



FACULTAD DE INGENIERÍA ROBOTICA II

**10mo. Semestre de la carrera
Ingeniería en Mecatrónica**



ROBOTICA II

UNIDAD 4

Robot Móvil Aéreo

Ing. Roberto HAARTH

Ingeniería en Mecatrónica

Facultad de Ingeniería. UNCuyo

Mendoza. ARGENTINA

UNIDAD 5. ROBOTS ESPECIALES

ROBOTICA MOVIL- AEREO . DRONES . HELICOPTEROS

VANT. Vehículo Autónomo No Tripulado.

Clasificación



1. **Blanco:** Como el primer UAV desarrollado al final de la primera guerra mundial, se utilizan para simular objetivos voladores.
2. **Reconocimiento:** Se encargan de obtener y enviar información militar, como por ejemplo imágenes aéreas de una base militar enemiga. En este tipo destacan los MUAV en forma de avión o helicóptero.
3. **Combate (UCAV):** Los sustitutos de los pilotos de combate en misiones que pueden resultar muy peligrosas.
4. **Logística:** Diseñados simplemente para llevar carga.
5. **Investigación y desarrollo:** Para probar los nuevos sistemas que están en investigación y desarrollo.
6. **UAV comerciales y civiles:** Los más conocidos y que se pueden conseguir fácilmente por internet. Para su uso civil y como entretenimiento (El UAV objeto de este proyecto se incluye en esta categoría).

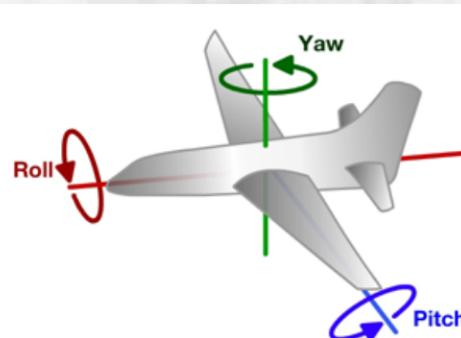
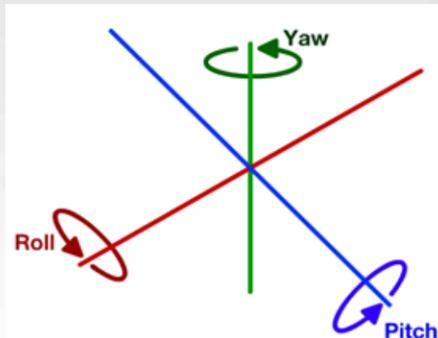
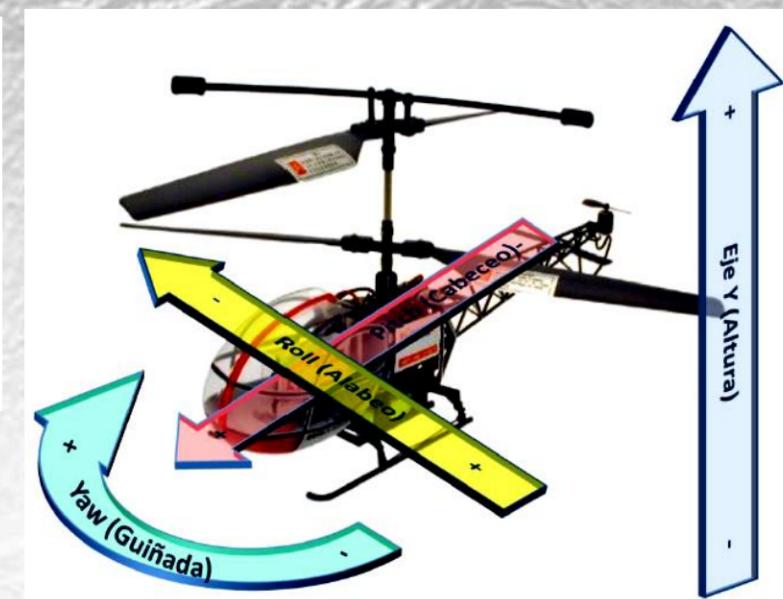
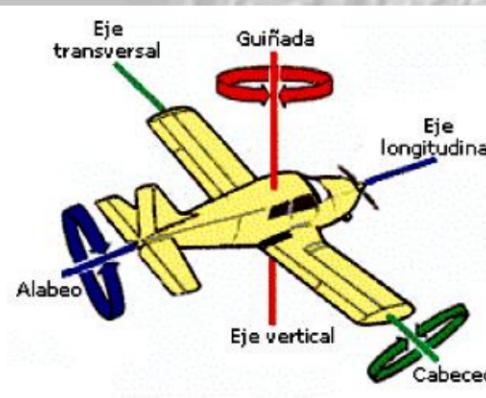
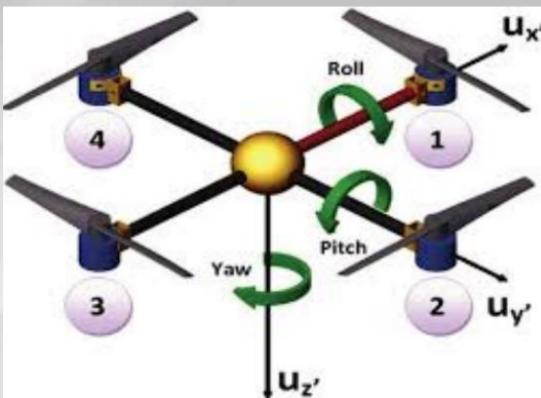


UNIDAD 5. ROBOTS ESPECIALES

→ ROBOTICA MOVIL- AEREO . DRONES . HELICOPTEROS

DRON-HELICOPTERO. Ángulos a Considerar.

- Pitch (Cabeceo): Inclinación o rotación respecto al eje ala-ala.
- Roll (Alabeo): Rotación alrededor del eje longitudinal.
- Yaw (Guiñada): Movimiento respecto del eje imaginario vertical que pasa por el centro de gravedad de la aeronave.



UNIDAD 5. ROBOTS ESPECIALES

→ ROBOTICA MOVIL- AEREO . DRONES . HELICOPTEROS

DRONE: También denominado

Multicoptero: es un tipo un “helicóptero” que está equipado con dos o más motores

TIPOS DE DRONE



- **Bicoptero – Multicoptero de 2 motores**
- **Multicoptero de 3 motores – Tricoptero**
- **Multicóptero de 4 motores – Quad**
- **Multicoptero de 5 motores – Pentacoptero**
- **Hexacoptero – Drone de 6 motores**
- **Hexacoptero Y6 – 6 motores**
- **Octacoptero – 8 motores**



La **cantidad de motores** y la configuración tienen un impacto en el rendimiento del vuelo, y cada uno tiene sus propias ventajas.

Por ejemplo, cuantos más motores tenga, más potencia y capacidad de elevación, lo que significa que puede transportar más carga. Más motores también significa una mejor estabilidad. Pero la principal desventaja es la disminución de la eficiencia energética, el aumento en los costes de hardware y mayor mantenimiento.



→ **CONFIGURACION DRONE**

Configuraciones típicas: **X + H.**

La configuración X es más popular ya que puedes mantener las hélices fuera de la vista de la cámara (para FPV y filmación aérea)

Configuración + es más intuitiva, vuela como un avión. Las hélices molestan la cámara.

Configuración H (Frame H) permite colocar la cámara mirando hacia adelante sin que molesten las hélices.

Tricoptero tiene más juego en el YAW (guiñada) en comparación con un quadcoptero. Significa que cuando un quadcoptero o hexacoptero gira, lo hacen disminuyendo la velocidad de la mitad de los motores y acelerando la otra mitad. Sin embargo, un Tricoptero, usa un servo para lograr la orientación, por lo que no pierde empuje cuando usas el YAW. También tiene menos fuerza de elevación debido al número de motor.

Tricoptero. Dos hélices en los brazos delanteros giran en sentido antihorario, el otro en sentido horario para contrarrestarse entre sí. El motor trasero puede ser inclinado hacia la izquierda y derecha por un servo para permitir el movimiento en el eje Z.



→ CONFIGURACION DRONE

Un quadcoptero tiene 4 motores montados en una estructura simétrica, cada brazo está normalmente a 90 grados de separación. Dos motores giran en sentido horario (CW en inglés) y los otros dos giran en sentido anti horario (CCW) para crear una fuerza opuesta para mantener el equilibrio.



Hexacoptero. 6 motores a 60 grados de separación en un marco simétrico, con tres juegos de motores / hélices CW y CCW

Los hexacopteros son muy similares a los cuadricópteros, pero con los motores adicionales proporcionan más capacidad de elevación. También hay una mejora en la seguridad, ya que si un motor falla, el dron puede permanecer lo suficientemente estable como para aterrizar de manera segura. El inconveniente es que tienden a ser de mayor tamaño y más caros de construir.

→ CONFIGURACION DRONE



HEXACOPTERO Y6 – 6 MOTORES

El Y6 tiene 6 motores en un marco con forma de “Y”. Son similares en forma a un tricóptero, pero tiene dos motores por brazo, uno arriba y otro abajo. Utiliza hélices CW y CCW en el mismo brazo en lugar de un servo para permitir la orientación.



OCTACOPTERO – 8 MOTORES

Un octocoptero típico tiene 8 motores en el mismo nivel con cuatro juegos de hélices CW y CCW, es una

Un octocoptero X8 utiliza 8 motores que están montados en cuatro brazos, en un marco con forma de “X” con cuatro conjuntos de hélices en CW y CCW. Las características son similares al Y6.



X8 – 8 MOTORES

→ **CONFIGURACION DRONE. HELICES**

¿Qué es una hélice?

Es un **perfil aerodinámico giratorio**, es decir, un **objeto plano** colocado con algo de **inclinación**, de forma que en una corriente de aire sea capaz de aprovechar las **fuerzas** originadas por el **cambio de velocidad o presión**.



A través de la fuerza que les transmiten los motores, generan una fuerza opuesta a la gravedad y superior a la que ésta ejerce sobre el dron. Esta fuerza opuesta al peso es conocida como **fuerza de sustentación**.



Dos posiciones diferentes. Se hace para **contrarrestar el Factor P o Par motor**. El fenómeno Par motor se explica con la **tercera ley de Newton**, en la que se indica que de cualquier fuerza que se ejerza va a resultar otra fuerza igual y de sentido contrario.

→ CONFIGURACION DRONE

El dron necesita de las hélices para elevarse, por eso las palas de las hélices deben estar inclinadas. Lo que ocurre es que la hélice no solo va a generar una **fuerza vertical**, hacia arriba, sino que además se genera una **fuerza horizontal** que va a hacer que el dron **rote sobre sí mismo**.



Para compensar este efecto se utilizan **hélices contrarrotatorias**, este es el motivo por el que el Drone dispone dos hélices diferentes en cuanto a la **dirección** de las palas. De esta manera la **fuerza horizontal** que genera cada hélice **se contrarresta** con una hélice opuesta girando en el sentido contrario.

El Par motor o Factor P es el motivo por el que se necesitan hélices con dos disposiciones distintas (levógiros – dextrógiros)

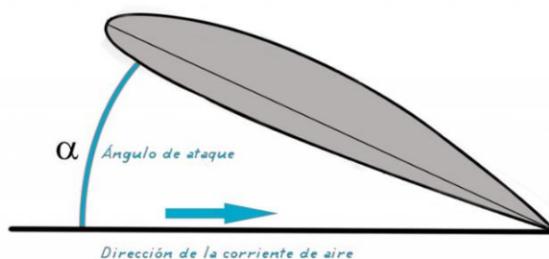


IMPORTANTE

La diferencia no se encuentra únicamente en la hélice, sino que para rotar en sentido contrario dispondremos también de **motores** que **rotarán en distinta dirección** en función de la hélice. Así nos encontramos con **motores horarios** y **motores anti horarios**, cada uno con sus correspondientes hélices para contrarrestar el **Efecto P**.

→ CONFIGURACION DRONE

Ángulo de ataque

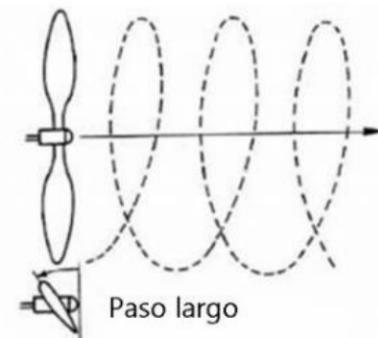
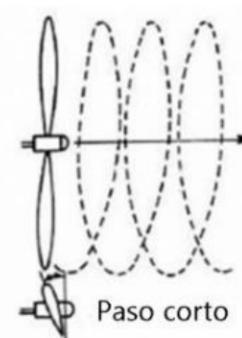
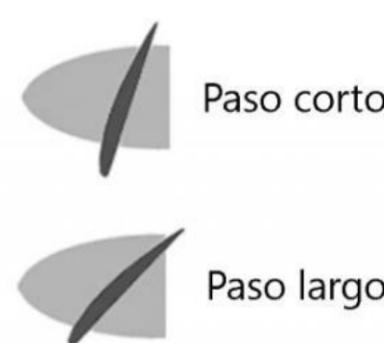


Ángulo de Ataque

Hace referencia al ángulo entre la **línea imaginaria que une los extremos de una pala** (desde la parte superior a la inferior) y el **viento relativo**, es decir, aquel que proviene de la **dirección** en la que la **pala avanza**.

Paso de la hélice. Es el **ángulo** que forman las **palas de las hélices** y su **plano de giro**, la **inclinación** que se observa en las **hélices**.

El paso mide la **distancia** que **avanzaría la hélice con un giro completo**. Las hélices de **paso corto** son apropiadas para **vuelos lentos y estables** y requieren de **menor consumo** de batería. Las hélices de **paso largo**, contrariamente, dan **vuelos rápidos** y tendrán un **mayor consumo** de la batería.



→ CONFIGURACION DRONE

Las medidas de una hélice

Medida 5 x 4,5.

Indica que se trata de una hélice con **5 pulgadas de diámetro** y **4,5 pulgadas de paso**. También puede venir indicado como 5045 para éstas mismas medidas. Estas son las características y medidas en las que el:

Diámetro

Es la **distancia de extremo a extremo** de la hélice, expresada en **pulgadas normalmente**. (1 pulgada = 2.54 cm)

Paso

La **distancia** que avanzaría la hélice en un medio sólido con un **giro completo** expresado también en pulgadas.

Sentido de giro

Como hemos visto antes, si se tratan de **hélices para giro horario o giro anti horario**.



→ CONFIGURACION DRONE

MOTORES BRUSHLESS PARA DRONES

1. Motor *EMAX 2204-2300KV*
2. Las cuatro primeras cifras se leen de dos en dos y se corresponden con la longitud del motor (22 milímetros) y con su altura (04 milímetros).
3. Las cuatro siguientes cifras (2300KV) se corresponden con los KV o Kilo volt y se trata de la característica física que define la calidad de un motor.

Con una batería 4s de 14.8v el valor teórico del motor es de 34040 rpm.

(El resultado se obtiene de multiplicar el valor 2300KV x 14,8V)

Con una batería 3s de 11.0v el valor teórico del motor es de 25300 rpm.

(El resultado se obtiene de multiplicar el valor 2300KV x 11,0V)



Significado del valor KV

Este número depende de muchos factores:

- Número de espiras
- Diámetro del hilo de cobre utilizado en el bobinado.
- Potencia de los imanes.
- Geometría del motor.

KV se refiere a la constante de revoluciones de un motor: **Es el número de revoluciones por minuto (rpm) que será capaz de ofrecer cuando se le aplica 1V (un volt) de tensión.** (No confundir KV con kV (kilovolt)).

→ CONFIGURACION DRONE

Motor Multistar Elite 3508-268 Kv 25V



Los motores eléctricos son modernos motores trifásicos brushless (sin escobillas, no habiendo ningún contacto entre rotor y estator), que tienen un gran rendimiento y un consumo bajo. Un rendimiento elevado significa que de toda la energía eléctrica que los alimenta transforman casi su totalidad en energía mecánica de rotación y por tanto tienen pocas pérdidas (rozamientos, calor).

Pueden ser de 2 tipos; Inrunner o de rotor interior y Outrunner o de carcasa giratoria.

Parámetro que los caracteriza llamado Kv ó rpm/v, que significa a qué velocidad gira el eje del motor por cada volt sin hélice, o sea sin carga o en vacío.

Por ejemplo, un motor de 1000 Kv a 12 V girará a 12000 rpm, y un motor de 500 Kv a 12 V girará a 6000 rpm. Si ambos tuviesen la misma Potencia en W, el de 500 Kv tendrá mayor par motor que el de 1000 Kv. Potencia (W)= Par Motor*Velocidad Angular (rpm).

La evolución de los motores empleados ha sido a valores Kv más bajos.

→ CONFIGURACION DRONE. FUERZA DE EMPUJE

Al girar varios motores con velocidades de giro distintas se descentra el eje de los mismos con respecto a la posición de equilibrio horizontal, en la que todos tienen sus ejes verticales, produciendo que el empuje ahora tenga una componente en la dirección hacia la que se han desviado.



En reposo los dos motores giran igual, y por tanto tienen el mismo empuje, que sólo se invierte en compensar la fuerza con la que la gravedad tira del aparato hacia el suelo. En el momento en el que el motor derecho gira más rápidamente que el izquierdo el sistema dinámico se desequilibra, produciendo que haya un mayor empuje a la derecha que a la izquierda del centro de gravedad, y originando un momento torsor que hace girar el aparato

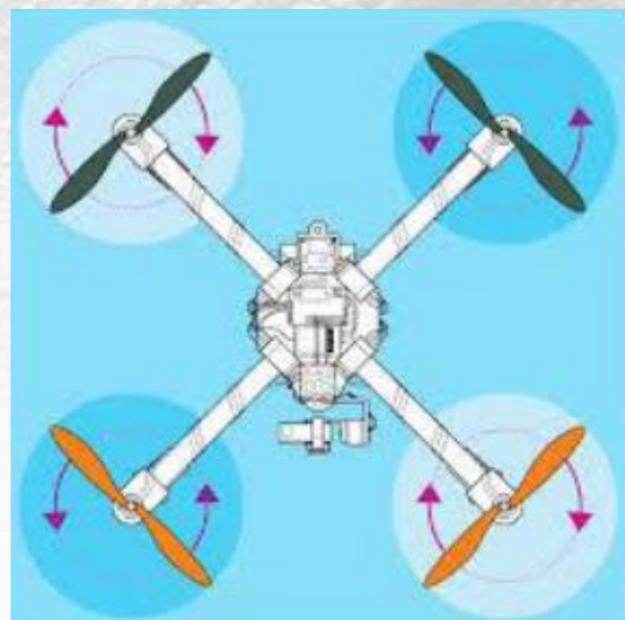
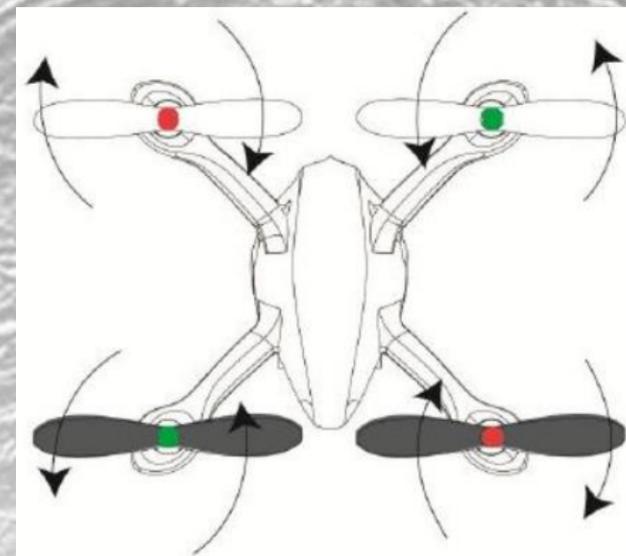
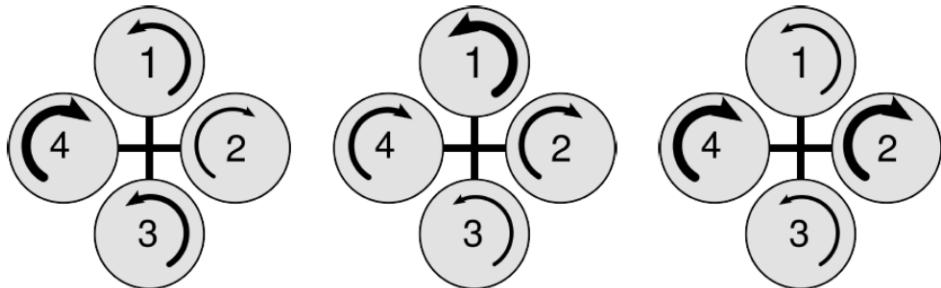
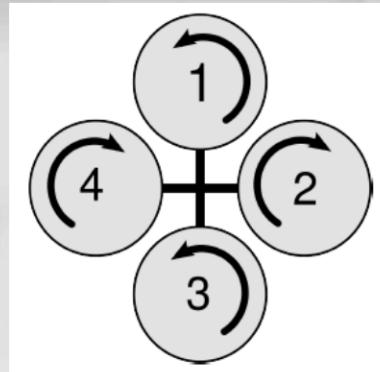
Esto hace que la resultante de la fuerza de los empujes no sea vertical y se compense con el peso, sino que hay una componente horizontal que tira del quadcopter hacia la izquierda hasta que se vuelvan a equilibrar los motores. Así, solo es necesario compensar el empuje para que el aparato no ascienda ni descienda y tenemos un desplazamiento lateral. :

→ CONFIGURACION DRONE

DRON. Movimientos en el espacio

Los movimientos del Drone en el Espacio dependen de la velocidad relativa que tengan las Hélices y el sentido de rotación determinado para los motores.

En sistemas pares los movimientos se logran modificando la velocidad de rotación

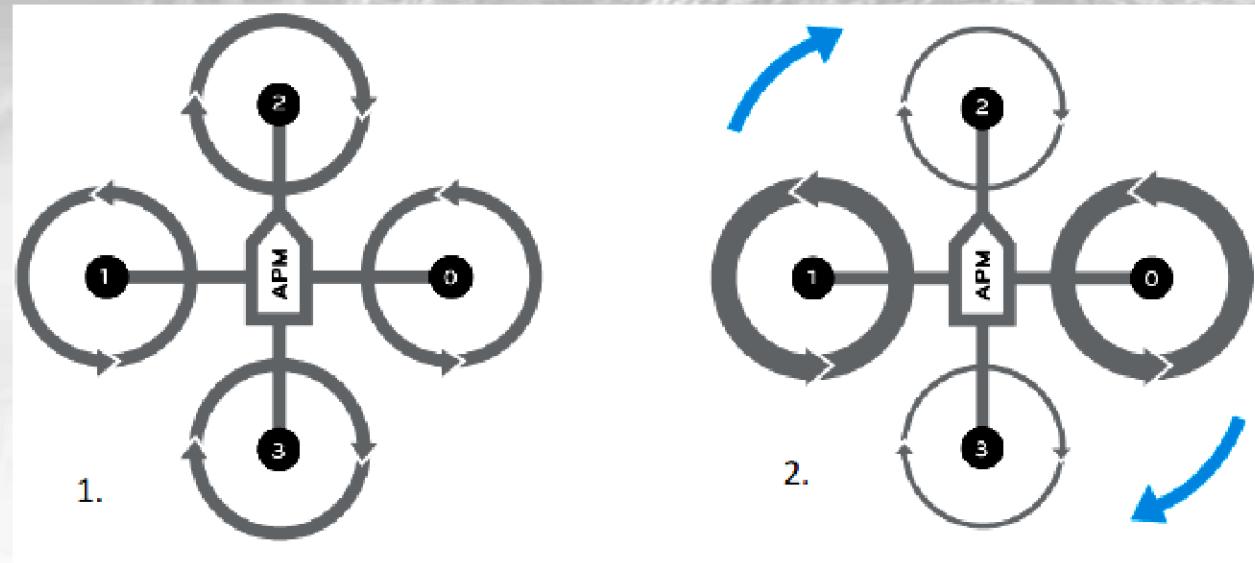


UNIDAD 5. ROBOTS ESPECIALES

→ ROBOTICA MOVIL- AEREO . DRONES . HELICOPTEROS

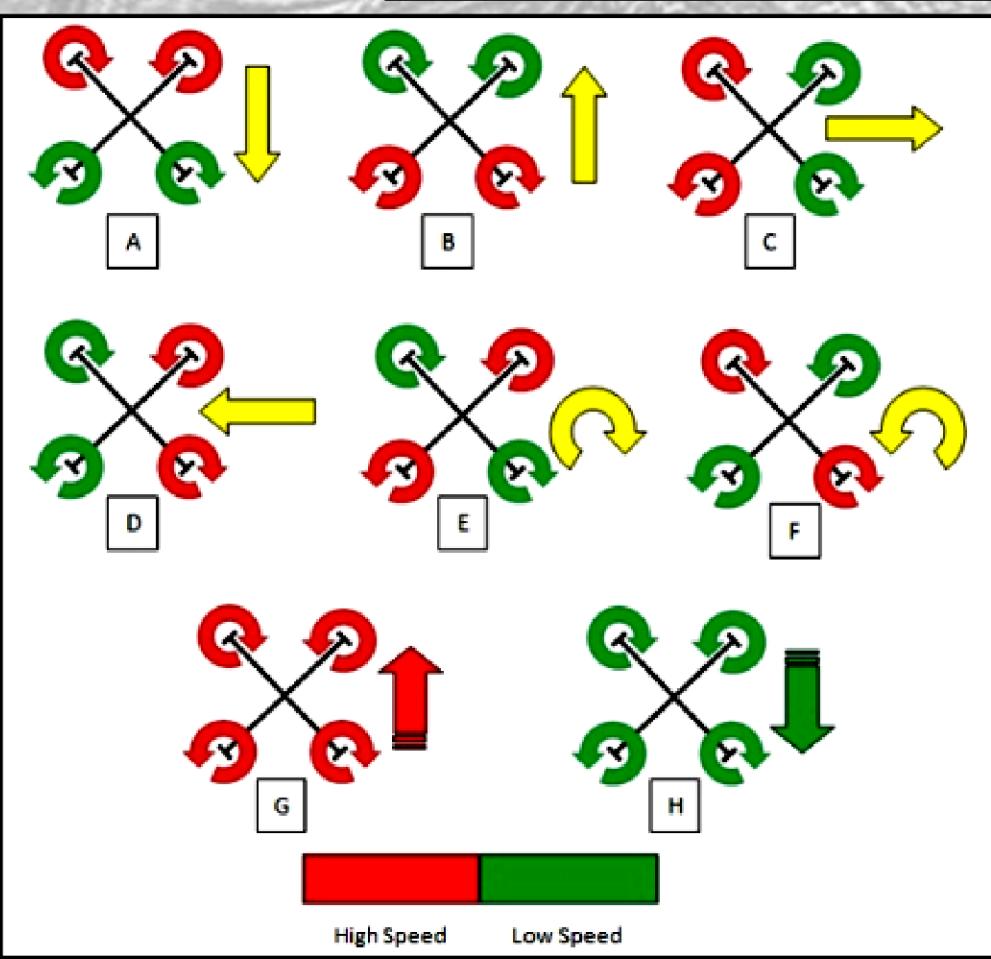
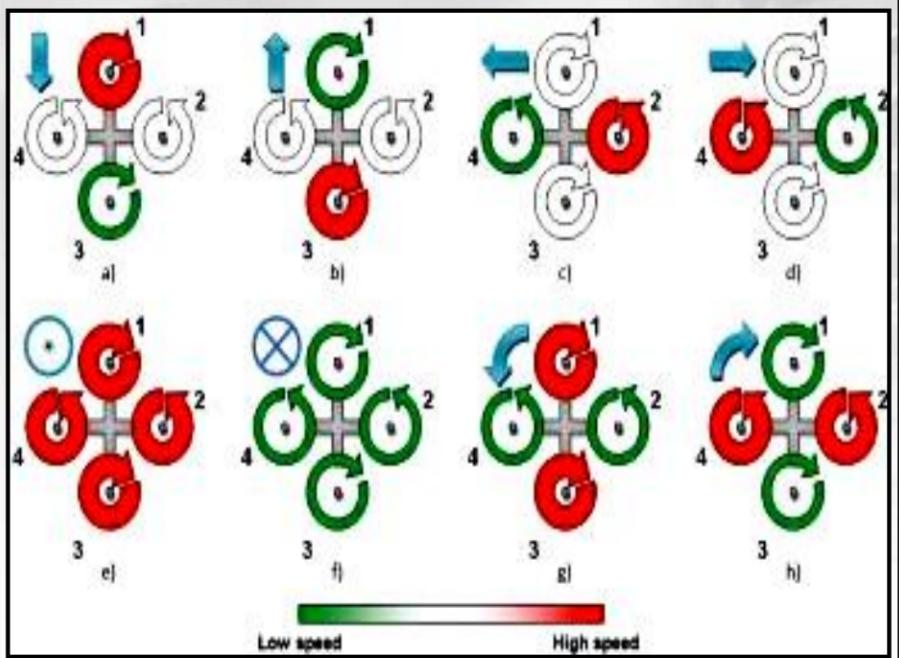
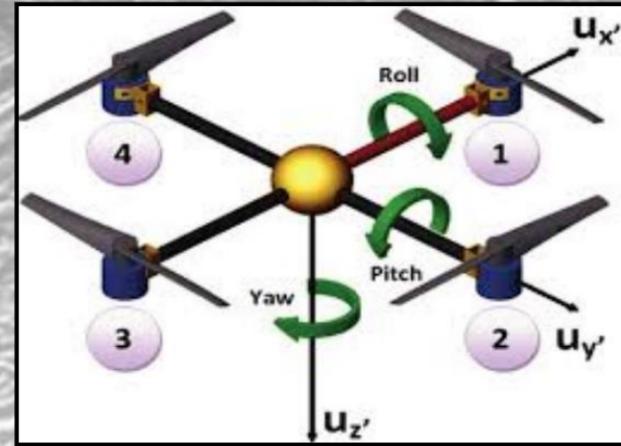
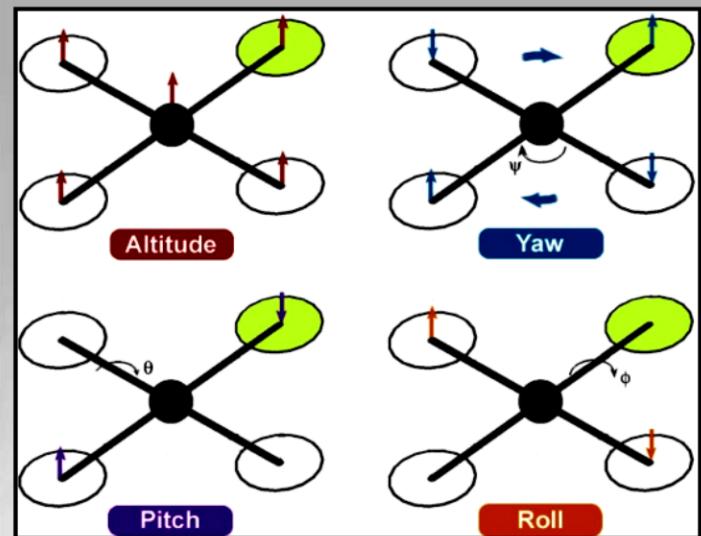
DRON-HELICOPTERO. Movimientos

Guiñada. La guiñada es el giro con respecto al eje vertical del quadcopter. Se consigue por el principio de conservación del momento cinético al disponer 2 rotores en cada sentido de giro. En un quadcopter, y en general en cualquier multirrotor la mitad de los rotores giran en un sentido y la otra mitad en el otro. De esta forma, con todos los rotores girando a la misma velocidad se consigue equilibrar el momento cinético y mantener el aparato recto. Si no estuvieran así dispuestos empezaría a girar sobre sí mismo y sería imposible dirigirlo.



Si lo que queremos es hacer “guiñar” el quadcopter, lo que tenemos que conseguir es que el par de motores que gira en un sentido gire más rápido que el que lo hace en el otro. Así el sumatorio de momentos no es 0 y hay un momento resultante en uno de los dos sentidos de giro.

UNIDAD 5. ROBOTS ESPECIALES



UNIDAD 5. ROBOTS ESPECIALES

→ DRONES . HELICOPTEROS

DRON. Estimación de Pesos y Cargas.

FUERZA DE EMPUJE

Se necesita conocer el Empuje que el sistema realiza sobre una carga (ej. 521g) en contra de la gravedad. Se calcula para 4 motores y se agrega el peso de los motores, electrónica y energía.

E_m = Empuje del motor

P_{est} = Peso de la estructura

$$E_m = \frac{P_{est}}{4} = \frac{521}{4} = 130.25$$

$$E_m = \frac{P_{est}}{4} + P_m + P_{CE} = \frac{521}{4} + P_m + P_{CE} = 130.25 + P_m + P_{CE}$$

P_m = Peso del motor

P_{CE} = Peso del control electrónico

E_{ex} = Empuje extra

$$E_m = \frac{P_{est}}{4} + P_m + P_{CE} + E_{ex} = 2 \cdot \left(\frac{521}{4} + P_m + P_{CE} \right) = 2 \cdot (130.25 + P_m + P_{CE}) g$$

Hay que tener en cuenta al adquirir las hélices que para compensar el momento cinético del quadcopter al volar hay que hacer girar dos hélices en un sentido y las otras dos en otro. Por tanto tenemos que pedir dos hélices levóginas y dos dextróginas.



→ DRONE. FUERZA DE EMPUJE

Fuerza de Empuje. Los fabricantes entregan fórmulas complejas para determinar la fuerza de empuje

Dynamic Thrust Equation

F = thrust (N), d = prop diam. (in.), RPM = prop rotations/min., pitch = prop pitch (in.), V_0 = propeller forward airspeed (m/s)

Expanded Form:

$$F = 1.225 \frac{\pi(0.0254 \cdot d)^2}{4} \left[\left(RPM_{prop} \cdot 0.0254 \cdot pitch \cdot \frac{1min}{60sec} \right)^2 \right. \\ \left. - \left(RPM_{prop} \cdot 0.0254 \cdot pitch \cdot \frac{1min}{60sec} \right) V_0 \right] \left(\frac{d}{3.29546 \cdot pitch} \right)^{1.5}$$

Simplified Form:

$$F = 4.392399 \times 10^{-8} \cdot RPM \frac{d^{3.5}}{\sqrt{pitch}} (4.23333 \times 10^{-4} \cdot RPM \cdot pitch - V_0)$$

→ DRONE. FUERZA DE EMPUJE

Fuerza de Empuje. La simplificación considera que

El diámetro de la hélice es d (in)

El paso de la Hélice o pitch p (in)

Velocidad del motor en rpm

Velocidad del aire

Simplified Form:

$$F = 4.392399 \times 10^{-8} \cdot RPM \cdot \frac{d^{3.5}}{\sqrt{pitch}} (4.23333 \times 10^{-4} \cdot RPM \cdot pitch - V_0)$$

Ejemplo.

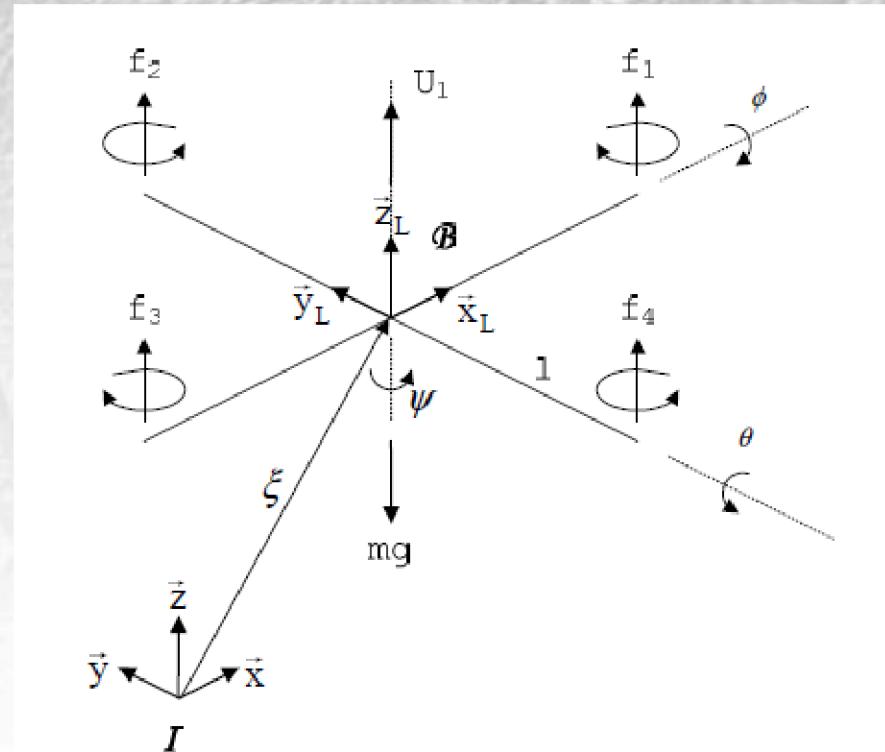
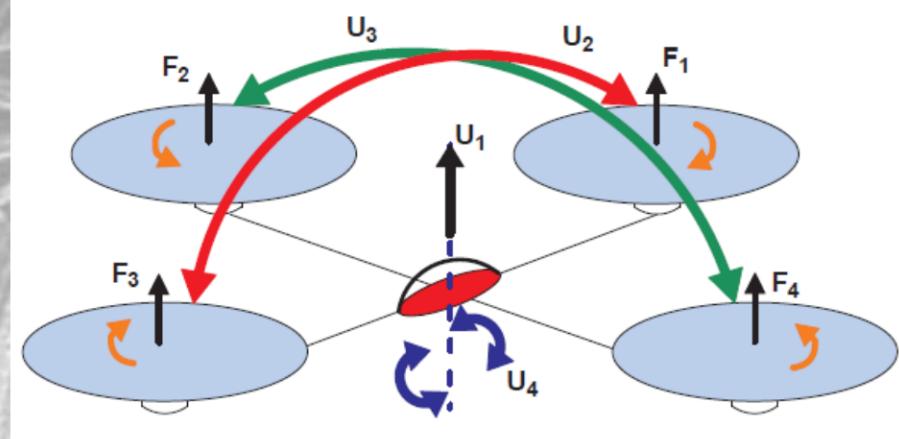
Se considera velocidad del aire 0. D=10 in p=4,5 in y RPM (depende del motor)

$$F = 4.392399 \times 10^{-8} \cdot RPM \frac{10^{3.5}}{\sqrt{4.5}} (4.23333 \times 10^{-4} \cdot RPM \cdot 4.5 - 0)$$

$$F = 2.77 \times 10^{-8} \cdot RPM^2 \quad (N)$$

→ CONFIGURACION DRONE

El modelado dinámico del Drone



UNIDAD 5. ROBOTS ESPECIALES

ROBOTICA MOVIL- AEREO . DRONES . HELICOPTEROS

DRON. Modelo Dinámico

Dinámica y Control.

El modelado del movimiento de un sistema rígido requiere el uso de dos sistemas de coordenadas: un sistema inercial (I, J, K) y un sistema de coordenadas móvil (fijo respecto del cuerpo) (i, j, k).

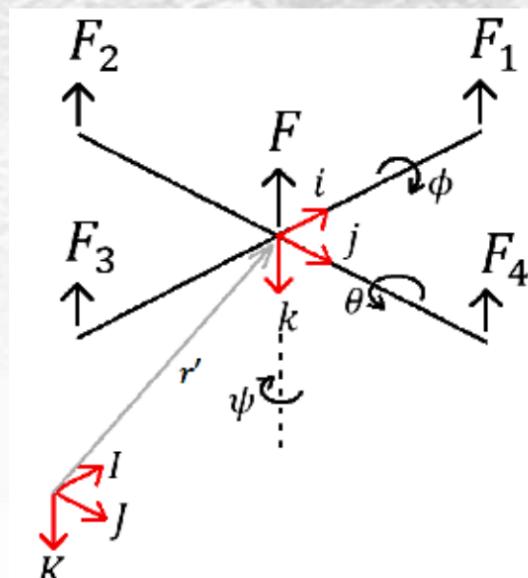
Para definir la posición del cuadrirrotor se definen seis cantidades

- Tres coordenadas que ubican el centro de masa respecto del sistema inercial.
- Tres ángulos independientes que den la orientación del sistema respecto del sistema inercial:

También denominados Roll ϕ , Pitch θ y Yaw ψ

$$\mathbf{r}' = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}$$



UNIDAD 5. ROBOTS ESPECIALES

ROBOTICA MOVIL- AEREO . DRONES . HELICOPTEROS

DRON. Modelo Dinámico

Estudiar la dinámica de un rígido implica determinar la posición y orientación del cuadrirrotor respecto de un sistema de coordenadas de referencia inercial.

Ecuaciones de Movimiento de la Orientación

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\phi} = \frac{lK}{I_{x_i x_i}} (\omega_2^2 - \omega_4^2) - \frac{(I_{zz} - I_{y_j y_j})}{I_{x_i x_i}} \dot{\psi} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} = \frac{lK}{I_{y_j y_j}} (\omega_1^2 - \omega_3^2) - \frac{(I_{x_i x_i} - I_{z_k z_k})}{I_{y_j y_j}} \dot{\psi} \dot{\phi} \\ \ddot{\psi} = \frac{b}{I_{z_k z_k}} (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) - \frac{(I_{y_j y_j} - I_{x_i x_i})}{I_{z_k z_k}} \dot{\phi} \dot{\theta} \end{array} \right.$$

Ecuaciones de Movimiento de la Posición

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = -\frac{K}{m} (\cos(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) + \sin(\phi) \sin(\psi)) (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ \ddot{y} = -\frac{K}{m} (\cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) - \sin(\phi) \cos(\psi)) (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ \ddot{z} = g - \frac{K}{m} (\cos(\phi) \cos(\theta)) (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{array} \right.$$

l es el largo del brazo del cuadrirrotor.

ω_i es la velocidad de giro de cada motor.

$I_{x_i x_i}$, $I_{y_j y_j}$ y I_{zz} son los componentes del tensor de inercia.

K se denomina factor de empuje.

b es el factor de arrastre.

m es la masa total del sistema.

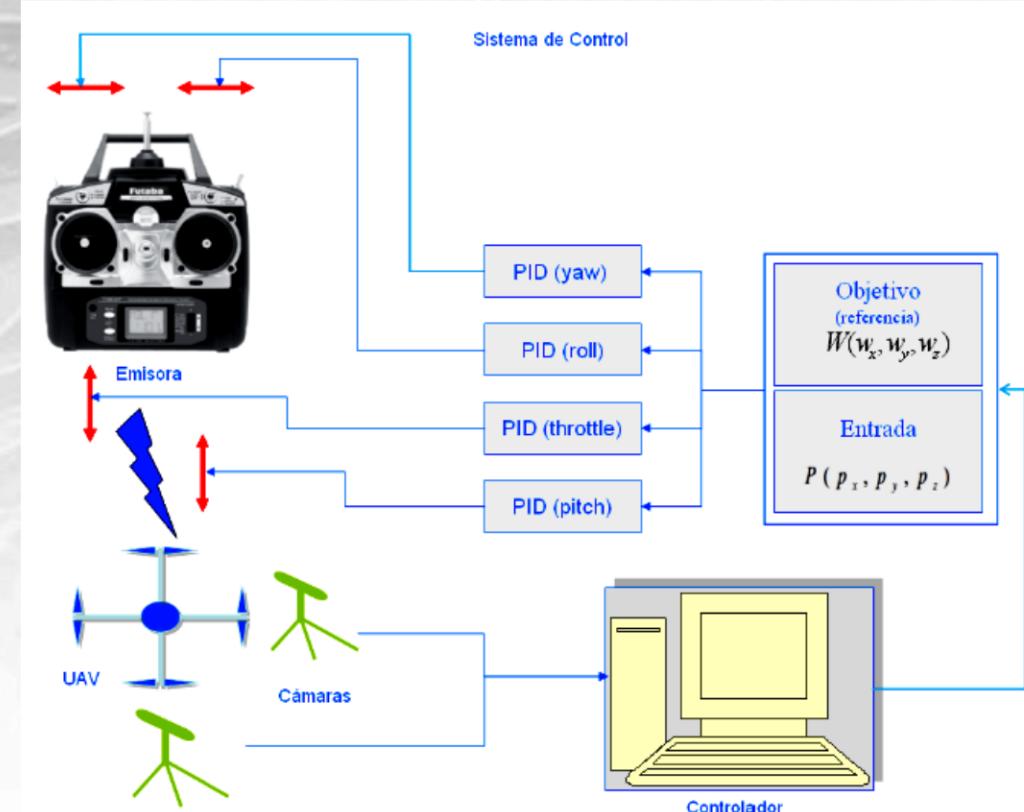
UNIDAD 5. ROBOTS ESPECIALES

→ ROBOTICA MOVIL- AEREO . DRONES . HELICOPTEROS

DRON. Modelo de Control.

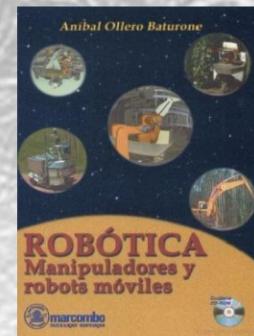
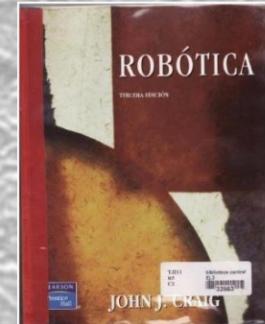
La estabilización en forma autónoma de un Dron se hace teniendo en cuenta los Sistemas de control:

- Control PID en la orientación e inclinación del sistema.
- Control PID para el mantenimiento de una altura determinada en todo momento.
- Control PID para variar la velocidad vertical del cuadrirroto.



Bibliografía Básica y de Referencia

| Autor | Título | Editorial | Año | Ejemplares Biblioteca | Unid. Prog |
|------------------------------------|---|-----------------------|------|-----------------------|-------------|
| A. Barrientos et all | Fundamentos de Robótica. | McGraw Hill | 2007 | 1 | 1-2-3-6 |
| B. Ollero | Robótica | Alfaomega | 2007 | 1 | 2-3-4-5-6 |
| J. Craig | Robótica. | Pearson | 2006 | 1 | 2-3-4-6 |
| J. Angulo Usategui et all | Introducción a la Robótica. | Paraninfo. | 2005 | | 1-2-4-6-7 |
| Angulo Yesa, Martínez | Microrobótica. | Editorial Thomson. | 2002 | no | |
| Maloney Timothy | Electrónica Industrial Moderna. 5ºed. | Pearson | 2006 | 1 | 1-4-6-7 |
| R. Mott | Diseño de elementos de máquinas. 4ºed. | Pearson | 2006 | 1 | 2 |
| M. Groover, Weiss Nagel & N. Odrey | Robótica Industrial. Tecnología, Programación y Aplicaciones. | McGraw Hill | 1989 | 1 | 1-2-3-4-5-6 |
| J. Angulo | Robótica Práctica. Tecnologías y Aplicaciones. | Paraninfo | 1986 | 1 | 1-2-3-4-6 |
| García Lopez, Librán González | Programación de Robots industriales | Universidad de Oviedo | 2000 | no | |



Bibliografía complementaria

| Autor | Título | Editorial | Año | Ejemplares Biblioteca | Unid. Prog |
|--------------------------|--|---------------|------|-----------------------|---------------|
| F. Torres Medina | Robot y Sistemas sensoriales. Ed. | Pearson | 2002 | | 1-2-3-4-5-6-7 |
| R. Kelly & V. Santibáñez | Control de Movimientos de Robot Manipuladores. | Pearson | 2003 | | 3 |
| M. Gomez et all | Teleoperación y Telerrobótica | Prentice Hall | 2006 | | 3-4-5-6 |
| Mcgookin Euan | Robotic systems | Wiley-VCH | 2012 | no | |
| W. Bolton | Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. (3ºed.) | Alfaomega | 2006 | 1 | 3-4 |
| F. Cembranos Nistal | Sistemas de Control Secuencial. | Thomson | 2002 | 1 | 14-7 |
| D. Poole | Algebra Lineal. Una Introducción Moderna. 2ºed. | Thomson | 2007 | 1 | 3 |
| W. Bolton | Instrumentación y control Industrial. | Paraninfo | 1996 | 1 | 4 |

