



Proyecto Final de Carrera
INGENIERÍA INDUSTRIAL

Control de un Quadcopter

Memoria

Autor: Gabriel de la Cal Mendoza
Director: Manel Velasco Garcia
Convocatoria: Fecha a presentar

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

En el presente proyecto se ha tenido como meta el control de un Quadcopter cuyas piezas se han adquirido por partes. Para tal propósito se ha linealizado el modelo no lineal obtenido y controlado mediante un Regulador Lineal Cuadrático (LQR). El contenido de este trabajo está organizado en 8 secciones y 4 anexos.

En la sección 1 se presentan los motivos por el que la elección del tema de este PFC queda justificada. También se mencionan requerimientos previos que se han requerido para no tener insalvables dificultades.

En la sección 2, como Introducción, se hace un estudio del arte, con breves pinceladas del basto campo que hoy en día se encuentra sobre este tema. Además se describen los objetivos de este proyecto. Éstos no son más que el resolver todo problema que haya surgido durante esta aventura.

Se obtiene el modelo a partir de los parámetros característicos del sistema físico en la sección 3. En linealizar el sistema en el punto de equilibrio se llega a la conclusión de que las variables que lo forman se desacoplan y se comportan como un conjunto de dobles integradores. Ésto permite que la ley de control sea sencilla y justifica el que se hayan usado controladores basados PID tan asiduamente. También se presenta el modelo implementado en Simulink, con el que se probará el control obtenido posteriormente para verificar su eficiencia.

La sección anterior permite que en la 4 se obtengan las acciones de control $u = -k \cdot X$ por medio de un LQR (Linear Quadratic Regulator). Se ataca al sistema con la ley obtenida juzgando los resultados.

En la sección 5 se explica cómo y qué se ha implementado respecto al control. Se comenta el código C que se está continuamente ejecutando.

En la sección 6 se describe tanto los componentes que se utilizan como el proceso de montaje paso a paso. Se justifica la elección de cada elemento tomando como criterio tanto las características de otros elementos como el dimensionado mismo del Quadcopter.

En las secciones 7, 8 y 9 se tiene un análisis económico, un estudio de impacto ambiental y las conclusiones respectivamente. En el primero se desglosan los costes materiales y se valoran las horas invertidas, considerando que el trabajo lo realiza un estudiante. En el estudio del impacto ambiental se describen los efectos en el medio ambiente de los componentes que se utilizan, tanto en la producción como en el reciclado. En la última sección se relata con qué se queda uno en limpio tras acabar esta empresa y cómo se espera continuar para futuros desarrollos.

En el Anexo 1 explica mediante código Matlab de dónde se ha extraído el vector de fuerzas del modelo. De esta manera se justifica la linealización en ser toda otra opción, en estas circunstancias, inviable.

En el Anexo 2 se detalla el proceso de grabado y posteriores modificaciones realizadas en el sistema operativo utilizado (Raspbian), para condicionar la Raspberry Pi tal y como se ha hecho para el Quadcopter.

En el Anexo 3 se describe qué es un filtro de Kalman, por qué es necesario y cómo se ha implementado.

En el Anexo 4 se describe cómo se han caracterizado los motores y cómo se han obtenido sus curvas características de fuerza y consumo.

Índice

Resum	1
1. Prefacio	5
1.1. Motivación	5
1.2. Requerimientos previos	5
2. Introducción	7
2.1. Estudio del arte	7
2.2. Objetivos del proyecto	8
3. Definición del modelo	10
3.1. Definición de las variables	10
3.2. Obtención del modelo	12
3.3. Representación del modelo con Simulink	18
4. Diseño del controlador	22
4.1. Regulador Quadrático Lineal	22
4.2. Obtención de la ley de control	23
4.3. Aplicación en el modelo	23
5. Implementación del control	24
6. Construcción del Quadcopter	25
6.1. Descripción de los componentes	25
6.2. Montaje	32
7. Análisis económico	33
8. Estudio del impacto ambiental	34
9. Conclusiones	35

Índice de figuras

1.	Quadcopter de ejemplo con cámara	7
2.	Ejemplo de Quadcopter con 6 motores	8
3.	Marcos de referencia en el quadcopter	10
4.	Modelo en Simulink de la dinámica del Quadcopter	18
5.	Raspberry Pi a utilizar	25
6.	Conectores de la Raspberry Pi	26
7.	IMU MPU-6050	26
8.	Emisora y Receptor	27
9.	Batería LiPo empleada	27
10.	Regulador Step-Down	28
11.	Esquema del Regulador Step-Down	28
12.	Esquema de un Variador como inversor trifásico	29
13.	Tabla de Set up de un ESC	30
14.	Piezas que componen la estructura del Quadcopter	30
15.	Par de hélices 8x4 simétricas	31
16.	Representación de la Longitud y Pitch de una Hélice	31
17.	Conexión por I2C entre MPU-6050 y RPi	42
18.	Detección del sensor MPU-6050	42
19.	Bancada para la determinación de las inercias	44
20.	Bancada para el estudio del motor	47
21.	Montaje para el estudio del motor	47
22.	Relación entre la fuerza (en gramos) y el PWM	49

1. Prefacio

1.1. Motivación

La principal motivación de este proyecto es la de aplicar por uno mismo los conocimientos básicos adquiridos en la carrera, y más en particular en el área del control en haber cursado la intensificación de automática.

En plantear un tema para el proyecto rápidamente surgió la idea de realizarlo sobre el control de un sistema mecánico, y más en particular sobre uno que estuviera actualmente emergiendo tanto en mercados como en el campo de la investigación.

De entre las diferentes alternativas, un quadcopter es la más atractiva para el proyecto tanto por su simplicidad constructiva como por su no excesivo coste. Existen actualmente en el mercado infinidad de proveedores para los componentes necesarios para construir un quadcopter, con un gran abanico de opciones de entre las que escoger cada elemento como motores, baterías, electrónica, etc.

Las posibles aplicaciones son numerosas, tanto que aún no se han ni tan solo explotado todas las posibles. Como ejemplo: vigilancia de superficies abiertas, transporte de pequeños paquetes, herramienta de ocio, entre otras.

Entender el funcionamiento y familiarizarse con el mecanismo es una inquietud que se ha mantenido insatisfecha durante largo tiempo. Con este pretexto se pretende acabar de justificar la elección del tema de ésta pequeña gran empresa.

1.2. Requerimientos previos

Es necesario tener ciertos conocimientos mínimos en automática para poder controlar el quadcopter, así como la inquietud de aprender lo que sea necesario para cumplir, en la medida de lo posible, los objetivos iniciales del presente proyecto.

Nociones de mecánica son necesarias para elaborar e interpretar el sistema sobre el que se trabaje, así como sus resultados. Conocimientos del lenguaje *C* son imprescindibles ya que el código del programa que realiza los cálculos está escrito en este mismo lenguaje.

Para adaptar los elementos que componen el aparato y afianzarlos a la estructura (Frame) del Quadcopter ha sido de gran ayuda contar con el servicio de una impresora 3D, creada por uno mismo. Finalmente, estar familiarizado con el argot y elementos de un Quadcopter, así como motores, emisoras de radio, entre otros es de ayuda.

Superar las dificultades que han surgido, teniendo en cuenta que el fin no justifica los medios, es la praxis que se ha aplicado a la hora de realizar éste trabajo. Finalmente, recordar reminiscencias de la carrera es siempre útil e interesante, así que conceptos adquiridos pero no utilizados se esperan aplicar.

2. Introducción

Un Quadcopter es un vehículo volador no tripulado (*Unmanned Aerial Vehicle o UAV*) que se caracteriza por tener cuatro motores a modo de actuadores en vez de dos como en el caso de los helicópteros. Este tipo de autogiro intenta obtener una flotabilidad estable y vuelo preciso balanceando las fuerzas producidas por los cuatro motores y surge de la necesidad de tener un aparato de vuelo de dimensiones reducidas y gran estabilidad, con prestaciones superiores a las de un helicóptero convencional.



Figura 1: Quadcopter de ejemplo con cámara

Una de las ventajas que se obtiene con este cambio es la mayor capacidad de carga ya que tiene 4 motores para soportar el peso. La estabilidad del vehículo mejora en permitir aterrizajes y despegues verticales con una mayor maniobrabilidad. También puede trabajar en áreas de difícil acceso o más agresivas, como con lluvia y viento.

Esquemáticamente se puede representar como una estructura en *X* con su centroide coincidiendo con el centro de masas y cuatro actuadores a las puntas de cada brazo, todos ellos apuntando en la misma dirección y sentido, pero con giros de aspa en sentido contrario, pero igual en lados opuestos.

2.1. Estudio del arte

En la actualidad el campo referente a estos aparatos se ha diversificado tanto que se pueden encontrar muchas variedades y tipos de Quadcopters. Se ha hecho mención del modelo de cuatro motores, pero bien pueden encontrarse de tres hasta 8 motores, sino más en casos más concretos.

Con el objetivo de desarrollar un *UAV* que realice tareas de forma totalmente autónoma, se han diseñado sensores para estimar los estados del vehículo de manera más rápida y eficiente, así como diferentes estrategias para controlar la estabilidad y orientación del mismo. Se ha utilizado visión por computador para realizar aterrizajes. de-



Figura 2: Ejemplo de Quadcopter con 6 motores

tección de objetivos y navegación autónoma. También pueden combinarse diferentes técnicas con el uso del GPS para asegurar una buena orientación del aparato.

Para controlar esta clase de aparatos se utilizan diferentes leyes de control, así como PID, LQR, Redes Neuronales, Machine Learning, entre otros. La más utilizada es sin duda un PID por su fácil implantación y poca carga computacional.

2.2. Objetivos del proyecto

La meta que se persigue es la de hacer planear un Quadcopter en direcciones horizontales. A la vez, éste es un excelente subterfugio para cumplir con otros objetivos relacionados con este fin como el control de motores, el inteligente uso de la electrónica y correcto diseño mecánico del aparato. Además, se espera haber ampliado la visión que uno tiene en cada campo.

De entre todas las disciplinas involucradas, se espera acabar familiarizado con las facetas relacionadas con la presente empresa para clarificar la relación entre los elementos que componen un Quadcopter. A saber, se espera poder acabar entendiendo la electrónica, mecánica y conocimientos de control que reinan en el sistema.

En el caso de la electrónica se espera entender y poder implementar sencillos protocolos de comunicación, en este caso *I2C* entre los sensores y la Raspberry Pi. Ésta misma es el centro neurálgico del Quadcopter, así que es esencial saber utilizarla como se requiere para que pueda recibir consignas, estados y enviar la correspondiente acción de control a los motores para que se llegue al estado final deseado.

Por parte de la mecánica, es primordial tener conocimientos sólidos de conceptos como el Teorema de la Cantidad de Movimiento y el de la conservación del Momento de Inercia, así como poder calcular el Lagrangiano (\mathcal{L}) para generar un modelo verosímil y que represente fidedignamente la realidad para que se desarrolle de manera efectiva

el control.

Finalmente, y como más serio objetivo de toda esta aventura, es el de haber afianzado lo que se creía entendido en relación al control. Asimilar otros métodos de control aplicables a sistemas multilineales no contemplados en la carrera es un excitante reto que se espera haber superado con éxito.

Entonces, se entiende este trabajo como la causa de la motivación a cumplir con un objetivo multidisciplinar como puede serlo cualquiera en el campo de la robótica, en el que se debe tener constancia de muchos aspectos relevantes, como el de la economía. Poder tener idea de lo que cuesta un robot es de gran importancia si uno se embarca en un proyecto de envergadura, ya que se quiere que los pronósticos sobre el presupuesto cuadren con la futura realidad.

3. Definición del modelo

3.1. Definición de las variables

Para caracterizar la planta con la que es trabajará, es necesario obtener un modelo del Quadcopter. Las constantes propias del modelo se dejarán en forma de parámetros a calibrar una vez se tenga el objeto físico. De esta manera el modelo será general para todo quadcopter que comparta la misma familia de parámetros. Es necesario considerar dos marcos de referencia: el inercial formado por los ejes x, y, z y el del cuerpo (Body) formado por los ejes x_B, y_B, z_B . El primero tiene la perspectiva de el observador en tierra, estático, mientras que el segundo es solidario a la estructura. Según la orientación de los ejes del cos con esta referencia se pueden dar los siguientes dos casos:

- **Cross type:** Los ejes de coordenadas coinciden con los brazos de la estructura ya que se tienen los actuadores a las puntas de cada brazo.
- **X-type:** Los ejes y la estructura forman 45°. Se tienen entonces dos motores en la parte delantera y dos en la trasera.

Por ser más usual la primera opción, se decide utilizar la configuración *Crosstype* tal y como se tiene en la figura 3.

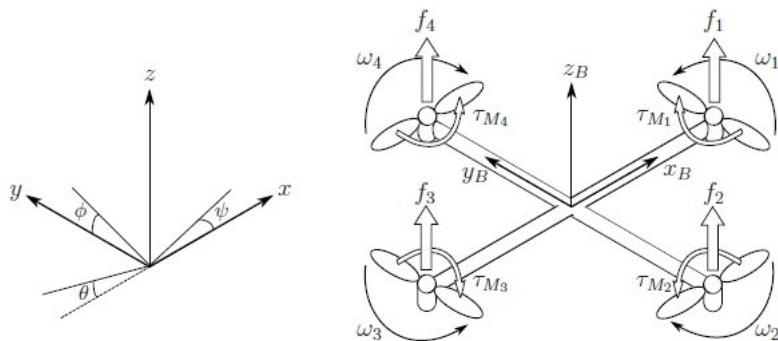


Figura 3: Marcos de referencia en el quadcopter

Se supone que el objeto es un rotor esférico, y por tanto su tensor de inercia es diagonal:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Se define la posición lineal absoluta con las coordenadas x, y, z con vector ξ e igualmente para la posición angular a partir de η según:

$$\xi = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad \eta = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}, \quad q = \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde ϕ es el ángulo de cabeceo (Pitch), θ es el de balanceo (Roll) y ψ el de guiñada (Yaw).

Para la orientación angular entre los dos marcos se tiene un sistema de referencia con ángulos Tait-Bryan, donde la matriz de transformación es:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi & C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi \\ S_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi C_\phi \\ -S_\theta & C_\theta C_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

con $C_\phi = \cos(\phi)$ i $S_\phi = \sin(\phi)$. Las velocidades lineales en el marco de referencia del cuerpo (Body Frame) se representen con el vector v_B y las velocidades angulares con γ según:

$$\mathbf{v}_B = \begin{bmatrix} v_{x,b} \\ v_{y,b} \\ v_{z,b} \end{bmatrix} \quad \gamma = \begin{bmatrix} p \\ n \\ r \end{bmatrix} \quad (4)$$

En cambio, las velocidades en el marco de referencia inercial (Inertial Frame) se representan por $\dot{\eta}$ para las velocidades lineales y con $\dot{\xi}$ para las angulares:

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad \dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Ya que la derivada de los ángulos ϕ , θ y ψ no es el vector de velocidades angulares es necesario tener un cambio de base para relacionar el marco de referencia inercial con el del cuerpo con la matriz W_η :

$$W_\eta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -S_\theta \\ 0 & C_\phi & C_\theta S_\phi \\ 0 & -S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \quad amb \quad \gamma = [W_\eta] \dot{\eta} \quad (6)$$

Las fuerzas de sustentación y velocidades angulares de los cuatro actuadores son f_1, f_2, f_3, f_4 i w_1, w_2, w_3, w_4 respectivamente. Siguiendo la orientación de la figura 3, con el objetivo de poder anular los momentos producidos en el eje z_B (en el marco del cuerpo B) el sentido de giro de los actuadores 4 y 2 son en el de las agujas del reloj (clockwise) y el de los 1 y 3 en sentido contrario (counterclockwise).

Interesa conocer qué fuerza y momento aportará cada motor dada una velocidad angular conocida. Se supone poder controlar la fuerza y momento ejercida por cada motor y cómo aproximación inicial se considera que están relacionados con la velocidad angular de la forma:

$$\begin{aligned} f_i &= kw_i^2 \\ \tau_{M_i} &= bw_i^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Por tanto el empuje total \mathbf{T}_B proporcionado en la dirección z_B y los momentos generados $\boldsymbol{\tau}_B$ por los motores son:

$$\mathbf{T}_B = k \left(\sum_{i=1}^4 w_i^2 \right) e_{z_B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum_{i=1}^4 f_i \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\tau}_B = \begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l(f_4 - f_2) \\ l(f_3 - f_1) \\ \sum_{i=1}^4 \tau_{M_i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.2. Obtención del modelo

Las ecuaciones que gobiernan el sistema se obtienen con el método de Euler-Lagrange, por lo que se empieza obteniendo el Lagrangiano del sistema:

$$\mathcal{L} = E_{cinetica} - E_{potencial} = (E_{translacion} + E_{rotacion}) - E_{potencial} \quad (9)$$

Substituyendo cada componente por su expresión:

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{m}{2} \dot{\boldsymbol{\xi}}^T \dot{\boldsymbol{\xi}} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\gamma}^T \mathbf{I} \boldsymbol{\gamma} - mgz \quad (10)$$

Es encuentra el vector de fuerzas y momentos:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \boldsymbol{\tau}_B \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}} \quad (11)$$

$$\text{amb } \mathbf{q} = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \quad \text{i } \dot{\mathbf{q}} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T.$$

En calcular F es necesario hacer el cambio de variables de $\boldsymbol{\gamma}$ a $\dot{\boldsymbol{\eta}}$ con el cambio de base $\dot{\boldsymbol{\eta}} = [W_\eta]^{-1} \boldsymbol{\gamma}$ para poder derivar el Lagrangiano respecto $\dot{\boldsymbol{\eta}}$, que son las variables propias del marco de referencia inercial:

$$\frac{1}{2} \boldsymbol{\gamma}^T \mathbf{I} \boldsymbol{\gamma} = \frac{1}{2} (\mathbf{W}_\eta \dot{\boldsymbol{\eta}})^T \mathbf{I} (\mathbf{W}_\eta \dot{\boldsymbol{\eta}}) = \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{\eta}}^T (\mathbf{W}_\eta^T \mathbf{I} \mathbf{W}_\eta) \dot{\boldsymbol{\eta}} = \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\eta}} \quad (12)$$

donde la matriz J queda como

$$\mathbf{J} = \mathbf{W}_\eta^T \mathbf{I} \mathbf{W}_\eta = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & -I_{xx} S_\theta \\ 0 & I_{yy} C_\phi^2 + I_{zz} S_\phi^2 & (I_{yy} - I_{zz}) C_\phi S_\phi C_\theta \\ -I_{xx} S_\theta & (I_{yy} - I_{zz}) C_\phi S_\phi C_\theta & I_{xx} S_\theta^2 + I_{yy} S_\phi^2 C_\theta^2 + I_{zz} C_\phi^2 C_\theta^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

y por tanto el Lagrangiano queda:

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{m}{2} \dot{\boldsymbol{\xi}}^T \dot{\boldsymbol{\xi}} + \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\eta}} - mgz \quad (14)$$

Los componentes lineales y angulares no dependen unos de los otros y por tanto se pueden estudiar por separado obteniendo dos ecuaciones: una para las fuerzas lineales y otro para los momentos. Ésto quiere decir que la fuerza que ejercen los actuadores no

depende de las velocidades angulares que se tengan ni tampoco se tendrán aceleraciones angulares diferentes según la altura a la que se encuentre el quadcopter: el objeto girará de la misma manera sea cual sea la posición en la que se encuentre en el espacio.

Entonces, calculando la derivada parcial respecte \dot{q} se obtiene que

$$\mathbf{F} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m}{2} (\mathbf{1} \cdot \dot{\boldsymbol{\xi}} + \dot{\boldsymbol{\xi}} \cdot \mathbf{1}) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}} (\dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\eta}}) \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}} \quad (15)$$

Como que \mathbf{J} es una matriz simétrica, se puede decir que $\frac{\partial}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}} (\dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\eta}}) = 2 \frac{\partial}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}} (\dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J}) \dot{\boldsymbol{\eta}}$.

Demostración: Para probar ésto se verá para el caso $\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x}) = 2 \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{x}^T \mathbf{A}) \mathbf{x}$ con

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Llavors

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x}) = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \left([x_1 x_2 x_3] \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \right) = \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (x_1^2 a_{11} + x_1 x_2 a_{21} + x_1 x_3 a_{31} + x_1 x_2 a_{12} + x_2^2 a_{22} + x_2 x_3 a_{32} + x_1 x_3 a_{13} + x_2 x_3 a_{23} + x_3^2 a_{33}) = \quad (18)$$

Com que \mathbf{A} es simétrica $a_{12} = a_{21}$, $a_{13} = a_{31}$ i $a_{23} = a_{32}$, y en hacer la derivada direccional resulta

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 2x_1 a_{11} + x_2 a_{21} + x_3 a_{31} + x_2 a_{12} + x_3 a_{13} \\ x_1 a_{21} + x_1 a_{12} + 2x_2 a_{22} + x_3 a_{32} + x_3 a_{23} \\ x_1 a_{31} + x_2 a_{32} + x_1 a_{31} + x_2 a_{23} + 2x_3 a_{23} \end{bmatrix} = 2 \cdot \begin{bmatrix} x_1 a_{11} + x_2 a_{12} + x_3 a_{13} \\ x_1 a_{12} + x_2 a_{22} + x_3 a_{23} \\ x_1 a_{13} + x_2 a_{23} + x_3 a_{23} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Y en evaluar el otro costado de la igualdad se tiene el mismo resultado

$$2 \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{x}^T \mathbf{A}) \mathbf{x} = 2 \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \left(\begin{bmatrix} x_1 a_{11} + x_2 a_{12} + x_3 a_{13} \\ x_1 a_{21} + x_2 a_{22} + x_3 a_{23} \\ x_1 a_{31} + x_2 a_{32} + x_3 a_{33} \end{bmatrix}^T \right) \mathbf{x} = \quad (20)$$

$$= 2 \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = 2 \cdot \begin{bmatrix} x_1 a_{11} + x_2 a_{12} + x_3 a_{13} \\ x_1 a_{12} + x_2 a_{22} + x_3 a_{23} \\ x_1 a_{13} + x_2 a_{23} + x_3 a_{23} \end{bmatrix} \quad (21)$$

■

Como que $2 \frac{\partial}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}} (\dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J}) \dot{\boldsymbol{\eta}} = 2 \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\eta}}$ se tiene, aplicando la regla de la cadena en el producto $\mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\eta}}$ que:

$$\mathbf{F} = \frac{d}{dt} (m \dot{\boldsymbol{\xi}} + \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\eta}}) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}} = m \ddot{\boldsymbol{\xi}} + \mathbf{J} \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\eta}} - \left(\frac{1}{2} 2 \frac{\partial}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}} (\dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J}) \dot{\boldsymbol{\eta}} - mg \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right) \quad (22)$$

Para llegar a este resultado se ha aplicado la derivada direccional a mgz :

$$D_q(mgz) = D_{\xi}(mgz) = mg \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Separando las componentes lineales y angulares en dos ecuaciones:

$$f = m\ddot{\xi} + mg \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = RT_B \quad (24)$$

$$\tau = J\ddot{\eta} + \underbrace{\left(J - \frac{\partial}{\partial \dot{\eta}}(\dot{\eta}^T J) \right)}_{C(\eta, \dot{\eta})} \dot{\eta} = J\ddot{\eta} + C(\eta, \dot{\eta}) \cdot \dot{\eta} \quad (25)$$

Donde $C(\eta, \dot{\eta})$ es la matriz de Coriolis. Para obtener el sistema de ecuaciones del modelo se deben aislar las aceleraciones y se obtiene:

$$\begin{cases} \ddot{\xi} = \frac{1}{m}RT_B - g \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \\ \ddot{\eta} = J^{-1}(\tau - C(\eta, \dot{\eta}) \cdot \dot{\eta}) \end{cases} \quad (26)$$

Reescribiendo estas ecuaciones de la forma $\dot{x} = f(x, u)$, donde u es el conjunto de fuerzas ejercidas por los motores, se tiene

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \\ \eta \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ \frac{1}{m}RT_B - g \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \\ \dot{\eta} \\ J^{-1}(\tau - C(\eta, \dot{\eta}) \cdot \dot{\eta}) \end{bmatrix} \quad (27)$$

Para realizar el control será útil representar el sistema 26 en forma de espacio de estados, y por tanto el vector de estados será de la forma $X = [x \ \dot{x} \ y \ \dot{y} \ z \ \dot{z} \ \phi \ \dot{\phi} \ \theta \ \dot{\theta} \ \psi \ \dot{\psi}]$. El punto de equilibrio de este sistema es aquél que hace que las componentes angulares del vector de estados no varíe y no haya desplazamientos lineales. Éste caso se puede dar para toda posición ξ dada. Ésto se tiene si todos los motores hacen exactamente la misma fuerza y entre todos cuatro la misma al peso del Quadcopter, además de tener un momento de inercia nulo y evitar que el ángulo ψ (yaw) varíe. Se trata de un punto de equilibrio forzado. El punto de equilibrio será entonces:

$$\begin{cases} X_0 = [x \ 0 \ y \ 0 \ z \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ U_0 = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \frac{m \cdot g}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (28)$$

El modelo se expresa en forma lineal como

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= [\mathbf{A}] \cdot \mathbf{X} + [\mathbf{K}] + [\mathbf{B}] \cdot \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} &= [\mathbf{C}] \cdot \mathbf{X}\end{aligned}\quad (29)$$

donde \mathbf{K} es el termino que incluye a la constante de la gravedad, separada de la función $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$. Se calculan las matrices \mathbf{A} y \mathbf{B} con los respectivos jacobianos en el punto de equilibrio:

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{X}_0, \mathbf{U}_0} \quad \mathbf{B} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{X}_0, \mathbf{U}_0} \quad (30)$$

En considerar que las posiciones angulares de ϕ y θ no diferirán significativamente respecto de zero y que el ángulo ψ no es relevante, se trabaja con una matriz de rotación R igual a la identidad

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Se ha mantenido el término independiente de la gravedad a fuera de la función $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ para no eliminarlo en la derivada del jacobiano. Las matrices \mathbf{A} y \mathbf{B} quedan como

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/m & 1/m & 1/m & 1/m \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -l/I_{xx} & 0 & l/I_{xx} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -l/I_{yy} & 0 & l/I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ b/I_{zz} & -b/I_{zz} & b/I_{zz} & -b/I_{zz} \end{bmatrix} \quad (32)$$

y las matrices \mathbf{K} i \mathbf{C} quedan como

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -9,81 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Éstos son los resultados sacados del procedimiento explicado en el *Anexo 1*, en donde se detalla el procedimiento.

Como se desea implantar un control sobre el equilibrio del Quadcopter en vez de la posición, se tendrán las variables pertinentes a la orientación, y por tanto el vector de estados estará formado por $[\dot{\phi} \ \ddot{\phi} \ \dot{\theta} \ \ddot{\theta}]$.

Queda entonces

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -l/I_{xx} & 0 & l/I_{xx} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -l/I_{yy} & 0 & l/I_{yy} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

donde el vector \mathbf{K} se ha obviado porque las componentes que se hubieran considerado de éste son todas nulas.

El eliminar estas componentes se hace porque no hay una referencia zero para el ángulo ψ , mientras que en el caso de los ángulos ϕ y θ la referencia siempre será la horizontal. No supone un infranqueable problema a la hora de hacer mover el Quadcopter, pues éste ya se puede desplazar en todo su plano horizontal, sin necesidad de girar en la dirección del *yaw*.

Para abordar el control de este sistema reducido se evalúa su controlabilidad y observabilidad. Se espera poder llevar el vector de estados de una posición a otra mediante una entrada adecuada, en un tiempo finito. La matriz de controlabilidad $\mathbf{W}_c = [B \ A \ BA \ A^2B \dots]$ es de la forma:

$$\mathbf{W}_c = \left[\begin{array}{cccc|cccc|c} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -l/I_{xx} & 0 & l/I_{xx} & \dots \\ 0 & -l/I_{xx} & 0 & l/I_{xx} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -l/I_{yy} & 0 & l/I_{yy} & 0 & \dots \\ -l/I_{yy} & 0 & l/I_{yy} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \end{array} \right] \quad (35)$$

Con las 8 primeras columnas es suficiente para ver que el rango de la matriz es máximo ya que el resto de componentes de la matriz son nulas. Por lo tanto, no hay subsistema inaccesible des de la entrada y es entonces controlable:

$$\text{rango}(\mathbf{W}_c) = 4 \ (\text{max.}) \rightarrow \text{Controlable} \quad (36)$$

Para evaluar la observabilidad se calcula la matriz de observabilidad \mathbf{W}_o y como en el caso anterior, se evaluará su rango:

$$\mathbf{W}_o = \left[\begin{array}{c} C \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline \dots \end{array} \right] \quad (37)$$

Otra vez no es necesario evaluar todos los términos de la matriz, ya que con las primeras 4 filas se ve que el rango vuelve a es máximo:

$$\text{rango}(\mathbf{W}_o) = 4 \ (\text{max.}) \rightarrow \text{Observable} \quad (38)$$

Ésto arroja lo que ya era sabido del sistema por su misma naturaleza física, y es que de un Quadcopter se pueden observar sus estados y que se puede gobernar (controlar) mediante los actuadores provistos.

3.3. Representación del modelo con Simulink

Obtenidas las ecuaciones del modelo, se quiere poder trabajar con éste para comprobar que la ley de control que se tenga es válida como para intentar controlar el aparato real. Se intenta que el modelo sea lo más preciso posible, por lo que no se tienen en cuenta linealizaciones ni aproximaciones de tipo alguno.

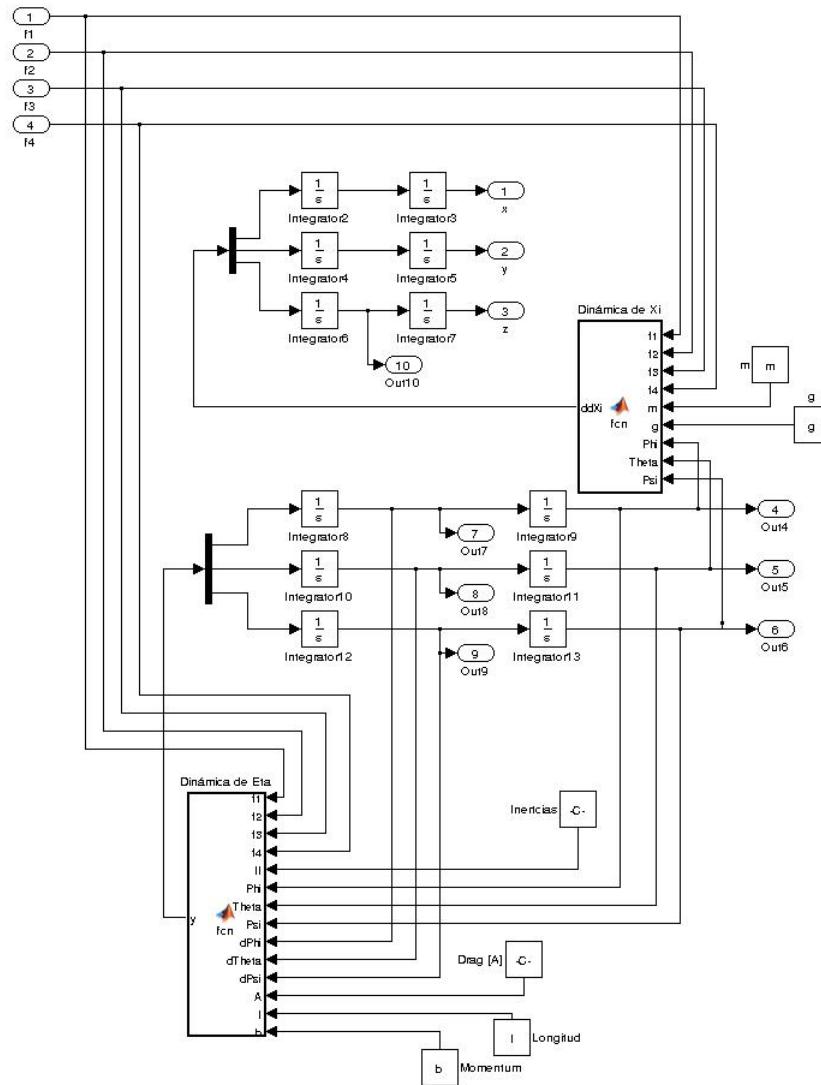


Figura 4: Modelo en Simulink de la dinámica del Quadcopter

Aunque en el modelo se hayan tenido en cuenta los respectivos coeficientes de fricción con el aire, como se ha visto en el apartado anterior no se han tenido en cuenta a la hora de linealizar el sistema ni calcular la ley de control ya que la determinación de estos parámetros no es fácil y de incluirse podría aportar incertidumbre.

Tal y como se explica a la hora de caracterizar los motores, no se pudo encontrar la

relación existente que la fuerza y momento ejercido por cada hélice, por lo que en este caso se ha supuesto que varía proporcionalmente con b .

Los dos bloques presentes en el modelo (*Function Matlab*) definen su dinámica. La función *Dinmica de Xi* determina las aceleraciones lineales. El código que se ejecuta en ésta es:

```

1 function ddXi = fcn ( f1 ,f2 ,f3 ,f4 ,m,g ,Phi ,Theta ,Psi )
2 %#codegen
3
4 R=[[cos(Psi)*cos(Theta) cos(Psi)*sin(Theta)*sin(Phi)-sin(Psi)*
5   cos(Phi) cos(Psi)*sin(Theta)*cos(Phi)+sin(Psi)*sin(Phi) ];
6   [sin(Psi)*cos(Theta) sin(Psi)*sin(Theta)*sin(Phi)+cos(Psi)*
7     cos(Phi) sin(Psi)*sin(Theta)*cos(Phi)-cos(Psi)*sin(Phi) ];
8   [-sin(Theta) cos(Theta)*sin(Phi) cos(Theta)*cos(Phi) ]];
9
10 ddXi = R*T/m+[0; 0; -g];

```

En ella se calcula la matriz de rotación R en función de la posición angular(ϕ, θ y ψ) y con el vector de fuerzas en la base móvil (del cuerpo *Body*) se calcula en vector de aceleraciones lineales, es decir, $\ddot{\xi} = [\ddot{\phi} \quad \ddot{\theta} \quad \ddot{\psi}]^T$.

En la función *Dinmica de Eta* se calculan las aceleraciones angulares. Su código corresponde a:

```

1 function y = fcn ( f1 ,f2 ,f3 ,f4 ,II ,Phi ,Theta ,Psi ,dPhi ,dTheta ,dPsi ,
2 A,l,b)
3 %#codegen
4
5 Ixx=II (1);
6 Iyy=II (2);
7 Izz=II (3);
8
9 TauB=[[ 1*(f4-f2) ];
10   [ 1*(f3-f1) ];
11   [ b*(f1+f3-f2-f4) ]];
12 Weta=[[ 1 0 -sin(Theta) ];
13   [ 0 1 sin(Theta) ];
14   [ 0 -sin(Theta) 0 ]];
15
16 dWeta=[[-l*(f4-f2) ];
17   [-l*(f3-f1) ];
18   [ b*(f1+f3-f2-f4) ]];
19
20 deta=[0 0 0 ];
21
22 deta=deta+dWeta;
23
24 deta=deta+TauB;
25
26 deta=deta/A;
27
28 deta=deta+l;
29
30 deta=deta*B;
31
32 deta=deta+(dPhi*dTheta);
33
34 deta=deta+(dTheta*dPsi);
35
36 deta=deta+(dPsi*dPhi);
37
38 deta=deta+(dPhi*dPsi);
39
40 deta=deta+(dPsi*dPhi);
41
42 deta=deta+(dTheta*dPsi);
43
44 deta=deta+(dPsi*dTheta);
45
46 deta=deta+(dPhi*dTheta);
47
48 deta=deta+(dTheta*dPhi);
49
50 deta=deta+(dPsi*dPhi);
51
52 deta=deta+(dPhi*dPsi);
53
54 deta=deta+(dPsi*dPhi);
55
56 deta=deta+(dTheta*dPsi);
57
58 deta=deta+(dPsi*dTheta);
59
60 deta=deta+(dPhi*dPsi);
61
62 deta=deta+(dPsi*dPhi);
63
64 deta=deta+(dTheta*dPhi);
65
66 deta=deta+(dPhi*dTheta);
67
68 deta=deta+(dPsi*dTheta);
69
70 deta=deta+(dTheta*dPsi);
71
72 deta=deta+(dPsi*dTheta);
73
74 deta=deta+(dPhi*dPsi);
75
76 deta=deta+(dPsi*dPhi);
77
78 deta=deta+(dTheta*dPhi);
79
80 deta=deta+(dPhi*dTheta);
81
82 deta=deta+(dPsi*dPhi);
83
84 deta=deta+(dTheta*dPsi);
85
86 deta=deta+(dPsi*dTheta);
87
88 deta=deta+(dPhi*dPsi);
89
90 deta=deta+(dPsi*dPhi);
91
92 deta=deta+(dTheta*dPhi);
93
94 deta=deta+(dPhi*dTheta);
95
96 deta=deta+(dPsi*dTheta);
97
98 deta=deta+(dTheta*dPsi);
99
100 deta=deta+(dPsi*dTheta);
101
102 deta=deta+(dPhi*dPsi);
103
104 deta=deta+(dPsi*dPhi);
105
106 deta=deta+(dTheta*dPhi);
107
108 deta=deta+(dPhi*dTheta);
109
110 deta=deta+(dPsi*dTheta);
111
112 deta=deta+(dTheta*dPsi);
113
114 deta=deta+(dPsi*dTheta);
115
116 deta=deta+(dPhi*dPsi);
117
118 deta=deta+(dPsi*dPhi);
119
120 deta=deta+(dTheta*dPhi);
121
122 deta=deta+(dPhi*dTheta);
123
124 deta=deta+(dPsi*dTheta);
125
126 deta=deta+(dTheta*dPsi);
127
128 deta=deta+(dPsi*dTheta);
129
130 deta=deta+(dPhi*dPsi);
131
132 deta=deta+(dPsi*dPhi);
133
134 deta=deta+(dTheta*dPhi);
135
136 deta=deta+(dPhi*dTheta);
137
138 deta=deta+(dPsi*dTheta);
139
140 deta=deta+(dTheta*dPsi);
141
142 deta=deta+(dPsi*dTheta);
143
144 deta=deta+(dPhi*dPsi);
145
146 deta=deta+(dPsi*dPhi);
147
148 deta=deta+(dTheta*dPhi);
149
150 deta=deta+(dPhi*dTheta);
151
152 deta=deta+(dPsi*dTheta);
153
154 deta=deta+(dTheta*dPsi);
155
156 deta=deta+(dPsi*dTheta);
157
158 deta=deta+(dPhi*dPsi);
159
160 deta=deta+(dPsi*dPhi);
161
162 deta=deta+(dTheta*dPhi);
163
164 deta=deta+(dPhi*dTheta);
165
166 deta=deta+(dPsi*dTheta);
167
168 deta=deta+(dTheta*dPsi);
169
170 deta=deta+(dPsi*dTheta);
171
172 deta=deta+(dPhi*dPsi);
173
174 deta=deta+(dPsi*dPhi);
175
176 deta=deta+(dTheta*dPhi);
177
178 deta=deta+(dPhi*dTheta);
179
180 deta=deta+(dPsi*dTheta);
181
182 deta=deta+(dTheta*dPsi);
183
184 deta=deta+(dPsi*dTheta);
185
186 deta=deta+(dPhi*dPsi);
187
188 deta=deta+(dPsi*dPhi);
189
190 deta=deta+(dTheta*dPhi);
191
192 deta=deta+(dPhi*dTheta);
193
194 deta=deta+(dPsi*dTheta);
195
196 deta=deta+(dTheta*dPsi);
197
198 deta=deta+(dPsi*dTheta);
199
200 deta=deta+(dPhi*dPsi);
201
202 deta=deta+(dPsi*dPhi);
203
204 deta=deta+(dTheta*dPhi);
205
206 deta=deta+(dPhi*dTheta);
207
208 deta=deta+(dPsi*dTheta);
209
210 deta=deta+(dTheta*dPsi);
211
212 deta=deta+(dPsi*dTheta);
213
214 deta=deta+(dPhi*dPsi);
215
216 deta=deta+(dPsi*dPhi);
217
218 deta=deta+(dTheta*dPhi);
219
220 deta=deta+(dPhi*dTheta);
221
222 deta=deta+(dPsi*dTheta);
223
224 deta=deta+(dTheta*dPsi);
225
226 deta=deta+(dPsi*dTheta);
227
228 deta=deta+(dPhi*dPsi);
229
230 deta=deta+(dPsi*dPhi);
231
232 deta=deta+(dTheta*dPhi);
233
234 deta=deta+(dPhi*dTheta);
235
236 deta=deta+(dPsi*dTheta);
237
238 deta=deta+(dTheta*dPsi);
239
240 deta=deta+(dPsi*dTheta);
241
242 deta=deta+(dPhi*dPsi);
243
244 deta=deta+(dPsi*dPhi);
245
246 deta=deta+(dTheta*dPhi);
247
248 deta=deta+(dPhi*dTheta);
249
250 deta=deta+(dPsi*dTheta);
251
252 deta=deta+(dTheta*dPsi);
253
254 deta=deta+(dPsi*dTheta);
255
256 deta=deta+(dPhi*dPsi);
257
258 deta=deta+(dPsi*dPhi);
259
260 deta=deta+(dTheta*dPhi);
261
262 deta=deta+(dPhi*dTheta);
263
264 deta=deta+(dPsi*dTheta);
265
266 deta=deta+(dTheta*dPsi);
267
268 deta=deta+(dPsi*dTheta);
269
270 deta=deta+(dPhi*dPsi);
271
272 deta=deta+(dPsi*dPhi);
273
274 deta=deta+(dTheta*dPhi);
275
276 deta=deta+(dPhi*dTheta);
277
278 deta=deta+(dPsi*dTheta);
279
280 deta=deta+(dTheta*dPsi);
281
282 deta=deta+(dPsi*dTheta);
283
284 deta=deta+(dPhi*dPsi);
285
286 deta=deta+(dPsi*dPhi);
287
288 deta=deta+(dTheta*dPhi);
289
290 deta=deta+(dPhi*dTheta);
291
292 deta=deta+(dPsi*dTheta);
293
294 deta=deta+(dTheta*dPsi);
295
296 deta=deta+(dPsi*dTheta);
297
298 deta=deta+(dPhi*dPsi);
299
300 deta=deta+(dPsi*dPhi);
301
302 deta=deta+(dTheta*dPhi);
303
304 deta=deta+(dPhi*dTheta);
305
306 deta=deta+(dPsi*dTheta);
307
308 deta=deta+(dTheta*dPsi);
309
310 deta=deta+(dPsi*dTheta);
311
312 deta=deta+(dPhi*dPsi);
313
314 deta=deta+(dPsi*dPhi);
315
316 deta=deta+(dTheta*dPhi);
317
318 deta=deta+(dPhi*dTheta);
319
320 deta=deta+(dPsi*dTheta);
321
322 deta=deta+(dTheta*dPsi);
323
324 deta=deta+(dPsi*dTheta);
325
326 deta=deta+(dPhi*dPsi);
327
328 deta=deta+(dPsi*dPhi);
329
330 deta=deta+(dTheta*dPhi);
331
332 deta=deta+(dPhi*dTheta);
333
334 deta=deta+(dPsi*dTheta);
335
336 deta=deta+(dTheta*dPsi);
337
338 deta=deta+(dPsi*dTheta);
339
340 deta=deta+(dPhi*dPsi);
341
342 deta=deta+(dPsi*dPhi);
343
344 deta=deta+(dTheta*dPhi);
345
346 deta=deta+(dPhi*dTheta);
347
348 deta=deta+(dPsi*dTheta);
349
350 deta=deta+(dTheta*dPsi);
351
352 deta=deta+(dPsi*dTheta);
353
354 deta=deta+(dPhi*dPsi);
355
356 deta=deta+(dPsi*dPhi);
357
358 deta=deta+(dTheta*dPhi);
359
360 deta=deta+(dPhi*dTheta);
361
362 deta=deta+(dPsi*dTheta);
363
364 deta=deta+(dTheta*dPsi);
365
366 deta=deta+(dPsi*dTheta);
367
368 deta=deta+(dPhi*dPsi);
369
370 deta=deta+(dPsi*dPhi);
371
372 deta=deta+(dTheta*dPhi);
373
374 deta=deta+(dPhi*dTheta);
375
376 deta=deta+(dPsi*dTheta);
377
378 deta=deta+(dTheta*dPsi);
379
380 deta=deta+(dPsi*dTheta);
381
382 deta=deta+(dPhi*dPsi);
383
384 deta=deta+(dPsi*dPhi);
385
386 deta=deta+(dTheta*dPhi);
387
388 deta=deta+(dPhi*dTheta);
389
390 deta=deta+(dPsi*dTheta);
391
392 deta=deta+(dTheta*dPsi);
393
394 deta=deta+(dPsi*dTheta);
395
396 deta=deta+(dPhi*dPsi);
397
398 deta=deta+(dPsi*dPhi);
399
400 deta=deta+(dTheta*dPhi);
401
402 deta=deta+(dPhi*dTheta);
403
404 deta=deta+(dPsi*dTheta);
405
406 deta=deta+(dTheta*dPsi);
407
408 deta=deta+(dPsi*dTheta);
409
410 deta=deta+(dPhi*dPsi);
411
412 deta=deta+(dPsi*dPhi);
413
414 deta=deta+(dTheta*dPhi);
415
416 deta=deta+(dPhi*dTheta);
417
418 deta=deta+(dPsi*dTheta);
419
420 deta=deta+(dTheta*dPsi);
421
422 deta=deta+(dPsi*dTheta);
423
424 deta=deta+(dPhi*dPsi);
425
426 deta=deta+(dPsi*dPhi);
427
428 deta=deta+(dTheta*dPhi);
429
430 deta=deta+(dPhi*dTheta);
431
432 deta=deta+(dPsi*dTheta);
433
434 deta=deta+(dTheta*dPsi);
435
436 deta=deta+(dPsi*dTheta);
437
438 deta=deta+(dPhi*dPsi);
439
440 deta=deta+(dPsi*dPhi);
441
442 deta=deta+(dTheta*dPhi);
443
444 deta=deta+(dPhi*dTheta);
445
446 deta=deta+(dPsi*dTheta);
447
448 deta=deta+(dTheta*dPsi);
449
450 deta=deta+(dPsi*dTheta);
451
452 deta=deta+(dPhi*dPsi);
453
454 deta=deta+(dPsi*dPhi);
455
456 deta=deta+(dTheta*dPhi);
457
458 deta=deta+(dPhi*dTheta);
459
460 deta=deta+(dPsi*dTheta);
461
462 deta=deta+(dTheta*dPsi);
463
464 deta=deta+(dPsi*dTheta);
465
466 deta=deta+(dPhi*dPsi);
467
468 deta=deta+(dPsi*dPhi);
469
470 deta=deta+(dTheta*dPhi);
471
472 deta=deta+(dPhi*dTheta);
473
474 deta=deta+(dPsi*dTheta);
475
476 deta=deta+(dTheta*dPsi);
477
478 deta=deta+(dPsi*dTheta);
479
480 deta=deta+(dPhi*dPsi);
481
482 deta=deta+(dPsi*dPhi);
483
484 deta=deta+(dTheta*dPhi);
485
486 deta=deta+(dPhi*dTheta);
487
488 deta=deta+(dPsi*dTheta);
489
490 deta=deta+(dTheta*dPsi);
491
492 deta=deta+(dPsi*dTheta);
493
494 deta=deta+(dPhi*dPsi);
495
496 deta=deta+(dPsi*dPhi);
497
498 deta=deta+(dTheta*dPhi);
499
500 deta=deta+(dPhi*dTheta);
501
502 deta=deta+(dPsi*dTheta);
503
504 deta=deta+(dTheta*dPsi);
505
506 deta=deta+(dPsi*dTheta);
507
508 deta=deta+(dPhi*dPsi);
509
510 deta=deta+(dPsi*dPhi);
511
512 deta=deta+(dTheta*dPhi);
513
514 deta=deta+(dPhi*dTheta);
515
516 deta=deta+(dPsi*dTheta);
517
518 deta=deta+(dTheta*dPsi);
519
520 deta=deta+(dPsi*dTheta);
521
522 deta=deta+(dPhi*dPsi);
523
524 deta=deta+(dPsi*dPhi);
525
526 deta=deta+(dTheta*dPhi);
527
528 deta=deta+(dPhi*dTheta);
529
530 deta=deta+(dPsi*dTheta);
531
532 deta=deta+(dTheta*dPsi);
533
534 deta=deta+(dPsi*dTheta);
535
536 deta=deta+(dPhi*dPsi);
537
538 deta=deta+(dPsi*dPhi);
539
540 deta=deta+(dTheta*dPhi);
541
542 deta=deta+(dPhi*dTheta);
543
544 deta=deta+(dPsi*dTheta);
545
546 deta=deta+(dTheta*dPsi);
547
548 deta=deta+(dPsi*dTheta);
549
550 deta=deta+(dPhi*dPsi);
551
552 deta=deta+(dPsi*dPhi);
553
554 deta=deta+(dTheta*dPhi);
555
556 deta=deta+(dPhi*dTheta);
557
558 deta=deta+(dPsi*dTheta);
559
560 deta=deta+(dTheta*dPsi);
561
562 deta=deta+(dPsi*dTheta);
563
564 deta=deta+(dPhi*dPsi);
565
566 deta=deta+(dPsi*dPhi);
567
568 deta=deta+(dTheta*dPhi);
569
570 deta=deta+(dPhi*dTheta);
571
572 deta=deta+(dPsi*dTheta);
573
574 deta=deta+(dTheta*dPsi);
575
576 deta=deta+(dPsi*dTheta);
577
578 deta=deta+(dPhi*dPsi);
579
580 deta=deta+(dPsi*dPhi);
581
582 deta=deta+(dTheta*dPhi);
583
584 deta=deta+(dPhi*dTheta);
585
586 deta=deta+(dPsi*dTheta);
587
588 deta=deta+(dTheta*dPsi);
589
590 deta=deta+(dPsi*dTheta);
591
592 deta=deta+(dPhi*dPsi);
593
594 deta=deta+(dPsi*dPhi);
595
596 deta=deta+(dTheta*dPhi);
597
598 deta=deta+(dPhi*dTheta);
599
600 deta=deta+(dPsi*dTheta);
601
602 deta=deta+(dTheta*dPsi);
603
604 deta=deta+(dPsi*dTheta);
605
606 deta=deta+(dPhi*dPsi);
607
608 deta=deta+(dPsi*dPhi);
609
610 deta=deta+(dTheta*dPhi);
611
612 deta=deta+(dPhi*dTheta);
613
614 deta=deta+(dPsi*dTheta);
615
616 deta=deta+(dTheta*dPsi);
617
618 deta=deta+(dPsi*dTheta);
619
620 deta=deta+(dPhi*dPsi);
621
622 deta=deta+(dPsi*dPhi);
623
624 deta=deta+(dTheta*dPhi);
625
626 deta=deta+(dPhi*dTheta);
627
628 deta=deta+(dPsi*dTheta);
629
630 deta=deta+(dTheta*dPsi);
631
632 deta=deta+(dPsi*dTheta);
633
634 deta=deta+(dPhi*dPsi);
635
636 deta=deta+(dPsi*dPhi);
637
638 deta=deta+(dTheta*dPhi);
639
640 deta=deta+(dPhi*dTheta);
641
642 deta=deta+(dPsi*dTheta);
643
644 deta=deta+(dTheta*dPsi);
645
646 deta=deta+(dPsi*dTheta);
647
648 deta=deta+(dPhi*dPsi);
649
650 deta=deta+(dPsi*dPhi);
651
652 deta=deta+(dTheta*dPhi);
653
654 deta=deta+(dPhi*dTheta);
655
656 deta=deta+(dPsi*dTheta);
657
658 deta=deta+(dTheta*dPsi);
659
660 deta=deta+(dPsi*dTheta);
661
662 deta=deta+(dPhi*dPsi);
663
664 deta=deta+(dPsi*dPhi);
665
666 deta=deta+(dTheta*dPhi);
667
668 deta=deta+(dPhi*dTheta);
669
670 deta=deta+(dPsi*dTheta);
671
672 deta=deta+(dTheta*dPsi);
673
674 deta=deta+(dPsi*dTheta);
675
676 deta=deta+(dPhi*dPsi);
677
678 deta=deta+(dPsi*dPhi);
679
680 deta=deta+(dTheta*dPhi);
681
682 deta=deta+(dPhi*dTheta);
683
684 deta=deta+(dPsi*dTheta);
685
686 deta=deta+(dTheta*dPsi);
687
688 deta=deta+(dPsi*dTheta);
689
690 deta=deta+(dPhi*dPsi);
691
692 deta=deta+(dPsi*dPhi);
693
694 deta=deta+(dTheta*dPhi);
695
696 deta=deta+(dPhi*dTheta);
697
698 deta=deta+(dPsi*dTheta);
699
700 deta=deta+(dTheta*dPsi);
701
702 deta=deta+(dPsi*dTheta);
703
704 deta=deta+(dPhi*dPsi);
705
706 deta=deta+(dPsi*dPhi);
707
708 deta=deta+(dTheta*dPhi);
709
710 deta=deta+(dPhi*dTheta);
711
712 deta=deta+(dPsi*dTheta);
713
714 deta=deta+(dTheta*dPsi);
715
716 deta=deta+(dPsi*dTheta);
717
718 deta=deta+(dPhi*dPsi);
719
720 deta=deta+(dPsi*dPhi);
721
722 deta=deta+(dTheta*dPhi);
723
724 deta=deta+(dPhi*dTheta);
725
726 deta=deta+(dPsi*dTheta);
727
728 deta=deta+(dTheta*dPsi);
729
730 deta=deta+(dPsi*dTheta);
731
732 deta=deta+(dPhi*dPsi);
733
734 deta=deta+(dPsi*dPhi);
735
736 deta=deta+(dTheta*dPhi);
737
738 deta=deta+(dPhi*dTheta);
739
740 deta=deta+(dPsi*dTheta);
741
742 deta=deta+(dTheta*dPsi);
743
744 deta=deta+(dPsi*dTheta);
745
746 deta=deta+(dPhi*dPsi);
747
748 deta=deta+(dPsi*dPhi);
749
750 deta=deta+(dTheta*dPhi);
751
752 deta=deta+(dPhi*dTheta);
753
754 deta=deta+(dPsi*dTheta);
755
756 deta=deta+(dTheta*dPsi);
757
758 deta=deta+(dPsi*dTheta);
759
760 deta=deta+(dPhi*dPsi);
761
762 deta=deta+(dPsi*dPhi);
763
764 deta=deta+(dTheta*dPhi);
765
766 deta=deta+(dPhi*dTheta);
767
768 deta=deta+(dPsi*dTheta);
769
770 deta=deta+(dTheta*dPsi);
771
772 deta=deta+(dPsi*dTheta);
773
774 deta=deta+(dPhi*dPsi);
775
776 deta=deta+(dPsi*dPhi);
777
778 deta=deta+(dTheta*dPhi);
779
780 deta=deta+(dPhi*dTheta);
781
782 deta=deta+(dPsi*dTheta);
783
784 deta=deta+(dTheta*dPsi);
785
786 deta=deta+(dPsi*dTheta);
787
788 deta=deta+(dPhi*dPsi);
789
790 deta=deta+(dPsi*dPhi);
791
792 deta=deta+(dTheta*dPhi);
793
794 deta=deta+(dPhi*dTheta);
795
796 deta=deta+(dPsi*dTheta);
797
798 deta=deta+(dTheta*dPsi);
799
800 deta=deta+(dPsi*dTheta);
801
802 deta=deta+(dPhi*dPsi);
803
804 deta=deta+(dPsi*dPhi);
805
806 deta=deta+(dTheta*dPhi);
807
808 deta=deta+(dPhi*dTheta);
809
810 deta=deta+(dPsi*dTheta);
811
812 deta=deta+(dTheta*dPsi);
813
814 deta=deta+(dPsi*dTheta);
815
816 deta=deta+(dPhi*dPsi);
817
818 deta=deta+(dPsi*dPhi);
819
820 deta=deta+(dTheta*dPhi);
821
822 deta=deta+(dPhi*dTheta);
823
824 deta=deta+(dPsi*dTheta);
825
826 deta=deta+(dTheta*dPsi);
827
828 deta=deta+(dPsi*dTheta);
829
830 deta=deta+(dPhi*dPsi);
831
832 deta=deta+(dPsi*dPhi);
833
834 deta=deta+(dTheta*dPhi);
835
836 deta=deta+(dPhi*dTheta);
837
838 deta=deta+(dPsi*dTheta);
839
840 deta=deta+(dTheta*dPsi);
841
842 deta=deta+(dPsi*dTheta);
843
844 deta=deta+(dPhi*dPsi);
845
846 deta=deta+(dPsi*dPhi);
847
848 deta=deta+(dTheta*dPhi);
849
850 deta=deta+(dPhi*dTheta);
851
852 deta=deta+(dPsi*dTheta);
853
854 deta=deta+(dTheta*dPsi);
855
856 deta=deta+(dPsi*dTheta);
857
858 deta=deta+(dPhi*dPsi);
859
860 deta=deta+(dPsi*dPhi);
861
862 deta=deta+(dTheta*dPhi);
863
864 deta=deta+(dPhi*dTheta);
865
866 deta=deta+(dPsi*dTheta);
867
868 deta=deta+(dTheta*dPsi);
869
870 deta=deta+(dPsi*dTheta);
871
872 deta=deta+(dPhi*dPsi);
873
874 deta=deta+(dPsi*dPhi);
875
876 deta=deta+(dTheta*dPhi);
877
878 deta=deta+(dPhi*dTheta);
879
880 deta=deta+(dPsi*dTheta);
881
882 deta=deta+(dTheta*dPsi);
883
884 deta=deta+(dPsi*dTheta);
885
886 deta=deta+(dPhi*dPsi);
887
888 deta=deta+(dPsi*dPhi);
889
890 deta=deta+(dTheta*dPhi);
891
892 deta=deta+(dPhi*dTheta);
893
894 deta=deta+(dPsi*dTheta);
895
896 deta=deta+(dTheta*dPsi);
897
898 deta=deta+(dPsi*dTheta);
899
900 deta=deta+(dPhi*dPsi);
901
902 deta=deta+(dPsi*dPhi);
903
904 deta=deta+(dTheta*dPhi);
905
906 deta=deta+(dPhi*dTheta);
907
908 deta=deta+(dPsi*dTheta);
909
910 deta=deta+(dTheta*dPsi);
911
912 deta=deta+(dPsi*dTheta);
913
914 deta=deta+(dPhi*dPsi);
915
916 deta=deta+(dPsi*dPhi);
917
918 deta=deta+(dTheta*dPhi);
919
920 deta=deta+(dPhi*dTheta);
921
922 deta=deta+(dPsi*dTheta);
923
924 deta=deta+(dTheta*dPsi);
925
926 deta=deta+(dPsi*dTheta);
927
928 deta=deta+(dPhi*dPsi);
929
930 deta=deta+(dPsi*dPhi);
931
932 deta=deta+(dTheta*dPhi);
933
934 deta=deta+(dPhi*dTheta);
935
936 deta=deta+(dPsi*dTheta);
937
938 deta=deta+(dTheta*dPsi);
939
940 deta=deta+(dPsi*dTheta);
941
942 deta=deta+(dPhi*dPsi);
943
944 deta=deta+(dPsi*dPhi);
945
946 deta=deta+(dTheta*dPhi);
947
948 deta=deta+(dPhi*dTheta);
949
950 deta=deta+(dPsi*dTheta);
951
952 deta=deta+(dTheta*dPsi);
953
954 deta=deta+(dPsi*dTheta);
955
956 deta=deta+(dPhi*dPsi);
957
958 deta=deta+(dPsi*dPhi);
959
960 deta=deta+(dTheta*dPhi);
961
962 deta=deta+(dPhi*dTheta);
963
964 deta=deta+(dPsi*dTheta);
965
966 deta=deta+(dTheta*dPsi);
967
968 deta=deta+(dPsi*dTheta);
969
970 deta=deta+(dPhi*dPsi);
971
972 deta=deta+(dPsi*dPhi);
973
974 deta=deta+(dTheta*dPhi);
975
976 deta=deta+(dPhi*dTheta);
977
978 deta=deta+(dPsi*dTheta);
979
980 deta=deta+(dTheta*dPsi);
981
982 deta=deta+(dPsi*dTheta);
983
984 deta=deta+(dPhi*dPsi);
985
986 deta=deta+(dPsi*dPhi);
987
988 deta=deta+(dTheta*dPhi);
989
990 deta=deta+(dPhi*dTheta);
991
992 deta=deta+(dPsi*dTheta);
993
994 deta=deta+(dTheta*dPsi);
995
996 deta=deta+(dPsi*dTheta);
997
998 deta=deta+(dPhi*dPsi);
999
1000 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1001
1002 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1003
1004 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1005
1006 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1007
1008 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1009
1010 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1011
1012 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1013
1014 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1015
1016 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1017
1018 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1019
1020 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1021
1022 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1023
1024 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1025
1026 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1027
1028 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1029
1030 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1031
1032 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1033
1034 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1035
1036 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1037
1038 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1039
1040 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1041
1042 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1043
1044 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1045
1046 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1047
1048 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1049
1050 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1051
1052 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1053
1054 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1055
1056 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1057
1058 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1059
1060 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1061
1062 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1063
1064 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1065
1066 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1067
1068 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1069
1070 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1071
1072 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1073
1074 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1075
1076 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1077
1078 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1079
1080 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1081
1082 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1083
1084 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1085
1086 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1087
1088 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1089
1090 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1091
1092 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1093
1094 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1095
1096 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1097
1098 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1099
1100 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1101
1102 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1103
1104 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1105
1106 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1107
1108 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1109
1110 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1111
1112 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1113
1114 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1115
1116 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1117
1118 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1119
1120 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1121
1122 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1123
1124 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1125
1126 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1127
1128 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1129
1130 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1131
1132 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1133
1134 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1135
1136 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1137
1138 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1139
1140 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1141
1142 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1143
1144 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1145
1146 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1147
1148 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1149
1150 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1151
1152 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1153
1154 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1155
1156 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1157
1158 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1159
1160 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1161
1162 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1163
1164 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1165
1166 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1167
1168 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1169
1170 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1171
1172 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1173
1174 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1175
1176 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1177
1178 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1179
1180 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1181
1182 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1183
1184 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1185
1186 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1187
1188 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1189
1190 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1191
1192 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1193
1194 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1195
1196 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1197
1198 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1199
1200 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1201
1202 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1203
1204 deta=deta+(dTheta*dPsi);
1205
1206 deta=deta+(dPsi*dTheta);
1207
1208 deta=deta+(dPhi*dPsi);
1209
1210 deta=deta+(dPsi*dPhi);
1211
1212 deta=deta+(dTheta*dPhi);
1213
1214 deta=deta+(dPhi*dTheta);
1215
```

```

13      [ 0   cos(Phi)  cos(Theta)*sin(Phi) ] ;
14      [ 0 -sin(Phi)  cos(Theta)*cos(Phi) ] ] ;
15
16 J=transpose(Weta)*[[ Ixx 0 0];[0 Iyy 0];[0 0 Izz]]*Weta;
17
18 CdE1=(Iyy*dTheta^2*sin(2*Phi))/2 - (Izz*dTheta^2*sin(2*Phi))/2
     - Ixx*dPsi*dTheta*cos(Theta) - (Iyy*dPsi^2*sin(2*Phi)*cos(
     Theta)^2)/2 + (Izz*dPsi^2*sin(2*Phi)*cos(Theta)^2)/2 - Iyy*
     dPsi*dTheta*cos(2*Phi)*cos(Theta) + Izz*dPsi*dTheta*cos(2*
     Phi)*cos(Theta);
19
20 CdE2=dPhi*(Ixx*dPsi*cos(Theta) - 2*Iyy*dTheta*cos(Phi)*sin(Phi)
     + 2*Izz*dTheta*cos(Phi)*sin(Phi) + Iyy*dPsi*cos(Phi)^2*cos(
     Theta) - Izz*dPsi*cos(Phi)^2*cos(Theta) - Iyy*dPsi*cos(Theta)*
     sin(Phi)^2 + Izz*dPsi*cos(Theta)*sin(Phi)^2) - Ixx*dPsi
     ^2*cos(Theta)*sin(Theta) + Iyy*dPsi^2*cos(Theta)*sin(Phi)^2 +
     Izz*dPsi^2*cos(Phi)*sin(Theta);
21
22 CdE3=-dPhi*(Ixx*dTheta*cos(Theta) - Iyy*dTheta*cos(Phi)^2*cos(
     Theta) + Izz*dTheta*cos(Phi)^2*cos(Theta) + Iyy*dTheta*cos(
     Theta)*sin(Phi)^2 - Izz*dTheta*cos(Theta)*sin(Phi)^2 - 2*Iyy*
     dPsi*cos(Phi)*cos(Theta)^2*sin(Phi) + 2*Izz*dPsi*cos(Phi)*
     cos(Theta)^2*sin(Phi) - Iyy*dTheta^2*cos(Phi)*sin(Phi)*sin(
     Theta) + Izz*dTheta^2*cos(Phi)*sin(Phi)*sin(Theta) + 2*Ixx*
     dPsi*dTheta*cos(Theta)*sin(Theta) - 2*Izz*dPsi*dTheta*cos(
     Phi)^2*cos(Theta)*sin(Theta) - 2*Iyy*dPsi*dTheta*cos(Theta)*
     sin(Phi)^2*sin(Theta));
23
24 CdEta=[CdE1; CdE2; CdE3];
25
26 y = inv(J)*(TauB-CdEta);

```

En esta función se calcula el vector de momentos ($\mathbf{\TauB}$), se calcula la actual matriz de cambio de base de velocidad angular a derivadas de ángulos de Euler ($\mathbf{W}\dot{\eta}$), se actualiza el tensor de inercias según este cambio y se obtiene el producto $\mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) \cdot \dot{\boldsymbol{\eta}}$. Finalmente devuelve las aceleraciones según se obtienen en la ecuación 27.

Los parámetros que se cargan en Matlab necesarios para definir este modelo son

```
1 % Declaracion simbolica de las variables
```



```
2
3 syms x dx ddx y dy ddy z dz ddz Phi dPhi ddPhi Theta dTheta
   ddTheta Psi dPsi ddPsi
4 syms f1 f2 f3 f4
5 syms Ixx Iyy Izz
6 syms Ax Ay Az
7 syms k m g l b
8
9 l=0.165 % Longitud de los
           brazos
10 Ixx=0.004 % Producto de inercia
             en x
11 Iyy=0.004 % Producto de inercia
             en y
12 Izz=0.008 % Producto de inercia
             en z
13 m=0.85 % Masa del Quadcopter
14 b=1.2*10^-7 % Relacion Momento-
               Fuerza
15 g=9.81 % Aceleracion gravedad
16
17 Ax=0 % Friccion aire (no
           usado)
18 Ay=0
19 Az=0
```

4. Diseño del controlador

Con el modelo linealizado del sistema ya se tiene lo que emulará una respuesta verosímil y acorde a la realidad. Para que haga lo que uno espera se decide aplicar un control óptimo mediante un regulador LQR (Linear Quadratic Regulator).

4.1. Regulador Quadrático Lineal

Dado un sistema lineal de tiempo continuo definido por

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= [\mathbf{A}] \cdot \mathbf{X} + [\mathbf{B}] \cdot \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} &= [\mathbf{C}] \cdot \mathbf{X}\end{aligned}\tag{39}$$

se quiere operar este sistema mediante un coste mínimo según un criterio determinado. Este criterio se caracteriza por tener una función de costes \mathbf{J} que depende tanto de los estados como de las entradas del sistema [8]

$$\mathbf{J} = \int_0^{\infty} (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{N} \mathbf{U}) dt\tag{40}$$

y se definen los pesos \mathbf{Q} , \mathbf{R} y \mathbf{N} como matrices definidas positivas y simétricas, según la penalización que se le quiera dar a los estados (\mathbf{X}), acciones (\mathbf{U}) o el efecto de ambos (\mathbf{N}) respectivamente, tal que se minimice el coste \mathbf{J} . Se obtiene la ley de control $\mathbf{U} = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{X}$ de

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{S} + \mathbf{N}^T)\tag{41}$$

donde \mathbf{S} es la solución de la ecuación de Riccati asociada

$$\mathbf{A}^T \mathbf{S} + \mathbf{S} \mathbf{A} - (\mathbf{S} \mathbf{B} + \mathbf{N}) \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{S} + \mathbf{N}^T) + \mathbf{Q} = -\dot{\mathbf{S}}\tag{42}$$

En este caso se supondrá que $\mathbf{N} = 0$ (ver [9]) se tendrá

$$\mathbf{J} = \int_0^{\infty} (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U}) dt\tag{43}$$

y por consiguiente, la ecuación a resolver es

$$\mathbf{A}^T \mathbf{S} + \mathbf{S} \mathbf{A} - \mathbf{S} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{S} + \mathbf{Q} = 0\tag{44}$$

Finalmente, de éste procedimiento se obtiene, además de las constantes de realimentación \mathbf{K} y la solución \mathbf{S} , los polos del sistema: $\mathbf{P} = \text{eig}(\mathbf{A} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{K})$.

4.2. Obtención de la ley de control

Como se ha visto en la ecuación 34, las matrices que representan el sistema son

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -l/I_{xx} & 0 & l/I_{xx} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -l/I_{yy} & 0 & l/I_{yy} & 0 \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

En el apartado anterior se ha visto que se deben asignar valores a \mathbf{Q} y \mathbf{R} , y como tanto \mathbf{X} como \mathbf{U} son vectores 4×1 , las matrices a asignar serán 4×4 . La matriz \mathbf{Q} se puede escribir como

$$\mathbf{Q} = 1 \cdot \mathbf{C}^T \mathbf{C} \quad (46)$$

por lo tanto

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (47)$$

Para el caso de \mathbf{R} se consideran toda un mismo peso para todas las entradas f_i y muy superior a los pesos de \mathbf{Q} :

$$\mathbf{R} = 100 \cdot I = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix} \quad (48)$$

Se hayan \mathbf{K}, \mathbf{S} y \mathbf{E} mediante la toolbox de Matlab para calcular el control óptimo según el regulador LQR[10]:

$$[\mathbf{K}, \mathbf{S}, \mathbf{e}] = \text{LQR}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{Q}, \mathbf{R})$$

Teniendo en cuenta que los parámetros del sistema físico obtenidos en el Anexo 4 son $I_{xx} = \dots$, $I_{yy} = \dots$ y $l = \dots$ se tiene que:

$$\mathbf{K} = \dots \quad \mathbf{S} = \dots \quad (49)$$

$$\mathbf{E} = \dots$$

4.3. Aplicación en el modelo

5. Implementación del control

6. Construcción del Quadcopter

El conjunto de piezas que forman este aparato están conectadas entre sí según la función que realicen. Esencialmente la Raspberry Pi controla los motores según las señales que recibe de la IMU y el Receptor. Todo el conjunto es alimentado por una batería LiPo y se adapta el voltaje de 11.1V a 5V por medio de un Regulador para poder alimentar a la Raspberry. Todos los componentes están sujetos a una estructura (Frame) que también soporta las fuerzas y momentos.

6.1. Descripción de los componentes

Se describe seguidamente cada componente y el criterio de selección que se ha aplicado.

Raspberry Pi

Abreviado como RPi, es un pequeño ordenador integrado en una sola placa (Single-Board Computer o SBC en inglés) del tamaño de una tarjeta de crédito, es decir, con unas dimensiones de 85.6cm x 53.98cm, desarrollada por la Fundación Raspberry Pi con la intención de promocionar las ciencias computacionales en las escuelas [2].



Figura 5: Raspberry Pi a utilizar

Se ha optado por esta opción por su económico precio, la velocidad de procesamiento y bajo consumo. Además, se han querido ampliar los conocimientos de este pequeño monstruo. En particular se utiliza la segunda revisión del modelo B:

Tiene un System-on-Chip (SoC) Broadcom BCM2835 con un ARM1176JZF-S a 700 Mhz, una GPU VideoCore IV y 512 MB de memoria RAM. Dispone de dos puertos USB, una salida mini-jack 3.5mm, salida de audio/vídeo HDMI, una salida RCA y un puerto RJ45 10/100 de Ethernet.

La alimentación se realiza por medio de un mini USB a 5V/700mA, con un consumo de 3.5W. El sistema operativo es un Raspbian, grabado en una tarjeta SD de 4GB. Dispone de un conjunto de pines que permiten comunicación con periféricos de bajo nivel UART, I2C, SPI y 8 pines de propósito general (General Purpose Input Output o GPIO).

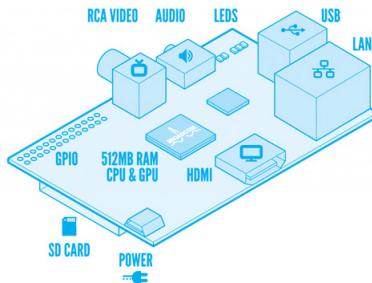


Figura 6: Conectores de la Raspberry Pi

GY-521 MPU-6050

Se trata de una Unidad de Medida Inercial (IMU en inglés) que integra en un mismo encapsulado de $4x4x0,9mm$ un acelerómetro y un giróscopo, ambos de 3 ejes. Dispone de un conversor ADC de 16 bits para cada eje y se comunica mediante un protocolo de comunicación *I2C*. Se ha optado por utilizar este dispositivo por su bajo coste y la fácil implicación con la RPi.



Figura 7: IMU MPU-6050

Como características de los sensores: el giróscopo tiene un rango de $\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000$ grados/segundo, y el acelerómetro de $\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, 16g$. La tensión de alimentación es del rango de $2,375V - 3,46V$ y cabe la posibilidad de utilizar un módulo *DMP* (Digital Motion Processor), pero se ha decidido implementar un filtro de Kalman para leer los datos en crudo (*raw*) de la cola *FIFO* del sensor.

Emisor-Receptor

Con este aparato se transmite la consigna generada des del transmisor hacia el receptor mediante ondas de radio. El modelo que se utiliza es el *Turnigy5X5ChMini*, porque es fácil de utilizar y además económico. Las especificaciones técnicas más relevantes son:

El transmisor tiene unas dimensiones de $156x152x50mm$, un peso de 265g y se alimenta a 6V (4 baterías AA). El receptor tiene unas medidas de $33,5x20,5x13mm$ y se alimenta a 4.8-6V. Dispone de 5 canales de radio, con transmisión segura a 2.4GHz



Figura 8: Emisora y Receptor

con el método FHSS. Puede configurarse para trabajar con dos modos(mode1-mode2).

La señal que se recibe para cada canal en el receptor es de PWM de $50Hz$ con un Duty que varía de $1ms$ a $2ms$.

Batería LiPo

Para alimentar a todo el conjunto se utiliza una LiPo *Turnigy* 2200mAh 3S 1P 25C. Por tanto, es capaz de entregar 2.2A durante una hora, y como la capacidad es de 25C, la descarga puede ser de $2.2 * 25 = 55A$ con un pic de descarga de 35C, es dir, con un pico de $2.2 * 35 = 77A$ durante 10 segundos. Esta batería está formada por tres celdas que proporcionan un voltaje total de unos 11,1V:



Figura 9: Batería LiPo empleada

El conector de carga es el *JST-XH* y el de descarga el *XT60*. Para tener en cuenta respecto al Quadcopter es interesante saber que pesa 188g y respecto a la estructura (frame) que sus dimensiones son de 105x33x24mm.

Regulador Step-Down

Para adaptar la tensión de 11.1V de la batería LiPo a 5V para alimentar la Raspberry Pi, es necesario un regulador. En este caso se tiene el Interruptor-Modo Máximo BEC LM2576S, que proporciona hasta 3A de corriente



Figura 10: Regulador Step-Down

El esquema del componente [6]:

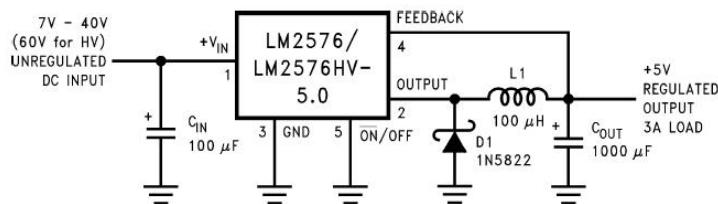


Figura 11: Esquema del Regulador Step-Down

Motores Brushless

Los actuadores que se utilizan son motores brushless (BL-DC). En particular el Turnigy 2213 20turn 1050kv 19A Outrunner. Se trata de máquinas síncronas de imanes permanentes, en vez de utilizar electroimanes, donde el campo magnético está uniformemente repartido en el entrehierro. Se conocen también de fuerza electromotriz (FEM) trapezoidal porque a velocidad constante la FEM tiene esta forma. Para controlarlo se utiliza un inversor (inverter), y como la commutación deja de ser mecánica la armadura de la máquina puede ser el estator. Ésto permite llegar a voltajes de uso y velocidades de funcionamiento más altas. Sus especificaciones más relevantes son:

- Kv: 1050rpm/V
- Corriente de trabajo: 6A 16A
- Corriente de pico: 19A
- Peso: 56g
- Dimensiones: 27.6 x 32mm
- Medida de el eje: 3.175mm

El primer parámetro hace referencia a cuántas rpm's funcionará el motor por Voltio aplicado. A este valor se le aplica un porcentaje $\%NLS$ (Porcentaje de Velocidad sin Carga, típicamente de 70%) para saber cuántas revoluciones por minuto funcionará:

$$Kv \cdot V \cdot \%NLS = 1050 \cdot \frac{rpm}{V} \cdot V \cdot 0,70 = 8085 \text{ rpm} \quad (50)$$

Esta velocidad es teórica, y como que no hay un lazo de control sobre ésta, no se tendrá en cuenta. En cambio, se atacará al motor con la señal de PWM que se envía al Variador que le controla. La relación entre la señal de PWM y la fuerza, así como el consumo que se desarrolla se encuentra en los Anexos.

Variador ESC

Para controlar un motor brushless la etapa de potencia a utilizar es un ESC (Electronic Speed Controller) que es un variador que se compone de un inversor trifásico: El

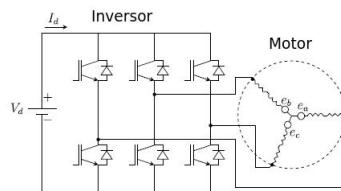


Figura 12: Esquema de un Variador como inversor trifásico

modelo a utilizar es el Turnigy AE-20A Brushless ESC. El uso de este tipo se justifica con el amperaje que soporta, en cuanto los motores consumen un pico de hasta 19A, que es menor al máximo de la corriente de este Variador (como límite se puede quemar el componente si se hacen circular 25A durante 10 segundos). Se debe asegurar la compatibilidad con la batería también, ya que soporta tensiones de entrada correspondientes a Baterías LiPo de entre 2 y 4 celdas. Incluye un circuito BEC (Battery Eliminator Circuit) para poder alimentar también el receptor de 2A de máxima corriente. La máxima velocidad de funcionamiento del motor depende de sus polos: si es de 2 polos será de 210000 rpm, con 6 polos de 70000 rpm y de 12 polos a 35000 rpm.

Tanto el peso de 19g, como las dimensiones de 50x26x12mm son parámetros a tener en cuenta en el montaje, en parte a que se hubican en los brazos del Quadcopter, aumentando la inercia por eje e influyendo considerablemente en el modelo. Antes de usar cada Variador se ha tenido que programar para que éste responda con un mejor rendimiento al caso en cuestión.

Para los 5 parámetros a configurar hay tres opciones, y las marcadas con un punto son las que se han aplicado.

Throttle stick position Menu	Low	Medium	High
1. Brake setting	• off	soft	hard
2. Timing setting	Low	• Medium	High
3. Battery Protection Voltage Threshold	High cut-off threshold	• Medium cut-off threshold	—
4. Plane Mode	• Fixed-wing aircraft	Helicopter mode 1 (with Soft start)	Helicopter mode 2 (Super-Soft+Governor Mode)
5. Throttle response speed setting	• normal	Medium	High

Figura 13: Tabla de Set up de un ESC

Marco

Todos los elementos que componen el Quadcopter se sujetan en una estructura que mantiene la integridad y rigidez necesarias para el vuelo.

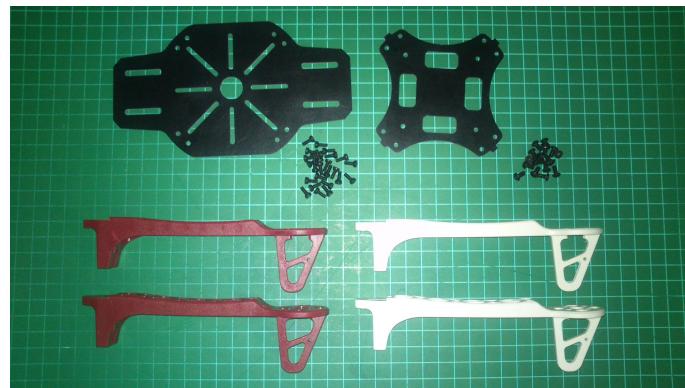


Figura 14: Piezas que componen la estructura del Quadcopter

La mayor parte del peso se concentra en el centro de la estructura e interesa que sea lo más ligera posible sin comprometer su integridad, de tal manera que los motores, situados en las puntas de cada brazo, deban compensar el menor peso posible. En este caso, tiene un peso de 190g, y las piezas están hechas de fibra de vidrio las piezas centrales (de color negro en la imagen) y de Nylon los brazos (rojo y blanco en la imagen). La distancia entre dos motores de una diagonal es de 33cm.

Hélices

En girar el motor, las aspas solidarias a su eje utilizan la energía cinética del rotor para proporcionar sustentación impulsando aire en sentido contrario. El tipo de aspa condiciona el rendimiento que se obtenga, así que se utilizan las que optimizan la fuerza de propulsión respecto al consumo de corriente. El modelo de hélice utilizado es el 8x4



Figura 15: Par de hélices 8x4 simétricas

Los parámetros que definen una hélice son su Longitud (X), es decir, diámetro de superficie recorrida por las aspas en pulgadas, y el Pitch (Y), que es la distancia que se avanzaría la hélice en una revolución de moverse en una masa blanda. Se representan en el siguiente gráfico:

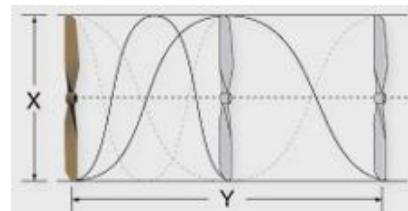
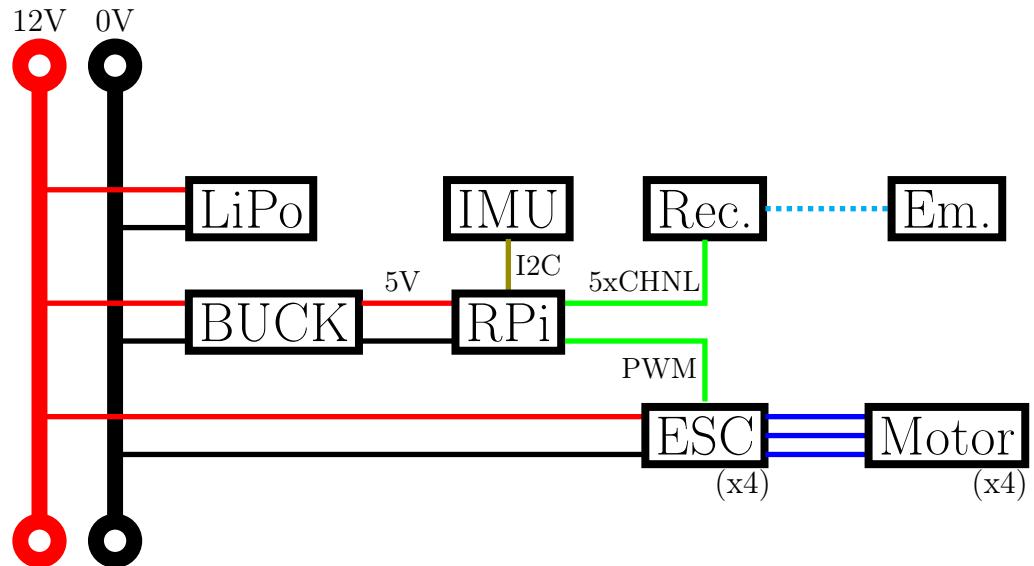


Figura 16: Representación de la Longitud y Pitch de una Hélice

6.2. Montaje



7. Análisis económico

8. Estudio del impacto ambiental

9. Conclusiones

Futuras aplicaciones

Referencias

- [1] Teppo Luukkonen (August 22,2011). *Modelling and control of quadcopter*
- [2] Wikipedia de la Raspberry Pi: http://en.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi
- [3] Acelerómetro y giroscopio MPU-6050 para Arduino: <http://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050#.UzhsVCK9jb4>
- [4] MPU-6050. Especificación del producto: <http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/PS-MPU-6000A-00v3.4.pdf>
- [5] MPU-6050. Mapa de Registros y descripciones: <http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/RM-MPU-6000A-00v4.2.pdf>
- [6] LM2576S Datasheet: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2576.pdf>
- [7] Librería wiringPi: <http://wiringpi.com/>
- [8] Artículo sobre LQR de Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Linear-quadratic_regulator
- [9] Documentación de la función LQR de Matlab: <http://www.mathworks.es/help/control/ref/lqr.html;jsessionid=8f737c267ee85a89cc2544a09a44>
- [10] Toolbox de Matlab del LQR : <http://www.mathworks.es/es/help/control/ref/lqr.html>

Agradecimientos

ANEXOS

Anexo 1: Obtención del vector de fuerzas

Para trabajar con la dinámica del sistema se obtiene el vector de fuerzas a partir del Lagrangiano:

```

1 clear all
2 clc
3
4 %%Para usar la funcion Laplace en el archivo Laplace.m se
   deben declarar las variables de esta manera:
5
6 syms x dx ddx y dy ddy z dz ddz Phi dPhi ddPhi Theta dTheta
   ddTheta Psi dPsi ddPsi
7 syms f1 f2 f3 f4 m1 m2 m3 m4
8 % syms w1 w2 w3 w4
9 syms Ixx Iyy Izz
10 syms Ax Ay Az           % No se tienen en cuenta
    coeficientes de fricción
11 syms k m g l b
12
13 l=0.165                 % longitud de los brazos
14 Ixx=0.004                % Momento de inercia del eje x
15 Iyy=0.004                % Momento de Inercia del eje y
16 Izz=0.008                % Momento de Inercia del eje z
17 m=0.85                  % Peso del Quadcopter
18 g=9.81                   % gravedad
19
20 %%El vector de variables que se usaran
21
22 v=[x dx ddx y dy ddy z dz ddz Phi dPhi ddPhi Theta dTheta
   ddTheta Psi dPsi ddPsi]
23
24 Xi=[x; y; z]
25 dXi=[dx; dy; dz]
26
27 Eta=[Phi; Theta; Psi]
28 dEta=[dPhi; dTheta; dPsi]
29

```



```

30 Q=[Xi; Eta]
31 dQ=[dXi; dEta]
32
33 II=[[Ixx 0 0];
34 [0 Iyy 0];
35 [0 0 Izz]]
36
37 A=[[Ax 0 0];
38 [0 Ay 0];
39 [0 0 Az]]
40
41 R=[[cos(Psi)*cos(Theta) cos(Psi)*sin(Theta)*sin(Phi)-sin(Psi)*
42 cos(Phi) cos(Psi)*sin(Theta)*cos(Phi)+sin(Psi)*sin(Phi)];
43 [sin(Psi)*cos(Theta) sin(Psi)*sin(Theta)*sin(Phi)+cos(Psi)*
44 cos(Phi) sin(Psi)*sin(Theta)*cos(Phi)-cos(Psi)*sin(Phi)
45 ];
46 [-sin(Theta) cos(Theta)*sin(Phi) cos(Theta)*cos(Phi)]]
47
48 Weta=[[1 0 -sin(Theta)];
49 [0 cos(Phi) cos(Theta)*sin(Phi)];
50 [0 -sin(Phi) cos(Theta)*cos(Phi)]]
51 J=transpose(Weta)*II*Weta
52
53 %% Aqui se obtiene con el Lagrangiano el vector de fuerzas F
54 %% segun
55 %% F=(d/dt)(dp(L)/dp(dq))-d(L)/dq
56 F=Lagrange(L,v)
57
58 %% Derivando a mano se obtiene que TauB=J*ddEta+CdEta
59 %% Y como TauB=[F(4); F(5); F(6)], se tiene que el termino de
60 %% Coriolis es:
61 CdEta=[F(4); F(5); F(6)]-J*[ddPhi; ddTheta; ddPsi]

```

```

62
63 %% %Hasta se tiene el producto Coriolis (Eta, dEta)*dEta . Pero
   como matlab
64 %% %no elimina las aceleraciones se hace a mano, y queda:
65
66 CdEta = [ (Iyy*dTheta^2*sin(2*Phi))/2 - (Izz*dTheta^2*sin(2*Phi))
            )/2 - Ixx*dPsi*dTheta*cos(Theta) - (Iyy*dPsi^2*sin(2*Phi)*
            cos(Theta)^2)/2 + (Izz*dPsi^2*sin(2*Phi)*cos(Theta)^2)/2 -
            Iyy*dPsi*dTheta*cos(2*Phi)*cos(Theta) + Izz*dPsi*dTheta*cos
            (2*Phi)*cos(Theta);
67
68
69
70 T=f1+f2+f3+f4
71 TB=[0; 0; T]
72 TauB=[l*(f4-f2);
73 l*(f3-f1);
74 % (m1+m2+m3+m4)]
75 b*(f1-f2+f3-f4)]

```

Anexo 2:Preparación de la Raspberry Pi

Para poner a punto la RPi se instala un Raspbian y se configura para que es pueda comunicar con la placa MPU-6050.

Instalación Raspbian

Habiendo introducido la tarjeta SD en un lector adecuado, se detecta en una terminal mediante la orden `df -h`. Suponiendo que haya estado gravada anteriormente:

```
/dev/sdb1      56M   19M   38M  33% /media/boot
/dev/sdb2      1,8G  1,4G  266M 85% /media/9c7e2035-df9b-490b-977b-d60f2170889d
```

Se deben desmontar las dos particiones, tanto la `/dev/sdb1` como la `/dev/sdb2`:

```
umount /dev/sdb1
umount /dev/sdb2
```

Descargada la imagen a instalar, por ejemplo en el Escritorio, se procede con:

```
sudo dd bs=4M if=~/Escritorio/2013-07-26-wheezy-raspbian.img of=/dev/sdb
```

Pasados unos minutos ya se tiene la SD grabada con el sistema operativo Raspbian.

Configuración de la Raspberry

Para poder comunicar la RPi con la IMU MPU-6050 por I2C es necesario configurar el sistema. Primero es necesario instalar los drivers mas relevantes. Del archivo

```
sudo nano /etc/modules
```

se añaden las siguientes dos líneas al final del archivo:

```
i2c-bcm2708
i2c-dev
```

En el archivo blacklist:

```
sudo vi /etc/modprobe.d/raspi-blacklist.conf
```

las siguientes dos líneas deben empezar con un signo `#` (de comentario):

```
#blacklist spi-bcm2708
#blacklist i2c-bcm2708
```

Para conectar el sensor, es necesario seguir primero el conexionado:

Es decir

- Pin 1-3.3V se conecta a VCC.

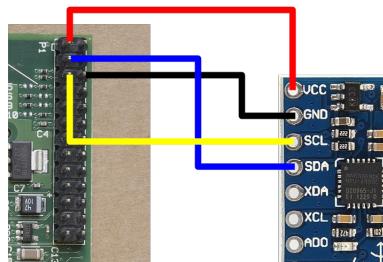


Figura 17: Conexión por I2C entre MPU-6050 y RPi

- Pin 3-SDA se conecta a SDA
- Pin 5-SCL se conecta a SCL
- Pin 6-Ground se conecta a GND

Es necesario instalar el paquete *i2c-tools*:

```
sudo apt-get install i2c-tools
```

Para ver el sensor se escribe:

```
sudo i2cdetect -y 1
```

El resultado es

```
pi@raspberrypi ~ $ sudo i2cdetect -y 1
      0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  a  b  c  d  e  f
00: --
10: --
20: --
30: --
40: --
50: --
60: --  --  --  --  --  -- 68  --  --  --  --  --  --
70: --  --  --  --  --  --
```

Figura 18: Detección del sensor MPU-6050

que es el dispositivo que corresponde al MPU-6050.

Librería wiringPi

Se utiliza esta librería [7] como a interfaz del GPIO (General Purpose Input Output). Permite, por tanto, leer las consignas y sensores y generar las acciones de control. La instalación y descripción de la librería esta explicado en la página web incluida en la bibliografía.

Anexo 3: Filtro de Kalman

Anexo 4: Identificación de los parámetros del Quadcopter

Para poder trabajar en particular con el Quadcopter construido es necesario saber qué lo caracteriza o distingue de los demás. Parámetros relevantes y necesarios que se utilizan en el modelo implementado en Simulink deben ser, entonces, medidos para que se simule el mismo aparato con iguales características.

Se consideran relevantes la matriz de inercias, la longitud de los brazos l y la intensidad (consumo) de los motores respecto a la señal PWM con que se controlan.

Con este conjunto de parámetros se considera que el Quadcopter está totalmente definido y puede obtenerse la ley de control.

Inercias

Como se ha comentado en la sección 3, se supone que el Quadcopter es un rotor esférico, y por tanto de su tensor de inercia todos los productos de inercia serán nulos. Se tendrá entonces una matriz diagonal como tensor. En este apartado, entonces, el objetivo será la medición de los dos momentos de inercia I_{xx} y I_{yy} , correspondientes a los ángulos *Roll* y *Pitch*. Para ello se usa una bancada compuesta por un muelle de constante de torsión D conocida del que cuelga el quadcopter. De querer determinar el momento de inercia I_{xx} , se cuelga desde uno de los extremos del eje x , tal y como se observa en la figura 19

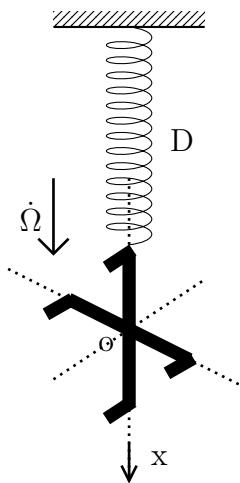


Figura 19: Bancada para la determinación de las inercias

Para un sólido rígido se tiene que

$$\mathbf{M} = \frac{d\mathbf{L}_o}{dt} \quad (51)$$

donde \mathbf{M} es el momento resultante y \mathbf{L}_o es el momento cinético o angular aplicado en el punto o , que en este caso corresponde al centro de gravedad del cuerpo. Éste se expresa como

$$\mathbf{L}_o = \mathbf{I}\dot{\Omega} \quad (52)$$

El momento resultante puede expresarse entonces de la forma

$$\mathbf{M} = \frac{d(\mathbf{I}\dot{\Omega})}{dt} = \mathbf{I}\ddot{\Omega} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\Omega}_x \\ \ddot{\Omega}_y \\ \ddot{\Omega}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\Omega} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = I_{xx}\ddot{\Omega} \quad (53)$$

en suponer que el tensor de inercia no varía con el tiempo. Se asume que el eje de rotación $\dot{\Omega}$ pasa por el centro de masas, de lo contrario debería aplicarse el teorema de Steiner. Para el muelle se tiene que, según la ley de Hooke

$$M = -D \cdot \Omega \quad (54)$$

donde Ω es el ángulo girado en la dirección longitudinal del muelle. Igualando las expresiones 53 y 54 se llega a

$$-D \cdot \Omega = I_{xx}\ddot{\Omega} \implies \ddot{\Omega} + \frac{D}{I_{xx}}\Omega = 0 \quad (55)$$

La solución de la ecuación anterior es el de un oscilador armónico de periodo

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I_{xx}}{D}} \quad (56)$$

Ésto se cumple en oscilaciones pequeñas cercanas al punto de equilibrio, donde $\Omega = \dot{\Omega} = \ddot{\Omega}$. Por lo tanto, el periodo de una oscilación es suficiente para poder calcular el momento de inercia en estar directamente relacionados. Para obtener resultados más precisos se medirá el tiempo varias veces.

Para calcular la constante de torsión del muelle se le ha sometido a ensayo, sometiéndolo a diferentes deformaciones elásticas y observando con qué momento éste respondía:

$\Omega(^{\circ})$	$\mathbf{M}(g \cdot 10cm)$	$\mathbf{M}(N \cdot m)$
30	33	0.0323
45	46	0.0451
60	62	0.0608
90	93	0.0912

En calcular la relación entre ambas magnitudes para obtener la constante de torsión del muelle, por regresión lineal se obtiene que la pendiente es de $1,0095 \text{ g} \cdot 10\text{cm}/\text{grad}$. La constante entonces puede expresarse en unidades del Sistema Internacional como

$$D = 1,0095 \frac{\text{g} \cdot 10\text{cm}}{\text{grad}} \cdot \frac{9,81 \text{ N}}{1000 \text{ g}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \cdot \frac{360 \text{ grad}}{2\pi \text{ rad}} = 0,0567 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}} \quad (57)$$

En hacer oscilar el Quadcopter en el eje x se obtiene:

Eje	Muestras(s)	Media(s)	Momento de inercia($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
x	2.3 2.3 2.5 2.2	2.35	$7,932 \cdot 10^{-3}$
	2.3 2.4 2.5 2.4		
	2.4 2.3 2.3 2.4		
	2.3 2.4 2.3 2.3		
y	2.4 2.3 2.2 2.4	2.31	$7,664 \cdot 10^{-3}$
	2.2 2.4 2.3 2.2		
	2.4 2.3 2.3 2.4		
	2.3 2.3 2.3 2.3		

y por tanto se obtiene que $I_{xx} = 7,931 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ y $I_{yy} = 7,664 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Longitud de brazo

Queda especificado en el modelo del Frame elegido que es de 33 cm la distancia de motor a motor, es decir, de la diagonal principal. La longitud que se considera es de $l = 16,5 \text{ cm}$.

Motores

Para poder controlar la planta es necesario saber cómo responden los actuadores para realizar un control preciso. De éstos se deben conocer qué fuerza y momento proporcionan, así como el consumo de energía, dado un PWM. Para obtener una curva de la fuerza respecto del PWM se pesa con una balanza la acción del motor. La rudimentaria bancada que se tiene para tal objetivo es un codo articulado en el eje de tal manera que la distancia del eje del motor al fulcro y de éste a la balanza sea la misma (en este caso de 12 cm):

Las partes están hechas de madera (parte marrón) y plástico ABS (parte verde). Toda la estructura se sujet a unas maderas:

Se transmite al ESC a qué velocidad se debe hacer funcionar el motor des de la Raspberry Pi por medio de una señal PWM. El programa que se ejecuta para hacer las pruebas es:



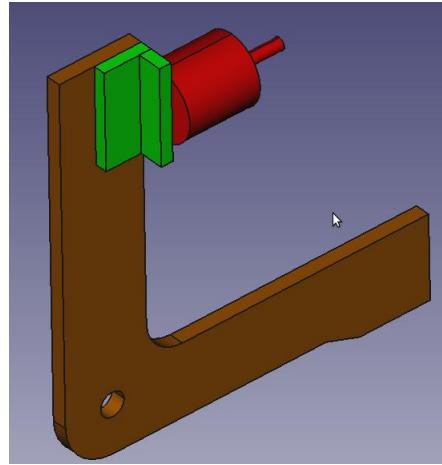


Figura 20: Bancada para el estudio del motor



Figura 21: Montaje para el estudio del motor

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <termios.h>
3 #include <wiringPi.h>
4 #include <unistd.h>
5
6 #define PIN 2 // pin 13
7
8 int main(void){
9
10     int i,p;
11     wiringPiSetup();
12
13     pinMode(PIN,OUTPUT);
14     digitalWrite(PIN,LOW);
```

```

15
16     for ( i =0;i <=100;i +=5){
17         for (p=0;p<250;p++){
18             digitalWrite (PIN ,HIGH) ;
19             delayMicroseconds(950+i *10) ;
20             digitalWrite (PIN ,LOW) ;
21             delayMicroseconds(19050 - i *10) ;
22
23             printf ( "PWM( i ) : %d \t h: %d \n" ,i ,p) ;
24         }
25     }
26     return 0;
27 }
```

Se obtiene una lectura de fuerza y de intensidad por cada incremento del 0.25 % del PWM enviado al Variador. Las lecturas que se obtienen son:

PWM(%)	Fuerza(g)	Intensidad(A)
5	0	0
5,25	0,25	13
5,5	0,5	38
5,75	0,9	74
6	1,38	98
6,25	1,8	128
6,5	2,4	158
6,75	2,9	191
7	3,5	215
7,25	4	250
7,5	4,6	277
7,75	5,5	318
8	6,5	360
8,25	8	400
8,5	9,15	450

Graficado:



M(g)

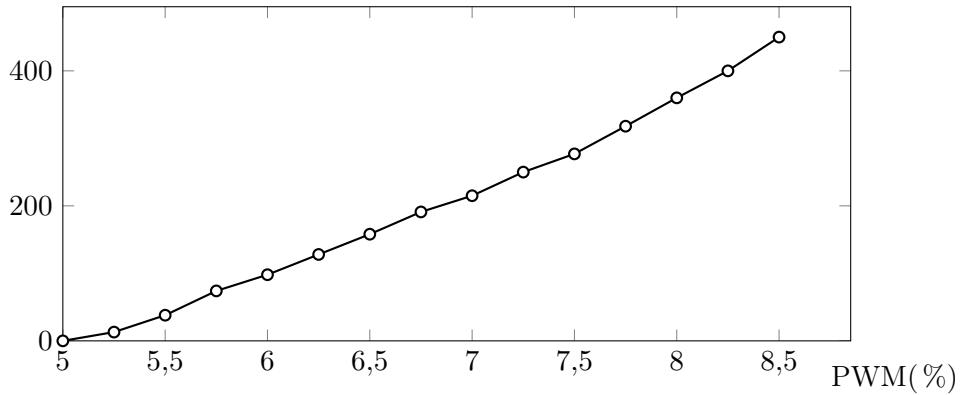
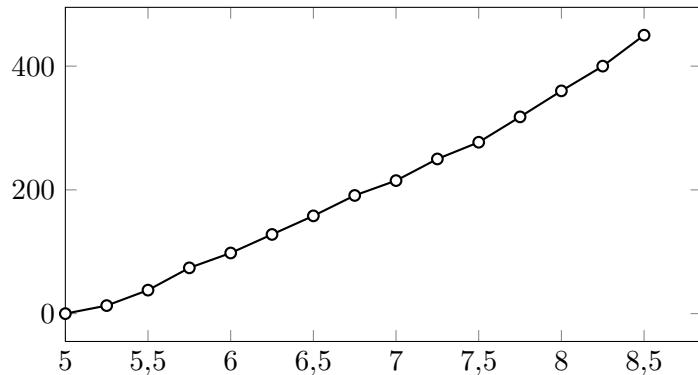


Figura 22: Relación entre la fuerza (en gramos) y el PWM



En el eje de las abscisas el PWM(%) es entre el 5% y el 10% de la señal enviada, que corresponden al mínimo y máximo del motor. Para un PWM elevado la fuerza era demasiado grande y no se prevé que se haga funcionar al sistema en semejantes condiciones de trabajo, no se estudia.

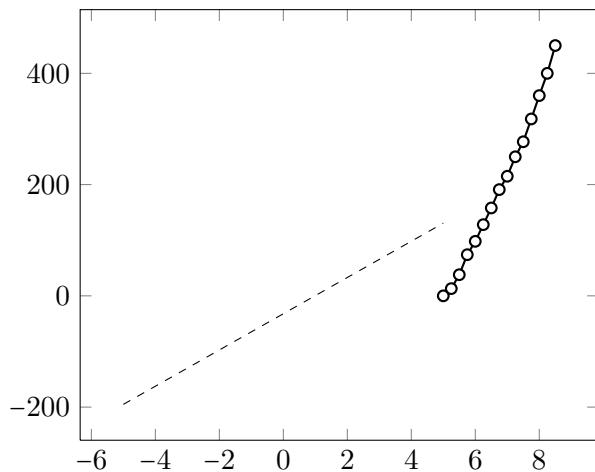
Se ve una relación proporcional del PWM con la fuerza generada. Se considera que una regresión lineal será suficiente. Se obtiene que la fuerza $f(PWM)$ del motor será:

$$f = 32,5758 \cdot PWM(\%) - 32,1758$$

con un coeficiente de determinación en la regresión de $R^2 = 0,9929$. Este resultado facilita el problema en ser una relación suficiente sencilla.

Para la intensidad se tiene una relación tan amigable como en el caso anterior, pero como no sera caso de estudio,solo se verá una aproximación de lo que puede llegar a consumir cada motor para asegurar una autonomía de vuelo no irrisoria. Resulta

Como en el punto de equilibrio cada motor soporta una cuarta parte del peso. el



PWM debería corresponder al de una fuerza de $m_{Quadcopter} \cdot g / 4 \approx 0,225\text{kg}$. El consumo correspondiente es de 3,5A aproximadamente. Entre los cuatro motores se consumirán $3,5 \cdot 4 = 14\text{A}$. Como que la batería es de 2200mAh se supone una autonomía de 7 minutos aproximadamente.