

0.1. Instrumentación y Control

En el presente capítulo se presentan los procedimientos realizados para la implementación del control embebido en la planta real. Se sigue un enfoque modular describiendo por parte cada componente del sistema, desde la medición de ángulo, la programación de sensores, la configuración de los controladores electrónicos, los toolkits de LabVIEW escogidos y las diferentes etapas de experimentación con el vehículo.

0.1.1. Medición de Ángulos

Acelerómetro

Para la medición de los ángulos se utilizan los sensores MEMS descritos en el capítulo de Componentes del Sistema ???. La mayoría de los acelerómetros MEMS miden la aceleración por medio de la lectura de capacitancias variables. Una masa de prueba es puesta entre las placas de los capacitores, ésta se mueve dependiendo de la aceleración a la que es sometida, posteriormente se registran las capacitancias, se procesan y entregan un valor de voltaje proporcional a la aceleración medida. La siguiente imagen muestra un concepto de lo descrito anteriormente:

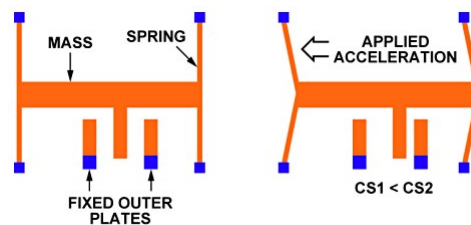


Figura 1: Principio físico de funcionamiento de un acelerómetro.

Para comprender como estimar los ángulos a partir de las mediciones de un acelerómetro, es útil imaginar una caja cúbica con una bola dentro de ella. En primera instancia si la caja estuviera en un lugar ausente de campos gravitacionales, ninguna fuerza afectaría la posición de la bola. Por otro lado, si se deja la caja en una superficie plana sobre la tierra y en reposo, la bola sentiría una aceleración de $1[g]$ hacía la tierra. De lo anterior es claro que de aplicar una fuerza externa a la caja, la bola se verá afectada por una fuerza ficti-

cia de igual magnitud y en sentido contrario. Las siguientes imágenes describen las tres situaciones antes mencionadas.

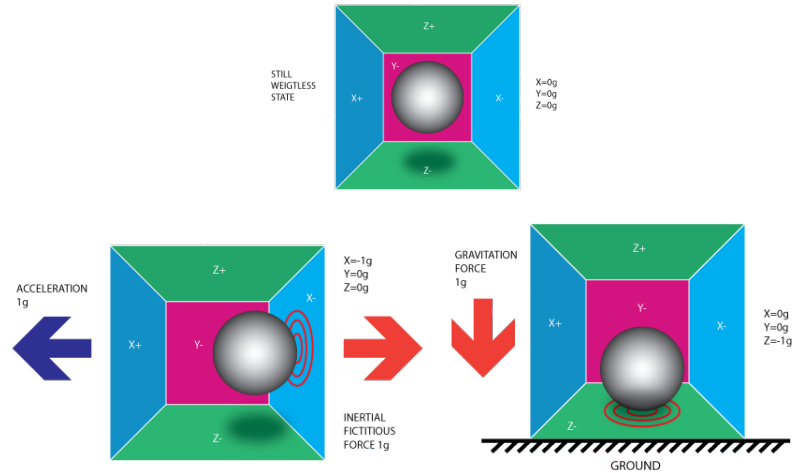


Figura 2: Ilustración del funcionamiento de un acelerómetro.

Por lo tanto al inducir cualquier rotación sobre la caja e inclinarla, la bola tendrá asociado un vector de aceleración resultante, que estará apuntando hacia el centro de la tierra. Dicho vector se puede descomponer en sus componentes cartesianas x,y,z , con las que es posible calcular el ángulo de inclinación de la caja, dado que se cuenta con la medición de aceleración en cada componente.

Antes de estimar los ángulos de inclinación del vehículo, es necesario mencionar que cualquier acelerómetro es completamente insensible a rotaciones sobre el vector del campo gravitacional, es decir, si la caja se encuentra en la superficie terrestre y ésta rota sobre el eje z de la figura anterior, no es posible utilizar las mediciones del sensor para estimar dicha rotación (yaw). Por lo tanto con éste sensor sólo se pueden estimar los ángulos de Pitch y Roll.

Se estudia el efecto de la matriz de rotación al vector del campo gravitacional de la tierra, inicialmente apuntando en dirección al eje z con magnitud de $1[g]$. Escribiendo dicho vector en términos de los ángulos de rotación mediante la matriz descrita en el Capítulo de Modelado de la Planta ??, se tiene:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = [T_x][T_y][T_z] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta\sin\phi \\ \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

De la representación anterior es claro notar que las componentes x e y del vector aceleración son cero si los ángulos de inclinación son cero y la componente z tiene un valor unitario en el mismo caso. También es necesario mencionar que la matriz de rotación no es conmutativa, que el efecto de dicha matriz sobre el campo gravitacional depende del orden en que rote cada ángulo como se menciona en [17]. Para este trabajo se tomará en cuenta el orden predefinido en el Capítulo de Modelado de la Planta ?? tal como la ecuación (1) lo indica, ampliamente utilizada y denominada secuencia de rotación aeroespacial. Relacionando las componentes normalizadas de la aceleración medida con los ángulos de elevación pitch y alabeo roll se tiene:

$$\frac{G_v}{||G_v||} = \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta\sin\phi \\ \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}} \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta\sin\phi \\ \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

Resolviendo para pitch θ y roll ϕ se tiene:

$$\tan\phi = \frac{G_y}{G_z} \quad , \quad \tan\theta = \frac{-G_x}{\sqrt{G_y^2 + G_z^2}} = \frac{-G_x}{\sqrt{G_y^2 + G_z^2}} \quad (3)$$

Por lo tanto los ángulos pitch y roll son:

$$\phi = \arctan\left(\frac{G_y}{G_z}\right) \quad , \quad \theta = \arctan\left(\frac{-G_x}{\sqrt{G_y^2 + G_z^2}}\right) \quad (4)$$

Gyróscopo

Para entender como funciona el giroscopo, es útil imaginar un cuerpo de masa m moviéndose con velocidad v . Si se aplica una rotación angular con velocidad Ω al cuerpo en movimiento, entonces éste experimentará una fuerza proporcional al producto cruz de las

velocidades antes mencionadas, como se muestra en la figura 3a. Esta fuerza es conocida como fuerza de Coriolis y su expresión es:

$$\vec{F} = 2m(\vec{\Omega} \times \vec{v}) \quad (5)$$

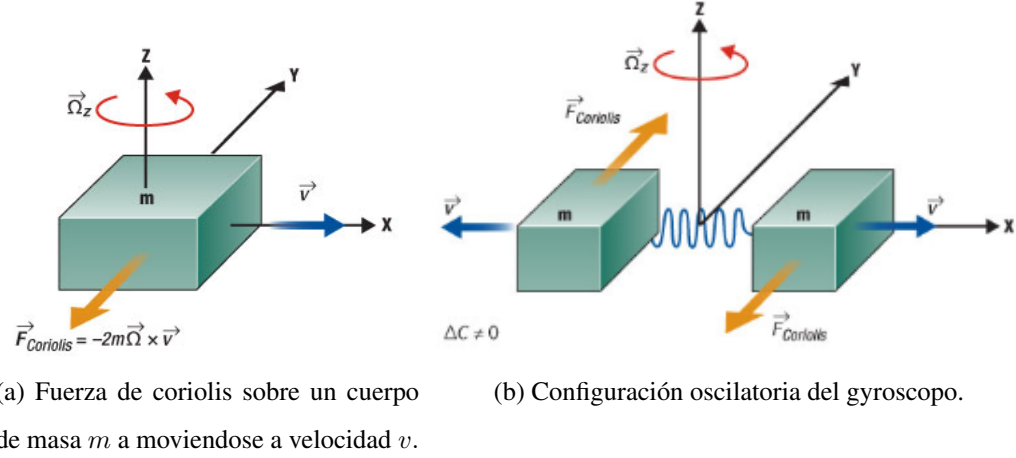


Figura 3: Principio físico de funcionamiento del giroscopo.

Dado el efecto de la fuerza de Coriolis, el giróscopo mantiene una masa en constante oscilación como la que se muestra en la figura 3b. Luego al aplicar una rotación sobre el sensor, la masa se desplaza perpendicularmente a la dirección de la velocidad de oscilación, movimiento que a su vez varía la capacidad de los capacitores internos del sensor entregando finalmente una medida de voltaje proporcional a la velocidad de rotación inducida.

Ya que la medición del giroscopo ITG-3200 utilizado en este proyecto entrega la velocidad de giro en cada eje en grados por segundo, para poder medir el ángulo yaw, que el acelerómetro es incapaz de medir, se integra la medición del giroscopo con la técnica de integración simple de Euler hacia atrás. Dado el ruido que introducen los actuadores sobre la planta, la estimación del ángulo yaw tendrá un error acumulativo importante, pero no es crítico al momento de sólo estabilizar el sistema, pues se puede controlar su velocidad directamente. Por lo tanto para estimar el ángulo yaw del vehículo se hace la siguiente operación:

$$Yz_k = Yz_{k-1} + \dot{Yz}_k \cdot \Delta t \quad (6)$$

Con la medición del giroscopo Yz en grados por segundo.

Consideraciones en Programación

Para comprobar la estimación de los ángulos obtenida mediante este proceso, se programa una aplicación en LabVIEW de adquisición de mediciones del acelerómetro y giroscopo en el controlador myRIO, junto con una visualización de un slab en 3D en el computador principal, con el cual se puede ver directamente el cambio de los ángulos en el tiempo al inclinar el controlador. En la figura 4 se puede apreciar el panel frontal de la aplicación, donde los potenciómetros virtuales son indicadores linkeados a variables de red para comunicar el VI de adquisición que se ejecuta en el dispositivo myRIO, con el VI de visualización que se ejecuta en el PC. El código de ésta aplicación se incluye en el apartado de anexos.

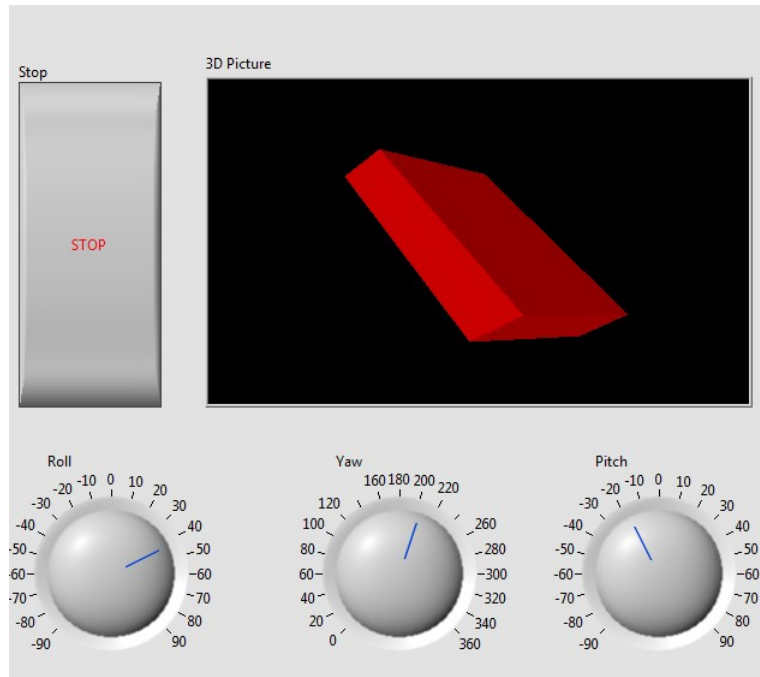


Figura 4: Aplicación de visualización de ángulos en 3D con LabVIEW.

Para el control embebido, tanto el acelerómetro como el giroscopo presentan valores

de offset distintos de cero. La estrategia adoptada para eliminar este efecto es que antes de empezar con el loop principal que ejecuta el algoritmo de control, se programan dos subrutinas que eliminan ambos offset de los sensores para tener una medición correcta. Las subrutinas consisten en promediar mil muestras de ambos sensores con el vehículo en reposo y manteniéndolo lo más paralelo al piso posible, con el fin de restar las componentes de offset del giroscopo debido a que está en reposo y repetir el proceso con el acelerómetro considerando sólo la presencia del campo gravitacional de 1[g] en el eje z . El código de estas subrutinas se incluye en el Anexo B.

0.1.2. Estrategia de Control PID descentralizado

Para la implementación del control en la planta real se utilizaron dos estrategias de control lineal, ambas basadas en controladores PID pero en diferentes configuraciones.

En primer lugar se programó un control lineal con filtro de ruido de medición similar al presentado en el capítulo de simulación. La programación de este controlador se realizó por eje asumiendo el modelo lineal presentado en el capítulo 3 y se utilizan las constantes de caracterización de motores para generar la actuación. La variante que se incluyó para el desarrollo de esta estrategia fue la incorporación de un filtro pasa bajos determinístico para reducir el ruido de medición, provocado por los actuadores que inducen vibraciones de alta frecuencia en la estructura del vehículo. Después de someter a prueba dicha estrategia de control en cada eje por separado para ambos soportes descritos en el capítulo de componentes, no se obtuvieron buenos resultados. La estabilización de la planta no fue posible para ningún eje separadamente, por lo tanto no se sometió a prueba el sistema completo. El código de la implementación se adjunta en el Anexo B.

Luego del primer intento con la estrategia de control PID descentralizado, se decide cambiar la estrategia de control por un control PID en cascada descentralizado, donde el lazo interior estabiliza la velocidad del sistema, mientras que el lazo exterior define la posición deseada por eje. El lazo de control propuesto para la implementación por eje es la que se propone en [18], tal como se muestra en la figura 5.

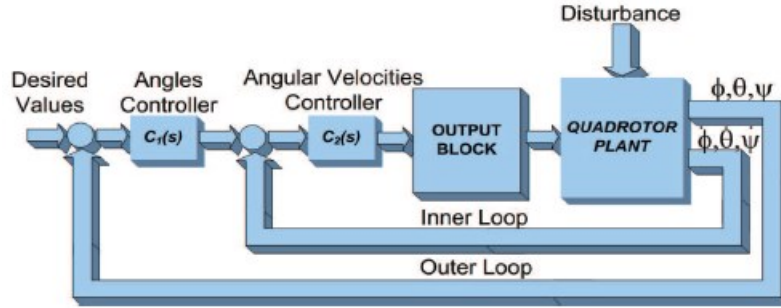


Figura 5: Estrategia de control PID en cascada.

Con esta estrategia de control se logra la estabilización por eje en ambos soportes, robusto a pequeñas perturbaciones y, en algunos casos, con un buen seguimiento de referencias constantes.

0.1.3. Actuación

Configuración del ESC

En primera instancia se debe asegurar de que los cuatro motores estén funcionando de la misma forma, vale decir con la misma configuración del controlador de velocidad ESC. Cabe mencionar que esta parte se hizo antes de obtener las mediciones de empuje con el banco de pruebas presentadas en el capítulo de simulación. Dentro de las configuraciones más importantes se pueden mencionar la configuración de detención rápida, aceleración rápida, frecuencia de operación, voltaje de corte y dirección del giro. Los distintos tipos de configuración del ESC se adjuntan en el Anexo D junto con el manual. El diagrama básico de conexión se muestra a continuación:

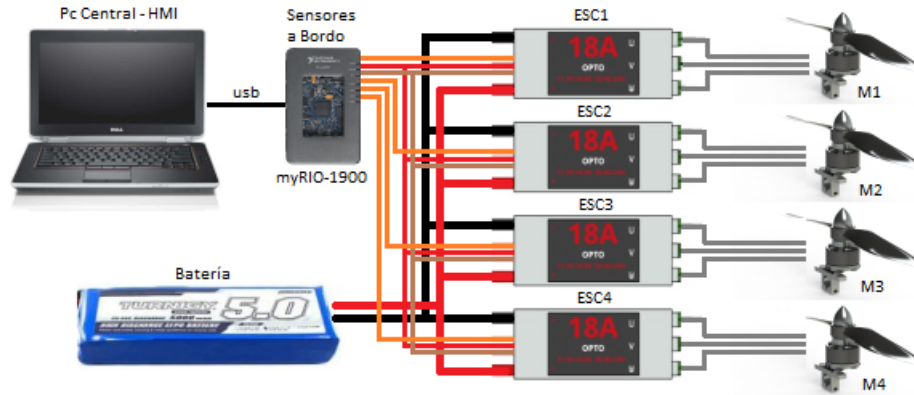


Figura 6: Diagrama de conexiones del Quadcopter.

Por otro lado también es importante mencionar que antes de comenzar toda prueba, se deben calibrar los motores en el rango de aceleración que se esté utilizando. Para esto se crean sub VI's que se dedican a variar uniformemente la señal de control PWM de 50[Hz] entre 1[ms] y 2[ms], correspondiente a un ciclo de trabajo de un 5 % y un 10 % respectivamente, con la cual el ESC queda configurado para dar mínima y máxima velocidad de giro a los motores dentro de ese rango. En el Anexo B se adjunta el código LabVIEW de calibración de motores, mientras que en Anexo D se describe la secuencia de calibración de los cuatro ESC simultáneamente.

0.1.4. Resultados Experimentales

En esta sección se presentan los resultados experimentales del control embebido en la planta real. La sección se divide en subsecciones que describen el funcionamiento por eje en cada soporte, presentando los resultados de posición angular y actuación en el tiempo.

A esta estrategia de control se le suma un filtro de ruido de medición al igual que en la estrategia anterior, puesto que los motores seguirán generando vibraciones. Las pruebas de estabilización se realizan por cada eje en los dos soportes adoptando una estrategia de control diferente a la diseñada en el capítulo 3. La programación del control embebido con LabVIEW y myRIO se detalla en el Anexo B.

La frecuencia de muestreo escogida para la implementación es de 150[Hz] para todas las pruebas realizadas en ambos soportes.

Estabilización de Eje Pitch y Roll en Soporte 1

Para la prueba de estabilización de elevación Pitch se fija el vehículo desde los dos extremos opuestos del soporte de madera, dejando sólo dos motores funcionando, aquellos relacionados con el eje en cuestión, tal como se muestra en la figura 5.8.b. Antes de describir los resultados obtenidos, es necesario comentar que las pruebas sobre el soporte de madera se hacen con el objetivo de probar posteriormente la estabilización en vuelo hovering, dado que dicho soporte simula de mejor manera el comportamiento del vehículo en vuelo.

La sintonización de los parámetros de los controladores se hizo en dos etapas, sintonización para el lazo interno y sintonización para el lazo externo [19]. En primer lugar se busca mantener la velocidad de giro del eje en cero. Para esto se busca un valor proporcional que haga oscilar la posición angular del eje, luego de que esto ocurre, se reduce dicha acción proporcional en un 20 %. Después se procede a ajustar el valor derivativo del PID manteniendo K_p en cero, buscando que el vehículo reaccione de forma rápida a los cambios bruscos de velocidad. Cuando se consigue dicha característica sin oscilaciones, se procede a reducir el valor derivativo en un 10 %. Luego se agrega integración para obtener respuesta a la acumulación de error, el valor se obtiene nuevamente logrando la oscilación del vehículo manteniendo los parámetros K_p y K_d en cero y reduciendo el valor de K_i en un 20 %. Los parámetros ajustados por este método se muestran en la tabla 1.

Para la sintonización del lazo externo se toman los valores del lazo interno como punto de partida para obtener un lazo estable. Luego se aumenta el valor proporcional para dar mayor rapidez en el seguimiento de posición frente a una perturbación externa o un cambio de la misma, mientras que se reducen los valores de la constante derivativa e integrativa, debido a que al aumentar K_p ya se tiene un aumento asociado a ambas por la estructura del PID implementado.

$$PID = K_p(e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{K_i} \int e(t)dt) \quad (7)$$

El tiempo de muestreo y ejecución del lazo de control programado es de 150[Hz], es decir 6 [ms] para la ejecución del programa principal.

1. **Resultados Pitch** Los resultados obtenidos para la posición del vehículo y la respectiva actuación en el tiempo se muestran en la tabla 1 y en la figura 7.

Parámetros PID	PID Interno	PID Externo
K_p	0.6	1.2
K_i	0.8	0.2
K_d	0.006	0.004

Cuadro 1: Parámetros de los controladores PID Pitch.

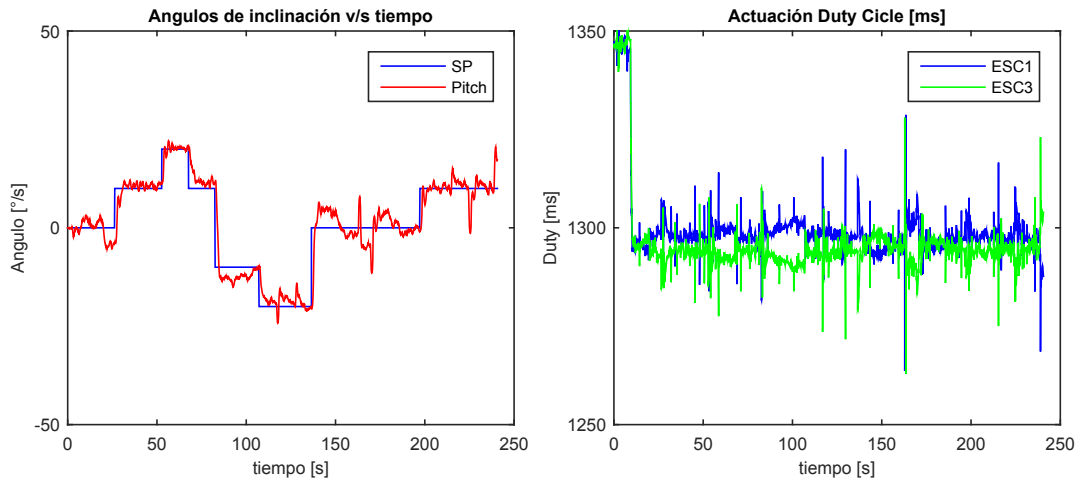


Figura 7: Estabilización eje Pitch en Soporte de Madera

En primer lugar se mantiene la posición deseada en cero mientras se asignan los valores de integración a los controladores PID. Dichos valores no se dejan activos desde un comienzo debido a que mientras se elimina el offset de los sensores, la parte integrativa acumula error, saturando el sistema al momento de encender los motores. El experimento prosigue con el cambio de posiciones angulares a $+10^\circ$, $+20^\circ$, $+10^\circ$, -10° y -20° . Donde se puede observar que el vehículo tiende a seguir las referencias constantes. Luego de que está en la posición de -20° , se perturba el sistema, verificando que vuelve a la posición deseada. Luego se fija un setpoint de cero grados para inducir nuevamente dos perturbaciones al sistema, finalizando con un cambio de posición a $+10^\circ$ donde nuevamente se perturba el sistema verificando que vuelve a estabilizarse cerca de los valores deseados.

2. Resultados Roll

Siguiendo el mismo método experimental de sintonización de los parámetros, se somete a prueba el eje Roll, cuyos resultados se presentan en la tabla 2 y en la figura 8.

Parámetros PID	PID Interno	PID Externo
K_p	0.6	1
K_i	0.8	0.1
K_d	0.004	0.004

Cuadro 2: Parámetros de los controladores PID Roll.

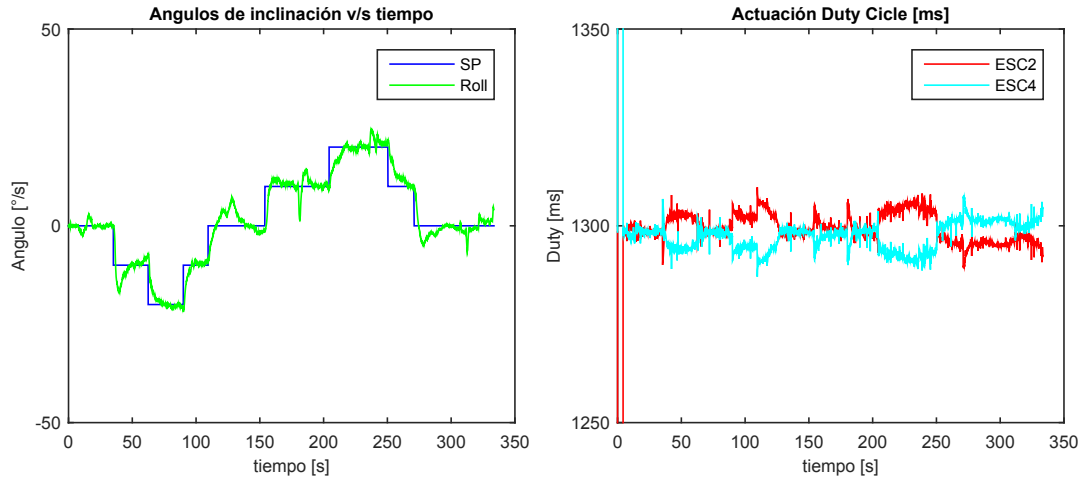


Figura 8: Estabilización eje Roll en Soporte de Madera.

El experimento también comienza calculando el offset asociado a los sensores, por lo tanto también se fijan los valores de integración después de esta etapa. En primer lugar se comienza con el vehículo estable en la posición cero, para cambiar referencia a -10° , -20° , -10° y 0° , con el fin de verificar seguimiento. Posteriormente se realizan los mismos cambios de referencia en sentido contrario, induciendo perturbación en $+10^\circ$ y en $+20^\circ$ cuyo resultado es que el vehículo vuelve a la posición deseada. Una vez que se vuelve a la posición cero, también se inducen perturbaciones verificando que el vehículo vuelve a la estabilización en dicha posición.

Estabilización de Eje Pitch, Roll y Yaw en soporte 2

Antes de probar la estabilización del vehículo en vuelo hovering, se somete a pruebas experimentales sobre el soporte de metal con tres grados de libertad descrito en el Capítulo ?? Componentes del Sistema. En primera instancia es necesario mencionar las características del soporte que impiden ajustar el controlador aplicado en la simulación. La primera es que el centro de masa del vehículo sobre el soporte no es el que se considera para el modelo del mismo en el Capítulo ?? Modelo de la Planta, puesto que el soporte construido a partir de una junta cardánica deja el quadcopter en una posición similar a un péndulo invertido. La otra característica desfavorable para fines de control, es el elevado roce que presentan los rodamientos de la estructura, dificultando el seguimiento de referencias constantes y la robustez a perturbaciones. La figura 9 muestra de mejor forma lo mencionado anteriormente, donde CQ es el centro de masa del Quadcopter y CC es el centro del cardán sobre el que gira.

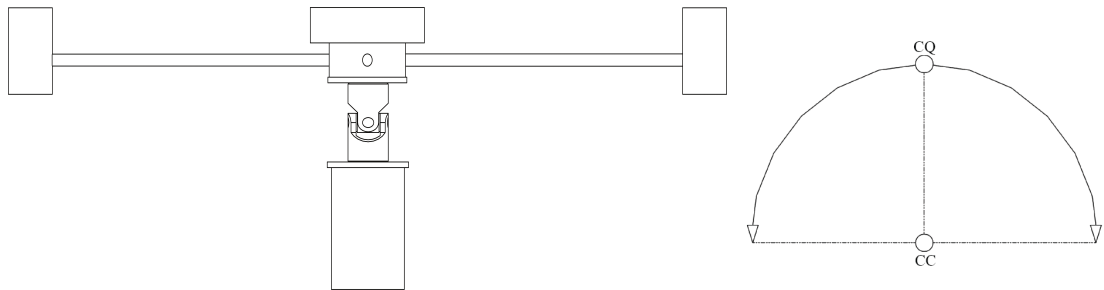


Figura 9: Características del soporte de metal.

Por lo tanto, sobre éste soporte se aplica la estrategia de control en cascada al igual que en el soporte de madera, obteniendo resultados en el control de cada eje por separado, pero no así en el control del vehículo completo, es decir, con todos sus ejes libres. Los resultados experimentales se describen a continuación.

1. **Resultados Pitch** Para la sintonización de los parámetros de los controladores PID se siguen los mismos pasos descritos en la estabilización con el soporte de madera. Dadas las limitaciones del diseño del soporte de metal, las pruebas de estabilización son un tanto diferentes para los ejes de Pitch y Roll. Éstas solo contemplan la estabi-

lización sobre la referencia en cero, dado que por el alto roce no es posible realizar seguimiento sin saturar la actuación o sin que la planta oscile de manera violenta, agregando peligro para las personas en las pruebas. Otra diferencia es la respuesta del sistema a las perturbaciones en la posición angular, dado que el vehículo solo vuelve a la posición deseada ante pequeñas perturbaciones, si estas aumentan en intensidad, el vehículo no contraresta el movimiento aplicado de manera correcta en gran parte por las condiciones del soporte.

Los resultados de las pruebas de estabilización sobre el eje Pitch se presentan en la tabla 3 y en la figura 10 :

Parámetros PID	PID Interno	PID Externo
K_p	2.2	1.8
K_i	0.8	0.6
K_d	0.006	0.005

Cuadro 3: Parámetros de los controladores PID Pitch.

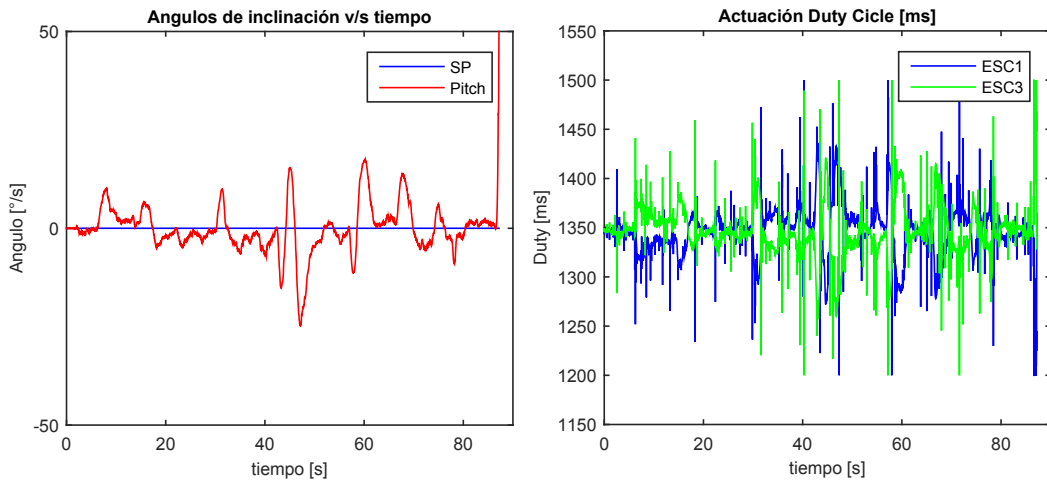


Figura 10: Estabilización eje Pitch en Soporte de Metal 3DOF.

El experimento comienza con el quadcopter en la posición de equilibrio para eliminar el offset de los sensores. Como las pruebas contemplan la estabilización en la posición cero, se procede a perturbar el sistema manualmente con diferentes intensidades, baja, media y alta. A los 17[s] se aplica la primera perturbación de pequeña

magnitud, al igual que a los 24[s] en sentido contrario, posteriormente a los 33[s] y 43[s] empujando el vehículo con fuerza moderada. Ante todas las perturbaciones anteriores el vehículo vuelve cerca de la posición deseada de estabilidad.

Luego se aumenta la fuerza externa aplicada a los 46[s], 63[s] y 72[s] de comenzado el experimento, cuyo efecto es la inestabilidad y saturación de la actuación, donde el vehículo alcanza los límites máximos de desplazamiento angular permitidos por el soporte y el tren de aterrizaje. Después de la inestabilidad provocada por la perturbación, el vehículo es capaz de retomar su posición estable, pero sin duda no es el resultado esperado dado el tiempo que transcurre entre ambas y los desplazamientos angulares alcanzados, que de no estar limitados, serían aún mayores.

2. **Resultados Roll** Tomando las mismas consideraciones que para las pruebas experimentales con el eje Pitch, se presentan los resultados obtenidos para la estabilización sobre el soporte de metal para el eje Roll, que se muestra en la tabla 4 y en la figura 11.

Parámetros PID	PID Interno	PID Externo
K_p	1.8	2.2
K_i	0.8	0.8
K_d	0.004	0.004

Cuadro 4: Parámetros de los controladores PID.

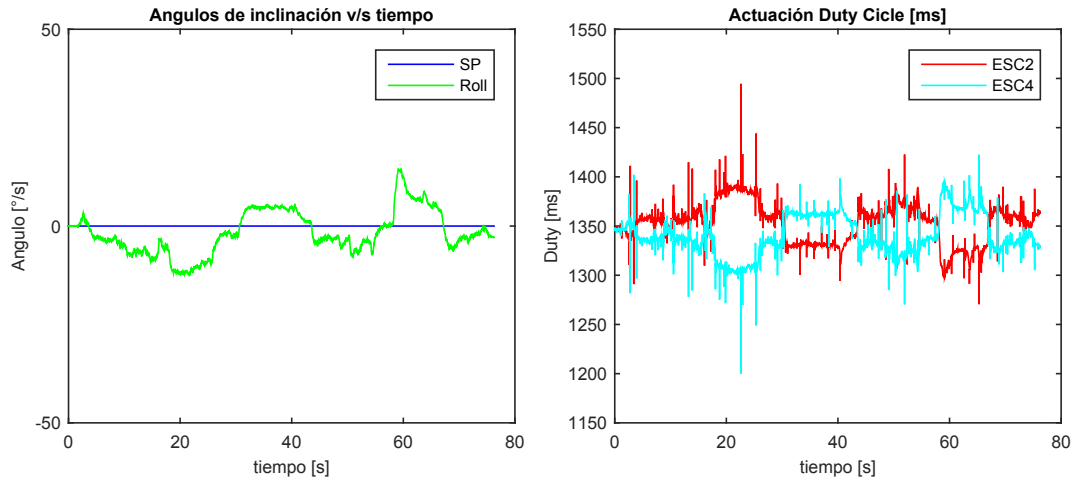


Figura 11: Estabilización eje Roll en Soporte de Metal 3DOF.

En esta oportunidad el experimento se hace en el eje del soporte que presenta mayor roce. Ésto se hace evidente al observar el comportamiento del vehículo luego de ser perturbado. De la figura 11 se puede observar que cada vez que se perturba el sistema, el vehículo demora más de 10 segundos en retomar posiciones angulares cercanas al punto deseado. Un ejemplo claro es la perturbación inducida transcurridos 13[s], donde el vehículo logra retomar su posición de estabilidad cerca de los 30[s], donde se perturba otra vez en dirección contraria para observar el mismo comportamiento. Es importante mencionar que la causa principal de este comportamiento se debe al roce del soporte, dado que las acciones de control se pueden apreciar claramente en el gráfico de actuación, cuyas diferencias en ciclo de trabajo generan el torque suficiente para estabilizar rápidamente con un coeficiente de roce menor.

3. Resultados Yaw

Para poner a prueba el control estabilizador en el eje Yaw, se bloquea el movimiento de los dos ejes anteriormente descritos. El soporte inspirado en una junta cardánica tiene un rodamiento en su base, el cual le permite girar en torno al eje z del sistema cartesiano.

En este experimento el vehículo montado sobre el soporte concuerda con el modelo descrito en el Capítulo ?? Modelado de la Planta, dado que en este caso el giro se

produce en torno al eje que pasa por el centro de masa del vehículo, obteniéndose resultados razonables para el seguimiento de referencias.

La principal desviación durante el desarrollo del experimento, es la obtención de la posición angular por medio de la integración de las mediciones del giroscopo, dado que el error del mismo sensor sumado al ruido de los motores, distorciona el punto de partida del vehículo, lo que se puede apreciar en los videos demostrativos, no así en los gráficos que registran la posición angular.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5 y en la figura 12 :

Parámetros PID	PID Interno	PID Externo
K_p	2.6	6
K_i	0	0.01
K_d	0.002	0.004

Cuadro 5: Parámetros de los controladores PID Yaw.

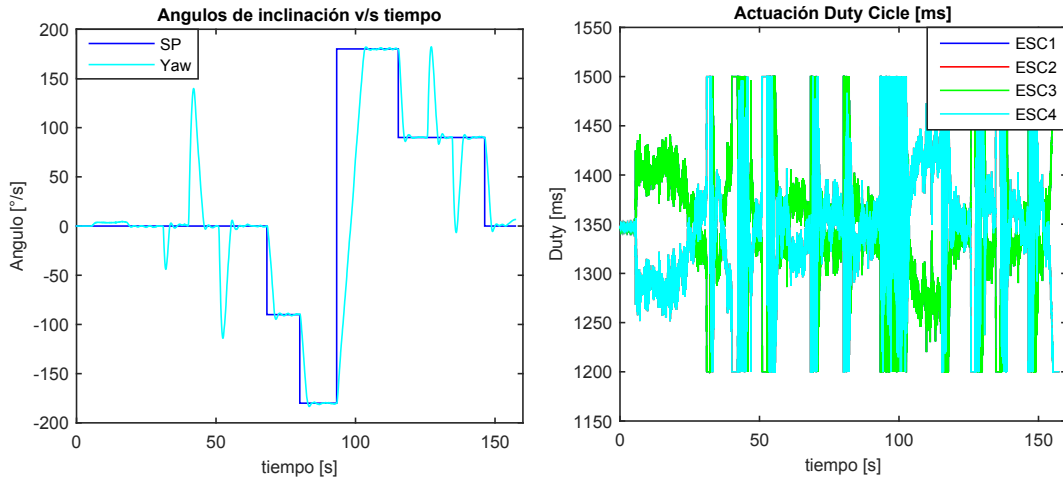


Figura 12: Estabilización eje Yaw en Soporte de Metal 3DOF.

Del experimento es claro observar que el ángulo Yaw se mantiene estable en el punto de operación. Después de aplicar perturbaciones al sistema en 27[s], 34[s] y 42[s] el sistema se estabiliza otra vez cerca de los puntos de referencia. Es claro que mientras mayor sea la perturbación, mayor es el tiempo que toma estabilizar el vehículo.

Del gráfico anterior también se puede observar el seguimiento de referencias constantes, donde también se puede perturbar el sistema y volver a la posición deseada sin problemas. El detalle en este experimento es la desviación en la posición original cero grados al inicio de las pruebas, con la posición cero al final de estas, ambas son diferentes dado el error acumulativo de integrar las mediciones del giroscopo para obtener dicha posición. Ésta desviación no es apreciable por medio de gráficos, pero sí se puede observar en las grabaciones de video realizadas para la presentación del proyecto de titulación.