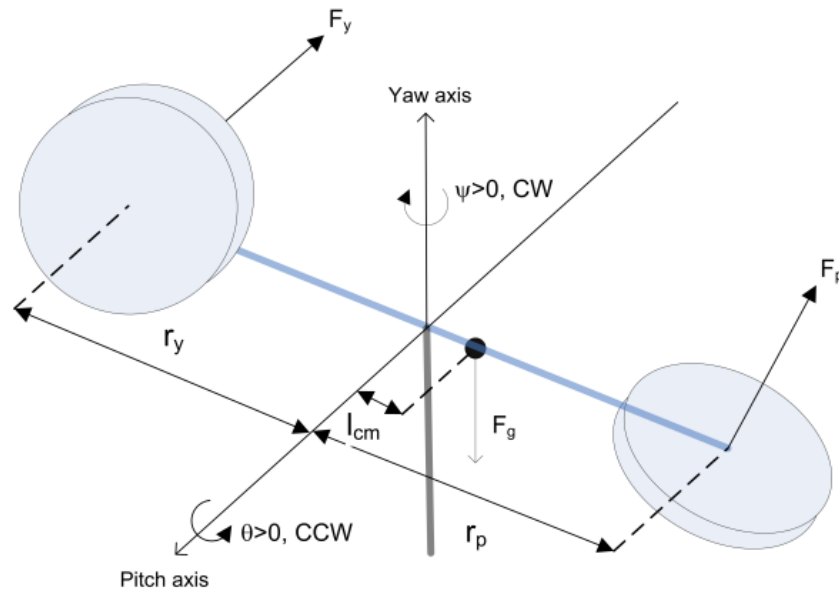


Figura 18. Diagrama de cuerpo libre Helicóptero QUANSER 2 DO (QUANSER, 2020).

Aplicando la segunda ley de Newton en cada eje de rotación y suponiendo que el sistema se encuentra en equilibrio.

Segunda ley de Newton (8).

$$F = ma \quad (8)$$

Donde

F = fuerza

m = masa

a = aceleración

Para movimientos rotacionales (8.1).

$$\tau = J\dot{\omega} \quad (8.1)$$

Donde

τ = momento angular.

j = momento de inercia.

ω = velocidad angular.

Reemplazando ω por θ (8.2)

$$\tau = J\dot{\theta} \quad (8.2)$$

Para el ángulo pitch (8.3).

$$\sum \tau = J\ddot{\theta}$$

$$J_p\ddot{\theta}(t) = T_p r_p + K_y T_y - \mu_p r_p \dot{\theta}(t) - f_g l_{cm} \sin \theta(t) \quad (8.3)$$

Para el ángulo yaw (8.4).

$$\sum \tau = J\ddot{\phi}$$

$$J_y\ddot{\phi}(t) = T_y r_y + K_p T_p - \mu_y r_y \dot{\phi}(t) \quad (8.4)$$

Donde

J_p y J_y son los momentos de inercia del cuerpo alrededor de θ y ϕ , los cuales se calculan mediante las fórmulas de inercia rotacional a través de un punto, y la fórmula de inercia de una barra. Como se tienen dos concentraciones de masa en los extremos y una barra, la inercia total será la suma de las tres inercias individuales.

θ y ϕ son las aceleraciones angulares de pitch y yaw respectivamente.

T_p y T_y son las fuerzas de empuje producidas por las hélices que son proporcionales a las señales que manejan los drivers de los motores.

l_{cm} = Distancia entre el eje vertical y el centro de masa.

f_g = Fuerza de gravedad actuando sobre el centro de masa.

μ_i = Coeficiente de rozamiento dinámico en los ejes de rotación.

K_i = Constantes de torque de reacción generadas por la acción de las hélices

Reducción de modelos

Para obtener un modelo de un helicóptero de dos grados de libertad que permita la implementación de reguladores por técnicas lineales para su control es necesario desarrollar un modelo simplificado de las dinámicas del sistema, se realiza eliminando los acoples existentes entre las dinámicas de cada eje de rotación. Para ello la fuerza de empuje T_y se aproxima a cero en (8.3) y T_p se aproxima a 0 en (8.4).

De tal forma que un eje no influya en el otro en el modelo.

Para el ángulo pitch (9.1).

$$J_p\ddot{\theta}(t) = T_p r_p - \mu_p r_p \dot{\theta}(t) - f_g l_{cm} \sin \theta(t) \quad (9.1)$$

Para el ángulo yaw (9.2).

$$J_y \ddot{\phi}(t) = T_y r_y - \mu_y r_y \dot{\phi}(t) \quad (9.2)$$

Linealización del modelo

Debido a que la mayoría de herramientas para el análisis de sistemas y diseño de sistemas de control requieren que el modelo sea lineal, es necesario entonces disponer de métodos para linealizar modelos. Cuando un modelo es muy complejo matemáticamente es necesario recurrir a técnicas como las representaciones en series infinitas como por ejemplo la expansión en serie de Taylor (Solaque Guzmán & Cristancho Cardozo, 2014).

Suponiendo una variación pequeña del ángulo pitch se tiene que:

$$\sin \theta = \theta$$

Con lo cual (10.1).

$$J_p \ddot{\theta}(t) = T_p r_p - \mu_p r_p \dot{\theta}(t) - f_g l_{cm} \quad (10.1)$$

J_p y J_y se pueden calcular teniendo en cuenta la inercia rotacional a través de un punto y la inercia de una barra. La inercia total será la suma de las inercias de las dos masas de los motores ubicados a los extremos y la inercia de la barra (10.2).

$$J_T = m_1 r_p^2 + m_2 r_y^2 + \frac{1}{2} m_{bp} L^2 \quad (10.2)$$

m_{bp} y L son, respectivamente, la masa y la longitud de la barra de pivote.

m_1 y m_2 son las masas de los motores de pitch y yaw.

Las fuerzas de empuje T_p y T_y pueden ser sustituidas por (10.3).

$$T_i = \frac{1}{2} \rho C_T A V^2 \quad (10.3)$$

Donde

R =radio de la hélice

Ω = velocidad angular.

ρ = es la densidad del aire.

C_T = es el coeficiente de empuje.

A = el área que forma la hélice al girar.

$V = \Omega R$ la velocidad de giro de la hélice.

Suponiendo que la fuerza de empuje es proporcional al cuadrado de la velocidad angular de las hélices (10.3) puede ser reescrita como (10.4):

$$T_i = K \Omega^2 \quad (10.4)$$

Con (10.5)

$$K = \frac{1}{2} \rho C_T A R^2 \quad (10.5)$$

Aplicando transformada de Laplace en (10.1) y (10.2) se obtienen las funciones de transferencia de pitch y yaw respectivamente se obtiene (10.6) y (10.7), para las simulaciones se utilizó, la Tabla 6. de parámetros que proporciona el fabricante.

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{\frac{r_p}{J_p}}{s^2 + \frac{\mu_p r_p}{J_y} s + \frac{l_{cm}}{J_p}} \quad (10.6)$$

$$\frac{\varphi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{r_y}{J_y}}{s^2 + \frac{\mu_y r_p}{J_y} s} \quad (10.7)$$

Simulación de los modelos

Las simulaciones de los modelos se realizaron mediante la herramienta SIMULINK. En las Figuras 19 y 20. se describe el comportamiento para los ángulos de Pitch y Yaw ante a una entrada escalón unitario respectivamente.

Para las simulaciones se utilizaron los parámetros dados por el fabricante, correspondientes al modelo que describe el comportamiento del helicóptero QUANSER 2 DOF como se pueden observar en la tabla 6.

| Símbolo | Descripción | Valor | Unidades |
|------------|---|---------|-------------------|
| μ_p | Fricción viscosa del eje Pitch | 0.01325 | N/V |
| μ_y | Fricción viscosa del eje Yaw | 0.8513 | N/V |
| M_{heli} | Masa móvil total del helicóptero | 1.3872 | kg |
| m_1 | Masa del motor de Pitch | 0.292 | kg |
| m_2 | Masa del motor de Yaw | 0.128 | kg |
| m_{bp} | Longitud total del cuerpo del helicóptero | 0.483 | m |
| m_{by} | Longitud del eje metálico que gira alrededor | 0.28 | m |
| J_p | Momento de inercia del motor delantero / escudo de montaje alrededor del pivote pitch | 0.0178 | kg.m ² |

| | | | |
|----------|--|--------|-------------------|
| J_y | Momento de inercia del motor trasero / escudo de montaje alrededor del pivote de yaw | 0.0084 | kg.m ² |
| l_{cm} | Posición en x del centro de masa | 0.186 | m |

Tabla 6. Parámetros Helicóptero 2 DOF (QUANSER, 2020).

Las simulaciones del modelo lineal se hicieron con una entrada escalón de 1. Se observa cómo la respuesta de los modelos es rápida y sin oscilaciones.

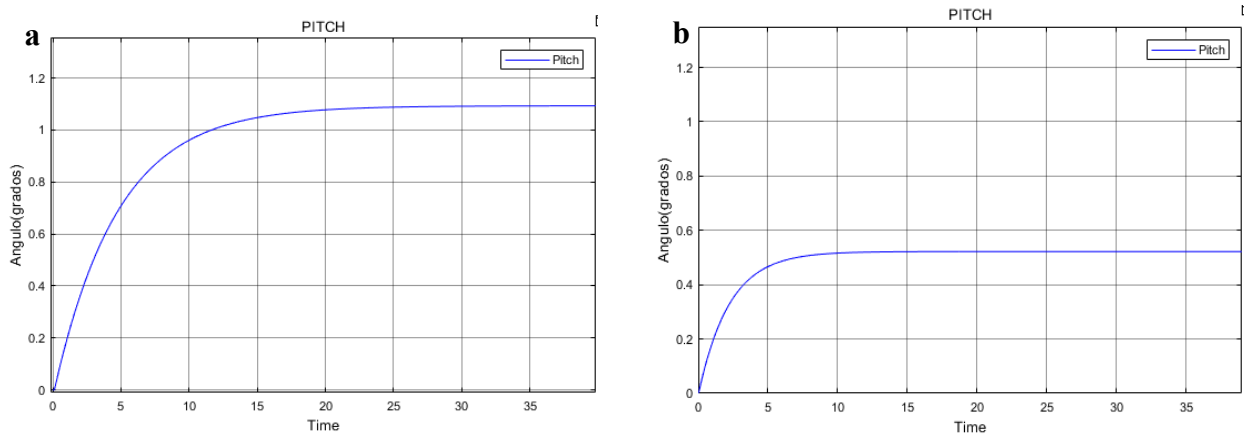


Figura 19. Respuesta modelo del ángulo Pitch. a) Lazo abierto. b) Lazo cerrado, (Autor).

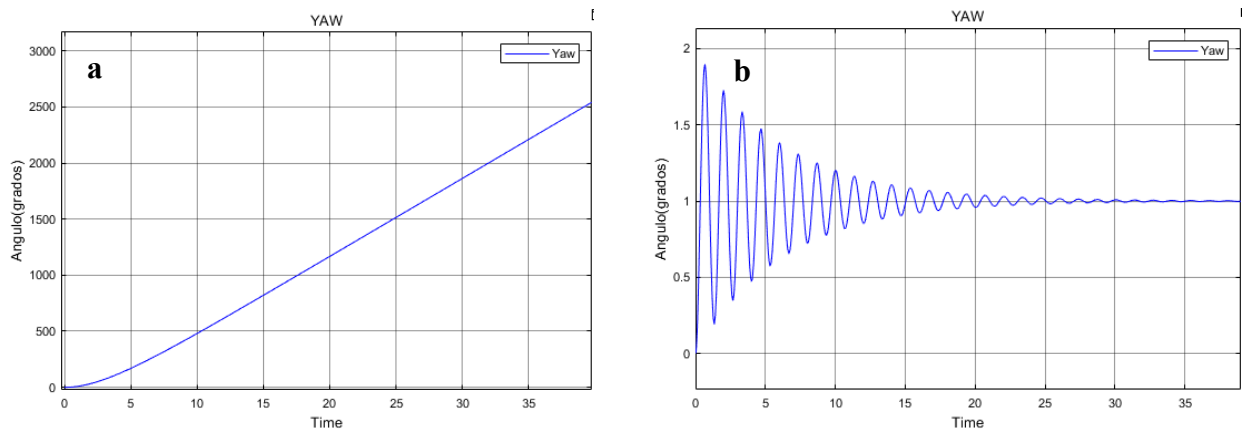


Figura 20. Respuesta modelo del ángulo Yaw. a) Lazo abierto. b) Lazo cerrado (Autor).

Como se puede observar las gráficas no presentan ruidos ni movimientos extraños, este es un comportamiento esperado en un sistema linealizado, con base en estos modelos se realiza el diseño de los controladores.

6.3 Diseño de los controladores

Se ha decidido realizar el diseño de controladores individuales para cada ángulo con el fin de abordar la plataforma no como un modelo MIMO¹⁴ si no como dos modelos SISO¹⁵ lo que permite reducir la complejidad del sistema de control.

Control ON/OFF

Para el diseño experimental de un control ON/OFF para los dos ejes de la planta pitch y yaw se realizó un análisis de las señales que los modelan anteriormente encontradas. De esta manera se encuentran los puntos de estabilidad para los ángulos de pitch y yaw en los cuales la planta tiene buen desempeño.

Se establecen los valores de High¹⁶ y Low¹⁷ tanto para Pitch y Yaw basados en los Comportamientos de la variación de Voltaje en los motores, y de esta manera se establece los valores de histéresis con los cuales la planta va a trabajar.

Pitch

$$\begin{aligned} High &= 100 \\ Low &= 0 \end{aligned}$$

Yaw

$$\begin{aligned} High &= 100 \\ Low &= -100 \end{aligned}$$

Control PID

El cálculo del regulador de PID implica tres acciones de control diferentes: la acción proporcional, la integral y la derivativa, el valor proporcional determina la acción al error actual, el integral determina la reacción basada en la suma de errores recientes y el derivado determina la anticipación a cambios en el error, la suma de estas tres acciones se utiliza para ajustar el proceso de control de un sistema. Para este caso, la planta se establece como un sistema SISO (single input, single output), por lo cual se hizo el diseño de un regulador PID para cada ángulo.

Para los parámetros de diseño se tiene como partida el desempeño del sistema en lazo abierto, generalmente recaen como sistemas de doble integrador. Desde la teoría, estos sistemas tienden a infinito cuando tienen por entrada un escalón. Para el caso, asumiendo la reacción propia del

¹⁴ Múltiples entradas, múltiples salidas

¹⁵ Una entrada, una salida.

¹⁶ Estado alto de la señal.

¹⁷ Estado bajo de la señal.

sistema (fuerza de empuje de motores + hélice e inercias vencidas), se asumen tiempos de estabilización no superiores a los 5 segundos, con un máximo sobrepaso del 25%. Con estos requerimientos, se procedió a realizar el cálculo de los reguladores.

Controlador en pitch

Analizando la respuesta observada en el ángulo pitch frente al estímulo de una señal de entrada tipo paso, una vez identificados los polos que estabilizan el sistema se realiza el cálculo de los parámetros del controlador.

Para realizar el control PID se definen los parámetros propios del sistema, que se encuentran fuertemente relacionados con la ubicación de los polos deseados que se obtiene del análisis de la función de transferencia del sistema (11).

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{10.44}{s^2 + 44.94s + 9.55} \quad (11)$$

Aplicando el criterio de estabilización de Routh-Hurwitz, se confirma que el sistema es estable ya que no existe cambio de signo entre las filas como se observa a continuación.

$$\begin{array}{c|cc} s^2 & 1 & 9.55 \\ s^1 & 44.94 & 0 \\ s^0 & 9.55 & 0 \end{array}$$

La asignación de los polos para el sistema de control se elige de acuerdo a las características de la respuesta transitoria, como el grado del denominador es dos, se debe aplicar para un sistema de segundo orden el máximo sobre impulso M_p , tiempo de estabilización t_s con un criterio del 2 %, para el criterio del 2 % se tiene que el t_s es 4 veces la constante de tiempo del sistema.

$$\begin{aligned} M_p &= 25\% \\ t_s &= 4 \end{aligned}$$

Por medio del análisis del lugar geométrico de las raíces y el Toolbox Sisotool de MATLAB que permite ver la respuesta al movimiento de los polos y calcula los parámetros de la ganancia proporcional, integral y derivativa para el controlador.

Por consiguiente, las ganancias del controlador son:

$$\begin{aligned} k_p &= 2.99 \\ T_i &= 1.29 \\ T_d &= 0.16 \end{aligned}$$

Controlador en yaw

De igual forma analizando la respuesta observada en el ángulo yaw frente al estímulo de una señal de entrada tipo paso, una vez identificados los polos que estabilizan el sistema se realiza el cálculo de los parámetros del controlador (12).

$$\frac{\varphi(s)}{U(s)} = \frac{22.14}{s^2 + 0.318s} \quad (12)$$

$$M_p = 30\% \\ t_s = 5$$

Por medio del análisis del lugar geométrico de las raíces y el Toolbox Sisotool de MATLAB que permite ver la respuesta al movimiento de los polos y calcula los parámetros de la ganancia proporcional, integral y derivativa para el controlador.

Por consiguiente, las ganancias del controlador son:

$$k_p = 3.45 \\ T_i = 0.43 \\ T_d = 0.023$$

Control LQR

Controlador en pitch

Para el diseño del controlador LQR es necesario plantear el sistema en ecuaciones de estado que describen de la siguiente forma.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [A]x + [B]u \\ y &= [C]x + [D]u \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{10.44}{s^2 + 44.94s + 9.55}$$

$$\theta(s)[s^2 + 44.94s + 9.55] = 10.44 U(s) \quad (13.1)$$

$$\theta(s)s^2 + \theta(s)44.94s + \theta(s)9.55 = 10.44 U(s) \quad (13.2)$$

Aplicando transformada inversa de Laplace en (13.2).

$$\ddot{\theta}(t) + 44.94\dot{\theta}(t) + 9.55\theta(t) = 10.44 U(t) \quad (13.3)$$

Luego se hallan la matriz de estados, el vector de entradas y el vector de salidas.

$$X_1 = \theta$$

$$X_2 = \dot{X}_1$$

$$\dot{X}_2 = -44.94X_2 - 9.55X_1 + 10.44 U \quad (13.4)$$

De esta manera la matriz de estado A es

$$[A] = \begin{bmatrix} -44.94 & -9.55 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

El vector de entradas B es

$$[B] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

El vector de salidas C

$$[C] = [0 \quad 10.44]$$

El vector D es

$$D = 0$$

Así, las ecuaciones de estado para el ángulo pitch son las siguientes

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -44.94 & -9.55 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (13.5)$$

donde

$$[A] = \begin{bmatrix} -44.94 & -9.55 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, [C] = [0 \quad 10.44], [D] = 0$$

El control LQR consiste el vector de ganancias k que estabilice la planta.

$$[k(t)] = [R^{-1}] [B]^T [P(t)] \quad (13.6)$$

Mediante el método del regulador cuadrático lineal se determina la matriz K del vector de control óptimo, Se busca solucionar la ecuación de Ricatti para hallar la matriz P ; si ésta existe y además es definida positiva el sistema es estable.(Patel et al., 2017)

$$[\dot{P}] = [A]^T [P] + [P] [A] - [P] [B][R]^{-1} [B]^T [P] + [Q] \quad (13.7)$$

Como se puede ver en las ecuaciones (13.6) y (13.7) contienen los términos $[Q]$ y $[R]$ estas son matrices propias del control LQR, hay algunos parámetros que deben tomarse en cuenta para seleccionar estas matrices, sin embargo, no existe una regla determinada para hacerlo (Tatiana & Galvis, 2016) además, la estrategia LQR tiene la ventaja de que independientemente de la selección de $[Q]$ y $[R]$ sigue siendo capaz de estabilizar al sistema porque es un control robusto, algunos parámetros que suelen seguirse para seleccionar estas matrices son:

Los valores deben ser siempre positivos o 0.

Debe conocerse muy bien el comportamiento dinámico de la planta.

Con frecuencia se escoge $[Q]$ y $[R]$ diagonales asignando valores grandes a las variables que se quieran minimizar.

Si $[Q]$ contiene valores grandes, la exigencia al control será mayor.

$[Q]$ debe ser positiva semidefinida, es decir que cumpla con $Q = Q^T \geq 0$.

$[R]$ debe ser positiva definida, es decir que cumpla con $R = R^T > 0$.

Si $[R]$ contiene valores grandes, se incrementa la influencia de las acciones de control sobre la planta.

Si $[R]$ corresponde a la matriz identidad, provoca que todas las variables de control tengan la misma influencia sobre el sistema. Si se necesita que unas variables de control ejerzan más influencia sobre la planta que otras, se escoge $[R]$ como matriz diagonal con diferente magnitud asignada a cada variable de control.

La manera más fácil de escoger $[Q]$ es igualarla a (13.8).

$$[Q] = [C]^T [C] \quad (13.8)$$

De esta manera:

$$[Q] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 108.99 \end{bmatrix}$$

Se establece un parámetro de optimización el cual determina la rapidez del sistema

$$R = 0.5$$

Despejando P en (13.7) se obtiene:

$$[P] = \begin{bmatrix} 0.0892 & 4.0169 \\ 4.0169 & 182.0879 \end{bmatrix}$$

Una vez hallada la matriz P , ésta se reemplaza en la ley de control óptimo del LQR la cual está dada por:

$$[k(t)] = [R^{-1}] [B]^T [P(t)] \quad (13.9)$$

Solucionando (13.9) se tiene que el vector de ganancias de realimentación para el ángulo pitch es:

$$[K] = [0.1784 \quad 8.0338] \quad (13.10)$$

La ganancia de precompensación del sistema se calcula dado que la respuesta en estado estacionario de la planta tiene un error permanente diferente de cero al utilizar control LQR esto se debe a que, a diferencia de otros métodos de control, LQR no compara la salida de la planta con la referencia.

$$NbarP = 1.6843$$

Controlador en yaw;

Para el diseño de la matriz $[K]$ de yaw, se utilizó el mismo procedimiento empleado en pitch empleando las ecuaciones de estado del eje yaw.

$$\frac{\varphi(s)}{U(s)} = \frac{22.14}{s^2 + 0.318s}$$

Las ecuaciones de estados que describen a yaw son

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -44.94 & -9.55 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (14.1)$$

Donde

$$[A] = \begin{bmatrix} -0.3180 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, [C] = [0 \quad 22.14D], [D] = 0$$

Se estableció un parámetro de optimización

$$R = 10$$

Por lo general, se escoge $[Q] = [C]^T[C]$ para buscar que el error que se minimice con respecto al esfuerzo de control sea el error en las salidas que se desean controlar de la planta (ECP, 1994). Esto se facilita cuando las salidas a controlar son a su vez estados del modelo en variables de estado y todos los estados son controlables.

Si se define $Q = I_2$, como matriz identidad de tamaño 2×2 en vez de $[Q] = [C]^T[C]$, se está buscando que los errores a minimizar sean los errores de todos los estados del sistema y no solo el del ángulo, para yaw se usa una matriz identidad que nos resulta más eficiente.

$$[Q] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De esta manera, se tiene que el vector de ganancias para el ángulo yaw es

$$[K] = [0.5950 \quad 0.3162]$$

La ganancia de precompensación del sistema para el ángulo yaw es

$$NbarY = 0.0639$$

6.4 Simulación de los controladores.

Con los diseños de los controladores se realizan las respectivas simulaciones de los mismos en la plataforma experimental. Dicha simulación se lleva a cabo en el Toolbox SIMULINK® de MATLAB®, en esta se integran los bloques que componen los lazos de control del sistema y se visualiza su respuesta.

Simulación control ON/OFF

La simulación del controlador ON/OFF se puede observar en la Figura 21 para los dos ángulos de movimiento de la planta Pitch Y Yaw en la cual se visualizan los bloques que lo componen, entre los cuales se pueden visualizar la entrada de las funciones de transferencia que representan cada ángulo.

Se realizan simulaciones de Lazo Abierto, Lazo Cerrado y así mismo la salida con el control para los dos ángulos, dicho controlador se hace a partir del bloque (Relay) que posee la plataforma para así determinar el comportamiento de los mismos, la simulación de dicho controlador se realiza en el Toolbox SIMULINK de MATLAB.

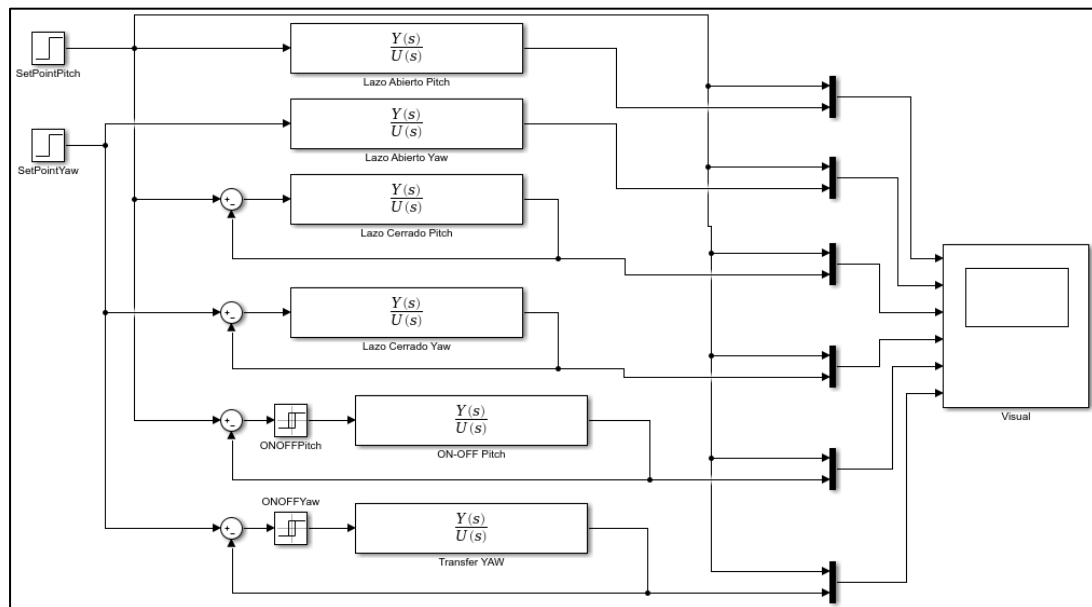


Figura 21. Diagrama de control ON/OFF de Pitch y Yaw simulado en MATLAB. (Autor)

En la Figura 22 se puede observar la respuesta del controlador ON-OFF a las funciones de transferencia para ambos ángulos ya calculadas anteriormente en el documento, a todas estas señales se les conectó un escalón unitario la cual se representa con el color rojo y su respuesta con el color azul.

Como se puede observar en la Figura 22(a) se representa el comportamiento oscilatorio del ángulo Pitch entre la salida y la referencia dado que este controlador no puede estabilizar el sistema ya que lo que realiza es una comparación y solo tiene dos resultados posibles en los cuales variar; en la Figura 22(b) se representa el comportamiento inestable y oscilatorio del ángulo Yaw se observa en dicha Figura que el sistema es inestable y para un ángulo de referencia su oscilación es mucho más amplia e inestable.

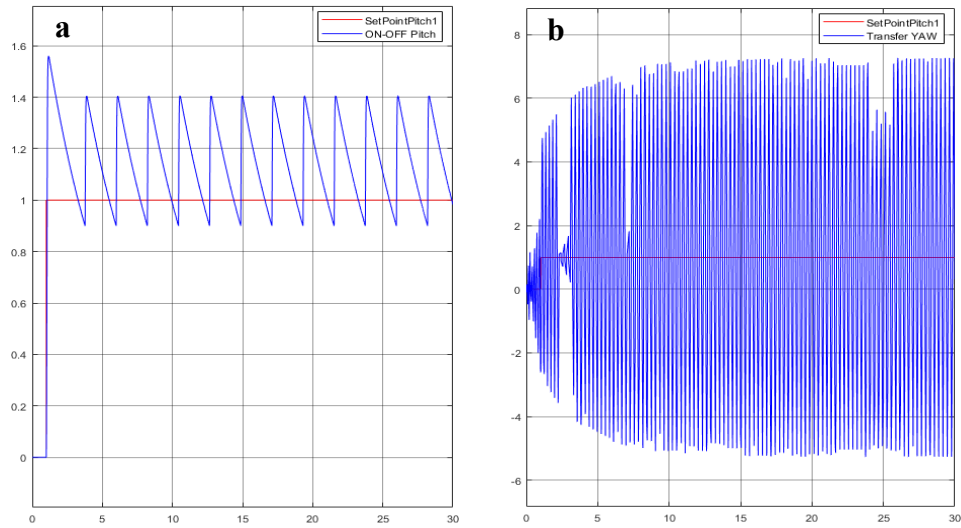


Figura 22. Respuesta modelo del ángulo Pitch (a) y Yaw (b) al control ON-OFF. (Autor)

Simulación control PID

La simulación del controlador PID se puede observar en la Figura 23 para los dos ángulos de movimiento de la planta Pitch Y Yaw en la cual se visualizan los bloques que lo componen, entre los cuales se pueden visualizar la entrada de las funciones de transferencia que representan cada ángulo. Se realizan simulaciones de Lazo Abierto, Lazo Cerrado y así mismo la salida con el control para los dos ángulos, dicho controlador se hace a partir del bloque PID que posee la plataforma para así determinar el comportamiento de los mismos, la simulación de dicho controlador se realiza a partir del Toolbox SIMULINK de MATLAB.

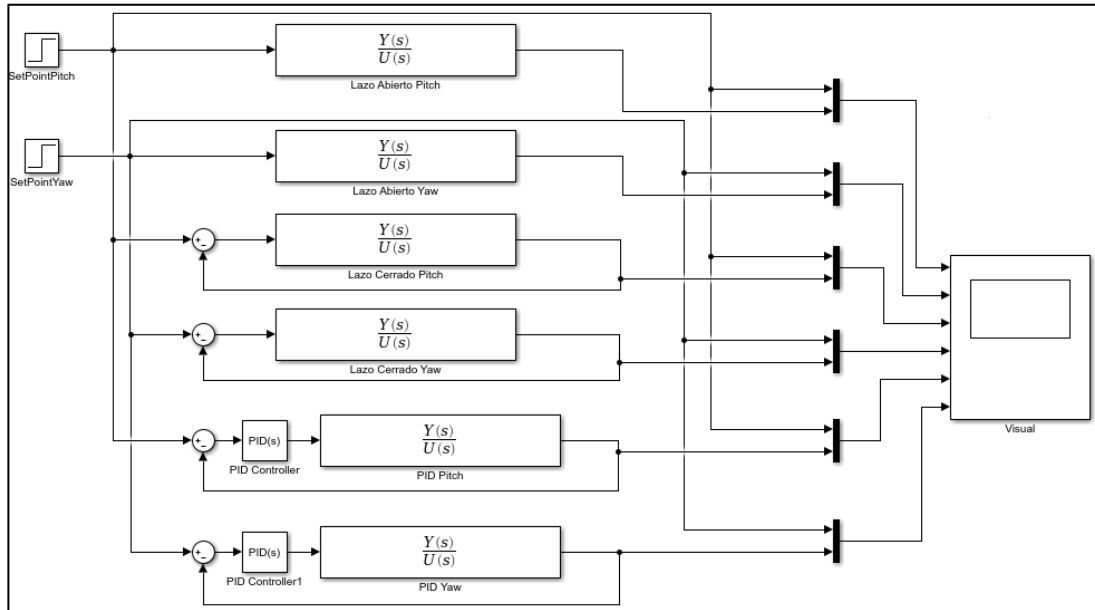


Figura 23. Diagrama de control PID de Pitch y Yaw simulado en MATLAB. (Autor)

En la Figura 24 se puede observar la respuesta del controlador PID a las funciones de transferencia para ambos ángulos ya calculadas anteriormente en el documento, a todas estas señales se les conectó un escalón unitario la cual se representa con el color rojo y su respuesta con el color azul.

Como se puede observar en la Figura 24(a) se representa la respuesta del sistema al configurar las ganancias del controlador ya mencionadas anteriormente en el apartado de controlador PID para Pitch el sistema se estabiliza con un máximo sobre impulso no mayor al 10% de la señal y un tiempo de estabilización menor de 15 segundos sin oscilaciones, lo que determina que el controlador es de respuesta lenta y robusto ya que no posee oscilaciones antes de la estabilización; en la Figura 24(b) se representa la respuesta del sistema al configurar las ganancias del controlador ya mencionadas anteriormente en el apartado de controlador PID para Yaw, el sistema se estabiliza con un máximo sobre impulso no mayor al 35% de la señal y un tiempo de estabilización menor de 12 segundos con algunas oscilaciones antes de estabilizarse, lo que determina que el controlador es de respuesta rápida y transitoria antes de su asentamiento total.

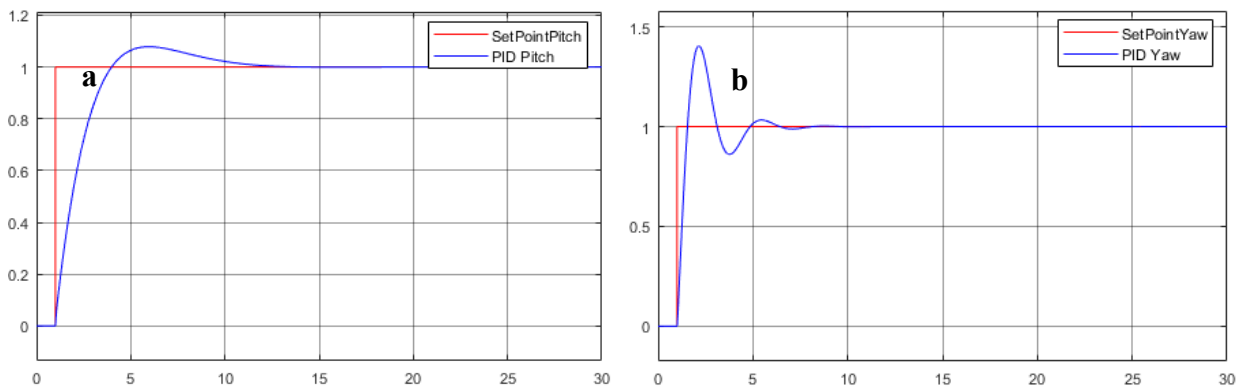


Figura 24. Respuesta modelo del ángulo Pitch (a) y Yaw (b) al control PID. (Autor)

Simulación control LQR

La simulación del controlador LQR se puede observar en la Figura 25 para los dos ángulos de movimiento de la planta Pitch Y Yaw en la cual se visualizan los bloques que lo componen, entre los cuales se pueden visualizar la entrada de las funciones de transferencia que representan cada ángulo. Se realizan simulaciones de Lazo Abierto, Lazo Cerrado y así mismo la salida con el control para los dos ángulos, dicho controlador se hace a partir del bloque de ganancia que captura la matriz de K y el valor de la ganancia de precompensación que no se aplican a la función de transferencia sino al sistema dado por sus matrices A, B, C y D que posee la plataforma en cada ángulo para así determinar el comportamiento de los mismos, la simulación de dicho controlador se realiza a partir del Toolbox SIMULINK de MATLAB.

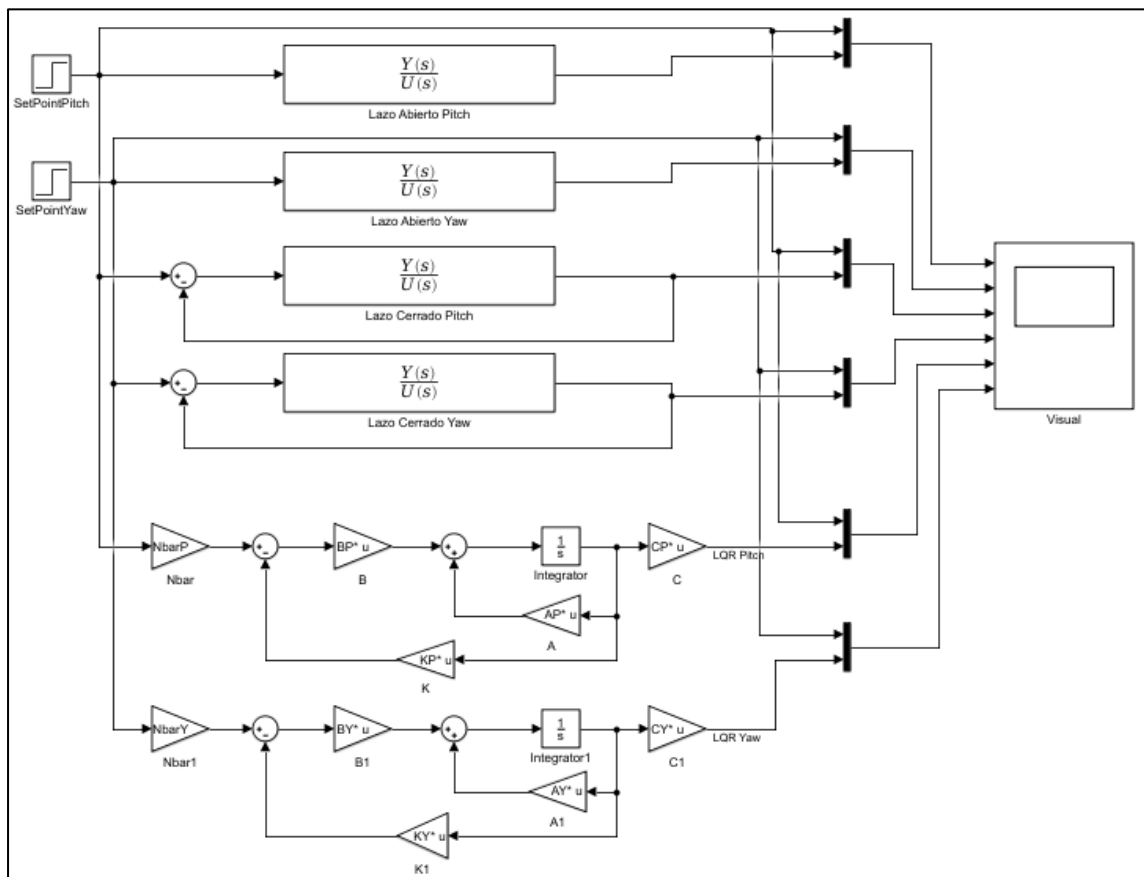


Figura 25. Diagrama de control LQR de Pitch y Yaw simulado en MATLAB. (Autor)

En la Figura 26 se puede observar la respuesta del controlador LQR las matrices de estado que representan cada uno de los ángulos del sistema ya calculadas anteriormente en el documento, a todas estas señales se les conectó un escalón unitario la cual se representa con el color rojo y su respuesta con el color azul.

Como se puede observar en la Figura 26(a) se representa la respuesta del sistema al configurar las ganancias del controlador ya mencionadas anteriormente en el apartado de controlador LQR para Pitch el sistema se estabiliza totalmente en un tiempo de 20 segundos sin oscilaciones; en la Figura 26(b) se representa la respuesta del sistema al configurar las ganancias del controlador ya mencionadas anteriormente en el apartado de controlador LQR para Yaw, se estabiliza totalmente en un tiempo menor a 10 segundos sin oscilaciones, en ambas gráficas se observa la robustez de dicho controlador y una efectividad del mismo al no poseer en ninguno de los ángulos oscilaciones.

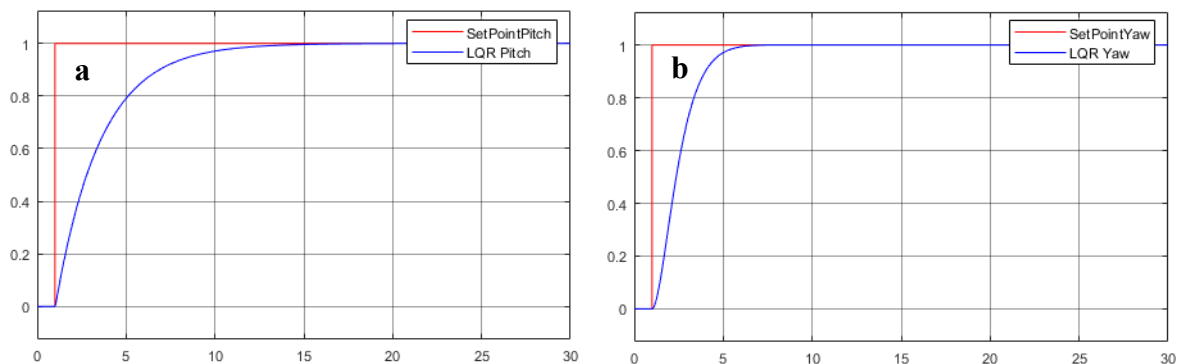


Figura 26. Respuesta modelo del ángulo Pitch (a) y Yaw (b) al control LQR. (Autor)

6.1 Implementación de los controladores.

Luego del diseño y simulación de los controladores se realiza la respectiva implementación de los mismos en la plataforma experimental. Dicha implementación se lleva a cabo en SIMULINK® de MATLAB®, en esta se integran los bloques que componen los lazos de control del sistema y se visualiza su respuesta.

Implementación control ON/OFF

La implantación del controlador ON/OFF para los dos ángulos de movimiento de la planta Pitch y Yaw, se observa en la Figura 27 así como los bloques necesarios para configurar la comunicación de la tarjeta de control con la planta y el acondicionamiento de las señales de entrada y salida ya mencionados en el apartado de Verificación de la planta.

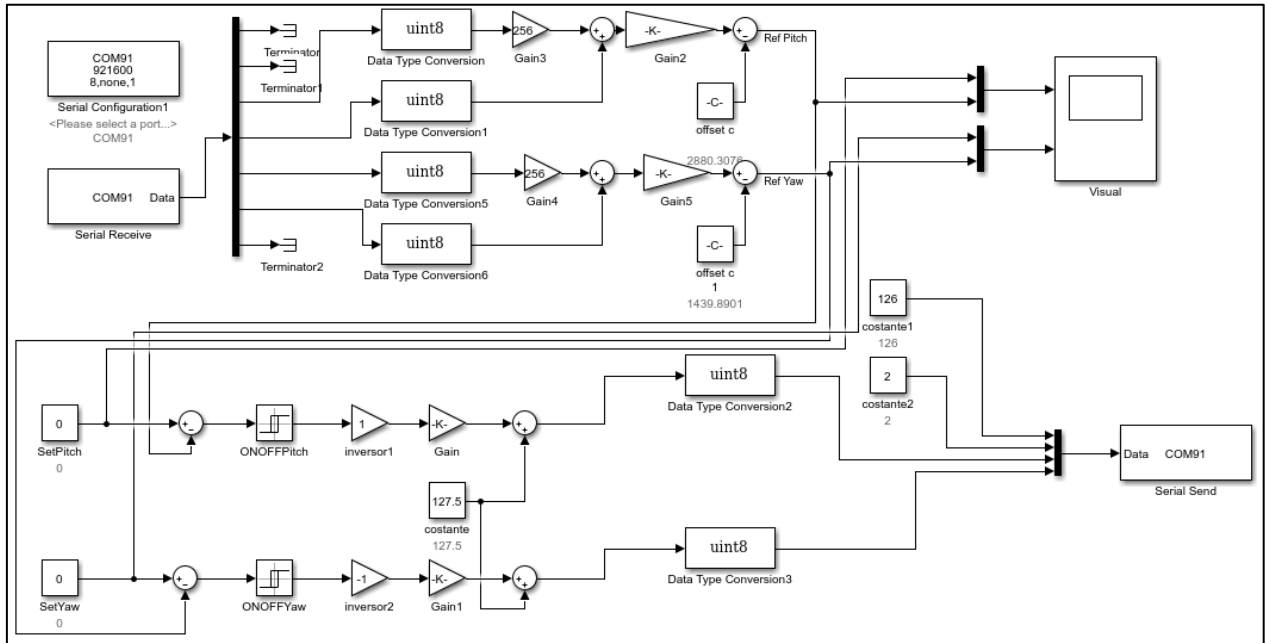


Figura 27. Diagrama de control ON/OFF de Pitch y Yaw implementado en SIMULINK. (Autor)

El bloque encargado de realizar el controlador ON-OFF para ambos ángulos es el bloque de Relay que se muestra en la Figura 28 que posee el Toolbox de MATLAB SIMULINK, al cual se le configuran los parámetros de High (Output when on) y Low (Output when off) para cada uno de los ángulos, y el valor de Histéresis (Switch on point y Switch off point), estos parámetros determinan la amplitud y rango de oscilación en el cual la planta va a funcionar y desplazarse que se pueden observar en la Figura 29.

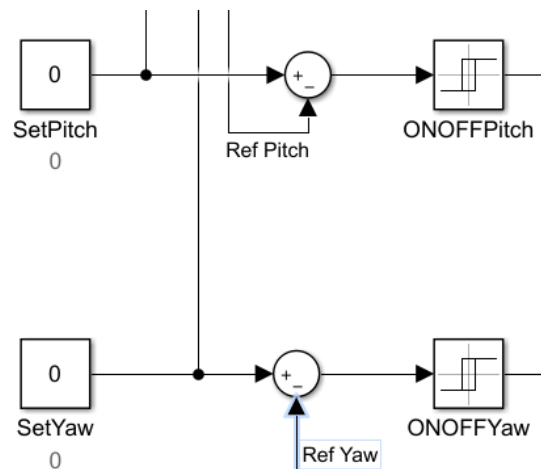


Figura 28. Bloque controlador ON-OFF

Relay

Output the specified 'on' or 'off' value by comparing the input to the specified thresholds. The on/off state of the relay is not affected by input between the upper and lower limits.

Main **Signal Attributes**

Switch on point:
 Unapplied change

Switch off point:

Output when on:

Output when off:

Input processing: **Elements as channels (sample based)**

☒ Enable zero-crossing detection

? **OK** **Cancel** **Help** **Apply**

Figura 29. Parámetros de Configuración bloque Relay.

Implementación control PID

La implementación del controlador PID para los dos ángulos de movimiento de la planta Pitch y Yaw, se observa en la Figura 30 así como los bloques necesarios para configurar la comunicación de la tarjeta de control con la planta y el acondicionamiento de las señales de entrada y salida ya mencionados en el apartado de Verificación de la planta.

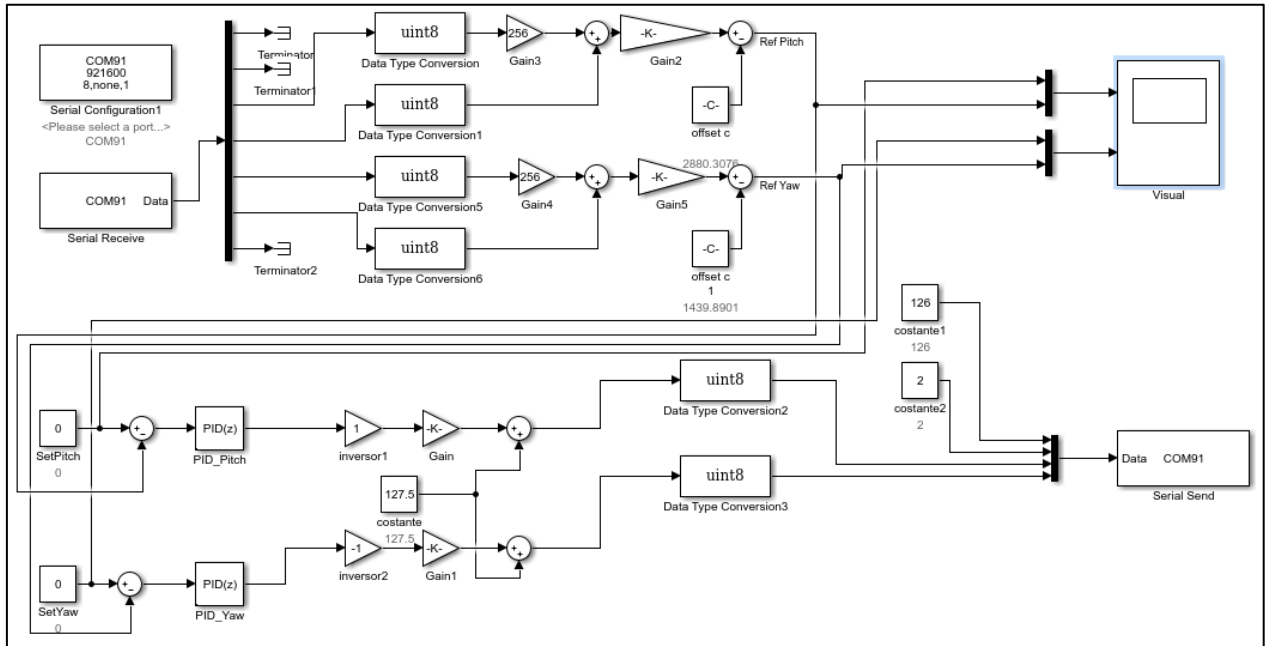


Figura 30. Diagrama de control PID de Pitch y Yaw implementado en SIMULINK. (Autor)

El bloque encargado de realizar el controlador PID para ambos ángulos es el bloque Discret PID Controller que se muestra en la Figura 31 que posee el Toolbox de MATLAB SIMULINK, al cual se le configuran los parámetros de Ganancia Proporcional (Proporcional P), Ganancia Integral (Integral I), Ganancia Derivativa (Derivative D) y El coeficiente de filtro (Filter coefficient N); los cuales se pueden apreciar en la Figura 32, estos parámetros determinan el comportamiento de la planta a variaciones de la referencia en el cual la planta va a funcionar y desplazarse.

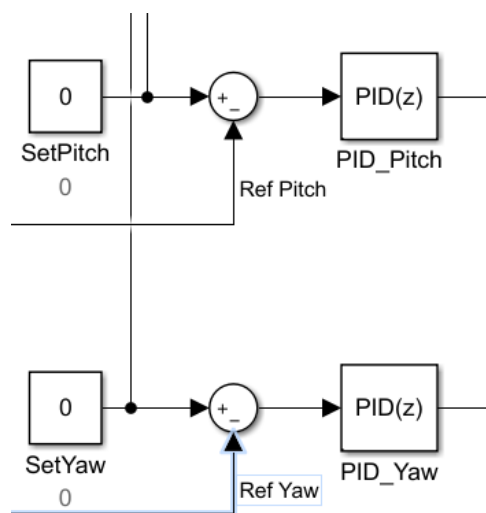


Figura 31. Bloque controlador PID y realimentación.

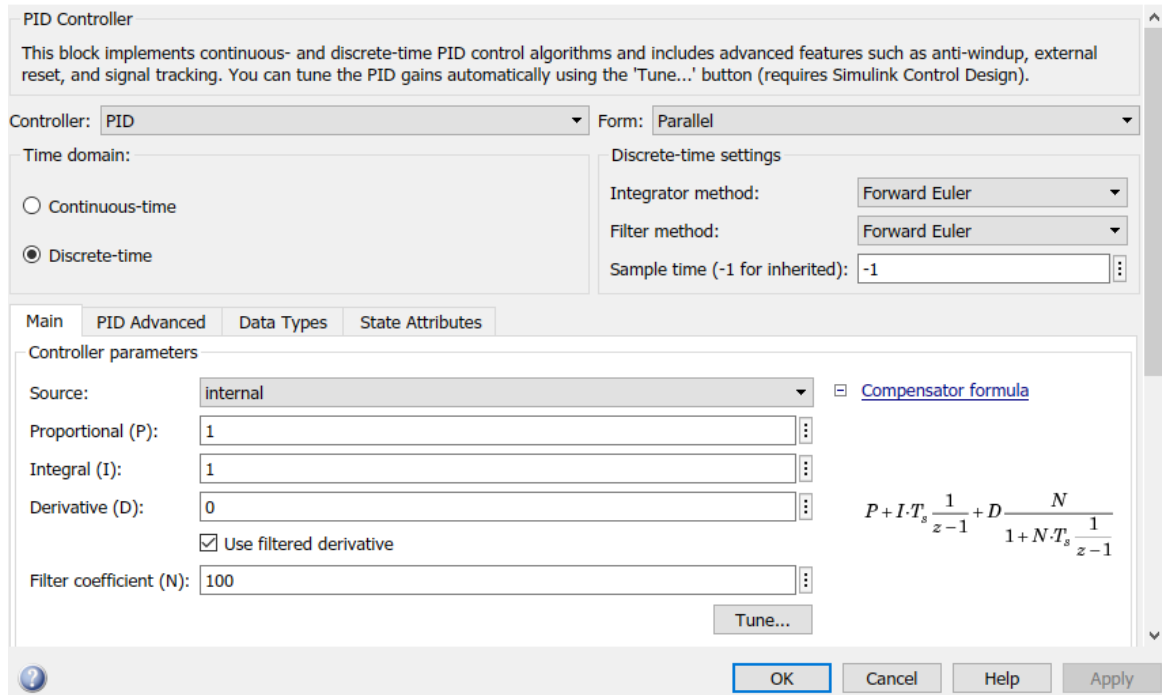


Figura 32. Parámetros de Configuración bloque PID.

Implementación control LQR

La implementación del controlador LQR para los dos ángulos de movimiento de la planta Pitch y Yaw, se observa en la Figura 33 así como los bloques necesarios para configurar la comunicación de la tarjeta de control con la planta y el acondicionamiento de las señales de entrada y salida ya mencionados en el apartado de Verificación de la planta.

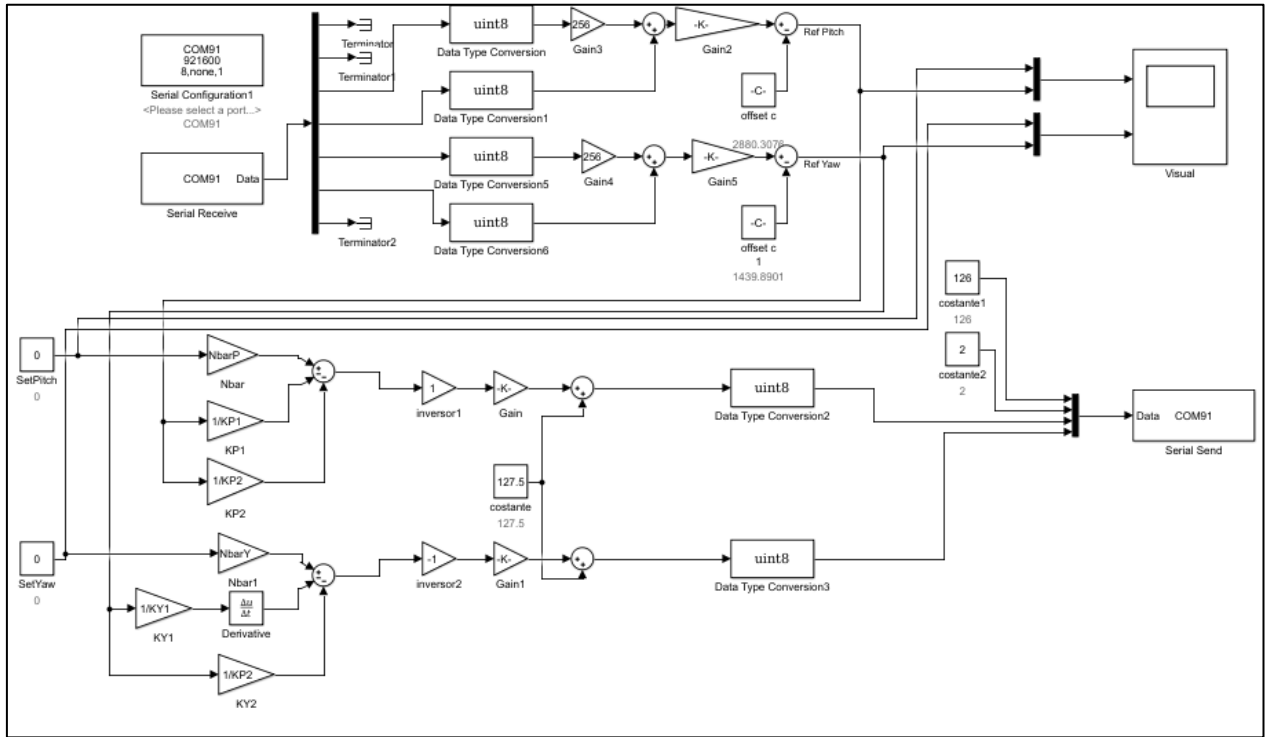


Figura 33. Diagrama de control LQR de Pitch y Yaw implementado en SIMULINK.

Los bloques encargados de realizar el controlador LQR para Pitch son los bloques de Gain que aparecen en la Figura 34^a y los bloques de Gain para el controlador LQR de Yaw se observan en la Figura 34^b, que posee el Toolbox de MATLAB SIMULINK. A los cuales se les modifica el parámetro de ganancia (Gain) como se observa en la Figura 35 basado en los cálculos del vector de ganancias para cada ángulo; los cuales determinan el comportamiento de la planta a variaciones de la referencia en el cual la planta va a funcionar y desplazarse.

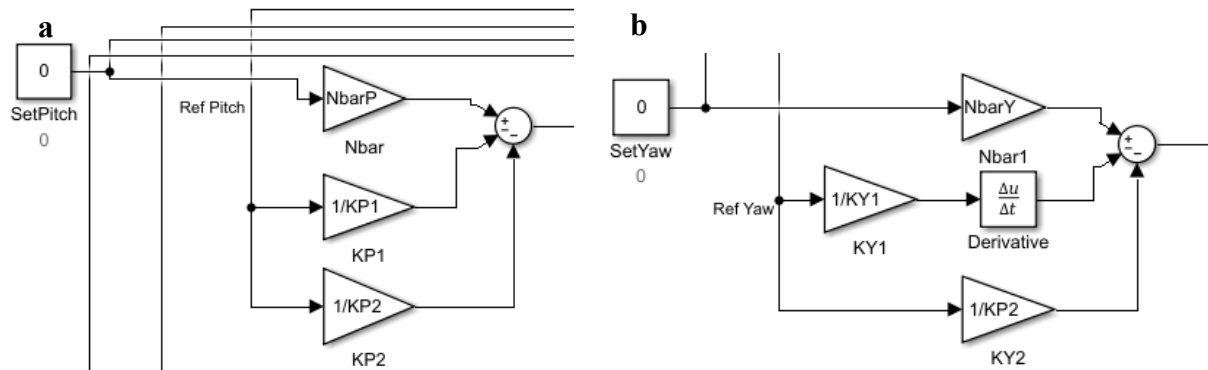


Figura 34. Bloque controlador LQR para Pitch (a) y para Yaw (b).

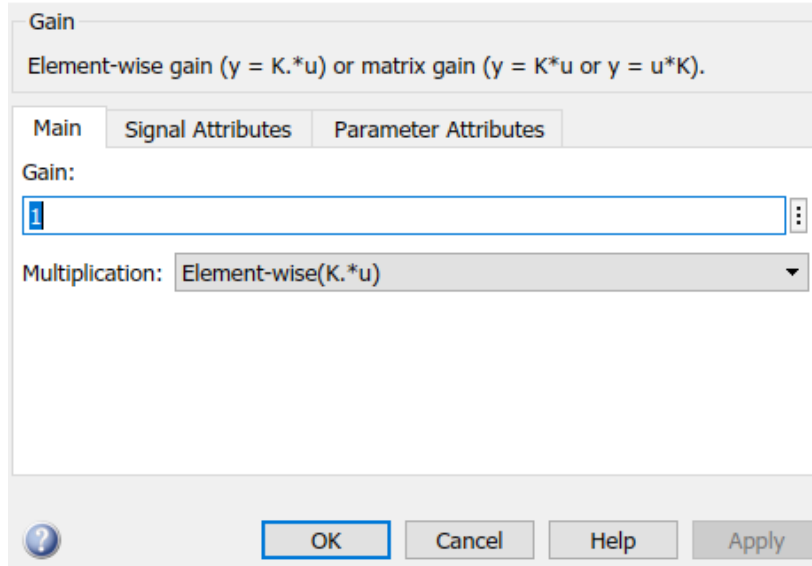


Figura 35. Parámetros de Configuración bloque Gain.

6.2 Diseño e implementación de la interfaz gráfica

Para el diseño de la interfaz gráfica se tuvieron que estudiar a fondo cada una de las estrategias de control y el comportamiento de la planta, con el fin de asegurar una comprensión y abstracción de cada una de las variables que interactúan con el diseño de los controladores, y así establecer su importancia en el diseño de los controladores.

Se empezó diseñando la pantalla principal de la interfaz en donde se realiza una descripción del sistema y se visualizan las opciones de funcionamiento, por simulación, con la planta directamente y una tercera opción pruebas de funcionamiento como se puede observar en la Figura 36.

SISTEMA PARA EL DESARROLLO
DE ESTRATEGIAS DE CONTROL ON/OFF, PID Y LQR
APLICADAS AL HELICÓPTERO QUANSER 2 DOF
DEL LABORATORIO DE CONTROL DE LA
FACULTAD TECNOLÓGICA



Figura 36. Pantalla principal interfaz de usuario. (Autor)

Cuando se seleccionan las opciones simulación o planta se despliegan las opciones de control ON/OFF, PID y LQR como aparece en la Figura 37.

ROL HELICÓPTERO
UANSER 2DOF



Figura 37. Selector de controlador. (Autor)

Al dar click en pruebas de funcionamiento se despliegan las funciones para visualizar los encoder y enviar un nivel de voltaje a los motores. Se puede observar en la Figura 38.

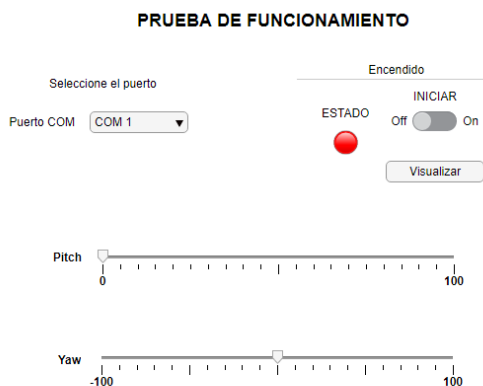


Figura 38. Pantalla prueba de funcionamiento interfaz de usuario. (Autor)

En la Figura 39 se observa el parámetro de configuración del puerto serial, así como el Switch de inicio a las pruebas con la planta; estos objetos de la interfaz se encuentran en las pantallas de prueba de funcionamiento, así como en las pruebas de control con la planta. Al dar click en el botón de visualizar se despliega las gráficas concernientes a las pruebas de funcionamiento, las pruebas de simulación o pruebas de controles con la planta.

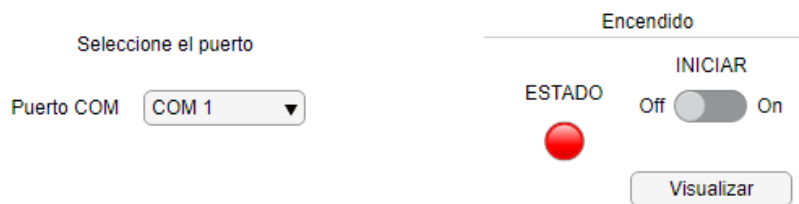


Figura 39. Configuración puerto y encendido. (Autor)

En las Figura 40 y 41 se observa la ventana que se despliega al dar click en visualización dentro de las opciones PID y LQR, en las dos primero se grafican la respuesta en lazo abierto y cerrado para los dos ángulos y posterior a estas las gráficas de los controladores aplicados, para que si el estudiante pueda analizar la respuesta en cada caso.

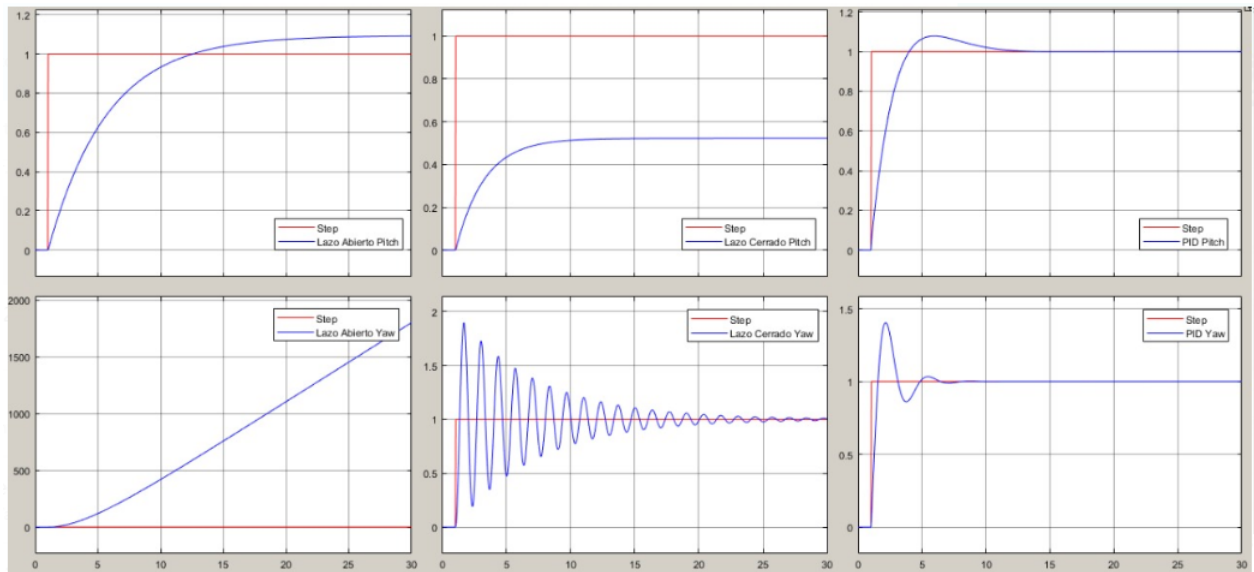


Figura 40. Muestra de visualización de simulación control PID. (Autor)

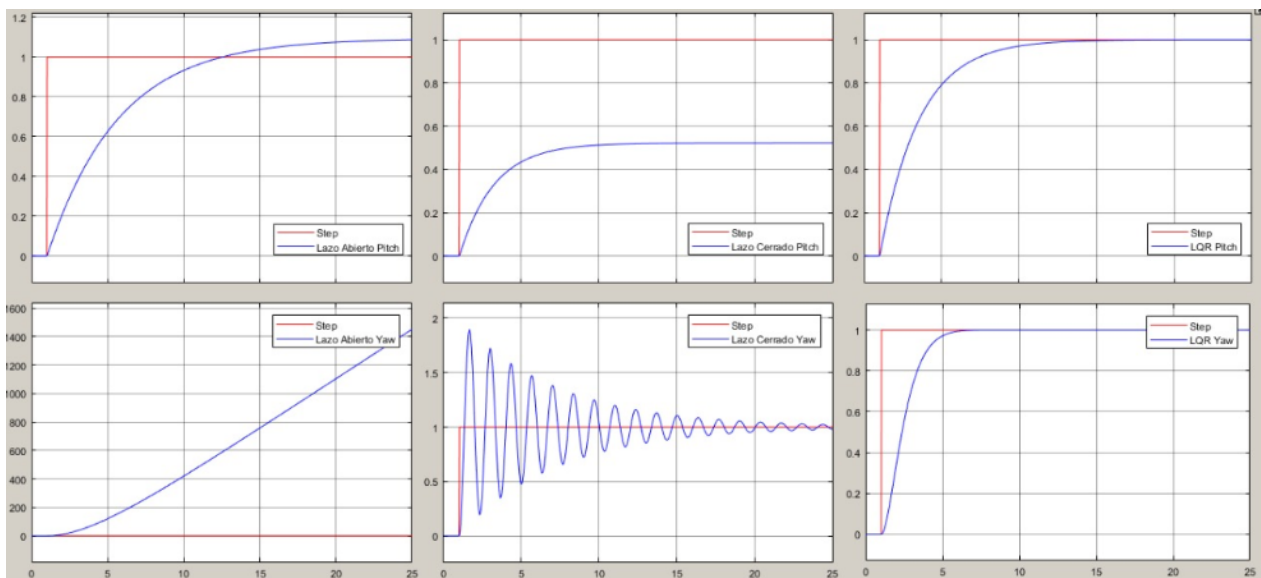


Figura 41. Muestra de visualización de simulación control LQR. (Autor)

La Figura 42 muestra los objetos (Slider) que modifican los Set Point de cada ángulo. Este objeto modifica el bloque de SIMULINK Constant que se observa en la Figura 43, en este bloque ajusta el valor en el cual el usuario quiere tener el sistema, este bloque se modifica tanto en la parte de simulación como en la planta como se observa en la Figura 44, los Slider modifican el parámetro Constant Value del bloque para cada ángulo de la Planta.

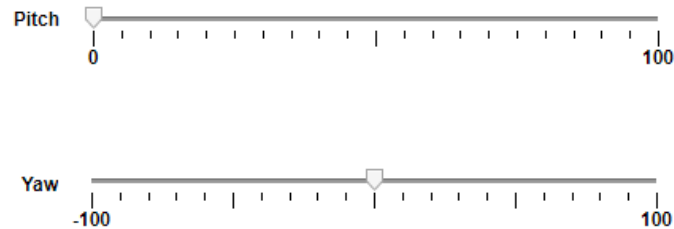


Figura 42. Slider de Modificación Set Point para Pitch y Yaw. (Autor)



Figura 43. Bloque de configuración de Set Point Pitch y Yaw en SIMULINK. (Autor)

The figure shows the configuration window for the Constant block. The 'Constant value' field is set to 0. The 'Interpret vector parameters as 1-D' checkbox is checked. The 'Sample time' field is set to 0.01. The window has tabs for 'Main' and 'Signal Attributes'. At the bottom, there are buttons for '?', 'OK', 'Cancel', 'Help', and 'Apply'.

Figura 44. Configuración de parámetro Bloque Constant. (Autor)

Las pantallas de los controladores se diseñaron de tal forma que el usuario pueda modificar el valor de las variables de diseño como se muestra en la figura 45, estas variables de diseño se enlazan con los bloques de SIMULINK para así poder cargar las variables de cada controlador, según los parámetros que se pidan como se describió anteriormente en el apartado de implementación de los controladores.



Figura 45. Pantallas de Controladores GUI¹⁸ (Autor)

¹⁸ Interfaz gráfica de usuario.

En la Figura 46 se visualizan las pantallas de modo simulación de los controladores en esta pantalla, así como en las anteriores se pueden modificar las variables de diseño de cada uno de los controladores con la excepción de modificar e ingresar la función de transferencia como se puede apreciar en las Figura 47.

Simulación Control ON/OFF

Simulación

INFO ON/OFF

Visualización INICIAR
 Off ☒ On

Control PITCH

Función de Transferencia

Num Pitch

Den Pitch

Variables de Diseño

High Pitch

Low Pitch

Histeresis Pitch

Control YAW

Función de Transferencia

Num Yaw

Den Yaw

Variables de Diseño

High Yaw

Low Yaw

Histeresis Yaw

Pitch Set Point

Yaw Set Point

Simulación Control PID

Simulación

INFO PID

Visualización INICIAR
 Off ☒ On

Control PITCH

Función de Transferencia

Num Pitch

Den Pitch

Variables de Diseño

Ki Pitch

Kp Pitch

Kd Pitch

N Pitch

Control YAW

Función de Transferencia

Num Yaw

Den Yaw

Variables de Diseño

Kp Yaw

Ki Yaw

Kd Yaw

N Yaw

Pitch Set Point

Yaw Set Point

Simulación Control LQR

Simulación

INFO LQR

Visualización INICIAR
 Off ☒ On

Control PITCH

Función de Transferencia

Num Pitch

Den Pitch

Variables de Diseño

Q Pitch=

R Pitch=

K Pitch=

Control YAW

Función de Transferencia

Num Yaw

Den Yaw

Variables de Diseño

Q Yaw=

R Yaw=

K Yaw=

Pitch Set Point

Yaw Set Point

Figura 46. Pantallas de Simulación de Controladores GUI. (Autor)

| Control PITCH | | Control YAW | |
|---------------------------------|--|-------------|--|
| Función de Transferencia | | | |
| Num Pitch | | Num Yaw | |
| Den Pitch | | Den Yaw | |

Figura 47. Ingreso función de transferencia en Pitch y Yaw. (Autor)

En la Figura 48 se observa el bloque de función de transferencia (Transfer Fnc) que posee el Toolbox de MATLAB SIMULINK, que se modifica desde las pantallas de simulación, cambiando los parámetros de Numerador (Numerator coefficients) y Denominador (Denominator coefficients) de la Función de Transferencia calculadas anteriormente en el apartado de Linealización del modelo, ingresando dichos datos con un corchete cuadrado como si fuera un vector, como se muestra en la Figura 49.

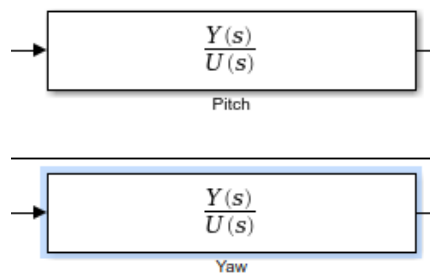


Figura 48. Bloques de Funciones de Transferencia para Pitch y Yaw. (Autor)

Transfer Fcn

The numerator coefficient can be a vector or matrix expression. The denominator coefficient must be a vector. The output width equals the number of rows in the numerator coefficient. You should specify the coefficients in descending order of powers of s.

Parameters

Numerator coefficients:

Denominator coefficients:

Absolute tolerance:

State Name: (e.g., 'position')

Buttons: ? OK Cancel Help Apply

Figura 49. Parámetros de Configuración Bloque Transfer Fcn. (Autor)

6.5 Guías de usuario, mantenimiento y prácticas de laboratorio

Guía de usuario

En la a guía de usuario se contempla todo lo que el usuario debe conocer para una primera aproximación a la planta, cabe aclarar que para hacer uso de la planta Helicóptero QUANSER 2 DOF de la Universidad se debe tener conocimiento previo en electrónica básica y si es posible contar con el acompañamiento de un profesor para operar la planta, ya que se corre riesgo eléctrico y mecánico con las partes móviles de planta.

En primera instancia se realiza una descripción al detalle de las conexiones, partes móviles, componentes electrónicos y módulos de potencia que posee el helicóptero QUANSER 2 DOF, para que el estudiante reconozca, conecte e interactúe con dicha planta en las prácticas siguientes, en la figura 50 se ven imágenes del manual, este se encuentra más al detalle en el anexo 1.



Figura 50. Imágenes guía de usuario (Autor).

Luego se describen los pasos necesarios para iniciar la comunicación entre el módulo de control y el PC, se le indica como configurar el puerto de comunicación del PC, una breve explicación del procedimiento para pedir acceso al laboratorio, recomendaciones para la verificación de la planta, y así el usuario pueda revisar si la planta se encuentra en condiciones de operar. También se explica el diagrama de conexión de la planta, como se observó anteriormente en la el documento, en la Figura 51 se observa las páginas que contienen esta información en el manual.

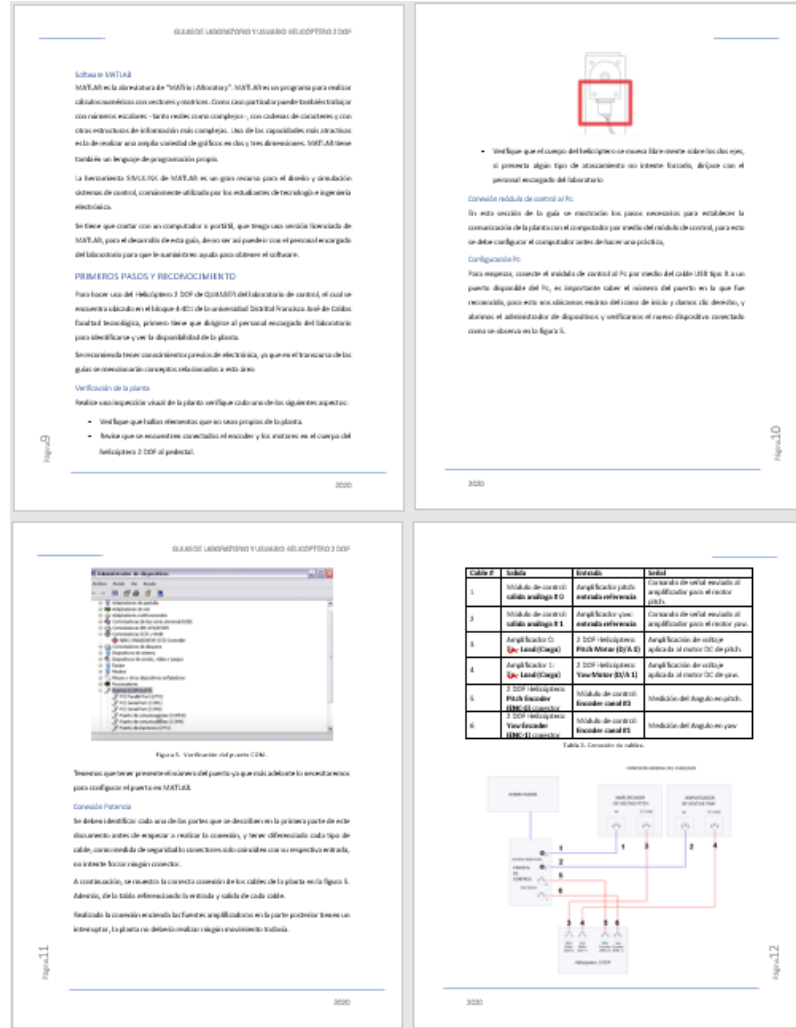


Figura 51. Pantallas LQR interfaz de usuario. (Autor)

Realizando los pasos mencionados anteriormente en la guía de usuario, quien vaya hacer uso de la planta ya tendrá una aproximación más cercana de cada uno de los elementos y de la configuración inicial de la misma, y de esta manera seguir con el desarrollo de las prácticas propuestas.

Guía de mantenimiento

La guía de mantenimiento es la encargada de establecer los pasos para que el estudiante pueda remover y quitar cada una de las partes de la planta y así realizarle limpieza verificar que su funcionamiento sea el adecuado, además de permitirle al estudiante verificar y asociarse con cada una de las partes que posee el helicóptero QUANSER 2 DOF.

Dentro de este manual se establecieron dos tipos de mantenimiento los cuales fueron un mantenimiento preventivo y un mantenimiento correctivo, además de los pasos necesario para realizar el desmonte la planta con el fin de realizar una limpieza profunda o reemplazo de algún elemento dañado.

El mantenimiento preventivo se realiza de manera periódica en lapsos de tiempo no tan lejanos (se recomienda cada seis meses máximo), con el fin de prevenir el surgimiento de averías en la planta, este constituye en la inspección visual, ajustes, análisis, lubricación, calibración, reparación, cambios de piezas, limpieza y verificación de los elementos de la Planta, dentro de este manual se dan las indicaciones para la limpieza y lubricación de los elementos que lo necesiten; también se solicita llenar una tabla de datos Mantenimiento para poder llevar un registro de los mismos.

Además, se establecen las advertencias necesarias para el desarrollo de este procedimiento algunas de estas se pueden observar en la figura 52.

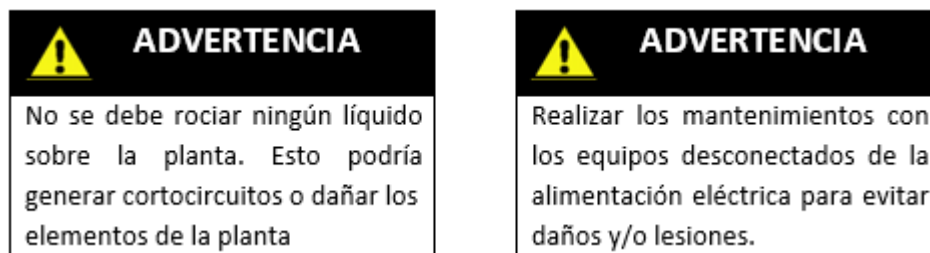


Figura 52. Advertencias mantenimiento. (Autor)

El mantenimiento correctivo es el que corrige los defectos observados en la planta, este mantenimiento es el más importante y consiste en localizar fallas o defectos para corregirlos o repararlos.

Se describen cada una de las posibles fallas de los elementos del helicóptero QUANSER 2 DOF, y del procedimiento básico que se debe seguir si se presenta alguna de estas, de igual manera que en el mantenimiento preventivo se establecieron advertencias de seguridad para no sufrir ningún accidente en la realización de este procedimiento.

Guías prácticas

Las guías de prácticas de laboratorio están diseñadas para afianzar los conocimientos vistos en clases por el estudiante, no obstante, se guía con un paso a paso de los cambios que se pueden realizar a los parámetros en la interfaz, y se culmina con unos laboratorios para que se realicen pruebas de funcionamiento con la misma.

Se escogieron las guías de prácticas pruebas de funcionamiento, ON-OFF, Proporcional (P), Proporcional – Integral (PI), Proporcional - Derivativo (PD) y Proporcional - Integral – Derivativo (PID) ya que son prácticas convencionales desarrolladas por un estudiante de Tecnología en electrónica e Ingeniería en Control, además de ser controladores clásicos, son en su mayoría controles utilizados en la industria para controlar diferentes tipos de procesos, y se realizan en ese orden para que el estudiante pueda observar el comportamiento de dichos controladores en un ambiente controlado, además también se propone una práctica con el controlador LQR, este último es un control óptimo y poco estudiado en clases.

Sin embargo, antes de realizar las pruebas en el helicóptero QUANSER 2 DOF, la interfaz de usuario (GUI) está dotada de un modo de simulación con el cual se puede realizar y probar cualquiera de los anteriores controladores, conociendo previamente y/o calculando anteriormente las funciones de transferencia que modelan el comportamiento de la planta.

La práctica pruebas de funcionamiento se escogió con el fin de que el estudiante pueda establecer la comunicación con la planta por medio de su computador o portátil, haciendo uso de la guía de usuario descrita anteriormente; en esta práctica se guía al estudiante para que inicie la interfaz de usuario desde MATLAB, las opciones que debe elegir para entrar en esta función y la configuración del puerto de comunicación, lo que se realiza es la verificación de los motores y los encoder, ya que por medio de la interfaz se puede observar la posición de los encoders y variar la velocidad de los motores.

La práctica con el controlador ON/OFF se diseñó con el fin de que el estudiante pueda relacionar las variables que se hallan para estabilizar la planta por medio de esté, y observe lo que sucede cuando se cambia el valor de la histéresis del controlador, de esta forma se analizan las gráficas obtenidas y de esta manera observar si por medio de este control se logra estabilizar la planta en el set point elegido.

La práctica con el controlador Proporcional (P), se diseñó con el fin de que el estudiante observe el comportamiento de una acción proporcional en el helicóptero QUANSER 2 DOF, en el desarrollo de la práctica por medio de la interfaz el estudiante debe ir variando la ganancia K_p para los dos ángulos, y de esta forma analizar la reacción de la planta al cambiar esta variable de control. La práctica con el controlador proporcional – integral (PI) se diseñó con el fin de que el estudiante observe el comportamiento de una acción proporcional - integral en el helicóptero QUANSER 2 DOF, variando las ganancias proporcional e integral y así poder determinar si solo con la combinación de estas dos acciones se logra estabilizar el sistema, que tan oscilatorio responde el

mismo a la variación de dichas acciones, su tiempo de estabilización, sobre impulso si tiene y concluir si es o no estable.

La práctica con el controlador proporcional – derivativo (PD) se diseñó con el fin de que el estudiante pueda observar el comportamiento de una acción proporcional – derivativo en el helicóptero QUANSER 2 DOF, variando las ganancias proporcional y derivativa y así poder determinar si solo con la combinación de estas dos acciones se logra estabilizar el sistema, que tan rápido responde el mismo a la variación de dichas acciones, su tiempo de estabilización, sobre impulso si tiene y concluir si es o no estable.

La práctica con el controlador proporcional – integral - derivativo (PID), se diseñó con el fin de que el estudiante pueda identificar el efecto de la combinación de estas tres, pasando anteriormente por las combinaciones proporcional (P), proporcional – derivativo (PD) y proporcional – integral (PI), se quiere interactuar con cada una de las variables de diseño del controlador, y que el estudiante pueda estabilizar el sistema de forma rápida y efectiva.

La práctica con el controlador LQR se diseñó con el fin de que el estudiante conozca los detalles necesarios para la implementación de un controlador LQR en el helicóptero QUANSER 2 DOF, por medio de la interfaz se establecen los parámetros para hallar la matriz de ganancias y así poder estabilizar el sistema, analizar la diferencia entre los controladores ON/OFF, PID y en este caso LQR, variando las matrices de diseño Q y R para cada ángulo.

En el ANEXO 1 se presenta la respectiva guía de usuario y mantenimiento, además de las Guías de prácticas a realizar para cada uno de los controladores.

7. Resultados

Solucionando los problemas que presentaba el helicóptero QUANSER 2 DOF se logró continuar con el estudio del comportamiento del sistema, establecer los modelos no lineales de la planta y calcular las variables de diseño de los controladores ON/OFF, PID y LQR, todo esto con el fin de ser implementados en la interfaz gráfica, para que el estudiante pueda hacer uso de dichos controladores, en un modo de simulación y de forma física. Con la realización del sistema de enseñanza práctico, las guías de usuario y mantenimiento, se logra apoyar al estudiante en el desarrollo y diseño de estos controladores en una plataforma didáctica.

Para hacer uso del sistema de enseñanza práctico se requiere que el estudiante tenga conocimientos básicos en estrategias de control y manejo de operaciones con matrices, ya que para el cálculo de la matriz de ganancia del controlador LQR esté emplea dichas operaciones, el controlador ON/OFF propuesto para ser implementado en la plataforma no logra estabilizar la planta en el ángulo deseado, dado que este control es muy limitado, sin embargo, los controladores PID y LQR, si logran estabilizar el sistema.

El sistema de enseñanza practico será de utilidad para los docentes del área de control, ya que por medio del sistema y haciendo uso de la guía de usuario y las prácticas de laboratorio propuestas, se puede trabajar con el helicóptero QUANSER 2 DOF.

8. Conclusiones

Para controlar el helicóptero QUANSER 2 DOF fue necesario manejarlo como dos subsistemas independientes, Se aplica la cinemática para definir el movimiento de la estructura sobre los ejes yaw y pitch, y se halla la función de transferencia de los subsistemas, con el fin de determinar las variables de control (en el caso de la estrategia PID) y la representación de estados del sistema (para calcular la matriz de ganancias en el caso de la estrategia LQR).

Cuando se diseña un controlador es importante un buen modelado de la planta la cual se va a controlar, puesto que si se tienen imprecisiones muy altas el sistema real puede hacerse inestable, a partir del modelo matemático encontrado, se realizó la reducción del modelo complejo (no lineal), encontrando así los modelos que representan la dinámica del sistema tanto para el ángulo Pitch como el de Yaw.

Las pruebas realizadas del controlador ON-OFF al Helicóptero QUANSER 2DOF aplicadas a la dinámica del ángulo de Yaw, demuestran que este control no posee las características necesarias para tener un buen desempeño, debido a que el sistema con dicho controlador oscila bruscamente lo que puede llegar a dañar los componentes de la planta, sin embargo, se observó que los controladores PID y LQR, si logran un buen desempeño, no presentan oscilaciones que afecten la planta.

La tarjeta de control desarrollada anteriormente por los estudiantes de Tecnología en Electrónica, funciona correctamente con la interfaz gráfica implementada; empleando una comunicación bidireccional efectiva con la herramienta SIMULINK, se logró realizar una lectura óptima de las mediciones de los encoders y envió de las señales a los amplificadores de voltaje de la planta, lo que fue útil para la implementación y puesta en marcha de los controladores ON/OFF, PID y LQR.

Como forma de validar el funcionamiento del sistema se realizaron pruebas con estudiantes en donde se puede observar las funcionalidades que tiene dicho sistema, posterior a esto se les realizó una encuesta para conocer su punto de vista con relación a la plataforma y futuras mejoras a la misma.

9. Referencias

- Bejarano Barreto, E. H. (2017). CONTROL ROBUSTO DE UN HELICÓPTERO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD PIVOTADO. Bogotá.
- cabrera estrada, j. c., & rosero bárcenas, f. a. (2015). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL DE POSICIÓN CON ACTUADORES ELECTROMECAÑICOS EN PLANTAS DIDÁCTICAS. SAN JUAN DE PASTO.
- castillo, A. F. (2005). CONTROL MULTIVARIABLE PARA UN HELICÓPTERO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS. Bogotá D.C.
- Cazzolato, B. (2006). Automatic Control II – 2DOF Helicopter Tutorial & Lab.
- Cypress. (2020). *PSoc 5*. Obtenido de <http://www.cypress.com>
- Gonzalez Uribe, C. D. (2016). COMPARACIÓN DE UN CONTROLADOR LQR VS UN CONTROLADOR PID IMPLEMENTADOS EN UN HELICÓPTERO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD PIVOTADO. Bogotá D.C.
- Hernandez, R. (2010). *Introduccion a los sistemas de control. Conceptos, aplicación y simulación con MATLAB*. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Higuera Martínez, O. I. (2015). CONTROLADOR ROBUSTO LMI PARA UN HELICÓPTERO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD.
- López, J. R., Camargo, C., & César, A. P. (2016). INTRODUCCIÓN AL PSoC5LP. Bogotá D.C, Colombia.
- Márquez David A, C. O. (2014). INSTRUMENTO DIDÁCTICO DE AUTO ENSEÑANZA BASADO EN TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN APLICADO AL ÁREA DE AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS. CASO DE ESTUDIO: CONTROLADORES PID. Merida.
- Ogata, K. (2010). *INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA*. Madrid (España): PEARSON EDUCACIÓN, S.A.,.
- Patel, R., Deb, D., Modi, H., & Shah, S. (2017). Adaptive Backstepping Control Scheme with Integral Action for Quanser 2-DOF Helicopter. *Adaptive Backstepping Control Scheme with Integral Action for Quanser 2-DOF Helicopter*, (págs. 571-577).
- QUANSER, L. (2020). *QUANSER*. Obtenido de <https://www.quanser.com/>
- Solaque Guzmán, L., & Cristancho Cardozo, C. A. (2014). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA EXPERIMENTAL DE DOS GRADOS DE LIBERTAD CONTROLADA POR DOS TÉCNICAS: PID Y LÓGICA DIFUSA. Bogotá.
- Tatiana, L. G. (2016). Diseño e implementación de un control óptimo LQR con la tarjeta Raspberry Pi. Bogotá D.C.
- Teherán, F. A. (2014). IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL CON RESTRICCIONES PARA EL HELICÓPTERO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD DE QUANSER®. Bogotá D:D.
- Yarokxy Arjadis Lázaro Mejía, F. A. (2016). DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UNA INTERFAZ DE CONTROL PARA EL HELICOPTERO QUANSER 2 DOF. Bogotá D.C.

10.Anexos

Anexo # 1

Guía de usuario, mantenimiento y prácticas de laboratorio.