



**Construcción de prácticas de laboratorio bajo la iniciativa CDIO a partir de la implementación de las técnicas de control PID y LQR en un MiniDrone Parrot Rolling Spider para la Universidad Antonio Nariño.**

**Paula Andrea Cardozo Cardozo  
Juan Sebastián Conde Cárdenas**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Neiva, Colombia  
2020

# **Construcción de prácticas de laboratorio bajo la iniciativa CDIO a partir de la implementación de las técnicas de control PID y LQR en un MiniDrone Parrot Rolling Spider para la Universidad Antonio Nariño.**

**Paula Andrea Cardozo Cardozo  
Juan Sebastián Conde Cárdenas**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Electrónico**

Director:

Ing. Christian Erazo Ordoñez, PhD.

Línea de Investigación:

Sistemas Dinámicos y Control

Grupo de Investigación en Bioinstrumentación y Control - GIBIO

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Neiva, Colombia

2020

*Este trabajo de grado va dedicado principalmente a Dios por darme la posibilidad de culminar mi pregrado con éxito. A mis padres Silvio y Darcy quienes me han brindado su amor, paciencia y esfuerzo. A mi hermana Marcela por siempre estar conmigo y apoyarme en todo momento. A mis sobrinos Juan Sebastián y José Gabriel por ser mi mayor motivación, convirtiéndome en su ejemplo a seguir. A Jhon S., quién me dio la mano y me llenó de ánimos en los momentos más difíciles. Finalmente, a mis profesores, amigos y compañeros que hicieron parte de este proceso académico.*

*Paula Andrea Cardozo Cardozo.*

*Principalmente a Dios, por concederme llegar a este momento y permitirme terminar satisfactoriamente este trabajo de grado, por todos los triunfos y también momentos difíciles que me enseñaron a ser un mejor profesional.*

*A mis padres, por acompañarme durante todo mi proceso estudiantil, porque con sus consejos han sabido guiarme para culminar mi carrera como ingeniero electrónico.*

*A mis hermanos, abuela, tíos, mi mujer, mi hijo y demás familiares porque han velado por mí durante este arduo camino para convertirme en un profesional.*

*Juan Sebastián Conde Cárdenas.*

## **Agradecimientos**

Agradecemos infinitamente a Dios por brindarnos la fuerza, valor y sabiduría para superar cada dificultad presentada a lo largo de esta etapa de nuestras vidas.

A nuestras familias por la confianza, apoyo incondicional que siempre nos han brindado, por enseñarnos a no desfallecer y siempre preservar la esperanza a través de cada sabio consejo y palabras de aliento junto a sus demostraciones de fe y amor.

A las ingenieras Andrea Milena Marín y Yeimi Muñoz Calderón, por estar con nosotros desde el primer hasta el último día de nuestra formación académica y profesional. A los ingenieros Kelyn Rosely Botina y Christian Camilo Erazo, por su tiempo y apoyo, además por sabiduría transmitida durante el desarrollo de este proyecto.

A nuestros compañeros de clases por la compañía brindada durante este arduo camino universitario y compartir con nosotros alegrías y fracasos.

## Resumen

En este trabajo se desarrollan dos guías de laboratorio enfocadas en estrategias de control como el Proporcional Integral Derivativo (PID) y el Regulador Cuadrático Lineal (conocido en sus siglas en inglés como LQR), con la finalidad de que el estudiante de la Universidad Antonio Nariño junto con el docente designado para los cursos de teoría de control y control II; domine los conceptos asociados a los controladores anteriormente mencionados aplicándolos a la variable de altura de un Drone específicamente en el MiniDrone Parrot Rolling Spider, con las distintas técnicas que conllevan estos controles.

Adicionalmente, se desarrollan los dos sistemas de control anteriormente mencionados y se presentan de forma simulada, con el fin de dar solución a cada práctica de laboratorio de manera independiente, de forma tal que el estudiante disponga de herramientas para consolidar los conocimientos en el área y que puedan ser de utilidad para su ejercicio laboral. Dichas simulaciones fueron realizadas en el software Matlab, específicamente en el programa de Simulink, ya que existen distintos Toolbox como el Simulink Support Package for Parrot Minidrones, el cual, mediante una programación de bloques facilita el entendimiento y realización del mismo. Cabe destacar que las prácticas de laboratorio se establecen bajo una modalidad de aprendizaje basada en la metodología CDIO, de forma que constituyan una experiencia de diseño e implementación.

Finalmente se presentan las respuestas a una encuesta realizada mediante la herramienta Google Forms, dirigida a estudiantes, docentes y egresados del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Antonio Nariño con conocimiento en el área de control, con el objetivo de evaluar los documentos en términos de dominio de las temáticas, conocimiento de la metodología CDIO, objetivo de cada guía, redacción, coherencia y aporte al desarrollo académico.

**Palabras clave: Sistemas, Controladores, MiniDrone, PID, LQR.**

## Abstract

In this work, two laboratory guides are developed focused on control strategies such as the Proportional Integral Derivative (PID) and the Quadratic Linear Regulator (known in its acronym in English as LQR), so that the student of the Antonio Nariño University together with the designated teacher for the control and control theory II courses; Master the concepts associated with the aforementioned controllers by applying them to the height variable of a Drone specifically in the MiniDrone Parrot Rolling Spider, with the different techniques involved in these controls.

Additionally, the two aforementioned control systems are developed and presented in a simulated way, to provide solutions to each laboratory practice independently, so that the student has tools to consolidate knowledge in the area and that may be useful for your work. Said simulations were carried out in Matlab software, specifically in the Simulink program, since there are different Toolboxes such as the Simulink Support Package for Parrot Minidrones, which, employing block programming, facilitates their understanding and realization. It should be noted that laboratory practices are established under a learning modality based on the CDIO methodology, so that they constitute a design and implementation experience.

Finally, the responses to a survey carried out using the Google Forms tool, aimed at students, teachers and graduates of the Electronic Engineering program of the Antonio Nariño University with knowledge in the control area, are presented to evaluate the documents in terms of mastery of the topics, knowledge of the CDIO methodology, objective of each guide, writing, coherence and contribution to academic development.

**Keywords: Systems, Drivers, MiniDrone, PID, LQR.**

# Contenido

	Pág.
Resumen .....	VI
Lista de figuras.....	X
Lista de tablas .....	XII
Lista de abreviaturas.....	XIII
<b>1. Capítulo: Introducción .....</b>	<b>14</b>
1.1 Estado del arte.....	17
1.2 Objetivos .....	19
1.2.1 Objetivo general .....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Metodología .....	20
<b>2. Capítulo: Marco teórico .....</b>	<b>23</b>
2.1 Iniciativa de Concebir, Diseñar, Implementar y Operar .....	23
2.2 Control Proporcional Integral Derivativo .....	24
2.3 Controlador Cuadrático Lineal.....	27
<b>3. Capítulo: Práctica de controladores de vuelo 1: Control PID de altitud para el MiniDrone Parrot Rolling Spider .....</b>	<b>30</b>
3.2 Diseño del controlador PID de Altura .....	32
3.3 Evaluar los efectos del controlador PID Vs. PID de Altura .....	35
3.4 Prevalidación del controlador PID de Altura .....	37
<b>4. Capítulo: Práctica de controladores de vuelo 2: Control Cuadrático Lineal de altitud para el MiniDrone Parrot Rolling Spider .....</b>	<b>39</b>
4.1 Diseño del controlador LQR de Altura.....	39
4.2 Implementación del controlador LQR de Altura .....	43
4.3 Prevalidación del controlador LQR de Altura.....	44
<b>5. Capítulo: Guías de laboratorio propuestas .....</b>	<b>46</b>
5.1 Diseño de las guías de laboratorio propuestas .....	46
5.2 Validación de las guías de laboratorio propuestas .....	48
5.2.1 Análisis de las respuestas .....	52
<b>6. Capítulo: Conclusiones .....</b>	<b>53</b>
<b>A. Anexo: Aeronavegabilidad y Operaciones para RPAS (Numeral 4.25.8.2) ....</b>	<b>56</b>

---

<b>B. Anexo: Recomendaciones, generalidades y características físicas del MiniDrone Parrot Rolling Spider .....</b>	<b>58</b>
<b>C. Anexo: Modelo matemático del cuadricóptero .....</b>	<b>61</b>
<b>D. Guía de conexión entre el MiniDrone Parrot Rolling Spider con el sistema operativo de Windows y el software Matlab .....</b>	<b>66</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>79</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 2-1.</b>	Diagrama de bloques del Control PID ..... <b>25</b>
<b>Figura 2-2.</b>	Curva de la respuesta en forma de S ..... <b>26</b>
<b>Figura 2-3.</b>	Diagrama de bloques del controlador LQR..... <b>28</b>
<b>Figura 3-1.</b>	Diagrama de bloques en Simlink del controlador de vuelo del MiniDrone Parrot Rolling Spider ..... <b>30</b>
<b>Figura 3-2.</b>	Aplicación del método de Ziegler y Nichols para la sintonización del controlador PID de altura del MiniDrone Parrot Rolling Spider ..... <b>32</b>
<b>Figura 3-3.</b>	Diagrama de boques simplificado para realizar la sintonización del controlador PID de altura del MiniDrone..... <b>33</b>
<b>Figura 3-4.</b>	Curva de aplicación del método de Ziegler y Nichols para la sintonización del controlador PID de altura del MiniDrone Parrot Rolling Spider ..... <b>34</b>
<b>Figura 3-5.</b>	Diagrama de bloques simplificado para realizar la sintonización con el autotuning con el bloque <i>Discrete PID Controler</i> del controlador PID de altura del MiniDrone ..... <b>34</b>
<b>Figura 3-6.</b>	Gráfica de comparación entre la respuesta sintonizada y la respuesta en el bloque ..... <b>35</b>
<b>Figura 3-7.</b>	Implementación del controlador PD de altura del MiniDrone ..... <b>36</b>
<b>Figura 3-8.</b>	Prevalidación de control de altura completo del MiniDrone Rolling Spider <b>37</b>
<b>Figura 3-7.</b>	Prevalidación de control de altura en el entorno de Matlab del MiniDrone Parrot Rolling Spider ..... <b>38</b>
<b>Figura 4-1.</b>	Diagrama de bloques en Simulink del controlador LQR de vuelo para el MiniDrone Parrot Rolling Spider ..... <b>40</b>
<b>Figura 4-2.</b>	Parte del código LQRControl.m..... <b>40</b>
<b>Figura 4-3.</b>	Parte del código mdl_quadrotor.m..... <b>41</b>
<b>Figura 4-4.</b>	Diagrama de bloques de la matriz K..... <b>44</b>
<b>Figura 4-5.</b>	Prevalidación del control LQR de altura del MiniDrone Parrot Rolling Spider..... <b>45</b>
<b>Figura 4-6.</b>	Validación del control LQR de altura completo en el entorno de Matlab del MiniDrone Parrot Rolling Spider ..... <b>48</b>
<b>Figura 5-1.</b>	Respuesta en porcentaje sobre el dominio de la temática asociada al controlador PID ..... <b>49</b>
<b>Figura 5-2.</b>	Respuesta en porcentaje sobre el dominio de la temática asociada al controlador LQR..... <b>50</b>
<b>Figura 5-3.</b>	Respuesta en porcentaje asociado al conocimiento de la iniciativa CDIO. <b>50</b>
<b>Figura 5-4.</b>	Respuesta en porcentaje acerca de la claridad y coherencia del contenido de las guías de laboratorio ..... <b>50</b>
<b>Figura 5-5.</b>	Respuesta en porcentaje sobre la consideración de las guías de laboratorio como una experiencia de diseño e implementación ..... <b>51</b>

---

<b>Figura 5-6.</b>	Respuesta en porcentaje acerca de la organización del documento favoreciendo el desarrollo del mismo .....	<b>51</b>
<b>Figura 5-7.</b>	Respuesta en porcentaje acerca de la consideración de los Syllabus asociados a los cursos de Electiva I, Control I y Control II sobre abarcar las temáticas aplicadas en las guías.....	<b>52</b>
<b>Figura 5-8.</b>	Respuesta en porcentaje referente a los objetivos planteados en la guía de control PID, su congruencia con la práctica y aporte al desarrollo académico del estudiante .....	<b>52</b>
<b>Figura 5-9.</b>	Respuesta en porcentaje referente a los objetivos planteados en la guía de control LQR, su congruencia con la práctica y aporte al desarrollo académico del estudiante .....	<b>53</b>
<b>Figura 5-10.</b>	Respuestas obtenidas referente a las observaciones o comentarios adicionales por parte de los estudiantes .....	<b>53</b>

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 2-1.</b> Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta .....	27
<b>Tabla 4-1.</b> Valores máximos para la regla de Bryson .....	41
<b>Tabla 4-2.</b> Pesos de los estados en LQR óptimo .....	42

## Lista de abreviaturas

A continuación, se presentan las abreviaturas más utilizadas en el presente documento.

### Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
UAV	Vehículo aéreo no tripulado.
VANT	Vehículo aéreo no tripulado.
RPAS	Sistema de aeronave pilotada remotamente.
LQR	Regulador cuadrático lineal.
PID	Control Proporcional Integral Derivativo.

# 1. Capítulo: Introducción.

Históricamente la ingeniería y la tecnología han cooperado en el desarrollo socio-económico y ambiental de la sociedad contemporánea. Hoy, es común encontrar diversos sistemas de control moderno operativos no solo en la industria, sino también en equipos y dispositivos que las personas emplean en su cotidianidad para mejorar su calidad de vida, por comodidad o entretenimiento. (Morales-menendez, 2014) Entre las últimas tecnologías que recientemente se han incorporado en la industria y la sociedad se destacan los vehículos aéreos no tripulados, siendo los drones, los que mayor visibilidad han alcanzado debido a que su versatilidad y ligereza les permite ser empleados en múltiples campos de la actividad humana desde la agricultura, arqueología, atención en desastres naturales, vigilancia, entre otros (Evora Jiménez, 2016)

Un Drone o vehículo aéreo no tripulado (VANT), y también conocido como UAV (del inglés, Remotely Piloted Aircraft System), es una aeronave capaz de despegar, volar y aterrizar automáticamente. En general se agrupan en dos categorías: los controlados desde una ubicación remota y los que operan de forma autónoma siguiendo planes de vuelo preprogramados. En estos vehículos se pueden implementar diversos tipos controladores, desde el clásico el PID hasta controles sintonizados por medio de técnicas de optimización como LQR, LQG, entre otros. El controlador se encarga de manipular la propulsión de los motores para garantizar que el vuelo sea autónomo, sostenido y regulado a lo largo de todo el trayecto (Huera Paredes & Vinicio, 2017).

Dentro de las variables involucradas en el control de vuelo, la altitud es una de las más importantes porque es la que determina la posición de vuelo, por lo que sin el control adecuado, una vez se alcanza la altura deseada el suministro de energía de los motores se interrumpe y el Drone se precipita al suelo (Azari et al., 2018). Al respecto del control de vuelo (altitud) de drones, la literatura reporta la aplicación de diferentes estrategias, desde las de control clásico PID y sus derivados, hasta técnicas avanzadas de control óptimo y

multivariable (Gómez, Christian David ; Mora, 2018) (Nelson Gatica et al., 2017)(Silveira et al., n.d.)(Hua et al., 2009). En particular, las referencias consultadas muestran que el control PID y sus variaciones se usan ampliamente por su bajo costo, alta funcionalidad y buena estabilidad, sin embargo, su desempeño puede disminuir cuando el proceso a controlar es un sistema MIMO, es decir, involucra múltiples variables de entrada y de salida, como en el caso de los drones (Pinto Bermúdez et al., 2010). Como alternativa para el control de sistemas MIMO se emplean técnicas de control óptimo o multivariable, las cuales mejoran el desempeño del controlador. Entre estas técnicas para el control de vuelo en drones se destacan: la realimentación de variables de estados (RVE), el regulador cuadrático lineal (LQR) y el controlador lineal cuadrático gaussiano (LQG). En las tres estrategias es posible trabajar con todas las variables involucradas, operando matemáticamente las variables controlada y manipulada (*Capítulo 7 Control Multivariable Capítulo 7 Control Multivariable 7.1-Introducción*, n.d.).

La diversidad de conceptos y teorías que se aplican en un Drone y su amplia adopción en diferentes industrias y actividades han constituido a estos vehículos como un campo de estudio amplio y desafiante, por lo que diferentes comunidades educativas alrededor del mundo destinan espacios y recursos para entender su funcionamiento, realizar múltiples desarrollos y proponer aplicaciones que permitan maximizar su funcionalidad. En particular, las instituciones educativas que cuentan con programas de formación en el área de la electrónica han realizado variados estudios de las técnicas de control para el vuelo de este tipo de aeronaves. A continuación, se relacionan algunos de los trabajos más destacados:

En (Estrada Velasco & Palmay Paredes, 2016) se evaluaron las técnicas de control óptimo LQR y LQG para regular la estabilidad de vuelo de un vehículo no tripulado, comparando sus resultados con los obtenidos tras la aplicación de un control clásico PID, tomando como conclusión que las perturbaciones y factores externos afectan significativamente la estabilidad del Drone, ya que optó por el uso de controladores lineales aplicados a modelos no lineales.

Otro trabajo destacado es el de (Karaman & Riether, 2016) quienes presentan una serie de guías, trabajos y proyectos de laboratorios sobre técnicas de control, que contienen un paso a paso del diseño y simulación de algoritmos para el Drone Parrot Rolling Spider que posee tecnología compatible con los scripts que se generan en Matlab; las actividades propuestas

permiten adquirir gráficamente la orientación del vuelo trazado, los comandos del motor y las posiciones de vuelo simulado, para desarrollar un sistema de vuelo controlado mediante varias etapas.

En la misma línea de los trabajos citados, en el programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Antonio Nariño se desarrolló un helicóptero pivotado con dos grados de libertad (Gómez, Christian David ; Mora, 2018) en el que se implementa un control PID, compuesto de tres elementos que produce una acción Proporcional, Integral y Derivativa, este proyecto tiene como enfoque ofrecer una herramienta de bajo costo para el desarrollo educativo de la comunidad universitaria. Sin embargo, la cantidad de equipos disponibles para prácticas de laboratorio asociadas a control PID y control avanzado u óptimo, es limitada, específicamente, se cuenta con plantas que emulan procesos industriales, sistemas físicos como el péndulo y el balancín, robots manipuladores y robots móviles. Además, a excepción del proyecto ya citado, la mayoría de proyectos e investigaciones que se han desarrollado en el marco de los Trabajos Integrales de Grado se han enfocado en la implementación de controladores PID para procesos que involucran sólo una variable, siendo en la mayoría de aplicaciones, la temperatura, la variable controlada (Gómez, Christian David ; Mora, 2018) (Quintero, C. A, y Vargas, D. M, 2019; Ipuz, N. y Espinoza, D. A, 2019).

Es de destacar que la Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica (FIMEB) de la UAN ha adoptado como iniciativa de aprendizaje el estándar CDIO, registrada como; concebir, diseñar, implementar y operar (en inglés, Conceive Design Implement Operate) la cual es una estrategia de enseñanza en ingeniería. La iniciativa CDIO sugiere entre cosas la oferta de experiencias de diseño e implementación que permitan a los ingenieros en formación conocer las habilidades y actitudes personales para afrontar cualquier problema en la industria (Restrepo & Lopera, n.d.).

En este contexto, el presente proyecto propone la construcción de dos guías de laboratorio bajo la iniciativa CDIO para el programa de ingeniería electrónica a partir de la implementación de las técnicas de control PID y LQR, tomando en cuenta la variable de altitud en un MiniDrone Parrot Rolling Spider, esperando reforzar los conceptos teóricos y prácticos a la vez que se desarrollan habilidades en cuanto a la filosofía del programa,

implementación y diseño y métodos de aprendizaje con el fin de reforzar la evaluación mediante un plan de estudio en alumnos del programa.

## 1.1 Estado del arte

En esta sección se presentan trabajos desarrollados recientemente y que se destacan en el área del control de altura o vuelo de drones. Se presenta una breve descripción de los objetivos y de los resultados reportados por los autores en los documentos consultados.

El control óptimo presentado en (Erat et al., 2018) afronta un desafío con la implementación de las técnicas de LQR y PID en vehículos no tripulados frente a visión exocéntrica, que busca que un dron pueda ser coordinado mientras el usuario lo observa directamente, aumentando el potencial de la visión humana mediante la tele operación precisa de estos dispositivos, estas técnicas fueron evaluadas en una institución de educación superior ecuatoriana, el cual realiza la estabilidad de vuelo en áreas peligrosas o intransitables para los seres humanos pero que de tal forma sea segura desde un punto de vista distante, determinando cuál técnica proporciona una mayor estabilidad y movimientos de trayectoria-velocidad en el dron mientras el usuario lo dirige. Esta evaluación se realizó por medio del registro cinemático creando comandos que tienen como referencia las partes del cuerpo, como la cabeza, manos, brazos, etc. logrando que el Drone adquiriera capacidad de imitar los movimientos creando una correcta operación.

En (Miehlbradt et al., 2018) con el objetivo de expandir el campo de la tele operación e implementar metodologías para identificar patrones cuerpo-máquina, abordó el estudio de sensores microelectromecánicos (MEMS), como el acelerómetro giroscopio y geo posicionamiento alcanzando el procesamiento de señales de inclinación, evitando alguna falla o posible siniestro al momento de operar el Drone. Este trabajo tuvo dos experimentos, uno con 17 personas que se les indicó que movimientos auto-seleccionados correspondientes al dron hicieran en su tronco superior y otro, con 44 personas diferentes a la del experimento 1, que dirigieron un dron virtual usando el torso. Aunque no se registran cifras del experimento, esto fueron aprobados por el comité ético para la Investigación del Comportamiento Humano de la École Polytechnique Fédérale de Lausanne Brain Mind Institute.

Por otro lado, en la Universidad Antonio Nariño se destaca el trabajo desarrollado por (Gómez, Christian David ; Mora, 2018) quienes diseñaron e implementaron un helicóptero de dos grados de libertad o más conocido como pivotado, con control PID, utilizando un control moderno de bajo costo con el comportamiento simplificado de un helicóptero; este trabajo tuvo como finalidad fines educativos para los estudiantes de la facultad de ingeniería electrónica, mejorando las competencias de los mismos.

Las gráficas de orientación de vuelo trazado, los comandos del motor y las posiciones de vuelo simulado, son esenciales para todo vehículo aéreo no tripulado. El trabajo del Instituto Tecnológico de Massachusetts, o mejor conocido en sus siglas en inglés como MIT, realizado en (Karaman & Riether, 2016) utilizó el Drone Parrot Rolling Spider vinculado a Simulink de Matlab, controlando el sistema de vuelo y otras etapas, como; las frases utilizadas (Sensor Calibration, Take-off, Actual Flight), las cuales permiten monitorear el estado en el que se encuentre el Drone; el procedimiento de seguridad y seguridad de software, encargados de evitar posibles accidentes e inconvenientes del Drone como con el usuario y su entorno. Por último, la etapa de configuración de algunos protocolos de controles específicos de conectividad y controles del vuelo, que corresponden a algunas letras del teclado QWERTY.

En cuanto a la iniciativa CDIO, existen distintas referencias en el ámbito de la ingeniería. Por ejemplo, en (Rozo Nader, n.d.), el programa de ingeniería de software creó como proyecto adaptar la iniciativa CDIO donde los conceptos asociados se aplican a un laboratorio enfocado en el área empresarial, teniendo como objetivo mejorar la calidad de profesionales, fortaleciendo los conocimientos y brindando una mayor experiencia en ámbitos laborales; contando con el apoyo de los demás pregrados existentes y profesionales en el tema. Se utilizó una metodología donde en primer lugar se divide el contenido programático central del pregrado anteriormente mencionado en cuatro asignaturas denominadas Ingeniería del software I, Ingeniería del software II, Ingeniería del software III e Ingeniería del software IV, después, se reagruparon estas asignaturas según su enfoque en términos de CDIO, es decir, el primer curso hace referencia a las etapas de concebir y diseñar, el segundo representa una etapa de implementación y los dos últimos corresponden a la operación. En estos últimos dos cursos, se enfocan en el trabajo con una

plataforma piloto con todo lo trabajado durante las demás asignaturas. En este software implementado el estudiante debe comprobar su alcance y el aporte al desarrollo académico, así como distintas pruebas (funcionalidad, rendimiento, seguridad, resistencia, recuperación de datos).

Por otro lado, se encuentra en (Gallagher & Goodwine, n.d.) el control de un péndulo invertido orientado para estudiante, el cual consiste en diseñar e implementar un controlador de retroalimentación digital en un sistema Físico real (péndulo) con el fin de estabilizarlo en condiciones invertidas. Para lograr esto, el estudiante debe aplicar la iniciativa CDIO, teniendo la capacidad de identificar los diferentes tipos de sistemas y conocimientos previos en microcontroladores, ya que para cumplir con el objetivo se debe diseñar el controlador, para así mismo descargarlo e implementarlo y seguido de esto ejecutarlo para comprobar sistemáticamente el funcionamiento u operación de este; poniendo en práctica los conocimientos adquiridos en los cursos de control I y programación. En base a lo anterior se puede concluir que cumpliendo secuencialmente la iniciativa CDIO aplicando una metodología basada en una matriz de realización con tres elementos los cuales son el cultivo de objetivos, enfoques de implementación y efectos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1.1 Objetivo general**

Construir dos prácticas de laboratorio bajo la iniciativa CDIO para el programa de ingeniería electrónica a partir de la implementación de las técnicas de control PID y LQR en un MiniDrone Parrot Rolling Spider.

### **1.2.1.2 Objetivos específicos**

- Establecer los objetivos y alcances para cada práctica de forma que constituyan una experiencia de diseño e implementación.
- Desarrollar controladores funcionales mediante las técnicas PID y LQR para el MiniDrone Parrot Rolling Spider.
- Diseñar las guías de laboratorio bajo los lineamientos de la iniciativa CDIO.
- Verificar la calidad de las guías en términos de: claridad, coherencia, y veracidad.

## 1.3 Metodología

Este trabajo que lleva por título “Construcción de prácticas de laboratorio bajo la iniciativa CDIO a partir de la implementación de las técnicas de control PID y LQR en un MiniDrone Parrot Rolling Spider para la Universidad Antonio Nariño”, hace referencia a la realización de un proyecto enfocado a los estudiantes pertenecientes a la Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica de la Universidad Antonio Nariño con el fin de afianzar conocimientos en el área de control, empleando un MiniDrone Parrot Rolling Spider vinculado al software Matlab.

En esta sección se el tipo de metodología formulada, la cual se divide en las siguientes fases:

- Fase preliminar.
- Fase 1: Delimitación de objetivos y alcance de las prácticas de laboratorio.
- Fase 2: Diseño de controladores.
- Fase 3: Diseño de guías de laboratorio bajo la iniciativa CDIO.
- Fase 4: Verificación de la calidad de las guías en términos de: claridad, coherencia, y veracidad.
- Fase final.

Cada fase tiene subdivisiones las cuales aseguran un trabajo eficiente, por lo tanto, se explica lo que contiene cada una a continuación:

- **Fase preliminar:** En esta fase se realiza una documentación exhaustiva sobre las tecnologías, desarrollos, técnicas y métodos actuales involucrados en el proyecto propuesto, contemplando actividad como:
  - Formulación y planteamiento del problema.
  - Revisión bibliográfica y documental.
- **Fase 1: Delimitación de objetivos y alcance de las prácticas de laboratorio:** Con base en la fase preliminar, se define el modelo de Drone a utilizar, el software correspondiente para el modelado de los controladores, escenarios de simulación y pruebas de los mismos; por lo tanto, se propone la realización de dos guías de

laboratorio, una enfocada en control PID y otra en control LQR, así como los alcances y variable a controlar en cada una. Cabe resaltar que se establece como metodología de las guías de laboratorio la iniciativa CDIO, para ser desarrolladas bajo un enfoque de aprendizaje, de tal manera que constituyan una experiencia de diseño e implementación.

- **Fase 2: Diseño de controladores:** Se establece un diseño individual para cada uno de los controladores. Esta fase además involucra la simulación y validación de los esquemas desarrollados con señales de referencia y condiciones controladas, especificando aspectos como:
  - Para el control LQR, se tendrá en cuenta el desarrollo del modelo lineal, los ajustes de Q y R, encontrar el conjunto de ganancia óptimo, y simular la respuesta.
  - En cuanto al control PID, hallar las acciones de control proporcional ( $K_p$ ), integral ( $K_i$ ) y derivativo ( $K_d$ ).
  - Determinación de las características de desempeño en términos de error y estabilidad de cada uno de los controles implementados a partir de las simulaciones.
  - Implementación de cada una de las técnicas de forma no simultánea en el MiniDrone para verificar su desempeño.
  - Evaluación experimental donde se estima las características de desempeño del sistema global (error). Una parte fundamental para el control PID y LQR.
  - Uso la información recopilada en los entrenamientos de cada control para la realización del correspondiente análisis cualitativo y cuantitativo de los datos, identificando los aspectos más relevantes para el estudio propuesto; además se contrastan los resultados experimentales con los modelos teóricos obtenidos en fases anteriores.

Con respecto a lo anterior, cada controlador se subdivide de la siguiente manera, agrupando las actividades descritas anteriormente:

- Control PID de altitud del MiniDrone Parrot Rolling Spider.
  - Síntesis del controlador
  - Validación numérica
  - Implementación

- Evaluación experimental.
  - Control LQR de altitud del MiniDrone Parrot Rolling Spider.
    - Síntesis del controlador
    - Validación numérica
    - Implementación
    - Evaluación experimental.
- **Fase 3: Diseño de guías de laboratorio bajo la iniciativa CDIO:** Tiene como actividad principal la aplicación de la iniciativa CDIO para la construcción de las guías de laboratorio, donde se estipulan los parámetros a tener en cuenta para la correcta redacción de cada una de ellas según los criterios de evaluación de acuerdo a los niveles cognitivos, los cuales son: conocimiento (listar, describir, definir), comprensión (explicar, defender, interpretar), aplicación (preparar, producir, mostrar), análisis (diferenciar, clasificar, inferir), síntesis (hipotetizar, diseñar, planear) y evaluación (juzgar, criticar, opinar y sumarizar).
- **Fase 4: Verificación de la calidad de las guías en términos de: claridad, coherencia, y veracidad:** Esta fase tiene como finalidad crear una encuesta dirigida a estudiantes y egresados del pregrado de ingeniería electrónica de la Universidad Antonio Nariño seccional Neiva, así como docentes pertenecientes a la institución de educación superior que tengan conocimiento sobre los cursos de Electiva I, Control I y Control II, los cuales se encargan de dar su percepción sobre las guías implementadas y evaluarlas en términos de claridad, coherencia y veracidad. Dicha encuesta cuenta con preguntas acerca del dominio de las temáticas de ambos controladores, así como el conocimiento acerca de la metodología CDIO. Por otro lado, respecto al documento se interroga a los encuestados sobre el contenido de las guías, su organización, contenido y aporte al desarrollo académico.
- **Fase final:** Esta fase contempla actividades como la redacción del documento formal del trabajo integral de grado, así como la difusión de resultados con los miembros del Comité de Trabajos Integrales de Grado COTIGE y personas interesadas en el tema, siguiendo los lineamientos establecidos.

## 2. Capítulo: Marco teórico.

En este capítulo se describe el marco teórico, donde se exponen los conceptos, teorías y leyes involucrados en el desarrollo del presente trabajo.

### 2.1 Iniciativa de Concebir, Diseñar, Implementar y Operar.

La iniciativa internacional CDIO de la abreviatura Concebir, diseñar, implementar y operar, es un sistema de implementación e idea educativa para la formación en ingeniería. (Wang et al., 2018). El principal objetivo de la aplicación de CDIO es la formación de ingenieros capacitados en desarrollar soluciones a los problemas del mundo real e innovar proponiendo nuevos productos y sistemas (Minin et al., 2015).

El aprendizaje CDIO propone 12 estándares ejecutivos operables como iniciativa de enseñanza a través de un plan de estudio y conjunto de buenas prácticas, basados en resultados de aprendizaje activo que promueven el desarrollo de habilidades por medio de trabajo en equipo, la comunicación y el pensamiento crítico. (Muhammad et al., 2018). Los estándares se agrupan actualmente en seis líneas:

- Filosofía del programa (Estándar 1)
- Desarrollo de los planes de estudio (Estándar 2,3 y 4)
- Espacio de trabajo para el diseño e implementación (Estándar 5 y 6)
- Métodos de enseñanza y aprendizaje (Estándar 7 y 8)
- Desarrollo del profesorado (Estándar 9 y 10)
- Evaluación y mejora continua (Estándar 11 y 12)

La autoevaluación de la rúbrica o guía de aprendizaje, se basa en el cumplimiento de cada uno de los estándares, con una escala de calificación de seis puntos, evaluados a partir de las evidencias que registra cada programa de educación. (*ESTÁNDARES CDIO v. 2.0 (con rúbricas personalizadas)*, 2010)

De acuerdo con el estándar 5 es necesario que en los programas se implementan experiencias de diseño e implementación que permitan promover el éxito temprano en la práctica de la ingeniería, para que los estudiantes desarrollen habilidades en la construcción de nuevos sistemas de innovación por medio de la de aplicación de las ciencias propias de la ingeniería.(Restrepo & Lopera, n.d.) Las experiencias de diseño e implementación se dividen o caracterizan por el grado de complejidad de desarrollo.

Los programas en los que se implementa esta metodología deben implementar al menos una evaluación descrita para este estándar se fija desde una calificación 0 cuando no se presenta ningún diseño e implementación en el programa hasta una calificación 5 al presentar una retroalimentación de evaluación en el desarrollo del proyecto.

## 2.2 Control Proporcional Integral Derivativo

En la actualidad, los controladores Proporcionales Integrales Derivativos o mejor conocido por sus siglas PID, son empleados frecuentemente en la industria ya que se desenvuelve en distintas aplicaciones como hidráulicas, neumáticas, electrónicas, entre otras, implementando un sistema en lazo cerrado desde la variable controlada o de salida hasta la variable de referencia o entrada, donde la señal de control es la suma resultante de tres acciones, las cuales están asociadas al error. Esas acciones son la Proporcional ( $K_p$ ), Integral ( $K_i$ ) y Derivativa ( $K_d$ ) (Enfoque Descriptivo & Walter D Cova, n.d.).

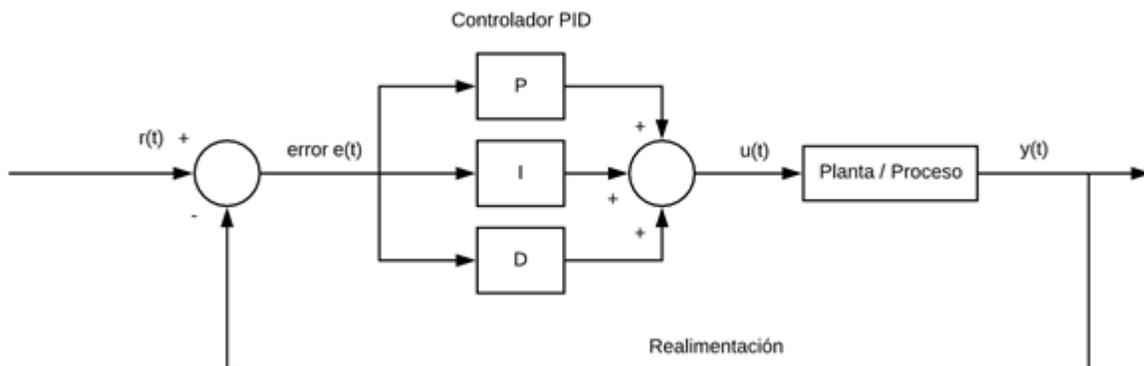
Cabe resaltar que cada acción tiene una función distinta; en el caso de  $K_p$ , se requiere cuando el controlador debe ser proporcional al tamaño de la señal de error del proceso, donde se permite el aumento en la velocidad del sistema y la reducción del porcentaje de error (Pinto Bermúdez et al., 2010). Para  $K_i$ , es decir, el control integral, es proporcional a la integral de error de control, es decir, permite disminuir y eliminar el error en estado estacionario, por ende, el aumento de la constante  $K_i$  varía de forma directa con el error del sistema, y si el porcentaje de error es mayor al error deseado, la constante aumentará hasta que el error se minimice. Si se presenta un porcentaje de error menor, la acción de control será creciente. Finalmente, esta  $K_d$ , que se basa en la predicción de errores de control

futuros, disminuyendo el error de forma proporcional a la velocidad en que se produce, donde es representada por la ganancia derivada que genera un aumento en la estabilidad del sistema que se está controlando y disminuye la velocidad de ejecución.

La salida de los tres parámetros son sumados para calcular la salida del controlador PID, la fórmula del control se denota en la **ecuación (2.1)**.

$$y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Por otro lado, en la **Figura 2-1**, se ilustra el diagrama de bloques que describe el controlador PID, donde  $r(t)$  hace referencia al Set Point o variable de comando,  $e(t)$  es el error,  $u(t)$  representa la señal de control y  $y(t)$  es la variable de salida o variable controlada (*Understanding PID Control, Part 1: What Is PID Control? Video - MATLAB, n.d.*).



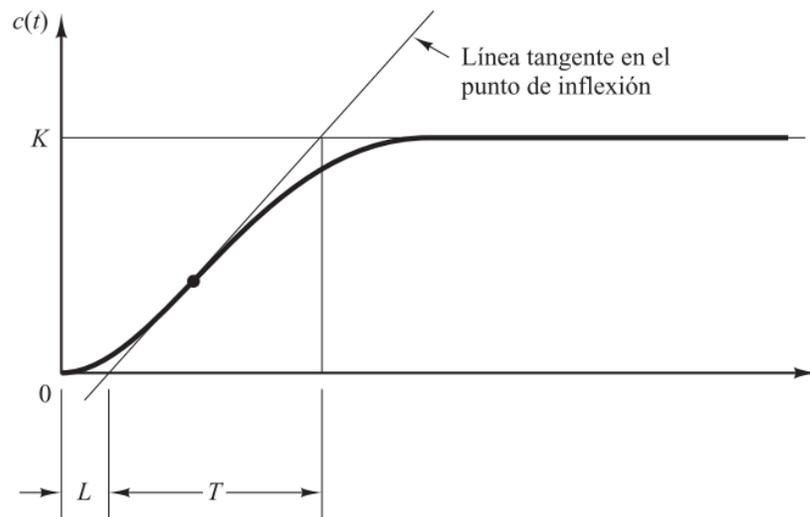
**Figura 2-1:** Diagrama de bloques del Control PID

Generalmente para la adecuada sintonización de un PID, se utilizan los métodos de Ziegler-Nichols (Pinto Bermúdez et al., 2010), (aunque existen distintos métodos como el de Tyreus-Luyben en lazo cerrado, Cohen-Coon en lazo abierto, entre otros (*MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID*, n.d.)), donde en el mejor de los casos, cuando existe un modelado matemático de la planta se puede aplicar ese tipo de controladores de manera tal que se determinen los parámetros adecuados que se ajustan a las necesidades. Sin embargo, como sucede en muchas ocasiones, se debe optar por una forma procedimental diferente porque la planta no cuenta con un modelo matemático,

donde se trabajan parámetros experimentales de  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , con el fin de lograr una adecuada sintonía.

Ziegler y Nichols postularon métodos para determinar los valores de la ganancia proporcional  $K_p$ , del tiempo integral  $T_i$  y del tiempo derivativo  $T_d$ , fundamentadas en las características de las señales de respuesta transitoria de una planta determinada. Tal determinación de los parámetros de los controladores PID o sintonía de controladores PID se realizan mediante experimentos o a partir de una simulación dinámica de la planta.

Para uno de estos métodos, y el utilizado para el desarrollo del controlador en este documento, la planta o el modelo de la planta se le proporciona una entrada escalón unitario y se analiza su respuesta. Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S, como se observa en la **Figura 2-2**.



**Figura 2-2.** Curva de la respuesta en forma de S.

De curva en S se puede determinar tres parámetros: el tiempo de retardo  $L$  y la constante de tiempo  $T$ , los cuales se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y la ganancia  $K$  alcanzada a régimen estacionario. Una vez obtenido estos parámetros se puede obtener la sintonía del controlador PID según la variante que se desea utilizar, apoyados en la siguiente **Tabla 2-1**.

**Tabla 2-1.** Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta.

Tipo de Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
<b>PD</b>	$1.6 \frac{T}{L}$	0	0.6 L
<b>PI</b>	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
<b>PID</b>	$1.2 \frac{T}{L}$	2 L	0.5 L

## 2.3 Controlador Cuadrático Lineal

El regulador cuadrático lineal o mejor conocido por sus siglas en inglés LQR, Linear Quadratic Regulator, se caracteriza por ser una estrategia de control que busca minimizar la acción de control, cumpliendo con las especificaciones de control de forma óptima. A diferencia del controlador por realimentación de los estados, las ganancias del controlador en este caso son seleccionadas optimizando la energía de control (Pinto Bermúdez et al., n.d.).

Dado un sistema lineal de tiempo invariante (LTI) descrito en el espacio de estados por:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (2.2)$$

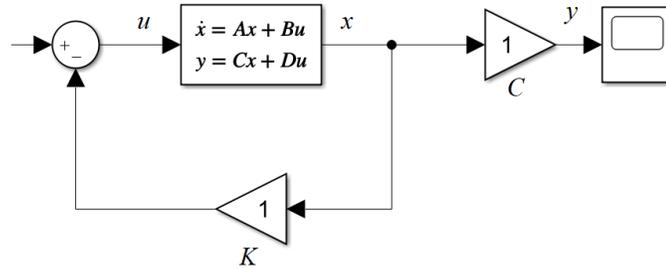
un controlador LQR para este sistema se expresa como

$$u = -Kx \quad (2.3)$$

donde  $K$  es la ganancia del controlador, la cual se calcula minimizando la función de costo

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (2.4)$$

En la **ecuación (2.4)**  $Q$  y  $R$  son matrices simétricas definidas o semi-definidas positivas, que son seleccionadas de modo que la velocidad de convergencia de las soluciones y la energía de control sean equilibradas. El esquema del controlador cuadrático lineal se muestra en la **Figura 2-3**.



**Figura 2-3.** Diagrama de bloques del controlador LQR.

Por otro lado, si se determinan los elementos desconocidos en  $\mathbf{K}$  para minimizar la función de costo, entonces la **ecuación (2.2)** es óptima para cualquier estado inicial  $x(0)$ . Debido a que este modelo no está linealizado, es necesario utilizar una herramienta de Matlab llamada *Linear Analysis*, con la que se obtiene un modelo ya linealizado del que se puede conseguir las matrices A y B. Sin embargo, se puede definir la matriz  $\mathbf{K}$  como una matriz identidad con el mismo número de componentes que el vector de estado, es decir, 12 componentes.

Mediante la regla de Bryson se calculan las matrices de pesos Q y R de la función costo. Esta regla indica que las matrices de pesos pueden ser definidas como una relación entre el peso que se le da a un estado y su valor máximo posible de forma normalizada. Así, se definen las matrices diagonales Q y R como:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1^2}{(x_1)_{\text{máx}}^2} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \dots & \frac{\alpha_n^2}{(x_n)_{\text{máx}}^2} \end{bmatrix} \text{ con } n = 12 \text{ estados} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{R} = \rho \begin{bmatrix} \frac{\beta_1^2}{(u_1)_{\text{máx}}^2} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \dots & \frac{\beta_n^2}{(u_n)_{\text{máx}}^2} \end{bmatrix} \text{ con } n = 4 \text{ motores} \quad (2.6)$$

La ley del control óptimo para el problema lineal con un índice de comportamiento está dada por  $\mathbf{u}(\mathbf{t})$ . Lo anterior puede ser representado por:

$$\mathbf{u}(t) = -R^{-1} B^T P x(t) \quad (2.7)$$

Donde existe una matriz  $\mathbf{P}$  definida positivamente, por tal razón el procedimiento consiste en definir los elementos de  $\mathbf{P}$  a partir de la comparación y ver si es definida positiva. Si el sistema es estable, siempre existe una matriz  $\mathbf{P}$  definida positiva que satisface esta ecuación. Otras matrices  $\mathbf{P}$  que cumplen esta ecuación no son determinadas positivas y deben despreciarse. Dicha matriz  $\mathbf{P}$  debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (2.8)$$

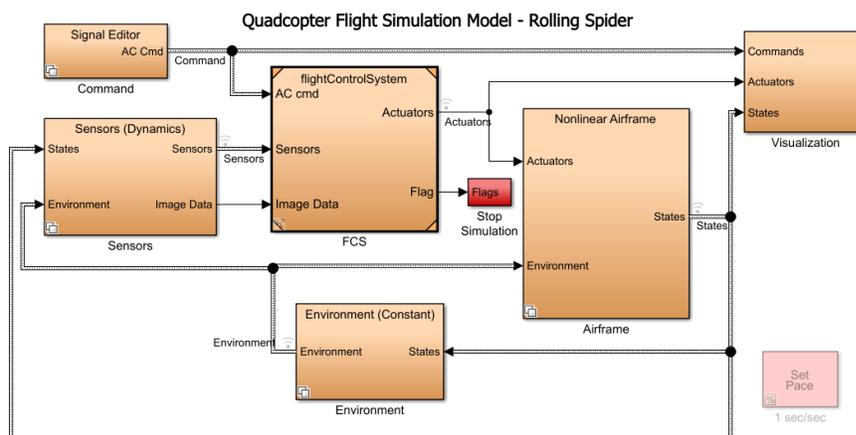
Por otro lado, se considera que  $\mathbf{R}$  es una matriz hermítica definida positiva o simétrica real para obtener la solución al problema de control óptimo cuadrático y se puede escribir como:

$$R = W^T W \quad (2.9)$$

### 3. Capítulo: Práctica de controladores de vuelo 1: Control PID de altitud del MiniDrone Parrot Rolling Spider.

En este capítulo se presentan las características de diseño del controlador PID para regular la altura del MiniDrone Parrot Rolling Spider. Se da solución específica de lo propuesto en la práctica para tal fin. Por otro lado, en el Capítulo 2, la sección 2.2 que corresponde al Controlador Proporcional Integral Derivativo, se encuentra una breve introducción al diseño del control PID; donde se describe la ley de control y los métodos de sintonización de las ganancias de control. Cabe destacar que, en el diseño de este controlador, se debe tener en cuenta el Anexo B. Recomendaciones, generalidades y características físicas del MiniDrone Parrot Rolling Spider, para la identificación de los componentes físicos y el Anexo C. Modelo matemático del cuadricóptero el cual proporciona una aproximación al modelo real del MiniDrone Parrot Rolling Spider. Partiendo de esas bases se especifica el procedimiento propuesto para realizar en las guías de laboratorio.

En la **Figura 3-1** se muestra el diagrama de bloques del simulador de vuelo del MiniDrone Parrot Rolling Spider. Para abrir el proyecto desde Matlab es necesario escribir en el Workspace el comando *asbQuadcopterStart*.

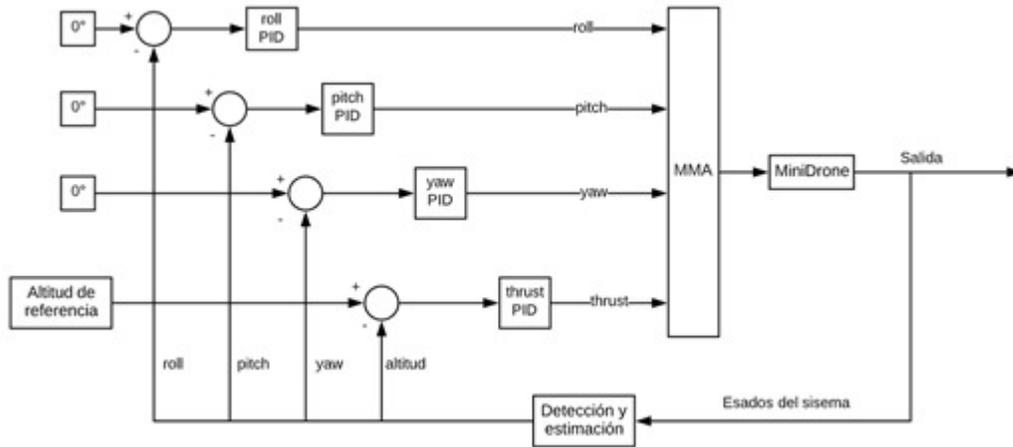


**Figura 3-1.** Diagrama de bloques en Simulink del controlador de vuelo del MiniDrone Parrot Rolling Spider.

El diagrama de bloques general modela un sistema no lineal, subactuado de seis grados de libertad que está constituido por el bloque de sensores (Sensors), el bloque del sistema de control de vuelo (flightControlSystem), el bloque de modelo del dron (Airframe), el bloque del entorno (Environment), el bloque de visualización (visualization) y el bloque generador de trayectorias de entrada para la planta (Command).

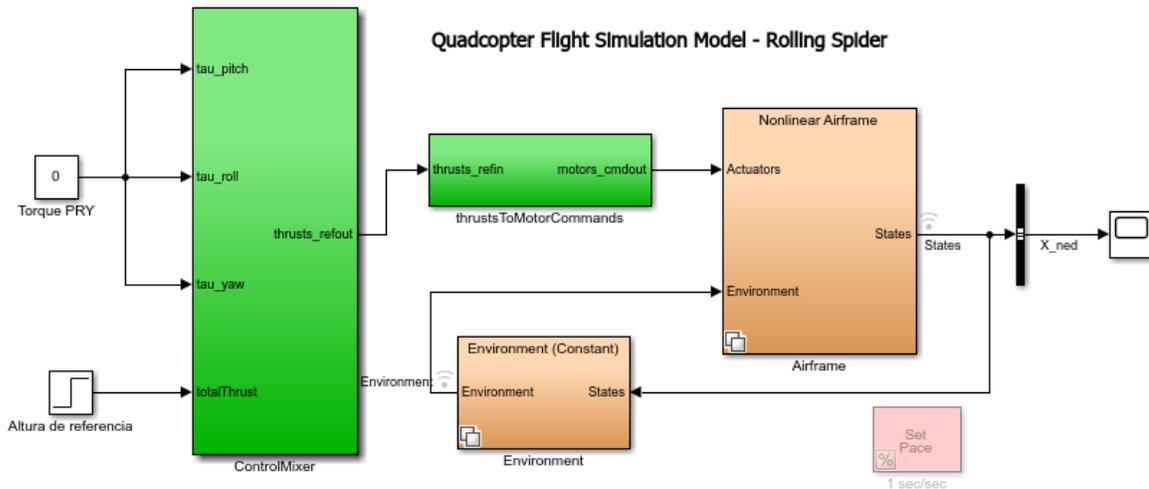
Cada bloque cumple una función en específico, por ejemplo, el bloque de sensores permite detectar las señales de las magnitudes física necesarias para realizar el control del sistema. Las entradas de este bloque son las variables de estado y las variables de entorno, respectivamente. Las salidas de este bloque son las señales de los sensores. El bloque del sistema de control de vuelo representa las señales de control que se diseñaran al modelo del dron. Sus entradas son las señales de referencia y sus salidas son la ley de control que se aplicara al modelo del dron. El bloque del modelo del dron contiene la representación del sistema a controlar. Para nuestro caso tendrá como entradas la altura, los tres grados de libertad angular o también conocidos como ángulos de navegación que son: roll, pitch y yaw. Las salidas de este bloque son las fuerzas y los momentos que se le deben aplicar a los motores. El bloque del entorno relaciona las variables del entorno tales como la aceleración de la gravedad, la temperatura del aire, la presión y la densidad del aire.

En el bloque de visualización se pueden observar las variables de estado, los ángulos de los motores, las fuerzas y los momentos aplicados en los motores, respectivamente. El bloque generador de trayectorias de entrada para el MiniDrone como su nombre lo indica, se le puede asignar el seguimiento de una trayectoria deseada.



**Figura 3-2.** Aplicación del método de Ziegler y Nichols para la sintonización del controlador PID de altura del MiniDrone.

**Diseñar un control PID para regular la altitud del dron a un valor deseado de 1.5 m y que garantice un tiempo de establecimiento inferior a 2 segundos, sin oscilaciones.** En la **Figura 3-2** se muestra los diagramas de bloques de la implementación necesaria para realizar la sintonización del control PID de altura. Se hace necesario eliminar las no linealidades existentes en los bloques presentes en el *asbQuadcopterStart* eliminar los PID existentes para las variables como lo son el cabeceo, el balanceo, la guiñada y el empuje. Como el control a implementar es solo de altura, manipularemos solo la variable de empuje y las demás variables serán tomadas como cero, como se muestra en la **Figura 3-3**.



**Figura 3-3.** Diagrama de bloques simplificado para realizar la sintonización del controlador PID de altura del MiniDrone.

Se ingresará una entrada paso y se analiza la respuesta temporal del sistema ante dicha entrada. Este punto el alumno lo puede realizar de dos formas, tal y como se expresa en la guía. La primera es aplicando lo explicado en el capítulo anterior por los métodos postulados por Ziegler y Nichols, como se muestra en la siguiente **Figura 3-3**. Para la realización de dicho método se utiliza una entrada escalón unitario en la variable de altura y se analiza la salida a través de un scope. De la gráfica resultante obtenemos los valores de  $L = 0,2$  y  $T = 0,9$ , como se muestra en la **Figura 3-4**. Aplicando por los valores dados en las tablas de sintonización para el método obtenemos los valores de  $K_p$ ,  $T_I$  y  $T_D$  respectivamente.

$$K_p = 1.2 \frac{T}{L} = 1.2 \frac{0.9}{0.2}$$

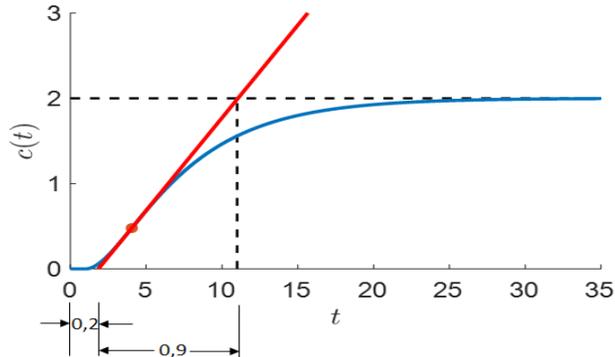
Entonces,  $K_p = 5.4$

$$T_I = 2 L = 2 * 0.2$$

Entonces,  $T_I = 0.4$

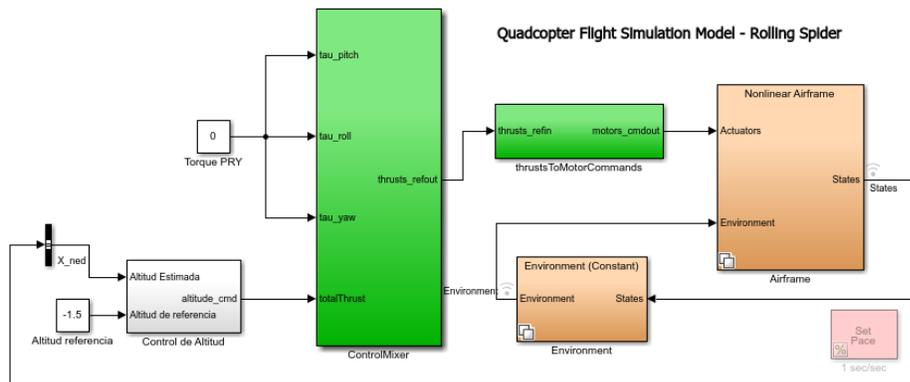
Asi mismo,  $T_D = 0.5 L = 0.5 * 0.2$

$$T_D = 0.1$$



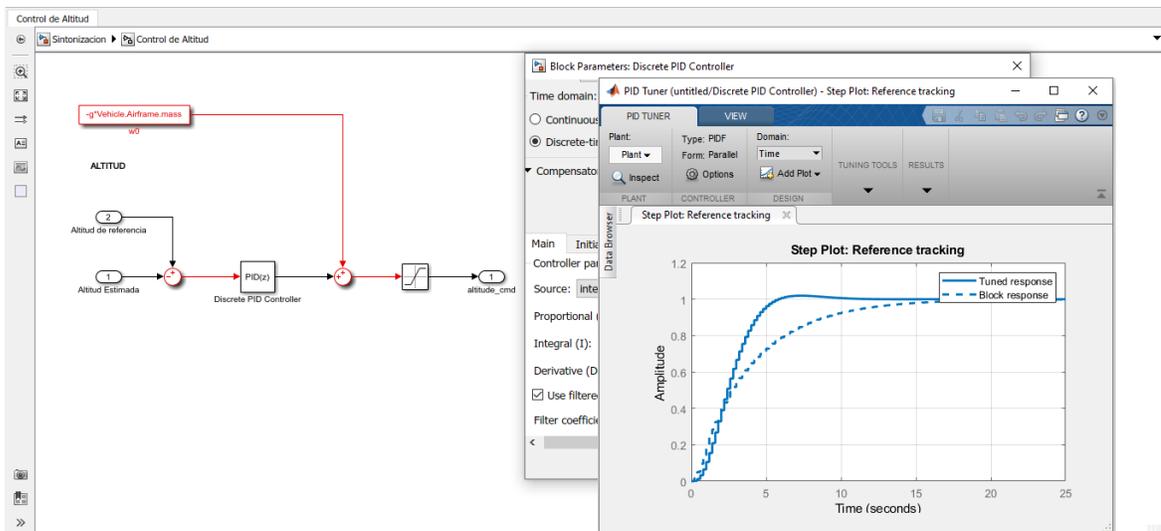
**Figura 3-4.** Curva de aplicación del método de Ziegler y Nichols para la sintonización del controlador PID de altura del MiniDrone.

Una vez obtenido los valores del controlador PID se realiza la implementación y se verifican los resultados obtenidos. Otra forma de sintonización es utilizando del bloque *Discrete PID Controller* el Autotuning. Para esto se debe modificar los diagramas de bloques de forma como se muestra en la **Figura 3.5**. El marco de referencia del dron que tiene un eje z positivo apuntando hacia abajo, por lo que nuestro controlador está conduciendo la altitud a 1.5 negativo.



**Figura 3-5.** Diagrama de bloques simplificado para realizar la sintonización con el autotuning con el bloque *Discrete PID Controller* del controlador PID de altura del MiniDrone.

En la **Figura 3-6** se puede observar las modificaciones que se deben hacer al bloque de control de altitud para realizar la sintonización de la planta linealizada del MiniDrone Parrot Rolling Spider. Dando doble click sobre el bloque *Discrete PID Control Controller* se puede establecer los parámetros de este bloque. En la parte inferior de la misma se puede encontrar el botón de Tuning para calcular las ganancias del PID.



**Figura 3-6.** Gráfica de comparación entre la respuesta sintonizada y la respuesta en el bloque.

**Evaluar los efectos del control PD, respecto al control PID ya obtenido con anterioridad.**

Para la realización de dicho método se utiliza una entrada escalón unitario en la variable de altura y se analiza la salida a través de un scope. De la gráfica resultante obtenemos los valores de  $L = 0,2$  y  $T = 0,9$ . Aplicando por los valores dados en las tablas de sintonización para el método obtenemos los valores de  $K_P$  y  $T_D$  respectivamente.

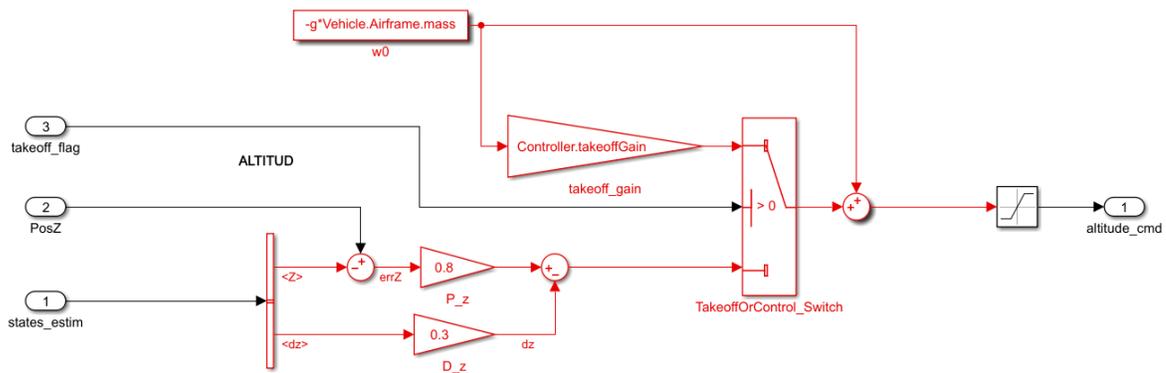
$$K_P = 1.6 \frac{T}{L} = 1.6 \frac{0.25}{0.5}$$

Entonces,  $K_P = 0.8$

$$T_D = 0.6 L = 0.6 * 0.5$$

Entonces,  $T_D = 0.3$

Una vez calculadas las ganancias del controlador, se debe realizar la implementación del diseño de control PD de la altura del drone Parrot Spider, como se aprecia en la **Figura 3-7**. Para ello se debe construir el siguiente diagrama de bloques en el subsistema de control.

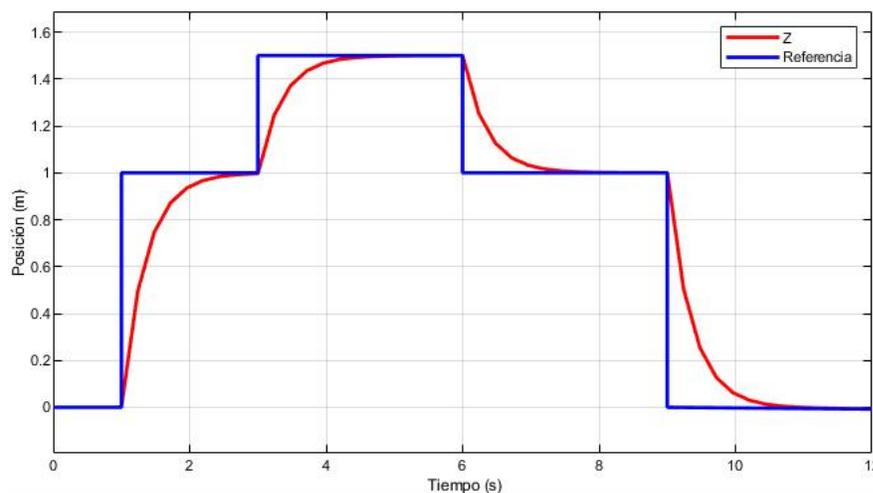


**Figura 3-7.** Implementación del controlador PD de altura del MiniDrone.

Como se puede observar en la anterior figura existe un switch que conmuta dos valores de control. Un valor que se empleara solamente en el transcurso del despegue del drone y otra que se empleara para el control de altura en el resto de su operación. Para el despegue se aplica un empuje constante con un valor de 5.35, esta ganancia se denomina como *takeoff\_gain* y se aplica a los rotores del quadrotor durante un tiempo aproximado de dos segundos. Durante el resto del vuelo del drone se aplica un controlador PD que hemos diseñado. La ganancia proporcional,  $K_P = 0.8$ , es multiplicada por el error entre la posición actual y la referencia. Asi mismo, la ganancia derivativa  $K_D = 0.3$  por la velocidad en el eje z.

**Prevalidar el controlador PD de altura obtenido en el modelo de simulación de la sección anterior. Se deberán verificar los cálculos realizados para la obtención del modelo**

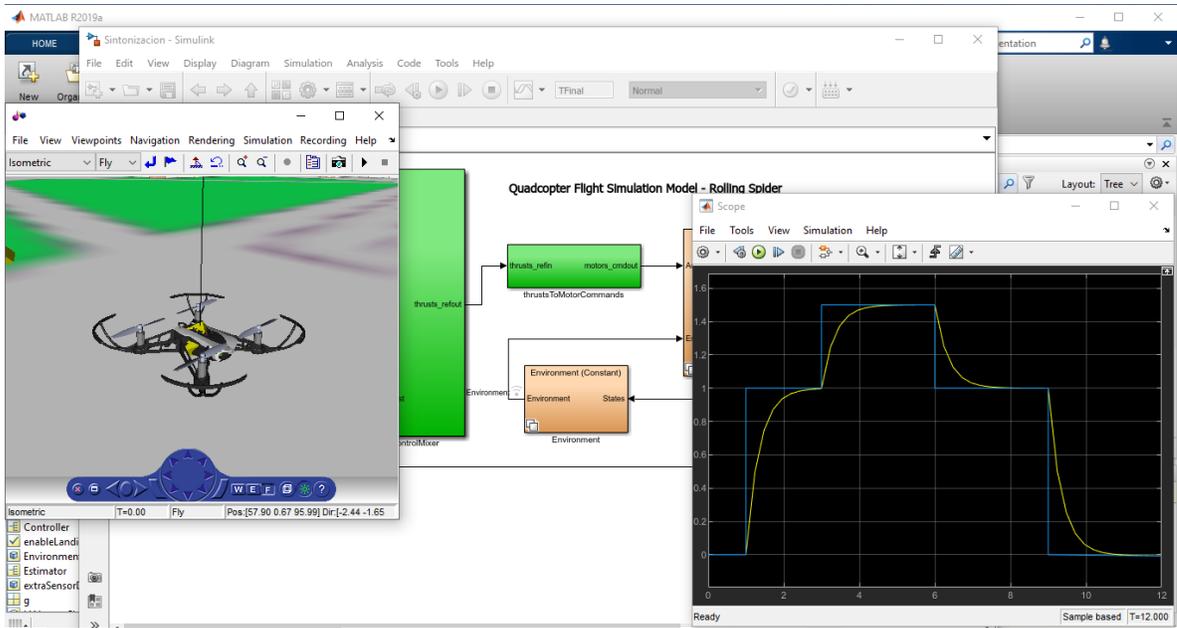
En esta primera prevalidación del control de altura se somete al modelo del drone reaccionando ante diferentes cambios en la referencia de la altura. Por último, se observa en la simulación el vuelo del drone se comporta de la manera diseñada. El experimento consiste en enviar una orden de subir hasta 1m en el despegue el cual ocurre en el pasado el primer segundo. A los tres segundos asciende a la referencia de 1.5 m hasta los 6 segundos. En ese instante desciende hasta llegar a la referencia de 1 m y finalmente llega a la referencia de 0 m a los 9 m, como se puede observar en la **Figura 3-8**.



**Figura 3-8.** Prevalidación de control de altura completo del MiniDrone Parrot Rolling Spider.

La **Figura 3-9** muestra la simulación del control PID en el entorno de realidad virtual del Matlab. Se puede observar que el controlador se comporta de una manera aceptable a lo diseñado.

38 Construcción de prácticas de laboratorio bajo la iniciativa CDIO a partir de la implementación de las técnicas de control PID y LQR en un MiniDrone Parrot Rolling Spider para la Universidad Antonio Nariño.



**Figura 3-9.** Prevalidación de control de altura completo en el entorno de Matlab del MiniDrone Parrot Rolling Spider.

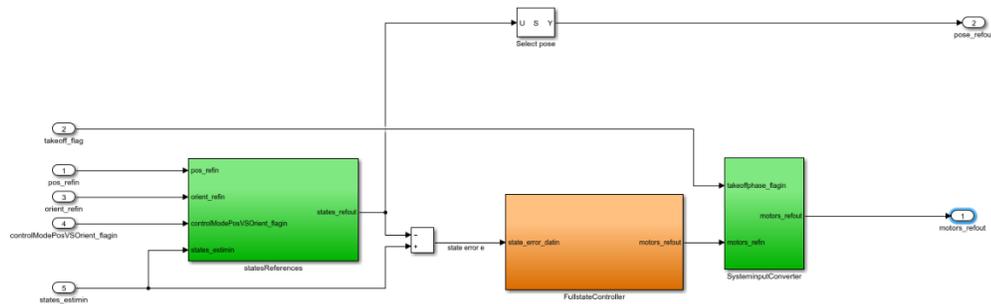
## 4. Capítulo: Práctica de controladores de vuelo 2: Control Cuadrático Lineal de altitud del MiniDrone Parrot Rolling Spider.

Este capítulo describe las características de diseño del Controlador Cuadrático Lineal (LQR) para regular la altura del MiniDrone Parrot Rolling Spider. Se da solución específica de lo propuesto en la práctica para tal fin. Por otro lado, en el Capítulo 2, la sección 2.3 que corresponde al Controlador Cuadrático Lineal, se establece una breve introducción al diseño del control LQR, describiendo la forma de obtención de las matrices y la función de costo. Cabe destacar que, en el diseño de este controlador, se debe tener en cuenta el Anexo B. Recomendaciones, generalidades y características físicas del MiniDrone Parrot Rolling Spider, para la identificación de los componentes físicos y el Anexo C. Modelo matemático del cuadricóptero el cual proporciona una aproximación al modelo real del MiniDrone Parrot Rolling Spider. Partiendo de esas bases se presenta el procedimiento que se propone para realizar en las guías de laboratorio.

**Diseñar un regulador cuadrático no lineal que cumpla con un tiempo de establecimiento de 2 segundos y no tenga sobre oscilación presente en el sistema.**

El primer paso es abrir el archivo *controllers/controller\_fullstate/LQR/controller\_lqr.slx*. Contiene un bloque de simulink de plantilla *ControllerLQR* para el controlador de retroalimentación de estado completo LQR que se implementará, como se puede observar en la Figura 4-1. Este bloque reemplazará el bloque *ControllerPID* en *sim\_quadrotor.slx*.

40 Construcción de prácticas de laboratorio bajo la iniciativa CDIO a partir de la implementación de las técnicas de control PID y LQR en un MiniDrone Parrot Rolling Spider para la Universidad Antonio Nariño.



**Figura 4-1.** Diagrama de bloques en Simulink del controlador LQR de vuelo para el MiniDrone Parrot Rolling Spider.

Después debe ir al siguiente archivo de Matlab en la caja de herramientas:

*/trunk/matlab/Simulación/controladores/controladorfullstate/LQRControl.m.*

Este archivo proporciona una plantilla para diseñar el controlador LQR, con valores preestablecidos para los límites usando la regla de Bryson y los pesos de costos para el error de estado y el esfuerzo de control, tal y como se explicó en el capítulo 2, sección 2.3, parte de esta plantilla se puede observar en la **Figura 4-2**.

```
DRONE > Parrot > RollingSpider-master > RollingSpider-master > Allfiles > MIT_MatlabToolbox > trunk > matlab > Simulation > controllers > controller_fullstate > LQR
Editor - LQRControl.m
LQRControl.m  mdl_quadrotor.m  +
1  %% Using a linearization of the drone dynamics about hover to design an LQR hover controller
2  %Load drone parameters from RoboticsToolbox
3  mdl_quadrotor
4  %% 1) Linearize Drone Model
5  %Use linearizeDrone_motorcmdToState.slx and Simulink's ControlDesign/Linear Analysis
6  %to find a linear plant model.
7  A = linsys1.a;
8  B = linsys1.b;
9  C = eye(12);
10 D = zeros(12,4);
11 %% 2) Setup Bryson's rule
12 %Limits on states
13 pos_max = 0.5;
14 att_max = 0.3;
15 dpos_max = 1;
Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
K_lqr_toMotorcmd =
-17.8843  26.8264  -89.4213  -37.2589  116.0734  130.1821  -19.5174  25.5324  -68.2561  28.2286  28.7360  -45.6781
17.8843  26.8264  89.4213  -37.2589  -116.0734  130.1821  19.5174  25.5324  68.2561  28.2286  -28.7360  -45.6781
17.8843  -26.8264  -89.4213  -37.2589  -116.0734  -130.1821  19.5174  -25.5324  -68.2561  -28.2286  -28.7360  -45.6781
-17.8843  -26.8264  89.4213  -37.2589  116.0734  -130.1821  -19.5174  -25.5324  68.2561  -28.2286  28.7360  -45.6781
fx >>
```

**Figura 4-2.** Parte del código LQRControl.m

Utilizando la dinámica linealizada se ejecuta la versión original del m-file *LQRcontrol.m* (es decir, con los valores originales para límites y pesos de costos). Genera una matriz  $K$  de controlador LQR de retroalimentación de estado completo  $K_{lqr\_toMotorcmd}$ . Se debe tener en cuenta que para su correcto funcionamiento se requiere de la función *mdl\_quadrotor.m*, como se muestra en la **Figura 4-3**.

```

1 %MDL_QUADROTOR Dynamic parameters for a quadrotor.
2 %
3 % MDL_QUADROTOR is a script creates the workspace variable quad which
4 % describes the dynamic characteristics of a quadrotor flying robot.
5 %
6 % Properties::
7 %
8 % This is a structure with the following elements:
9 %
10 % nrotors Number of rotors (1x1)
11 % J Flyer rotational inertia matrix (3x3)
12 % h Height of rotors above CoG (1x1)
13 % d Length of flyer arms (1x1)
14 % nb Number of blades per rotor (1x1)
15 % r Rotor radius (1x1)
16 % c Blade chord (1x1)
17 % e Flapping hinge offset (1x1)
18 % Mb Rotor blade mass (1x1)
19 % Mc Estimated hub clamp mass (1x1)
20 % ec Blade root clamp displacement (1x1)
21 % Ib Rotor blade rotational inertia (1x1)
22 % Ic Estimated root clamp inertia (1x1)
23 % mb Static blade moment (1x1)
24 % Ir Total rotor inertia (1x1)
25 % Ct Non-dim. thrust coefficient (1x1)

```

**Figura 4-3.** Parte del código *mdl\_quadrotor.m*

A continuación, en la **Tabla 4-1** se presentan los valores máximos para la regla de Bryson para la selección de las matrices  $Q$  y  $R$ . Si se conocen los valores máximos de los estados finales, estados continuos y entradas continuas, luego se puede aplicar la siguiente regla para la selección de matrices de ponderación  $K$ ,  $Q$  y  $R$ , respectivamente.

**Tabla 4-1.** Valores máximos para la regla de Bryson

Estados	Valor máximo
Ángulos yaw, pitch y roll	0,3 rad
Comando máximo para los motores	500

Posición	1,5 m
Velocidades angulares	3,14 rad/s
Velocidades lineales	1 m/s

En la **Tabla 4-2** se pueden observar los valores de los pesos de los estados LQR óptimos obtenidos a través del script *LQRControl.m*, el cual linealiza el modelo dinámico del MiniDrone descrito en el Anexo C. Modelo matemático del cuadricóptero, se cargan los valores máximos para la regla de Bryson y entrega los pesos de los estados del controlador LQR óptimo los cuales se pueden observar en la **Tabla 4-2**, respectivamente.

**Tabla 4-2.** Pesos de los estados en LQR óptimo

Peso	Valor
Ángulos yaw, pitch y roll	0,0621 rad
Posición x, y	0
Posición z	1,5 m
Rho	0,01
Velocidad angular	0,1266 rad/s
Velocidad lineal	0,0158 m/s

Las matrices Q y R que se obtienen de los parámetros anteriores son:

$$Q = \begin{bmatrix} 0,0319 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0319 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,7647 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,0411 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0411 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0411 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0035 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0035 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0035 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0282 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0282 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0282 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0,24 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,24 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,24 \end{bmatrix}$$

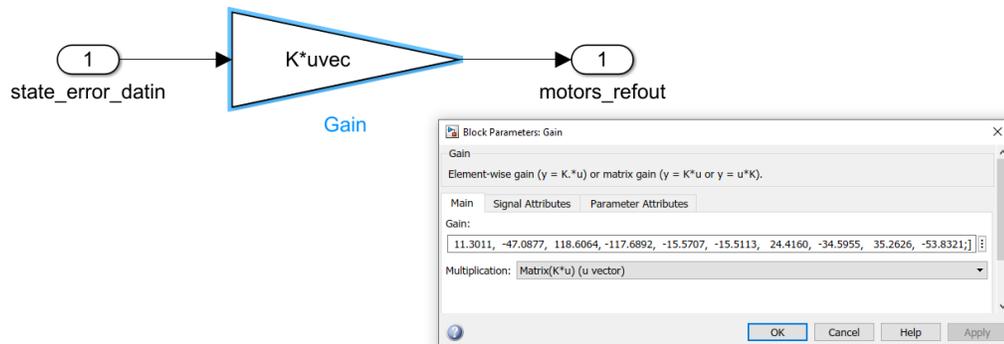
Mediante el uso del *Control System Toolbox* utilizando la función LQR, que recibe como entrada las matrices A, B, Q y R. Este se encarga de calcular la ganancia que minimiza la función de coste. Se puede calcular diversas matrices de ganancia en dependencia de los valores de entrada que se quieran controlar con el VANT como por ejemplo para este caso, la altura del MiniDrone. Obteniendo la siguiente ganancia:

$$K = \begin{bmatrix} 11,301 & -11,301 & 11,301 & 47,087 & -108,606 & -117,689 & 15,570 & -15,511 & 24,416 & -34,595 & -35,262 & 53,832 \\ -11,301 & -11,301 & -11,301 & 47,087 & 108,606 & -117,689 & -15,570 & -15,511 & -24,416 & -34,595 & 35,262 & 53,832 \\ -11,301 & 11,301 & 11,301 & 47,087 & 108,606 & 117,689 & -15,570 & 15,511 & 24,416 & 34,595 & 35,262 & 53,832 \\ 11,301 & 11,301 & -11,301 & 47,087 & -108,606 & 117,689 & 15,570 & 15,511 & -24,416 & 34,595 & -35,262 & 53,832 \end{bmatrix}$$

**Implementar el controlador LQR de altura verificando los pesos de las matrices obtenidas. Modifique los pesos hasta que obtenga mejores resultados.**

El diagrama de bloque que permite la simulación del control LQR se muestra en la siguiente **Figura 4-1**. El bloque del controlador recibe como entrada: referencia de posición con el nombre de *pos\_refin*, la señal que indica el despegue con el nombre *takeoff\_flag*, la señal de referencia de los ángulos de orientación con el nombre *orient\_refin*, la señal de control de posición frente a control de ángulos con el nombre *controlModePosVSOrient\_flagin* y por último, la señal de estimación del vector de estado cuyo nombre es *state\_estim*.

En el bloque de *statesReferences*, selecciona el vector de estado que se utilizará para calcular el error junto con el vector de entrada, dependiendo de si está activado el control de posición o el de orientación, respectivamente. Este vector de errores entrega la señal al controlador, es decir, el bloque *FullstateController* que aplica la ley de control  $u(t) = -Kx(t)$ , los valores obtenidos de la matriz K se reemplazan dando doble click al bloque y editando dicha matriz, como se observa en la **Figura 4-4**.

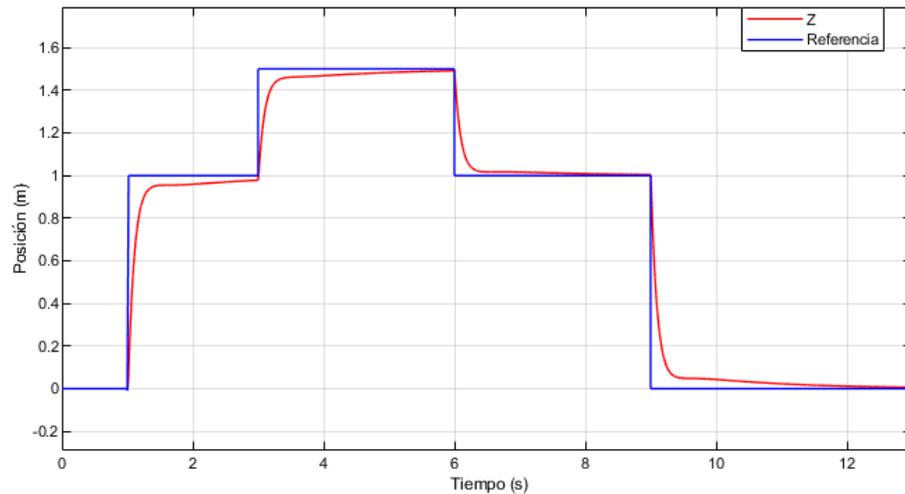


**Figura 4-4.** Diagrama de bloques de la matriz K.

La salida del controlador LQR *FullstateController* alimenta el bloque *SystemInputConverter* el cual realiza una serie de conversiones necesarias para enviar la palabra de control a los motores. En este bloque se genera un empuje constante; y en caso de estar activado mediante la señal de despegue (que tiene por nombre *takeoff\_flag*), se sustituye por lo que cuantifique el controlador en cuanto se desactive este valor.

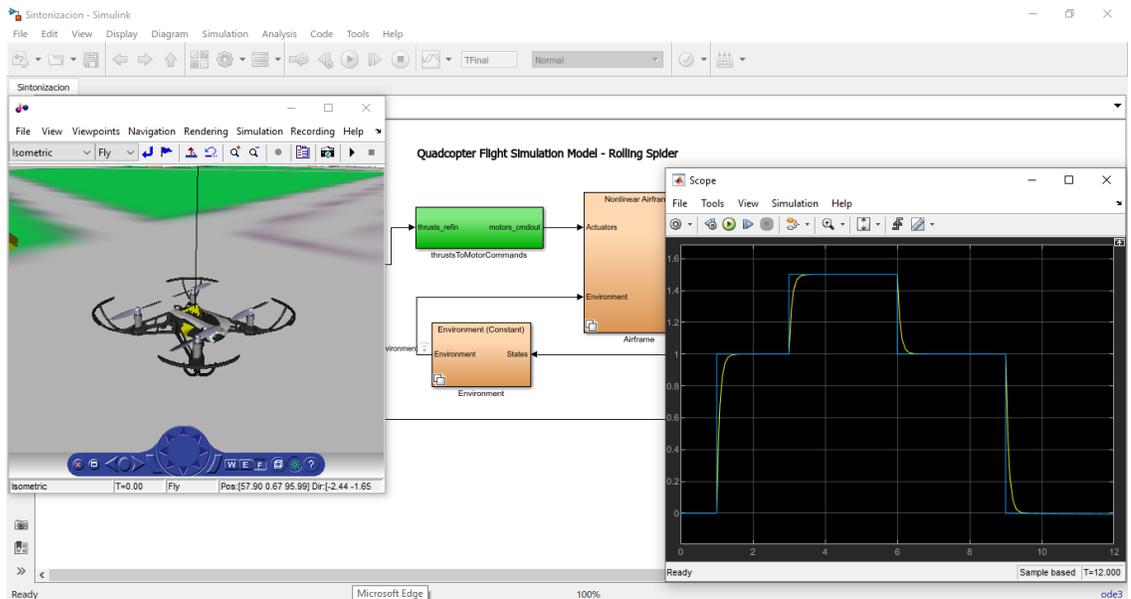
**Realice la prevalidación de los modelos obtenidos cambiando los valores de las matrices y compare sus resultados.**

En la validación el control LQR de altura se somete diferentes cambios en la referencia de la altura. El experimento consiste en enviar una orden de subir hasta 1m en el despegue el cual ocurre en el segundo 1. A los tres segundos asciende a la referencia de 1.5 m hasta los 6 segundos, se puede observar el excelente comportamiento del control L.Q.R, pues no presenta sobre impulso para alcanzar la altura de referencia. En ese instante desciende hasta llegar a la referencia de 1 m y finalmente llega a la referencia de 0 m a los 9 s, como se puede observar en la **Figura 4-5**.



**Figura 4-5.** Prevalidación del control LQR de altura del MiniDrone Parrot Rolling Spider.

Por otro lado, se obtiene la **Figura 4-6** mostrada a continuación, la cual es una simulación 3D de un modelo genérico de un UAV entregado por el entorno de realidad virtual de Matlab.



**Figura 4-6.** Prevalidación de control LQR de altura completo en el entorno de Matlab del MiniDrone Parrot Rolling Spider.

## **5. Capítulo: Guías de laboratorio propuestas.**

El siguiente capítulo abarca lo relacionado a las guías de laboratorio, desde su realización hasta su validación.

Las guías propuestas de manera independiente para el controlador PID y LQR de altitud en el MiniDrone Parrot Rolling Spider, se basan en el estándar 5 mencionado en el Capítulo 2: Marco teórico, sección 2.1 Iniciativa de Concebir, Diseñar, Implementar y Operar, ya que se compone de una experiencia de diseño, implementación y operación, donde el estudiante es capaz de desarrollar habilidades y destrezas en el proceso de aprendizaje enfrentándose a un entorno educativo con la posibilidad de utilizar ambientes virtuales o simulaciones de situaciones concretas, en este caso, poder elevar el MiniDrone a una altura determinada en un tiempo establecido.

### **5.1 Diseño de las guías de laboratorio propuestas:**

Para la elaboración de estas guías, se toma en cuenta los Syllabus de los cursos de Electiva I, Control I y Control II, para identificar los temas que el estudiante debe conocer y hasta donde se puede abarcar el controlador. Por ende, el documento se resume en etapas, las cuales son:

- Etapa 1: Se da a conocer al estudiante los requisitos preliminares y repositorio de archivos, esenciales para abarcar el tema, donde se presenta un listado de libros en caso de ser necesaria la ampliación de información y los posibles inconvenientes que se pueden presentar a la hora de desarrollar la práctica, como lo son la circular reglamentaria N. 002 nombrada en el Anexo A: Aeronavegabilidad y Operaciones para RPAS (Numeral 4.25.8.2), donde se especifica las precauciones necesarias para vuelo en un espacio abierto de vehículos aéreos no tripulados, establecidos

por la Aeronáutica Civil Colombiana. Añadido a esto, se encuentra el Anexo B, el cual indica las recomendaciones, generalidades y características físicas del MiniDrone Parrot Rolling Spider, con la finalidad de reconocer las partes con las que cuenta el UAV. Sin embargo, se considera igual de necesario la guía de conexión entre el MiniDrone Parrot Rolling Spider con el sistema operativo de Windows y el software Matlab, contemplada en el Anexo D, con el fin de ayudar al estudiante a enlazar en el MiniDrone, tomando en cuenta los posibles inconvenientes.

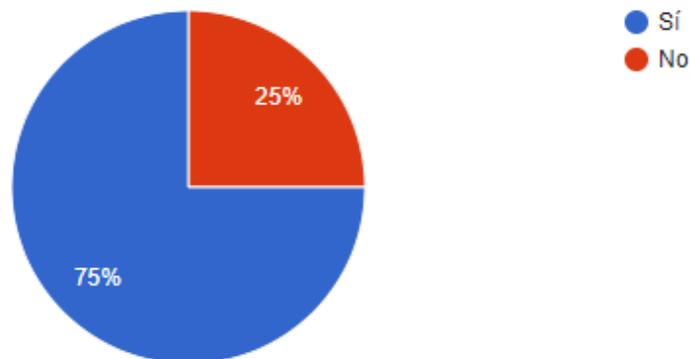
- Etapa 2: Se presenta el alcance de la práctica de laboratorio, donde el estudiante diseñará, implementará y operará un controlador (ya sea el PID o el LQR) que regule el vuelo de un MiniDrone Parrot Rolling Spider alrededor de una altura en metros preestablecida. Sin embargo, el alcance se delimita por unos objetivos específicos como el de diseñar un controlador PID por medio de la técnica establecida, implementar el controlador diseñado en Matlab, operar el MiniDrone con el controlador implementado, para verificar que se cumplan los requisitos de diseño. Todo lo anterior basados en el estándar 5 de la iniciativa CDIO. Finalmente, el estudiante será evaluado bajo cuatro parámetros establecidos de la siguiente manera: rigurosidad del proceso de diseño, registro de pruebas de funcionalidad, funcionalidad del controlador implementado y porcentaje de cumplimiento de los requisitos de diseño durante la operación del MiniDrone.
- Etapa 3: Se exponen los materiales de trabajo, tanto el software como el hardware necesario, así como una breve introducción a MiniDrone Parrot Rolling Spider y una sección de conceptualización del control Proporcional Integral Derivativo; para después dar a conocer la parte procedimental del documento, donde se describe el procedimiento que el estudiante debe seguir para realizar el controlador respectivo con una altura predeterminada.
- Etapa 4: Se especifica los entregables que el estudiante debe realizar tanto para la práctica como para la sustentación con el fin de evidenciar los parámetros de diseño, implementación y operación del controlador, así como lo que debe contener

el informe que deber ser entregado al docente encargado. Finalmente, se añaden recomendaciones generales respecto a la conexión del MiniDrone con el sistema operativo de Windows y condiciones de aeronavegabilidad, con el fin de evitar inconvenientes legales y accidentalidad al momento de la operación (vuelo).

## 5.2 Validación de las guías de laboratorio propuestas:

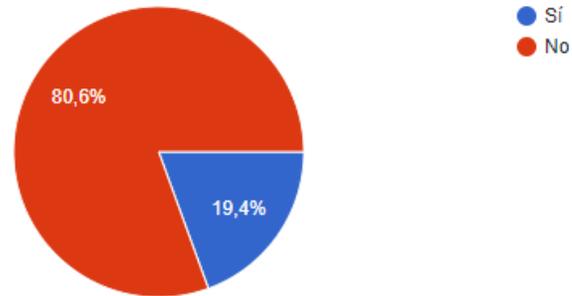
Se consolida una encuesta dirigida a 36 personas, donde se encuentran estudiantes, docentes y egresados del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Antonio Nariño los cuentan con conocimiento en el área de control, mediante la herramienta Google Forms. En primer lugar, se da a conocer la guía de laboratorio planteada y se procede a realizar las siguientes preguntas con sus respectivas respuestas:

- Domina la temática asociada a los controladores PID (Teoría, Diseño, Implementación y Operación):



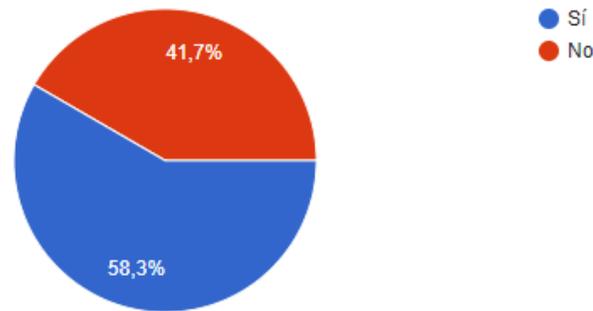
**Figura 5-1.** Respuesta en porcentaje sobre el dominio de la temática asociada al controlador PID.

- Domina la temática asociada a los controladores LQR (Teoría, Diseño, Implementación y Operación):



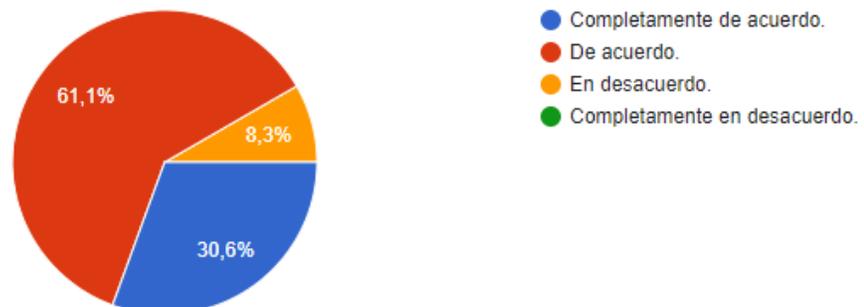
**Figura 5-2.** Respuesta en porcentaje sobre el dominio de la temática asociada al controlador LQR.

- ¿Tiene conocimiento acerca de la iniciativa CDIO?



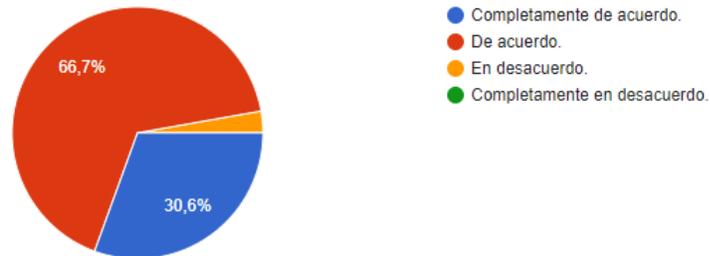
**Figura 5-3.** Respuesta en porcentaje asociado al conocimiento de la iniciativa CDIO.

- El contenido de las guías es claro y coherente.



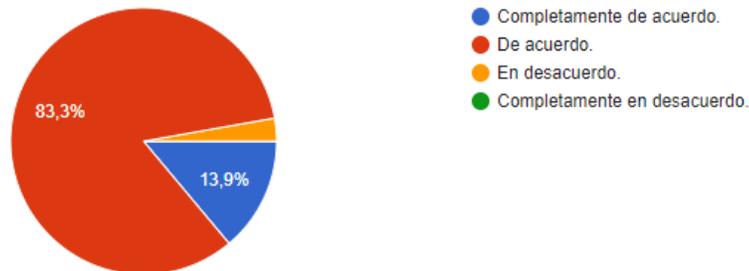
**Figura 5-4.** Respuesta en porcentaje acerca de la claridad y coherencia del contenido de las guías de laboratorio.

- Considera que las guías son una experiencia de diseño e implementación



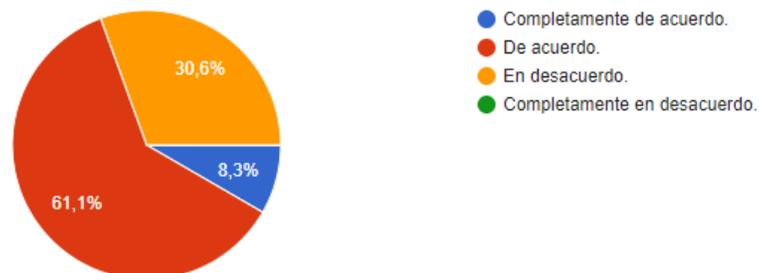
**Figura 5-5.** Respuesta en porcentaje sobre la consideración de las guías de laboratorio como una experiencia de diseño e implementación.

- La organización de los documentos favorece el desarrollo del mismo.



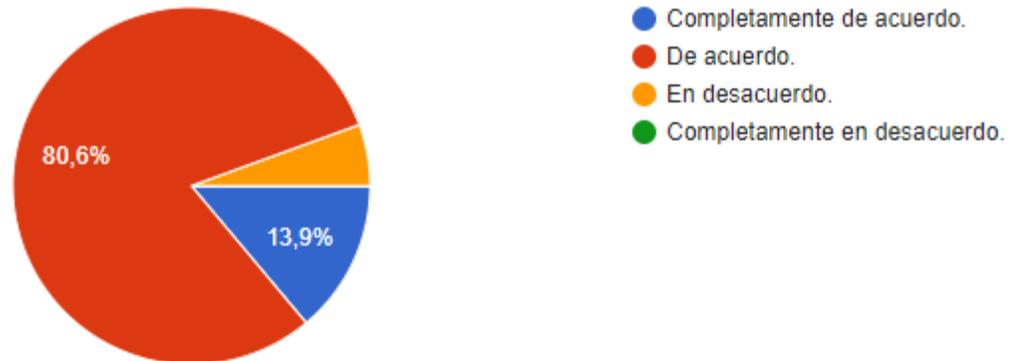
**Figura 5-6.** Respuesta en porcentaje acerca de la organización del documento favoreciendo el desarrollo del mismo.

- ¿Considera que el Syllabus de las materias de Electiva I, Control I y Control II abarca las temáticas aplicadas en las guías?



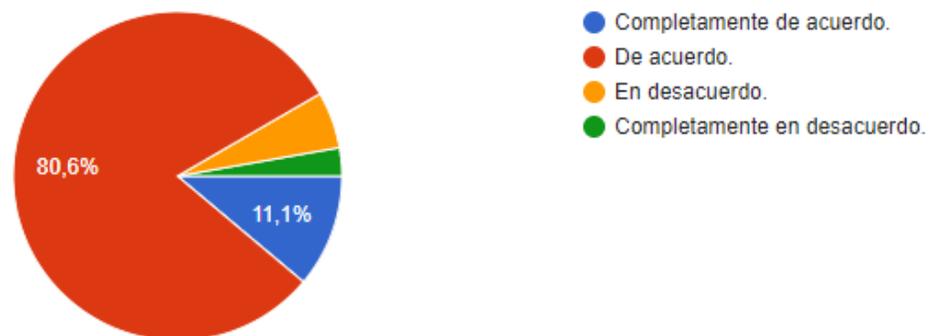
**Figura 5-7.** Respuesta en porcentaje acerca de la consideración de los Syllabus asociados a los cursos de Electiva I, Control I y Control II sobre abarcar las temáticas aplicadas en las guías.

- Los objetivos planteados en la guía de control PID son congruentes con la práctica y aportan a su desarrollo académico.



**Figura 5-8.** Respuesta en porcentaje referente a los objetivos planteados en la guía de control PID, su congruencia con la práctica y aporte al desarrollo académico del estudiante.

- Los objetivos planteados en la guía de control LQR son congruentes con la práctica y aportan a su desarrollo académico.



**Figura 5-9.** Respuesta en porcentaje referente a los objetivos planteados en la guía de control LQR, su congruencia con la práctica y aporte al desarrollo académico del estudiante.

- Si tiene algún observación o comentario adicional por favor hacerla saber en este espacio.

Si tiene algún observación o comentario adicional por favor hacerla saber en este espacio.

8 respuestas

No tengo observaciones.
ninguna observación
No
Bueno
Al no tener el conocimiento necesario sobre el control LQR es mas complejo desarrollar dicha guia
No
Excelente propuesta. Muy interesante y dinámica, puesto que permite aplicar la teoría que se reciben en las clases. Una pequeña dificultad que veo es que algunos estudiantes puede que no cuenten con los suficientes recursos para acceder a un pc con las características acordadas en la guía.
Ninguna

**Figura 5-10.** Respuestas obtenidas referentes a las observaciones o comentarios adicionales por parte de los estudiantes.

### 5.2.1 Análisis de las respuestas:

- Se evidencia que el 75% de los encuestados afirmaron que dominan la temática referente a los controladores PID en cuanto a teoría, diseño, implementación y operación (haciendo referencia a la iniciativa CDIO), mientras que el 25% manifestó que no domina la temática.
- 29 de las 36 personas que respondieron, es decir, el 80,6%, responden que no dominan la temática asociada al controlador LQR en cuanto a teoría, diseño, implementación y operación.
- El 41,7% afirma que no tiene conocimiento acerca de la iniciativa CDIO, mientras que el 58,3% sostiene que posee conocimiento sobre esta iniciativa.
- Más de la mitad de encuestados, es decir el 61,1% está de acuerdo con que ambas guías de laboratorio presentan un contenido claro y coherente. Sin

embargo, 66,7% responden que están de acuerdo con que los documentos representan una experiencia de diseño e implementación.

- En cuanto a la pregunta relacionada a la organización de los documentos favoreciendo el desarrollo de los mismos, obtiene un porcentaje considerable de 83,3%, donde los encuestados se encuentran de acuerdo con esto.
- 11 de los 36 encuestados responden que están en desacuerdo con que ambas guías de laboratorio abarquen contenidos programáticos de los cursos de Electiva I, Control I y Control II; mientras el 61,1% está de acuerdo.
- Considerando que los objetivos planteados en ambas prácticas de laboratorio son congruentes con cada una de ellas y aportan al desarrollo académico del estudiante, el 80,6% equivalente a 29 encuestados, manifestaron estar de acuerdo con esta afirmación.

## 6. Capítulo: Conclusiones

- Se establecieron los objetivos y los alcances para cada guía de laboratorio implementando dos controladores actualmente utilizados en la industria y aportando al desarrollo académico del estudiante, ya que tales controladores hacen parte del contenido programático de los cursos mencionados a lo largo de este documento.
- Las guías hacen un aporte a la temática de las asignaturas de control, ya que al ser una experiencia de aprendizaje, se refuerza el contenido teórico; aportando a una aplicación con enfoque en diseño e implementación, empleando el MiniDrone Parrot Rolling Spider, donde el estudiante es el protagonista ante un escenario simulado, en el cual puede interactuar con la planta y validar los resultados obtenidos con un modelo físico.
- Se desarrollaron dos controladores funcionales mediante las técnicas PID y LQR para el MiniDrone Parrot Rolling Spider, donde se pueden ver los resultados de dichos controladores, observando cual tiene mejor respuesta ante perturbaciones externas.
- Luego de implementar cada uno de los controladores en el ambiente de simulación y observar el comportamiento de los mismos, bajo los criterios de diseño como: tiempo de estabilización, máximo sobre impulso, estabilidad y restricciones en la señal de control, los controladores LQR diseñados para la regulación de la altura presentan un mejor desempeño que los PID. Se tiene la exposición de la planta frente a perturbaciones el sistema no presenta sobre impulso en la altura lo cual no representa un factor crítico para el funcionamiento de la planta y sigue siendo menor que el sobre impulso presentado con los controladores PID; un tiempo de estabilización de 2 segundos, lo que representa la mitad del tiempo que le toma al controlador PID alcanzar la misma referencia; y una mayor estabilidad, pues a perturbaciones de mayor amplitud el sistema con el lazo de control LQR presenta un menor número de oscilaciones que el PID. En cuanto a las señales de control,

los reguladores LQR poseen una desventaja frente a los PID pues generan saturaciones que finalmente repercuten en el consumo de energía.

- Los métodos heurísticos como los de Ziegler-Nichols para la sintonización de controladores PID representan sólo un punto de partida para el diseño de estos controladores, esto hace estrictamente necesario la aplicación de un ajuste fino para lograr que el lazo de control tenga el comportamiento esperado.
- En cuanto a la verificación de cada guía de laboratorio en términos de claridad, coherencia y veracidad, se realizó una encuesta a 36 personas entre alumnos, docentes y egresados pertenecientes al programa de ingeniería electrónica de la Universidad Antonio Nariño; dicha encuesta se enfocó en 9 preguntas relacionadas a ciertos aspectos como el dominio de la temática asociada a los controladores, la iniciativa CDIO, organización de ambos documentos y aporte al desarrollo académico e inclusión del contenido programático del curso. Como resultado se obtuvo un alto nivel de aprobación en cuanto a los aspectos anteriormente mencionados, sin embargo, el 80,6% de los encuestados afirmaron que no tienen dominio de la temática asociada al controlador LQR, lo que es congruente con la pregunta enfocada al Syllabus de las asignaturas de Electiva I, Control I y Control II sobre abarcar las temáticas aplicadas en las guías, por lo tanto, se concluye que al no ser muy conocido el controlador LQR, el 30,6% se encuentran en desacuerdo.
- El conocimiento acerca de la iniciativa CDIO es importante para la aplicación de las guías de laboratorio, ya que constituyen una experiencia de aprendizaje para el estudiante, sin embargo, aproximadamente la mitad encuestados afirman no tener conocimiento acerca de esta iniciativa, por ende, el desarrollo e implementación de las prácticas elaboradas en este documento asociados al área de control aportan mayor dominio en cuanto a fundamentos técnicos asociados a diseñar, implementar y operar.

## **A. Anexo: Aeronavegabilidad y Operaciones para RPAS (Numeral 4.25.8.2)**

La siguiente normatividad (*CIRCULAR REGLAMENTARIA N° 002 REQUISITOS GENERALES DE AERONAVEGABILIDAD Y OPERACIONES PARA RPAS (Numeral 4.25.8.2) Principio de Procedencia 5100-082 Versión: 01 Fecha: 27/07/2015 Pág: 1 de 34, n.d.*), es establecida por la Aeronáutica Civil Colombiana. Sin embargo, el MiniDrone Parrot Rolling Spider es un dispositivo de uso pedagógico y educativo, por lo tanto, esta circular sólo aplicaría en caso de que se desee utilizar en espacios exteriores para alguna actividad diferente a la estipulada en este documento referente a prácticas de laboratorio.

La Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil es la autoridad encargada de vigilar, administrar y regular todo el espacio aéreo colombiano autorizado por el Artículo 2 del Decreto 260 de 2004. El sistema de aeronaves pilotadas en Colombia, cuenta con permisos decretados de acuerdo al numeral 4.25.8.2 del Reglamentos Aeronáuticos de Colombia con sus siglas RAC; que es solicitado por organizaciones, personal natural o jurídico y empresas para sobre volar rutas dadas en la superficie del territorio colombiano.

La Organización de Aviación Civil Internacional, junto al Sistema Regional de Cooperación para la Vigilancia de la Seguridad Operacional SRVSOP, han dispuesto en realizar un mapa de rutas entre los años 2012 y 2018 dado que distintos Estados de la Región Latinoamericana han diseñado e implementado drones, conocido como aeronaves pilotadas a distancia (RPA), recibiendo el nombre de "Aeronave" debido a que es capaz de mantener un vuelo estable y en algunos casos transportar cosas, según lo dicho en el Artículo 1789 del Código de Comercio.

El vehículo no tripulado, drones; se clasifican en dos categorías, pequeños con un peso menor o igual a 25 Kg y grandes con un peso mayor a 25Kg, estos deben contar con un

permiso para sobrevolar en cualquier lugar exclusivamente durante el día y en un lugar que cuente condiciones meteorológicas de vuelo visual. Adicionalmente, el material de sus hélices no podrá ser metálicas, debe tener un sistema GPS, no debe generar ruido excesivo ni contaminación, un color visible, y portar en algún lado del Drone la identificación de este y responsable por si ocurre un accidente u otro incidente.

## **B. Anexo: Recomendaciones, generalidades y características físicas del MiniDrone Parrot Rolling Spider.**

### **Recomendaciones:**

El MiniDrone Parrot Rolling Spider se caracteriza por ser un vehículo aéreo no tripulado diseñado para usos recreativos, de entretenimiento y académicos, y principalmente no cuenta con un mando remoto, sino que su pilotaje se realiza mediante una aplicación llamada FreeFlight3, disponible en Google Play y Apple Store.

La empresa Parrot (Parrot, n.d.) recomienda que este tipo de UAV no son aptos para niños menores de 14 años y recomienda que la persona que lo pilotee, tenga cuidado con el lugar donde lo vaya a utilizar, ya que se debe garantizar la seguridad de las personas, los animales y la propiedad en todo momento. Sin embargo, en caso de ser utilizado en interiores, se sugiere el uso de las ruedas para proteger el MiniDrone en caso de algún choque.

Por otro lado, se resalta el hecho de que el Rolling Spider no debe ser expuesto a ningún tipo de líquidos, aterrizar sobre ellos o manipularlo si se encuentra húmedo. Adicional a esto, cuidarlo del polvo y la arena, ya que puede sufrir daños irreversibles y sobre todo, en caso de cambios de algunas piezas, solo utilizar las que se son específicas para esa referencia.

Para ampliar esta sección, consulte: <https://www.parrot.com/global/support/products/parrot-rolling-spider>

- **Generalidades:**

- El Parrot Rolling Spider está elaborado en su mayoría de plástico resistente a los golpes, contando con un sistema de seguridad en las hélices, es decir, si alguna de estas golpea un objeto, se desprende evitando daños a sí misma, hacia el MiniDrone o hacia su entorno, sin embargo, las llantas conforman otro sistema de protección (es opcional si se utiliza o no, ya que es desmontable) para prevenir colisiones y a su vez permiten al dispositivo realizar maniobras desde las más complejas como trepar paredes o andar por el techo, hasta las más sencillas como rodar por el piso.
- Este dispositivo cuenta con diferentes sensores capaz de detectar los estímulos internos a los que es sometido. Entre estos sensores encontramos un giroscopio que sirve para medir, mantener o cambiar la orientación del MiniDrone y cuenta con tres ejes, un acelerómetro encargado de medir la fuerza de aceleración con tres ejes, un sensor ultrasónico capaz de detectar la proximidad con los objetos cercanos y finalmente una cámara que se encuentra ubicada en la parte inferior que permite captar imágenes al momento del vuelo.

- **Características físicas:**

- Peso: 54 gramos aproximadamente.
- Dimensiones: 19,3 x 6,6 x 20,6 cm.
- Almacenamiento interno: 1GB.
- Resolución de cámara: 0,3 MP.
- Batería: litio de 550 mA.
- Autonomía de vuelo: de 6 a 8 minutos aproximadamente.
- Velocidad máxima: 18 Km/h - 11 MPH
- Distancia máxima de alcance: 20 m - 66 ft
- Colores disponibles: Rojo, blanco y azul.
- Compatibilidad: Android, iOS y Windows Phone.

- **¿Qué contiene la caja?**

- Rolling Spider
- Un set de hélices.

- Dos Ruedas de protección.
- Bastón que conecta a las ruedas entre sí y con el MiniDrone.
- Batería de litio removible.
- 1 lote de pegatinas.
- Cable Micro-USB.
- Manual de instrucciones.

## C. Anexo: Modelo matemático del cuadricóptero.

El modelo matemático seleccionado se basa en el utilizado en (Ashis & Rahul Sharma, 2019), donde se parte como referencia el diseño genérico de un cuadricóptero proporcionado por Peter Corke.

Las particularidades físicas del dispositivo MiniDrone se miden empleando los dos marcos de referencia. Algunas de las particularidades físicas del quadcopter como roll, pitch, yaw y las velocidades angulares se calculan en el marco de la tierra. Determinadas propiedades, como las aceleraciones lineales, se calculan en el marco del cuerpo. Los vectores de posición lineal y angular del quadcopter en el marco de tierra son  $[x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$  de modo que  $[u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$  son los vectores de velocidad lineal y angular en el marco del cuerpo. El vínculo en los dos marcos de referencia es:

$$v = R \cdot v_b \quad (C.1)$$

$$\omega = T \cdot \omega_b \quad (C.2)$$

Donde  $v=[x \ \dot{y} \ \dot{z}]^T$ ,  $\omega=[\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ ,  $v_b=[u \ v \ w]^T$ ,  $v_b=[p \ q \ r]^T$  y R es la matriz de giro que rota los puntos de un cuadro a otro cuadro . La matriz de modificación angular T está dada por:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & s(\phi)t(\theta) & c(\phi)t(\theta) & 0 & c(\phi) & -s(\phi) & 0 \\ 0 & c(\phi) & s(\phi) & 0 & -s(\phi) & c(\phi) & 0 \\ 0 & -s(\phi) & c(\phi) & 0 & c(\theta) & s(\theta) & 0 \end{bmatrix} \quad (C.3)$$

La fuerza máxima experimentada por el dispositivo es la adición de todas las fuerzas particulares que actúan en las coordenadas  $x \ y \ z$  que viene dada por la siguiente ecuación:

$$F_B = [f_x \ f_y \ f_z] = m(\omega_b \times v_b + \dot{v}_b) \quad (C.4)$$

Donde  $m$  es la masa del sistema y  $f_x$ ,  $f_y$  y  $f_z$  son las fuerzas que actúan en las coordenadas  $x, y$  y  $z$  respectivamente.

El par total en el MiniDrone se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$M_B = [M_x \ M_y \ M_z] = \omega_b \times (I \cdot \omega_b) + I \cdot \dot{\omega}_b \quad (C.5)$$

Donde  $M_x$ ,  $M_y$  y  $M_z$  son los pares que actúan en las coordenadas  $x, y$  y  $z$  respectivamente. La matriz de inercia  $I$  se procede a calcular mediante la siguiente ecuación:

$$I = \text{diag}(I_x, I_y, I_z) \quad (C.6)$$

$f_\omega = [f_{\omega x}, f_{\omega y}, f_{\omega z}]$  Es la fuerza que ejerce sobre el MiniDrone gracias al efecto de la ventisca. Por otro lado,  $T_B$  es la matriz que incluye la diferencia de las velocidades provenientes del rotor.

$$T_B = [T_x \ T_y \ T_z]^T \quad (C.7)$$

Los pares generados por el viento en el dispositivo viene dado por:

$$T_\omega = [T_{\omega x} \ T_{\omega y} \ T_{\omega z}]^T \quad (C.8)$$

Se obtiene una matriz que equivale a la velocidad elevada al cuadrado de los rotores, pero a su vez, es proporcional tanto a la fuerza de entrada como a los pares y se obtiene:

$$[f_t \ f_x \ f_y \ f_z] = [b(\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2) \ bl(\delta_3^2 - \delta_1^2) \ bl(\delta_4^2 - \delta_2^2) \ d(\delta_2^2 + \delta_4^2 + \delta_3^2 + \delta_1^2)] \quad (C.9)$$

Donde la distancia que existe en medio del dron y el rotor se indica por la expresión  $l \cdot b$ . Simboliza el factor de empuje y  $d$  simboliza el factor de arrastre y  $\delta_i$  es la velocidad del rotor para  $i = \{1,2,3,4\}$ . Las variables de estado son:

$$X = [x \ y \ z \ u \ v \ w \ \phi \ \theta \ \varphi \ p \ q \ r]^T \quad (C.10)$$

Una vez examinada la cinemática y dinámica del quadcopter, el modelo no lineal  $X = f(X, U)$  se define mediante la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \\ u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w[s(\phi)s(\varphi) + c(\phi)c(\varphi)s(\theta)] - v[c(\phi)s(\varphi) - c(\varphi)s(\phi)s(\theta)] + u[c(\varphi)c(\theta)] \\ v[c(\phi)c(\varphi) + s(\phi)s(\varphi)s(\theta)] - w[c(\varphi)s(\phi) - c(\phi)s(\varphi)s(\theta)] + u[c(\theta)s(\varphi)] \\ w[c(\varphi)c(\theta)] - u[s(\theta)] - v[c(\theta)s(\phi)] \\ p + r[c(\phi)t(\theta)] - q[s(\phi)t(\theta)] \\ q[c(\phi)] - r[s(\phi)] \\ r \frac{c(\phi)}{c(\theta)} + q \frac{s(\phi)}{c(\theta)} \\ rv - qw - g[s(\theta)] + \frac{f_{wx}}{m} \\ pw - ru + g[s(\phi)c(\theta)] + \frac{f_{wy}}{m} \\ qu - pv + g[c(\theta)c(\phi)] + \frac{f_{wz} - f_t}{m} \\ \frac{I_y - I_z}{I_x} rq + \frac{\tau_x - \tau_{wx}}{I_x} \\ \frac{I_z - I_x}{I_y} pr + \frac{\tau_y - \tau_{wy}}{I_y} \\ \frac{I_x - I_y}{I_z} pq + \frac{\tau_z - \tau_{wz}}{I_z} \end{bmatrix} \quad (\text{C.11})$$

El modelo no lineal expresado en la **ecuación (C.11)** se podrá simplificar aún más descartando las fuerzas generadas por el viento en el dispositivo. Para incluir un control óptimo, el sistema no lineal necesita regresar a su estado de proporcionalidad, es decir deberá ser lineal.

## B. Linealización

Las ecuaciones de espacio de estado no lineal se pueden linealizar alrededor de un punto de operación  $\bar{x}$  con un valor de entrada constante  $\bar{u}$ . Se consideró una condición de actitud cero para la linealización. La linealización del modelo quadcopter se ha realizado para una configuración flotante y se lleva a cabo para obtener un modelo de espacio de estado lineal generalizado de la forma,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_u(t) \quad (\text{C.12})$$

Donde,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.13})$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.14})$$

A se define como la matriz de condición o estado y B la matriz de acceso respectivamente. El sistema debe estrictamente controlado para realizar el diseño de controladores PID Y LQR. Los criterios empleados para simular el modelo en Matlab se enumeran a continuación:

- Masa del cuadricóptero (m): 0.068 kg
- Constante de gravedad (g):  $9.81 \frac{m}{s^2}$

- MOI en el eje X ( $I_x$ ):  $0.0686 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
- MOI en el eje Y ( $I_y$ ):  $0.092 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
- MOI en el eje Z ( $I_z$ ):  $0.1366 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
- Densidad del aire ( $\rho$ ):  $1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- Factor de empuje ( $b$ ): 0.0107
- Longitud del centro del rotor al Drone ( $l$ ): 0.0624 m
- Radio del rotor ( $R$ ): 0.033 m

## D. Anexo: Guía de conexión entre el MiniDrone Parrot Rolling Spider con el sistema operativo de Windows y el software Matlab.

En este anexo se presenta una guía de conectividad entre el equipo o computador a utilizar, el MiniDrone Rolling Spider y el Software Matlab. Cabe mencionar que se debe contar con la disponibilidad de los siguientes materiales para realizar una conexión exitosa:

### **Software:**

- a. Matlab 2019a o superiores con Toolbox de Simulink.

### **Hardware:**

- a. Computador con las siguientes características:
  - Si es con sistema operativo Windows que sea de 7 en adelante, pero si es con sistema operativo MacOS, que sea de la versión 10.10 o 10.11.
  - Procesador Intel o AMD x86-63.
  - Disco duro de 2GB o superior.
  - Memoria RAM de 1GB mínimo, pero se recomienda de 4GB.
  - Tarjeta gráfica de soporte para OpenGL 3.3 con mínimo 1GB en GPU.
- b. MiniDrone Parrot Rolling Spider.
- c. Bluetooth CSR 4.0.

**NOTA:** En caso de no contar con Matlab, la Universidad Antonio Nariño creó una guía donde se explica el paso a paso de descarga y activación de la licencia estudiantil de este software.

## ANEXO D. Guía de conexión entre el MiniDrone Parrot Rolling Spider con el sistema operativo de Windows y el software Matlab.

### RESUMEN

Esta guía establece el paso a paso para lograr adecuada comunicación vía Bluetooth entre el MiniDrone Rolling Spider, un sistema operativo de Windows 7, 8 o 10, y el software Matlab 2017 o 2020.

### REQUISITOS PRELIMINARES

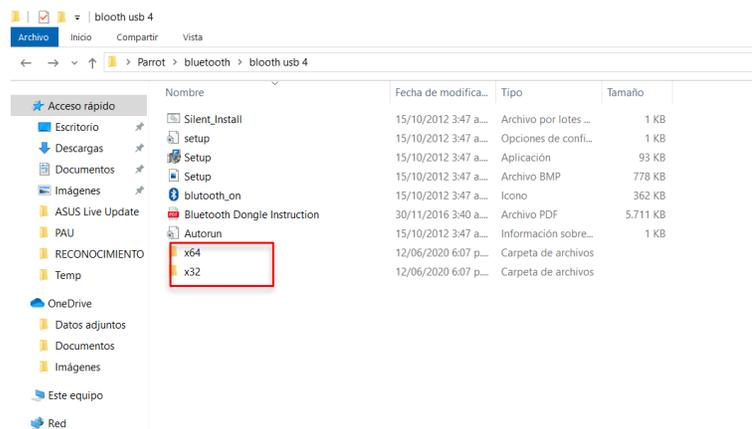
- MiniDrone Parrot Rolling Spider.
- Cable de conexión USB entre el MiniDrone y el computador.
- Adaptador Bluetooth CSR 4.0.
- Drivers de instalación del CSR 4.0.
- Matlab con Simulink.

### PROCEDIMIENTO CONECTIVIDAD

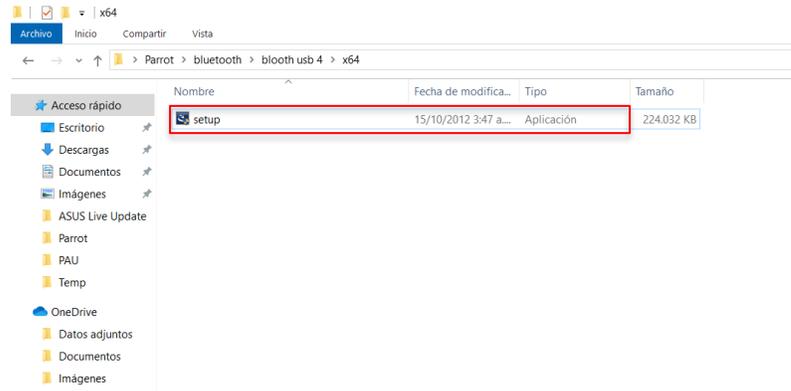
#### 1. Enlace entre computadora y MiniDrone

El enlace que conectara la computadora con el Minidrone será mediante vía bluetooth para esto debemos tener el adaptador CCR V4.0 para instalar los drivers de fabrica del dispositivo, dichos drivers se deberán instalar según el número de bits con los que cuenta la computadora en la que se realizara el laboratorio.

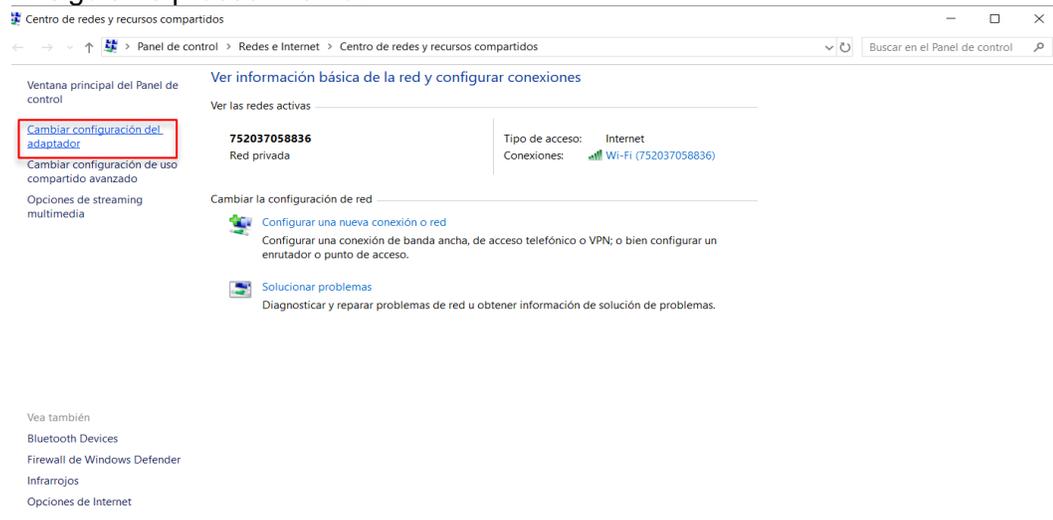
-Seleccionar la carpeta según el número de bits de la computadora.



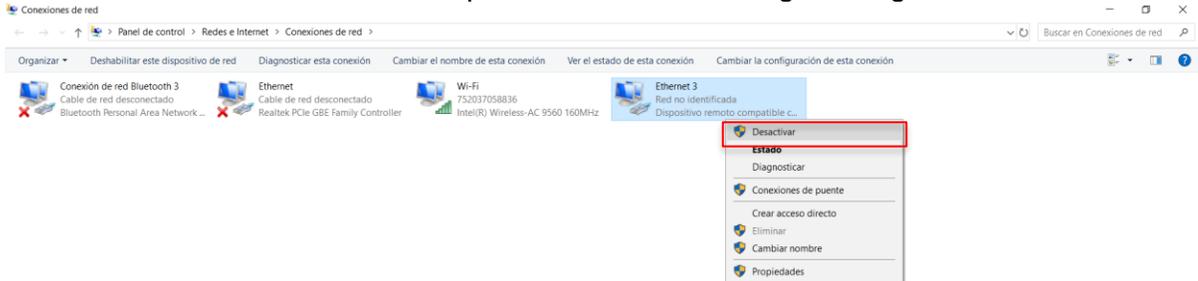
Construcción de prácticas de laboratorio bajo la iniciativa CDIO a partir de la implementación de las técnicas de control PID y LQR en un MiniDrone Parrot Rolling Spider para la Universidad Antonio Nariño.



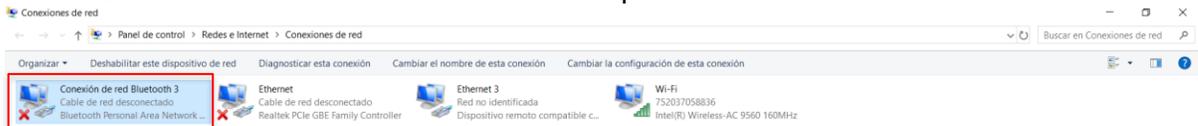
- Realizada la instalación de los drivers procedemos a conectar nuestro dispositivo a la computadora, para esto debemos cambiar la dirección IP de la red realizando el siguiente procedimiento:



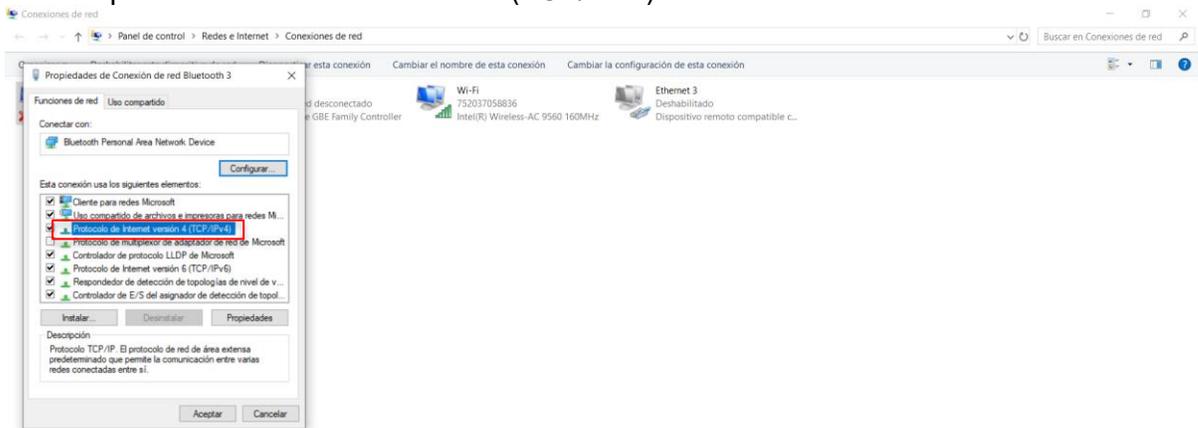
- Inhabilitar la red 3 de la computadora, con esto se logra configurar la dirección IP.



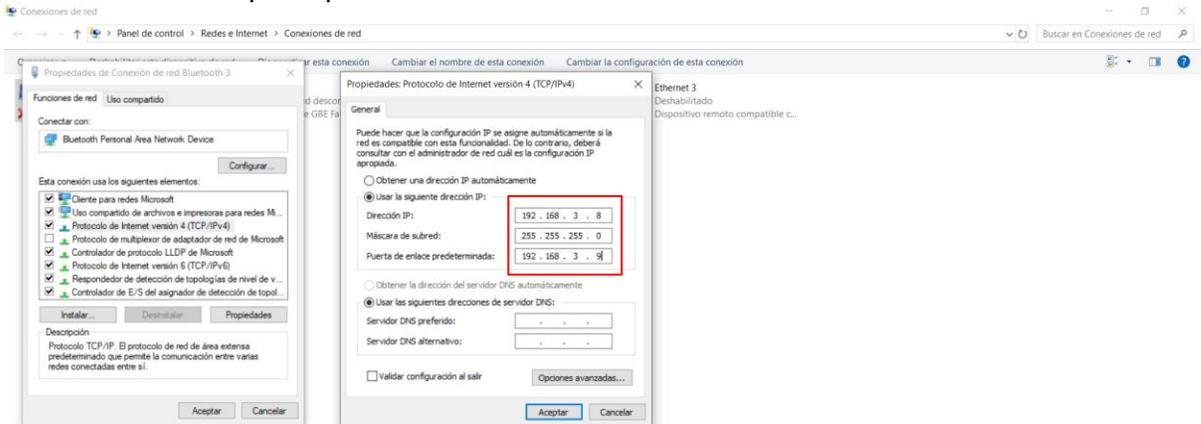
- Seleccionar la conexión bluetooth del dispositivo Drone.



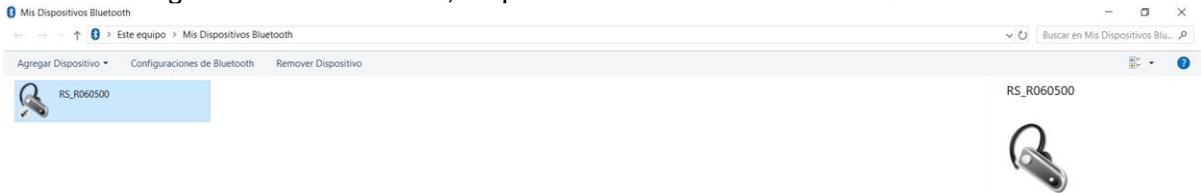
- Se debe seleccionar propiedades de la conexión bluetooth y buscar la opción "protocolo de internet versión 4 (TCP/IPv4)".



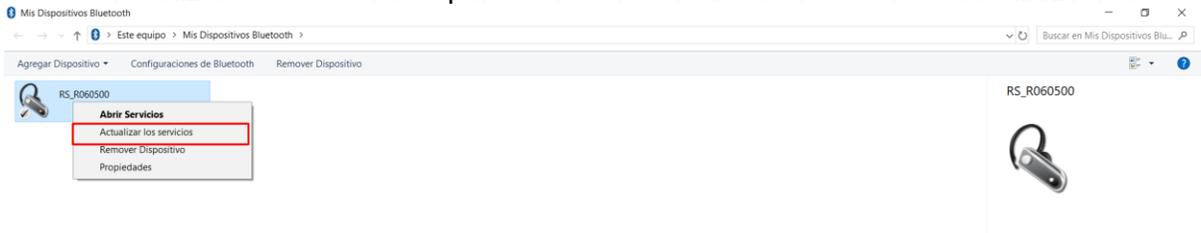
- Realizado esto procedemos a escribir los valores indicados los cuales son necesarios para que la IP de la red funcione correctamente.



- Configurada la IP de la red, se procede a establecer la conexión con el Minidrone.



- Actualizamos los servicios para conectar de manera efectiva nuestro MiniDrone.



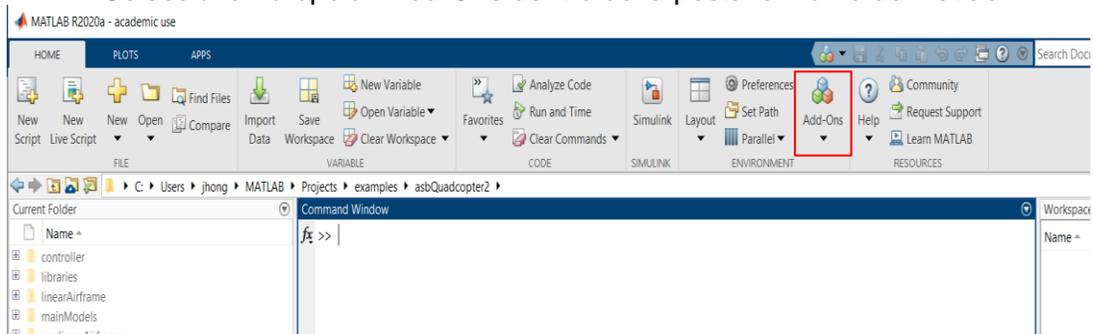
- Seleccionar conectar.



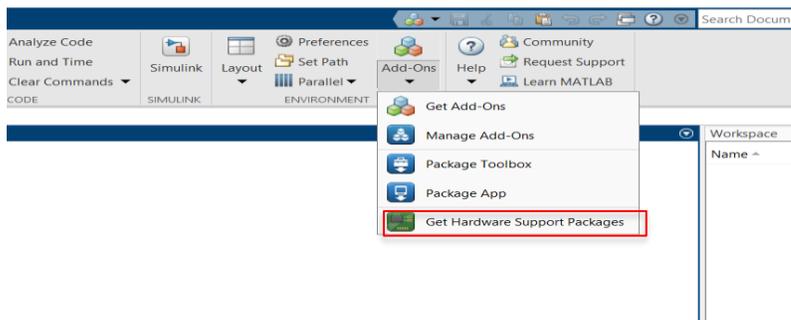
## 2. Instalación de toolbox

Conectado el dispositivo a la computadora se debe tener instalado el software Matlab con sus respectivos toolbox para realizar el control de Drone, estos toolbox se deben instalar a través del programa Matlab de la siguiente manera:

- Seleccionar la opción Add-Ons dentro de la pestaña Home de Matlab



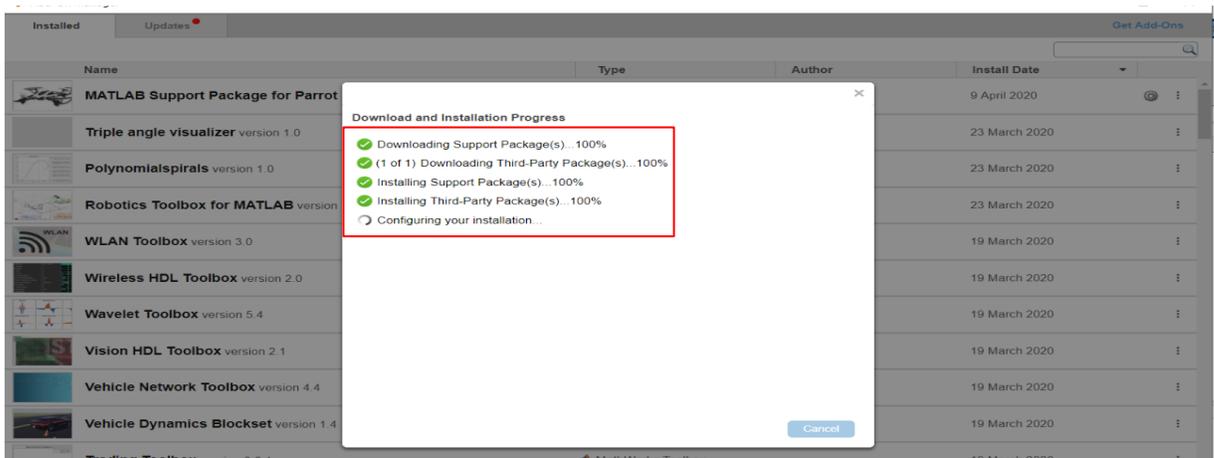
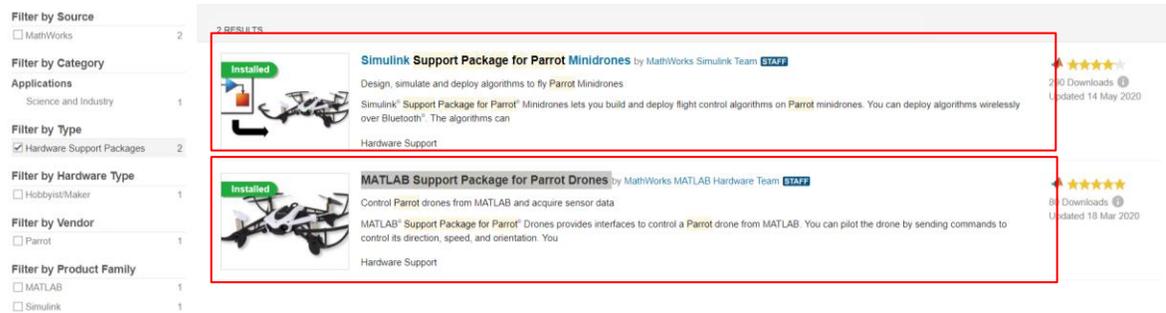
- Seleccionar “Get hardware support package”.



- Al abrir la opción “Get Hardware Support Package” proceder a buscar los toolbox denominados Simulink Support Package for Parrot Minidrones y Matlab Support Package for Parrot drones, se deberán descargar e instalar. (*Parrot Drone Support from MATLAB - Hardware Support - MATLAB & Simulink, n.d.*; *Parrot Minidrones Support from Simulink - Hardware Support - MATLAB & Simulink, n.d.*)

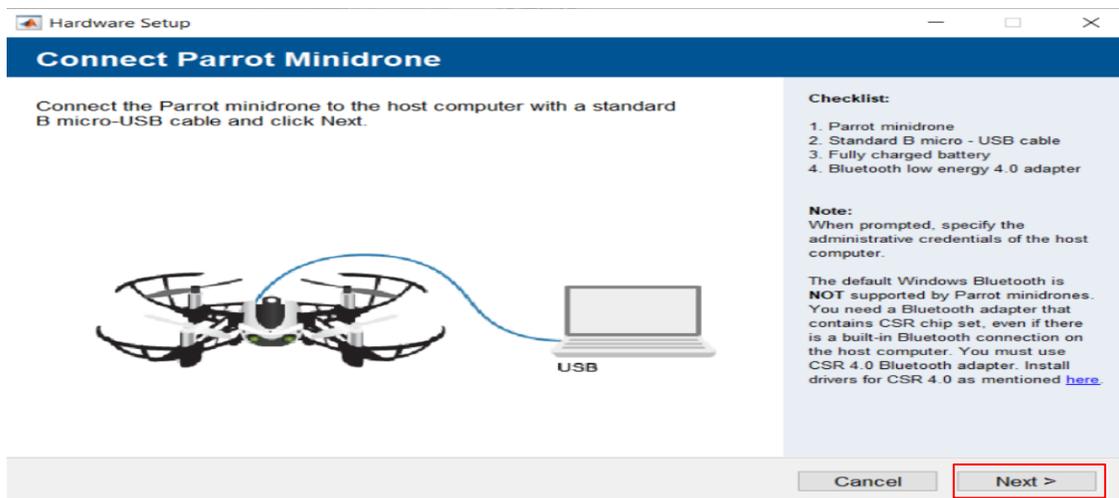
72

Construcción de prácticas de laboratorio bajo la iniciativa CDIO a partir de la implementación de las técnicas de control PID y LQR en un MiniDrone Parrot Rolling Spider para la Universidad Antonio Nariño.

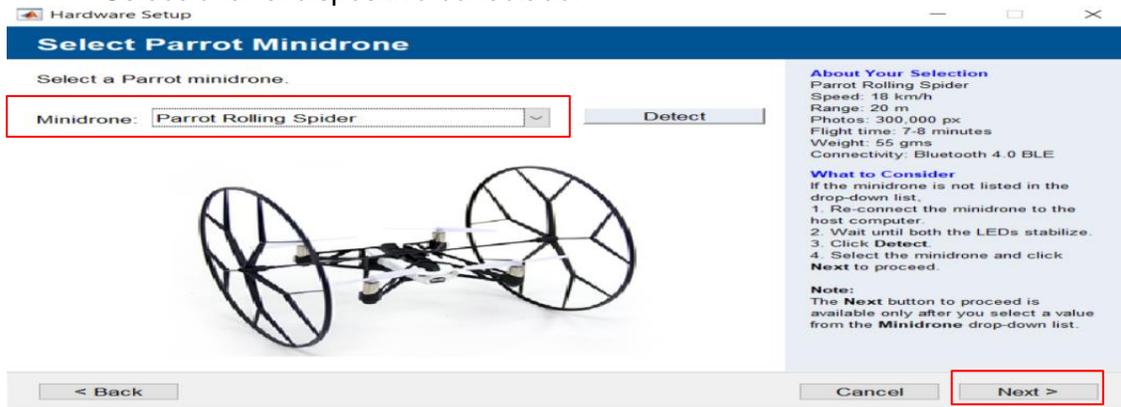


### 3. Conexión de Minidrone

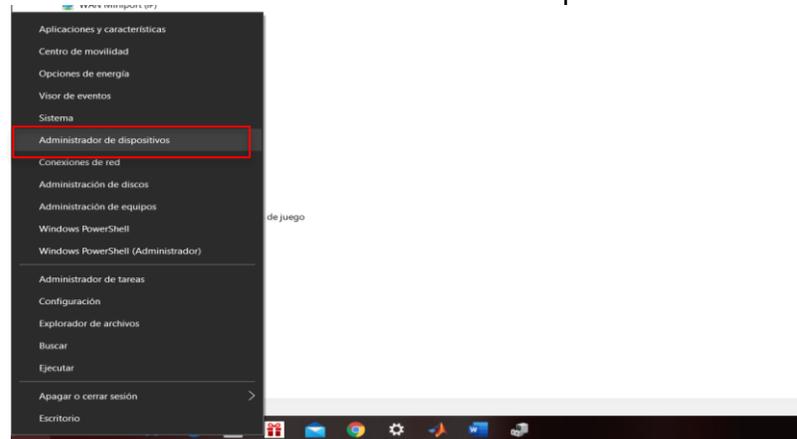
- Realizada la instalación de los toolbox estrictamente se tendrá que conectar el Mini Drone mediante cable USB para actualizar los controladores.



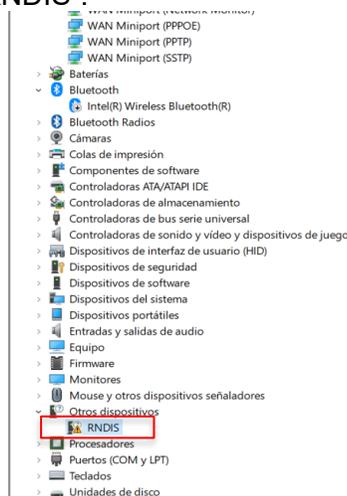
- Seleccionar el dispositivo conectado.



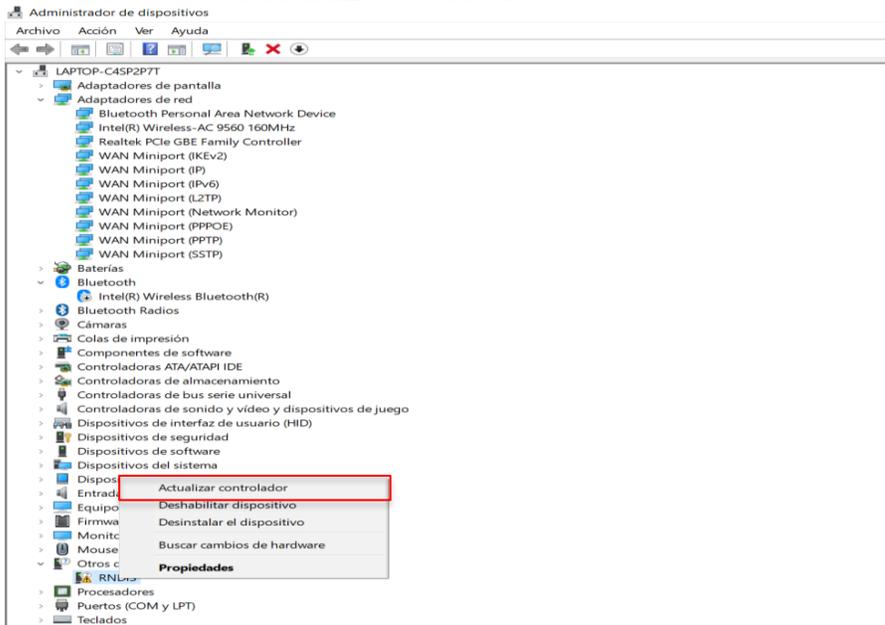
- Click derecho seleccionando administrador de dispositivos.



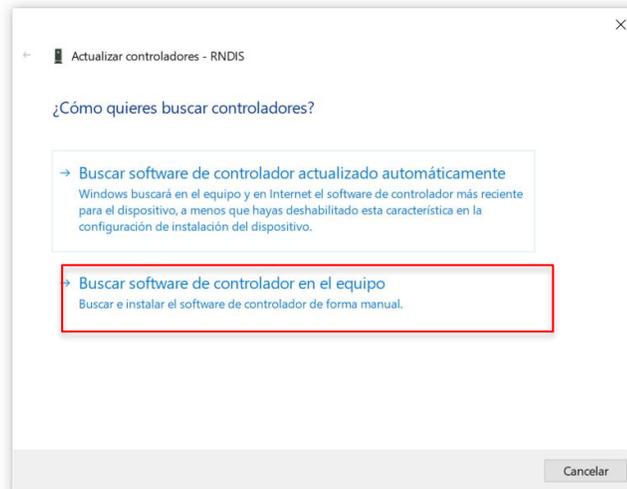
- Realizado el enlace vía bluetooth aparecerá la opción “otros dispositivos”, seleccionar “RNDIS”.



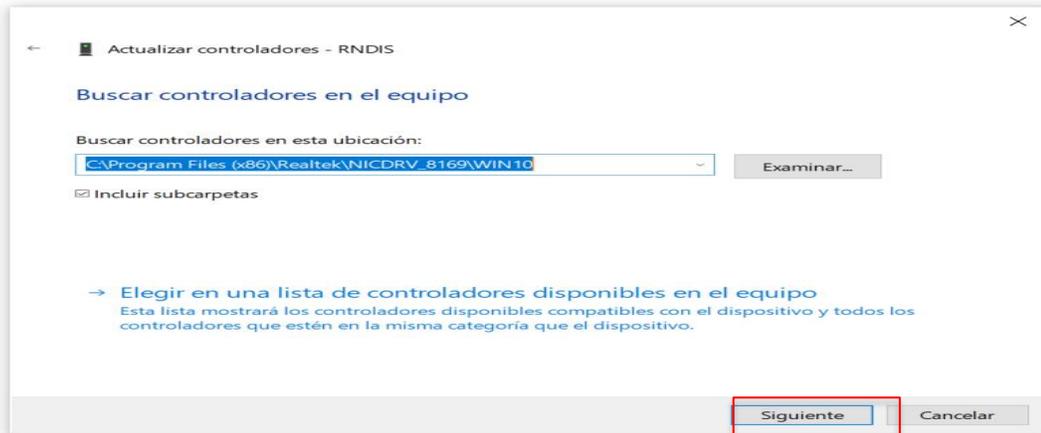
- Seleccionar actualizar controlador.



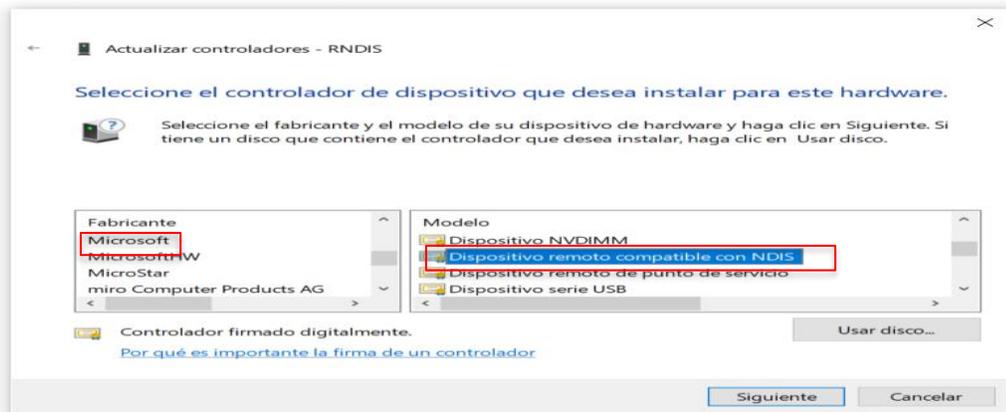
- Debe aparecer el siguiente menú, por tanto seleccionar “buscar software de controlador en el equipo”.



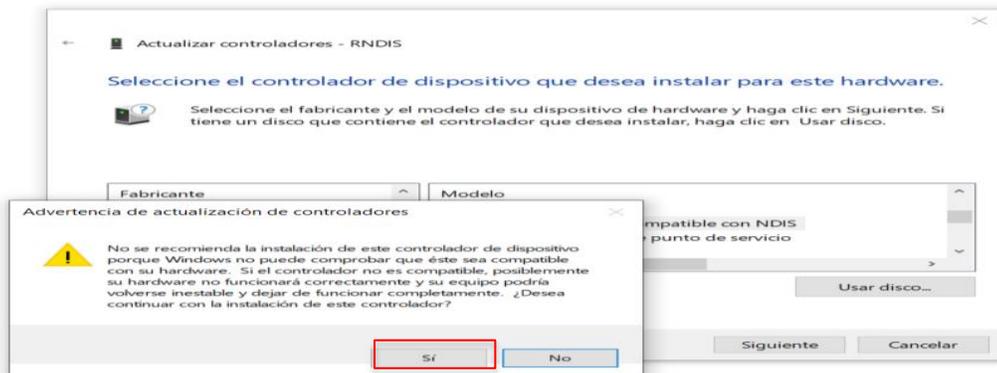
- Seleccionar “siguiente”.



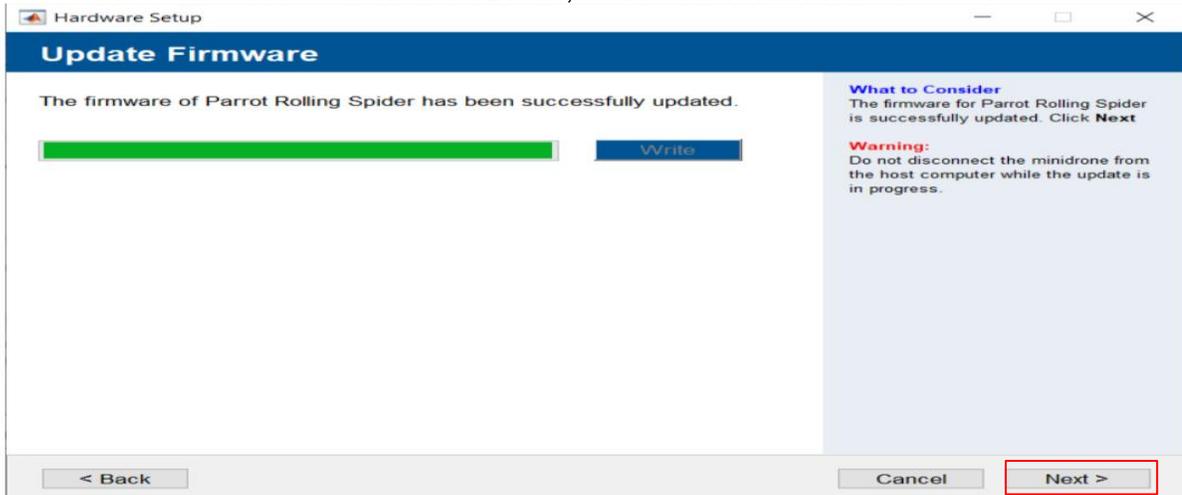
- Configurada Previamente la direccion IP de la red, instalar los controladores para el hardware. El fabricante a seleccionar sera “Microsoft” y el modelo debera ser “Dispositivo remoto compatible con NDIS”.



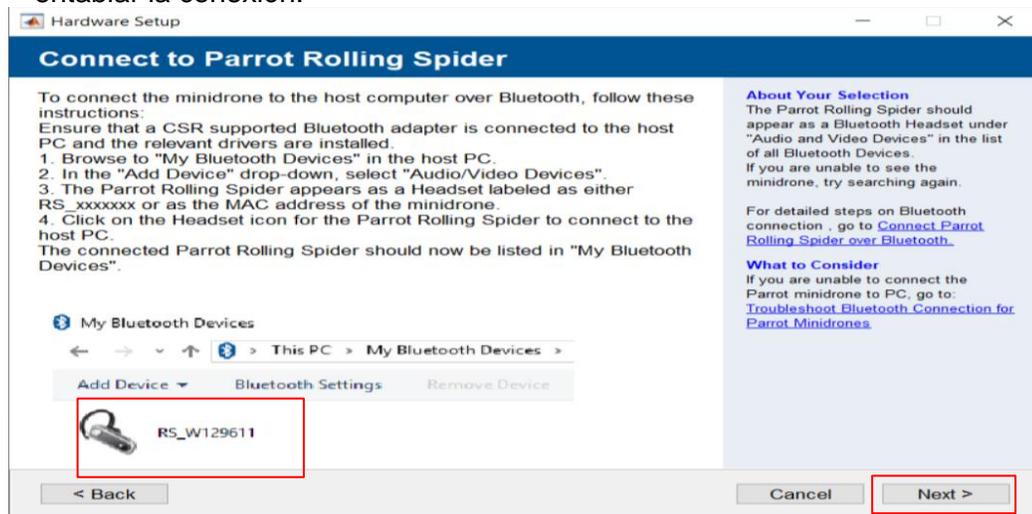
- Click en la opcion “Si”.



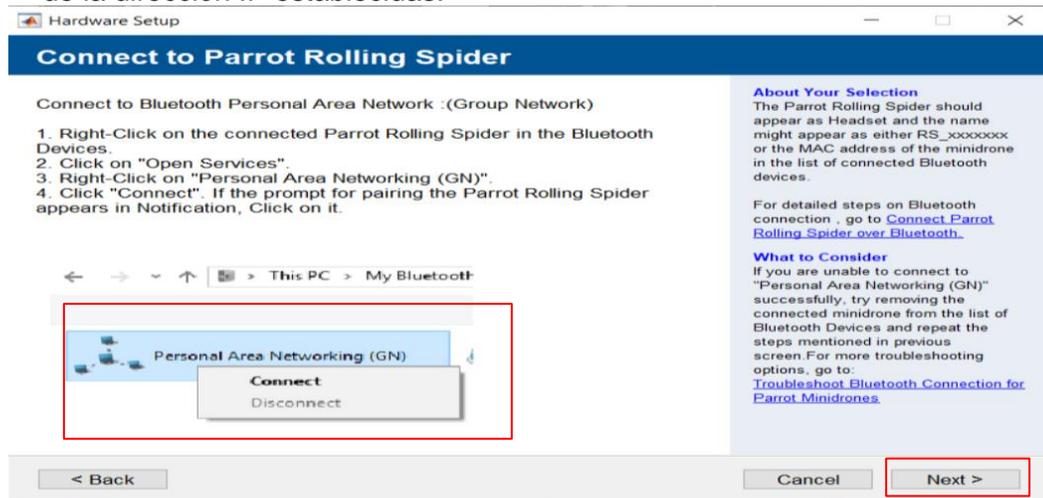
- Proceder con la Conexión del Drone, se instalará el firmware de este.



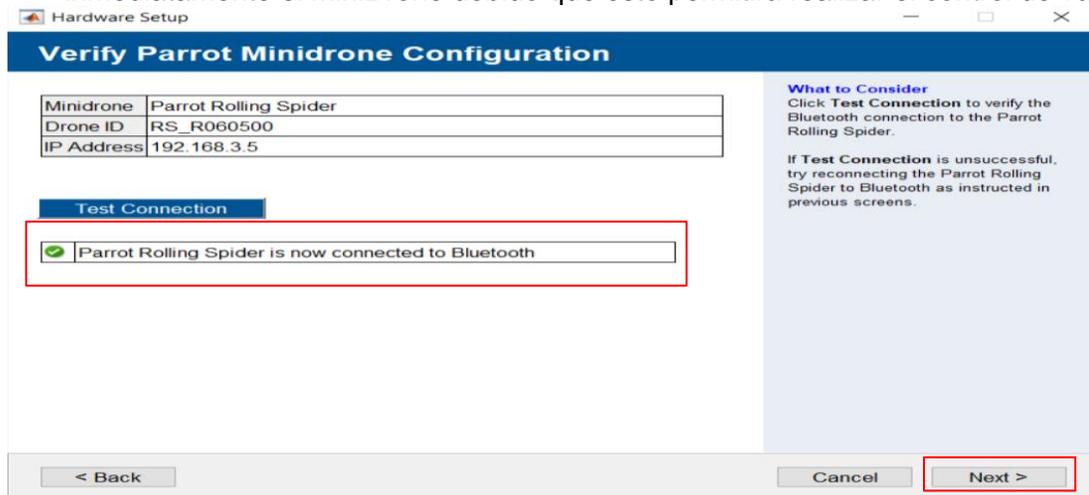
- Desconectar el dispositivo del cable USB, este se deberá estar encendido para entablar la conexión.



- Seguido de esto el dispositivo se conectará a la red local mediante la configuración de la dirección IP establecidas.



- Realizada toda la configuración de conexión, el software Matlab detectará inmediatamente el MiniDrone debido que esto permitirá realizar el control de vuelo.



## RECOMENDACIONES

- Deshabilitar el Bluetooth que usa por defecto el computador con el cual se está trabajando.
- Asegurarse de comprar el CSR 4.0 original, ya que con uno genérico no se garantiza una conexión exitosa.

## REFERENCIAS

*Instale RNDIS para Parrot Minidrones - MATLAB y Simulink.* (n.d.). Retrieved June 14, 2020, from <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/parrot/ug/intro.html>

*Parrot Drone Support from MATLAB - Hardware Support - MATLAB & Simulink.* (n.d.). Retrieved June 14, 2020, from <https://www.mathworks.com/hardware-support/parrot-drone-matlab.html>

*Parrot Minidrones Support from Simulink - Hardware Support - MATLAB & Simulink.* (n.d.). Retrieved June 14, 2020, from <https://www.mathworks.com/hardware-support/parrot-minidrones.html>

## Bibliografía

- Azari, M. M., Rosas, F., Chiumento, A., Ligata, A., & Pollin, S. (2018). Uplink performance analysis of a drone cell in a random field of ground interferers. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC, 2018-April*, 1–6.  
<https://doi.org/10.1109/WCNC.2018.8377426>
- Erat, O., Isop, W. A., Kalkofen, D., & Schmalstieg, D. (2018). Drone-Augmented human vision: Exocentric control for drones exploring hidden areas. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(4), 1437–1446.  
<https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2794058>
- ESTÁNDARES CDIO v. 2.0 (con rúbricas personalizadas). (2010). <http://www.cdio.org>.
- Estrada Velasco, M. V., & Palmay Paredes, D. F. (2016). *Evaluación de las Técnicas de Control Óptimo LQR y LQG Aplicado al Diseño del Sistema de Control de Estabilidad de Vuelo de un Vehículo Aéreo de Vigilancia*.
- Evora Jiménez, E. (2016). *Sistema de procesamiento de imágenes NIR e IR aéreas para agricultura de precisión*.
- Gómez, Christian David ; Mora, L. C. (2018). *Diseño e implementación de un helicóptero de 2 grados de libertad con control PID para la Universidad Antonio Nariño seccional Neiva*.
- Hua, M. D., Hamel, T., Morin, P., & Samson, C. (2009). A control approach for thrust-propelled underactuated vehicles and its application to VTOL drones. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(8), 1837–1853.  
<https://doi.org/10.1109/TAC.2009.2024569>
- Huera Paredes, J. V., & Vinicio, J. (2017). *Sistema Aéreo de drones para mejorar el levantamiento topográfico de los predios de la ciudad de Tulcán*.
- Johnson, M. A., & Moradi, M. H. (n.d.). *New Identification and Design Methods*. Retrieved March 26, 2020, from <http://www.mathworks.com/>
- Karaman, S., & Riether, F. (2016). *Getting started with MIT's Rolling Spider MATLAB Toolbox An MIT take-home lab for 16.30 Feedback Control Systems*.  
<https://github.com/Parrot-Developers/RollingSpiderEdu>

- Miehlbradt, J., Cherpillod, A., Mintchev, S., Coscia, M., Artoni, F., Floreano, D., & Micera, S. (2018). Data-driven body-machine interface for the accurate control of drones. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(31).
- Minin, M., Kriushova, A., & Muratova, E. (2015). Assessment of the CDIO syllabus learning outcomes: From theory to practice. *2015 International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL)*, 689–694.  
<https://doi.org/10.1109/ICL.2015.7318110>
- Muhammad, A., Sanusi, S. N. A., Muhamad, S. H. A., Sayed Jamaludin, S. I., Shah Buddin, M. M. H., Sukor, M. Z., Idris, S. A., Ab Aziz, N. S., & Ismail, M. I. (2018). CDIO Implementation in Separation Processes Course for Chemical Engineering. In *Proceedings of the Second International Conference on the Future of ASEAN (ICoFA) 2017 – Volume 2* (pp. 465–473). Springer Singapore.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-10-8471-3\\_46](https://doi.org/10.1007/978-981-10-8471-3_46)
- Nelson Gatica, Z., Carlos Muñoz, P., & Patricio Sellado, A. (2017). Real fuzzy PID control of the UAV AR.Drone 2.0 for hovering under disturbances in known environments. *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON 2017 - Proceedings, 2017-January*, 1–6.  
<https://doi.org/10.1109/CHILECON.2017.8229634>
- Pinto Bermúdez, E., Matía, F., Pearson, E., & Hall, P. (2010). *Ingeniería de control moderna*. [www.pearsoneducacion.com](http://www.pearsoneducacion.com)
- Restrepo, G., & Lopera, M. A. (n.d.). *CDIO: Una gran estrategia de formación en ingeniería*.
- Silveira, A. S., Silva, A. F., Augusto, J., Real, F., & Silva, O. F. (n.d.). *CENTRALIZED MULTIVARIABLE LQG CONTROL SYSTEM FOR LONGITUDINAL AND LATERAL SPEED HOLD AUTOPILOT FOR THE AR.DRONE 2.0 QUADCOPTER*.
- Understanding PID Control, Part 1: What Is PID Control? Video - MATLAB*. (n.d.). Retrieved June 8, 2020, from <https://www.mathworks.com/videos/understanding-pid-control-part-1-what-is-pid-control--1527089264373.html>
- Wang, L., Li, L., & Wu, X. (2018). Teaching reform and practice of the course mechanism manufacture technology basis based on CDIO education foundation. *Lecture Notes of*

- the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST, 243, 162–168. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93719-9\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93719-9_21)*
- [1] “Spareparts - Parrot Rolling Spider | Parrot Official.” [Online]. Available: <https://www.parrot.com/global/minidrones/parrot-rolling-spider/pieces-detachees>. [Accessed: 24-Feb-2020]. (n.d.). *Spareparts - Parrot Rolling Spider | Parrot Official*. Retrieved February 24, 2020, from <https://www.parrot.com/global/minidrones/parrot-rolling-spider/pieces-detachees>
- Ashis, C. K., & Rahul Sharma, K. (2019). Dynamic Modeling and Altitude Control of Parrot Rolling Spider using LQR. *2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies, ICICICT 2019*, 1377–1381. <https://doi.org/10.1109/ICICICT46008.2019.8993150>
- CIRCULAR REGLAMENTARIA N° 002 REQUISITOS GENERALES DE AERONAVEGABILIDAD Y OPERACIONES PARA RPAS (Numeral 4.25.8.2) Principio de Procedencia 5100-082 Versión: 01 Fecha: 27/07/2015 Pág: 1 de 34.* (n.d.).
- Enfoque Descriptivo, U., & Walter D Cova, I. J. (n.d.). *CONTROL PID. MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID.* (n.d.).
- Parrot. (n.d.). *Indice.*
- Pinto Bermúdez, E., Matía, F., Pearson, E., & Hall, P. (2010). *Ingeniería de control moderna*. [www.pearsoneducacion.com](http://www.pearsoneducacion.com)
- Engineering, LNICST (Vol. 243, pp. 162–168). Springer Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93719-9\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93719-9_21)
- Capítulo 7 Control Multivariable Capítulo 7 Control Multivariable 7.1-Introducción.* (n.d.).
- Gómez, Christian David ; Mora, L. C. (2018). *Diseño e implementación de un helicóptero de 2 grados de libertad con control PID para la Universidad Antonio Nariño seccional Neiva.*
- Morales-menendez, R. (2014). *Sistemas de Control Moderno . Volumen I : Sistemas de Tiempo Continuo . Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey , México 2012 . January 2011.*
- Pinto Bermúdez, E., Matía, F., Pearson, E., & Hall, P. (n.d.). *Ingeniería de control*

- moderna*. Retrieved March 1, 2020, from [www.pearsoneducacion.com](http://www.pearsoneducacion.com)
- Restrepo, G., & Lopera, M. A. (n.d.). *CDIO: Una gran estrategia de formación en ingeniería*.
- Rozo Nader, J. (n.d.). *IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA CDIO EN LAS ASIGNATURAS DE INGENIERÍA DEL SOFTWARE DE LA UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL BARRANQUILLA*. Retrieved July 16, 2020, from <https://acofipapers.org/index.php/ei/2014/paper/viewFile/654/243>
- Gallagher, J., & Goodwine, B. (n.d.). CDIO-ORIENTED INVERTED PENDULUM CONTROL PROJECT FOR UNDERGRADUATE ENGINEERING STUDENTS.