

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**Diseño y construcción de una planta MIMO para la  
implementación en tiempo real de algoritmos de control  
analógicos y digitales**

**Byron Alexander Quezada Benalcázar**

**Ingeniería Electrónica**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Electrónico

Quito, 15 de julio de 2015

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Diseño y construcción de una planta MIMO para la implementación en tiempo real de algoritmos de control analógicos y digitales**

**Byron Alexander Quezada Benalcázar**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Alberto Sánchez, PhD.

Firma del profesor

---

Quito, 15 de julio de 2015

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

---

Nombres y apellidos:

Byron Alexander Quezada Benalcázar

Código:

103563

Cédula de Identidad:

1722154000

Lugar y fecha:

Quito, julio de 2015

## RESUMEN

El siguiente trabajo escrito reporta el diseño y construcción de un sistema de rotores gemelos en balancín para la prueba de controladores análogos y digitales MIMO. Esta planta se ajusta a la creciente necesidad de conocer el funcionamiento de vehículos conformados por rotores y provee un entorno construido a partir de elementos que se pueden adquirir comercialmente. El escrito detalla las diferentes etapas llevadas en el diseño y construcción del sistema mecánico de la planta, cableado y alimentación, el diseño y construcción del circuito acondicionador y, finalmente, el diseño e implementación del controlador y la interfaz gráfica de control. Este reporte finaliza detallando las mejoras y alternativas que se pueden tomar para realizar una planta mejorada.

**Palabras clave:** rotores gemelos, planta MIMO, configuración experimental, diseño de sistemas, motores brushless, ESC, controladores, LabVIEW, myRIO, Arduino.

## ABSTRACT

This work reports on the design and construction of a twin rotor system that will allow the implementation of MIMO analog and digital control solutions. This plant meets the increasing need to know about the operation of vehicles that are built with rotors, and it provides an environment built upon commercially available elements. The report describes the stages of design and construction of the plant's mechanical system, the wiring and the power supply, the design and construction of the conditioning circuit, and the design and implementation of the controller and the controller graphical interface. The report finalizes with the improvements and alternatives to improve the plant.

**Key words:** twin rotor, MIMO plant, experimental setup, system design, brushless motors, ESC, controllers, LabVIEW, myRIO, Arduino.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Introducción.....</b>	<b>9</b>
<b>Desarrollo del Tema .....</b>	<b>10</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>31</b>
<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>33</b>
<b>Anexo A: Medidas de las piezas.....</b>	<b>34</b>
<b>Anexo B: PCB imprimible.....</b>	<b>42</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Detalles técnicos del motor brushless.....	20
---	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Inteco Dual Rotor System .....	11
Figura 2: Diseño de la base en 3D .....	12
Figura 3: Eje de inclinación en 3D .....	13
Figura 4: Eje de inclinación en 3D con líneas invisibles .....	13
Figura 5: Soporte del eje de rotación en 3D .....	14
Figura 6: Soporte del eje de rotación en 3D con líneas invisibles .....	14
Figura 7: Eje de rotación en 3D .....	16
Figura 8: Eje de rotación en 3D con líneas invisibles .....	16
Figura 9: Acople en 3D para el potenciómetro que mide la inclinación .....	17
Figura 10: Acople en 3D para el potenciómetro que mide la inclinación con líneas invisibles .....	17
Figura 11: Uso del cable UTP .....	20
Figura 12: Esquema del circuito de adaptación .....	22
Figura 13: Esquema de la PCB .....	24
Figura 14: Disposición de la PCB .....	24
Figura 15: Conexión para un sistema de medición con referencia a tierra .....	26
Figura 16: Diagrama de bloques de la interfaz virtual (VI) para myRIO .....	26
Figura 17: Interfaz gráfica del controlador manual para myRIO .....	27
Figura 18: Diagrama de bloques de la interfaz virtual para Arduino .....	28
Figura 19: Interfaz gráfica del controlador manual para Arduino .....	28
Figura 20: Medidas de la base (mm), plano lateral .....	34
Figura 21: Medidas de la base (mm), plano superior .....	34
Figura 22: Medidas del eje de inclinación (mm), plano lateral izquierdo .....	35
Figura 23: Medidas del eje de inclinación (mm), plano superior .....	35
Figura 24: Medidas del eje de inclinación (mm), plano lateral derecho .....	35
Figura 25: Medidas del eje de inclinación (mm), plano lateral frontal .....	36
Figura 26: Medidas del soporte del eje de rotación (mm), plano lateral .....	36
Figura 27: Medidas del soporte del eje de rotación (mm), plano superior .....	37
Figura 28: Medidas del soporte del eje de rotación (mm), plano inferior .....	37
Figura 29: Medidas del eje de rotación (mm), plano lateral parte superior .....	38
Figura 30: Medidas del eje de rotación (mm), plano lateral parte inferior .....	38
Figura 31: Medidas del eje de rotación (mm), plano superior .....	39
Figura 32: Eje de rotación en 3D, vista inferior .....	39
Figura 33: Medidas del eje de rotación (mm), plano inferior .....	40
Figura 34: Medidas del acople para el potenciómetro que mide la inclinación (mm), plano frontal .....	40
Figura 35: Medidas del acople para el potenciómetro que mide la inclinación (mm), plano lateral .....	41
Figura 36: PCB imprimible .....	42



# INTRODUCCIÓN

Un sistema de rotores gemelos de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) es un modelo experimental reducido de un helicóptero que tiene dos grados de libertad. El componente principal del sistema es una viga que lleva dos rotores en los extremos, esta viga tiene ejes de rotación ortogonales entre sí. Las hélices que se colocan en los rotores producen el empuje necesario para mover el sistema y producir la guiñada e inclinación correspondientes. El sistema completo es no lineal y complejo debido a un acoplamiento cruzado significativo (Bayrak, Dogan, Tatlicioglu & Ozdemirel, 2015).

Las configuraciones experimentales de laboratorio como esta son útiles como herramientas educativas e igualmente son plataformas esenciales para evaluar y probar métodos teóricos. Desarrollar un sistema experimental permite a los estudiantes y desarrolladores ganar experiencia en el diseño y construcción de sistemas reales, además, ofrece la posibilidad de escoger piezas de acuerdo al presupuesto, opción no disponible para sistemas comerciales disponibles (Bayrak, Dogan, Tatlicioglu & Ozdemirel, 2015).

Los sistemas de control electrónicos son usados en cualquier campo y, en muchos casos, son el principal sistema de control de una planta, pero para poder crear un controlador se necesita un estudio de la dinámica de la planta. Para resolver este inconveniente existe la posibilidad de construir plantas que permitan estudiar los fenómenos más importantes en el comportamiento de sistemas que se puedan aplicar a sistemas reales.

Adicionalmente, el desarrollo de controladores para este sistema puede ser usado para satisfacer la creciente demanda de proyectos relacionados con UAV (vehículos aéreos no tripulados) para fines comerciales, gubernamentales, investigativos o militares (Agarwal, Mohan, & Kumar, K., 2014). El objetivo de este proyecto es crear una planta que proporcione un entorno en el que se puedan desarrollar e investigar controladores con una aplicación directa a la práctica.

# DESARROLLO DEL TEMA

## Objetivos

### Objetivo principal

Diseñar y construir un sistema de rotores gemelos por medio de la elaboración del sistema mecánico y electrónico, para proporcionar una planta MIMO que sirva para la implementación, en tiempo real, de algoritmos de control analógicos y digitales.

### Objetivos secundarios

1. Diseñar y construir el sistema mecánico de la planta.
2. Realizar el cableado y establecer la fuente de alimentación de la planta.
3. Diseñar e implementar el circuito acondicionador.
4. Diseñar e implementar el controlador y la interfaz de control manual de la planta.

## Requerimientos

- Usar dos motores tipo brushless (motores eléctricos sin escobillas) de marca T-MOTOR, modelo Air Gear 350, con su respectiva hélice y controlador de velocidad electrónico (ESC).
- Usar dos tubos de fibra de carbono de 330 [mm] de largo y 16 [mm] de diámetro, y acoplar los motores por medio de una base de fibra de carbono y abrazaderas para tubo de 16 [mm].
- Usar un potenciómetro de precisión de 10 vueltas marca Bourns, modelo 3540, para medir la rotación de la planta.
- Usar un potenciómetro de precisión de 1 vuelta marca Vishay, modelo 132, para medir la inclinación de la planta.
- Usar la tarjeta marca National Instruments, modelo myRIO, junto con el software LabVIEW, para crear el controlador manual y la interfaz de control.

## Diseño y construcción del sistema mecánico

El diseño se basó en un sistema modelo llamado Two Rotor Aerodynamical System (Sistema Aerodinámico de Dos Rotores) producido por la empresa polaca Inteco. El sistema consiste de una viga que pivotea en su base de tal manera que ésta pueda rotar libremente tanto en el plano horizontal como en el vertical. El sistema se muestra en la Figura 1.

Para realizar los planos del diseño se usó el CAD Solidworks 2013. Con este software se puede realizar la geometría y el modelo en 3D de la planta.

El escrito sigue la cronología del diseño de piezas, porque el sistema no fue diseñado de abajo hacia arriba, sino más bien, en orden de simplicidad de piezas, por lo que las piezas finales son adaptadas para acoplarse con las primeras piezas diseñadas. Es importante recalcar este aspecto ya que el por qué se diseñó una pieza de determinada forma puede quedar respondida por el orden en el que fue diseñada y construida.

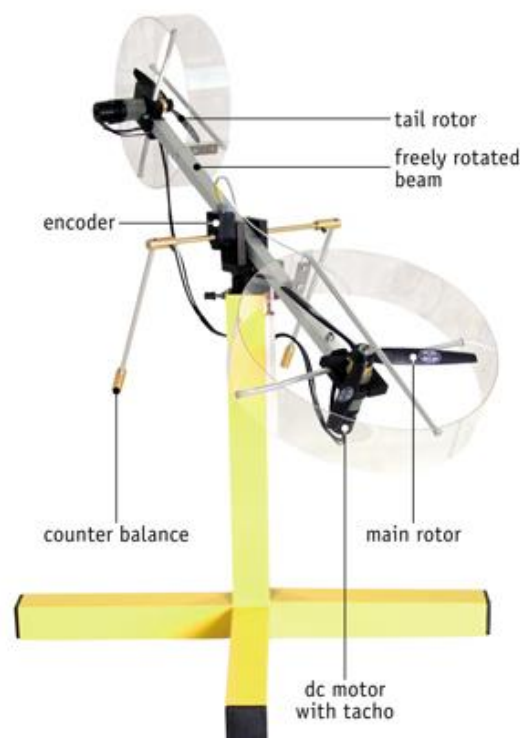


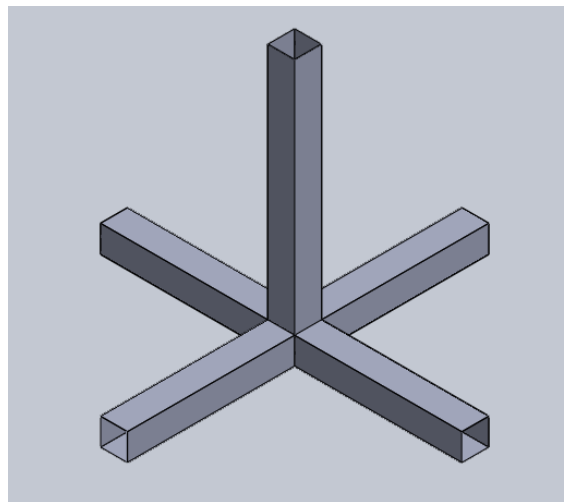
Figura 1: Inteco Dual Rotor System<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Obtenido el 10 de Julio de 2015 desde <http://www.inteco.com.pl/products/two-rotor-aerodynamical-system/rotor/>

### **Diseño y construcción de la base**

El propósito de la base es sostener toda la planta y evitar la caída del bloque superior, para ello se debe usar una configuración sólida y firme que evite la oscilación de la planta y sirva como un ancla sobre la superficie de trabajo.

El diseño de la base está basado en el sistema modelo mencionado anteriormente, siendo ésta una cruz con brazos en 90 grados de la misma longitud, adicionalmente, se eleva un quinto brazo sobre el centro de la cruz. Debido a costos y a la facilidad para soldar, se escogió una barra hueca cuadrada de acero como material de construcción. La barra de acero también proporciona un buen peso para que la base sirva como ancla de la planta. El diseño en 3D se muestra en la Figura 2.



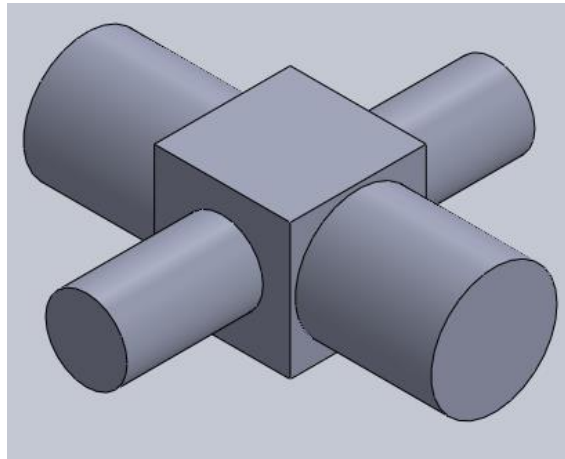
**Figura 2: Diseño de la base en 3D**

### **Diseño y construcción del eje de inclinación**

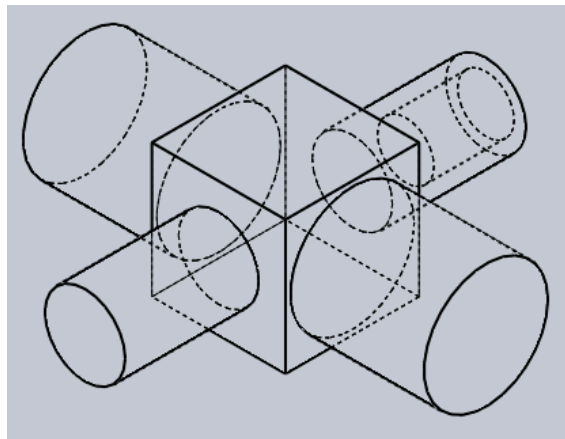
El eje de inclinación es la pieza que permite el acople de los dos tubos de fibra de carbono para formar una sola viga. Además, esta pieza permite que la viga pueda inclinarse hacia arriba y abajo. Finalmente, esta pieza debe acoplarse de alguna manera a la perilla del potenciómetro.

Con los requerimientos establecidos se procede con el diseño y la construcción en aluminio, debido a que es un material resistente, no se deforma con facilidad y es liviano. El

diseño en 3D se muestra en la Figura 3 y el mismo diseño con líneas invisibles se muestra en la Figura 4.



**Figura 3: Eje de inclinación en 3D**

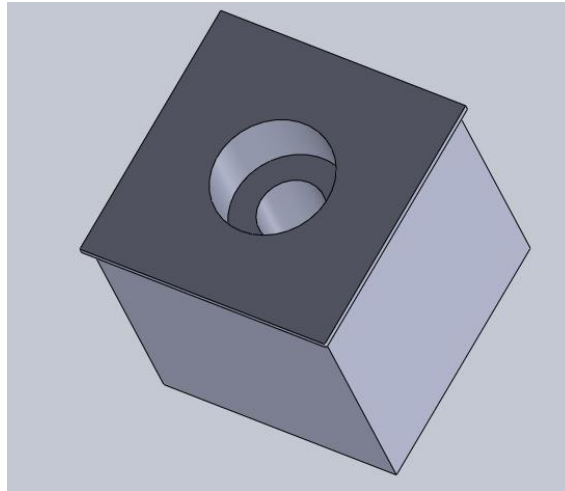


**Figura 4: Eje de inclinación en 3D con líneas invisibles**

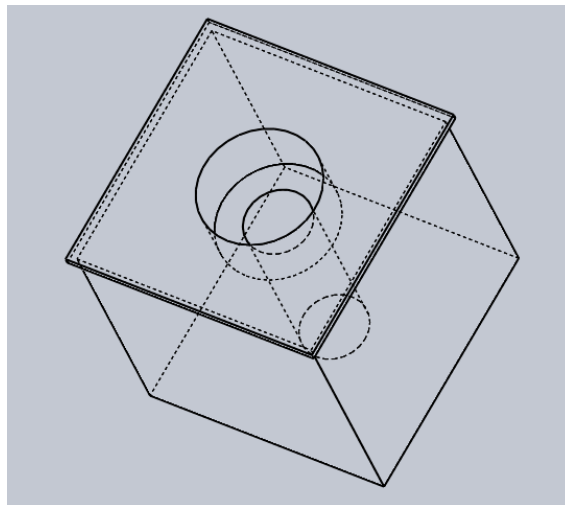
### **Diseño y construcción del soporte del eje de rotación**

El soporte del eje de rotación es la pieza que se coloca en la cúspide de la cruz, en el tope del brazo elevado, y sirve para sostener al eje de rotación y además sostiene al potenciómetro de 10 vueltas en la parte inferior de la pieza. Esta pieza contiene dos rodamientos que permiten la rotación del eje en la parte superior, y, en conjunto proporcionan mayor estabilidad al eje. En la parte inferior tiene una rosca hecha específicamente para el potenciómetro tal que la única parte móvil sea la perilla del potenciómetro.

Esta pieza se elaboró en acero ya que el manejo de acero es menos complicado que otros metales, además tiene una gran resistencia y la pieza resultante tendrá una gran duración. El diseño en 3D se muestra en la Figura 5 y el mismo diseño con líneas invisibles se muestra en la Figura 6.



**Figura 5: Soporte del eje de rotación en 3D**



**Figura 6: Soporte del eje de rotación en 3D con líneas invisibles**

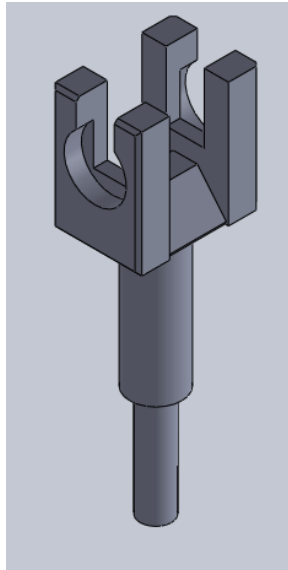
### **Diseño y construcción del eje de rotación**

El eje de rotación es la pieza más complicada del sistema mecánico ya que ésta debe acoplarse al soporte y al potenciómetro inferior, debe incluir alguna forma para acoplar el eje de inclinación y el potenciómetro que mide la inclinación. Además, debe ser resistente para que no se deforme con el peso que va a sostener.

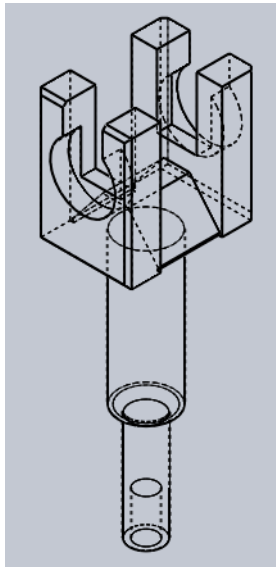
La parte superior del eje de rotación tiene que ser una estructura firme porque en esta parte de la pieza se acoplará el eje de inclinación y el potenciómetro para medir dicha inclinación. Con estos requerimientos se diseñó esta parte con forma de “U”, tal que el eje de inclinación esté acoplado a los lados laterales, pero poder acoplar eje de inclinación se suma la necesidad de incluir rodamientos en los laterales de la “U”. Además, el eje de inclinación tiene acoplados los tubos de fibra de carbono que generan una sola viga que puede inclinarse hacia arriba y hacia abajo, por ello la parte inferior de esta parte de la pieza no debe impedir este movimiento, sino más bien, debe establecer los límites de inclinación de la planta.

La parte inferior del eje de rotación debe tener una forma cilíndrica de suficiente ancho para poder sostener toda la estructura que está encima. Sin embargo, el grosor del cilindro debe reducirse en la parte inferior para poder acoplarse a los rodamientos. Finalmente, el cilindro reducido debe tener un hueco en el final de la pieza para que la perilla del potenciómetro de 10 vueltas, colocado sobre el soporte del eje de rotación, pueda acoplarse.

Con los requerimientos establecidos se procede con el diseño y la construcción en aluminio como material de construcción debido a que es un material resistente y liviano. El diseño resultante se muestra en la Figura 7 y el mismo diseño con líneas invisibles se muestra en la Figura 8.



**Figura 7: Eje de rotación en 3D**



**Figura 8: Eje de rotación en 3D con líneas invisibles**

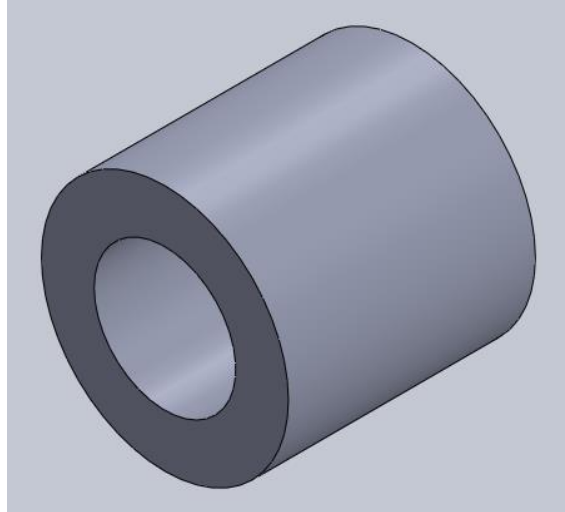
### **Diseño y construcción del acople para el potenciómetro que mide la inclinación**

Esta pieza no se contemplaba en el diseño inicial pero debido a que el eje de inclinación usa al potenciómetro como un rodamiento, se necesitó crear un acople para que el potenciómetro permanezca fijo y la única parte móvil sea la perilla del mismo.

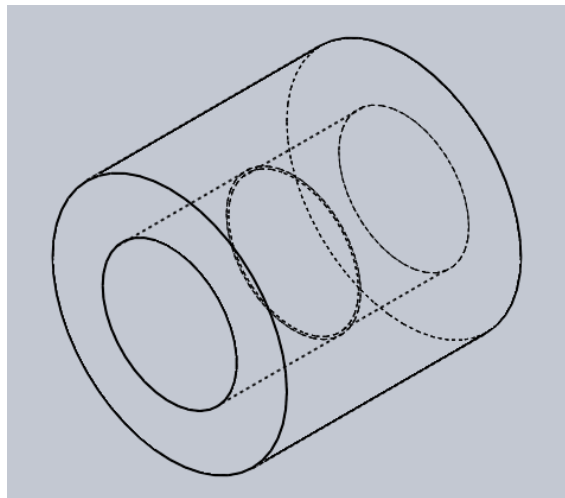
Se creó un cilindro del mismo diámetro del rodamiento para que se inserte en la misma ranura del eje de rotación. Además, el acople es hueco para que el eje de inclinación pueda ingresar en él por el un lado, mientras que por el otro lado entra el potenciómetro por



medio de la rosca. De esta forma se logra acoplar el eje de inclinación con el potenciómetro que mide la inclinación. El diseño resultante se muestra en la Figura 9 y el mismo diseño con líneas invisibles se muestra en la Figura 10.



**Figura 9: Acople en 3D para el potenciómetro que mide la inclinación**



**Figura 10: Acople en 3D para el potenciómetro que mide la inclinación con líneas invisibles**

## **Cableado y fuente de alimentación de la planta**

El cableado de la planta es un proceso importante en la construcción ya que un mal cableado puede ocasionar perturbaciones sobre el sistema, por ejemplo: cuando un cable genera fuerza sobre la viga, el cable puede mover a la planta ya sea inclinando o rotando la viga, resultando en una alteración a la dinámica del sistema y la subsecuente dificultad a la hora de crear el controlador análogo o digital. Sin embargo, para que el efecto expuesto

ocurra el cable debe tener una dureza y peso considerable, por lo que los cables con menor AWG afectan en mayor grado a la dinámica del sistema y, por ende, son los que se deben analizar principalmente.

Se decidió que el cableado principal esté colocado en paralelo al eje de rotación, y baje por el brazo central de la base, para de esta forma evitar la mayor cantidad de perturbaciones generadas por el cableado.

Igualmente, un mal cableado puede ocasionar un incendio al existir la posibilidad de generar chispas en caso de cortocircuito o exceso de corriente sobre un cable, una falla muy probable debido a que la planta maneja corrientes elevadas, a saber, cada motor requiere 10.9 [A] en velocidad máxima. Por eso es importante elegir los cables con el AWG correspondiente al tipo de conexión que se está realizando.

### **Cableado para los motores**

Cada motor tiene 3 cables cortos de 20 [AWG] terminados en un conector bullet macho, que se conectan a un controlador electrónico de velocidad (ESC). El ESC tiene 3 conectores bullet hembra a través de los cuales provee potencia eléctrica trifásica generada electrónicamente.

Idealmente se quería colocar los ESC fuera de la viga y más cerca de la tarjeta de control myRIO. En total resultaban 6 cables de 20 [AWG], 3 cables por cada motor, que se necesitaban acoplar en paralelo al eje de rotación, pero la fuerza que generaban para regresar la viga a la posición inicial era apreciable y ese resultado sólo alteraría la dinámica del sistema. A este problema se le suma la necesidad de encontrar los conectores bullet en el mercado ecuatoriano, para no cortar los cables provistos por el fabricante, pero la poca disponibilidad y alto precio convirtieron a esta alternativa en la menos apta.

Por las razones expuestas, se decidió colocar al ESC en el tubo de fibra de carbono y conectar directamente el motor al mismo.

### **Cableado para los controladores electrónicos de velocidad (ESCs)**

Cada ESC tiene 3 conectores bullet hembra mencionados anteriormente, un par trenzado de 22 [AWG] que termina en un header hembra y 2 cables de 18 [AWG] para la alimentación DC que se usa para energizar los motores. A pesar de que ahora salen 8 cables en total, 4 de cada ESC, el par trenzado de 22 [AWG] queda sujeto al tubo ya que los cables son cortos y de esta forma no se interfiere con la dinámica del sistema, sin embargo, el header hembra llega hasta el eje de rotación. Debido a que las señales que se transmiten por el par trenzado son las señales de control, se puede usar un cable de mayor AWG para conectarse a este header hembra ya que sólo son señales de voltaje y no requieren llevar mucha corriente.

Los 2 cables de 18 [AWG] restantes son muy cortos por lo que se decidió usar un conector muy usado en los cuadricópteros para el cableado de alimentación, a saber, el conector tipo Dean o conector en T. El conector tipo Dean es un conector de dos entradas, una para la entrada positiva y otra para la negativa, muy resistente al calor ya que está hecho de nylon. Comúnmente los conectores tipo Dean se usan para conectar los ESCs a una batería, usualmente tipo LiPo, pero en este caso se usaron para conectar los ESCs a la fuente de energía de la planta. Específicamente, los ESCs llevan conectores Dean hembra.

### **Cableado Restante**

Los requerimientos de todo el cableado son los siguientes:

- 4 cables 18 [AWG] para la alimentación DC de los ESCs.
- 4 cables para las señales de control.
- 2 cables para la polarización de los 2 potenciómetros.
- 2 cables para la lectura del voltaje en los 2 potenciómetros.

Se usó 4 cables de 18 [AWG] organizados en pares. Al final de cada par se soldó conectores Dean macho, mientras que en el otro extremo del par se conecta la fuente de

alimentación de la planta. Cada par se coloca en paralelo al eje de rotación y van opuestos en el eje de inclinación para compensar el efecto de su peso.

Se observó que el cableado restante es de 8 cables y que un cable UTP tiene 8 cables en su interior organizados como pares trenzados. Por esta razón se usó un cable UTP con el esquema que se muestra en la Figura 11. Esta configuración permitió tener un solo cable en paralelo al eje de rotación, pero permitía que en la parte final se separara para lograr conectar todos los elementos restantes.

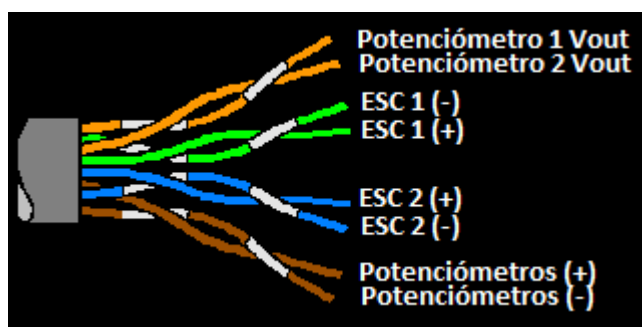


Figura 11: Uso del cable UTP

### Fuente de alimentación de la planta

Se necesita una fuente DC para alimentar principalmente a los motores, los requerimientos del motor se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Detalles técnicos del motor brushless<sup>2</sup>

Item No.	Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (g)	RPM	Efficiency (g/W)
AIR 2213 KV920	11.1	T 9545	50%	2	22.2	240	4400	10.81
			65%	3.8	42.18	386	5900	9.15
			75%	5.5	61.05	490	6900	8.03
			85%	7.2	79.92	594	7800	7.43
			100%	9.8	108.78	722	8300	6.64
	12		50%	2.3	27.6	278	4800	10.07
			65%	4.4	52.8	445	6300	8.43
			75%	6.2	74.4	568	2200	7.63
			85%	8.1	97.2	679	8100	6.99
			100%	10.9	130.8	813	8900	6.22
	14.8		50%	3.3	48.84	403	5700	8.25
			65%	6.2	91.76	636	7600	6.93
			75%	8.4	124.32	786	8600	6.32
			85%	10.7	158.36	907	9500	5.73
			100%	14.3	211.64	1084	10200	5.12

<sup>2</sup> Obtenida el 11 de Julio desde [http://www.rctigermotor.com/html/2014/Combo\\_pack\\_0930/279.html](http://www.rctigermotor.com/html/2014/Combo_pack_0930/279.html)

Las fuentes de computadora son fuentes DC que pueden abastecer una gran corriente y que proporcionan un voltaje de 12 [V]. Para encontrar la potencia de la fuente que se necesita, se observa que a 12 [V] al 100% de velocidad, cada motor requiere 10.9 [A] o 130.8 [W]. Por ende se necesita una fuente de computadora que entregue más de 22 [A] o 262 [W] a un voltaje de 12 [V].

Con los requerimientos establecidos se escogió una fuente de 600 [W], primero por la disponibilidad en el local comercial y segundo porque esta fuente es capaz de entregar 30 [A] o 360 [W] a 12 [V]. Hay que tomar en cuenta que la fuente es de 600 [W], pero no toda la potencia puede ser entregada por los terminales de 12 [V], sino más bien es una suma de los terminales 3.3, 5 y 12 [V] principalmente. En otras palabras, una fuente de 300 [W] en teoría cumple con la potencia requerida por los motores, pero en realidad de esos 300 [W] puede que tan sólo la mitad puedan ser entregados a 12 [V].

## **Diseño e implementación del circuito de acondicionamiento**

### **Diseño teórico del circuito de acondicionamiento**

Para hacer uso de la fuente de 600 [W] para la polarización de los potenciómetros de retroalimentación de la planta, se debe crear un circuito acondicionador que baje los  $\pm 12$  [V] provistos por la fuente, a  $\pm 10$  [V] que pueden ser medidos con la tarjeta myRIO. Para ello se diseñó un circuito regulador de voltaje con diodos zener de 10 [V].

Se usó el diodo zener 1N4740A con una disipación máxima de potencia  $P_D = 1$  [W]. Con este componente y la teoría de diodos zener (Boylestad, R. y Nashelsky, L, 2009) se procedió a diseñar el circuito de la Figura 12.

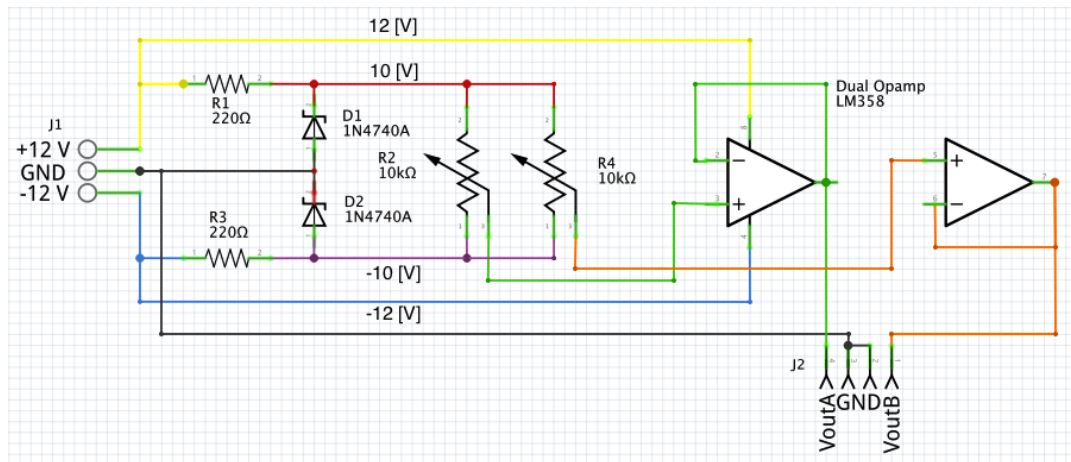


Figura 12: Esquema del circuito de adaptación

En este circuito se incluye la adaptación para la terminales positivas al igual que para las negativas. Para comenzar con el análisis del diseño se procede a calcular la máxima corriente que puede fluir a través del diodo zener como se muestra en la Ecuación 1.

$$I_s = \frac{Watts}{Voltaje} = \frac{1[W]}{10[V]} = 0.1[A] = 100[mA]$$

Ecuación 1: Corriente máxima teórica a través del diodo zener

El cálculo del valor mínimo de la resistencia en serie  $R_s$  en función de  $I_s$ , el voltaje de la fuente  $V_s$  y el voltaje zener  $V_z$  se muestra en la Ecuación 2.

$$R_s = \frac{V_s - V_z}{I_s} = \frac{12 - 10[V]}{0.1[A]} = 20[\Omega]$$

Ecuación 2: Valor teórico de la resistencia en serie

El cálculo de la corriente de la carga  $I_L$ , si se conectan dos potenciómetros de  $10[k\Omega]$  cada uno en paralelo con los diodos zener, se muestra en la Ecuación 3 (Dorf, R. y Svoboda, J, 2011). El diferencial de voltaje entre los terminales del potenciómetro es el doble ya que un terminal está a  $10[V]$  y el otro a  $-10[V]$ .

$$I_L = \frac{2 \times V_z}{R_L} = \frac{2 \times 10[V]}{\frac{10000 \times 10000}{10000 + 10000} [\Omega]} = \frac{20}{5000} [A] = 0.004[A] = 4[mA]$$

Ecuación 3: Corriente teórica de la carga

El cálculo de la corriente zener  $I_z$  con carga total se muestra en la Ecuación 4.

$$I_z = I_s - I_L = 100 - 4[mA] = 96[mA]$$

**Ecuación 4: Corriente zener teórica**

Finalmente, se usa un amplificador operacional doble LM358, para crear dos seguidores de voltaje y de esta forma aislar las impedancias para no afectar las medidas de los potenciómetros.

**Diseño práctico**

Una vez obtenidos los valores teóricos se procede a obtener los valores prácticos que se pueden usar. El primer factor a tomar en cuenta es el factor de disipación de potencia de las resistencias en serie, ya que se debe usar el menor factor para no quemar el circuito. En este proyecto se usó resistencias con un factor de disipación de potencia de  $\frac{1}{2}$  [W]. Con el uso de estas resistencias se reduce la corriente máxima a través del diodo zener como se muestra en la Ecuación 5.

$$I_s = \frac{Watts}{Voltaje} = \frac{1/2 [W]}{10[V]} = 0.05[A] = 50[mA]$$

**Ecuación 5: Corriente práctica máxima a través del diodo zener**

Como se puede observar, esta corriente aún es mayor a la que requieren los dos potenciómetros por lo que el circuito no se ve afectado.

La fuente potencia de 600 [W] puede proporcionar 30 [A] a través de los terminales de 12 [V], de los cuales ya se han usado alrededor de 22 [A] para los motores. Debido a que el circuito de acondicionamiento no requiere mucha corriente, los 8 [A] restantes son más que suficientes. Por el otro lado, los terminales de -12 [V] de la fuente sólo proporcionan 0.5 [A], pero son suficientes para el circuito que se diseñó.

Para limitar aún más la corriente que circula por el circuito y de esta forma reducir el calor generado por los diodos zener para mantener los  $\pm 10$  [V], se aumentó el valor de las resistencias a  $R_s = 220[\Omega]$ . Lo que resulta en la Ecuación 6.

$$I_s = \frac{V_S - V_Z}{R_s} = \frac{12 - 10[V]}{220[\Omega]} = 0.009[A] = 9[mA]$$

**Ecuación 6 : Corriente práctica requerida por el circuito de acondicionamiento**

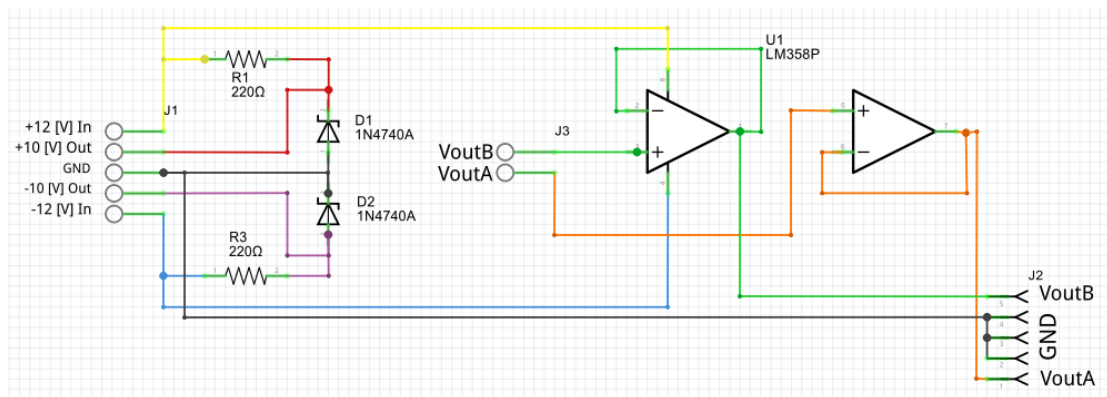
Con esto nuevos datos se obtiene una nueva corriente zener como se muestra en la Ecuación 7, con la que se comprueba la baja corriente que debe ser disipada por los diodos.

$$I_z = I_s - I_L = 9 - 4[mA] = 5[mA]$$

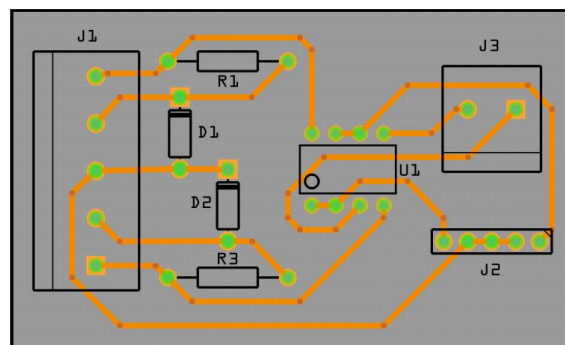
**Ecuación 7: Corriente zener práctica**

### Diseño de la placa con el circuito impreso (PCB)

Para crear la PCB se usó el programa Fritzing. En este programa se reemplaza los potenciómetros por una bornera cuyos terminales se conecten a los potenciómetros de la planta. A su vez, se cambia la primera bornera de 3 pines por una de 5 pines, ya que la salida de  $\pm 10$  [V] puede ser incluida en esta bornera. Finalmente, se añade una toma de tierra (GND) en el header de salida ya que la tarjeta myRIO requiere 3 pines de tierra. El esquema se muestra en la Figura 13 y la disposición de la PCB se muestra en la Figura 14.



**Figura 13: Esquema de la PCB**



**Figura 14: Disposición de la PCB**



## **Diseño e implementación del controlador y la interfaz de control manual de la planta**

### **myRIO**

Se usó la tarjeta myRIO de National Instruments como el dispositivo de control de la planta. La tarjeta requiere el software LabVIEW Development System junto con el Real-Time Module para su correcto funcionamiento. Para este proyecto se usó la versión 2014.

Para controlar los motores a través de los ESCs, se necesita enviar una señal de control de tipo “Servo” a los ESCs. La señal de tipo servo es una señal PWM limitada por el ancho del pulso, es decir, a diferencia de una señal PWM común que varía el ancho del pulso (duty cycle) sobre todo el período de la señal, la señal tipo servo se limita a variar en un rango que usualmente va de 1000 [us] a 2000 [us] para una señal con frecuencia de 50 [Hz].

Conociendo estos detalles y la posibilidad de la tarjeta para generar señales PWM con la frecuencia deseada, se creó la interfaz de control manual en base a un ejemplo del uso de un motor servo con la tarjeta myRIO (Doering, 2015). Los cambios realizados fueron la eliminación de elementos relacionados con los ángulos de los motores servo y la duplicación del controlador para el segundo ESC.

Para medir el voltaje provisto por los potenciómetros se usó las dos entradas análogas de la tarjeta myRIO capaces de medir  $\pm 10$  [V]. Se configuró la conexión de estas entradas para un sistema de medición con referencia a tierra como se muestra en la Figura 15.

Finalmente, se aumentó a la interfaz el bloque auto configurable para usar ambas entradas en LabVIEW y obtener un gráfico de retroalimentación de la planta.

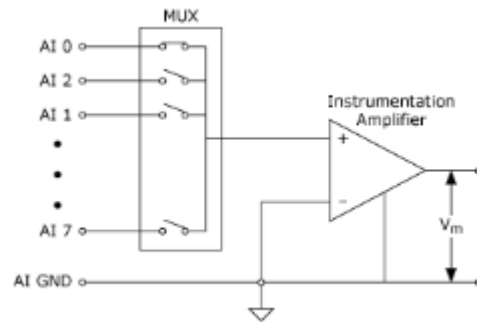


Figura 15: Conexión para un sistema de medición con referencia a tierra<sup>3</sup>

El diagrama de la interfaz virtual (VI) se muestra en la Figura 16 y la interfaz gráfica se muestra en la Figura 17.

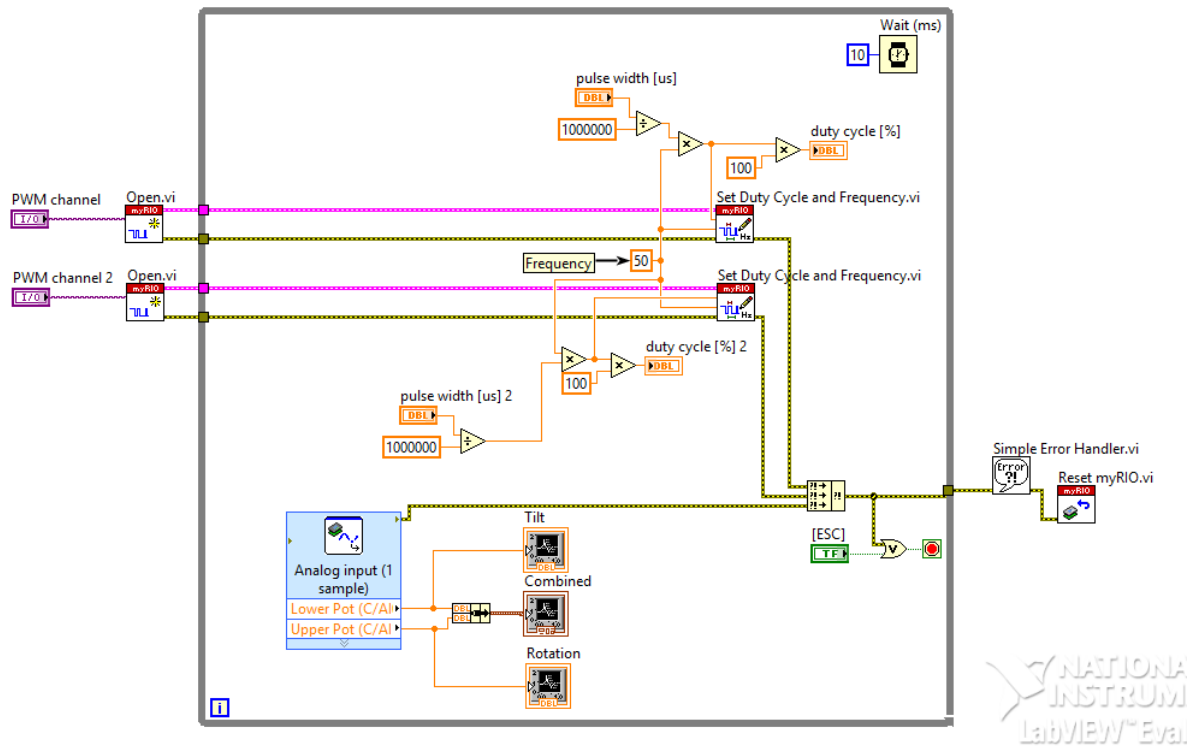


Figura 16: Diagrama de bloques de la interfaz virtual (VI) para myRIO

<sup>3</sup> Obtenida el 12 de Julio de 2015 desde <http://www.ni.com/white-paper/3344/en/>

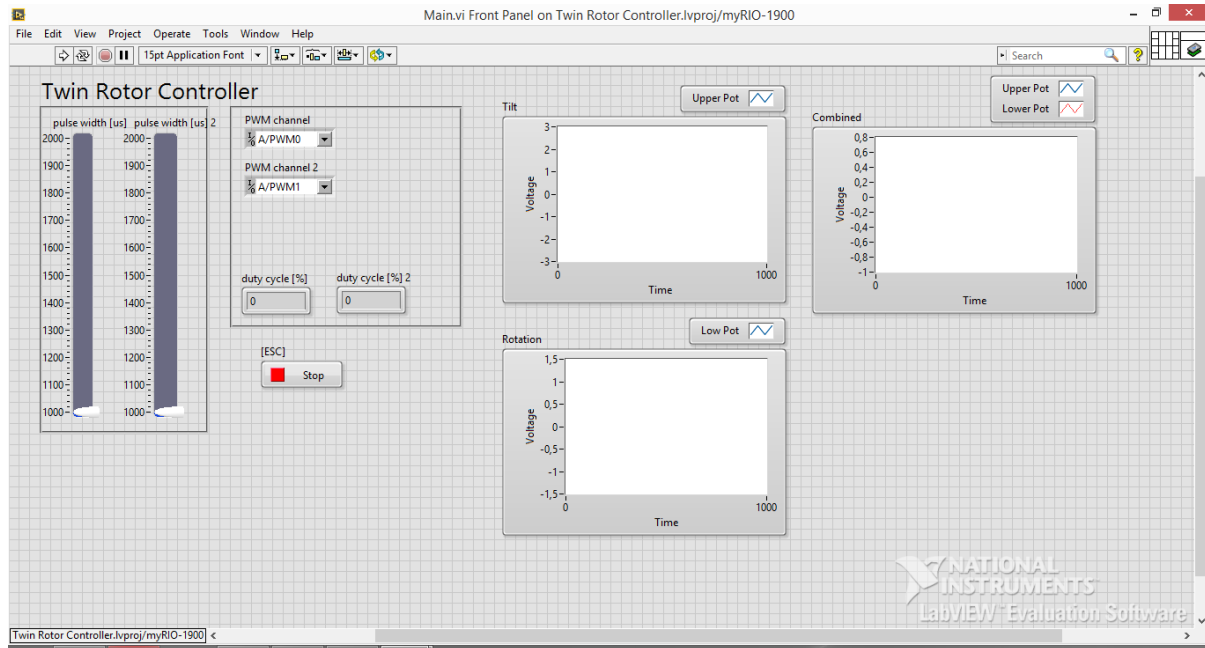


Figura 17: Interfaz gráfica del controlador manual para myRIO

## Arduino

Este apartado busca ofrecer una alternativa para el control de la planta en caso de que no se disponga de la tarjeta myRIO y se disponga de una tarjeta Arduino, la tarjeta UNO es más que suficiente. Es importante destacar que el sistema de medición está diseñado para trabajar con  $\pm 10$  [V] y dañaría las entradas análogas de la tarjeta Arduino UNO, por ende, si se quiere trabajar con este sistema hay que hacer un circuito de acondicionamiento o polarizar los potenciómetros con +5 [V] y GND.

Aclarado este aspecto se establecen los requerimientos de software. Para trabajar con un Arduino UNO se requiere del software LabVIEW Development System y el paquete MakerHub LINX, descargable gratuitamente a través del JKI VI Package Manager de LabVIEW. Una vez descargado el paquete se encuentran los bloques que realicen operaciones homogéneas a las establecidas anteriormente.

El diagrama de la interfaz virtual (VI) se muestra en la Figura 18 y la interfaz gráfica se muestra en la Figura 19.

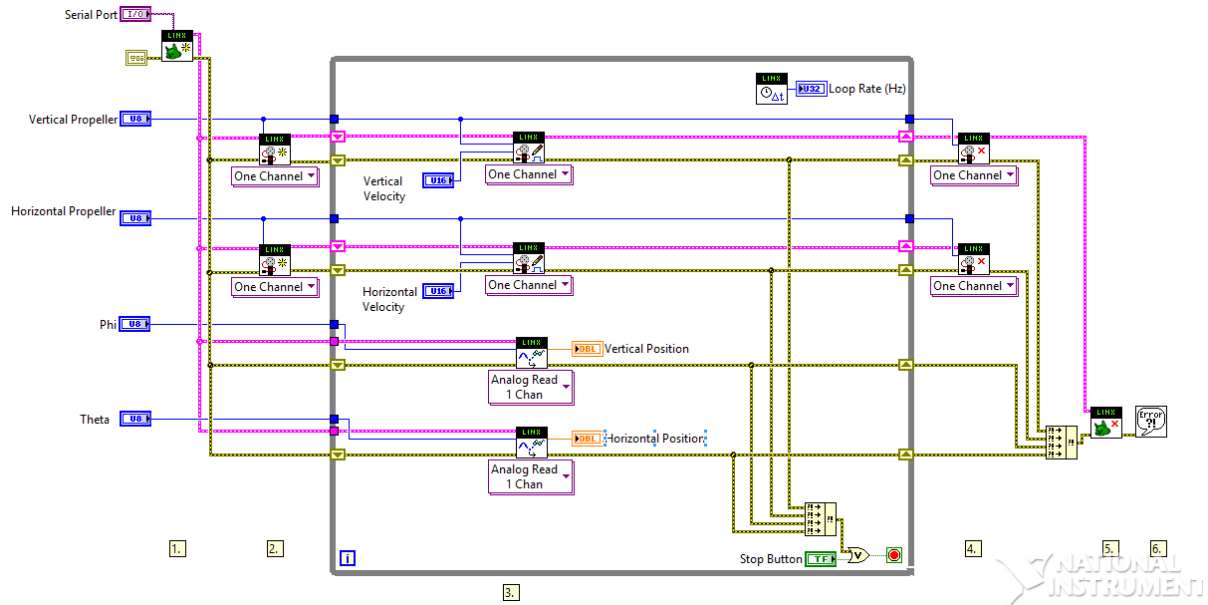


Figura 18: Diagrama de bloques de la interfaz virtual para Arduino

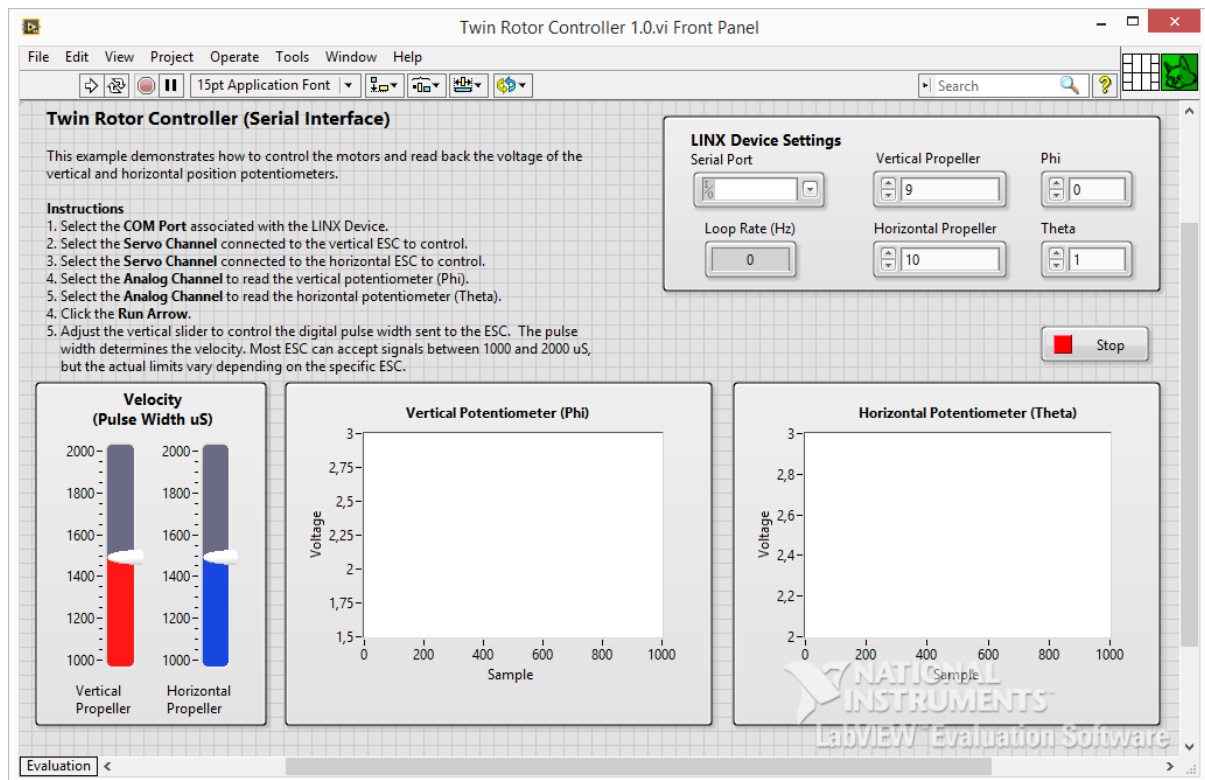


Figura 19: Interfaz gráfica del controlador manual para Arduino

## Resultados

El sistema mecánico no presentó ninguna falla al momento de probarlo con los motores encendidos. La estructura es bastante sólida y los elementos resistentes. El potenciómetro superior es prácticamente un rodamiento ya que la fricción que genera es

despreciable. También se valida el uso de SolidWorks para diseñar piezas debido a la facilidad de observar la pieza en 3D aclarando el panorama de diseño.

Una vez que se controló manualmente la planta se observó que el sistema de inclinación es bastante liviano por lo que se necesitó de poca velocidad en el motor de elevación para inclinar la viga. Sin embargo, se encontró que una vez que la viga sobrepasa el punto de equilibrio (cuando la viga está totalmente horizontal), el peso del sistema de rotación (el lado opuesto) ejerce una fuerza que aumenta la elevación del sistema alterando la dinámica del sistema.

Así mismo, se encontró que la fricción del potenciómetro que mide la rotación de la viga es mayor de la deseada. Como resultado, el torque generado a pequeña velocidad no es suficiente para sobrepasar la fricción generada por el potenciómetro. Para contrarrestar ambos efectos se añadió un peso de 350 [g] a la hélice de elevación para lograr dos cosas: la primera es lograr que el motor de elevación regrese a un punto bajo si es que se reduce o se detiene el funcionamiento del motor; la segunda es exigir una mayor velocidad para elevar la viga, debido al mayor peso, y de esta forma aumentar la velocidad angular, que se traduce en un aumento de torque, para poder sobrepasar la fricción generada por el potenciómetro inferior.

Se puede entonces sacar dos alternativas para la planta. La primera es no realizar las estructuras en aluminio y usar otro material que no sea fibra de carbono para el tubo del motor de inclinación, de tal manera que el peso que este motor tenga que levantar sea de 350 [g] y genere suficiente torque para sobrepasar la fricción generada por el potenciómetro inferior. La segunda es cambiar el potenciómetro inferior por otro tipo de sensor que pueda usarse para medir la rotación de un eje. En base a la Tabla 1 se puede decir que la mejor alternativa es la segunda ya que a mayor velocidad, menor es la eficiencia y mayor es el consumo del motor.

Se verificó que la fuente de computadora es una fuente DC confiable para la planta, no se sobrecalentó y ha provisto de manera constante la corriente necesaria exigida por los motores. Igualmente, la fuente provee de energía, sin ninguna dificultad, al circuito de acondicionamiento.

Durante las pruebas se encontró que si las señales de control que van a los ESCs no se conectan con un conector header macho, cualquier falla de contacto provoca que el motor se comporte de manera inesperada y esto resulta peligroso si no se tiene precaución. Por ello se recomienda siempre verificar que los terminales de los ESCs estén conectados firmemente, y con el conector adecuado, antes de conectar la fuente de alimentación. De igual manera, se debe evitar entrar en el área de funcionamiento de la planta mientras ésta esté conectada a una toma de corriente, sin importar si el controlador indica que el motor está detenido. Estos detalles se pueden mejorar con protecciones que cumplan con la seguridad ocupacional.

A pesar de que se está usando potenciómetros de precisión, el rango que puede ser medido con los mismos es reducido y por el precio de estos potenciómetros se puede optar por otro tipo de sensores para medir la rotación de los ejes. No obstante, hay que destacar que el cableado y la medición de los potenciómetros son bastante simples y además estos potenciómetros son elementos muy sólidos que difícilmente van a fallar bajo uso normal.

Finalmente, se logró crear fácilmente una interfaz gráfica para el controlador manual con LabVIEW. Además se logró proporcionar controladores que trabajen con 2 tarjetas, a saber, la tarjeta myRIO y la tarjeta Arduino UNO. A pesar de que ambos controladores se crearon en LabVIEW, la tarjeta myRIO requiere de un costoso módulo adicional para su uso mientras que la tarjeta Arduino UNO requiere de un paquete que se puede descargar gratuitamente. Por ello se considera que el controlador basado en Arduino es más amigable con el hogar del estudiante. No obstante, la tarjeta myRIO es un hardware de muchas mejores prestaciones por lo que se pueden obtener controladores más confiables sobre esta tarjeta.

## CONCLUSIONES

1. Se logró construir un sistema mecánico firme y sólido con el diseño creado en SolidWorks obteniendo muy buenos resultados. El mayor problema que se encontró fue la dificultad para que el sistema rote debido a la elevada fricción del potenciómetro inferior. Esta dificultad puede resolverse si se usa otro tipo de sensor para medir la rotación, usando un sensor que genere menos o no tenga fricción con el eje de rotación. A pesar de los buenos resultados, el diseño mecánico no fue rigurosamente calculado por lo que un estudio de las piezas podría proporcionar una mejora sobre la planta actual.
2. El uso de un potenciómetro para medir la rotación del sistema no es la mejor alternativa y la principal mejora que se le puede hacer a esta planta es reemplazar el potenciómetro por otro tipo de sensor. Sin embargo, el potenciómetro superior es prácticamente un rodamiento, por lo que se puede considerar la idea de mantener este sensor para medir la inclinación de la planta. Aun así, el rango que se usa de este potenciómetro podría no justificar su precio. También es posible mejorar la respuesta de los potenciómetros si se crea un circuito de adaptación en el que se estudie la variación de la resistencia cada potenciómetro y entregar un rango mucho más grande que provea de mayor información para el control de la planta.
3. El cableado de la planta también cumple con el funcionamiento adecuado del sistema dinámico afectando muy poco en condiciones normales. La fuente de alimentación es bastante confiable para la planta a pesar de ser una fuente de computador. Esta fuente además logró energizar sin ningún problema al circuito de adaptación por lo que se afirma la buena elección. A pesar de todo, es importante recalcar que es una planta que puede resultar peligrosa si no se tienen las precauciones adecuadas. Una mejora

que también se puede hacer es acoplar protecciones que cumplan con los reglamentos de la seguridad ocupacional.

4. Se realizó en LabVIEW de forma simple las interfaces gráficas para los controladores, pero se encontró diferencias a la hora de implementarlas en hardware. La tarjeta myRIO es una tarjeta orientada al laboratorio y a la investigación, mientras que la tarjeta Arduino UNO se apega más al trabajo estudiantil en casa.
5. Finalmente, se construyó una planta MIMO que servirá a los estudiantes para que aprendan acerca de los sistemas dinámicos basados en rotores, y puedan aplicar sus conocimientos para generar controladores que puedan usarse en sistemas reales. Este sistema con el hardware provisto puede ser usado para investigación que en el mejor de los casos será difundida al país y al mundo entero.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agarwal, S., Mohan, A., & Kumar, K. (2014). *Design, Construction And Structure Analysis Of Twinrotor UAV*. International Journal of Instrumentation & Control Systems. Jan2014, Vol. 4 Issue 1, p. 33.
- Bayrak, A., Dogan, F., Tatlicioglu, E. and Ozdemirel, B. (2015). *Design of an experimental twin-rotor multi-input multi-output system*. Comput. Appl. Eng. Educ., 23: 578–586. doi: 10.1002/cae.21628
- Boylestad, R. y Nashelsky, L. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. 10ma ed. México D.F.: Pearson.
- Czajkowski, A.; Patan, K. (2013). *Designing nonlinear model of the Two Rotor Aerodynamical system using state space neural networks with delays*. Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). pp. 195-199.
- Doering, E. (2015). *Guía de Elementos Básicos para Iniciar Proyectos con NI myRIO*. Obtenido el 9 de junio de 2015 desde <http://www.ni.com/tutorial/14621/es/>
- Dorf, R. y Svoboda, J. (2011). *Circuitos Eléctricos*. 8va ed. México D.F.: Alfaomega.
- National Instrumets. (2014). *Field Wiring and Noise Considerations for Analog Signals*. Notas Técnicas de National Instruments. Obtenido el 29 de junio de 2015 desde <http://www.ni.com/white-paper/3344/en/>
- Nemati, A. & Kumar, M. (2014). *Modeling and control of a single axis tilting quadcopter*. American Control Conference (ACC). pp. 3077-3082.
- SolidWorks. (2006). *Conceptos básicos de SolidWorks: Piezas y ensamblajes*. Concord: SolidWorks Corporation.
- SolidWorks Education. (2010). *Guía del instructor para la enseñanza del software SolidWorks*. Corcord: SolidWorks Corporation.
- Travis, J. & Kring, J. (2006). *LabVIEW for everyone: graphical programming made easy and fun*. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Yamashita, M., Saeki, M., Wada, N. & Masubuchi, I. (2004). *Gain scheduling controller design for two rotor hovering system*. SICE 2004 Annual Conference , vol.2, pp. 1196-1201 vol. 2.
- Yuanfeng, H., Haifeng, W. & Wang, L. (2014). *Research of torque balance control of dual-rotor motor based on MATLAB*. Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2014 17<sup>th</sup>. pp. 1219-1221.
- Zhihui, C., Huizhen, W. & Yangguang, Y. (2012). *A Doubly Salient Starter/Generator With Two-Section Twisted-Rotor Structure for Potential Future Aerospace Application*. Industrial Electronics. IEEE Transactions. vol.59. no.9. pp. 3588-3595.

## ANEXO A: MEDIDAS DE LAS PIEZAS

### Base

Las medidas en milímetros para el plano lateral se muestran en la Figura 20.

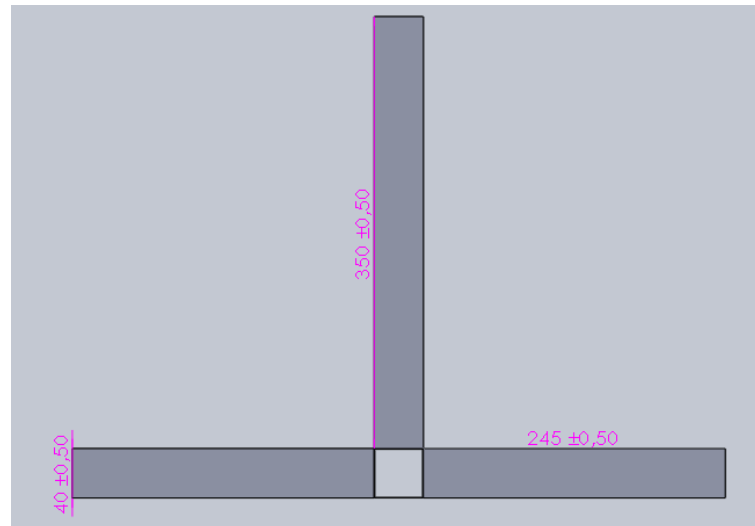


Figura 20: Medidas de la base (mm), plano lateral

Las medidas en milímetros para el plano superior se muestran en la Figura 21.

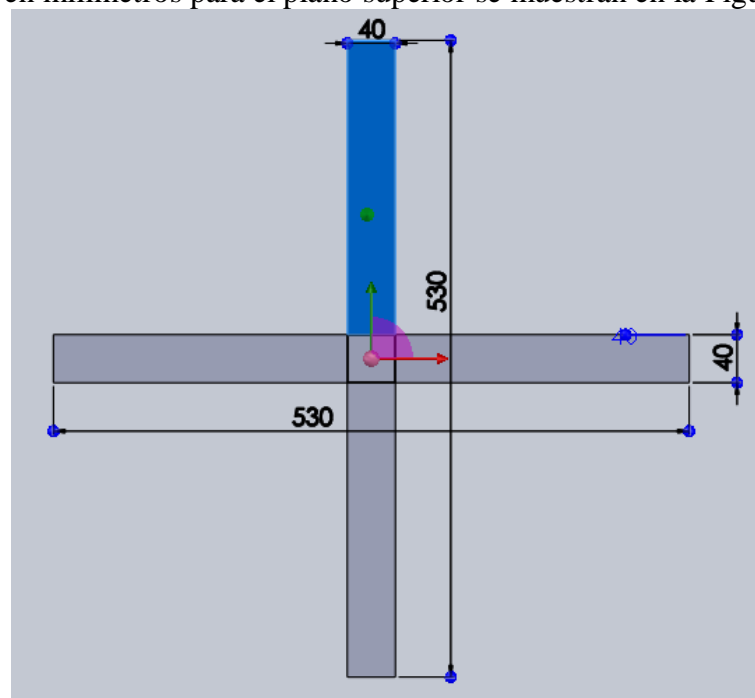


Figura 21: Medidas de la base (mm), plano superior

### Eje de inclinación

Las medidas en milímetros para el plano lateral izquierdo se muestran en la Figura 22.

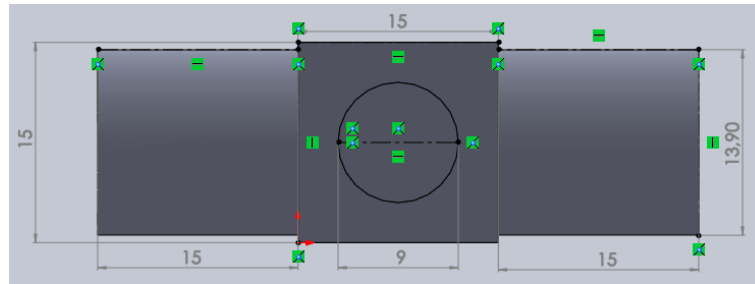


Figura 22: Medidas del eje de inclinación (mm), plano lateral izquierdo

Las medidas en milímetros para el plano superior se muestran en la Figura 23.

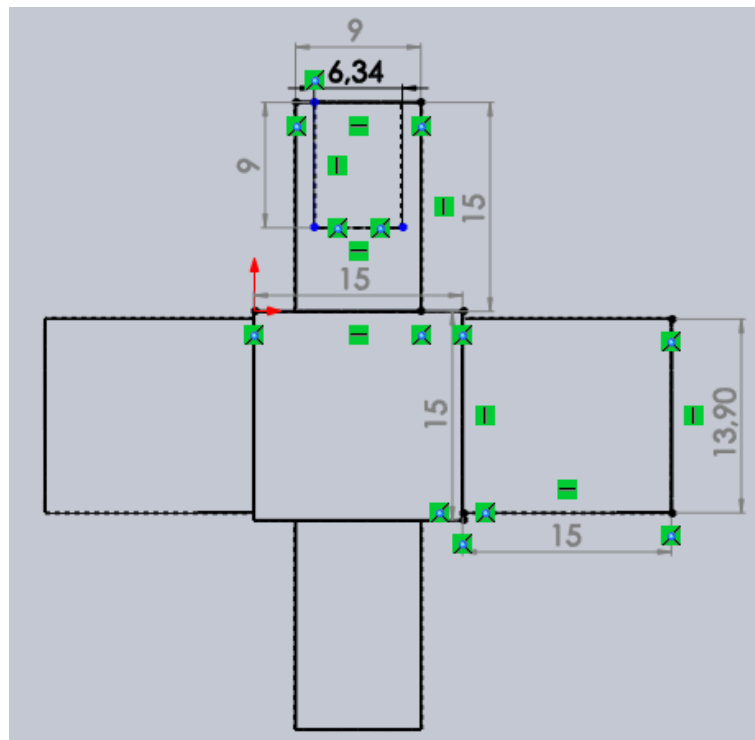


Figura 23: Medidas del eje de inclinación (mm), plano superior

Las medidas en milímetros para el plano lateral derecho se muestran en la Figura 24.

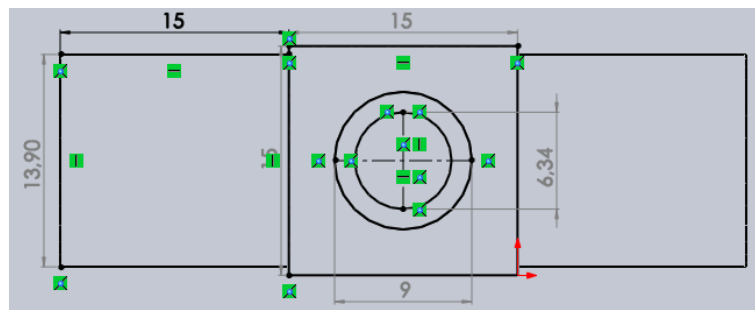


Figura 24: Medidas del eje de inclinación (mm), plano lateral derecho

Las medidas en milímetros para el plano lateral frontal se muestran en la Figura 25.

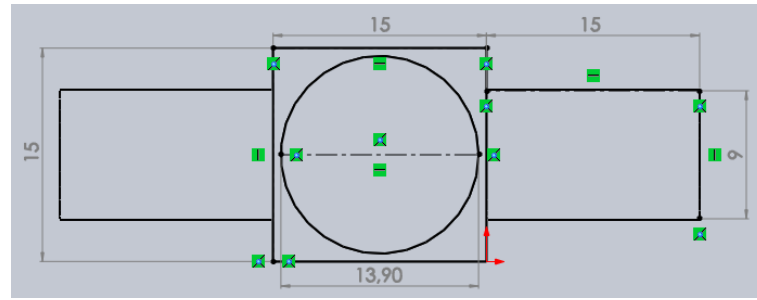


Figura 25: Medidas del eje de inclinación (mm), plano lateral frontal

### Base del eje de rotación

Las medidas en milímetros para el plano lateral se muestran en la Figura 26.

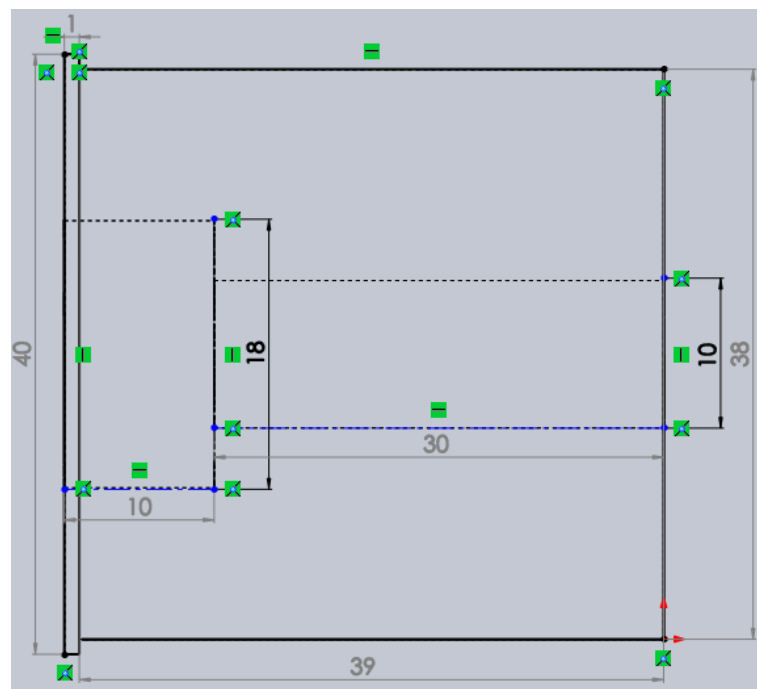


Figura 26: Medidas del soporte del eje de rotación (mm), plano lateral

Las medidas en milímetros para el plano superior se muestran en la Figura 27.

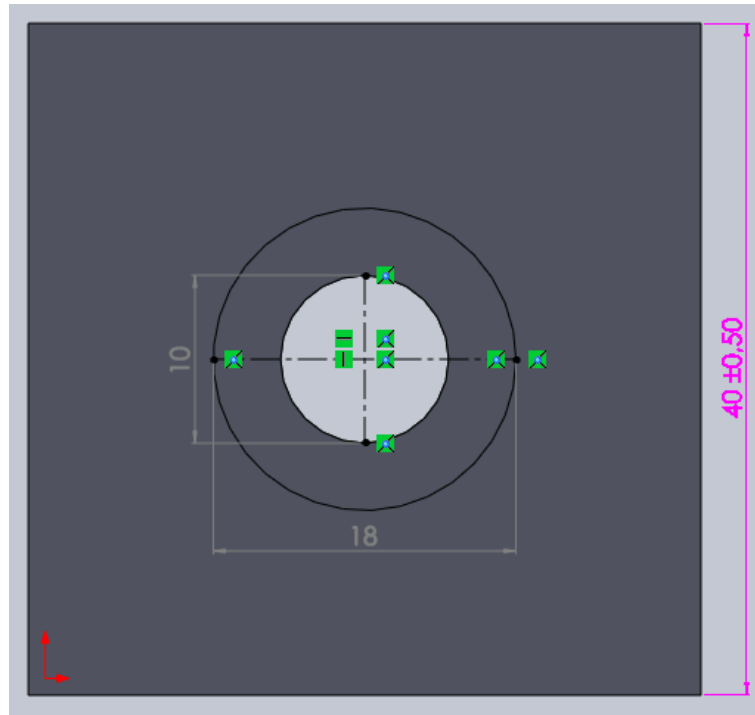


Figura 27: Medidas del soporte del eje de rotación (mm), plano superior

Las medidas en milímetros para el plano superior se muestran en la Figura 28.

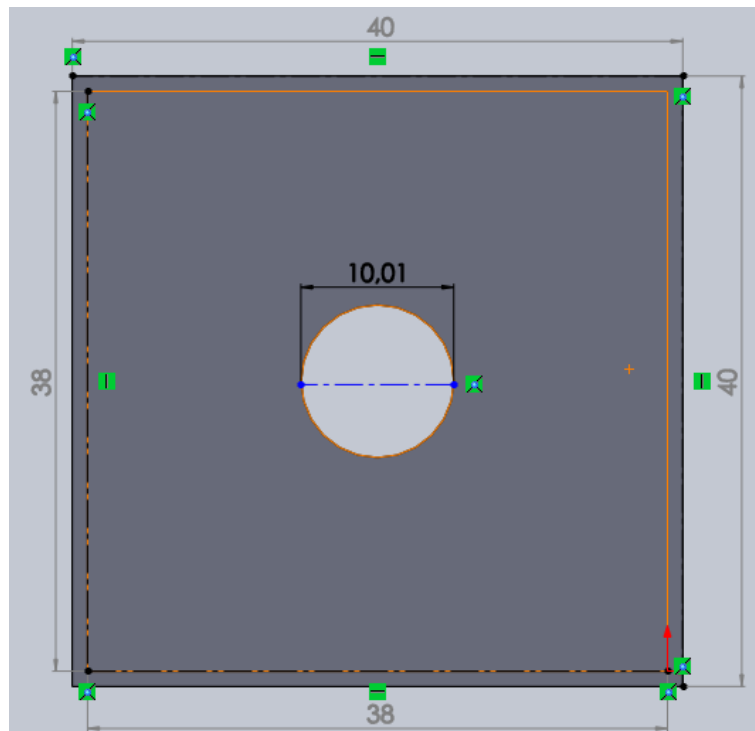


Figura 28: Medidas del soporte del eje de rotación (mm), plano inferior

## Eje de rotación

Las medidas en milímetros para el plano lateral parte superior se muestran en la Figura 29.

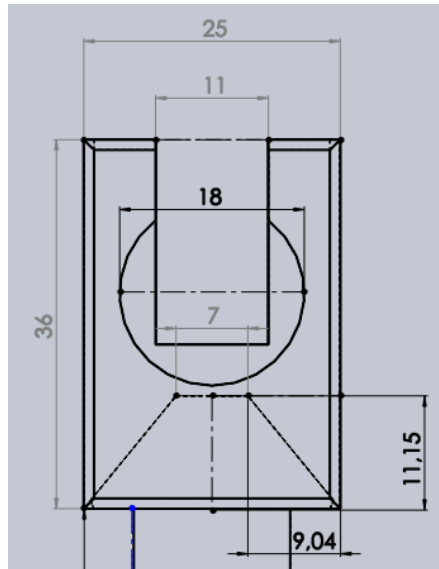


Figura 29: Medidas del eje de rotación (mm), plano lateral parte superior

Las medidas en milímetros para el plano lateral parte inferior se muestran en la Figura 30.

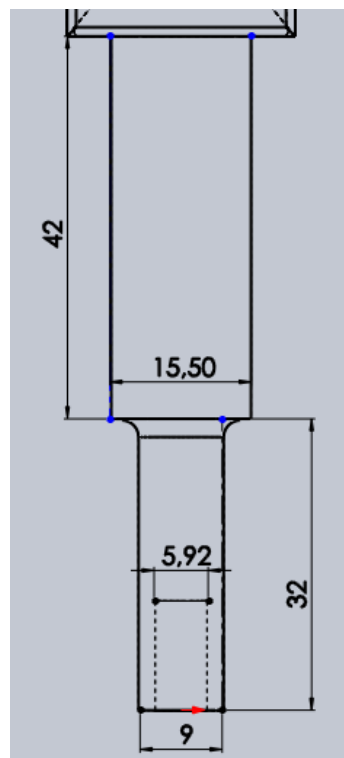
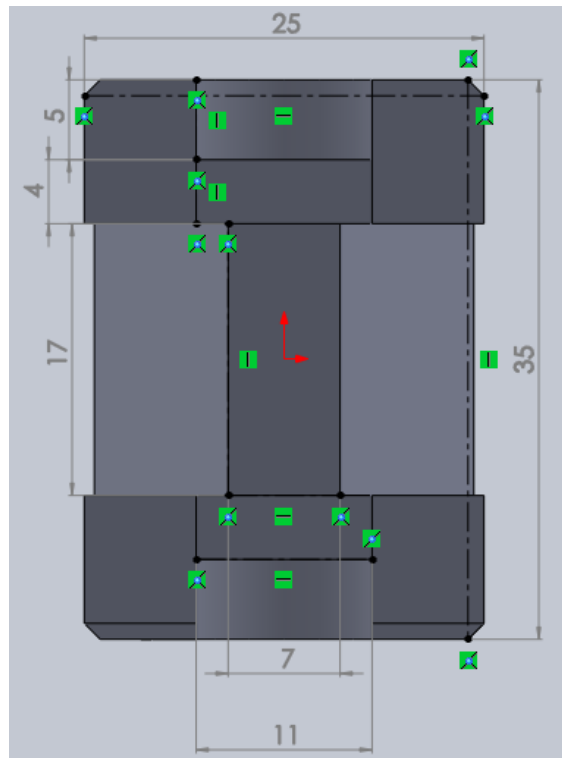


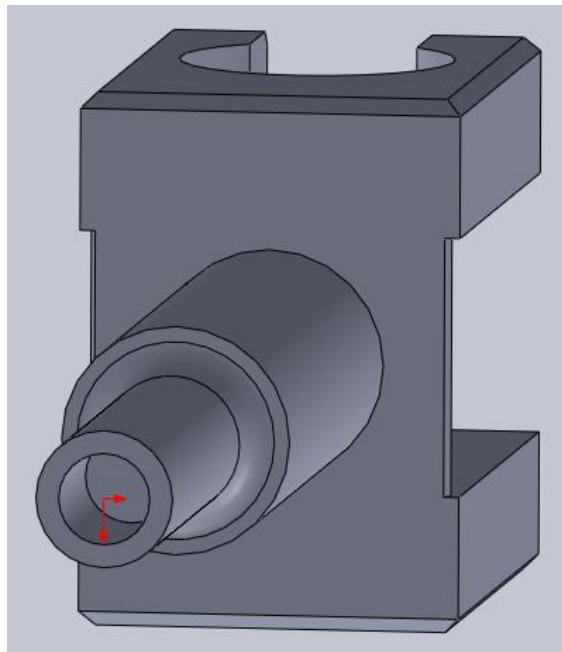
Figura 30: Medidas del eje de rotación (mm), plano lateral parte inferior

Las medidas en milímetros para el plano superior se muestran en la Figura 31.



**Figura 31: Medidas del eje de rotación (mm), plano superior**

La Figura 32 muestra una vista inferior de la pieza en 3D que aclara las medidas en milímetros para el plano inferior mostrado en la Figura 33.



**Figura 32: Eje de rotación en 3D, vista inferior**

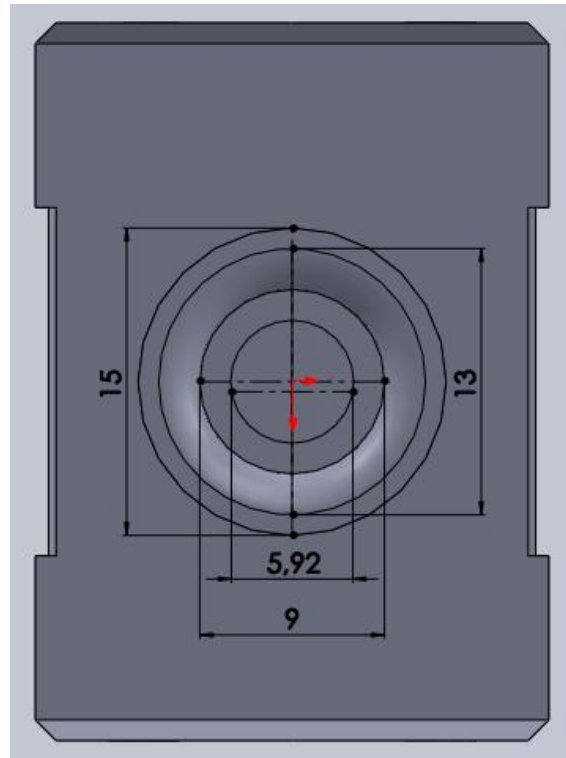


Figura 33: Medidas del eje de rotación (mm), plano inferior

### Acople para el potenciómetro que mide la inclinación

Las medidas en milímetros para el plano frontal se muestran en la Figura 34.

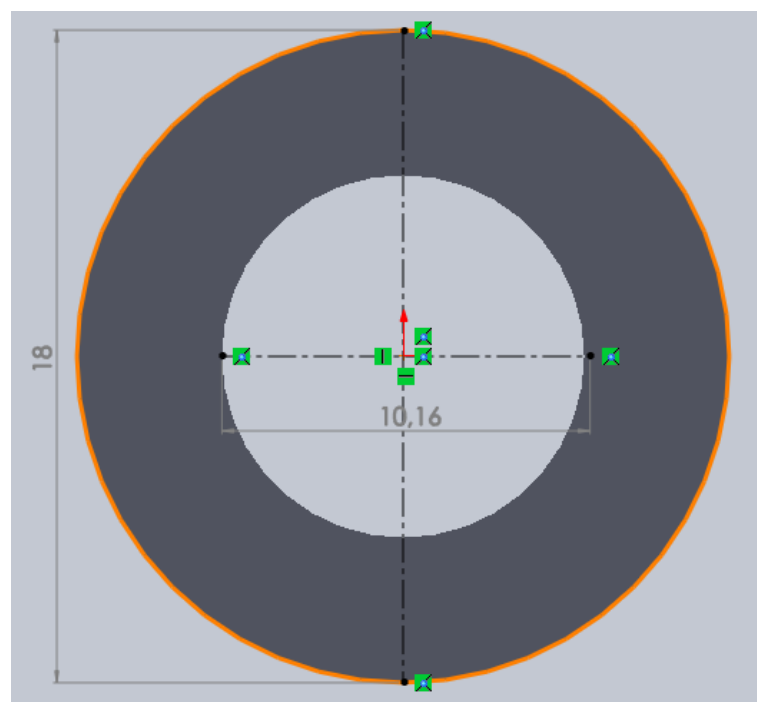


Figura 34: Medidas del acople para el potenciómetro que mide la inclinación (mm), plano frontal

Las medidas en milímetros para el plano frontal se muestran en la Figura 35.



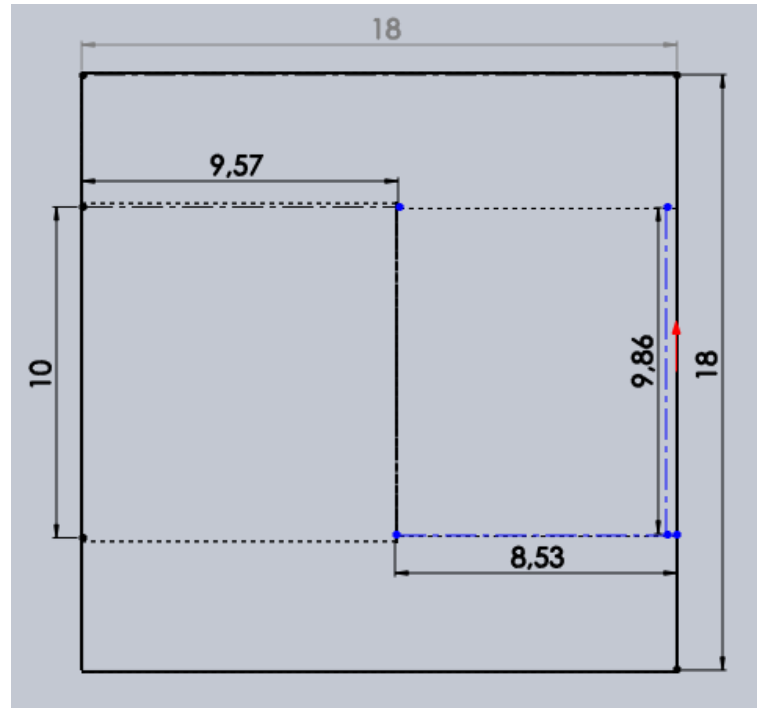


Figura 35: Medidas del acople para el potenciómetro que mide la inclinación (mm), plano lateral

## ANEXO B: PCB IMPRIMIBLE

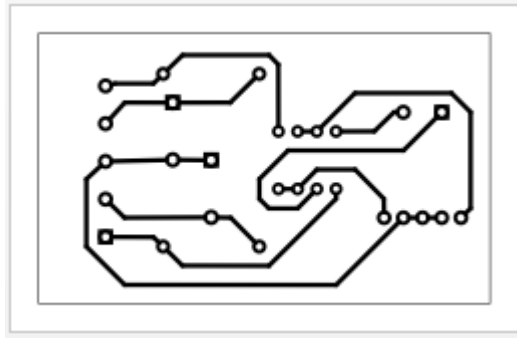


Figura 36: PCB imprimible