

# **Entregable 13: INFORME DE DISEÑO DE GIMBAL GIROESTABILIZADO PARA PLATAFORMA UAS DE ALTAS PRESTACIONES**

01/03/2022

## CONTENIDO

I.	OBJETIVO TAREA.....	3
II.	INTRODUCCIÓN .....	4
	A. Etapas de desarrollo .....	4
	B. Selección de la opción .....	4
	C. Opciones y Limitaciones de diseño.....	5
III.	ARQUITECTURA DE DISEÑO .....	5
	A. Estructura .....	5
	B. Detalle de diseño base.....	7
	C. Montaje electrónico.....	7
	D. Sensor IMU.....	10
	E. Servoactuadores.....	14
	F. Programación.....	16
IV.	BASES DE FUNCIONAMIENTO.....	16
	A. Estabilizador Activo .....	16
	B. Colocación del Sensor IMU.....	17
	C. Sistema de Coordenadas.....	18
	D. Ángulos de EULER.....	18
	E. Filtros Complementarios.....	18
	V. CONTROL DE TRAYECTORIA.....	20
VI.	PROTOTIPO.....	20
VII.	CONCLUSIONES.....	20
VIII.	REFERENCIAS.....	21



## I. OBJETIVO TAREA

Como ya se exponía en anteriores proyectos realizados por el INTA, en la actualidad resulta habitual la incorporación de sensores para la toma de diferentes tipos de medidas en aeronaves no tripuladas. Para un correcto funcionamiento de los mismos durante el vuelo, y por lo tanto para que las medidas tomadas sean útiles, la posición de dichos sensores tiene que nivelarse y estabilizarse, de forma que en la medida de lo posible su posición sea lo más estable posible, posibilitando, a su vez, la esclavización del FCS (Sistema de control de vuelo) en base a la disposición y grado de libertad de la superficie donde se ubica la sensorización. Con el objeto de solucionar esta problemática, resultan conocidos diferentes dispositivos que permiten, por ejemplo, estabilizar una carga de sensores atmosféricos en una aeronave no tripulada. Un ejemplo puede encontrarse en el documento “The Stabilized Radiometer Platform (STRAP)—An Actively Stabilized Horizontally Level Platform for Improved Aircraft Irradiance Measurements”, donde se describe un sistema en el que los sensores se ubican sobre el fuselaje de la propia aeronave centrados sobre el eje de desplazamiento, lo cual tiene una serie de limitaciones y presenta una serie de inconvenientes, como por ejemplo una importante limitación en la nivelación de los instrumentos, que es de  $\pm 0.02^\circ$  en alabeo y  $\pm 10^\circ$  en cabeceo, lo que supone la imposibilidad de estabilizar o fijar el ángulo de alabeo en un amplio rango, lo que resulta necesario a la hora de mantener los aparatos, es decir, los sensores, estabilizados durante los giros de la aeronave para definir cualquier secuencia de 30 ángulos de apuntamiento de los sensores. Es por ello se hace imprescindible la actuación sincronizada de la plataforma aérea con el sistema de servoactuadores de nivelación de los sensores. Además, la disposición de los sensores ocupa mucho espacio en la aeronave. Asimismo, dada la disposición solidaria y conjunta de los sensores en el fuselaje de la aeronave, no se puede regular de manera independiente el cabeceo de cada grupo de sensores o de cada sensor de manera individualizada.

El objetivo del desarrollo se basa en la implementación de un estabilizador de tipo cardán para una cámara multispectral de mediano tamaño con capacidad de trabajar en bandas IR ( $0.7\mu\text{m} - 1\text{mm}$  de longitud de onda) con sistema de control de retroalimentación de 2 ejes actuando sobre el control de vuelo de la aeronave. El propósito es hacer que la regulación activa sea efectiva para estabilizar las cámaras mediante la motorización adecuada. El sistema se basa en la utilización de servoactuadores eléctricos asociados a un sensor de posición con capacidad giroscópica para compensar el movimiento no deseado. Esto garantizará que el sensor esté siempre nivelado con el suelo y que las imágenes de video permanezcan estables. Para simplificar el problema, el movimiento de la plataforma aérea se descompone en tres: guiñada ( $\psi$ ), cabeceo ( $\phi$ ) y alabeo (balanceo) ( $\theta$ ). La rótula estabilizadora se hará de material PLC impreso en 3D asociado con un servomotor para fijar los dos ejes perpendiculares entre sí. El dispositivo se integrará en la zona frontal sustituyendo la ojiva de la plataforma

aérea de forma que permita una libertad de movimiento esférico de dos grados de libertad para la operación de la plataforma. La efectividad operativa del sistema integrado compensa otros efectos como los pares de acción y reacción como otras acciones físicas sobre la aeronave. El sistema es voluminoso pero ligero y facilita el control de la plataforma debiendo disponerse de un sistema antibloqueo que permita de su recuperación activa durante el vuelo de forma remota. Este sistema será implementado con posterioridad. En general, el sistema funciona según lo requerido, logrando así su propósito. Para un mayor desarrollo, la principal área de mejora es que la compensación del regulador sea más fluida. Además, el sistema puede reducirse significativamente en tamaño y peso

## II. INTRODUCCIÓN

### A. Etapas de desarrollo.

Los criterios de diseño en los que ha de basarse el sistema son los siguientes:

- 1º.- Establecimiento de los objetivos de desempeño, así como de las declaraciones claras del sistema.
- 2º.-Desarrollo de un modelo y hacer una comprensión básica de la simplificación en un sistema real.
- 3º.-Diseñar e implementar un control que cumpla con las especificaciones de eficacia establecida.
- 4º.- Validar la robustez del control analítico para fijar las limitaciones del sistema.
- 5º.-Validación del hardware para demostrar el correcto funcionamiento.

### B. Selección de la opción

El objeto de diseño es una particularización específica muy determinada para la integración de cámaras del tipo ya referenciado y por ello no se pretende rediseñar lo ya inventado sino adaptar y reconfigurar el diseño de sistemas válidos a las ópticas seleccionadas, con sus particularidades. El estabilizador universal de 2 ejes fue elegido porque cumple con todos los criterios y se puede fabricar y probar de forma ágil y rápida. el objetivo del estabilizador es mantener la plataforma inferior, es decir, la cámara se puede conectar a un plano de referencia horizontal en el espacio 2d. el plano de referencia utilizado configura la función de fijación de la cámara en su lugar durante la fase de calibración. después de la calibración, el sensor IMU lee el movimiento esperado del sistema. El microcontrolador genera comandos de motor a lo largo del balanceo, cabeceo y guiñada para estabilizar la plataforma para cualquier uso previsto y acción inesperada. estos ajustes deben hacerse para evitar el exceso y lo suficientemente

rápidos como para implementar la frecuencia de imágenes utilizada por las cámaras multiespectrales utilizadas que en la realidad no es elevada siendo posible reducir velocidad para mejorar en precisión. Por otro lado, el método de diseño y su dinámica se realiza mediante mínimos cuadrados reiterativos. el modelo del sistema se puede utilizar para futuras simulaciones y anulación de errores.

### C. Opciones y Limitaciones de diseño

Es necesario indicar las afecciones debido a las limitaciones de tiempo, los presupuestos y la complejidad potencial que no debemos sobrepasar. En definitiva, el diseño deberá estar adaptado y en sincronismo con la realidad del objeto y no superarlo. Para el diseño hardware de partida se contará con el estabilizador de cardán el cual, inicialmente, consistía en un motor de cc con codificadores que impulsaban el movimiento a lo largo de los ejes de alabeo (balanceo) y cabeceo con restricciones mínimas. Se utilizarán servomotores comerciales de bajo coste de uso habitual en aeronáutica elemental baratos, fáciles de adquirir y no requiriendo otro controlador adicional para compensar rebotes gracias al uso de filtros y amortiguadores software que actúan sobre el controlador del acelerómetro. La utilización de servoactuadores comerciales de bajo coste limita las amplitudes máximas de movimiento a 90º en ambas direcciones y en consecuencia, el sistema de cardán puede compensar los movimientos a lo largo de los ejes de balanceo y cabeceo hasta  $\pm 90^\circ$ . Como ya se indicó, por razones de racionalización del diseño, podemos reducir la velocidad de movimiento a valores de hasta 90º/s lo que nos permite mitigar las perturbaciones con la suficiente eficacia.

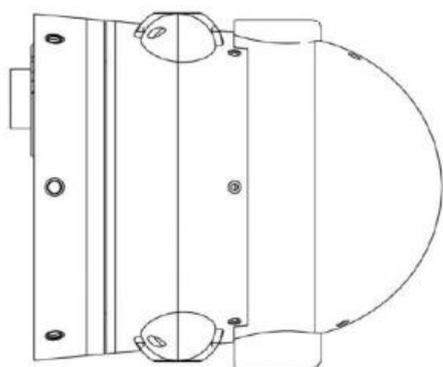
## III. ARQUITECTURA DE DISEÑO

### A. Estructura.

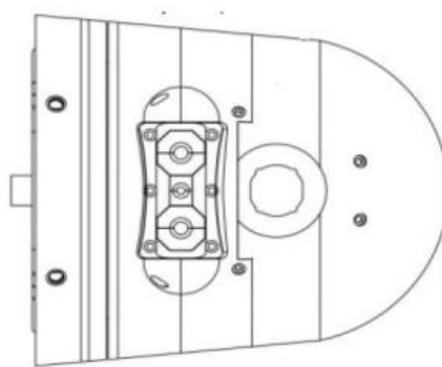
El sistema consistirá en un desarrollo realizado sobre una ojiva básica desarrolla previamente por el INTA para la instalación de sensorización basada en la medida de la transividad atmosférica sobre la que se implementa y acopla un sistema de cámara multiespectral con nuevas condiciones de movilidad y filtrado de actividad sobre la IMU de la propia aeronave. En la figura puede verse el modelo del estabilizador de cardán diseñado para este proyecto. El prototipo está impreso con plástico PCA y ensamblado con pernos M3. Los tres servoactuadores conectados al cardán están controlados por el microcontrolador alimentado por la fuente de alimentación del avión. En una pequeña plataforma en el eje horizontal, se puede colocar la cámara. El sensor acelerómetro se coloca en la parte central para simplificar la colocación del cable y lee solo



intencionalmente los sensores IMU que leen el ángulo de cabeceo ( $\phi$ ) y el ángulo de balanceo ( $\theta$ ). Para que el sistema sea lo más compacto posible, todo el conjunto está diseñado para acercar el centro de gravedad del conjunto al punto medio de los ejes de balanceo y cabeceo.



VISTA LATERAL



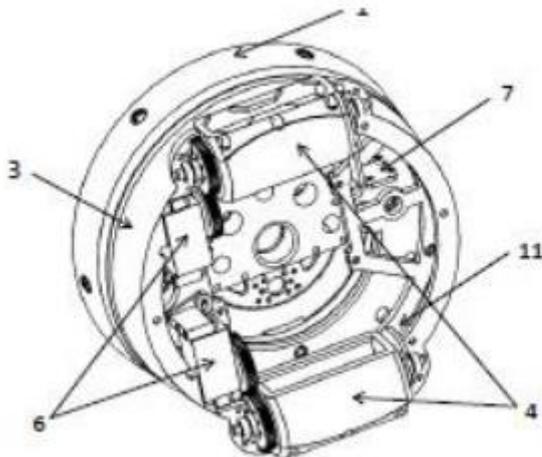
VISTA INFERIOR

#### EXTERIOR OJIVA/GIMBAL PARA INTEGRACIÓN DE CAMARA GIROESTABILIZADA

El sistema se constituye como una estructura que se forma mediante la unión ensamblada de diferentes módulo o anillos, acoplados unos en otros. La diferente forma de estos anillos permite alojar diferentes sensores, y el acoplar más o menos anillos permite variar el número de sensores instalados. Teniendo en cuenta la forma de estos anillos, el número de ellos que se acoplen apenas afecta a la aerodinámica del avión. Para poder regular de forma independiente el cabeceo de grupos de sensores, se regula de forma independiente la posición de los cilindros que alojan un grupo de sensores. Ninguno de los mecanismos del estado de la técnica cumple los requisitos señalados anteriormente. El dispositivo permite una nivelación de  $\pm 360^\circ$  en alabeo y de  $\pm 45^\circ$  en cabeceo. La nivelación en alabeo está limitada mecánicamente a  $\pm 90^\circ$  para evitar que se dañen los cables y fibras ópticas de los sensores. Conseguir, con alguno de los mecanismos del estado de la técnica que se cumplan los seis requisitos implicaría tener que instalar simultáneamente varios de dichos mecanismos, lo que además del problema de espacio afectaría enormemente a la aerodinámica del avión. Se contempla la posibilidad de que la ojiva giroestabilizadora comprenda un mecanismo de protección de los sensores durante las fases de despegue y aterrizaje de la aeronave, donde dicho mecanismo activa los medios motrices para orientar al menos un módulo de cilindros bancada de acuerdo con una orientación estable durante dichas fases de despegue y aterrizaje.



## B. Detalle de diseño base.



El módulo giroestabilizado se dispone sobre una ojiva sustitutoria con dos grados de libertad que vendrá a eliminar a la ojiva fija de vuelo de la aeronave no tripulada, en la cual se dispondrá esquemáticamente los siguientes elementos:

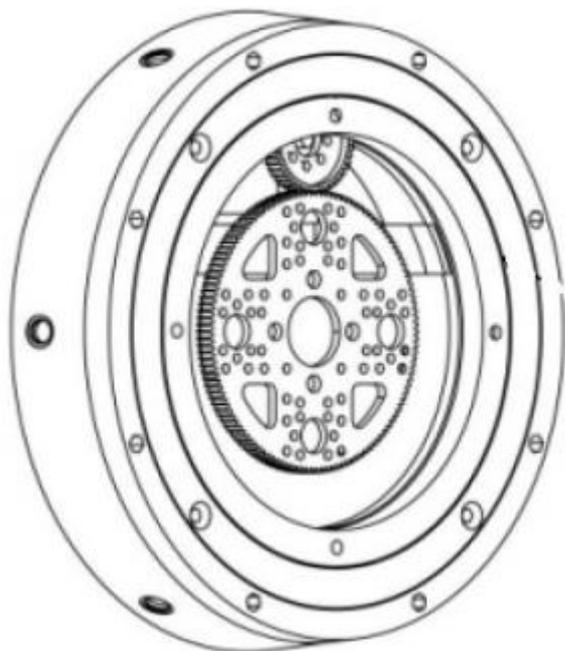
- (1) Módulo de acople
- (2) Corona de giro
- (3) Bancada de cilindro
- (4) Cilindro portasensores (cámara)

## C. Montaje electrónico.

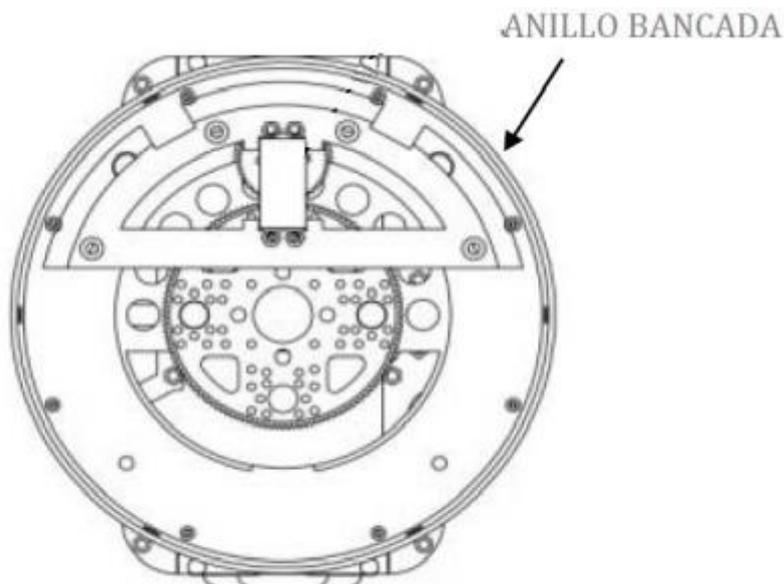
Basándose en el diseño original del sistema previamente desarrollado para sensorización radiométrica la ojiva giroestabilizadora que comprende un módulo de acople que puede fijarse al fuselaje y que está ensamblado mediante una corona de giro a un módulo de cilindros bancada que aloja al menos un cilindro bancada, que a su vez puede alojar al menos una cámara multispectral, de manera que el módulo de cilindros bancada puede girar respecto del módulo de acople mediante el accionamiento de medios motrices principales y al menos un acelerómetro, donde a su vez, al menos un cilindro bancada puede girar respecto del módulo de cilindros portasensores mediante medios motrices externos. La disposición de varios cilindros bancada para alojar diferentes sensores puede permitir colocarlos simétricamente respecto al eje longitudinal del primer grado de giro de la aeronave, pudiendo alojar además más de un sensor en cada cilindro bancada. Las bancadas pueden girar respecto al módulo de

 **COMPETITIVIDAD**

acoplamiento mediante elementos servomotoroes (servoactuadores) hasta un grado de libertad de  $\pm 90^\circ$ .



A su vez cada bancada cilíndrica tiene un segundo grado de giro (y) según ejes paralelos, de forma que puede girar de manera independiente respecto al cilindro bancada mediante otros servomotores independientes. La ojiva giroestabilizada dispondrá en nuestro caso de un solo cilindro bancada cuya disposición la permite actuar de forma independiente con su propio receptáculo en el que se dispone la cámara multispectral. La sustitución del anillo bancada en el que se dispone la cámara permitirá utilizar múltiples sensores (cámaras) de forma independiente o incluso sincronizada en el mismo vuelo y sistema de giroestabilización, no siendo, no obstante, el objeto del presente proyecto.

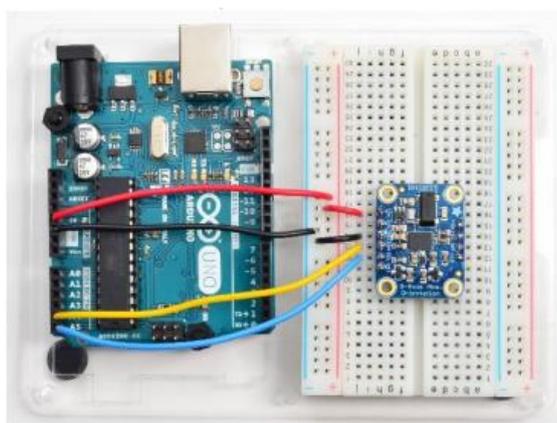
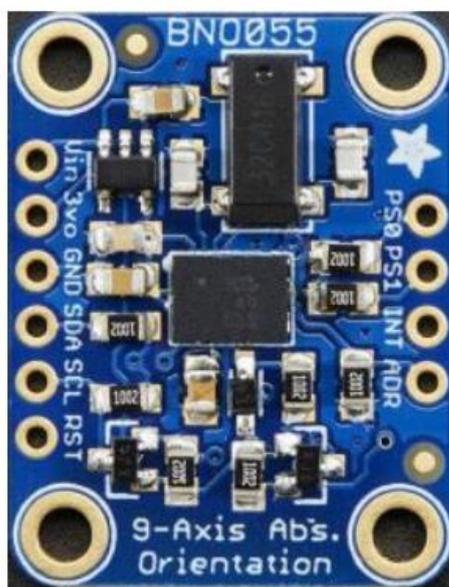


### DISPOSICIÓN DEL CILINDRO-BANCADA GIROESTABILIZADO

La modularidad es una de las principales ventajas del sistema base de ojiva propuesto para el proyecto. No obstante, hay que tener en cuenta el elevado peso y volumen del tipo de cámaras que pretendemos utilizar ya que la disposición del sistema giroestabilizado en la ojiva coloca el centro de gravedad de esta carga útil muy alejada del CG de la aeronave y hemos de compensar el equilibrio de masas del RPAS para que mantenga sus condiciones de aeronavegabilidad. Ello nos limita a una sola cámara por ensayo y vuelo. Al igual que el sistema original, el interior de los cilindros aloja una bahía de carga en la que se alojan los sensores a estabilizar (en nuestro caso una cámara multiespectral). Cada uno de los sensores se aloja en un receptáculo hecho a la medida para él. El exterior de este receptáculo tiene las medidas apropiadas para que encaje en la bahía de carga de los cilindros. De esta forma, en dicha bahía se pueden alojar varios sensores, cada uno de ellos con su correspondiente receptáculo. Todos los cables, o fibras ópticas, que parten de los sensores pasan a través de los cilindros al interior de la ojiva, quedando expuesto al exterior únicamente los receptores de señal. De acuerdo con la realización que se ha representado, el dispositivo comprende tres motores, un motor principal para el giro de la ojiva, otro motor auxiliar para el giro del cilindro superior, y otro motor auxiliar para el del cilindro inferior. El movimiento de estos motores se controla con una placa electrónica conectada a un sensor de orientación absoluta, que va situado sobre una pieza solidaria a uno de los cilindros, de tal forma que la estabilización de esta pieza implica la estabilización de los sensores. Todo el sistema está alimentado mediante las correspondientes baterías del RPAS. El sistema almacena información acerca de la posición del sensor para ser comparada posteriormente con la telemetría de la aeronave y poder mejorar la giroestabilización de los sensores.

#### D. Sensor IMU.

El movimiento de giroestabilización de los anillos se consigue mediante la utilización de sistemas acelerómetros, en nuestro caso se utiliza el modelo 2472 9-DOF de orientación absoluta BNO055 de la casa ADAFRUIT con peso inferior a los 5g y capacidad IMU de hasta 9 ejes. Conectar un sensor de 9 DOF, tiene el desafío de convertir los datos del sensor de un acelerómetro, giroscopio y magnetómetro en "orientación espacial 3D" real. La orientación es un problema difícil de resolver ya que han de desarrollarse los algoritmos de fusión de sensores datos de magnetómetro y giroscopio en una salida estable de orientación de tres ejes. Es un factor difícil de corregir e implementar en sistemas de tiempo real de bajo costo. Los elementos Bosch integrados en este acelerómetro MEMS nos permite de forma estable, fiable y segura hacer esto. Con el magnetómetro y giroscopio colocados en un solo lado con una alta velocidad y procesador basado en ARM Cortex-M0 para digerir todos los datos del sensor nos permiten abstraer el sensor de los requisitos de fusión y tiempo real, y escupir datos que puede usar en cualquier sistema angular como cuaterniones, Ángulos de Euler o vectores.

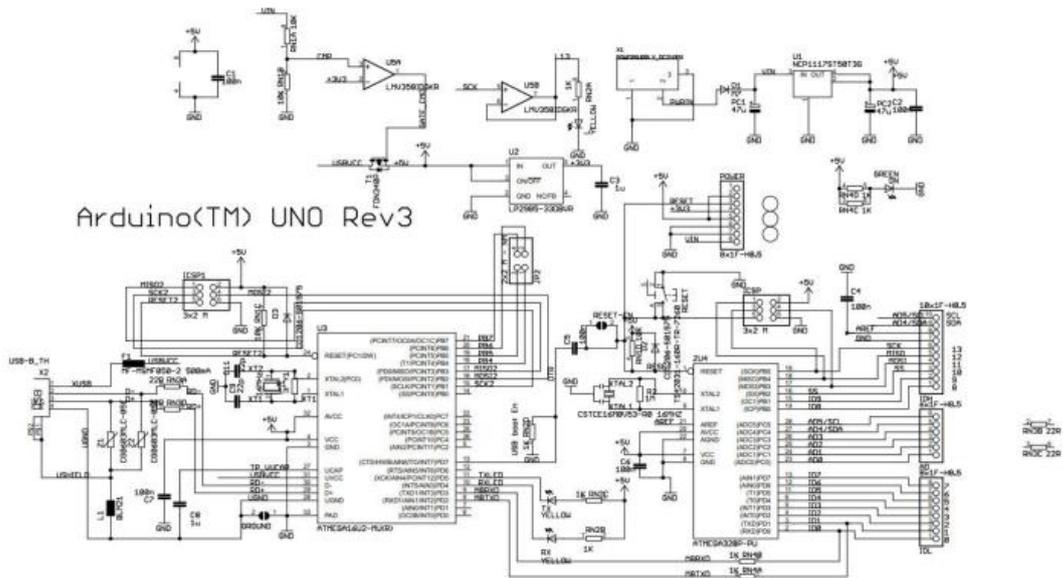


ADAFRUIT 2472 9-DOF de orientación absoluta BNO055. Características:

- Orientación absoluta (Vector de Euler, 100 Hz) Datos de orientación de tres ejes basados en una esfera de 360°
- Orientación absoluta (Quaternion, 100 Hz) Salida de cuaterniones de cuatro puntos para una manipulación de datos más precisa
- Vector de velocidad angular (100 Hz) Tres ejes de 'velocidad de rotación' en rad/s
- Vector de aceleración (100 Hz) Tres ejes de aceleración (gravedad + movimiento lineal) en  $m/s^2$
- Vector de fuerza de campo magnético (20 Hz) Tres ejes de detección de campo magnético en micro Tesla ( $\mu T$ )
- Vector de aceleración lineal (100 Hz)

Tres ejes de datos de aceleración lineal (aceleración menos gravedad) en  $m/s^2$  Para la integración y cableado al microcontrolador hemos utilizado un Arduino UNO R3, AVR, ATmega328P con placa MCU de 8Bits con capacidad I2C. El procesador principal de la placa es un ATmega328 de bajo consumo, como en las demás placas de la familia Arduino MKR.

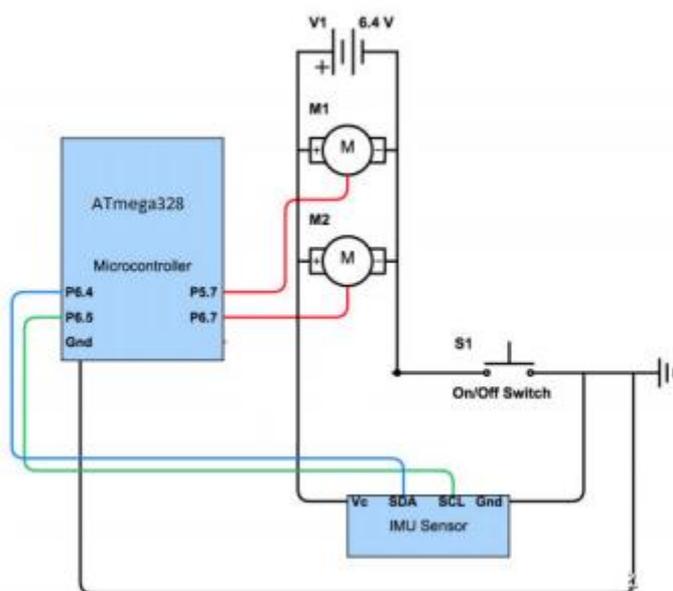
La conectividad de banda estrecha se realiza con un módulo de u-blox, equipado en el propio ATmega328P-PU. Su puerto USB puede utilizarse para suministrar energía (5V) a la placa. Dispone de un circuito de carga de Li-Po que permite que la placa funcione con la energía de la batería o con una fuente externa de 5 voltios, cargando la batería de Li-Po mientras funciona con energía externa. El cambio de una fuente a otra se realiza automáticamente.



Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS. Arduino DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Arduino may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." Arduino reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information.

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Arduino UNO R3, AVR, ATmega328P con placa MCU de 8Bits Microcontrolador: ATmega328

- Voltaje de funcionamiento: 5V
- Voltaje de entrada (recomendado): 7-12V
- Voltaje de entrada (límites): 6-20V Pines de E/S digitales: 14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM)
- Pines de entrada analógica: 6
- Corriente CC por pin de E/S: 40 Ma
- Corriente CC para clavija de 3,3 V: 50 mA
- Memoria flash: 32 KB (ATmega328) de los cuales 0,5 KB utilizados por el cargador de arranque
- SRAM: 2 KB (ATmega328)
- EEPROM: 1KB (ATmega328)
- Velocidad de reloj: 16MHz



El sensor IMU concluyente consta de una placa de microcontrolador basada en el ATmega328 con 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 6 se pueden usar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un cabezal ICSP y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para soportar el microcontrolador; simplemente conectándolo a una computadora con un cable USB o encendiéndolo con un adaptador

de CA a CC o una batería se inicia el sistema. El Uno se diferencia de todas las placas anteriores en que no utiliza el chip controlador FTDI USB a serie. En cambio, presenta el Atmega16U2 (Atmega8U2 hasta la versión R2) programado como un convertidor de USB a serie.

#### E. Servoactuadores.

El servomotor utilizado en el proyecto es un servomotor DIGILENT IG2220053X00085R. El motor gira aproximadamente  $\pm$  ciclo de trabajo de 90° de la onda PWM suministrada a sus pines de señal alrededor de la posición neutral. Para los servomotores DIGILENT, el ciclo de trabajo efectivo está entre el 5% y el 10% durante un período de tiempo de 20 ms. Un ciclo de trabajo del 7,5% es adecuado para que el motor permanezca en posición neutra.



#### CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS:

Nivel de voltaje: 6V D.C. +-10%

Par Nominal: 0.69 kgf.cm

Carga radial: 8N

Carga axial: 6N

Dirección de giro: Eje horizontal

Posibilidad de invertir giro: SI

Temperatura de uso: -10 / 60°C

Humedad: 20 /85% RH

#### CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS:

Consumo de corriente sin carga: 220mA max.

Vel.sin carga: 150rpm +/-15%

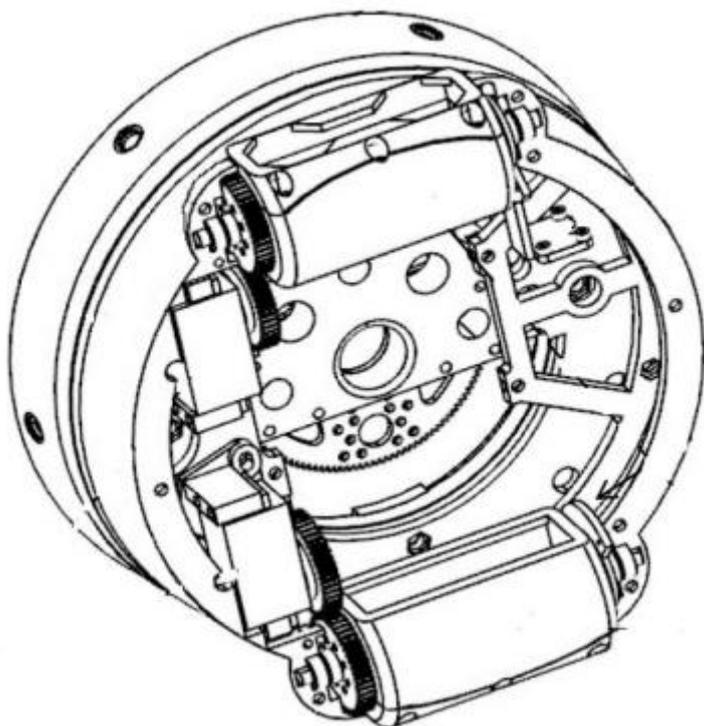
Consumo max: 480 mA

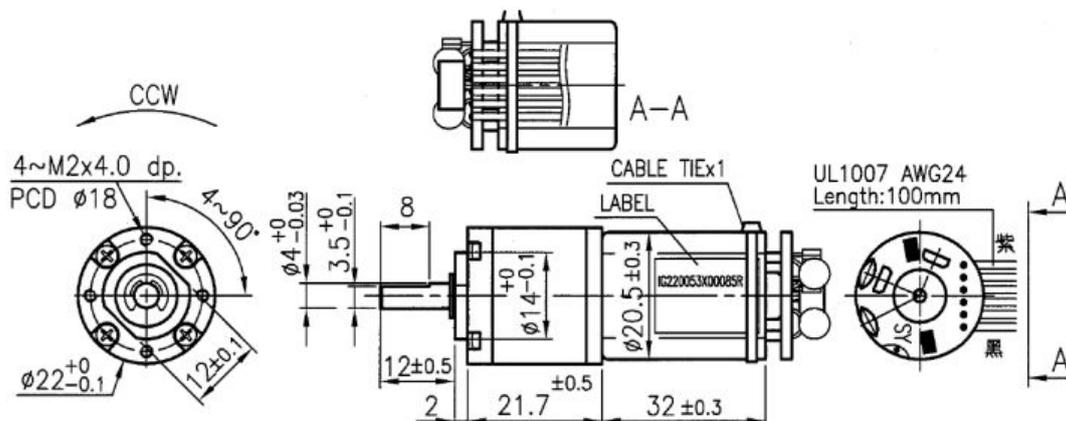
Vel en carga: 125rpm +/-15%

Consumo de bloqueo: 1.8<sup>a</sup>

Par de bloqueo: 4.1 kgf.cm

Aislamiento: D.C. 500V meg. 1.0 MOhm min.





## F. Programación.

El lenguaje de programación utilizado para el Arduino es C++. No es un C++ puro sino que es una adaptación que proviene de avr-libc que provee de una librería de C de alta calidad para usar con GCC (compilador de C y C++) en los microcontroladores AVR de Atmel y muchas utilidades específicas para las MCU AVR de Atmel como avrdude.

Las herramientas necesarias para programar los microcontroladores AVR son avr-binutils, avr-gcc y avr-libc y ya están incluidas en el IDE de Arduino, pero cuando compilamos y cargamos un sketch estamos usando estas herramientas. Aunque se hable de que hay un lenguaje propio de programación de Arduino, no es cierto, la programación se hace en C++ pero Arduino ofrece una api o core que facilitan la programación de los pines de entrada y salida y de los puertos de comunicación, así como otras librerías para operaciones específicas. El propio IDE ya incluye estas librerías de forma automática y no es necesario declararlas expresamente. Otra diferencia frente a C++ standard es la estructura del programa que ya hemos visto anteriormente.

## IV. BASES DE FUNCIONAMIENTO

### A. Estabilizador Activo.

Los dos tipos principales de estabilizadores disponibles hoy en día son los estabilizadores pasivos y activos. los estabilizadores pasivos se basan en mantener el equilibrio con los contrapesos, mientras que los estabilizadores activos utilizan motores eléctricos para mantener la cámara en la orientación correcta, por lo que se eligió el proyecto de estabilizador activo para contrarrestar el movimiento no deseado, el sistema debe determinar si la cámara está dentro o no. El giro lejos de su plano de referencia se hace típicamente mediante mediciones inerciales de un sensor unitario (IMU) que detecta la aceleración y la velocidad angular para determinar la posición referencial de la cámara en el espacio tridimensional angular. Una forma intuitiva de presentar un ángulo es dividirlo en tres ejes diferentes, a saber, cabeceo, guiñada y balanceo. esta definición se

usa a menudo para describir el ángulo de rotación de una aeronave, pero puede interpretarse bien ya que lo mismo ocurre con los movimientos de la cámara. Los tres ejes son perpendiculares entre sí, por lo que todas las rotaciones posibles se pueden dividir en sus componentes de balanceo, cabeceo y rodadura. Para los sistemas de estabilización de cámara activa, el cabeceo y el balanceo o alabeo son primordiales, ya que el movimiento inesperado alrededor de estos ejes hace que el video grabado parezca inestable. Este hecho es importante en lentes panorámicas donde el movimiento debe ser suave y consistente, como es nuestro caso.

#### B. Colocación del sensor IMU

La posición del sensor IMU afectará significativamente el método del sistema de control. Hay dos opciones principales para colocar el sensor en el lado de la cámara o en la parte superior del soporte. Si la IMU se coloca en la plataforma de la cámara, la cámara y la IMU comparten el mismo plano de referencia. Esto da como resultado que la plataforma de la cámara tenga un ángulo tridimensional que es el mismo que el ángulo del sensor. La posición de la cámara se puede controlar con mucha precisión conociendo completamente la orientación exacta de ésta, no obstante, hay que conocer todos los ángulos. La compensación del motor mueve la IMU, lo que afecta a los datos del sensor. Si el sistema de control es inadecuado, el movimiento repentino y rápido causado por el motor puede hacer que el valor del sensor sea incorrecto, y la plataforma de la cámara rodeará fácilmente su punto de vibración de referencia. Alternativamente, el sensor se puede colocar en el lado de soporte del sistema. Este posicionamiento permite que el ángulo de la plataforma y el sensor giren independientemente el uno del otro. Este método reduce en gran medida el riesgo de vibración en el lado de la cámara porque el motor no afecta la lectura del sensor. Desafortunadamente, esta ubicación del sensor exacerbará la capacidad de determinar el ángulo de la cámara. Debido a que la cámara y el sensor no comparten el mismo plano de referencia, los datos del sensor deben estimarse desde la perspectiva de la plataforma. Esto se puede hacer de manera eficiente y funciona bien con un control adecuado del motor, con pequeños errores de estimación que pueden resultar en cambios angulares permanentes hasta que el sistema se recalibre.

#### C. Sistema de Coordenadas.

Para estabilizar la plataforma de la cámara en una posición fija, es importante medir el marco de referencia de posición (marco inercial) de la cámara en relación con el objeto fijo. En este proyecto, el marco de referencia ya se utiliza para la orientación, todo ha de alinearse en dirección del norte magnético en alabeo y de la gravedad en cabeceo. Sin embargo, el valor medido del sensor no siempre se puede medir directamente en el marco inercial porque el sensor mide la cantidad relativa a su propio marco de

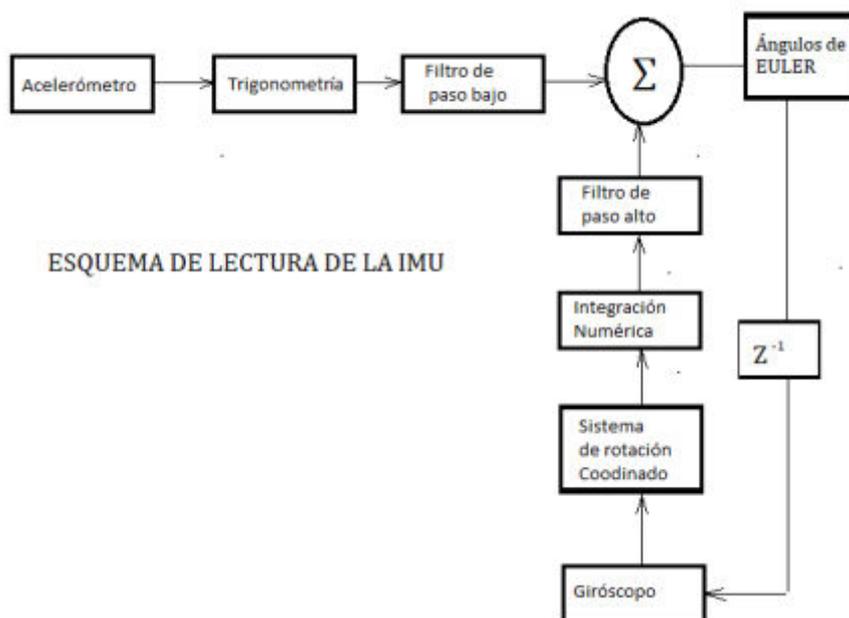
referencia, en lugar de fijarse en el espacio. Esto significa que los datos de medición deben convertirse. De hecho, para obtener la representación del marco inercial, un enfoque es utilizar el ángulo de Euler como una representación de la orientación del marco del sensor en relación con el marco inercial.

#### D. Ángulos de EULER.

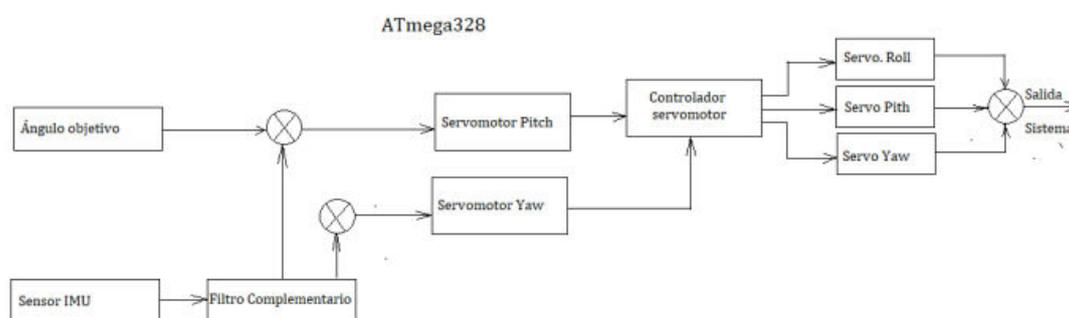
Los ángulos de Euler se utilizan para describir el marco de dirección del marco de inercia en relación con el movimiento. Los ángulos se expresan como  $\psi$ ,  $\theta$  y  $\phi$ , respectivamente, representando los resultados de tres rotaciones con respecto a diferentes ejes. La rotación se llama guiñada, cabeceo y balanceo. Representando las rotaciones en un modelo matemático clásico como tres matrices rotacionales deben multiplicarse en el orden de guiñada, cabeceo y balanceo. Esto significa que la matriz de rotación de guiñada gira el vector desde el marco inercial hasta el llamado primer marco intermedio. Las formulas que marcan las leyes de las aceleraciones en los tres ejes, se pueden utilizar para estimar los ángulos de cabeceo y balanceo en función de las lecturas del acelerómetro. Sin embargo, las lecturas del giroscopo no se expresan en el marco inercial. Para hacer esto, se requiere la matriz de rotación. Los ejes del marco del sensor IMU se han de alinear con el triedro X, Y, Z de forma que la tasa angular de Euler se puede calcular mediante la matriz que combina el movimiento completo.

#### E. Filtros Complementarios.

La fusión de sensores se utiliza para combinar mediciones de múltiples sensores para obtener información más fiable. Los sensores tienen la desventaja de medir la dirección utilizando giroscopos y acelerómetros, respectivamente pero el acelerómetro no puede proporcionar resultados de medición fiables si está cambiando de actitud ya que sufre desviaciones variables en el tiempo. Los filtros complementarios agrupan las tasas de variabilidad para obtener una mejor estimación. Los filtros complementarios se utilizan para el filtrado de paso bajo de los datos proporcionados por el acelerómetro, integrando y filtrando los datos de paso alto del giroscopo y luego combinando las dos lecturas. De esta manera se proporcionan estimaciones más fiables.



En definitiva, las lecturas ruidosas del acelerómetro se filtran y complementan con datos del giróscopo, mientras que las desviaciones variables en el tiempo del giróscopo se filtran y complementan con datos del acelerómetro, por lo tanto, el filtro proporciona una estimación que se basa en la mejor medición de cada sensor. Por otro lado, el dominio de tiempo no se puede implementar directamente en el equipo y la diferencia de retroceso se utiliza para hacerlo más discreto. En cuanto al hardware, el filtro complementario se ha implementado de acuerdo con el esquema expuesto, pero el filtro no puede procesar directamente los datos del sensor sin procesar por lo que parte del procesamiento se ha realizado antes del filtrado mediante la utilización de modelos matemáticos ya desarrollados. Para obtener el ángulo de Euler del acelerómetro, se debe utilizar el método trigonométrico, aunque también podemos utilizar estimaciones experimentales.



bloque de control de un sistema de trayectoria de bucle abierto

## V. CONTROL DE TRAYECTORIA.

Las trayectorias generalmente se establecen a través de restricciones en un proceso o ejecutor. Además, la generación de trayectorias se puede utilizar tanto en sistemas de bucle abierto como de circuito cerrado. debido a que no hay retroalimentación del servomotor, el control de trayectoria se realiza solo para el control de bucle abierto. El esquema adjunto muestra el bloque de control de un sistema de trayectoria de bucle abierto. la trayectoria elegida es una rotación de guiñada constante para simular una cámara que captura una vista panorámica. las perturbaciones se excluyen de forma independiente en el eje de rodadura o en el eje de inclinación. Dado que el cardán puede estabilizar la cámara lenta, es posible realizar un desplazamiento angular en la dirección opuesta. por lo tanto, las lecturas del sensor IMU se pueden utilizar para estimar la rotación del motor.

## VI. PROTOTIPO.

Se ha construido un prototipo, como se muestra en la fotografía. ha sido probado y evaluado para evaluar su actividad estable. Los resultados muestran que es capaz de estabilizar el movimiento desacoplado en los dos ejes hasta cierto punto. El movimiento a lo largo del eje de cabeceo es muy suave en comparación con el eje de alabeo. Para ángulos pequeños, el movimiento es suave. cuando el ángulo de inclinación se acerca a cero, se produce una ligera vibración que se compensa con el sistema software de filtrado como ya estaba previsto La señal de datos en bruto adquirida del sensor IMU se procesa y filtra para obtener una posición confiable en el ángulo de la cámara. los datos del acelerómetro son muy ruidosos, y los datos del giroscopo se desplazan con el tiempo. Para resolver este problema, se introducen algoritmos de fusión de sensores mediante la aplicación de filtros complementarios a los datos del acelerómetro y el giroscopo. Se observó que el controlador estabilizó la plataforma bajo interferencias de baja frecuencia. Sin embargo, el controlador no puede estabilizar la plataforma con precisión para evitar interferencias del movimiento acoplado. Esta limitación se basa en la suposición de que el controlador considera los ángulos de forma independiente.

## VII. CONCLUSIONES.

El cardán de dos ejes cumple con los objetivos descritos en la introducción. el objetivo principal del cardán es mitigar las distracciones introducidas por el usuario manteniendo la parte superior de la plataforma en el mismo plano de referencia. Los ensayos han demostrado que el sistema de control universal es suficientemente eficaz y suave. La construcción del cardán y la lectura de posición del sensor IMU verifican que el sistema esté funcionando como se esperaba. La estabilización de la plataforma para el movimiento acoplado se ha logrado mediante la utilización del procesador ATmega 328 ejecutando la potencia de cálculo requerida para la cinemática inversa.



## VIII. REFERENCIAS.

- William Andreen y Ella Hurtberg. "Giroscopo estabilización de la unidad de posicionamiento". en (2019).
- Robots. "entendiendo el cabo de euler". en 2012).
- Mark Pedley. detección de inclinación mediante un acelerómetro triaxial. en: freescale semiconductor application note 1 (2013), pp. 2012–2013.
- Wada Takashi et al. "Modelado práctico e identificación del sistema de servomotores r/c". en: 2009 ieeec control application (cca) y intelligent control (isic). ieeec. en 2009
- "Algoritmo de estimación de actitud y posición para eliminar la deriva en 3d". en: (2016).

