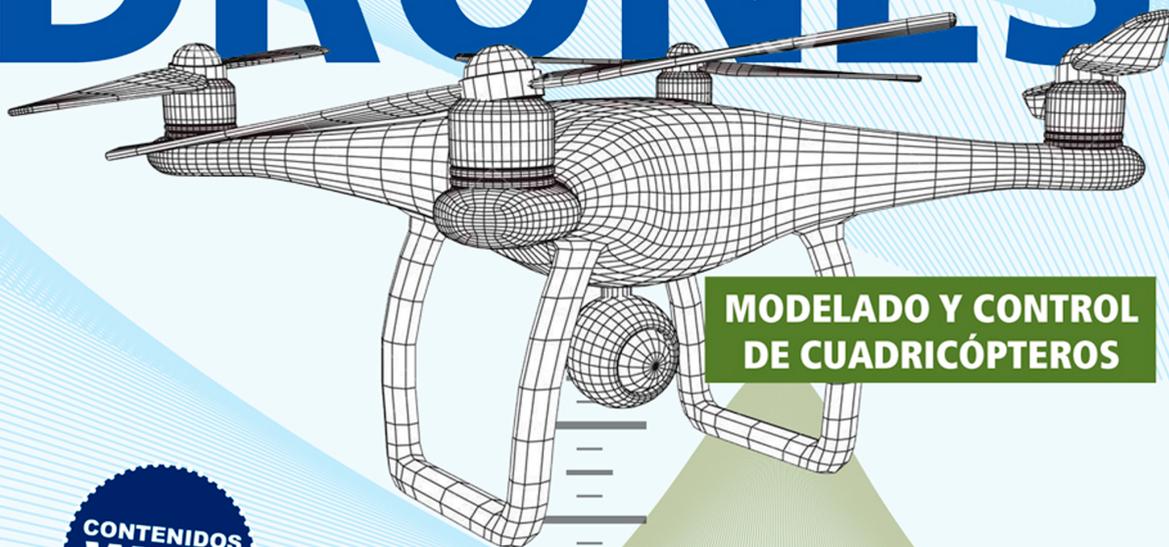


Miranda | Garrido | Aguilar | Herrero

DRONES



MODELADO Y CONTROL
DE CUADRÍCÓPTEROS

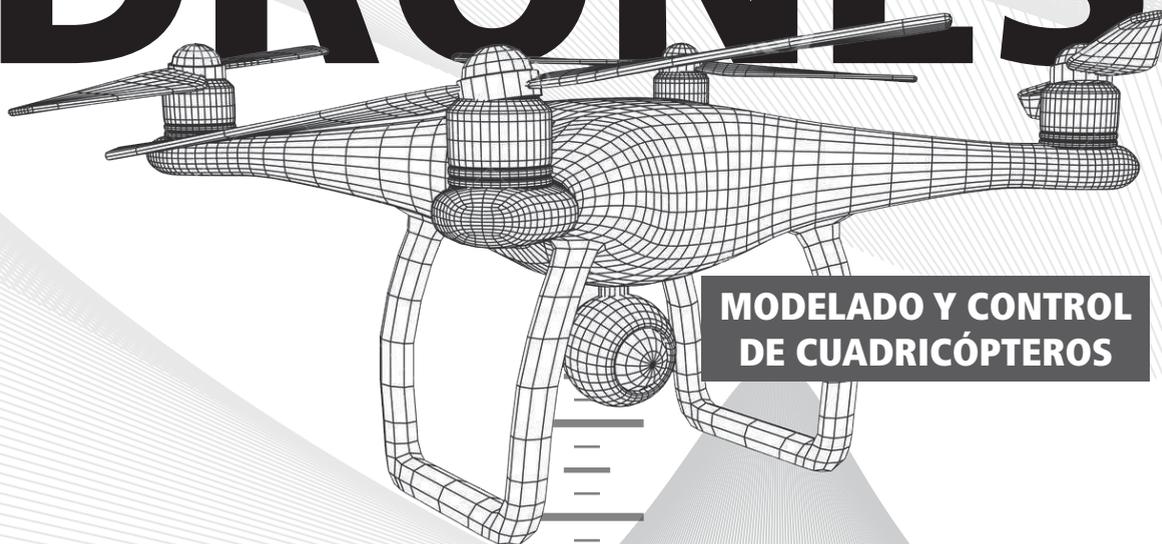
CONTENIDOS
WEB

 Alfaomega

1945-2020
Marcombo **75** años

Miranda | Garrido | Aguilar | Herrero

DRONES



**MODELADO Y CONTROL
DE CUADRICÓPTEROS**



Drones
Modelado y control de cuadricópteros

Roger Miranda Colorado, Rubén Alejandro Garrido Moctezuma,
Luis Tupak Aguilar Bustos y José Ernesto Herrero Brito

Derechos reservados © Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México
Primera edición: septiembre de 2018
ISBN: 978-607-538-314-9

Primera edición: MARCOMBO, S.L. 2020

© 2020 MARCOMBO, S.L.
www.marcombo.com

«Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra».

ISBN: 978-84-267-2819-7
D.L.: B-2751-2020

Impreso en Servicepoint
Printed in Spain

Acerca de los autores



Dr. Roger Miranda Colorado.

Roger Miranda Colorado. Doctor en Ciencias en Control Automático por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN). Su desempeño ha sido reconocido mediante la certificación *Certified Solidworks Associate* (CSWA) por parte de Dassault Systèmes SolidWorks Corporation y el *Emblema de Primer Lugar* de la carrera de Ingeniería Electrónica. Cuenta con gran experiencia docente en diversas instituciones de educación superior, así como en el posgrado del Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital del Instituto Politécnico Nacional (CITEDI-IPN). Ha impartido diversas asignaturas incluyendo Mecatrónica, Automatización y Control, Modelado Matemático, Robótica, Control de Robots Manipuladores, Actualización Matemática para Ingenieros, Control de Sistemas Lineales, Control de Sistemas no Lineales, Seminario de Investigación, entre otras, tanto a nivel Licenciatura como en Maestría y Doctorado. Ha participado como director de tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado. Es autor del libro *Cinemática y Dinámica de Robots Manipuladores*, así como de varios capítulos de libros y artículos de investigación publicados en congresos y revistas internacionales con arbitraje. Sus líneas de investigación incluyen: Control de Vehículos Aéreos no Tripulados, Control de Robots Rígidos y Flexibles, Identificación Paramétrica, Control de Estructura Variable y Aprendizaje de Máquinas. Actualmente, es Miembro del Sistema Nacional de Investigadores SNI Nivel I y es Catedrático CONACYT, adscrito al Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital del Instituto Politécnico Nacional CITEDI-IPN.



Dr. Rubén Alejandro Garrido Moctezuma.

Rubén Alejandro Garrido Moctezuma. Doctor en Ciencias por la Universidad de Tecnología de Compiègne, Francia. Se desempeña en la línea de investigación de Control de robots manipuladores, control de robots paralelos, identificación paramétrica, control adaptable, control visual de robots, servomecanismos, y control visual de robots paralelos planos. Cuenta con gran experiencia docente en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional impartiendo materias relacionadas con Control de Robots, Control Visual, Control de Servomecanismos, Identificación Paramétrica, y Control de Robots Paralelos

Ha sido director de más de 30 tesis. Autor de artículos en revistas internacionales con arbitraje y de artículos en congresos nacionales e internacionales. Actualmente es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) Nivel II y profesor investigador en el CINVESTAV-IPN.



Dr. Luis Tupak Aguilar Bustos.

Luis Tupak Aguilar Bustos. Doctor en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones por el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), México. Se desempeña en la línea de sistemas de estructura variable, control H-infinito no lineal y no suave y aplicaciones generales en control. Cuenta con experiencia docente en el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital (CITEDI-IPN) impartiendo materias relacionadas con Control de Robots, Control de Sistemas Lineales y Control de Sistemas de Estructura Variable. Ha sido director de 33 tesis en maestría y doctorado. Es Coautor de los libros *Advanced H-infinity Control-Towards Nonsmooth Theory and Applications* y *Self-Oscillations in Dynamic Systems-A new methodology via two-relay controllers* y de más de 200 artículos en revistas internacionales con arbitraje, capítulos de libros y congresos nacionales e internacionales. Actualmente es Profesor de Tiempo Completo en el CITEDI-IPN y editor asociado del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por sus siglas en inglés).



M.C. José Ernesto Herrero Brito. **José Ernesto Herrero Brito.** Ingeniero en Automática en la Universidad Politécnica de La Habana y Maestro en Ciencias en Sistemas Digitales por el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital del Instituto Politécnico Nacional. Ha sido autor y colaborador en publicaciones de artículos presentados en congresos y revistas especializadas. Además, ha laborado en temas relacionados con el control de sistemas y edificios inteligentes. Actualmente se encuentra realizando sus estudios de Doctorado en CITEDI-IPN con los temas de control de sistemas no lineales, vehículos autónomos y optimización.

Dedicatorias

A mi amada esposa Lore y a mi hermoso hijo Roger Leonardo, porque son la luz de mi vida, la energía que mueve el motor del amor, la fe y la esperanza que me permiten disfrutar todos y cada uno de mis días. Porque ustedes dos son todas las bellas razones que elevan mi espíritu y mi alma hacia la luz y la paz.

Roger Miranda

Con mucho cariño para Ara, Juli e Isa.

Rubén Garrido

A mi esposa Erica Baes y a mis hijos Gabriel Tupak y Elisa Valeria.

Luis T. Aguilar

A mis queridos padres, Ernesto y Maritza, por impulsarme cada día a ser una mejor persona través de su amor y dedicación.

Ernesto H. Brito



Agradecimientos

Este trabajo ha recibido la valiosa ayuda de instituciones y personas que permitieron que se volviera una realidad al alcance de todos aquellos que deseen estudiar el interesante mundo de los vehículos aéreos no tripulados. El Dr. Roger Miranda Colorado agradece de manera especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) bajo el proyecto de Cátedras CONACyT 1537, así como al Instituto Politécnico Nacional (IPN) y el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital (CITEDI) por haber proporcionado las condiciones necesarias para que se llevara a cabo esta investigación y se pueda transmitir a la comunidad. Además, agradece el apoyo y confianza de sus colegas que confiaron en el desarrollo de este proyecto y proporcionaron sus valiosas ideas y comentarios, los cuales permitieron mejorar de modo sustancial la calidad de este trabajo.

El Dr. Rubén Alejandro Garrido agradece de modo especial a su familia, a sus estudiantes que siempre han sido una fuente de inspiración y trabajo, y a todas las personas que directa e indirectamente contribuyeron y siguen contribuyendo a su formación.

El Dr. Luis Tupak Aguilar Bustos agradece al Instituto Politécnico Nacional y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología bajo el proyecto 285279.

José E. Herrero Brito agradece al CONACyT, al CITEDI y al IPN por otorgarle la oportunidad de continuar sus estudios y contribuir en el desarrollo de este proyecto.



Mensaje del editor

Una de las convicciones fundamentales de Alfaomega es que los conocimientos son esenciales en el desempeño profesional, ya que sin ellos es imposible adquirir las habilidades para competir laboralmente. El avance de la ciencia y de la técnica hace necesario actualizar continuamente esos conocimientos, y de acuerdo con esto Alfaomega publica obras actualizadas, con alto rigor científico y técnico, y escritas por los especialistas del área respectiva más destacados.

Consciente del alto nivel competitivo que debe de adquirir el estudiante durante su formación profesional, Alfaomega aporta un fondo editorial que se destaca por sus lineamientos pedagógicos que coadyuvan a desarrollar las competencias requeridas en cada profesión específica.

De acuerdo con esta misión, con el fin de facilitar la comprensión y apropiación del contenido de esta obra, cada capítulo inicia con el planteamiento de los objetivos del mismo y con una introducción en la que se plantean los antecedentes y una descripción de la estructura lógica de los temas expuestos, asimismo, a lo largo de la exposición se presentan laboratorios desarrollados con todo detalle para llevar a cabo los aprendizajes.

Además, Alfaomega hace uso de los medios impresos tradicionales en combinación con las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) para facilitar el aprendizaje. Correspondiente a este concepto de edición, la presente obra cuenta con su complemento en una página Web en donde el alumno y el profesor encontrarán software para reforzar el conocimiento relacionado con temas específicos de la obra.

Los libros de Alfaomega están diseñados para ser utilizados en los procesos de enseñanza aprendizaje, y pueden ser usados como textos en diversos cursos o como apoyo para reforzar el desarrollo profesional, de esta forma Alfaomega espera contribuir a la formación y al desarrollo de profesionales exitosos para beneficio de la sociedad, y espera ser su compañera profesional en este viaje de por vida por el mundo del conocimiento.



Contenido

Introducción	xv
Plataforma de contenidos web	xix
Capítulo 1. Generalidades	
1.1 Introducción	3
1.2 Clasificación de los vehículos aéreos no tripulados	4
1.3 Vehículos cuadricópteros	6
1.4 Ventajas y desventajas del uso de vehículos cuadricópteros	8
1.5 Aplicaciones	9
1.6 Algoritmos de control	10
1.7 Planeación de trayectorias	14
1.8 Resumen	15
1.9 Referencias	16
Capítulo 2. Teoría introductoria	
2.1 Introducción	23
2.2 Álgebra lineal	23
2.3 Grupos $SO(3)$ y $SE(3)$	27
2.4 Conceptos de modelado de sistemas dinámicos	30
2.5 Conceptos de teoría de control	31
2.6 Resumen	36
2.7 Referencias	37
Capítulo 3. Análisis dinámico de un cuadricóptero	
3.1 Introducción	41
3.2 Modelo dinámico de un cuadricóptero	42
3.2.1 Ecuaciones de movimiento traslacional	42
3.2.2 Ecuaciones de movimiento rotacional	46
3.3 Representaciones alternativas del modelo dinámico de un cuadricóptero	50
3.4 Propiedades adicionales del modelo dinámico de un cuadricóptero	58
3.4.1 Perturbaciones	59
3.4.2 Propiedades de los actuadores	61
3.4.3 Potencia mecánica promedio y potencia eléctrica promedio	63
3.5 Resumen	65
3.6 Referencias	66
Capítulo 4. Diseño de trayectorias y sintonización de controladores	
4.1 Introducción	69
4.2 Diseño de trayectorias	70
4.2.1 Trayectoria con velocidad mínima	72

4.2.2	Trayectoria de sobreaceleración mínima	73
4.2.3	Diseño de una trayectoria empleando MATLAB®	73
4.3	Sintonización de las ganancias de un controlador	82
4.4	Resumen	89
4.5	Referencias	90

Capítulo 5. Estrategias de control lineal de un cuadricóptero

5.1	Introducción	95
5.2	Modelo linealizado de un vehículo cuadricóptero	96
5.3	Diseño del primer controlador PID	99
5.3.1	Análisis de estabilidad	102
5.3.2	Simulaciones numéricas	106
5.4	Diseño del segundo controlador PID	132
5.4.1	Simulaciones numéricas	135
5.5	Resumen	140
5.6	Referencias	141

Capítulo 6. Estrategias de control no lineal de un cuadricóptero

6.1	Introducción	145
6.2	Modelo dinámico de segundo orden de un cuadricóptero	146
6.3	Diseño del controlador CMD	148
6.3.1	Instalación del controlador CMD	152
6.3.2	Reducción del castaño	156
6.3.3	Simulaciones numéricas	157
6.3.4	Análisis de resultados	164
6.4	Resumen	167
6.5	Referencias	168

Capítulo 7. Perspectivas futuras en cuadricópteros

7.1	Introducción	171
7.2	Diseño de nuevas arquitecturas	172
7.3	Estimación paramétrica	173
7.4	Perspectivas en control robusto de cuadricópteros	174
7.5	Aplicaciones recientes con vehículos cuadricópteros	177
7.6	Conclusión	179
7.7	Referencias	180

Índice analítico		183
-------------------------	--	------------

Introducción

El empleo de vehículos aéreos no tripulados (VANT) comenzó durante la primera guerra mundial. Posteriormente se utilizaron como objetivos en entrenamientos tanto en Estados Unidos como en Gran Bretaña. Durante la guerra de Vietnam, los VANT fueron usados por el ejército estadounidense en tareas de reconocimiento, lanzamiento de proyectiles y distribución de panfletos. Actualmente, una clase de VANTS, los cuadricópteros se han vuelto comunes dentro de nuestro entorno.

Los VANT encuentran aplicaciones que van desde el entretenimiento hasta el desarrollo de vehículos capaces de realizar misiones militares, tareas de reconocimiento y vigilancia, así como labores dentro de la ingeniería civil, la pesca y la agricultura entre otras. El crecimiento del mercado de los VANT ha sido considerable y se estima que en años venideros su valor será de varias decenas de miles de millones de dólares americanos, siendo los sectores comerciales y militares los más importantes. El empleo de los VANT ha sido de tal magnitud que en varios países existen o están en elaboración reglamentaciones para su uso con el fin de que su empleo no cause accidentes, que no se utilicen para invadir la privacidad de las personas ni que se emplee para contrabando o para llevar a cabo otros delitos.

Debido a que la mayor parte de los cuadricópteros no pueden realizar vuelos de manera autónoma, un operador humano debe responsabilizarse de su control. Por otro lado, en muchos casos las tareas que llevan a cabo los cuadricópteros no necesitan de la ejecución de trayectorias o de movimientos complicados, hecho que permite su control en lazo cerrado mediante algoritmos relativamente sencillos como es el caso del controlador Proporcional Integral Derivativo, que es generalmente conocido por su acrónimo PID y el cual se emplea en muchos cuadricópteros. Sin embargo, tareas de mayor complejidad en cuanto a requerimientos de altas velocidades y aceleraciones, que se ejecuten de manera autónoma o mediante control humano, podrían requerir la instalación de algoritmos de control avanzados que generen un mejor desempeño que el obtenido con algoritmos estándares. Además, el hecho de que un cuadricóptero transporte carga de un lugar a otro implica que su peso total cambia durante el desarrollo de esta tarea. Estos cambios deben considerarse en la propuesta de un controlador con el fin de que no generen pérdida de desempeño.

El estudio de los cuadricópteros tiene varias facetas. Por un lado, se trata de sistemas electromecánicos controlados mediante procesadores digitales y sensores. Esto los hace interesantes debido a que varias áreas del conocimiento participan en su diseño, cons-

trucción y operación. Estas incluyen las Ingenierías Mecánica, Eléctrica, Electrónica y de Control, así como la Instrumentación y la Computación. Lo anterior los convierte en un paradigma natural en la Mecatrónica y un sujeto de estudio interdisciplinario. Por otro lado, desde el punto de vista de la Robótica e Inteligencia Artificial, el hecho de que un cuadricóptero tiene el potencial de realizar tareas de manera autónoma en ambientes semiestructurados o no estructurados los convierte en casos de estudio para la aplicación de técnicas relacionadas con las redes neuronales y la visión por computadora. También se insertan de manera natural dentro de los denominados Sistemas Multi-Agente en donde varios cuadricópteros ejecutan tareas en colaboración.

Desde el punto de vista de la enseñanza, los cuadricópteros constituyen plataformas donde es posible el aprendizaje de conceptos sobre Matemáticas, Control Automático, Informática, Microprocesadores y Electrónica, entre otros. El hecho de que un alumno estudie el modelado y control de cuadricópteros, construya un prototipo de estos vehículos y lo haga funcionar constituye una experiencia de aprendizaje completa al conjuntar la teoría con aspectos prácticos. En este sentido, hay un número creciente de publicaciones en donde un cuadricóptero es considerado una herramienta de enseñanza atractiva para los estudiantes.

En relación al arte, los cuadricópteros también se utilizan en la realización de pinturas en paredes de edificios, en filmación, en fotografía aérea, en la ejecución de piezas de música y en coreografía aérea.

Cabe destacar el hecho de que hasta este momento no existen libros que traten sobre el control en lazo cerrado de cuadricópteros y que sean de fácil acceso a estudiantes hispanohablantes. Si bien se han publicado varias obras excelentes sobre el tema, prácticamente todas ellas están escritas en idioma inglés y generalmente se orientan a estudiantes de posgrado. Estos dos hechos limitan su acceso y comprensión a estudiantes de pregrado, los cuales en general carecen de los antecedentes académicos necesarios para poder abordar esta temática.

La presente obra constituye probablemente el primer libro escrito en castellano sobre el control en lazo cerrado de cuadricópteros. Su objetivo primordial es proporcionar a estudiantes de pregrado y posgrado los elementos básicos sobre modelado y control de estos vehículos. Lo anterior les permitirá conocer los aspectos básicos del control de cuadricópteros comerciales y les facilitará la comprensión de textos avanzados sobre el tema.

Además de dar un panorama sobre el origen, la evolución, las ventajas y desventajas, y las aplicaciones de los cuadricópteros, la obra contiene aspectos sobre su modelado y

control. Respecto al modelado, el lector tiene contacto con el empleo de las ecuaciones de Newton-Euler para la obtención de un modelo del cuadricóptero a partir del cual se derivan variantes que son adecuadas para el diseño de ciertos tipos de controladores. Además, los modelos presentados consideran los efectos de perturbaciones, cuya presencia es ubicua en cualquier aplicación. En cuanto a los aspectos de control, se consideran tanto controladores PID como controladores por modos deslizantes. Los primeros son de amplio uso en la industria por su fácil instalación y se estudian en muchos libros de texto básicos sobre Control Automático, Robótica y Mecatrónica. Por otra parte, el Control por Modos Deslizantes (CMD) es un tópico de investigación que generalmente se estudia en cursos de posgrado debido a sus excelentes propiedades de robustez.

Una de sus características sobresalientes de esta obra es la presentación de un capítulo dedicado a la solución al problema de minimización del consumo de energía a través del diseño de trayectorias y sintonización óptimas de controladores, ambos realizados mediante el empleo del algoritmo de optimización heurística denominado Algoritmo de Búsqueda de Cuclillos (ABC), herramienta que ha probado su eficacia en muchas aplicaciones. La motivación del proceso de optimización viene del hecho de que muchos cuadricópteros tienen una autonomía de vuelo limitada debido a que emplean motores eléctricos alimentados mediante baterías. Como en el caso de otros vehículos eléctricos, el empleo de estas últimas limita enormemente la duración de las tareas que pueden ejecutar. Consecuentemente, el diseño de las trayectorias y la sintonización de la ley de control que produzcan el menor consumo de energía deben ser tomadas en cuenta para incrementar la autonomía de vuelo de un cuadricóptero.

Para ilustrar el desempeño de los algoritmos de control estudiados en esta obra se emplean simulaciones numéricas. Se presentan resultados cuando se aplican técnicas de optimización en el diseño de trayectorias y en la sintonización de los controladores, los cuales se contrastan en cuanto al consumo de energía con aquellos obtenidos cuando no se realiza el proceso de optimización. Además, también se realizan simulaciones numéricas en ausencia y cuando existen perturbaciones externas al cuadricóptero en la forma de viento, y cambios paramétricos en su modelo. Estos últimos ejemplifican cambios en la carga que transporta el cuadricóptero o bien, errores cometidos durante el proceso de determinación y estimación de los parámetros de su modelo.

Esta obra puede utilizarse como soporte para un curso completo sobre cuadricópteros o bien, algunos de los capítulos se pueden abordar separadamente en diferentes cursos. Por ejemplo, el modelo del cuadricóptero presentado en el Capítulo 3 puede ser un caso

de estudio dentro de un curso de pregrado o posgrado sobre modelado de sistemas electromecánicos. El control empleando algoritmos PID estudiado en el Capítulo 5 puede utilizarse como ejemplo en un curso de pregrado de Control Automático. La aplicación de algoritmos de CMD a un cuadricóptero sería un material complementario en un curso de posgrado sobre este tema. También se incluye un capítulo sobre preliminares matemáticos el cual puede obviarse si los alumnos tienen conocimientos previos sobre los tópicos ahí mencionados. La obra termina con un capítulo que incluye las perspectivas sobre tópicos de investigación y de desarrollo tecnológico futuros relacionados con los cuadricópteros.

Los autores desean agradecer a la editorial Alfa-Omega por su apoyo en la publicación de este libro, a nuestras familias, y a colegas y estudiantes que directa e indirectamente y de manera consciente o involuntaria ayudaron a concebir y llevar a cabo esta obra, la cual se espera sea de utilidad a los lectores de habla castellana.

Plataforma de contenidos web

Para acceder al material de apoyo de este libro, entre en www.marcombo.info e introduzca el siguiente código:

DRONES1

Nota: Se recomienda respaldar los archivos descargados de la página web en un soporte físico.

