

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

"Diseño y construcción de un instrumento para medir la fuerza de empuje y el torque en motores de drones"

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Juan Fernando Palma Velasquez

Elvis Steven Rebolledo Rivera

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

## **DEDICATORIA**

Dedicada a nuestros padres.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis padres Hugo y Jessica que me han dado todo su apoyo y soporte durante este trayecto. A mi hermana Daniela y el resto de mi familia. A todos mis amigos han estado conmigo y han brindado su apoyo en estos años. A mis profesores que he tenido a lo largo de todos mis estudios.

### **Juan Fernando Palma Velasquez**

A Mayra que es el pilar de mi vida, sin ella nada de esto fuera posible. A Kimberly y a Pamela que son hermanas incondicionales. A Elvis que lo llevo presente a pesar de nuestras diferencias. A la ESPOL, por haberme dado una segunda oportunidad. A los “peores” que fueron un gran apoyo toda esta etapa de mi vida. A Sophia, que nunca dejo de creer en mis capacidades en esta segunda etapa universitaria. A “los 2013” que son un gran grupo de compañeros y a todas las personas que de alguna manera me brindaron apoyo en esta dura pero hermosa etapa.

### **Elvis Steven Rebolledo Rivera**

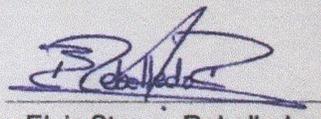
Al Ing. Livingston Castro e Ing. Francis Loayza por sus guías y colaboraciones durante el proyecto. Al Ing. Geancarlos Zamora por su tiempo y apoyo en la realización del proyecto.

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Juan Fernando Palma Velasquez y Elvis Steven Rebolledo Rivera* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

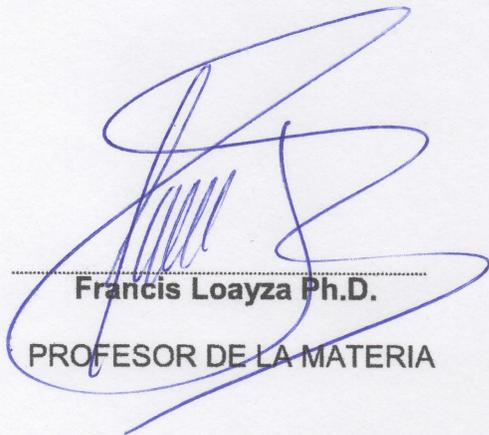


Juan Fernando Palma  
Velasquez

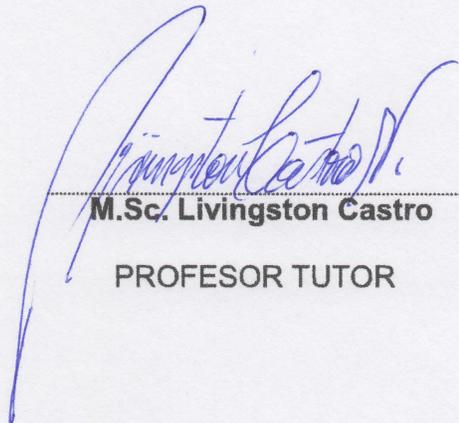


Elvis Steven Rebolledo  
Rivera

## EVALUADORES



Francis Loayza Ph.D.  
PROFESOR DE LA MATERIA



M.Sc. Livingston Castro  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

El mercado de drones ha crecido exponencialmente en los últimos años abriéndose cada día a nuevas industrias como lo son la agricultura, transporte, seguridad hasta marketing entre otros, este desarrollo ha llevado al interés del diseño de nuevos tipos de drones para distintas necesidades. Para el diseño de estos drones se necesita conocer el comportamiento de todos sus componentes entre sus motores. Aunque cada fabricante de motores para drones de su información técnica esta muchas veces no es suficiente el diseñador, por eso en este proyecto se va a diseñar y construir un instrumento que permita medir la fuerza de empuje y el torque que generan los motores de drones con su respectiva hélice para poder realizar su correcta caracterización.

El diseño del instrumento comenzó con la selección del diseño de forma del transductor que mejor se adapte a nuestro requerimiento, luego se realizó el dimensionamiento de las celdas de cargas con cálculos de esfuerzos y simulaciones en ANSYS en donde se determinó el posicionamiento de las galgas y su mejor ubicación con sus respectivas conexiones eléctricas.

Finalmente se consiguió la construcción del prototipo. Se realizó la calibración de las celdas de carga a diferentes configuraciones de puente de Wheatstone para comparar la sensibilidad del instrumento. Para la validación de los datos se construyó una curva de Empuje-RPM y se la compara con otra obtenida de un instrumento comercial en donde se obtuvo menos del 1% del error relativo entre las curvas en las velocidades críticas de operación.

**Palabras claves:** Celdas de carga, galgas extensiométricas, empuje, torque, drones

## **ABSTRACT**

*The drone market has grown exponentially in the last years, opening to new industries like agriculture, transport, security and even marketing, this new development has led to new drone design for different necessities. For the design of this drones we need to know the behavior of each component, among them its engines. Each manufacturer of drone engine provides the technical information about its product but sometimes that is not enough for the designer, so in this project we will design and build an instrument that can measure the thrust and torque generated by the engine with its propeller*

*The design of the instrument began with the selection of its shape design of the transducer that best suit our requirements, the sizing of the load cell was obtained with the stress calculations and simulation in ANSYS where the position of the gauge was determined. We also determine the best configure of the gauge with it electrical connections.*

*The construction of the prototype was achieved. Calibration of the load cells to different Wheatstone bridge configurations was performed to compare the sensitivity of the instrument. For the validation of the data, a Thrust-RPM curve was constructed and compared with another obtained from a commercial instrument where we obtained less than 1% of the relative error between the curves in the critical operating speeds.*

*Keywords: Load cells, strain gauges, thrust, torque, drones*

# ÍNDICE GENERAL

|  |      |
|--|------|
| RESUMEN .....  | I    |
| <i>ABSTRACT</i> .....  | II   |
| ÍNDICE GENERAL .....   | III  |
| ABREVIATURAS .....   | VI   |
| SIMBOLOGÍA.....  | VII  |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                      | X    |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                                       | XII  |
| ÍNDICE DE PLANOS.....  | XIII |
| CAPÍTULO 1 .....   | 1    |
| 1. Introducción .....  | 1    |
| 1.1 Descripción del problema .....                           | 1    |
| 1.2 Justificación del proyecto .....                         | 2    |
| 1.3 Objetivos .....  | 3    |
| 1.3.1 Objetivo General .....                                 | 3    |
| 1.3.2 Objetivos Específicos.....                             | 3    |
| 1.4 Marco teórico .....                                      | 3    |
| 1.4.1 Celdas de carga.....                                   | 3    |
| 1.4.2 Galgas extensiométricas.....                           | 4    |
| 1.4.3 Elementos de un sistema de galgas extensométricas..... | 4    |
| 1.4.4 Puente de Wheatstone .....                             | 5    |
| CAPÍTULO 2 .....   | 6    |
| 2. METODOLOGÍA .....   | 6    |
| 2.1 Requerimientos de diseño.....                            | 6    |

|                  |  |    |
|------------------|--|----|
| 2.2              | Selección de las formas de medición .....            | 7  |
| 2.3              | Diseño mecánico del instrumento.....                 | 7  |
| 2.3.1            | Criterios de diseño.....                             | 7  |
| 2.3.2            | Ponderación de criterios .....                       | 8  |
| 2.3.3            | Alternativas de solución .....                       | 9  |
| 2.3.4            | Selección de la alternativa .....                    | 12 |
| 2.3.5            | Selección del material.....                          | 12 |
| 2.3.6            | Diseño de forma del instrumento .....                | 13 |
| 2.3.7            | Diseño detallado del instrumento.....                | 15 |
| 2.3.8            | Simulación del instrumento.....                      | 23 |
| 2.3.9            | Posicionamiento de las galgas extensiométricas ..... | 24 |
| 2.3.10           | Mediciones de fuerza y torque.....                   | 27 |
| 2.4              | Diseño electrónico del instrumento.....              | 28 |
| 2.4.1            | Configuración eléctrica de las celdas de carga ..... | 28 |
| 2.5              | Calibración .....                                    | 30 |
| 2.6              | Sistema de adquisición de datos .....                | 31 |
| 2.7              | Prototipo.....                                       | 32 |
| 2.8              | Caracterización del motor.....                       | 33 |
| 2.8.1            | Curva de la constante de empuje .....                | 33 |
| 2.8.2            | Curva de la constante de torque .....                | 33 |
| CAPÍTULO 3 ..... |  | 34 |
| 3.               | RESULTADOS.....                                      | 34 |
| 3.1              | Prototipo final .....                                | 34 |
| 3.2              | Diseño mecánico del instrumento.....                 | 36 |
| 3.2.1            | Determinación de concentradores de esfuerzo.....     | 36 |

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| 3.2.2           | Diseño detallado de las celdas de carga..... | 38 |
| 3.2.3           | Simulación del instrumento.....              | 39 |
| 3.3             | Calibración.....                             | 44 |
| 3.4             | Mediciones.....                              | 48 |
| 3.5             | Análisis de costos.....                      | 52 |
| CAPÍTULO 4..... |  | 53 |
| 4.              | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....          | 53 |
| 4.1             | Conclusiones.....                            | 53 |
| 4.2             | Recomendaciones.....                         | 54 |
| BIBLIOGRAFÍA    |  |    |
| ANEXOS          |  |    |

## ABREVIATURAS

|                |  |
|----------------|--|
| UAV            | Unmanned Aerial Vehicle                                    |
| ABS            | Acrilonitrilo Butadieno Estireno                           |
| ASTM           | American Society for Testing and Materials                 |
| LED            | Light-Emitting Diode                                       |
| NI             | National Instrument  |
| FIMCP          | Faculta de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción |
| kg             | Kilogramo  |
| N              | Newton   |
| m              | Metro  |
| Rpm            | Revoluciones por minuto                                    |
| A              | Amperio  |
| V              | Voltaje  |
| GPa            | Giga pascales  |
| MPa            | Mega pascales  |
| m <sup>3</sup> | Metros cúbicos   |
| m <sup>2</sup> | Metros cuadrados   |
| mV             | Milivoltio   |

## SIMBOLOGÍA

|                |   |
|----------------|---|
| $\sigma_{nom}$ | Esfuerzo nominal de la celda de carga   |
| $\sigma$       | Esfuerzo de la celda de carga   |
| $\sigma_{zT}$  | Esfuerzo normal nominal en la dirección Z   |
| $P_T$          | Fuerza axial interna en la sección crítica de la celda de carga de torque                         |
| $A_T$          | Área transversal de la sección crítica de la celda de carga de torque                             |
| $M_{xT}$       | Momento flector en la dirección X de la celda de carga de torque                                  |
| $c_T$          | Distancia entre la superficie y el eje neutro de la sección de la celda de carga de torque        |
| $I_{xxT}$      | Momento de inercia con respecto al eje X de la sección crítica de la celda de carga de torque     |
| $\tau_{zyT}$   | Esfuerzo cortante en el plano XY en la dirección Y de la celda de carga de torque                 |
| $V_{yT}$       | Fuerza cortante en la dirección Y de la sección crítica de la celda de carga de torque            |
| $Q_{xxT}$      | Primer momento de área con respecto al eje X de la sección crítica de la celda de carga de torque |
| $t_T$          | Espesor de la celda de carga de torque en el punto crítico paralelo al eje X                      |
| $\sigma_{yF}$  | Esfuerzo normal nominal en la dirección Y   |
| $M_{xF}$       | Momento flector en la dirección X de la celda de carga de fuerza                                  |
| $M_{zF}$       | Momento flector en la dirección Z de la celda de carga de fuerza                                  |
| $c_F$          | Distancia entre el punto crítico y el eje Z   |
| $b_F$          | Distancia entre el punto crítico y el eje X   |
| $I_{xxF}$      | Momento de inercia con respecto al eje X de la sección crítica de la celda de carga de fuerza     |
| $\tau_{yzF}$   | Esfuerzo cortante en el plano XZ en la dirección Z de la celda de carga de fuerza                 |
| $V_{zT}$       | Fuerza cortante en la dirección Z de la sección crítica de la celda de carga de fuerza            |

|                 |   |
|-----------------|---|
| $Q_{xxF}$       | Primer momento de área con respecto al eje X de la sección crítica de la celda de carga de fuerza |
| $t_{xF}$        | Espesor de la celda de carga de fuerza en el punto crítico paralelo al eje X                      |
| $\tau_{yxF}$    | Esfuerzo cortante en el plano XZ en la dirección X de la celda de carga de fuerza                 |
| $V_{xT}$        | Fuerza cortante en la dirección X de la sección crítica de la celda de carga de fuerza            |
| $Q_{zzF}$       | Primer momento de área con respecto al eje Z de la sección crítica de la celda de carga de fuerza |
| $t_{zF}$        | Espesor de la celda de carga de fuerza en el punto crítico paralelo al eje Z                      |
| $\sigma'_T$     | Esfuerzo de Von Mises en el punto crítico de la celda de carga de torque                          |
| $\sigma'_F$     | Esfuerzo de Von Mises en el punto crítico de la celda de carga de fuerza                          |
| $\sigma''_T$    | Esfuerzo corregido de Von Mises en el punto crítico de la celda de carga de torque                |
| $K_T$           | Valor del concentrador de esfuerzo en la celda de carga para el torque en el punto crítico        |
| $\sigma''_F$    | Esfuerzo corregido de Von Mises en el punto crítico de la celda de carga de fuerza                |
| $K_F$           | Concentrador de esfuerzo en la celda de carga de fuerza en el punto crítico                       |
| $E$             | Módulo de elasticidad del material de la celda de carga   |
| $\epsilon_{zz}$ | Deformación unitaria en la dirección Z  |
| $\epsilon_{yy}$ | Deformación unitaria en la dirección Y  |
| $\eta_T$        | Factor de seguridad de la celda de carga de torque  |
| $S_y$           | Esfuerzo de fluencia para el material de la celda de carga  |
| $\eta_F$        | Factor de seguridad de la celda de carga de fuerza  |
| $M_m$           | Momento que actúa sobre el instrumento  |
| $F_t$           | Fuerza que actúa en la celda de carga   |
| $d$             | Distancia del centro del soporte a la celda de carga  |
| $V_s$           | Voltaje de excitación del circuito  |
| $V_o$           | Voltaje de salida del circuito  |

|        |                            |
|--------|----------------------------|
| $C_T$  | Coeficiente de empuje      |
| $\rho$ | Densidad del aire          |
| $A$    | Área del giro de la hélice |
| $r$    | Radio de la hélice         |
| $E$    | Empuje del motor-hélice    |
| $T$    | Torque del motor-hélice    |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 Alternativa 1 .....   | 9  |
| Figura 2.2 Alternativa 2 .....   | 10 |
| Figura 2.3 Alternativa 3 .....   | 10 |
| Figura 2.4 Sección crítica de la celda de carga de fuerza .....              | 14 |
| Figura 2.5 Sección crítica de la celda de carga de torque .....              | 14 |
| Figura 2.6 Geometría de la celda de carga de torque.....                     | 15 |
| Figura 2.7 Geometría de la celda de carga de fuerza.....                     | 16 |
| Figura 2.8 Modelo de simulación para concentrador de esfuerzo.....           | 17 |
| Figura 2.9 Diagrama de cuerpo libre de la celda de torque .....              | 18 |
| Figura 2.10 Diagrama de cuerpo libre de la celda de torque .....             | 18 |
| Figura 2.11 Modelo para ANSYS .....  | 23 |
| Figura 2.12 Cargas y restricciones para el modelo.....                       | 24 |
| Figura 2.13 Diagrama de cuerpo libre del instrumento .....                   | 24 |
| Figura 2.14 Fuerzas en la celda de empuje.....                               | 25 |
| Figura 2.15 Fuerzas en la celda de torque .....                              | 25 |
| Figura 2.16 Puente completo Tipo I.....                                      | 26 |
| Figura 2.17 Fuerza de las celdas de torque .....                             | 28 |
| Figura 2.18 Puente de Wheatstone de las celdas de carga.....                 | 28 |
| Figura 2.19 Posición de las galgas en la celda de carga .....                | 29 |
| Figura 2.20 Puente de Wheatstone .....                                       | 30 |
| Figura 2.21 Diagrama de bloques de LabView .....                             | 32 |
| Figura 3.1 Modelo 3D del instrumento.....                                    | 34 |
| Figura 3.2 Foto del prototipo .....  | 35 |
| Figura 3.3 Diagrama de fuerza cortante de la celda de carga .....            | 36 |
| Figura 3.4 Diagrama del momento flector de la celda de carga.....            | 36 |
| Figura 3.5 Simulación de deformación de la celda de carga .....              | 37 |
| Figura 3.6 Simulación de esfuerzos de la celda de carga.....                 | 37 |
| Figura 3.7 Deformación unitaria de las celdas de torque en ANSYS .....       | 40 |
| Figura 3.8 Esfuerzos normales en las celdas de carga de torque en ANSYS..... | 40 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.9 Esfuerzo de Von Mises en las celdas de carga de torque en ANSYS.....    | 41 |
| Figura 3.10 Deformación unitaria de la celda de fuerza en ANSYS.....               | 43 |
| Figura 3.11 Esfuerzos normales en las celdas de carga de fuerza en ANSYS.....      | 43 |
| Figura 3.12 Esfuerzos de Von Mises en las celdas de carga de fuerza en ANSYS ..... | 44 |
| Figura 3.13 Curva de calibración de celda de fuerza – Puente completo .....        | 46 |
| Figura 3.14 Curva de calibración de celda de fuerza – Cuarto de puente .....       | 46 |
| Figura 3.15 Curva de calibración de celda de torque – Puente completo .....        | 47 |
| Figura 3.16 Curva de calibración de celda de torque – Medio puente .....           | 47 |
| Figura 3.17 Curva Empuje-RPM del motor-hélice .....                                | 49 |
| Figura 3.18 Comparación de curva de empuje .....                                   | 49 |
| Figura 3.19 Error absoluto entre las dos curvas de empuje.....                     | 50 |
| Figura 3.20 Curva Torque-RPM del motor-hélice .....                                | 51 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2.1 Parámetros y rangos de medición .....                                | 6  |
| Tabla 2.2 Ponderación de criterios .....                                       | 8  |
| Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de las alternativas .....                     | 11 |
| Tabla 2.4 Selección de la mejor alternativa .....                              | 12 |
| Tabla 2.5 Propiedades de los materiales.....                                   | 13 |
| Tabla 2.6 Propiedades geometrías de las celdas de carga .....                  | 14 |
| Tabla 2.7 Tipos de puentes de Wheatstone .....                                 | 26 |
| Tabla 3.1 Concentradores de esfuerzos.....                                     | 38 |
| Tabla 3.2 Resultados del diseño detallado de la celda de carga de torque ..... | 38 |
| Tabla 3.3 Resultados del diseño detallado de la celda de carga de fuerza.....  | 39 |
| Tabla 3.4 Resultados de las simulaciones de la celda de torque 1 .....         | 42 |
| Tabla 3.5 Resultados de las simulaciones de la celda de torque 2.....          | 42 |
| Tabla 3.6 Resultados de las simulaciones de la celda de fuerza.....            | 44 |
| Tabla 3.7 Mediciones del prototipo.....  | 48 |
| Tabla 3.8 Costo del instrumento.....   | 52 |

## ÍNDICE DE PLANOS

|         |                          |
|---------|--------------------------|
| PLANO 1 | Ensamble del instrumento |
| PLANO 2 | Soporte del motor        |
| PLANO 3 | Celda de carga de fuerza |
| PLANO 4 | Celda de carga de torque |
| PLANO 5 | Union en L               |
| PLANO 6 | Platina                  |

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Los drones o UAV son una alternativa de solución a problemas donde por cuestiones geográficas o de tamaño, el ser humano no podía llegar con facilidad.

Entre las aplicaciones de los drones tenemos el mantenimiento, donde se puede mejorar la seguridad de los trabajadores y la eficiencia de las inspecciones, además de tener una respuesta rápida y segura en caso de una emergencia. El inventario de activos, ya que pueden venir equipados con analizadores de imagen o equipos de fotometría. El transporte, que es el sector más grande del mercado de estos dispositivos, ofrece una amplia gama de aplicaciones de transporte y entrega de correspondencia. En la industria agrícola estos pueden realizar tareas como monitoreo del cultivo, fertilizado y fumigación. La seguridad es otro mercado donde los drones están ganando espacio, por la opción que dan la oportunidad de tener un ojo en el cielo tanto para personas naturales como para entes gubernamentales. Aunque las aplicaciones militares son las que más han ayudado al desarrollo de los drones (Silver, Mazur, Wisniewski, & Agnieszka, 2017).

Debido a esta gran versatilidad, la industria de producción de drones ha ido en aumento. Se estima un crecimiento anual del 33.78% para el 2018 en comparación del 2017. Para el 2022 se estima que este mercado va a crecer en \$11.61 billones. Los drones de uso personal son los que aumentan en popularidad porque son fácilmente financiados para el cliente, por esto, la cantidad de diseñadores de drones ha crecido, ya que las piezas para poder construir con dron son de fácil acceso (Maida, 2018).

### 1.1 Descripción del problema

En el diseño y construcción de drones es importante conocer las características de desempeño de estos, por eso es necesario conocer los parámetros mecánicos y eléctricos. El conocimiento de estos parámetros permitirá optimizar

el diseño del dron para distintos fines como por ejemplo vuelos largos ininterrumpidos o poder levantar cargas más pesadas.

Entre los parámetros mecánicos que se deben saber para caracterizar el dron tenemos la fuerza (empuje) y el torque. La fuerza de empuje durante el despegue y aterrizaje representa una importante restricción para obtener un nivel alto de autonomía, el torque generado por el motor eléctrico representa una variable importante para el control y estabilidad del dron.

Los parámetros eléctricos que son el voltaje y corriente permiten conocer la eficiencia de los motores eléctricos permitiendo hacer pruebas para conocer su punto de trabajo óptimo para la necesidad de cada diseñador. La velocidad de rotación del motor es el último parámetro necesario para poder encontrar la eficiencia de estos motores influyen este en la velocidad del dron.

Comercialmente, la información que existe sobre este tipo de motores, dependiendo de su procedencia, puede ser escasa o nula, lo cual dificulta en gran medida el trabajo de los diseñadores, ya que, al no contar con la caracterización adecuada de los motores, no se podrá realizar el control de este o un diseño apropiada para nuestros intereses.

## **1.2 Justificación del proyecto**

Cuando se diseñan drones los parámetros mecánicos y eléctricos del sistema muchas veces son desconocidos o parcialmente conocidos por lo que es necesario realizar un proceso de identificación del sistema. Conocer estos parámetros permite mejorar la eficiencia del dron en la función que va a realizar. En el mercado ya existen instrumentos que pueden realizar estas mediciones, pero el costo de ellos es elevado, por eso muchas veces es factible diseñar uno por cuenta propia. En internet se pueden encontrar guías y diseños de cómo construir instrumentos que midan los parámetros de los motores para dron, pero estos son bastantes limitadas ya que no miden todos los parámetros mencionado al mismo tiempo o tiene limitaciones mecánicas al usar motores más potentes, también no siempre explican muy detalladamente como se realizaron. Este

instrumento permite a los diseñadores de drones hacer las mediciones de manera sencilla para que puede optimizar estos a sus necesidades. Por esto el objetivo del proyecto consiste en el diseño y construcción de un instrumento que pueda medir estos parámetros de manera sencilla.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar y construir un prototipo de un instrumento para evaluar los parámetros mecánicos de un motor para drones.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Diseñar un transductor para usar como la base de un sistema de medición para estimar los efectos del empuje y torque.
- Seleccionar los sensores y la forma en la que se implementaran para cuantificar los efectos de los parámetros generados por el motor para drones.
- Diseñar el sistema de adquisición de datos para registrar las variaciones de los parámetros de interés.
- Construir el prototipo del instrumento.
- Calibración del prototipo del instrumento.
- Validar el funcionamiento.

### **1.4 Marco teórico**

#### **1.4.1 Celdas de carga**

La celda de carga es un transductor que convierte la fuerza en una señal de salida que se puede medir. En la celda de carga la fuerza que se quiere medir es aplicada a un material elástico, este material se deforma dependiendo de la magnitud de la fuerza aplicada. La forma de las celdas de cargas son

bastantes varias que dependen completamente del tipo de fuerza, como fuerza de compresión o tensión.

Para medir las deformaciones las celdas de carga se le añaden galgas extensiométricas, le posición y el tipo de estas galgas depende de la fuerza a medir (Morris, 2018).

#### **1.4.2 Galgas extensiométricas**

Estos son dispositivos que cambian su resistencia eléctrica cuando sufren algún tipo de deformación. Son capaces de medir deformaciones bastantes pequeñas en los rangos de 0-50  $\mu\text{m}$ . Las galgas tradicionales consisten en una resistencia de metal formada en un patrón de serpentín y montando sobre un material flexible. Al ser aplicada una deformación en la galga, el área transversal del metal cambia afectando la resistencia eléctrica del metal.

Gracias a los efectos elásticos y de cambio de resistencia eléctrica una de sus aplicaciones es la medición de deformaciones, el cálculo de esfuerzos y por ende de fuerzas y torques. Dependiendo de la posición y la orientación de las galgas extensiométricas, se podrá medir efectos de torsión, flexión, esfuerzos axiales y tener compensaciones por efectos térmicos. Las galgas se conectan en un puente de Wheatstone, dependiendo de la posición en este puente se podrán compensar los efectos térmicos y contrarrestar los efectos que puedan interferir con la medición de la deformación deseada, producto de una carga externa que este aplicada en el mismo momento (Hoffmann).

#### **1.4.3 Elementos de un sistema de galgas extensométricas**

Para realizar las mediciones con galgas extensométricas este sistema debe estar compuesto de las siguientes partes:

- Elemento sensor
- Acondicionador de señal
- Amplificador
- Elemento registrador

- Elementos procesadores

El elemento sensor incluye las propias galgas extensométricas, las galgas deben ser conectadas a un circuito eléctrico para captar la señal eléctrica producida por ellas, para esto se usa el puente de Wheatstone que es considerado como el elemento transmisor intermedio. La variación de resistencia eléctrica producida por las galgas es muy pequeña hacían que el voltaje que producido también sea muy pequeño por lo que se necesita un amplificador operación para que la señal de salida sea detectada correctamente.

El elemento registrador y procesador incluye el sistema de adquisición de datos que puede leer las señales producidas por el circuito y procesarlas para que puedan ser leídas. En el caso que no sean iguales se puede usar un osciloscopio para visualizar la señal y usar luego usar un convertidor analógico-digital para poder procesar la señal a una computadora (Hoffmann).

#### **1.4.4 Puente de Wheatstone**

Para medir la resistencia eléctrica de las galgas este debe ser conectado a un circuito capaz de medir esos cambios pequeños de resistencia. Para lograr esto se usa el llamado puente de Wheatstone que está formado por 4 resistencia unidas diagonalmente.

Al ser las cuatro resistencias iguales el puente se encuentra balanceado haciendo que la corriente sea cero, cuando se produce las pequeñas variaciones causadas por la deformación de la galga se produce una corriente que puede ser medida (Hoffmann)

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

La metodología que se siguió para este proyecto de construcción fue la siguiente: se definieron los requerimientos de diseño dados por el cliente, luego se seleccionaron las distintas formas en que se midieron los diferentes parámetros. Una vez que se tomó la decisión se procedió a realizar los diseños de forma del instrumento con la selección de materiales y sensores específicos. Una vez que se realizó toda la selección necesaria, se dio inicio a la construcción del equipo con su respectiva calibración y validación.

### 2.1 Requerimientos de diseño

El equipo se usará para medir la fuerza y el torque generado por los motores de drones de una manera sencilla. El instrumento podrá usarse para distintos tipos de motores, mediante unión universal.

Los rangos de medición de los parámetros serán:

**Tabla 2.1 Parámetros y rangos de medición**

| Parámetros       | Rango        |
|------------------|--------------|
| Fuerza de empuje | 0 – 25 [kg]  |
| Momento          | 0 – 10 [N*m] |

Además de estos requerimientos de trabajo, se tienen los requerimientos especificados por el inversionista del proyecto, que estos son:

- Que el diseño sea económico.
- Debe ser compacto para ser usado en diversos lugares.
- Debe ser de fácil uso.

## 2.2 Selección de las formas de medición

Para la medición de la fuerza y torque se usó una celda de carga con galgas extensiométricas. El uso de galgas extensiométricas permitió una medición de fuerza y torque basada en la deformación de la celda, el problema radica en el diseño de la forma de la celda de carga ya que se debió ver cómo actúan las fuerza y la ubicación en donde se pusieron las galgas para tener una medición precisa.

Para el sistema de adquisición de datos se decidió un módulo de National Instrument, ya que este permite una sencilla conexión al instrumento y una programación mediante diagrama de bloques para la toma de datos.

## 2.3 Diseño mecánico del instrumento

### 2.3.1 Criterios de diseño

En base a los requerimientos de diseño, se han planteado los siguientes criterios de diseño:

**Sensibilidad según simulación:** La sensibilidad del instrumento dependía del tipo de efecto que tenía las cargas sobre la celda de carga. Lo ideal sería que todas las celdas de carga estén a flexión, ya que con puente complete la sensibilidad es la máxima que se puede obtener.

**Facilidad de manufactura:** La facilidad de hacer las piezas, además de la repetibilidad de las más fue un factor importante para nosotros, ya que los costos de manufactura aumentarían si todas las piezas fueran diferentes.

**Mantenimiento:** Se busco realizar piezas donde su reemplazo o arreglo no involucre la compra de un nuevo instrumento.

**Tamaño:** Como el instrumento es para prueba de motores de drones, la portabilidad de este es importante, ya que queríamos que el cliente pueda hacer pruebas en su sitio de trabajo.

### 2.3.2 Ponderación de criterios

Para ponderar correctamente cada criterio de diseño, se realizó la matriz de ponderación, en esta se estableció la importancia de cada criterio en el diseño del instrumento. Cada criterio es comparado contra los demás para obtener finalmente el peso de cada uno.

**Tabla 2.2 Ponderación de criterios**

| Matriz de ponderación         | Sensibilidad según simulación | Facilidad de manufactura | Mantenimiento | Tamaño | Total | Ponderación | Ponderación (%) |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------|--------|-------|-------------|-----------------|
| Sensibilidad según simulación | 1.00                          | 1.17                     | 1.75          | 2.33   | 6.25  | <b>0.38</b> | <b>38%</b>      |
| Facilidad de manufactura      | 0.86                          | 1.00                     | 1.50          | 0.45   | 3.81  | <b>0.23</b> | <b>23%</b>      |
| Mantenimiento                 | 0.57                          | 0.67                     | 1.00          | 1.33   | 3.57  | <b>0.22</b> | <b>22%</b>      |
| Tamaño                        | 0.43                          | 0.50                     | 0.75          | 1.00   | 2.68  | <b>0.16</b> | <b>16%</b>      |
| <b>SUMA TOTAL</b>             |                               |                          |               |        | 16.31 | <b>1.00</b> | <b>100%</b>     |

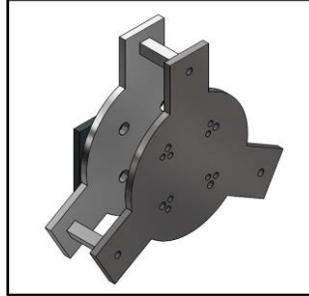
El peso del criterio de Sensibilidad según simulación fue del 38%, siendo este el criterio más importante para el diseño del instrumento, ya que nos interesó encontrar un modelo el cual podemos medir fuerzas muy pequeñas debido a las bajas RPM que pueda tener el motor en el momento de la caracterización. El criterio de facilidad de manufactura tuvo un resultado del 23%, siendo el segundo más importante, esto nos ayudó a plantearnos la sencillez y repetibilidad de las piezas.

El criterio de mantenimiento tuvo un resultado del 22%, con este nos guiamos para que el instrumento en situaciones de daño de alguna pieza sea fácil de reemplazar o de tener una alternativa de solución según el cliente.

El criterio de tamaño represento un 16% del peso total, lo que significa que el instrumento lo diseñaremos con un tamaño dependiendo del tamaño del motor más grande que podamos montar.

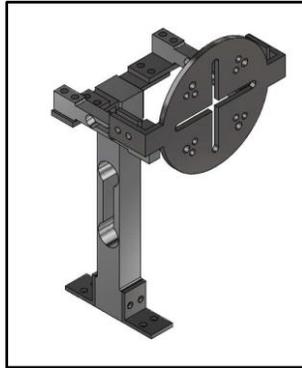
### 2.3.3 Alternativas de solución

Se establecieron 3 alternativas de solución, dependiendo del efecto que generan las cargas en las celdas de carga.



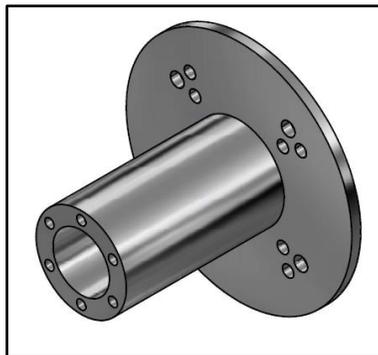
**Figura 2.1 Alternativa 1**

**Alternativa 1:** El instrumento propuesto en la alternativa 1 constaba de dos placas metálicas, una que era el soporte del motor y la otra que servía de bancada del sistema, estas estaban unidas por 3 transductores prismáticos. Debido a las cargas que deseábamos medir, los efectos en dichos transductores eran flexión, generado por el momento, y axial, generando por la fuerza de empuje; estos efectos se combinaban en cada transductor, por lo que debíamos realizar un análisis de cómo conseguir el resultado de cada carga sin que se viera afectada por la otra. Debido a la forma de los transductores no se podía colocar un concentrador de esfuerzo en ellos, ya que su tamaño no era tan grande, ya que queríamos anular los efectos de peso del motor en nuestras mediciones. Si se deseará cambiar de marca o modelo de motor, bastaba con construir otra placa base de motor o realizando el patrón en la misma que existía.



**Figura 2.2 Alternativa 2**

**Alternativa 2:** Consta de una base para el motor, uniones y 3 transductores con concentradores de esfuerzo, uno solo para medir la fuerza de empuje, y los otros dos para medir los efectos producidos por el torque, todos estos transductores experimentaban flexión por las dos cargas, y los efectos de cada carga sobre la otra que no medirían eran mínimos. Además, la repetibilidad de las piezas era un factor primordial de esta alternativa, ya que en total constaba de 5 piezas diferentes, pero se podían usar varias de las mismas piezas, dándole al cliente un alivio al momento de ensamblar el instrumento. También tenía la versatilidad de hacer lectura de diferentes modelos y marcas de motores, ya que su base para el motor viene con distintos patrones de pernos.



**Figura 2.3 Alternativa 3**

**Alternativa 3:** Consta de un cilindro con un agujero en el centro el cual hizo la función de concentrador de esfuerzos. En uno de sus extremos tiene el soporte del motor, y en el otro tiene agujeros para fijarlo a una superficie. Debido a las cargas que íbamos a medir, estas creaban esfuerzos de torsión para el torque y esfuerzos axiales para la fuerza de empuje. Constaba de una sola pieza y no por eso no contaba con la versatilidad de medir en diferentes modelos de motor.

**Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de las alternativas**

| Alternativas  | Ventajas  | Desventajas   |
|---------------|---|---|
| Alternativa 1 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transductores sometidos a flexión y axial.</li> <li>• Versatilidad para modelos y marcas de motores.</li> <li>• 3 transductores que miden fuerza y torque</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos provocados por fuerza y torque se combinan.</li> <li>• No hay concentradores de esfuerzo.</li> </ul>   |
| Alternativa 2 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transductores independientes para medición de fuerza y torque.</li> <li>• Versatilidad para modelos y marcas de motores.</li> <li>• Transductores sometidos solo a flexión.</li> <li>• Cuenta con concentrador de esfuerzo.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Varios elementos por fabricar.</li> </ul>  |
| Alternativa 3 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Forma fácil de fabricar.</li> <li>• Cuenta con concentrador de esfuerzo.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transductor sometido a axial (fuerza) y torsión (momento).</li> <li>• Solo sirve para un modelo y marca específica.</li> <li>• Poca sensibilidad.</li> </ul> |

### 2.3.4 Selección de la alternativa

Basándonos en las ponderaciones de los criterios de diseño, se realizó la siguiente escala de calificaciones para cada alternativa de solución:

1. Malo
2. Regular
3. Bueno
4. Muy Bueno
5. Excelente

Con esto se formó la matriz de decisión, la cual nos ayudó a seleccionar la alternativa que más nos convenga a nosotros.

**Tabla 2.4 Selección de la mejor alternativa**

| Alternativas                         |     | Alternativa 1 |         | Alternativa 2 |         | Alternativa 3 |         |
|--------------------------------------|-----|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|
| Criterio                             |     | Calificación  | Puntaje | Calificación  | Puntaje | Calificación  | Puntaje |
| <b>Sensibilidad según simulación</b> | 35% | 3             | 1.05    | 5             | 1.75    | 3             | 1.05    |
| <b>Facilidad de manufactura</b>      | 23% | 4             | 0.92    | 3             | 0.69    | 5             | 1.15    |
| <b>Mantenimiento</b>                 | 22% | 4             | 0.88    | 5             | 1.1     | 1             | 0.22    |
| <b>Tamaño</b>                        | 15% | 3             | 0.45    | 4             | 0.6     | 5             | 0.75    |
| <b>TOTAL</b>                         |     |               | 3.5     | <b>TOTAL</b>  | 4.35    | <b>TOTAL</b>  | 3.3     |

### 2.3.5 Selección del material

Los materiales seleccionados para este instrumento debían tener un bajo módulo de elasticidad, ya que queríamos que con pequeñas cargas poder medir deformaciones que estén en la magnitud que nos indicaba las galgas extensiométricas.

Además, queríamos que los elementos de unión del instrumento fueran rígidos en comparación a las celdas de carga, para esto, el material de los materiales de unión debía tener un módulo de elasticidad mayor al de las celdas de carga. El material seleccionado para las celdas de carga fue Duraluminio y para los elementos de unión fue acero ASTM A36. En la tabla 2.5 se muestra las propiedades mecánicas de dichos materiales.

**Tabla 2.5 Propiedades de los materiales**

| <b>Material</b> | <b>Densidad<br/>[kg/m<sup>3</sup>]</b> | <b>Módulo de elasticidad<br/>[GPa]</b> | <b>Esfuerzo a la fluencia<br/>[MPa]</b> |
|-----------------|--|--|---|
| Duraluminio     | 2830                                   | 71.5                                   | 550*                                    |
| Acero ASTM A36  | 7850                                   | 200                                    | 250                                     |

### **2.3.6 Diseño de forma del instrumento**

Según los requerimientos de diseño se necesitará celdas de carga que soporten un empuje de 25 kg y torques de 12 Nm. Para esto se tomó medidas aproximadas de celdas comerciales. Los planos de las celdas de carga se muestran en la siguiente sección. Con estos planos se pudo definir lo que es el área y momento de inercia de las secciones críticas donde se colocaran las celdas de carga, además, se determinó en factor de concentrador de esfuerzo. En la figura 2.4 se muestra la sección crítica de la celda de carga de fuerza de empuje y en la figura 2.5 se muestra la sección crítica de la celda de carga de torque.

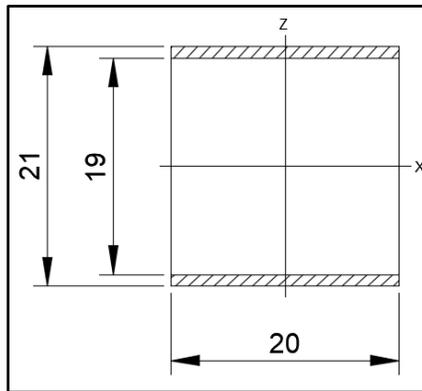


Figura 2.4 Sección crítica de la celda de carga de fuerza

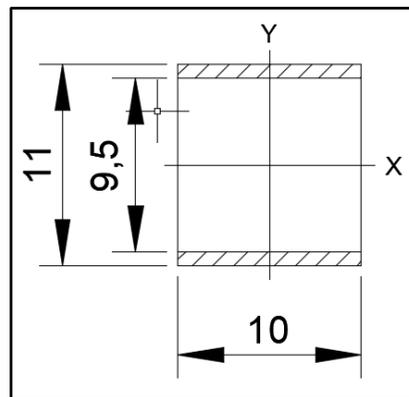


Figura 2.5 Sección crítica de la celda de carga de torque

En la tabla 2.6, se especifica los datos inherentes a la geometría de las celdas de cargas en sus secciones críticas.

Tabla 2.6 Propiedades geometrías de las celdas de carga

| Celda de carga   | Área [m <sup>2</sup> ] | Inercia respecto al eje X [m <sup>2</sup> ] | Inercia respecto al eje Y [m <sup>2</sup> ] | Inercia respecto al eje Z [m <sup>2</sup> ] |
|------------------|------------------------|---|---|---|
| Torque           | 1.5e-5                 | 3.9469e-10                                  | 1.25e-10                                    | -   |
| Fuerza de empuje | 4.0e-5                 | 4.0033e-9                                   | -   | 3.333e-12                                   |

### 2.3.7 Diseño detallado del instrumento

Para esta sección se tomarán en cuenta las cargas máximas que soportara el instrumento, además, de realizar una simulación en un software de diseño (ANSYS), el cual nos ayudó a verificar los resultados obtenidos de manera teórica.

#### 2.3.7.1 Determinación de concentradores de esfuerzo

Para los concentradores de esfuerzo se realizaron simulaciones en ANSYS APDL, con esto se encontró los valores de esfuerzo que soportaban cada punto crítico de las celdas de carga y con el valor de la carga y la geometría de las celdas se determinó el valor de esfuerzo nominal. En la figura 2.6, se muestra la geometría utilizada en la celda de carga de torque y en la figura 2.7, la utilizada en la celda de carga de fuerza.

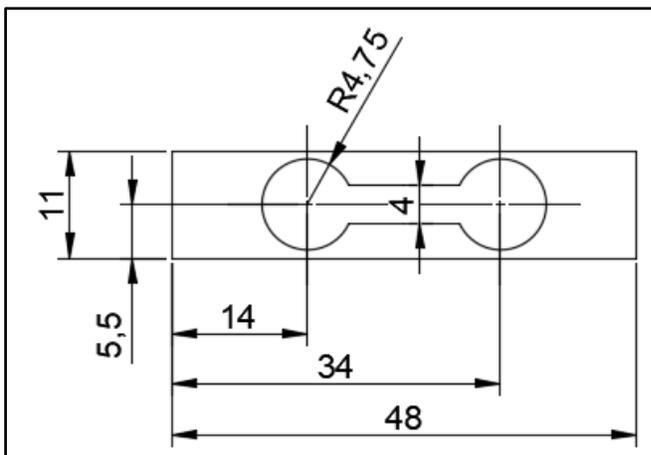
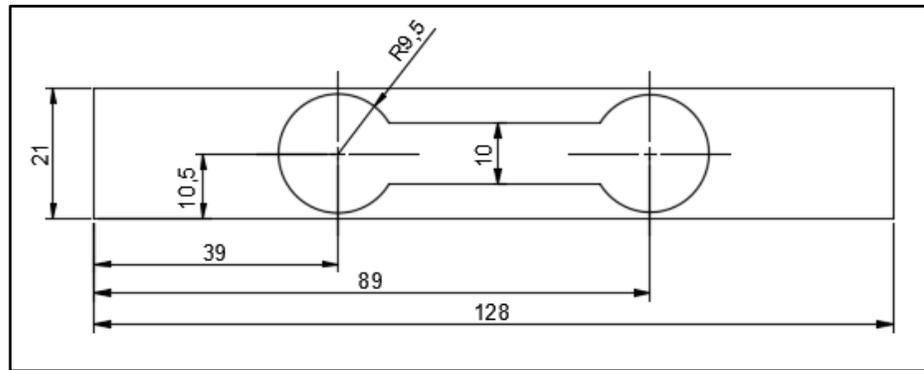


Figura 2.6 Geometría de la celda de carga de torque



**Figura 2.7 Geometría de la celda de carga de fuerza**

Con estos datos se utilizó la siguiente ecuación para encontrar los factores de concentradores de esfuerzo:

$$K = \frac{\sigma}{\sigma_{nom}} \quad (2,1)$$

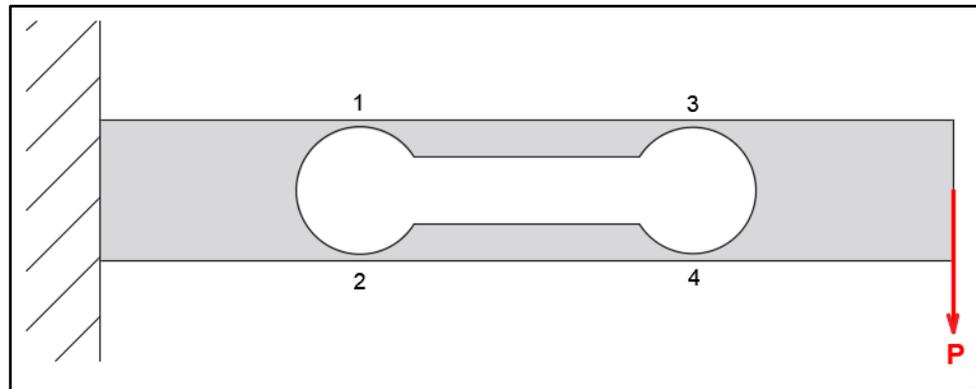
Donde:

$K$  es el valor del concentrador de esfuerzo.

$\sigma_{nom}$  es el esfuerzo nominal de la celda de carga.

$\sigma$  es el esfuerzo de la celda de carga considerando el concentrador de esfuerzo.

Para la simulación se modeló ambas celdas de carga con las restricciones de que una de las caras estaba empotrada y que la carga se aplicaba en el extremo opuesto. Además, se colocó las propiedades mecánicas del material descritas anteriormente. En la figura 2.8, se muestra el diagrama de cuerpo libre y el modelo que se utilizó en ANSYS APDL.



**Figura 2.8 Modelo de simulación para concentrador de esfuerzo**

Se simularon 3 cargas las cuales sirvió para comprobar el valor del concentrador de esfuerzo.

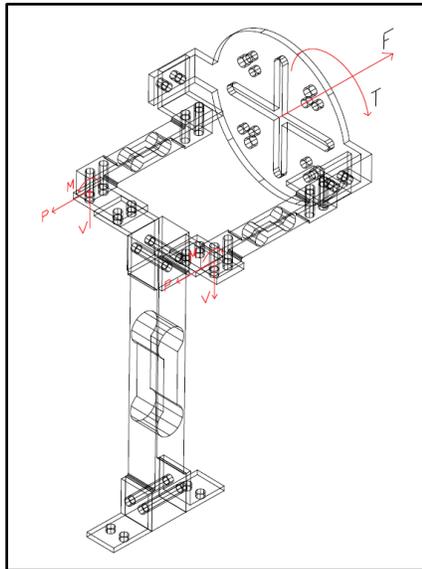
Con lo que respecta al esfuerzo nominal, se tomó las mismas restricciones que en la simulación. Además, se realizaron los diagramas de fuerza cortante y momento flector para determinar el esfuerzo, que para ambas celdas son de flexión. Por lo que se empleó la ecuación de esfuerzo de flexión en los cuatro puntos críticos de la carga.

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (2,2)$$

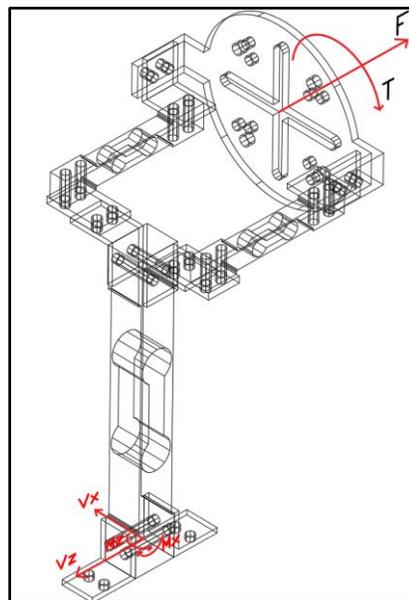
### 2.3.7.2 Diseño de las celdas de carga

Para lo correspondiente a las celdas de carga se usaron modelos matemáticos donde se analizó el efecto que tenían las cargas sobre las mismas.

En el caso de las celdas de carga de torque, estas estuvieron sometidas a esfuerzos axiales y de flexión, como se muestra en la figura 2.9; y, en el caso de las celdas de carga de fuerza, estuvieron sometidas a esfuerzos de flexión, pero en dos ejes diferentes, como se muestra en la figura 2.10.



**Figura 2.9 Diagrama de cuerpo libre de la celda de torque**



**Figura 2.10 Diagrama de cuerpo libre de la celda de torque**

Las secciones críticas fueron donde se encontraban los concentradores de esfuerzo de cada celda, entonces se usó las siguientes ecuaciones para calcular el esfuerzo normal de cada celda de carga en su respectivo eje:

- Para la celda de carga de torque

$$\sigma_{z_T} = \frac{P_T}{A_T} + \frac{M_{x_T} c_T}{I_{xx_T}} \quad (2,3)$$

$$\tau_{zy_T} = \frac{V_{y_T} Q_{xx_T}}{I_{xx_T} t_T} \quad (2,4)$$

- Para la celda de carga de fuerza

$$\sigma_{y_F} = \frac{M_{z_F} c_F}{I_{zz_F}} + \frac{M_{x_F} b_F}{I_{xx_F}} \quad (2,4)$$

$$\tau_{yz_F} = \frac{V_{z_T} Q_{xx_F}}{I_{xx_F} t_{x_F}} \quad (2,5)$$

$$\tau_{yx_F} = \frac{V_{x_T} Q_{zz_F}}{I_{zz_F} t_{z_F}} \quad (2,6)$$

Donde:

$\sigma_{z_T}$  fue el esfuerzo normal nominal en la dirección Z.

$P_T$  fue la fuerza axial interna en la sección crítica de la celda de carga de torque.

$A_T$  fue el área transversal de la sección crítica de la celda de carga de torque.

$M_{x_T}$  fue el momento flector en la dirección X de la celda de carga de torque.

$c_T$  fue la distancia entre la superficie y el eje neutro de la sección de la celda de carga de torque

$I_{xx_T}$  fue el momento de inercia con respecto al eje X de la sección crítica de la celda de carga de torque.

$\tau_{zy_T}$  fue el esfuerzo cortante en el plano XY en la dirección Y de la celda de carga de torque.

$V_{y_T}$  fue la fuerza cortante en la dirección Y de la sección crítica de la celda de carga de torque.

$Q_{xx_T}$  fue el primer momento de área con respecto al eje X de la sección crítica de la celda de carga de torque.

$t_T$  fue el espesor de la celda de carga de torque en el punto crítico paralelo al eje X.

$\sigma_{y_F}$  fue el esfuerzo normal nominal en la dirección Y.

$M_{x_F}$  fue el momento flector en la dirección X de la celda de carga de fuerza.

$M_{z_F}$  fue el momento flector en la dirección Z de la celda de carga de fuerza.

$c_F$  fue la distancia entre el punto crítico y el eje Z.

$b_F$  fue la distancia entre el punto crítico y el eje X.

$I_{xx_F}$  fue el momento de inercia con respecto al eje X de la sección crítica de la celda de carga de fuerza.

$I_{zz_F}$  fue el momento de inercia con respecto al eje Z de la sección crítica de la celda de carga de fuerza.

$\tau_{yz_F}$  fue el esfuerzo cortante en el plano XZ en la dirección Z de la celda de carga de fuerza.

$V_{z_T}$  fue la fuerza cortante en la dirección Z de la sección crítica de la celda de carga de fuerza.

$Q_{xx_F}$  fue el primer momento de área con respecto al eje X de la sección crítica de la celda de carga de fuerza.

$t_{x_F}$  fue el espesor de la celda de carga de fuerza en el punto crítico paralelo al eje X.

$\tau_{yx_F}$  fue el esfuerzo cortante en el plano XZ en la dirección X de la celda de carga de fuerza.

$V_{x_T}$  fue la fuerza cortante en la dirección X de la sección crítica de la celda de carga de fuerza.

$Q_{zz_F}$  fue el primer momento de área con respecto al eje Z de la sección crítica de la celda de carga de fuerza.

$t_{z_F}$  fue el espesor de la celda de carga de fuerza en el punto crítico paralelo al eje Z.

El análisis estático que realizamos fue por medio del esfuerzo efectivo de Von Mises, por lo que se calculó dicho esfuerzo en los puntos críticos tanto en la celda de carga de torque y de fuerza, donde se usó la ecuación:

$$\sigma'_T =$$

$$\sqrt{\frac{(\sigma_{x_T} - \sigma_{y_T})^2 + (\sigma_{y_T} - \sigma_{z_T})^2 + (\sigma_{z_T} - \sigma_{x_T})^2 + 6(\tau_{xy_T}^2 + \tau_{yz_T}^2 + \tau_{zx_T}^2)}{2}} \quad (2,7)$$

$$\sigma'_F = \sqrt{\frac{(\sigma_{x_F} - \sigma_{y_F})^2 + (\sigma_{y_F} - \sigma_{z_F})^2 + (\sigma_{z_F} - \sigma_{x_F})^2 + 6(\tau_{xy_F}^2 + \tau_{yz_F}^2 + \tau_{zx_F}^2)}{2}} \quad (2,8)$$

Donde:

$\sigma'_T$  fue el esfuerzo de Von Mises en el punto crítico de la celda de carga de torque.

$\sigma'_F$  fue el esfuerzo de Von Mises en el punto crítico de la celda de carga de fuerza.

Por los agujeros que existen en las celdas de carga, se debió hacer el cálculo del esfuerzo real en cada celda, por lo que se utilizó la siguiente ecuación para el cálculo del esfuerzo real teórico:

- Para la celda de carga de torque

$$\sigma''_T = K_T \sigma'_T \quad (2,9)$$

- Para la celda de carga de fuerza

$$\sigma''_F = K_F \sigma'_F \quad (2,10)$$

Donde:

$\sigma''_T$  fue el esfuerzo corregido de Von Mises en el punto crítico de la celda de carga de torque.

$K_T$  fue el valor del concentrador de esfuerzo en la celda de carga para el torque en el punto crítico.

$\sigma''_F$  fue el esfuerzo corregido de Von Mises en el punto crítico de la celda de carga de fuerza.

$K_F$  fue el valor del concentrador de esfuerzo en la celda de carga de fuerza en el punto crítico.

Para el cálculo de las deformaciones unitarias de cada uno de los puntos de las secciones críticas que se analizó se utilizó la siguiente ecuación:

- Para la celda de carga de torque

$$\epsilon_{zz} = \frac{\sigma_{zT}}{E} \quad (2,11)$$

- Para la celda de carga de fuerza

$$\epsilon_{yy} = \frac{\sigma_{yF}}{E} \quad (2,12)$$

Donde:

$E$  fue el módulo de elasticidad del material de la celda de carga.

$\epsilon_{zz}$  fue el valor de deformación unitaria en la dirección Z.

Donde:

$\epsilon_{yy}$  fue el valor de deformación unitaria en la dirección Z.

Además, para poder tener una referencia de que tanto esfuerzo está soportando la celda de carga en comparación al valor de su esfuerzo de fluencia, calculamos un factor de seguridad.

- Para la celda de carga de torque

$$\eta_T = \frac{S_y}{\sigma_T''} \quad (2,13)$$

- Para la celda de carga de fuerza

$$\eta_F = \frac{S_y}{\sigma_F''} \quad (2,14)$$

Donde:

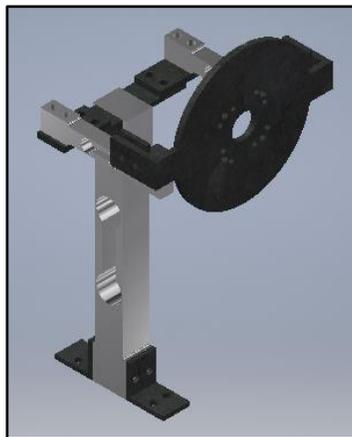
$\eta_T$  fue el factor de seguridad de la celda de carga de torque.

$S_y$  fue el esfuerzo de fluencia para el material de la celda de carga.

$\eta_F$  fue el factor de seguridad de la celda de carga de fuerza.

### 2.3.8 Simulación del instrumento

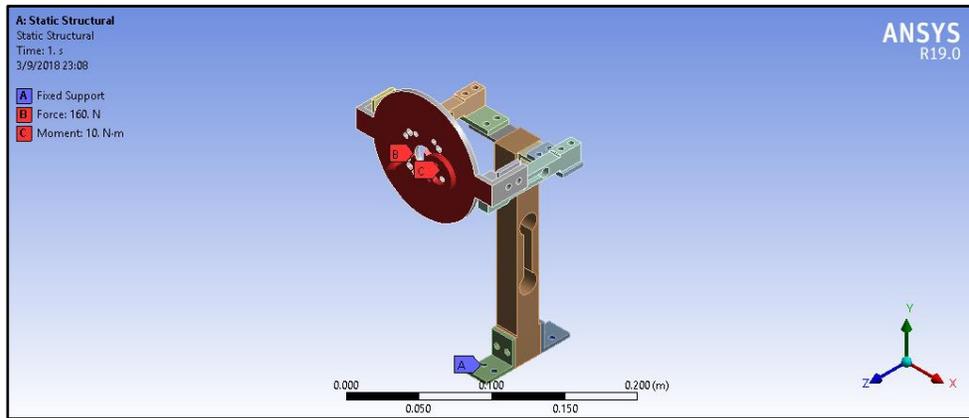
La simulación del instrumento completo se realizó en ANSYS Workbench, para esta se realizó el modelo el 3D del instrumento en Autodesk Inventor, colocando en dicho modelo las propiedades mecánicas para cada pieza, es decir, las celdas de carga con duraluminio y el resto de las piezas con acero ASTM A36.



**Figura 2.11 Modelo para ANSYS**

Se importo dicha geometría a ANSYS, donde se le coloco un mallado donde cada elemento medía 0.5 mm.

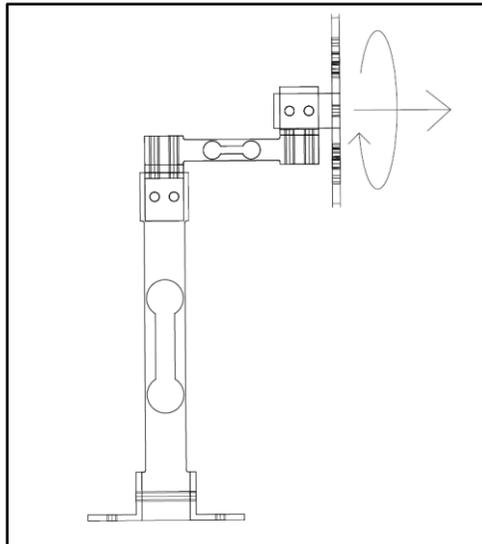
Las cargas se las colocó en la cara de la pieza que soporta el motor, estas cargas fueron una de fuerza de empuje que tenía una magnitud de 250 N y un torque de 12 Nm. Además, se colocó como superficies fijas a los agujeros donde se colocan los pernos que sujetan todo el instrumento a la superficie de trabajo.



**Figura 2.12 Cargas y restricciones para el modelo**

### 2.3.9 Posicionamiento de las galgas extensiométricas

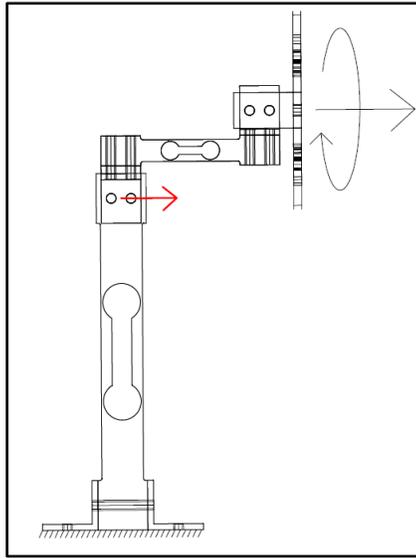
Se analizó los efectos que ocasionaban las cargas sobre las celdas de carga. En la figura 2.13 se puede ver el diagrama de cuerpo libre de nuestra alternativa seleccionada en donde actúan dos efectos importantes, una fuerza y momento en el eje X.



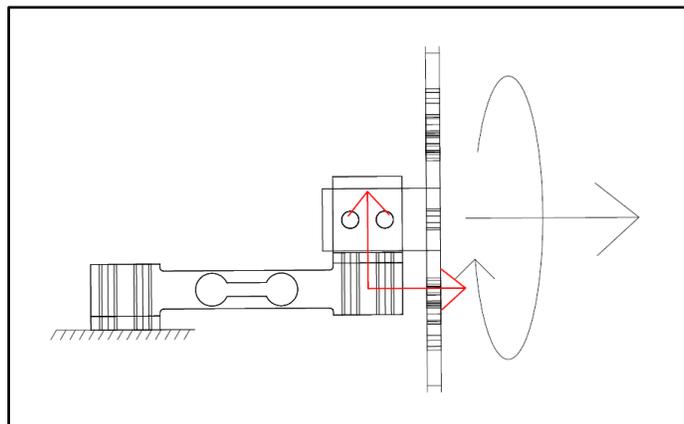
**Figura 2.13 Diagrama de cuerpo libre del instrumento**

Analizando la transmisión de fuerzas a través de las celdas de cargas se puede ver que las celdas actúan como una viga empotrada a flexión como se

ve en la figura 2.14 y 2.15. Sobre la celda de carga vertical, solo actuó una fuerza en sentido horizontal causando flexión sobre ella. Las dos celdas de carga horizontales son afectadas por la fuerza y el momento, en donde el momento le aplica una fuerza sobre cada una en dirección opuesta en sentido vertical ocasionando flexión en las dos y una fuerza en el sentido horizontal causando estiramiento axial.



**Figura 2.14 Fuerzas en la celda de empuje**



**Figura 2.15 Fuerzas en la celda de torque**

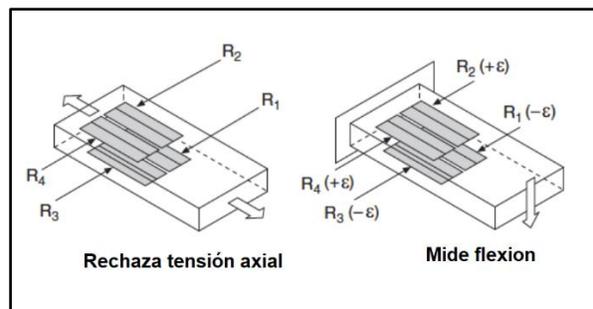
Se uso la tabla 2.7 elaborada por National Instrument para escoger la configuración más adecuada para las galgas extensiométricas.

**Tabla 2.7 Tipos de puentes de Wheatstone [Obtenida de <http://www.ni.com>]**

| Tipo de medida                      | Cuarto de puente |              | Medio puente |                | Puente completo |                |                |
|-------------------------------------|------------------|--------------|--------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
|                                     | Tipo I           | Tipo II      | Tipo I       | Tipo II        | Tipo I          | Tipo II        | Tipo III       |
| Tensión axial                       | Si               | Si           | Si           | No             | No              | No             | Si             |
| Tensión de flexión                  | Si               | Si           | Si           | Si             | Si              | Si             | No             |
| Compensación                        |                  |              |              |                |                 |                |                |
| Temperatura                         | No               | Si           | Si           | Si             | Si              | Si             | Si             |
| Sensibilidad transversal            | No               | No           | Si           | No             | No              | Si             | Si             |
| Sensibilidad                        |                  | $\beta$      |              |                |                 |                |                |
| Sensibilidad a 1000 ue              | ~0.5 mV/V        | ~0.5 mV/V    | ~0.65 mV/V   | ~1.0 mV/V      | ~2.0 mV/V       | ~1.3 mV/V      | ~1.3 mV/V      |
| Instalación                         |                  |              |              |                |                 |                |                |
| Cantidad de galgas vinculadas       | 1                | 1*           | 2            | 2              | 4               | 4              | 4              |
| Ubicación de montaje                | Un solo lado     | Un solo lado | Un solo lado | Lados opuestos | Lados opuestos  | Lados opuestos | Lados opuestos |
| Cantidad de cables                  | 2 o 3            | 3            | 3            | 3              | 4               | 4              | 4              |
| Resistores de terminación de puente | 3                | 2            | 2            | 2              | 0               | 0              | 0              |

\* Se coloca una segunda galga de tensión en contacto térmico directo con la estructura, pero no se vincula.

Se escogió el puente completo tipo I porque este presenta una mayor sensibilidad de medición y rechaza la tensión axial causada en las dos celdas de carga horizontales que no nos interesa medir. La figura 2.16 muestra la configuración tipo I de puente completo, la posición exacta de cada galga en la celda de carga se encontró mediante las simulaciones que se puede apreciar en la figura 2.19. (Kumar, Kumar, Chaturvedi, & Chandra , 2012).



**Figura 2.16 Puente completo Tipo I [Obtenida de <http://www.ni.com>]**

## 2.3.10 Mediciones de fuerza y torque

### 2.3.10.1 Fuerza

La medición de fuerza de empuje fue un valor que se pudo obtener comparando directamente el valor de voltaje obtenido de la medición con los valores de voltaje de la curva de calibración.

### 2.3.10.2 Torque

La medición del torque se calculó comparando el valor de voltaje con los valores de la curva de calibración para obtener la fuerza que actúa sobre la celda de carga. Esta fuerza fue transformada a momento considerando la distancia del centro del soporte a la celda de carga con usando la siguiente ecuación:

$$M_m = F_t d \quad (2,15)$$

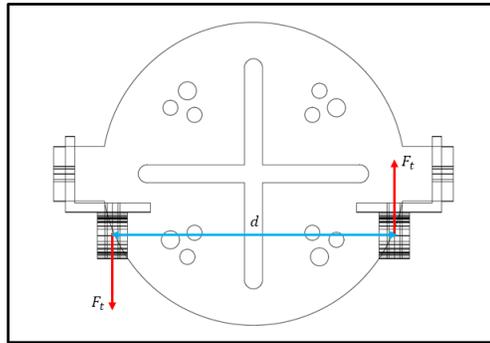
Donde:

$M_m$  es el momento que actúa sobre el instrumento

$F_t$  es la fuerza que actúa en la celda de carga

$d$  es la distancia del centro del soporte a la celda de carga

En la figura 2.17 se puede ver un esquema del soporte para el motor en donde se ve donde actúa la fuerza para el torque.



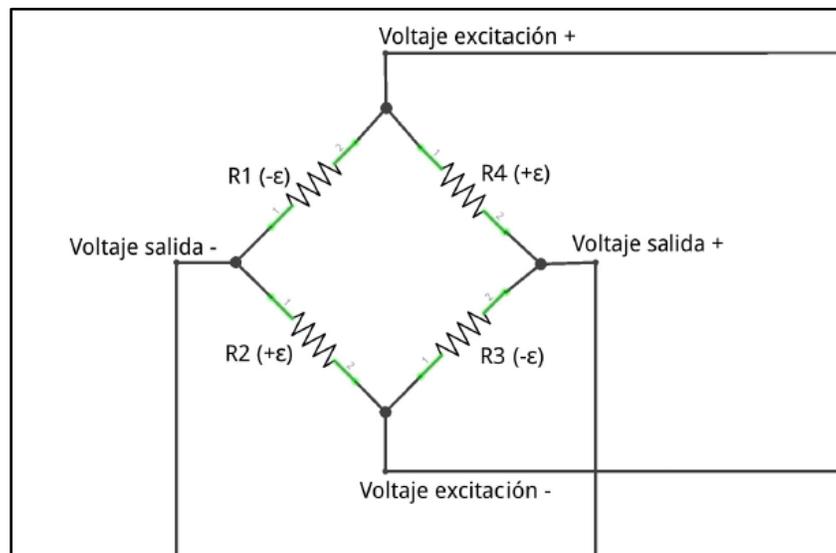
**Figura 2.17 Fuerza de las celdas de torque**

## 2.4 Diseño electrónico del instrumento

Esta parte se describe todos los pasos que se realizando para la configuración eléctrica y electrónica del instrumento.

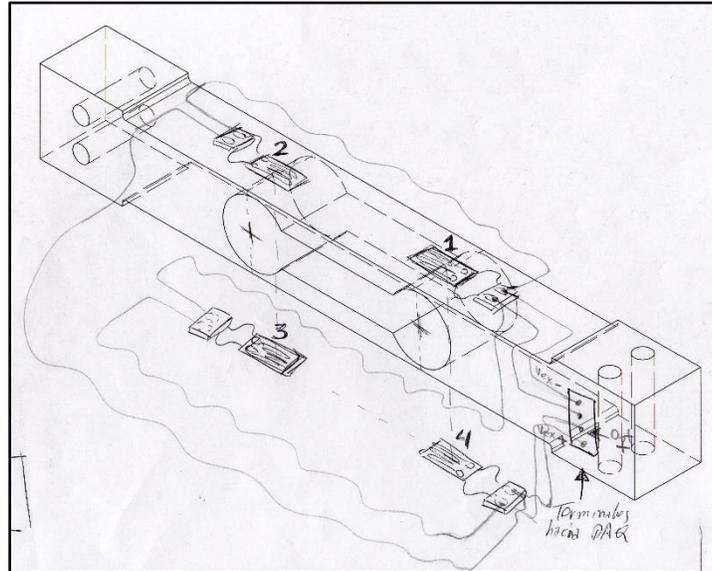
### 2.4.1 Configuración eléctrica de las celdas de carga

La configuración del puente de Wheatstone se puede ver en la figura 2.18, en donde se aprecia cuales galgas se encuentra en tensión y compresión. También se puede observar cual son los puntos de voltaje de entrada y salida del circuito



**Figura 2.18 Puente de Wheatstone de las celdas de carga**

En la figura 2.19 se puede ver el posicionamiento de las galgas extensiométricas en la celda de carga

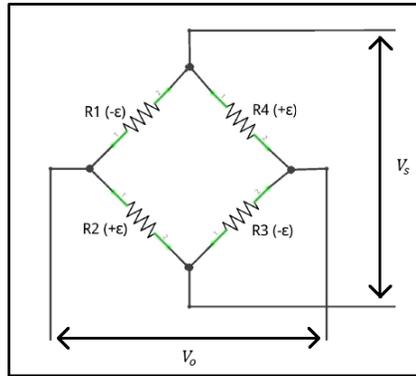


**Figura 2.19 Posición de las galgas en la celda de carga**

La conexión con el sistema de adquisición de datos se detalla en la sección 2.6, donde se describe el sistema de adquisición de datos.

#### **2.4.1.1 Cálculos teóricos de voltaje**

Los valores teóricos de voltajes se calcularon también de manera teórica considerando el puente completo de Wheatstone como se ve en la figura 2.19 en donde  $V_s$  representa el voltaje de excitación del circuito y  $V_o$  el voltaje de salida que va a ser medido.



**Figura 2.20 Puente de Wheatstone**

La fórmula con la que se puede calcularlos voltajes de salida es la siguiente (Hoffmann):

$$V_o = V_s \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2,16)$$

Donde  $k$  representa el factor de galga y  $\varepsilon$  son las deformaciones que se obtuvieron con las simulaciones en cada punto en donde se instalaron las galgas.

## 2.5 Calibración

Para la calibración de las celdas de carga se usó la norma ASTM E74 “Standard Practices for Calibration and Verification for Force-Measuring Instruments” en donde nos indica cómo se debe realizar la calibración de instrumentos que miden fuerzas.

La norma caracteriza la calibración en dos tipos: estándar primario y estándar secundario. El estándar primario incluye las fuerzas aplicada de manera directa sin ningún tipo de intervención de un mecanismo como palancas y equipos mecánicos. El estándar secundario incluye cualquier instrumento o mecanismo que fue calibrado previamente usando el estándar primario. Para nuestro caso se usó el estándar primario para la calibración de la fuerza de empuje mediante

la aplicación de pesos estandarizados y el estándar secundario para la calibración del torque mediante un torquímetro. (ASTM E74-06, 2006)

Siguiendo las recomendaciones de las normas esta nos pidió que exista estabilización de la temperatura y estabilización eléctrica. Para la estabilización de temperatura se mantuvo el cuarto a la misma temperatura de 24 °C por un periodo de 3 horas. En la estabilización eléctrica se mantuvo los equipos conectados y prendidos por 15 minutos antes de comenzar a poder los pesos calibrados. También se realizó practicas aplicando la fuerza máxima antes de comenzar la calibración como dice la norma.

En el momento de la calibración se aplicaron 10 pesos distintos sacando 3 valores de lectura para cada peso siguiendo las especificaciones de las normas. Los valores de los pesos fueron distribuidos siguiendo un intervalo equidistante. La curva de calibración fue construida con los valores de los pesos aplicados y un el promedio de los 3 valores de voltaje para cada peso.

## **2.6 Sistema de adquisición de datos**

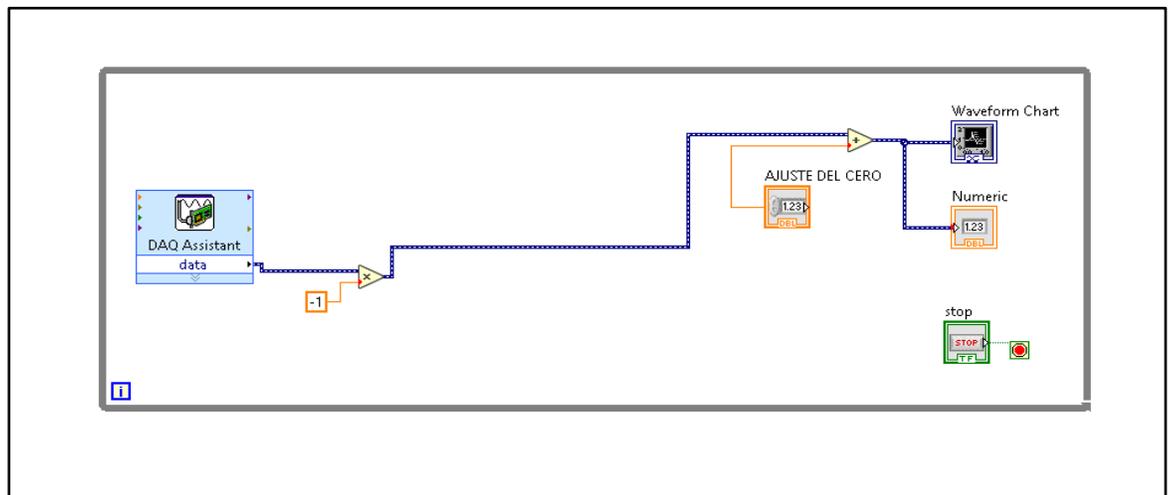
Se uso un sistema de adquisición datos de National Instrument para el instrumento, el módulo NI9219 que permite la lectura de puente de Wheatstone y el programa LabView 2017 para la visualización de estos.

Para la conexión de la celda de carga al sistema de adquisición de datos se usó la guía de instrucciones operación y especificación del módulo NI9219 en donde se indica en que puerto se conecta cada cable que se encuentra en el Anexo B. Este instructivo se encontró en la página web de National Instrument (Operating Instructions and Specifications - NI9219, 2009).

La configuración de LabView usa fue usando el DaqAssistant en la opción de Bridge. Dentro del DaqAssistant se activaron las opciones de “Full Bridge” para

el tipo de puente y “On Demand” para lectura de los datos. Para la visualización se escogió la interfaz de “Waveform Chart” en donde se encerró en un “While” para que registre las lecturas a través del tiempo. Se agregó un multiplicador a la lectura para eliminar los pequeños voltajes negativos iniciales. Para la encerada del valor de voltaje de lectura se creó un sumador que con la opción de control en donde se modificó en tiempo real.

El diagrama de bloques usado en LabView para la calibración y prueba del instrumento se puede ver en la figura 2.23.



**Figura 2.21 Diagrama de bloques de LabView**

En el Anexo D se describe la implementación y diseño de un sistema de adquisición de datos de bajo costo basado en Arduino.

## 2.7 Prototipo

El primer prototipo del instrumento fue realizado en impresión 3D con el material ABS, este prototipo fue usado para las pruebas y funcionamiento correcto del instrumento.

El segundo modelo fue construido con los materiales mencionados en la sección 2.3.5 de selección de los materiales, este fue entregado al dueño del instrumento que financio el proyecto.

## 2.8 Caracterización del motor

Para caracterizar un motor de dron se puede realizar distintas pruebas y mediciones. Para nuestro análisis y pruebas se decidió realizar las siguientes curvas.

### 2.8.1 Curva de la constante de empuje

Basándonos de la ecuación de empuje para un motor de dron (Vidal, 2016):

$$E = C_T \rho A r^2 \omega^2 \quad (2,17)$$

Donde:

$C_T$  es el coeficiente de empuje.

$\rho$  es la densidad del aire.

$A$  es el área del giro de la hélice.

$r$  es el radio de la hélice.

La expresión  $C_T \rho A r^2$  se puede reducir a la constante  $k$  que depende de cada conjunto motor-hélice, teniendo la ecuación,

$$E = k \omega^2 \quad (2,18)$$

### 2.8.2 Curva de la constante de torque

El torque generado por el empuje también se puede representar por la ecuación 2,14 aumentando el radio  $R$  de la hélice.

$$T = R C_T \rho A r^2 \omega^2 \quad (2,19)$$

La expresión  $R C_T \rho A r^2$  se puede representar como la constante  $b$ ,

$$T = b \omega^2 \quad (2,20)$$

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS

En este capítulo se muestran todos los resultados obtenidos por la metodología. Esto incluye el diseño detallado del instrumento, las simulaciones realizadas, los planos de construcción, la calibración del instrumento y las mediciones realizadas con el prototipo instrumento comparando los resultados obtenidos con un instrumento de medición comercial.

### 3.1 Prototipo final

En la figura 3.1 se presenta el ensamble final de la estructura del instrumento realizado en INVENTOR 2019. El instrumento está compuesto de una celda de carga que mide la fuerza de empuje causada por el motor y dos celdas de carga que mide las fuerzas producidas por el torque del motor. El ensamble también incluye el soporte en donde se instala el motor de dron, este soporte puede ser cambiado por motores de distintas configuraciones.

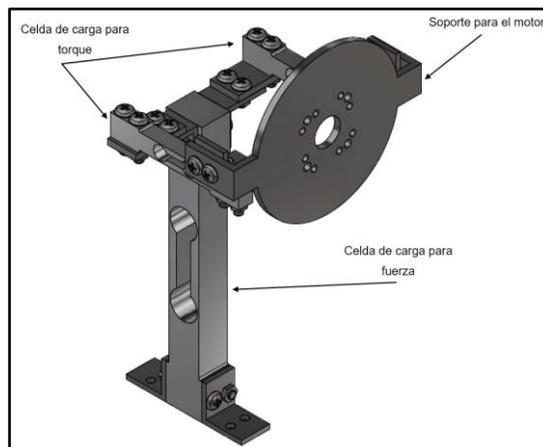


Figura 3.1 Modelo 3D del instrumento

Las distintas piezas del ensamble son unidas por uniones en L de las mismas dimensiones para mantener un diseño universal simplificando la manufactura del instrumento. Entre la celda de carga de torque y las uniones en L para la celda de carga de fuerza se acoplaron dos platinas, con el objetivo de que en el caso que se necesite extender el tamaño del soporte solo sea necesario diseñar unas nuevas platinas con distintas dimensiones. Todos los pernos usados en el instrumento son M5x0.8, con tuercas M5.

En la figura 3.2 se puede una foto ver el prototipo construido.



**Figura 3.2 Foto del prototipo**

Los planos detallados de cada pieza del instrumento se encuentran en el Anexo F.

## 3.2 Diseño mecánico del instrumento

### 3.2.1 Determinación de concentradores de esfuerzo

Para lo que corresponde a la celda de carga de torque, se obtuvo los siguientes diagramas de fuerza cortante y momento flector.

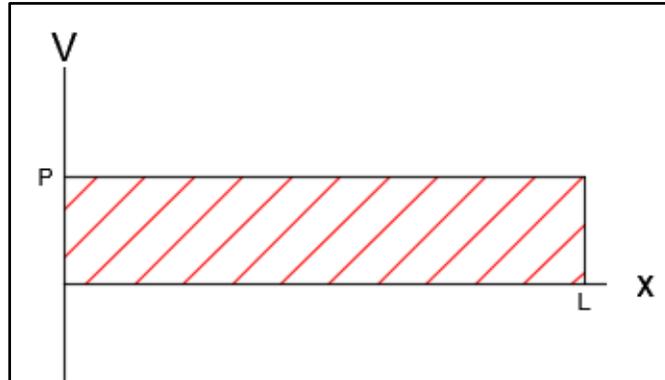


Figura 3.3 Diagrama de fuerza cortante de la celda de carga

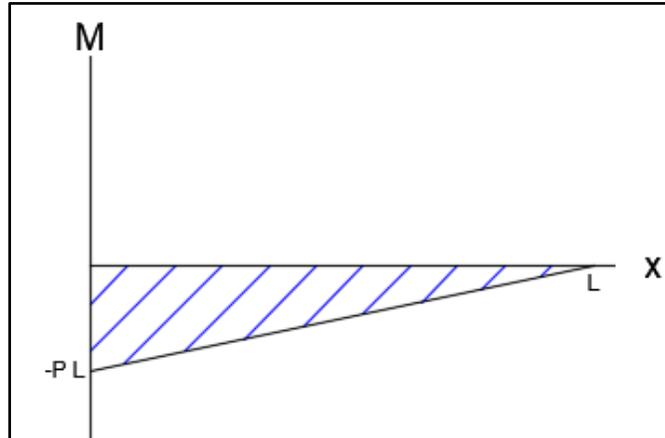
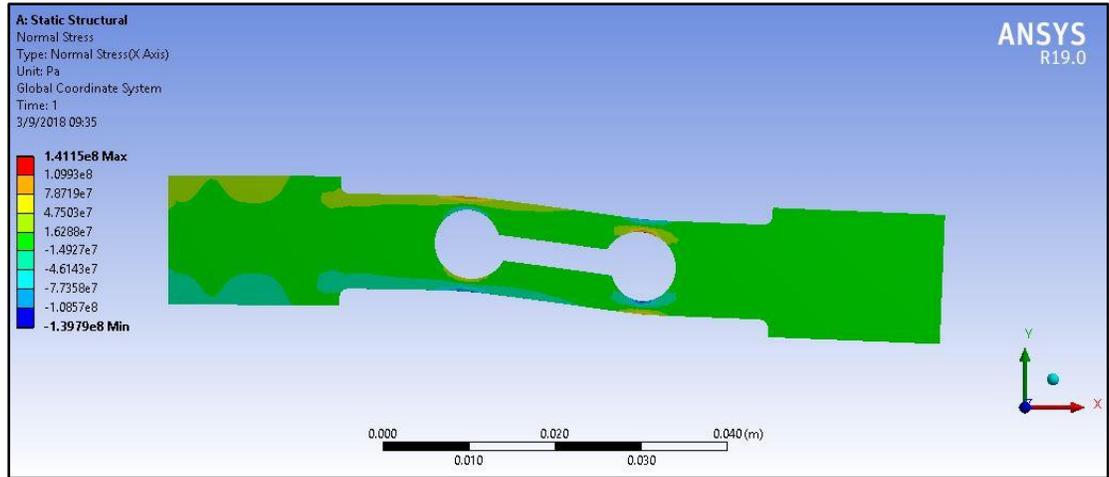
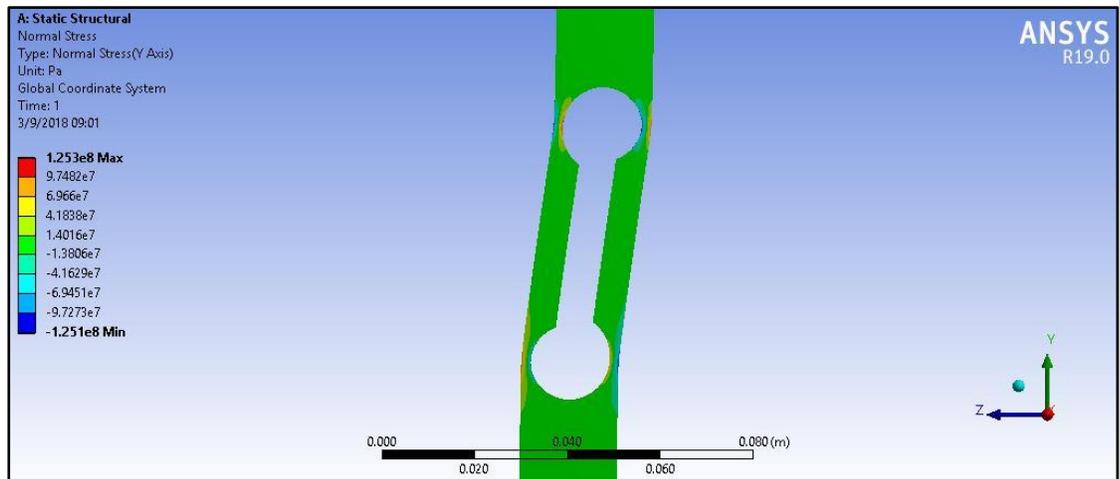


Figura 3.4 Diagrama del momento flector de la celda de carga

Con estos diagramas y los datos de la geometría obtenidos en el capítulo anterior, se obtuvieron los resultados de esfuerzo teóricos, además con la simulación se obtuvo los datos de los esfuerzos de cada elemento. En la figura 3.5 se muestra el resultado de esfuerzos normales de la simulación en ANSYS 19 para la celda de torque comuna carga de 100 N.



**Figura 3.5 Simulación de deformación de la celda de carga**



**Figura 3.6 Simulación de esfuerzos de la celda de carga**

En la tabla 3.1, se muestra los concentradores de esfuerzo para cada uno de los puntos críticos que tuvieron la celda de carga de torque y la de fuerza.

**Tabla 3.1 Concentradores de esfuerzos**

| Punto crítico | $K_T$  | $K_F$  |
|---------------|--------|--------|
| 1             | 10.60  | 17.48  |
| 2             | 10.41  | 17.55  |
| 3             | -24.89 | -38.55 |
| 4             | -24.32 | -38.88 |

En los puntos 3 y 4 existe la particularidad que se trabajó con la magnitud de los esfuerzos y no con el signo, ya que si tomábamos en cuenta el signo saldría un concentrador de esfuerzo negativo. Esto ocurre por el efecto del diseño de la celda de carga, ya que el momento flecto cambia de signo entre los agujeros, por ende, el signo de los esfuerzos también.

### 3.2.2 Diseño detallado de las celdas de carga

En la tabla 3.2, se muestra tabulados los resultados de esfuerzos, deformaciones unitarias y factores de seguridad para la celda de carga de torque. Dicha celda estaba sometido a esfuerzos axiales y de flexión, además, que los esfuerzos cortantes eran cero porque el punto crítico estaba en la superficie libre de la celda.

**Tabla 3.2 Resultados del diseño detallado de la celda de carga de torque**

| Punto Crítico | Esfuerzo Normal [Pa] | Deformación unitaria Normal [m/m] | Esfuerzo de Von Mises [Pa] | Factor de seguridad |
|---------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------|
| 1             | 2.69E+07             | 3.76E-04                          | 1.17E+08                   | 4.71                |
| 2             | -2.29E+07            | -3.20E-04                         | 9.71E+07                   | 5.67                |
| 3             | 2.69E+07             | 3.76E-04                          | 2.31E+08                   | 2.38                |
| 4             | -2.29E+07            | -3.20E-04                         | 1.96E+08                   | 2.81                |

En menor factor de seguridad de las celdas de carga de torque es 2.38, lo que confirma el dimensionamiento de las celdas de carga de torque para los requerimientos de diseño establecidos en el capítulo 1. Además, la

deformación unitaria no excede los valores máximos que soportaría la galga extensiométrica.

En la tabla 3.3, se muestran tabulados los resultados de esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad para la celda de carga de fuerza.

**Tabla 3.3 Resultados del diseño detallado de la celda de carga de fuerza**

| Punto Crítico | Esfuerzo Normal [Pa] | Deformación unitaria Normal [m/m] | Esfuerzo de Von Mises [Pa] | Factor de seguridad |
|---------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------|
| 1             | 3.40E+07             | 4.75E-04                          | 9.61E+07                   | 5.72                |
| 2             | -3.40E+07            | -4.75E-04                         | 9.59E+07                   | 5.73                |
| 3             | 2.24E+07             | 3.13E-04                          | 7.14E+07                   | 7.70                |
| 4             | -2.24E+07            | -3.13E-04                         | 7.17E+07                   | 7.67                |

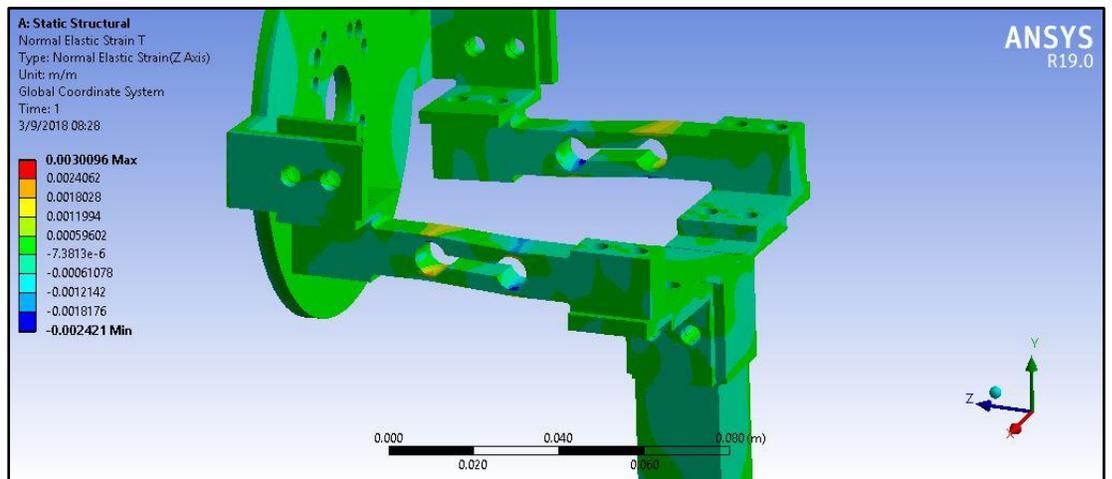
El valor de factor de seguridad más pequeño obtenido es de 5.72, por lo que se confirma que el dimensionamiento de las celdas de carga es el adecuado para las carga y torque del requerimiento. Además, los valores de deformación unitaria están en el rango permitido por la galga extensiométrica.

### 3.2.3 Simulación del instrumento

El resultado obtenido en las simulaciones en ANSYS fueron la deformación unitaria, los esfuerzos y el valor del factor.

#### 3.2.3.1 Celda de carga de torque

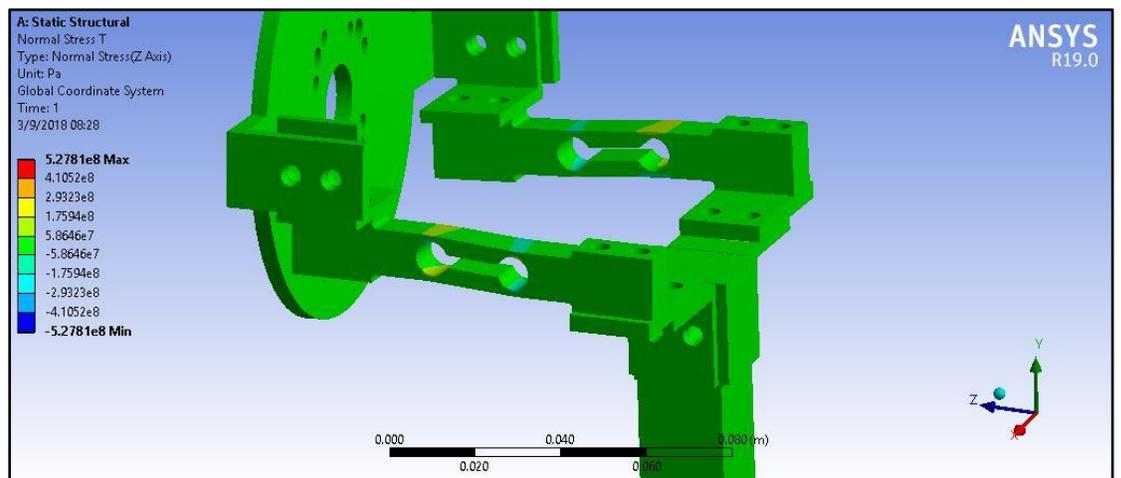
En la figura 3.7 se muestra la deformación normal en la dirección Z de las celdas de carga de torque.



**Figura 3.7 Deformación unitaria de las celdas de torque en ANSYS**

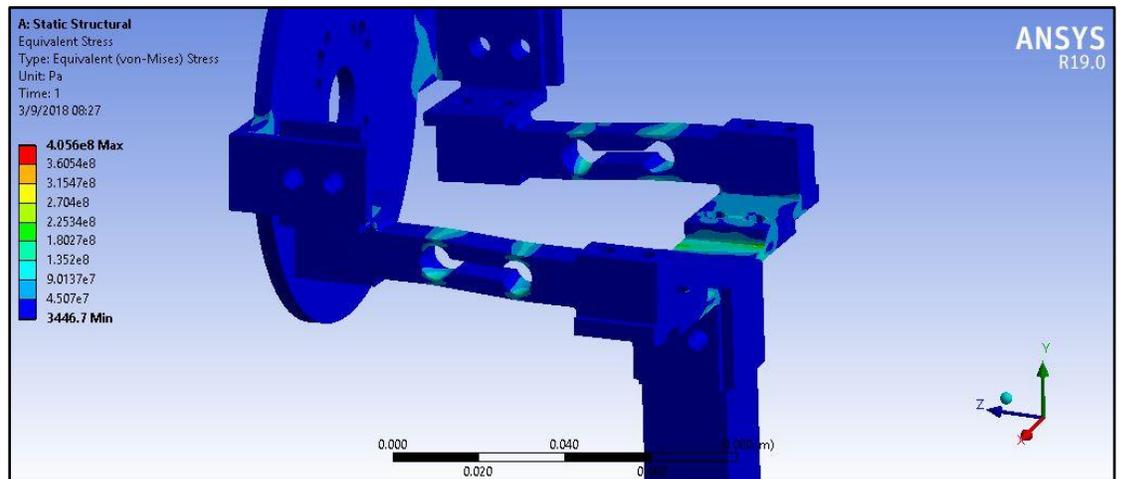
La mayor deformación unitaria de estas celdas es de 0.30096% por lo que estamos en el rango permitido por las galgas extensiométrica que usamos para la medición del torque.

En la figura 3.8 se muestra la distribución de esfuerzos normales a lo largo de la celda de carga de torque, se puede observar que la flexión de las dos celdas es distinta, por lo cual los esfuerzos de tensión y compresión se alternan dependiendo del sentido del torque aplicado al instrumento.



**Figura 3.8 Esfuerzos normales en las celdas de carga de torque en ANSYS**

En la figura 3.9 se muestra la distribución de esfuerzos de Von Mises en las celdas de carga de torque, con este esfuerzo se puede determinar el nivel de intensidad que tendrá el esfuerzo equivalente que fue necesario para determinar el factor de seguridad que tendrán las celdas de carga.



**Figura 3.9 Esfuerzo de Von Mises en las celdas de carga de torque en ANSYS**

En la tabla 3.4 y 3.5 están tabulados los resultados de la simulación en los distintos puntos críticos de la fuerza de carga de torque. El menor factor de seguridad es 5.12, dicho factor es en una zona de compresión.

Con los valores de concentradores de esfuerzo nos dimos cuenta de que el dimensionamiento de las celdas de carga de torque ha sido el adecuado, ya que todas soportan la carga de torque máxima que exigen los requerimientos.

**Tabla 3.4 Resultados de las simulaciones de la celda de torque 1**

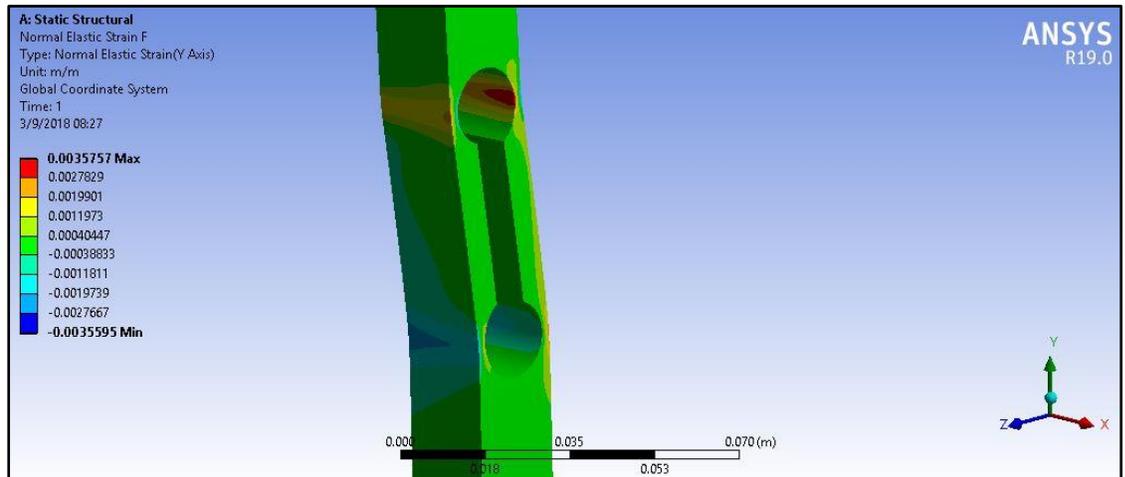
| Celda de carga de Torque 1 |                      |                                   |                            |                     |
|----------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------|
| Punto Crítico              | Esfuerzo Normal [Pa] | Deformación unitaria Normal [m/m] | Esfuerzo de Von Mises [Pa] | Factor de seguridad |
| 1                          | -9.4190E+07          | -1.2039E-03                       | 9.3094E+07                 | 5.91                |
| 2                          | 9.8037E+07           | 1.2595E-03                        | 9.6941E+07                 | 5.67                |
| 3                          | 9.9119E+07           | 1.2751E-03                        | 9.7626E+07                 | 5.63                |
| 4                          | -9.9318E+07          | -1.2720E-03                       | 9.7761E+07                 | 5.63                |

**Tabla 3.5 Resultados de las simulaciones de la celda de torque 2**

| Celda de carga de Torque 2 |                      |                                   |                            |                     |
|----------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------|
| Punto Crítico              | Esfuerzo Normal [Pa] | Deformación unitaria Normal [m/m] | Esfuerzo de Von Mises [Pa] | Factor de seguridad |
| 1                          | 1.0785E+08           | 1.4131E-03                        | 1.0617E+08                 | 5.18                |
| 2                          | -1.0979E+08          | -1.4322E-03                       | 1.0737E+08                 | 5.12                |
| 3                          | -8.6778E+07          | -1.0819E-03                       | 8.5820E+07                 | 6.41                |
| 4                          | 8.7324E+07           | 1.0959E-03                        | 8.6557E+07                 | 6.35                |

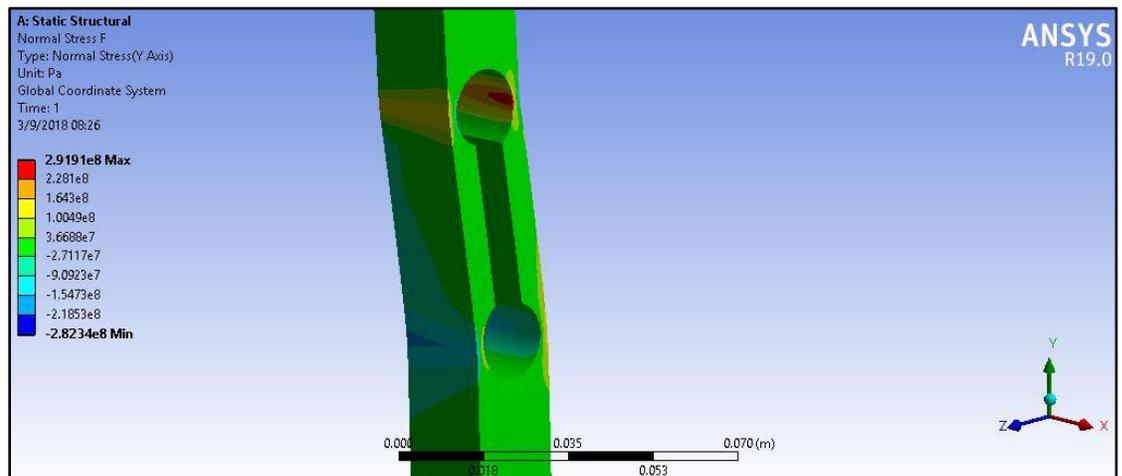
### 3.2.3.2 Celda de carga de fuerza

En la figura 3.10 se muestra las deformaciones que sufrió la celda de carga de fuerza en la simulación, se puede observar que el mayor valor de deformación unitaria fue 0.35757%, lo cual también está en el rango de aceptación por las galgas extensiométricas.



**Figura 3.10 Deformación unitaria de la celda de fuerza en ANSYS**

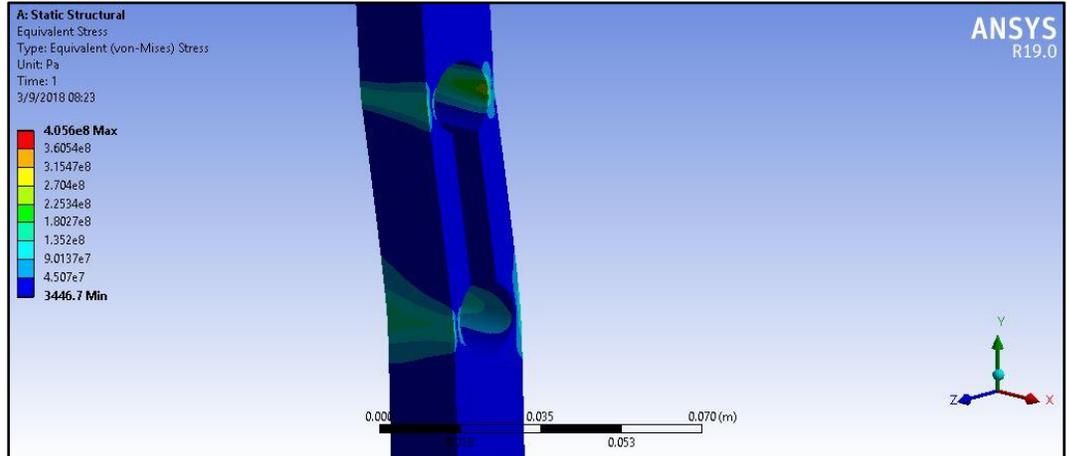
En la figura 3.11 se puede observar la distribución de los esfuerzos normales en la dirección Y de la celda de carga de fuera, estos tuvieron un máximo de  $2.9191 \times 10^8$  Pa, este es en la cara interior del concentrador de esfuerzo, así que no es uno de los puntos que estamos analizando donde se posicionará las galgas.



**Figura 3.11 Esfuerzos normales en las celdas de carga de fuerza en ANSYS**

En la figura 3.12 se muestra la distribución de los esfuerzos de Von Mises, con estos valores de obtuvo el factor de seguridad de cada punto crítico,

donde el valor más bajo es de 3.99. Este valor también confirma que el dimensionamiento de la celda de carga fue correcto.



**Figura 3.12 Esfuerzos de Von Mises en las celdas de carga de fuerza en ANSYS**

En la tabla 3.7 se muestran tabulados los valores de los resultados obtenidos de la simulación en los puntos críticos de la celda de carga de fuerza.

**Tabla 3.6 Resultados de las simulaciones de la celda de fuerza**

| Punto Crítico | Esfuerzo Normal [Pa] | Deformación unitaria Normal [m/m] | Esfuerzo de Von Mises [Pa] | Factor de seguridad |
|---------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------|
| 1             | -1.5251E+08          | -1.9741E-03                       | 1.3748E+08                 | 4.00                |
| 2             | 1.5282E+08           | 1.9775E-03                        | 1.3769E+08                 | 3.99                |
| 3             | 1.3872E+08           | 1.7373E-03                        | 1.2178E+08                 | 4.52                |
| 4             | -1.3821E+08          | -1.7307E-03                       | 1.2129E+08                 | 4.53                |

### 3.3 Calibración

En esta sección se presentan las curvas de calibración obtenidas de las celdas de cargas con el sistema de adquisición de datos de NI9219

Durante la construcción del instrumento se realizaron pruebas con el prototipo impreso en 3D usando ABS y otro prototipo usando los materiales mencionados en la sección de metodología.

Se obtuvo curvas de calibración para las celdas de carga usando medio puente y puente completo.

En la figura 3.13 se presenta la curva de calibración a puente completo de la celda de fuerza, mediante métodos de regresión lineal se obtuvo la siguiente ecuación de la recta:

$$y = 0.0215x + 0.208$$

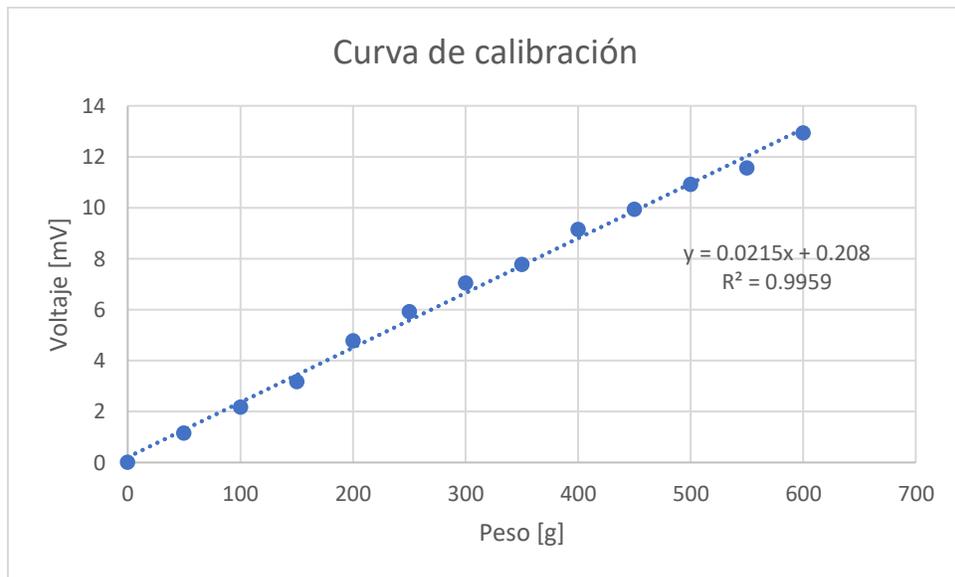
Con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9965.

También se realizó la calibración de la misma celda a cuarto de puente por problemas con las galgas, la calibración se puede ver en la figura 3.14 donde se obtuvo la ecuación:

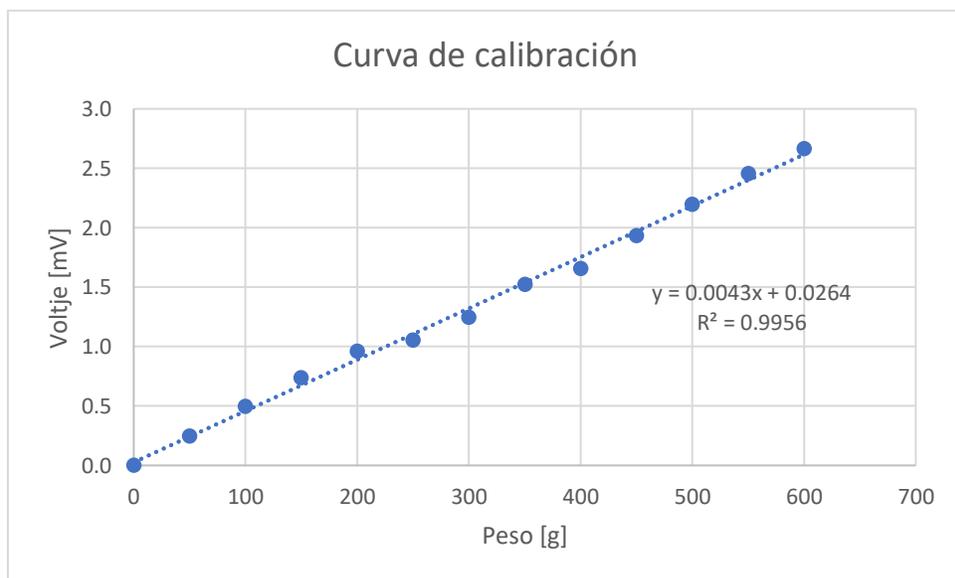
$$y = 0.0043x + 0.1761$$

Con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9965.

Comparado los voltajes de las dos configuraciones se puede observar que los valores de voltaje del puente completo son en promedio cuatro veces que el de cuarto de puente, dando como consecuencia una mayor sensibilidad de lectura en el puente completo.



**Figura 3.13 Curva de calibración de celda de fuerza – Puente completo**



**Figura 3.14 Curva de calibración de celda de fuerza – Cuarto de puente**

En las figuras 3.15 y 3.16 están las curvas de calibración obtenidas para la celda de torque. Para la configuración de puente completo se obtuvo la ecuación:

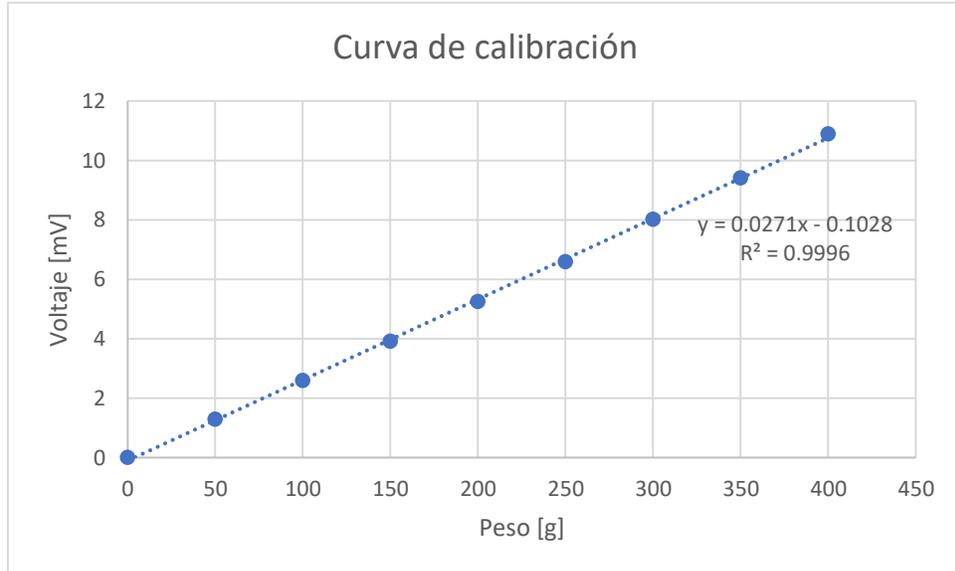
$$y = 0.0271x - 0.1028$$

Con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9996.

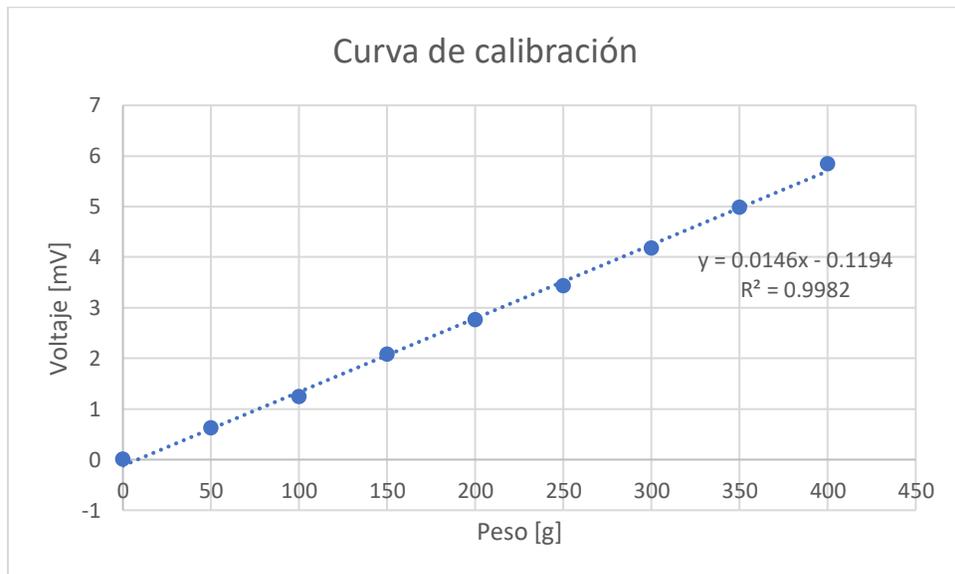
La ecuación de obtenida para la configuración de medio puente es:

$$y = 0.0146x + 0.1194$$

Con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9982.



**Figura 3.15** Curva de calibración de celda de torque – Puente completo



**Figura 3.16** Curva de calibración de celda de torque – Medio puente

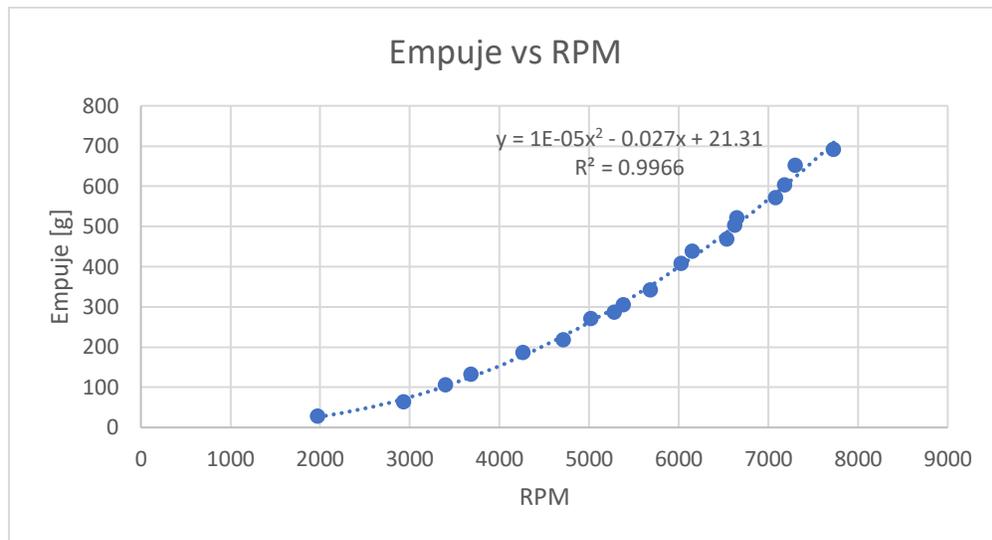
### 3.4 Mediciones

Las mediciones se realizaron usando el motor E-flite Power 32 770Kv con una hélice de aspa doble de 10"x4.5". Se realizaron aumentos progresivos en el throttle del controlador para realizar las lecturas. En la tabla 3.8 se muestran las mediciones obtenidas donde se muestra la fuerza del empuje, el torque causado junto los RPM de la hélice, el voltaje y corriente entrega por la batería.

**Tabla 3.7 Mediciones del prototipo**

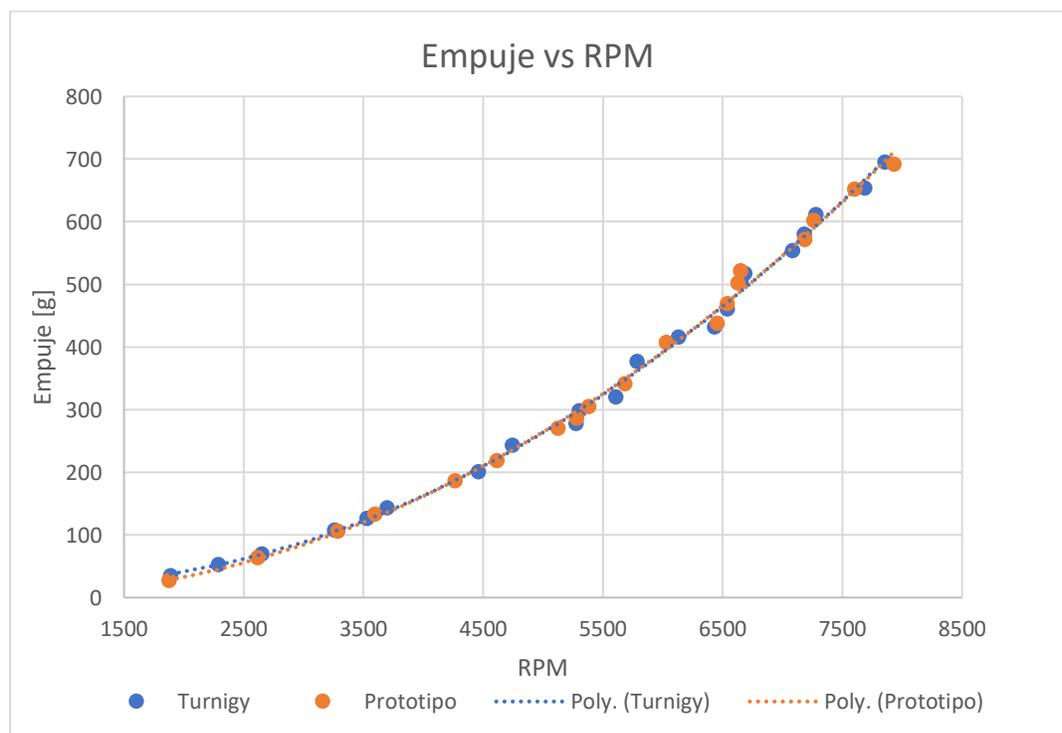
| Throttle [%] | Fuerza [kg] | Fuerza torque [kg] | RPM  | Voltaje [V] | Corriente [A] |
|--------------|-------------|--------------------|------|-------------|---------------|
| 0            | 0.00        | 0.000              | 0    | 14.97       | 0.00          |
| 5            | 25.94       | 0.027              | 2533 | 14.98       | 0.61          |
| 10           | 55.63       | 0.043              | 3549 | 14.86       | 1.16          |
| 15           | 102.65      | 0.069              | 4971 | 14.82       | 2.27          |
| 20           | 144.88      | 0.089              | 5660 | 14.70       | 3.05          |
| 25           | 187.10      | 0.097              | 6414 | 14.54       | 4.12          |
| 30           | 216.52      | 0.114              | 6572 | 14.39       | 4.68          |

En la gráfica 3.17 se muestra la curva de Empuje-RPM para caracterizar el motor. La curva presenta un comportamiento polinomial cuadrática como se menciona en la ecuación 2,19.



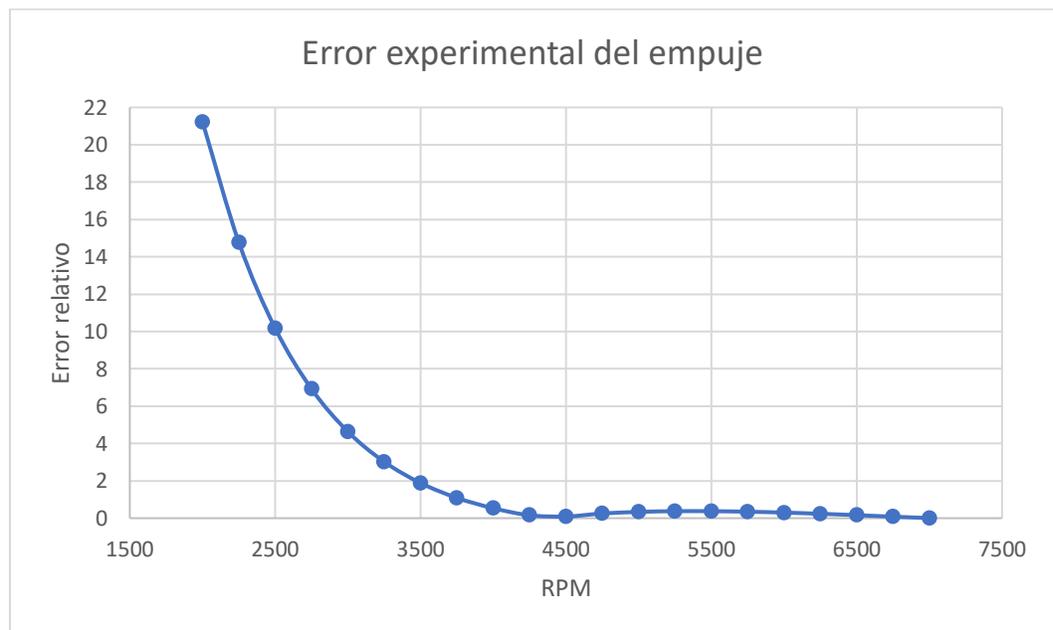
**Figura 3.17 Curva Empuje-RPM del motor-hélice**

Para la validación de los datos obtenidos se realizó la comparación de la curva de empuje obtenida con un instrumento de medición comercial y el prototipo diseñado. En la gráfica 3.18 se encuentran las dos curvas obtenidas.



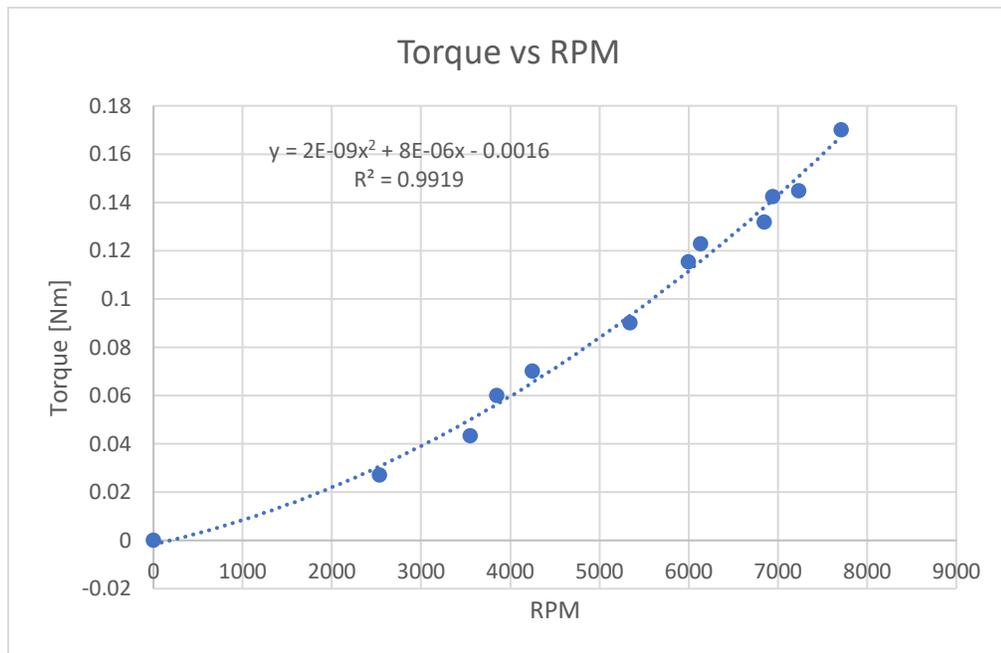
**Figura 3.18 Comparación de curva de empuje**

Se obtuvo el error absoluto entre las curvas obtenidas mediante la fórmula de error experimental. En la figura 3.19 se puede apreciar cómo se comporta el error a lo largo de las curvas. En velocidad bajas, aproximadamente menos de 4000 RPM existe un error alto que llega hasta 9 unidades de diferencia. En velocidades superiores a 4000 RPM la diferencia no llega a superar las 2 unidades.



**Figura 3.19 Error absoluto entre las dos curvas de empuje**

En la figura 3.20 se encuentra la curva Torque vs RPM que también presenta un comportamiento cuadrático como se mencionó en la ecuación 2,21.



**Figura 3.20 Curva Torque-RPM del motor-hélice**

### 3.5 Análisis de costos

En la tabla 3.9 se muestra los costos de los materiales usados para la construcción del prototipo en donde se tiene un costo final de \$543.20, en donde el mayor gasto viene en la mecanización de las piezas. La impresión 3D del prototipo de ABS costo \$60.00, si el instrumento fuera elaborado de esta manera se reducir el costo final a \$221.20.

**Tabla 3.8 Costo del instrumento**

| Componentes                    | Cantidad | Precio unitario | Precio total |
|--------------------------------|----------|-----------------|--------------|
| <b>Electrico y electronico</b> |          |                 |              |
| Galgas extensometricas         | 10       | \$ 14.00        | \$ 140.00    |
| Cables Jumpers 22 AWG          | 40       | \$ 0.07         | \$ 2.80      |
| Terminales                     | 8        | \$ 1.00         | \$ 8.00      |
| <b>Mecanizacion</b>            |          |                 |              |
| Soporte motor                  | 1        | \$ 118.00       | \$ 118.00    |
| Union en L                     | 6        | \$ 20.00        | \$ 120.00    |
| Platina de union               | 2        | \$ 8.00         | \$ 16.00     |
| Celda de carga grande          | 1        | \$ 48.00        | \$ 48.00     |
| Celda de carga pequena         | 2        | \$ 40.00        | \$ 80.00     |
| <b>Otros</b>                   |          |                 |              |
| Pernos M6                      | 20       | \$ 0.31         | \$ 6.20      |
| Tuercas M6                     | 20       | \$ 0.22         | \$ 4.40      |
| <b>Total</b>                   |          |                 | \$ 543.40    |

Realizando un flujo de caja que se encuentra en el Anexo D para ver la viabilidad del proyecto se obtuvo un VAN de \$374.96 y un TIR del 13% con una inversión inicial de \$1300.00.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Se realizó el diseño de forma del instrumento, tomando en cuenta tamaños y formas de celdas de carga tipo viga comerciales, se diseñaron dos celdas de carga para poder medir el torque y una celda de carga para medir la fuerza de empuje. La principal diferencia entre ellas era magnitud de la fuerza que podían soportar.
- Se calculó los esfuerzos y deformaciones teóricas que tendría el instrumento según nuestro modelo matemático. Entre estos valores están los de factor de seguridad, los cuales salieron mayor que uno, lo cual indico que nuestro modelo no tendría falla estática con las cargas que indicaba el requerimiento.
- Se desarrollo la simulación en ANSYS donde se pudo comprobar el correcto dimensionamiento de las celdas de carga, ya que todos los factores de seguridad son mayores que uno. También, se pudo comprobar las deformaciones unitarias de los puntos críticos de cada una de las celdas de carga, estos valores también estaban debajo del límite de la capacidad de deformación de las galgas extensiométrica que usamos.
- Se construyo dos prototipos del instrumento. El primero fue un prototipo impreso en 3D de material ABS y el segundo de Duraluminio y Acero A36. La diferencia entre estos dos prototipos se muestra principalmente en las cargas máximas que soportan cada uno.
- Se logro diseñar el sistema de adquiredor de datos usando LabView para realizar la calibración y mediciones del instrumento.
- Se realizo la calibración correcta de las celdas de carga siguiendo la norma ASTM E74-06, realizando curvas de calibración para diversas configuraciones de galgas. Entre estas configuraciones de puente completo, medio puente y

cuarto de puente se pudo determinar cómo se reduce por la mitad la sensibilidad de lectura mientras se reduce el tiempo de puente.

- Se construyó una gráfica de Empuje-RPM y Torque-RPM demostrando que el empuje y torque del motor tiene un comportamiento cuadrático en relación con su velocidad de giro. Estos datos se pudieron validar realizando la comparación de la curva obtenida con el prototipo y la curva obtenida con un instrumento de medición comercial. En velocidades menores a 4000 RPM se obtuvo errores más altos que a velocidades mayores de 4000 RPM, esta zona de baja velocidad no son las zonas de operación del dron por lo que no es necesario una medición precisa de esta zona.
- Se diseñó un sistema de adquisición de datos de bajo costo para implementación futura del prototipo basado en Arduino en donde aparte del empuje y torque también podrá medir rpm, corriente y voltaje.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Cuando se diseña una celda de carga se recomienda no sobredimensionar el tamaño de la celda para una carga máxima dado que va a tener menor sensibilidad en las cargas más pequeñas.
- En el diseño de forma del instrumento hay que tener en cuenta el método de sujeción de este, hacer que los elementos de sujeción cubran toda la base del instrumento, y así minimizar cualquier efecto del exterior.
- Al momento de dimensionar el concentrador de esfuerzo para las celdas de carga tener en cuenta el espacio que queda entre este y el mismo, ya que si es muy pequeño puede llegar a afectar enormemente la integridad de la celda para cargas muy bajas.
- Al momento de realizar la calibración de las celdas se recomienda asegurarse de que exista el menor ruido electromagnético posible para evitar errores en la lectura. Este ruido se puede eliminar usando cables apantallados, realizando conexión con soldadura correcta y haciendo una conexión a tierra.

# BIBLIOGRAFÍA

- ASTM E74-06. (2006). *Standard Practice of Calibration of Force-Measuring Instruments for Verifying the Force Indication of Testing Machines*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
- Espinosa, M. (1995). *Diseño y construcción de una celda de carga*. Nuevo Leon, Mexico: Universidad Autonoma de Nuevo Leon.
- Hoffmann, K. (s.f.). *An Introduction to Stress Analysis Stress Analysis*. HBM.
- Kumar, A., Kumar, S., Chaturvedi, V., & Chandra , R. (October de 2012). Design Studies and Optimization of Position of Strain Gauge. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3(10).
- Maida, J. (2018). *Global Commercial Drones Market 2018-2022*. USA: Technavio.
- Marchidan , A., Sullivan, T., & Palladino, J. (2012). Load Cell Design Using COMSOL Multiphysics. *COMSOL Conference*. Boston.
- Moaveni, S. (1999). *Finite Analysis Theory and Application with ANSYS*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Morris, A. (2018). *Measurement and Instrumentation Principles*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Norton, R. (2011). *Diseño de Máquinas*. Mexico: Pearson Educación.
- Operating Instructions and Specifications - NI9219. (2009). Austin, Texas, USA: National Instruments.
- Popov. (2000). *Mecánica de sólidos*. Mexico: Pearson Educación.
- Silver, B., Mazur, M., Wisniewski, A., & Agnieszka, B. (2017). *Welcome to the era of drone-powered solutions*. USA: PwC.
- Vidal, J. (2016). *Diseño, desarrollo y construcción de bancos de pruebas para un UAV multi-rotor*. España: Univerisda de La Rioja.

# **ANEXOS**

## ANEXO A – MEDICIONES

### Calibración

| Celda de fuerza - Punte completo |                      |              |              |          |          |
|----------------------------------|----------------------|--------------|--------------|----------|----------|
| Masa<br>[g]                      | Voltage lectura [mV] |              |              |          |          |
|                                  | Lectura<br>1         | Lectura<br>2 | Lectura<br>3 | Promedio | Encerado |
| 0                                | 28.682               | 28.720       | 28.723       | 28.708   | 0.000    |
| 50                               | 29.673               | 29.683       | 29.709       | 29.688   | 0.980    |
| 100                              | 30.734               | 30.713       | 30.705       | 30.717   | 2.009    |
| 150                              | 31.804               | 31.884       | 31.954       | 31.881   | 3.173    |
| 200                              | 33.142               | 33.160       | 33.159       | 33.153   | 4.445    |
| 250                              | 34.265               | 34.366       | 34.230       | 34.287   | 5.579    |
| 300                              | 35.354               | 35.306       | 35.368       | 35.343   | 6.635    |
| 350                              | 36.365               | 36.373       | 36.425       | 36.388   | 7.680    |
| 400                              | 37.510               | 37.530       | 37.526       | 37.522   | 8.814    |
| 450                              | 38.451               | 38.555       | 38.453       | 38.486   | 9.778    |
| 500                              | 39.518               | 39.409       | 39.541       | 39.489   | 10.781   |
| 550                              | 40.405               | 40.439       | 40.425       | 40.423   | 11.715   |
| 600                              | 41.543               | 41.545       | 41.437       | 41.508   | 12.800   |

| Celda de fuerza - Cuarto de puente |                      |              |              |          |          |
|------------------------------------|----------------------|--------------|--------------|----------|----------|
| Masa<br>[g]                        | Voltage lectura [mV] |              |              |          |          |
|                                    | Lectura<br>1         | Lectura<br>2 | Lectura<br>3 | Promedio | Encerado |
| 0                                  | 0.132                | 0.158        | 0.159        | 0.150    | 0.000    |
| 50                                 | 0.398                | 0.393        | 0.402        | 0.398    | 0.248    |
| 100                                | 0.638                | 0.646        | 0.652        | 0.646    | 0.496    |
| 150                                | 0.884                | 0.892        | 0.891        | 0.889    | 0.739    |
| 200                                | 1.103                | 1.112        | 1.122        | 1.112    | 0.963    |
| 250                                | 1.174                | 1.213        | 1.222        | 1.203    | 1.053    |
| 300                                | 1.381                | 1.394        | 1.409        | 1.395    | 1.245    |
| 350                                | 1.661                | 1.675        | 1.681        | 1.672    | 1.522    |
| 400                                | 1.802                | 1.800        | 1.813        | 1.805    | 1.655    |
| 450                                | 2.027                | 2.091        | 2.126        | 2.081    | 1.932    |
| 500                                | 2.326                | 2.360        | 2.357        | 2.348    | 2.198    |
| 550                                | 2.607                | 2.607        | 2.601        | 2.605    | 2.455    |
| 600                                | 2.823                | 2.814        | 2.809        | 2.815    | 2.666    |

| <b>Celda de torque - Puente completo</b> |                             |                  |                  |                 |                 |
|--|-----------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Masa [g]</b>                          | <b>Voltaje lectura [mV]</b> |                  |                  |                 |                 |
|  | <b>Lectura 1</b>            | <b>Lectura 2</b> | <b>Lectura 3</b> | <b>Promedio</b> | <b>Encerado</b> |
| 0  | 2.051                       | 2.043            | 2.041            | 2.045           | 0.000           |
| 50                                       | 3.329                       | 3.330            | 3.336            | 3.331           | 1.287           |
| 100                                      | 4.621                       | 4.632            | 4.648            | 4.633           | 2.589           |
| 150                                      | 5.952                       | 5.964            | 5.967            | 5.961           | 3.916           |
| 200                                      | 7.281                       | 7.290            | 7.299            | 7.290           | 5.245           |
| 250                                      | 8.637                       | 8.636            | 8.636            | 8.636           | 6.591           |
| 300                                      | 10.040                      | 10.074           | 10.083           | 10.065          | 8.021           |
| 350                                      | 11.442                      | 11.448           | 11.458           | 11.449          | 9.404           |
| 400                                      | 12.921                      | 12.945           | 12.931           | 12.932          | 10.887          |

| <b>Celda de torque - Medio puente</b> |                             |                  |                  |                 |                 |
|---------------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Masa [g]</b>                       | <b>Voltaje lectura [mV]</b> |                  |                  |                 |                 |
|                                       | <b>Lectura 1</b>            | <b>Lectura 2</b> | <b>Lectura 3</b> | <b>Promedio</b> | <b>Encerado</b> |
| 0                                     | 0.059                       | 0.026            | 0.044            | 0.043           | 0.000           |
| 50                                    | 0.671                       | 0.717            | 0.602            | 0.663           | 0.620           |
| 100                                   | 1.261                       | 1.288            | 1.287            | 1.278           | 1.235           |
| 150                                   | 2.071                       | 2.068            | 2.225            | 2.121           | 2.078           |
| 200                                   | 2.797                       | 2.822            | 2.796            | 2.805           | 2.762           |
| 250                                   | 3.489                       | 3.478            | 3.460            | 3.476           | 3.433           |
| 300                                   | 4.193                       | 4.244            | 4.210            | 4.216           | 4.173           |
| 350                                   | 5.014                       | 5.050            | 4.993            | 5.019           | 4.976           |
| 400                                   | 5.879                       | 5.899            | 5.869            | 5.882           | 5.839           |

| <b>Celda de torque - Cuarto de puente</b> |                             |                  |                  |                 |                 |
|---|-----------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Masa [g]</b>                           | <b>Voltaje lectura [mV]</b> |                  |                  |                 |                 |
|   | <b>Lectura 1</b>            | <b>Lectura 2</b> | <b>Lectura 3</b> | <b>Promedio</b> | <b>Encerado</b> |
| 0   | 0.146                       | 0.148            | 0.148            | 0.147           | 0.000           |
| 50  | 0.447                       | 0.452            | 0.464            | 0.454           | 0.307           |
| 100                                       | 0.748                       | 0.757            | 0.764            | 0.757           | 0.609           |
| 150                                       | 1.069                       | 1.072            | 1.069            | 1.070           | 0.923           |
| 200                                       | 1.378                       | 1.384            | 1.389            | 1.384           | 1.236           |
| 250                                       | 1.705                       | 1.705            | 1.714            | 1.708           | 1.561           |
| 300                                       | 2.006                       | 2.016            | 2.022            | 2.015           | 1.867           |
| 350                                       | 2.253                       | 2.261            | 2.267            | 2.260           | 2.113           |
| 400                                       | 2.588                       | 2.592            | 2.594            | 2.591           | 2.444           |

## Pruebas prototipo

| Prototipo             |           |           |          |          |            |      |
|-----------------------|-----------|-----------|----------|----------|------------|------|
| Fuerza de empuje [mV] |           |           |          |          | Fuerza [g] | RPM  |
| Lectura 1             | Lectura 2 | Lectura 3 | Promedio | Encerado |            |      |
| 0.35609               | 0.35561   | 0.36071   | 0.35747  | 0.00000  | 0.00000    | 0    |
| 0.50069               | 0.50576   | 0.50118   | 0.50254  | 0.14507  | 27.59853   | 1875 |
| 0.65596               | 0.65783   | 0.66206   | 0.65862  | 0.30115  | 63.89504   | 2616 |
| 0.83093               | 0.84971   | 0.83765   | 0.83943  | 0.48196  | 105.94514  | 3285 |
| 0.92994               | 0.96786   | 0.96572   | 0.95451  | 0.59704  | 132.70716  | 3594 |
| 1.16652               | 1.18881   | 1.19621   | 1.18385  | 0.82638  | 186.04204  | 4265 |
| 1.30184               | 1.33362   | 1.33186   | 1.32244  | 0.96497  | 218.27305  | 4616 |
| 1.55448               | 1.54950   | 1.53658   | 1.54686  | 1.18939  | 270.46219  | 5124 |
| 1.63317               | 1.60360   | 1.61129   | 1.61602  | 1.25855  | 286.54747  | 5280 |
| 1.72468               | 1.68691   | 1.67870   | 1.69677  | 1.33930  | 305.32498  | 5382 |
| 1.85032               | 1.85218   | 1.85170   | 1.85140  | 1.49393  | 341.28700  | 5683 |
| 2.18446               | 2.09008   | 2.13107   | 2.13521  | 1.77774  | 407.28778  | 6031 |
| 2.25907               | 2.27640   | 2.26445   | 2.26664  | 1.90917  | 437.85444  | 6453 |
| 2.43260               | 2.39070   | 2.37687   | 2.40006  | 2.04259  | 468.88157  | 6537 |
| 2.56797               | 2.54799   | 2.51443   | 2.54347  | 2.18600  | 502.23196  | 6626 |
| 2.63481               | 2.61083   | 2.63501   | 2.62689  | 2.26942  | 521.63196  | 6651 |
| 2.86790               | 2.84050   | 2.81518   | 2.84120  | 2.48373  | 571.47150  | 7185 |
| 3.00135               | 2.95417   | 2.96744   | 2.97432  | 2.61685  | 602.43119  | 7263 |
| 3.18680               | 3.18062   | 3.19113   | 3.18619  | 2.82872  | 651.70173  | 7604 |
| 3.34878               | 3.34817   | 3.37378   | 3.35691  | 2.99944  | 691.40560  | 7929 |

## Mediciones instrumento comercial

| Turnigy    |      |
|------------|------|
| Fuerza [g] | RPM  |
| 0          | 0    |
| 35         | 1890 |
| 53         | 2287 |
| 70         | 2649 |
| 108        | 3260 |
| 126        | 3528 |
| 143        | 3696 |
| 201        | 4459 |
| 243        | 4744 |
| 278        | 5276 |
| 298        | 5300 |
| 320        | 5607 |
| 377        | 5786 |
| 416        | 6133 |
| 432        | 6431 |
| 461        | 6539 |
| 505        | 6654 |
| 517        | 6684 |
| 554        | 7083 |
| 580        | 7183 |
| 611        | 7281 |
| 654        | 7689 |
| 695        | 7854 |

## ANEXO B – MANUAL DE OPERACIÓN NI9219

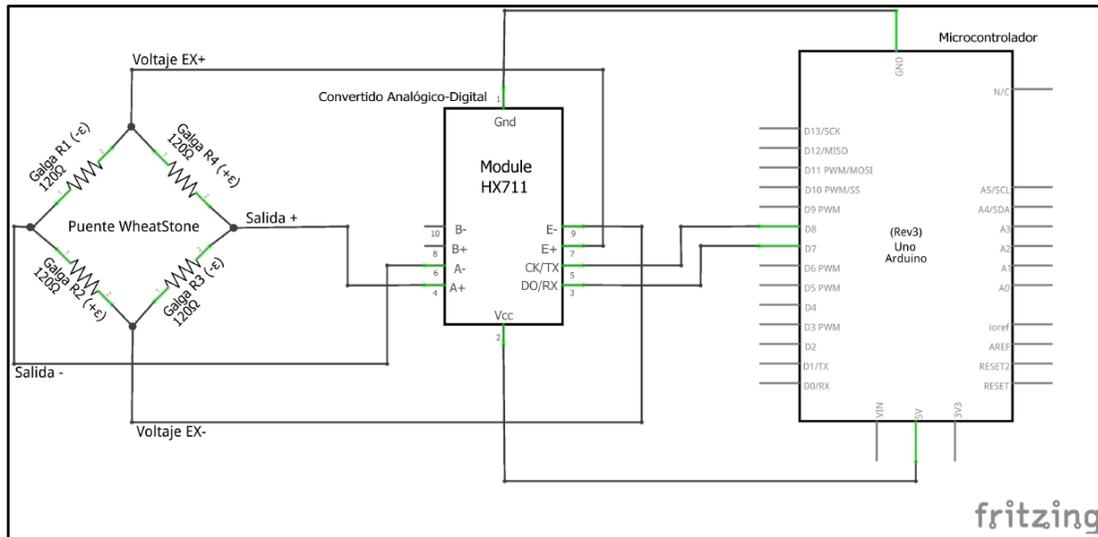
**Table 2.** NI 9219 Terminal Assignments by Mode

| Mode              | Terminal |    |     |    |     |    |
|-------------------|----------|----|-----|----|-----|----|
|                   | 1        | 2  | 3   | 4  | 5   | 6  |
| Voltage           | T+       | T- | —   | HI | LO  | —  |
| Current           | T+       | T- | HI  | —  | LO  | —  |
| 4-Wire Resistance | T+       | T- | EX+ | HI | EX- | LO |
| 2-Wire Resistance | T+       | T- | HI  | —  | LO  | —  |
| Thermocouple      | T+       | T- | —   | HI | LO  | —  |
| 4-Wire RTD        | T+       | T- | EX+ | HI | EX- | LO |
| 3-Wire RTD        | T+       | T- | EX+ | —  | EX- | LO |
| Quarter-Bridge    | T+       | T- | HI  | —  | LO  | —  |
| Half-Bridge       | T+       | T- | EX+ | HI | EX- | —  |
| Full-Bridge       | T+       | T- | EX+ | HI | EX- | LO |
| Digital In        | T+       | T- | —   | HI | LO  | —  |
| Open Contact      | T+       | T- | HI  | —  | LO  | —  |

# ANEXO C – IMPLEMENTACION DE SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS A BASE DE ARDUINO

## Diseño eléctrico de las celdas de carga

En la figura se muestra el esquema del sistema de medición de la celda de carga.



Circuito de las celdas de carga

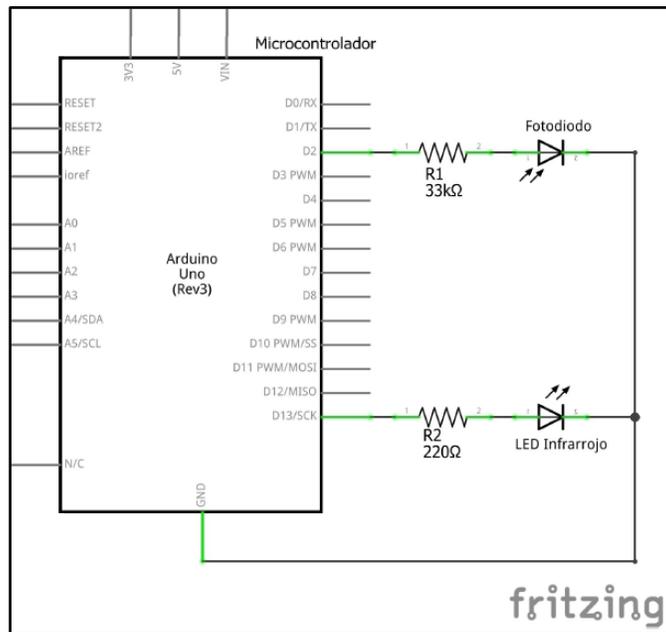
Para la amplificación del sistema y su compatibilidad con Arduino se usará el módulo HX711, que es un convertidor analógico-digital de 24 bits con una ganancia de 64 y 128.

## Diseño del tacómetro óptico

Para el diseño del tacómetro óptico se usará un LED infrarrojo que cumple la función de emisor de la señal a medir y un fotodiodo como receptor de la señal.

Al fotodiodo se lo conecta a un pin digital del Arduino con una resistencia en serie de valor alto para obtener una mayor sensibilidad, el otro terminal del fotodiodo se lo conecta a tierra. El LED infrarrojo será conectado a otro pin digital del Arduino con una resistencia para limitar la corriente que pasa a través de ella.

La manera en funciona este circuito es que se emite una señal continua del emisor al receptor, en el momento en que se interrumpe la señal el fotodiodo pasa de HIGH a LOW llamando a una función de contador en donde se fue registrando las interrupciones en un tiempo determinado. En la figura encuentra el circuito usado para el tacómetro óptico.



**Circuito del tacómetro óptico**

### Diseño del medidor de corriente y voltaje

En el medidor de corriente se usará el módulo ACS709 en donde toma la lectura de corriente mediante el efecto Hall. Este módulo se conecta en serie a la terminal positiva de la batería a usarse.

En la medición de voltaje se necesitará diseñar un divisor de voltaje ya que el Arduino solo permite leer hasta 5 V. Se considero un voltaje máximo de 60 V para la batería. La fórmula aplica para el divisor es la siguiente:

$$V_l = \frac{V_e * R_2}{(R_1 + R_2)}$$

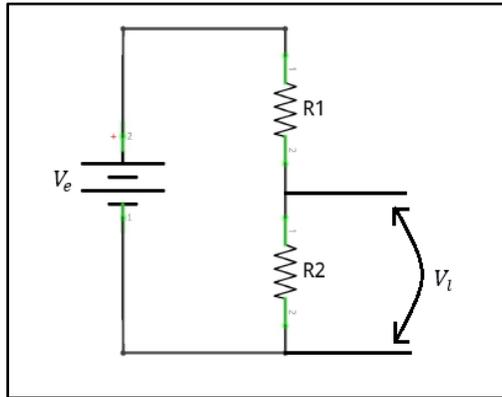
En donde:

$V_e$  es el voltaje de la batería

$V_l$  es el voltaje de lectura

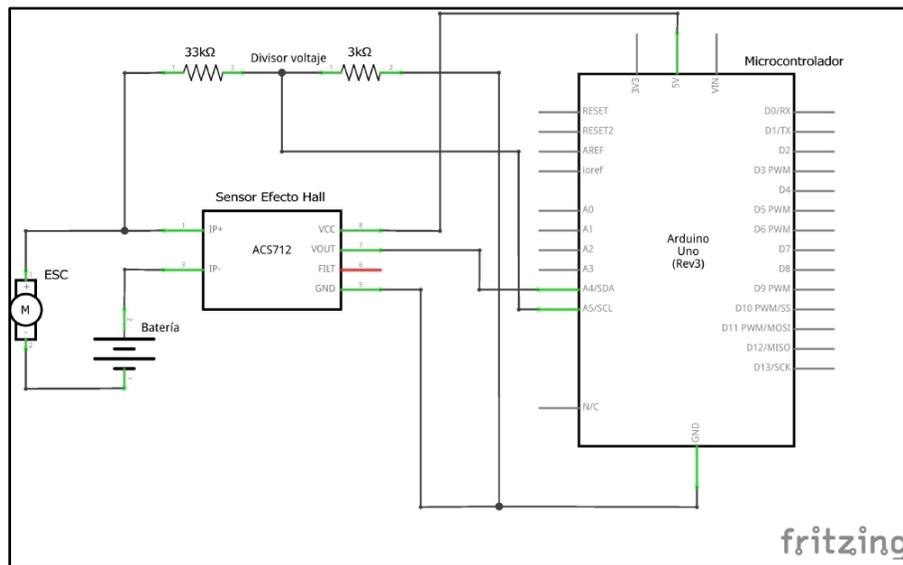
$R_1, R_2$  son las resistencias del divisor

La figura muestra el circuito que se usara para el divisor de voltaje.



**Divisor de voltaje**

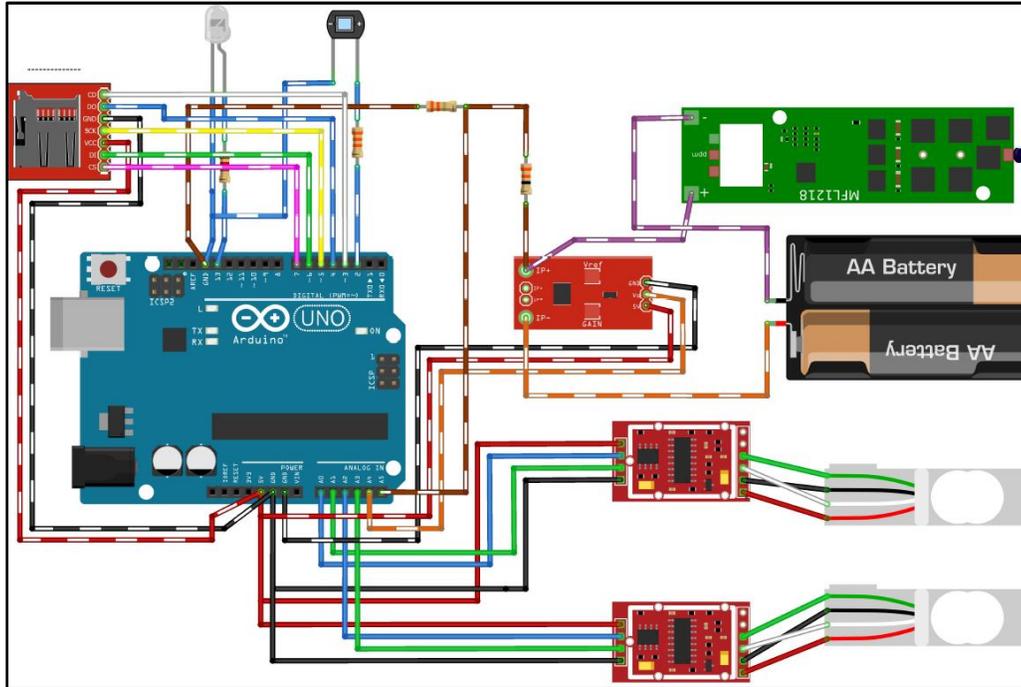
Se considero los valores estándares de resistencia y obtuvimos  $33k\ \Omega$  como la resistencia  $R_1$  y  $3k\ \Omega$  como la resistencia  $R_2$ . La figura presenta el circuito completo del sensor de corriente y el divisor de voltaje.



**Circuito del sensor de voltaje y corriente**

## Arduino

En la figura se muestra el esquema del sistema de adquisición de datos de bajo costo

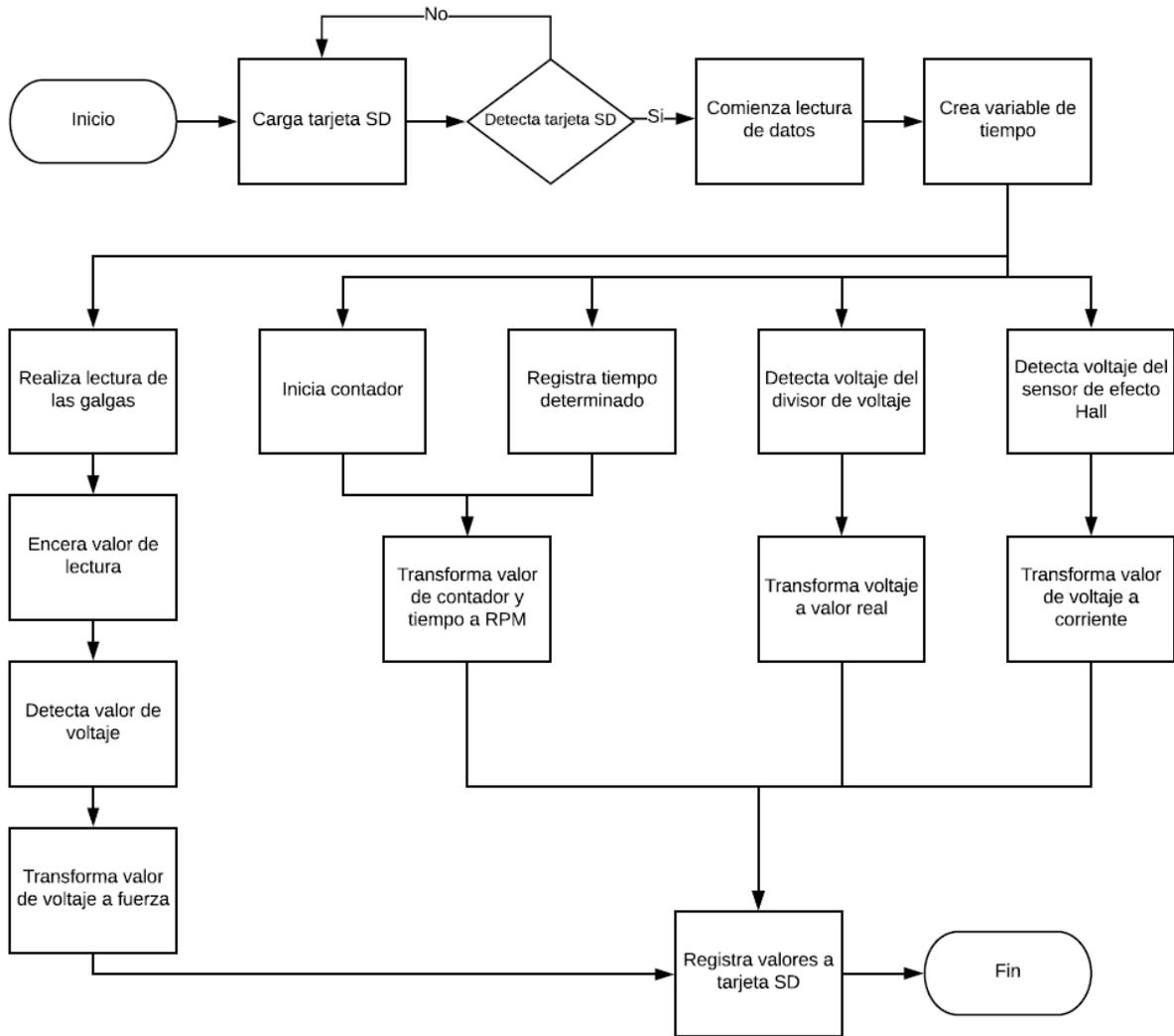


**Esquema del sistema de adquisición de datos basado en Arduino**

El sistema realiza la adquisición de los datos usando librerías creadas para cada módulo compatible con el Arduino. Las variables son almacenadas en un archivo de texto para que luego puedan ser importadas a una hoja de cálculo.

## Diagrama de flujo

Se muestra el diagrama de flujo que usara el Arduino para realizar las mediciones



## Código

```
#include <SD.h>
```

```
#include <HX711_ADC.h>
```

```
#include <Wire.h>
```

```
HX711_ADC CeldaF(4, 5);
```

```
HX711_ADC CeldaT(6, 7);
```

```
File myFile;
```

```
int PinIR = 13;
```

```
int PinEstado = 12;
```

```
volatile byte contador;
```

```
volatile int status;
```

```
unsigned int rpm;
```

```
unsigned long tiempo;
```

```
void rpm_contador() //Funcion para el contador de rpm
```

```
{
```

```
    contador++;
```

```
    if (status == LOW) {
```

```
        status = HIGH;
```

```
    } else {
```

```
        status = LOW;
```

```
    }
```

```

    digitalWrite(PinEstado, status);
}

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    Serial.print("Iniciando SD ..."); //Inicia la tarjeta SD
    if (!SD.begin(5)) {
        Serial.println("No se pudo inicializar");
        return;
    }
    Serial.println("inicializacion exitosa");

    CeldaF.begin(); //Inicia la lectura de las celdas de carga
    CeldaF.start(2000);
    CeldaF.setCalFactor(1.0);
    CeldaT.begin();
    CeldaT.start(2000); //
    CeldaT.setCalFactor(1.0);

    attachInterrupt(0, rpm_contador, FALLING); //Configuracion tacometro
    pinMode(PinIR, OUTPUT);
    digitalWrite(PinIR, HIGH);
    pinMode(PinEstado, OUTPUT);
    contador = 0;
    rpm = 0;
    tiempo = 0;
    status = LOW;
}

void loop()

```

```
{
  delay(1000);
  detachInterrupt(0); //Calculo de rpm
  rpm = 30*1000/(millis() - tiempo)*contador;
  tiempo = millis();
  contador = 0;
  attachInterrupt(0, rpm_contador, FALLING);

  CeldaF.update(); //Lectura de celda de fuerza
  float Fuerza = CeldaF.getData();
  Serial.print("Empuje[g]:");
  Serial.print(Fuerza);

  CeldaT.update(); //Lectura de celda de torque
  float TF = CeldaF.getData();
  float Torque = TF*0.001*9.8*0.0465*2;
  Serial.print("Torque[Nm]:");
  Serial.print(Torque);

  myFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE); //Crea el archivo
  if (myFile) {
    Serial.print("Escribiendo SD: ");
    myFile.print("RPM=");
    myFile.print(rpm,DEC);
    myFile.print(", Fuerza [g]=");
    myFile.print(Fuerza);
    myFile.print(", Torque [Nm]=");
    myFile.print(Torque);
    myFile.println(", sensor3=");
    myFile.close(); //cerramos el archivo
  }
}
```

```
Serial.print("RPM=");  
Serial.print(rpm,DEC);  
Serial.print(", Fuerza [g]=");  
Serial.print(Fuerza);  
Serial.print(", Torque [Nm]=");  
Serial.print(Torque);
```

```
} else {  
  Serial.println("Error al abrir el archivo");  
}  
delay(100);  
}
```

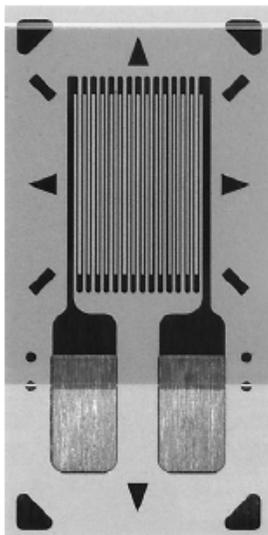


# ANEXO E – DATASHEET DE LAS GALGAS EXTENSIOMETRICAS



125UN

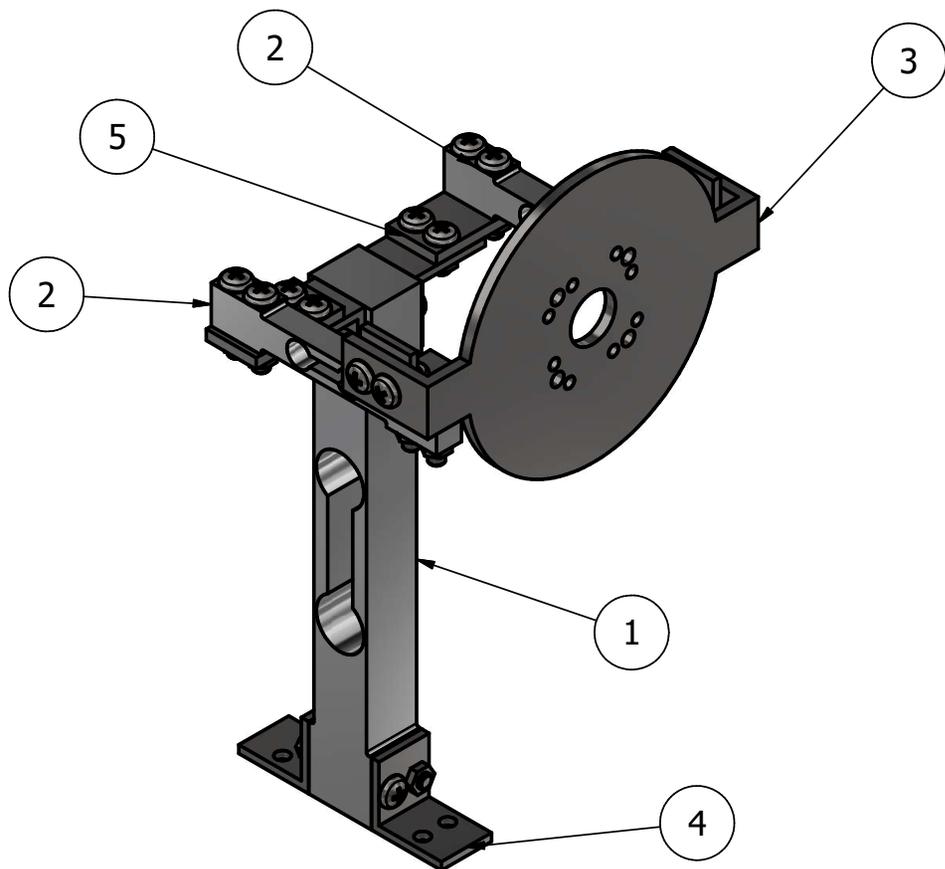
## General Purpose Strain Gages – Linear Pattern

| GAGE PATTERN DATA   |                       |   |  |                          |   |
|---|-----------------------|---|--|--------------------------|---|
|  <p style="text-align: center; margin-top: 10px;">actual size</p> |                       |   | <b>GAGE DESIGNATION</b><br><small>See Note 1</small> | <b>RESISTANCE (OHMS)</b> | <b>OPTIONS AVAILABLE</b><br><small>See Note 2</small> |
|   |                       |   | CEA-XX-125UN-120<br>CEA-XX-125UN-350                 | 120 ± 0.3%<br>350 ± 0.3% | <b>P2</b><br><b>P2</b>                                |
| <b>DESCRIPTION</b><br>General-purpose gage with narrow geometry. Exposed solder tab area 0.06 x 0.05 in (1.5 x 1.1 mm). See also 125UW pattern.     |                       |   |  |                          |   |
| <b>GAGE DIMENSIONS</b>  |                       | <b>Legend</b>   |  |                          | inch<br>millimeter                                    |
|   |                       | <small>ES = Each Section<br/>S = Section (S1 = Section 1)</small> | <small>CP = Complete Pattern<br/>M = Matrix</small>  |                          |   |
| <b>Gage Length</b>  | <b>Overall Length</b> | <b>Grid Width</b>   | <b>Overall Width</b>                                 | <b>Matrix Length</b>     | <b>Matrix Width</b>                                   |
| 0.125<br>3.18   | 0.275<br>6.99         | 0.100<br>2.54   | 0.120<br>3.05  | 0.38<br>9.7              | 0.19<br>4.8   |

| GAGE SERIES DATA – See Gage Series datasheet for complete specifications |   |              |                                  |
|--|---|--------------|----------------------------------|
| Series   | Description                             | Strain Range | Temperature Range                |
| CEA  | Universal general-purpose strain gages. | ±5%          | -100° to +350°F (-75° to +175°C) |

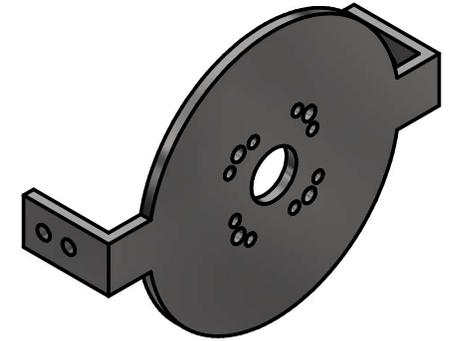
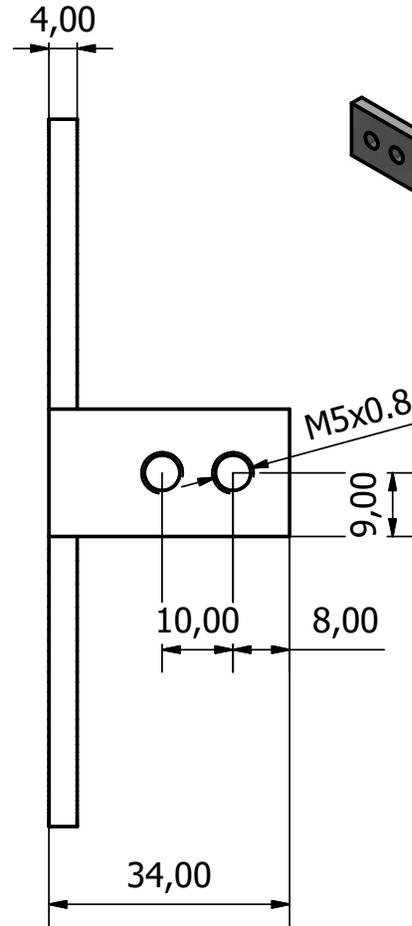
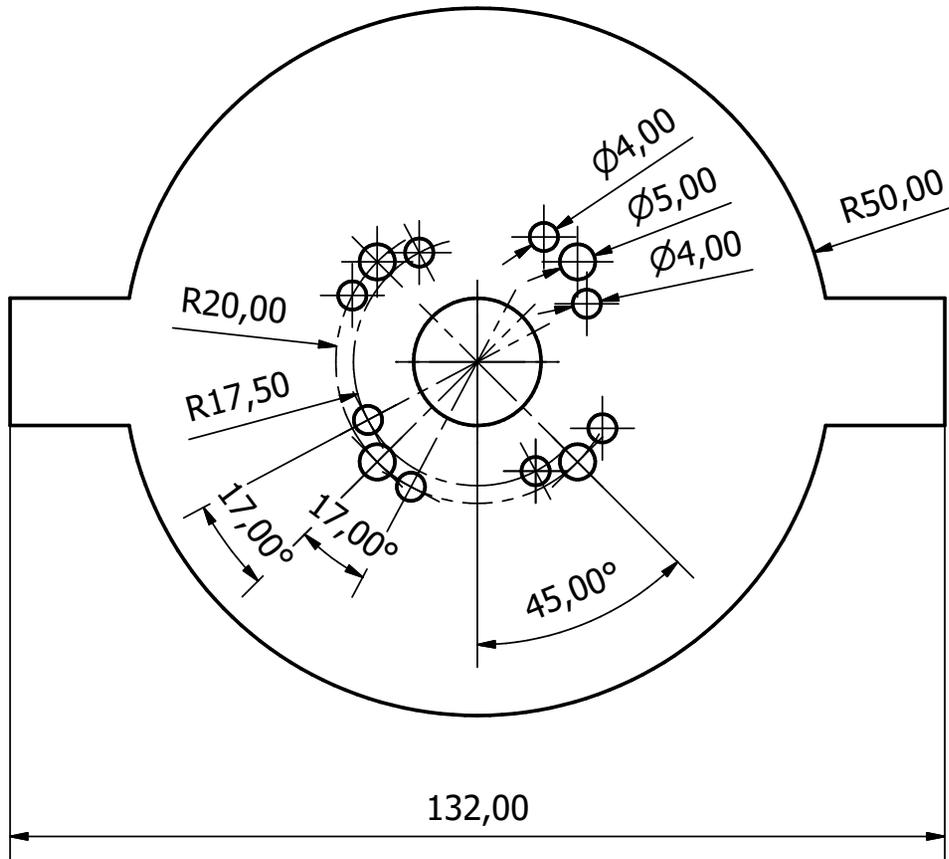
**Note 1:** Insert desired S-T-C number in spaces marked XX.  
**Note 2:** Products with designations and options shown in bold are not RoHS compliant.

## **ANEXO F – PLANOS DE CONSTRUCCIÓN**



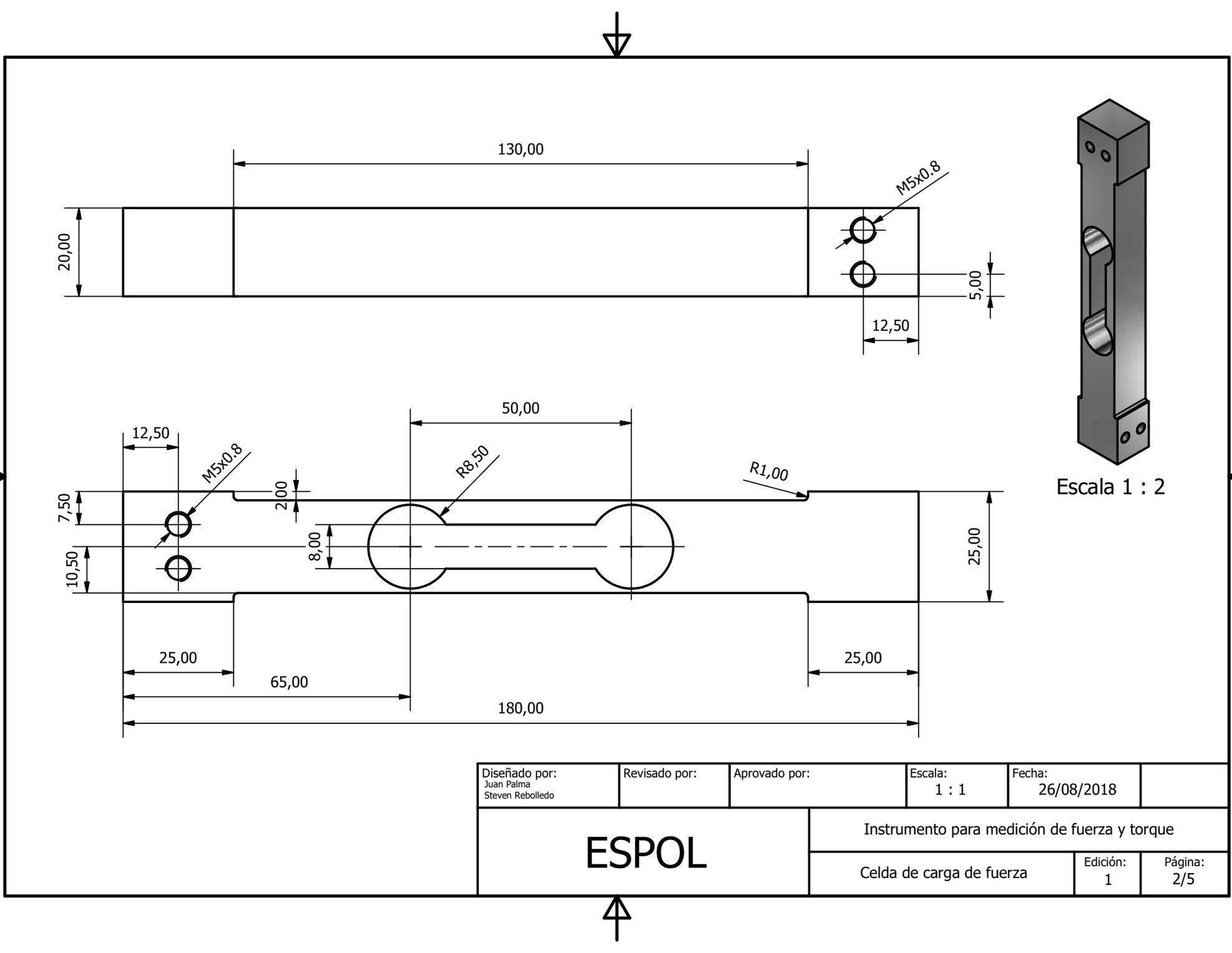
| Lista de partes |          |                          |
|-----------------|----------|--------------------------|
| Item            | Cantidad | Descripción              |
| 1               | 1        | Celda de carga de fuerza |
| 2               | 2        | Celda de carga de torque |
| 3               | 1        | Soporte de motor         |
| 4               | 6        | Union en L               |
| 5               | 2        | Platina                  |

|   |               |               |  |                      |         |
|---|---------------|---------------|--|----------------------|---------|
| Diseñado por:<br>Juan Palma<br>Steven Rebolledo | Revisado por: | Aprovado por: | Escala:<br>1 : 2                             | Fecha:<br>26/08/2018 |         |
| <b>ESPOL</b>                                    |               |               | Instrumento para medición de fuerza y torque |                      |         |
|   |               |               | Ensamble del instrumento                     | Edición:<br>1        | Página: |

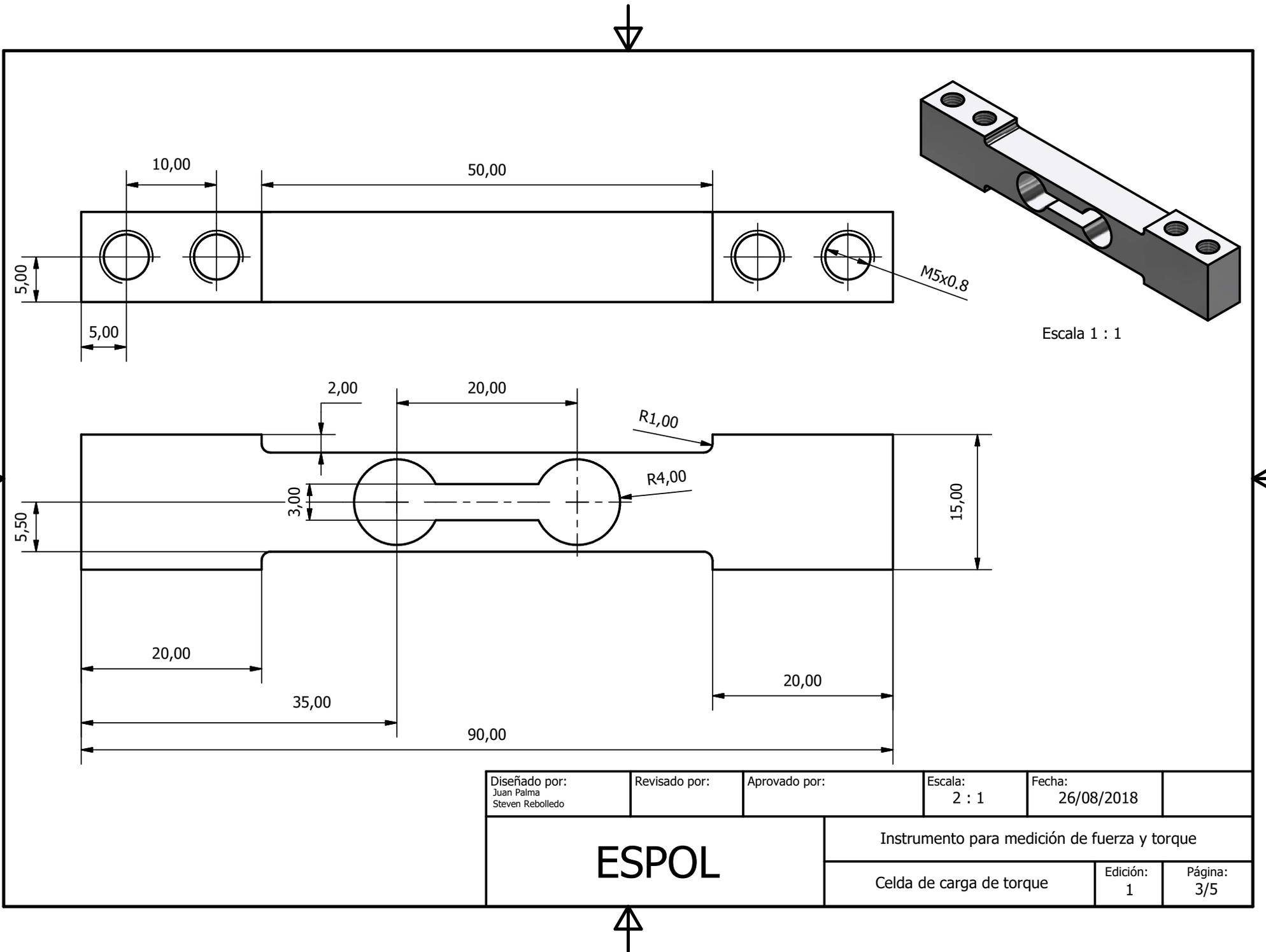


Escala 1 : 2

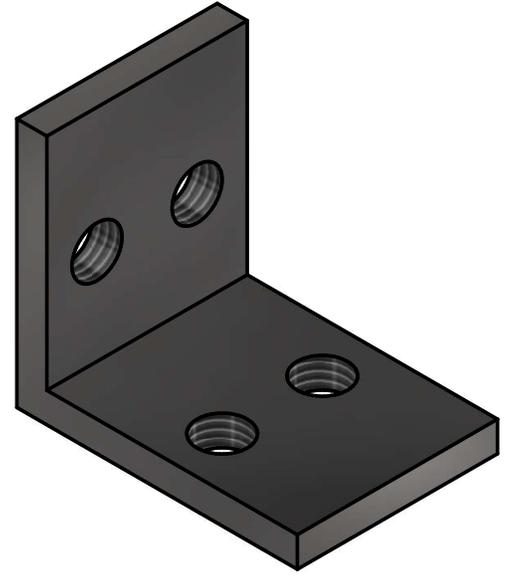
|   |               |               |  |                      |
|---|---------------|---------------|--|----------------------|
| Diseñado por:<br>Juan Palma<br>Steven Rebolledo | Revisado por: | Aprobado por: | Escala:<br>1 : 1                             | Fecha:<br>26/08/2018 |
| <b>ESPOL</b>                                    |               |               | Instrumento para medición de fuerza y torque |                      |
|   |               |               | Soporte para motor                           | Edición:<br>1        |



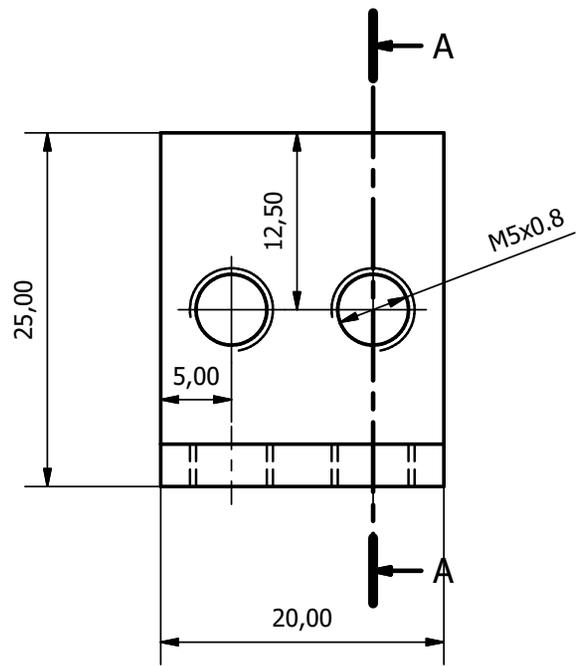
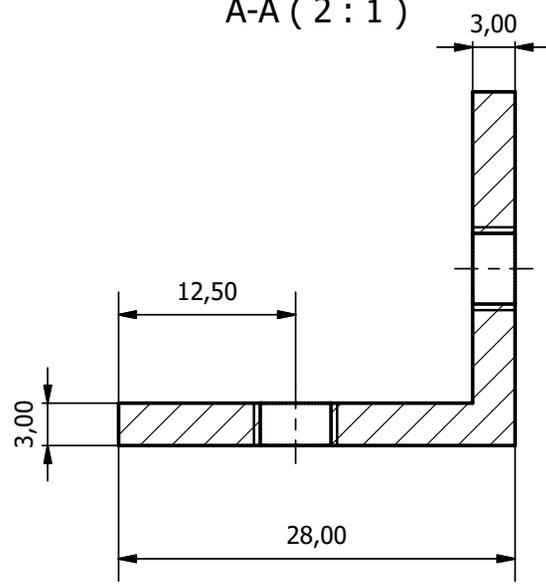
|   |               |               |  |                      |                |
|---|---------------|---------------|--|----------------------|----------------|
| Diseñado por:<br>Juan Palma<br>Steven Rebolledo | Revisado por: | Aprobado por: | Escala:<br>1 : 1                             | Fecha:<br>26/08/2018 |                |
| <b>ESPOL</b>                                    |               |               | Instrumento para medición de fuerza y torque |                      |                |
|   |               |               | Celda de carga de fuerza                     | Edición:<br>1        | Página:<br>2/5 |



|   |               |               |  |                      |
|---|---------------|---------------|--|----------------------|
| Diseñado por:<br>Juan Palma<br>Steven Rebolledo | Revisado por: | Aprobado por: | Escala:<br>2 : 1                             | Fecha:<br>26/08/2018 |
| <b>ESPOL</b>                                    |               |               | Instrumento para medición de fuerza y torque |                      |
|   |               |               | Celda de carga de torque                     | Edición:<br>1        |

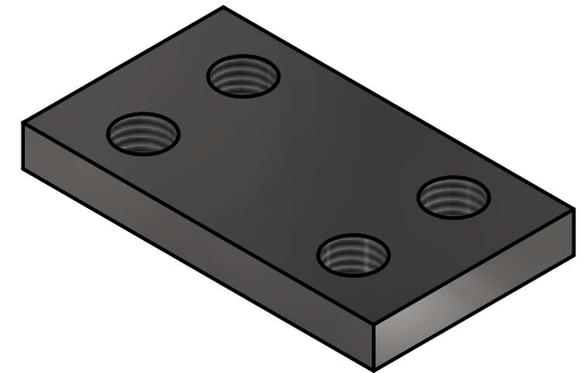
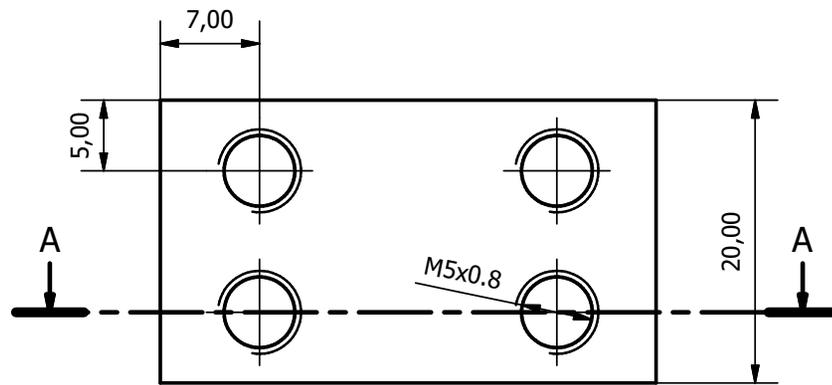


A-A ( 2 : 1 )

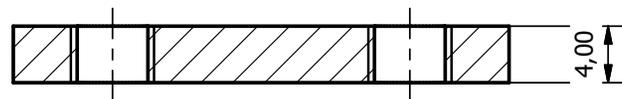


|   |               |               |  |                      |                |
|---|---------------|---------------|--|----------------------|----------------|
| Diseñado por:<br>Juan Palma<br>Steven Rebolledo | Revisado por: | Aprobado por: | Escala:<br>2 : 1                             | Fecha:<br>26/08/2018 |                |
| <h1>ESPOL</h1>                                  |               |               | Instrumento para medición de fuerza y torque |                      |                |
|   |               |               | Union en L                                   | Edición:<br>1        | Página:<br>4/5 |





A-A ( 2 : 1 )



|   |               |               |  |                      |                |
|---|---------------|---------------|--|----------------------|----------------|
| Diseñado por:<br>Juan Palma<br>Steven Rebolledo | Revisado por: | Aprobado por: | Escala:<br>2 : 1                             | Fecha:<br>26/08/2018 |                |
| <b>ESPOL</b>                                    |               |               | Instrumento para medición de fuerza y torque |                      |                |
|   |               |               | Platina                                      | Edición:<br>1        | Página:<br>5/5 |