

Capítulo 1

Caracterización de los motores

1.1. Objetivo

El objetivo de este Test es el de caracterizar el funcionamiento de los motores. Con dicho fin se busca determinar:

- Relación entre velocidad angular y fuerza
- Relación entre comando I2C y la velocidad angular.
- Relación entre comando I2C y la fuerza.
- Relación entre velocidad angular y torque.
- Relación entre comando I2C y torque.
- Respuesta al escalón

Los algoritmos de control se centraran o bien en la velocidad angular o bien en los comandos I2C. Por dicho motivo es fundamental como se relacionan dichas magnitudes con la fuerza y el torque. Asimismo, si se decidiera que el control estuviera centrado en la velocidad angular se debe conocer la relación entre esta última y el comando I2C ya que es sobre los comandos I2C que se tiene real poder de actuar.

1.2. Materiales

- Motores del cuadricóptero Turbo Ace X720
- LED IR TSAL6200
- Detector IR TSOP38256
- Balanza
- Beagleboard XM rev C
- Osciloscopio digital
- Generador de onda
- Analizador lógico ChronoVu

1.3. Procedimiento

1.3.1. Consideraciones previas

Funcionamiento del dispositivo IR

Es necesario entender el funcionamiento del *detector IR* para poder realizar un experimento adecuado. Dicho dispositivo es sensible a las *radiaciones infrarrojas*. Si se lo expone a una luz infrarroja constante la salida del dispositivo es un “1” lógico. Del mismo modo, si se quita dicha fuente de luz la salida continúa siendo un “1”.

En la hoja de datos del dispositivo se explica que mientras se recibe una onda cuadrada de frecuencia 56kHz la salida del mismo es un “0”. Por lo tanto para poder distinguir cuando llega la radiación emitida por la LED de cuando no llega se debe hacer que esta última conmute entre ON y OFF con una frecuencia de 56kHz. Dicho de otro modo, el detector IR debe recibir la información modulada en una frecuencia de 56kHz para luego decodificarla.

Diseño del circuito de medida de velocidad angular

La idea del dispositivo de medida es sencilla. Se trata de hacer “pasar” la radiación infrarroja emitida por el LED a través de la hélice en funcionamiento de uno de los motores. Esta radiación es recogida del otro lado por el receptor IR.

De este modo tendremos a la salida del detector, pulsos de frecuencia correspondientes a la velocidad con la que la hélice obstruye el camino entre el sensor y la LED. **La velocidad angular será entonces la mitad de dicha frecuencia.**



Figura 1.1: Dispositivo en forma de U

El dispositivo se trata de un cuerpo en forma de “U”, donde de un lado se tiene la LED infrarroja y del otro el detector, tal como se puede ver en la figura 1.1.

Como explicamos anteriormente la LED debe ser conmutada con una frecuencia de 56kHz por lo tanto se la alimentará con un generador de señales funcionando como generador de onda cuadrada a dicha frecuencia. Para lograr un correcto funcionamiento de la misma se requiere una corriente superior a los 100mA. La amplitud de la onda cuadrada se regulará a 5V y se trabajará con una resistencia de 20Ω en serie. Midiendo la tensión en la re-

sistencia se puede comprobar que dichos valores son adecuados para el propósito.

La salida del receptor IR se conecta directamente a un frecuencímetro.

1.3.2. Relación entre comando I2C, velocidad angular y empuje

Objetivos particulares

Este experimento servirá para obtener las curvas:

- Relación entre velocidad angular y fuerza
- Relación entre comando I2C y la velocidad angular.
- Relación entre comando I2C y la fuerza.

Modelos de ajuste

Es claro que si no se envía ningún comando i2c los motores no giran. También es evidente que si los motores no giran las hélices no realizan ningún empuje. Por lo tanto los modelos deben estar ajustados al cero.

- Para la relación entre velocidad angular y fuerza en base a la bibliografía consultada sobre el tema se proponen dos modelos de ajuste siguientes:
 - Modelo cuadrático $T = a\omega^2 + b\omega$
 - Modelo cúbico $T = a\omega^3 + b\omega^2 + c\omega$
- Para la relación entre comando I2C y la velocidad angular se propone un ajuste en base a los siguientes modelos:
 - Modelo cuadrático $\omega = ax^2 + bx$
 - Modelo cúbico $\omega = ax^3 + bx^2 + cx$
 - Modelo de Monod $\omega = \frac{a\omega x}{b\omega x + c\omega}$
- Para la relación entre comando I2C y fuerza se propone un ajuste en base a los modelos:

Desarrollo del experimento

El procedimiento consiste en enviar distintos comandos I2C al cuadricóptero y registrar las diferentes lecturas de masa en la balanza para determinar el empuje de los motores y en registrar las diferentes medidas de frecuencia en el osciloscopio para determinar la velocidad angular de los cuatro motores. El setup experimental puede observarse en la figura ?? Se solidariza el cuadricóptero a una base de madera. Sobre esta última se añade peso suficiente para asegurar que el cuadricóptero no se eleve, se agregaron 3Kg de sobrepeso para asegurar completamente dicha condición. Al estar el sistema en equilibrio mecánico se cumple que:

$$\sum F_{ext} = 0$$

En este caso las fuerzas presentes son el peso del sistema (M_{total}) la normal de la balanza sobre el sistema (N) y el empuje de los motores (T_{total}). Por lo tanto

$$T_{total} - M_{total}g + N = 0$$

Por lo tanto el empuje de los motores puede calcularse como:

$$T_{total} = M_{total}g - N$$

La lectura de la balanza no es otra cosa que $\frac{N}{g}$. Una vez ubicado el cuadricóptero con el sobrepeso sobre la balanza se tara la balanza. Por lo tanto la lectura que indica la balanza (M_{medida}) luego de realizada esta acción es:

$$M_{medida} = \frac{N - M_{total}g}{g}$$

Por lo tanto el empuje de los cuatro motores puede calcularse como:

$$T_{total} = -M_{medida}g$$

Asumiendo que los cuatro motores se comportan en forma similar se tiene que:

$$T = -\frac{M_{medida}g}{4}$$

La medida de frecuencia se realiza con el dispositivo IR descrito en la sección anterior. La frecuencia medida (f_{medida}) corresponde al inverso del tiempo que transcurre entre el pasaje de una hoja de la hélice y la otra. El período de la rotación de la hélice es el doble y por ende la frecuencia de la rotación es la mitad de la frecuencia medida. Por lo tanto se tiene que:

$$\omega = 2\pi f = \pi f_{medida}$$

Se mide la velocidad angular de los cuatro motores y se trabaja con el promedio. En la sección 1.4.4 se verá porqué es adecuado considerar el promedio.

1.3.3. Relación entre velocidad I2C, velocidad angular y torque

1.3.4. Respuesta al Escalón

1.4. Resultados y análisis

1.4.1. Obtención de la curva fuerza contra velocidad angular

Los resultados obtenidos de frecuencia y medida en la balanza se presentan la tabla 1.1.

En la figura 1.2 se observan los puntos obtenidos experimentalmente ya las curvas obtenidas con los modelos de ajuste propuesto. En dicha figura se observa que cualquiera de los dos modelos aproxima adecuadamente los puntos obtenidos experimentalmente.

Para el modelo cuadrático se obtiene:

- Parámetros: $a = 3,5296 \times 10^{-5} N s^2$, $b = -4,9293 \times 10^{-4} N s$
- Error promedio: $e = -2,76 \times 10^{-3} N$
- Desviación estándar: $\sigma = 4,03 \times 10^{-2} N$

Para el modelo cúbico se obtiene:

- Parámetros: $a' = -1,5197 \times 10^{-8} N s^3$, $b' = 4,4399 \times 10^{-5} N s^2$, $c' = 0,0018 N s$
- Error: $7,17 \times 10^{-4} N$
- Desviación estándar: $\sigma = 2,66 \times 10^{-2} N$

Peso (g)	Frecuencia (Hz)	Peso (g)	Frecuencia (Hz)
0	0	-1010	86.13
-140	34.58	-1250	95.83
-300	49.03	-1520	105.15
-500	63.30	-1870	116.53
-765	75.00	-2400	132.9

Cuadro 1.1: Medidas obtenidas de peso y frecuencia medida por el dispositivo IR

Como es de esperar el modelo cúbico aproxima mejor los puntos que el modelo cuadrático, sin embargo cualquiera de los dos modelos ajusta adecuadamente los puntos. Esto fue observado gráficamente en una primera instancia y se comprobó realizando el estudio del error promedio y de la desviación estándar. Ya que ambos modelos parecen adecuados a partir de este momento se trabajará con el más sencillo de los dos, es decir con el modelo cuadrático. Por lo tanto:

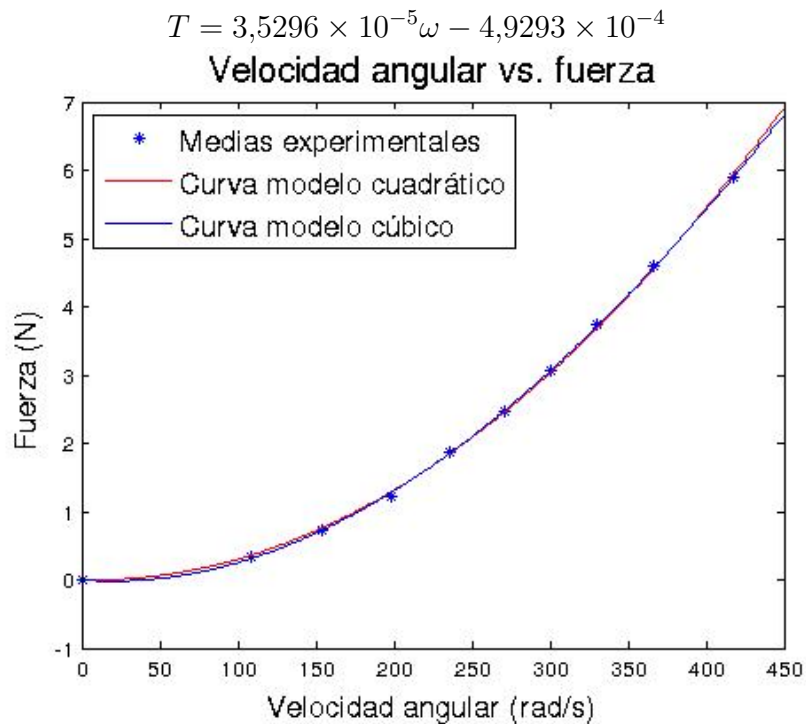


Figura 1.2: Curva experimental de Fuerza-Velocidad angular

1.4.2. Obtención de la curva i^2c contra velocidad angular

En la tabla 1.2 se presentan los resultados obtenidos de frecuencia para distintos valores del comando I2C.

Comando i^2c	Velocidad angular (rpm)	Velocidad angular (rad/s)
0	0	0
50	17.29	108.6206
70	24.51	154.0166
90	31.65	198.8628
110	37.50	235.6194
130	43.06	270.5697
150	47.91	301.0431
170	52.58	330.3385
200	58.26	366.0741
250	66.45	417.5177

Cuadro 1.2: Comando i^2c enviado y velocidad angular obtenida

En la figura 1.3 se muestran gráficamente los resultados obtenidos de ajustar un modelo cuadrático a la curva *comando i^2c vs. velocidad angular*.

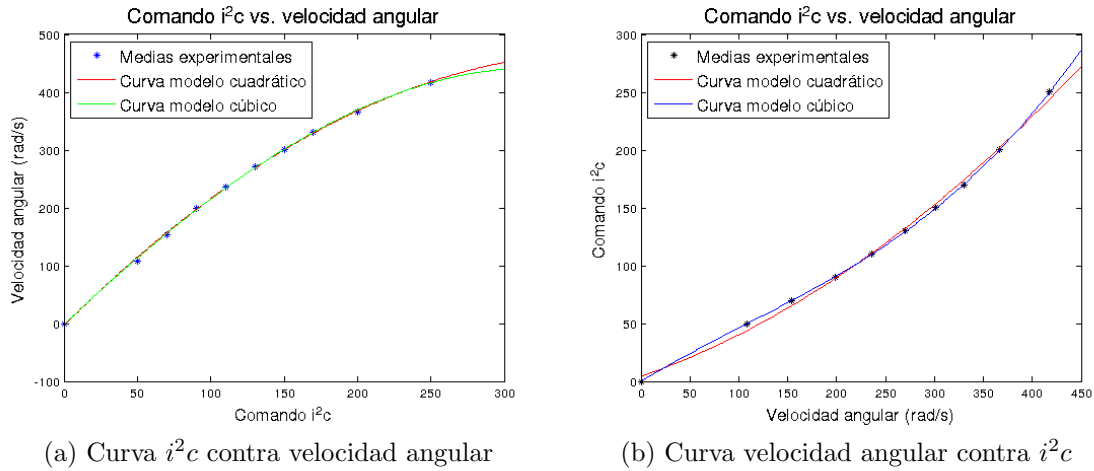


Figura 1.3: i^2c y velocidad angular

Se realiza el ajuste de dos maneras similares. En la primera, mostrada en la figura 1.3a, se propone un modelo cuadrático y otro cúbico para la velocidad angular en función del comando i^2c . En la segunda, mostrada en la figura 1.3b, se proponen los modelos cuadrático y cúbico para el comando i^2c en función de la velocidad angular.

Ajuste 1

Se ajusta la velocidad angular con el comando i^2c de forma que la velocidad angular siga un modelo cuadrático frente al comando i^2c .

Los resultados obtenidos son, para el modelo cuadrático:

- Modelo: $w = -3,380 \times 10^{-3}x^2 + 2,531x - 3,493$

- Desviación estándar: $\sigma = 2,854$

Los resultados para el modelo cúbico son:

- Modelo: $w = -3,521 \times 10^{-6}x^3 - 2,064 \times 10^{-3}x^2 + 2,407x - 1,602$
- Desviación estándar: $\sigma = 2,452$

No resulta claro si alguno de los modelos es el indicado. Se obtienen desviaciones no muy chicas. Hay que probar con otro modelo.

Ajuste 2

Se ajusta la velocidad angular con el comando i^2c de forma que el comando i^2c siga un modelo cuadrático frente a la velocidad angular.

Los resultados obtenidos son, para el modelo cuadrático:

- Modelo: $x = 6737 \times 10^{-4}w^2 + 2,924 \times 10^{-1}w + 4,351$
- Desviación estándar: $\sigma = 4,171$

Los resultados para el modelo cúbico son:

- Modelo: $x = 2,211 \times 10^{-6}w^3 - 7,115 \times 10^{-4}w^2 + 5,104 \times 10^{-1}w + 1,999 \times 10^{-2}$
- Desviación estándar: $\sigma = 4,013 \times 10^{-1}$

En este caso se puede ver que la desviación estándar obtenida con el modelo cúbico es 1 orden menor que la obtenida con el modelo cuadrático. Además al observar la figura 1.3b se divisa claramente que la curva del modelo cúbico se ajusta mejor a los datos obtenidos experimentalmente. Se concluye entonces que las magnitudes en cuestión se relacionan de la siguiente forma:

$$x = 2,211 \times 10^{-6}w^3 - 7,115 \times 10^{-4}w^2 + 5,104 \times 10^{-1}w + 1,999 \times 10^{-2}$$

1.4.3. Obtención de la curva i^2c contra fuerza

Se enviaron distintos comandos de i^2c y utilizando una balanza electrónica de 5g de apreciación se procedió a medir la fuerza que realizan los 4 motores juntos. Luego, avalados por las conclusiones de la sección 1.4.4, se obtiene la fuerza de cada motor, simplemente dividiendo la fuerza total entre 4. Los datos se presentan en la tabla 1.3.

Comando i^2c	Fuerza (N)
0	0
50	0.34335
70	0.73575
90	1.2263
110	1.8762
130	2.477
150	3.0656
170	3.7278
200	4.5862
250	5.886

Cuadro 1.3: Comando i^2c enviado y fuerza obtenida

Se desea ajustar la fuerza que realizan los motores con modelos lineal, cuadrático y cúbico, en función del comando i^2c . Los resultados se presentan en la figura 1.4.

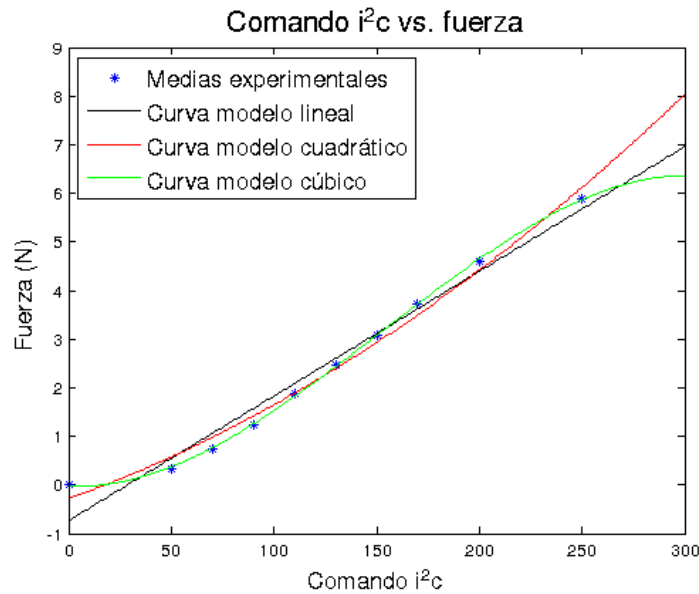


Figura 1.4: Curva i^2c contra fuerza

■ Modelo Lineal

- Modelo: $F = 2,565 \times 10^{-2}x - 7,363 \times 10^{-1}$
- Desviación estándar: 1,520

■ Modelo Cuadrático

- Modelo: $F = 4,211 \times 10^{-5}x^2 + 1,508 \times 10^{-2}x - 2,830 \times 10^{-1}$
- Desviación estándar: $2,087 \times 10^{-1}$

■ Modelo Cúbico

- Modelo: $F = -4,955 \times 10^{-7}x^3 + 2,274 \times 10^{-4}x^2 - 2,352 \times 10^{-3}x - 1,689 \times 10^{-2}$

- Desviación estándar: $3,667 \times 10^{-2}$

TODO: Decidirse por una. Parece q es la cúbica no?

1.4.4. Comparación entre motores

Se envían diferentes comandos i^2c al cuadricóptero y se mide la velocidad angular de todos los motores. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 1.4.

i^2c	Fuerza (N)	Velocidad angular (rad/s)			
		Motor D0	Motor D2	Motor D4	Motor D6
0	0	0	0	0	0
50	0.34335	34.2	34.3	35.5	34.3
70	0.73575	49.2	49.5	49	48.4
90	1.2263	63.7	62.7	63.3	63.5
110	1.8762	76.7	74.4	75.5	73.4
130	2.477	87.3	86.3	86.2	84.7
150	3.0656	97.5	95.4	96.2	94.2
170	3.7278	104.7	104.2	106.2	105.5
200	4.5862	115.5	113.4	119.9	117.3
250	5.886	133.5	132.4	131.5	134.2

Cuadro 1.4: Comando i^2c enviado y fuerza obtenida

El análisis gráfico se presenta en la figura 1.5.

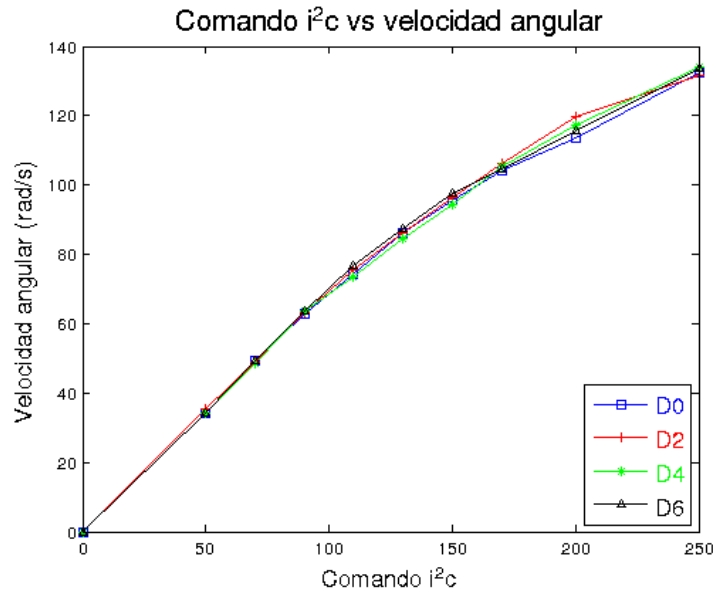


Figura 1.5: Comparación de la curva i^2c vs. velocidad angular para los 4 motores

Puede verse claramente que el comportamiento de los motores es en todos los casos similar.

TODO: Poner alguna medida del error entre motores. de las diferencias entre motores más bien.

Se puede decir entonces que:

- La fuerza medida (de los 4 motores juntos) corresponde con el cuádruple de la fuerza ejercida por cada uno de ellos
- Es válido promediar las velocidades angulares de los 4 motores y trabajar con esos promedios como un motor típico. Además de este modo se reducen los posibles errores que se pueden haber causado a la hora de realizar las medidas.