

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"

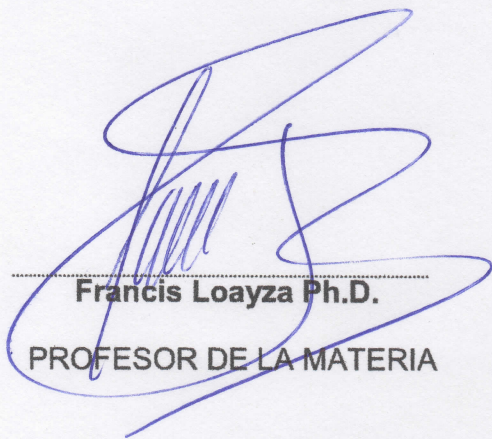


Juan Fernando Palma
Velasquez

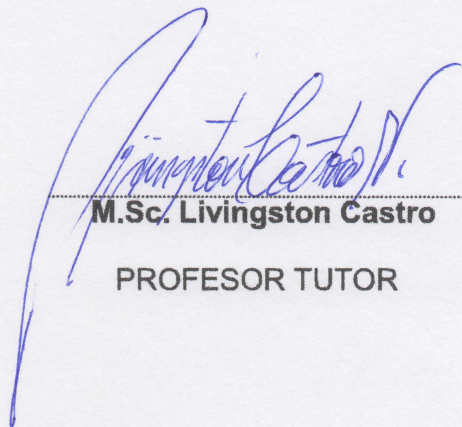


Elvis Steven Rebolledo
Rivera

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 ³	Metros cúbicos
m ²	Metros cuadrados
mV	Milivoltio

SIMBOLOGÍA

σ_{nom}	Esfuerzo nominal de la celda de carga
σ	Esfuerzo de la celda de carga
σ_{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
τ_{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
σ_{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
τ_{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
τ_{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
σ'_T	Esfuerzo de Von Mises en el punto crítico de la celda de carga de torque
σ'_F	Esfuerzo de Von Mises en el punto crítico de la celda de carga de fuerza
σ''_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
σ''_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
ϵ_{zz}	Deformación unitaria en la dirección Z
ϵ_{yy}	Deformación unitaria en la dirección Y
η_T	Factor de seguridad de la celda de carga de torque
S_y	Esfuerzo de fluencia para el material de la celda de carga
η_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
ρ	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 variadas 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, la 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 μm . 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	0.38	38%
Facilidad de manufactura	0.86	1.00	1.50	0.45	3.81	0.23	23%
Mantenimiento	0.57	0.67	1.00	1.33	3.57	0.22	22%
Tamaño	0.43	0.50	0.75	1.00	2.68	0.16	16%
SUMA TOTAL					16.31	1.00	100%

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.

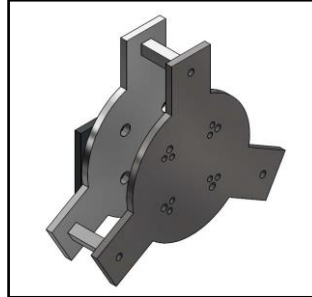


Figura 2.1 Alternativa 1

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.

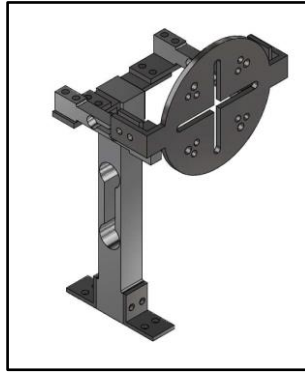


Figura 2.2 Alternativa 2

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.

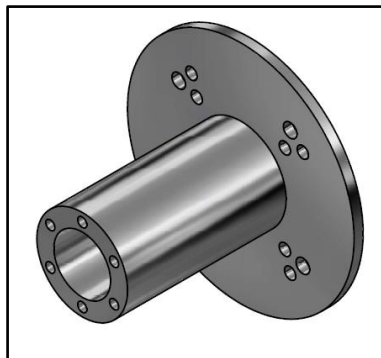


Figura 2.3 Alternativa 3

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

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
Sensibilidad según simulación	35%	3	1.05	5	1.75	3	1.05
Facilidad de manufactura	23%	4	0.92	3	0.69	5	1.15
Mantenimiento	22%	4	0.88	5	1.1	1	0.22
Tamaño	15%	3	0.45	4	0.6	5	0.75
TOTAL			3.5	TOTAL	4.35	TOTAL	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

Material	Densidad [kg/m³]	Módulo de elasticidad [GPa]	Esfuerzo a la fluencia [MPa]
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.

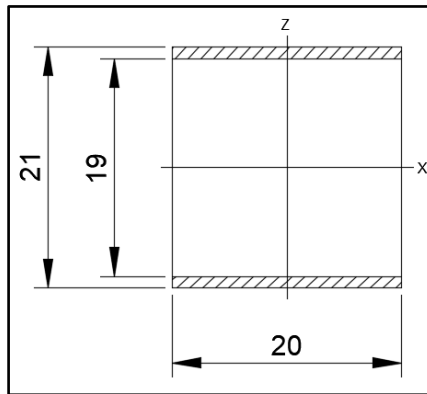


Figura 2.4 Sección crítica de la celda de carga de fuerza

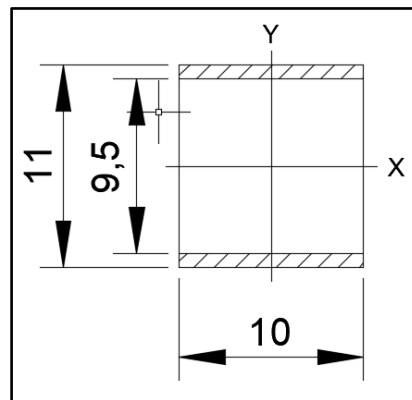


Figura 2.5 Sección crítica de la celda de carga de torque

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 ²]	Inercia respecto al eje X [m ²]	Inercia respecto al eje Y [m ²]	Inercia respecto al eje Z [m ²]
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.

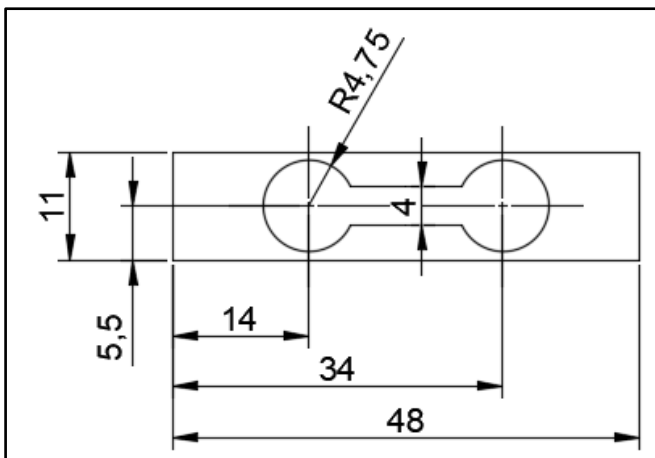


Figura 2.6 Geometría de la celda de carga de torque

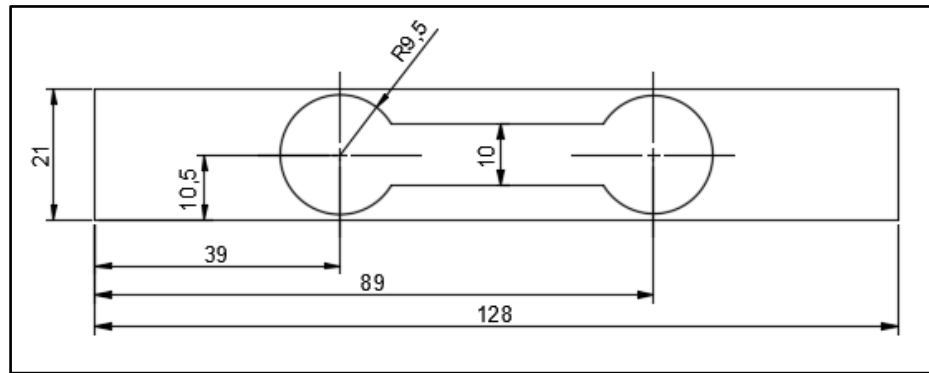


Figura 2.7 Geometría de la celda de carga de fuerza

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.

σ_{nom} es el esfuerzo nominal de la celda de carga.

σ 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.

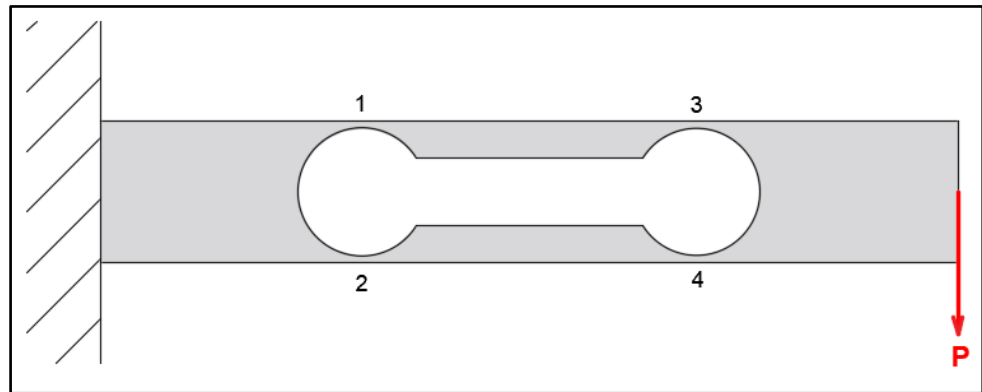


Figura 2.8 Modelo de simulación para concentrador de esfuerzo

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.

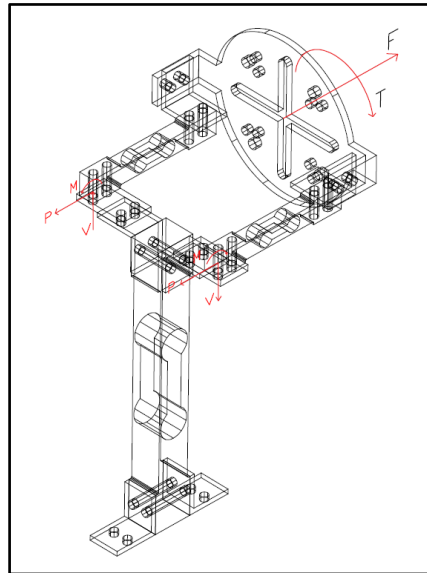


Figura 2.9 Diagrama de cuerpo libre de la celda de torque

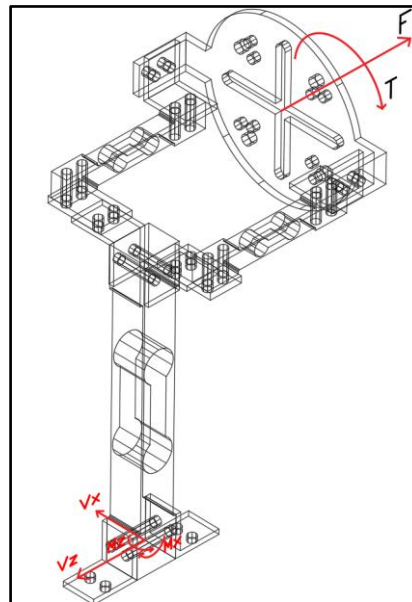


Figura 2.10 Diagrama de cuerpo libre de la celda de torque

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:

σ_{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.

τ_{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.

σ_{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.

τ_{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.

τ_{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:

$$\sigma'_T =$$

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

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

Donde:

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

σ'_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:

σ''_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.

σ''_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.

ϵ_{zz} fue el valor de deformación unitaria en la dirección Z.

Donde:

ϵ_{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:

η_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.

η_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.

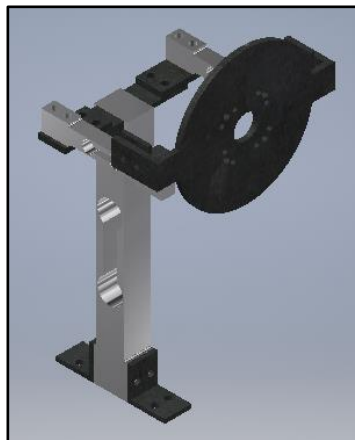


Figura 2.11 Modelo para ANSYS

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.

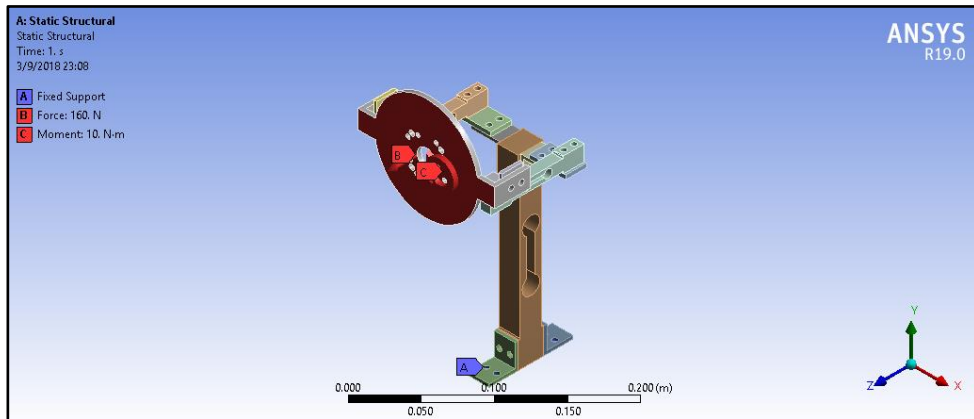


Figura 2.12 Cargas y restricciones para el modelo

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.

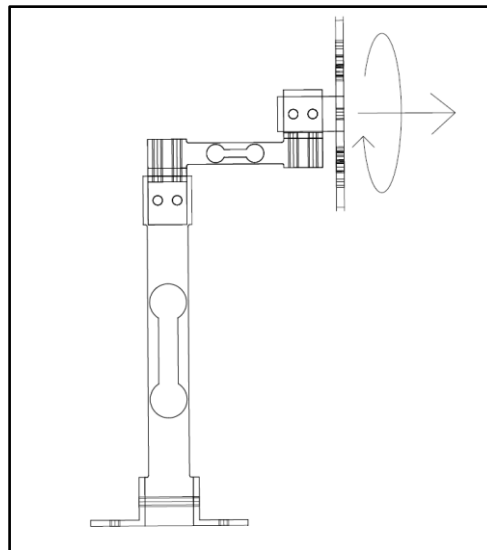


Figura 2.13 Diagrama de cuerpo libre del instrumento

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.

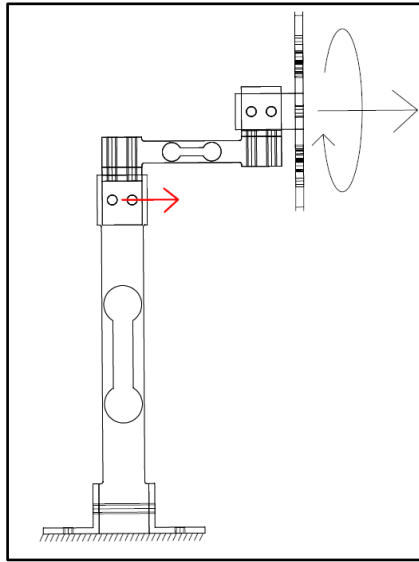


Figura 2.14 Fuerzas en la celda de empuje

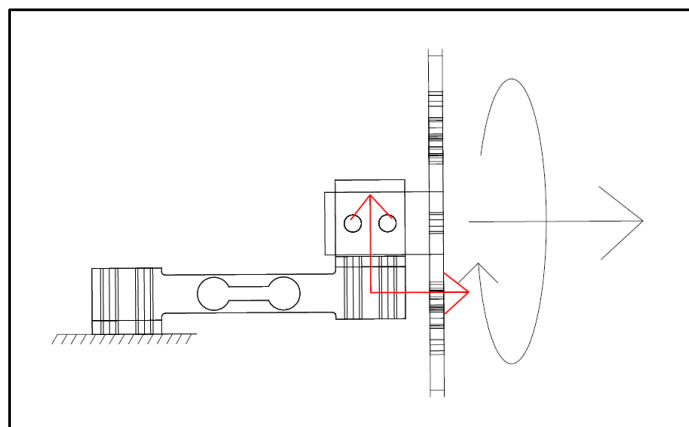


Figura 2.15 Fuerzas en la celda de torque

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		β					
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).

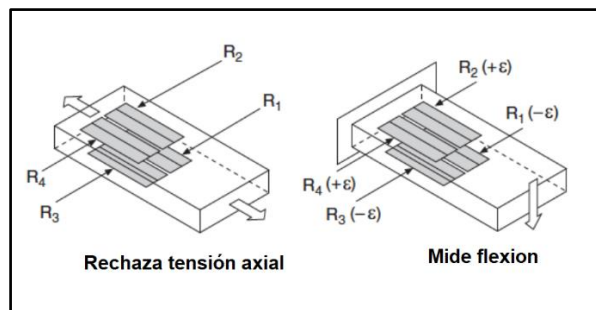


Figura 2.16 Puente completo Tipo I [Obtenida de <http://www.ni.com>]

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.

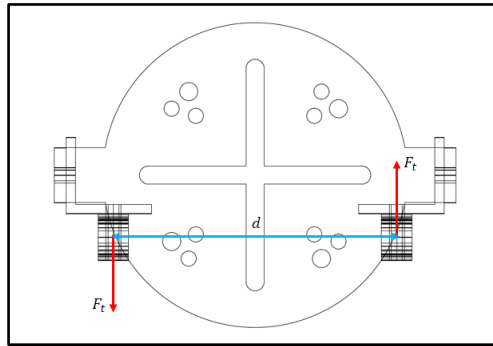


Figura 2.17 Fuerza de las celdas de torque

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

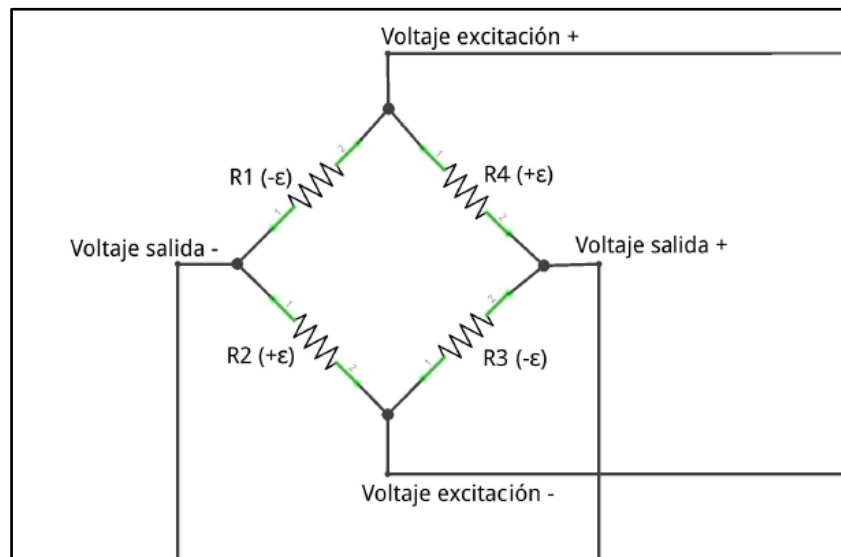


Figura 2.18 Puente de Wheatstone de las celdas de carga

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

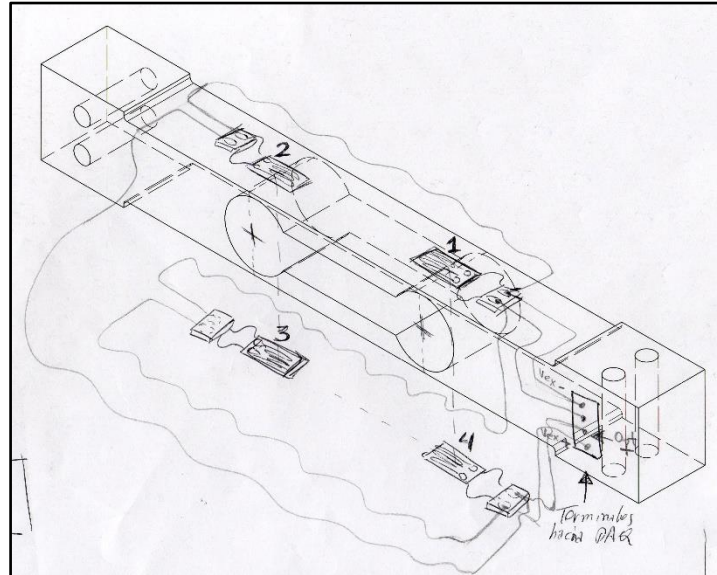


Figura 2.19 Posición de las galgas en la celda de carga

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.

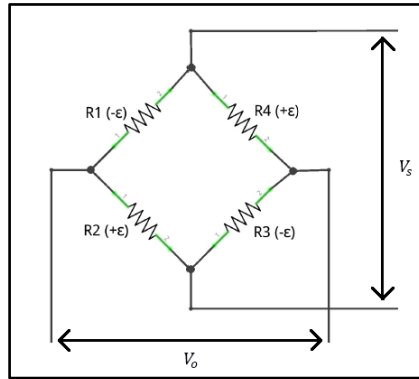


Figura 2.20 Puente de Wheatstone

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 ε 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.

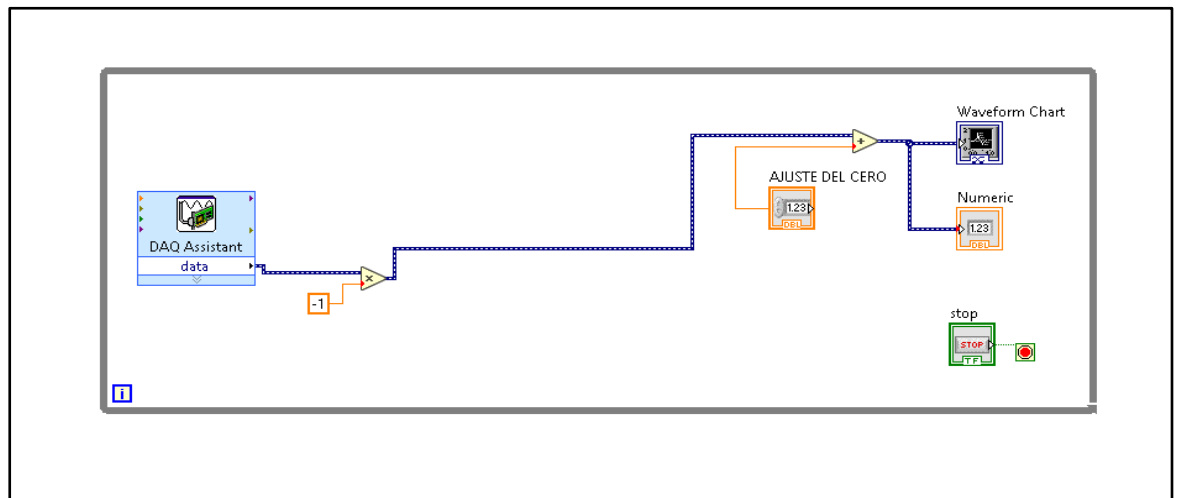


Figura 2.21 Diagrama de bloques de LabView

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.

ρ 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.

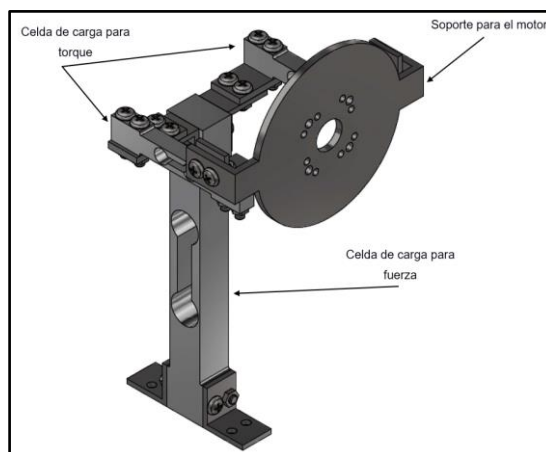


Figura 3.1 Modelo 3D del instrumento

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.

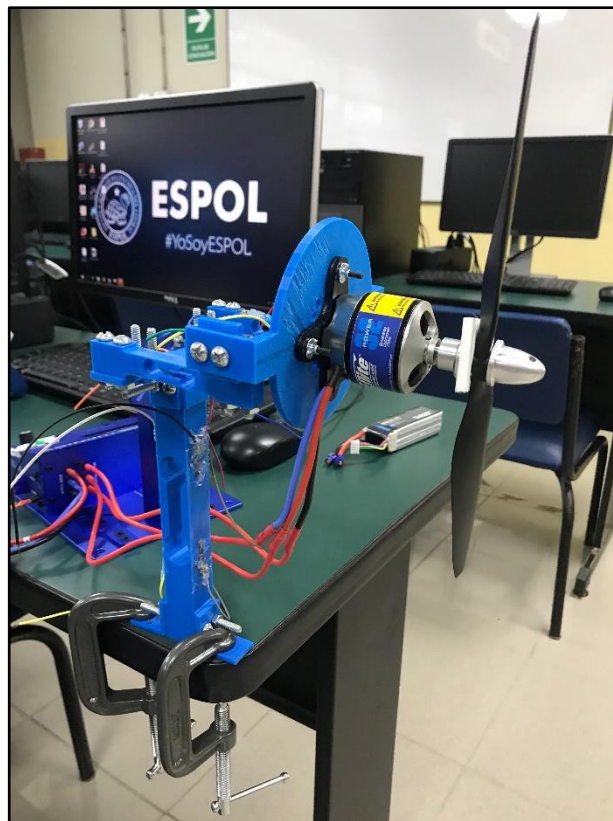


Figura 3.2 Foto del prototipo

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.

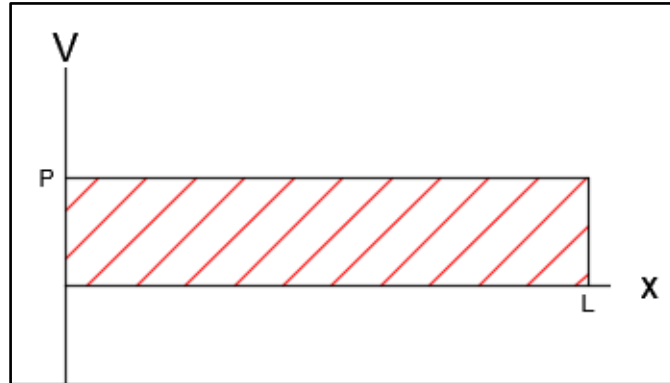


Figura 3.3 Diagrama de fuerza cortante de la celda de carga

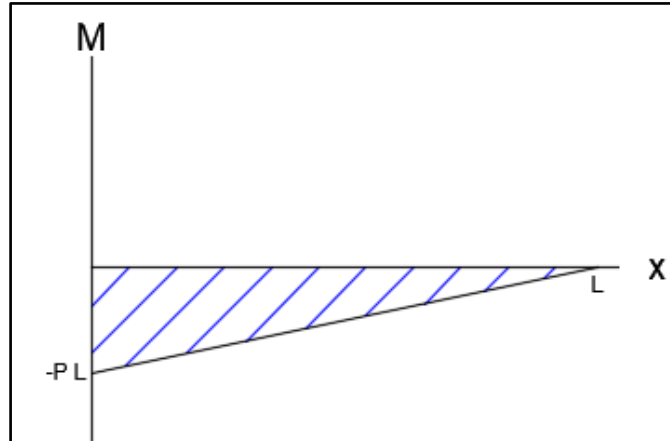


Figura 3.4 Diagrama del momento flector de la celda de carga

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.

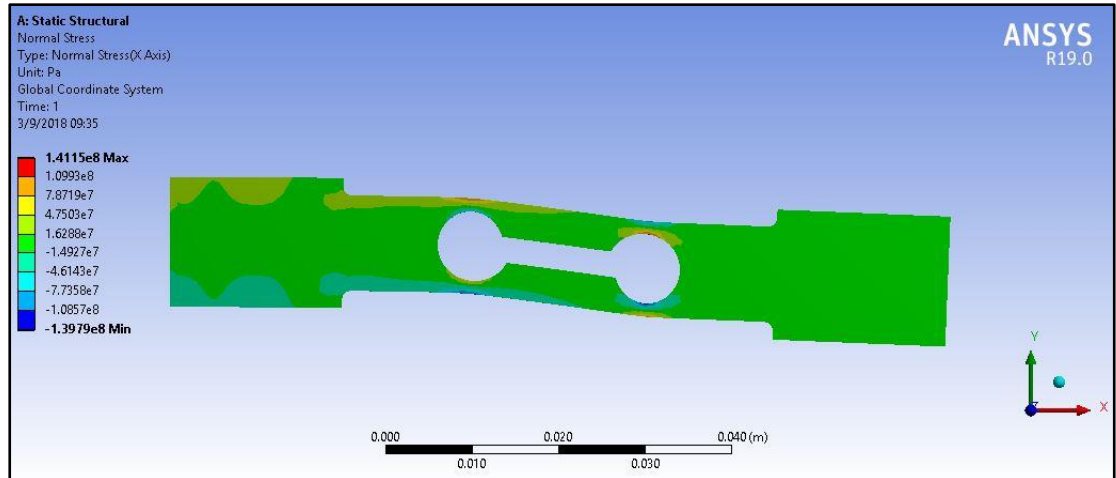


Figura 3.5 Simulación de deformación de la celda de carga

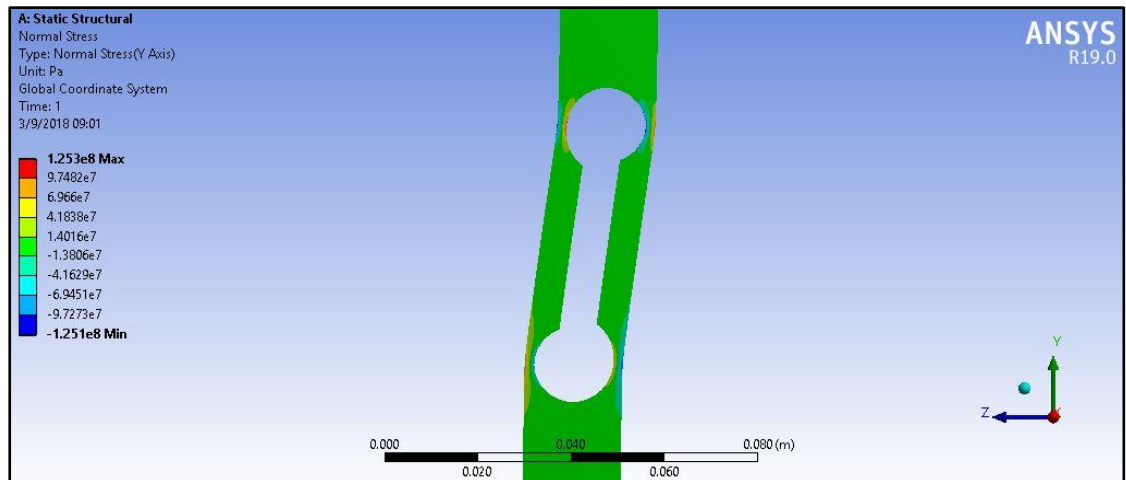


Figura 3.6 Simulación de esfuerzos de la celda de carga

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 tomáramos 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.

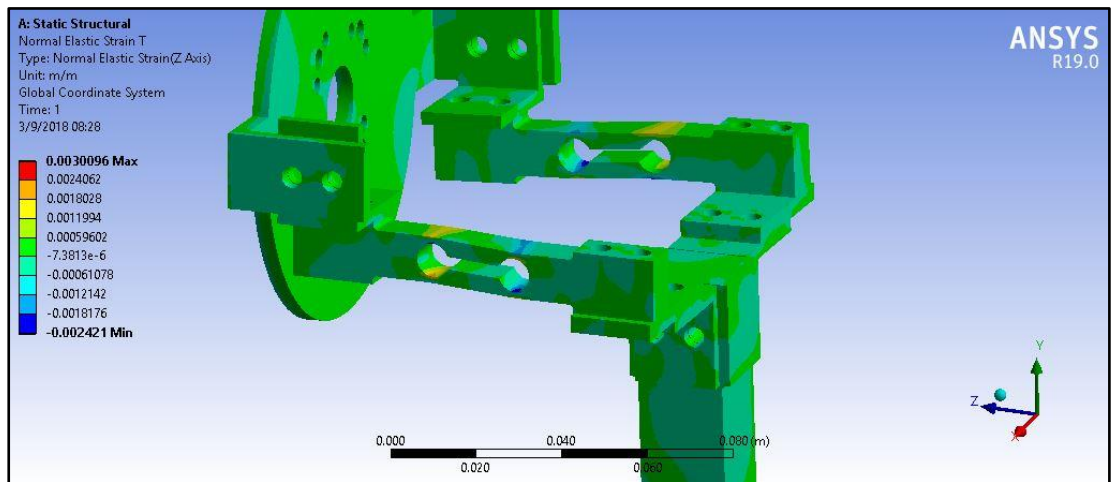


Figura 3.7 Deformación unitaria de las celdas de torque en ANSYS

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.

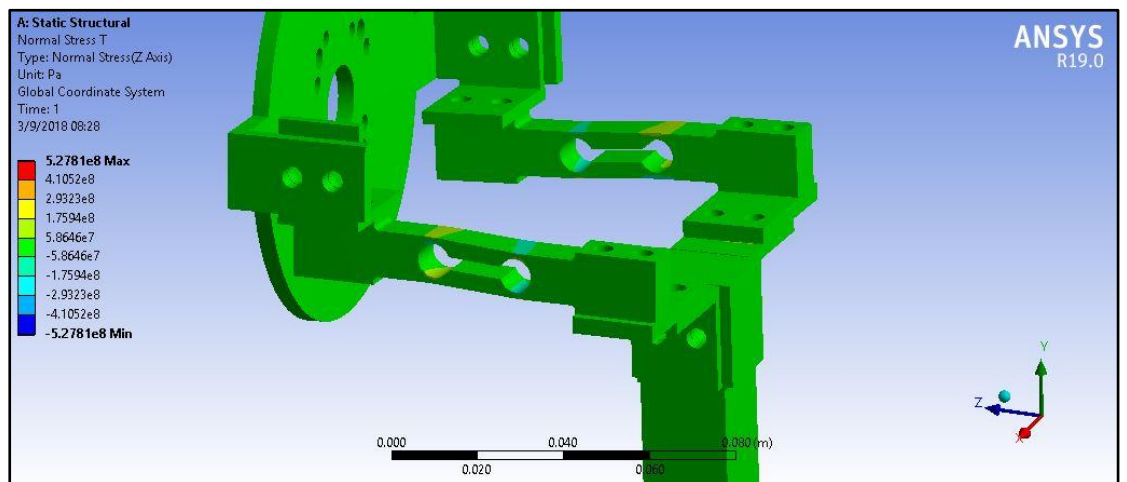


Figura 3.8 Esfuerzos normales en las celdas de carga de torque en ANSYS

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.

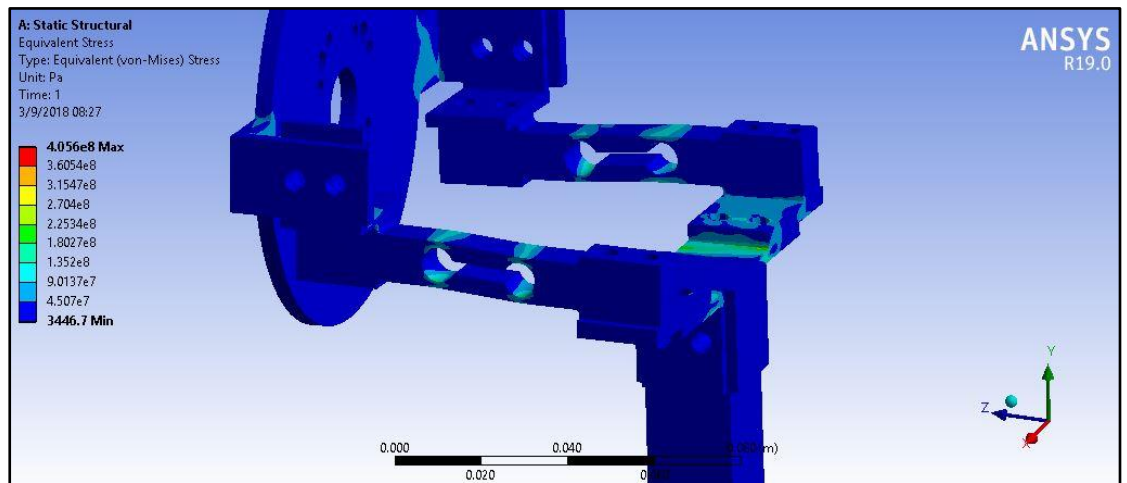


Figura 3.9 Esfuerzo de Von Mises en las celdas de carga de torque en ANSYS

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.

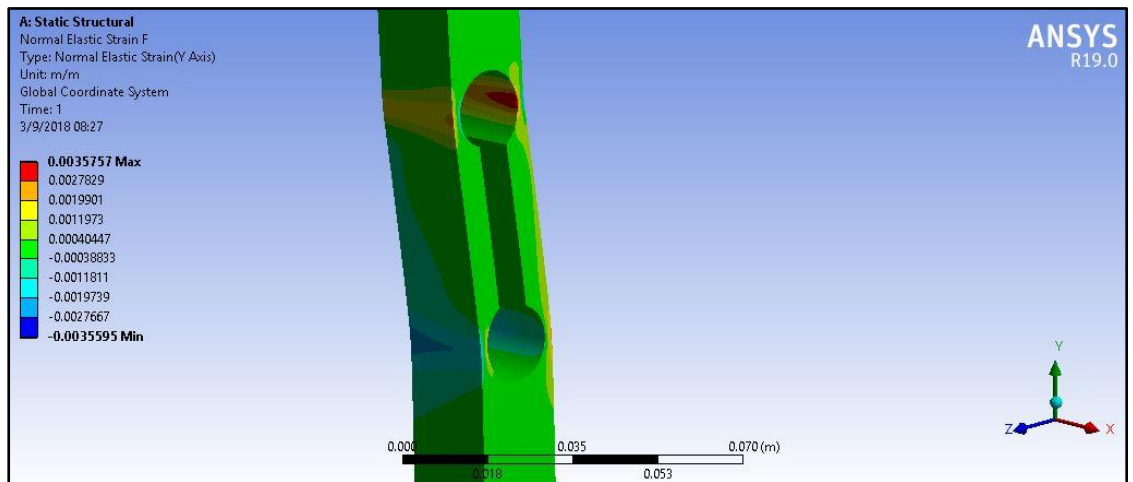


Figura 3.10 Deformación unitaria de la celda de fuerza en ANSYS

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 2.9191×10^8 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.

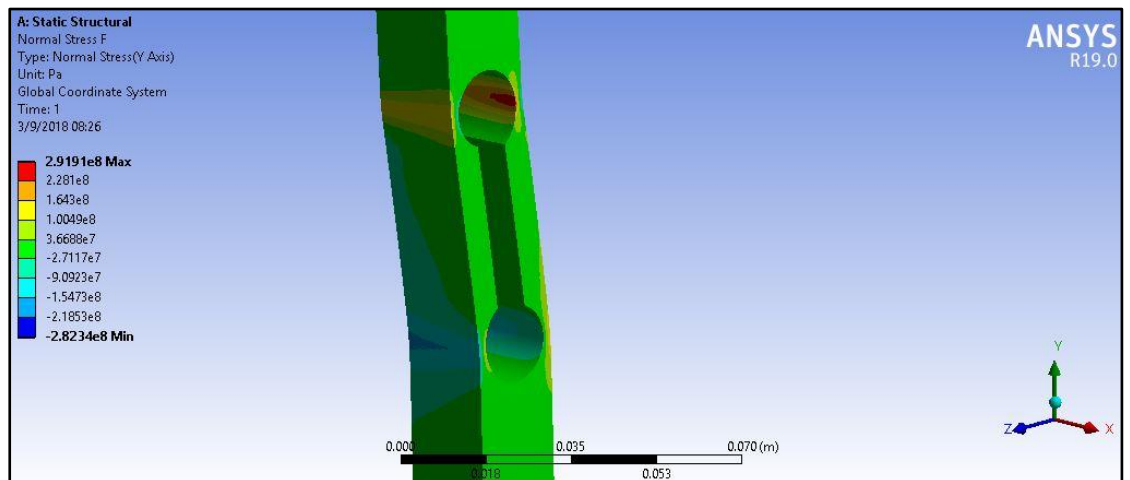


Figura 3.11 Esfuerzos normales en las celdas de carga de fuerza en ANSYS

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.

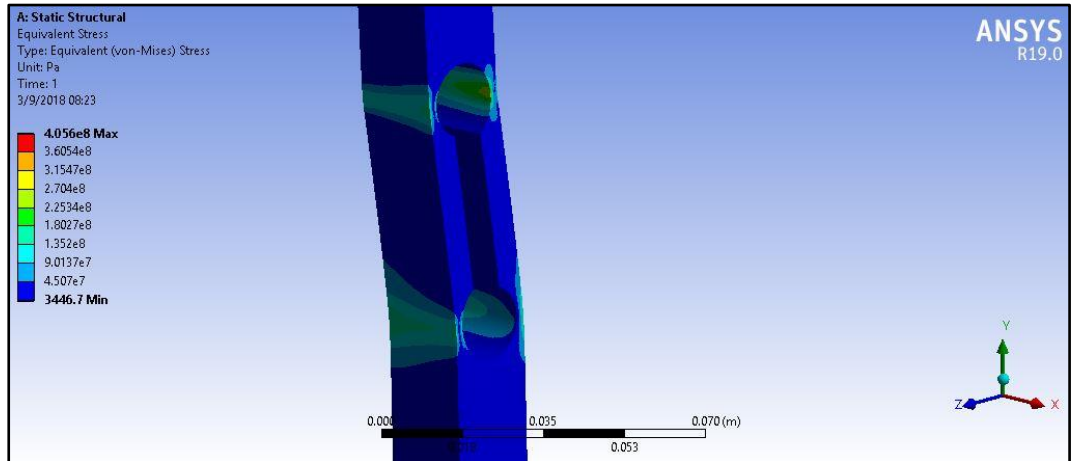


Figura 3.12 Esfuerzos de Von Mises en las celdas de carga de fuerza en ANSYS

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.

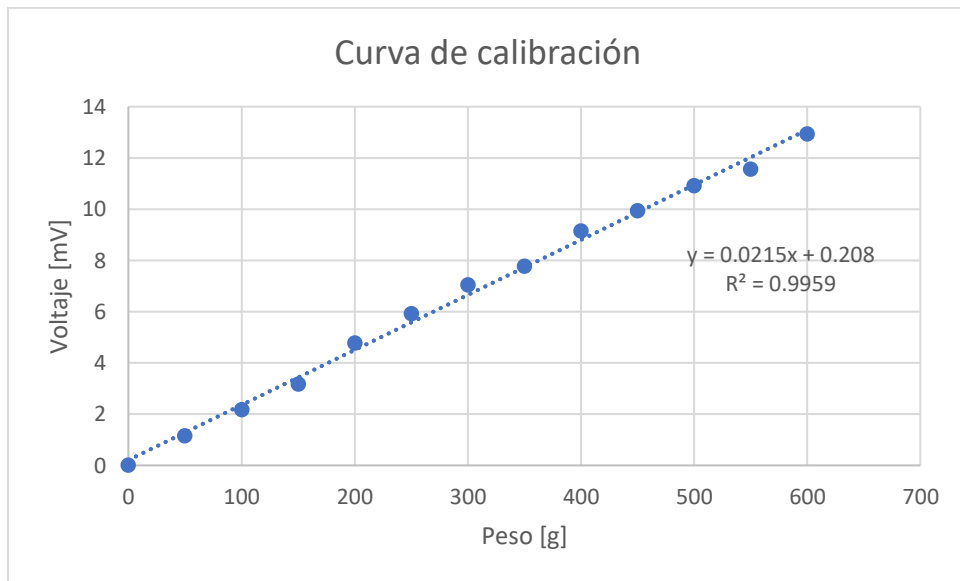


Figura 3.13 Curva de calibración de celda de fuerza – Puente completo

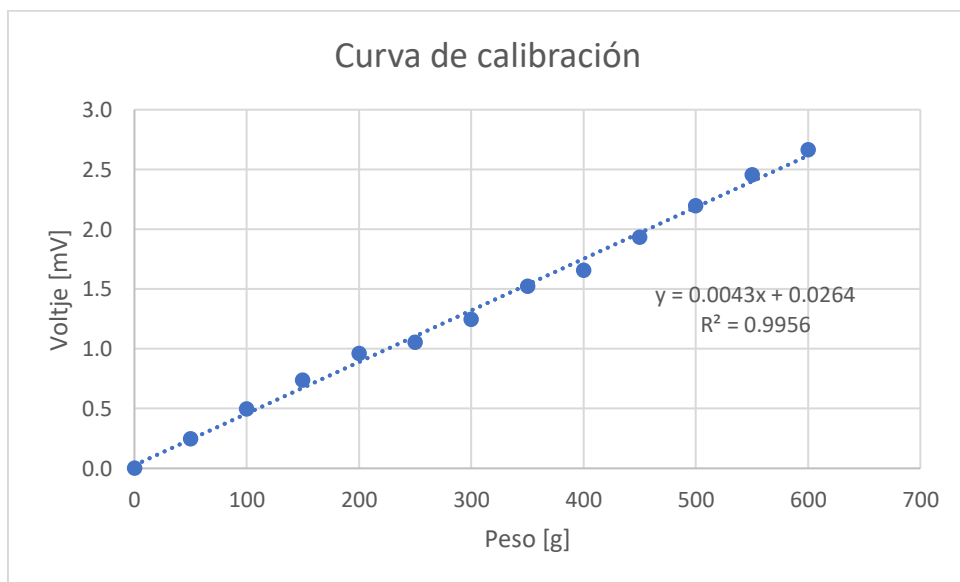


Figura 3.14 Curva de calibración de celda de fuerza – Cuarto de puente

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.

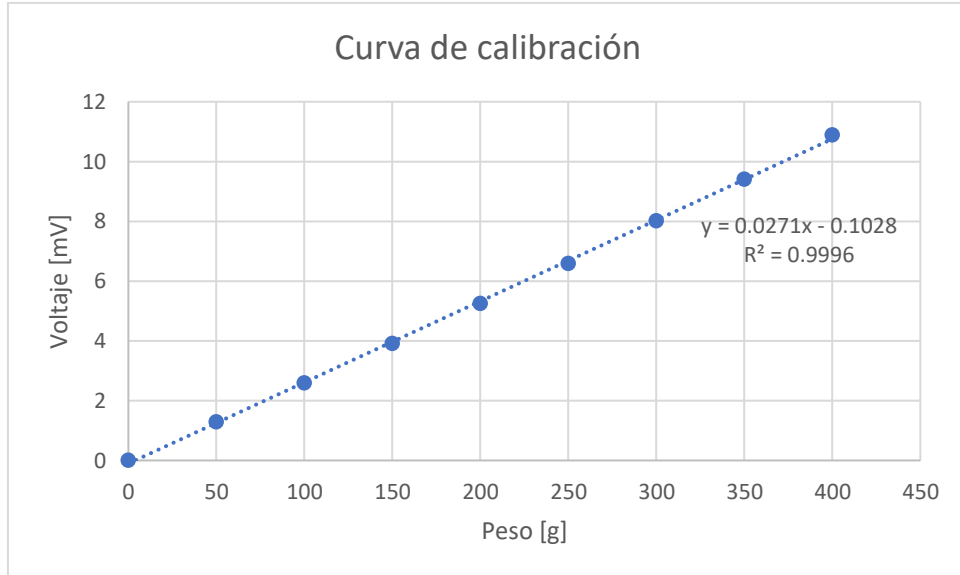


Figura 3.15 Curva de calibración de celda de torque – Puente completo

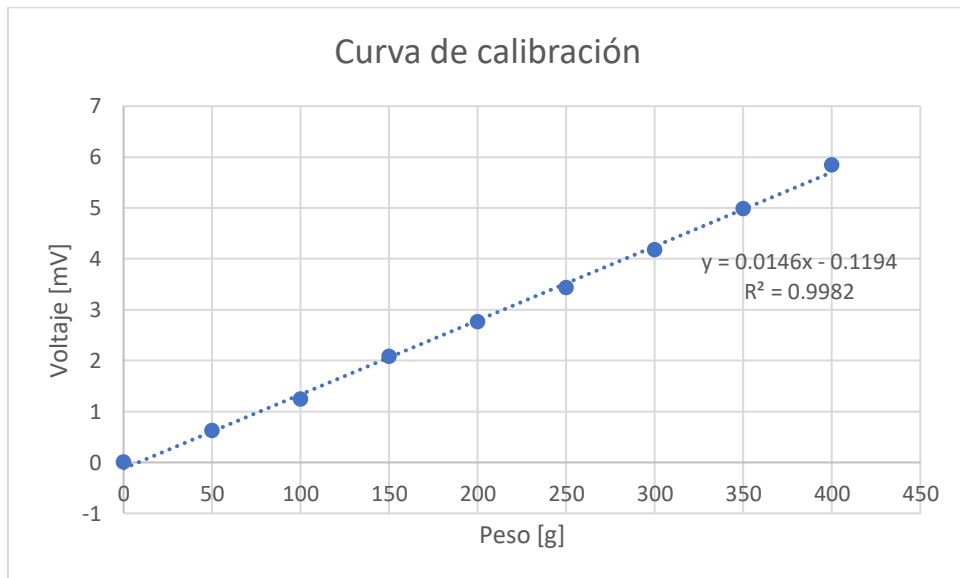


Figura 3.16 Curva de calibración de celda de torque – Medio puente

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.

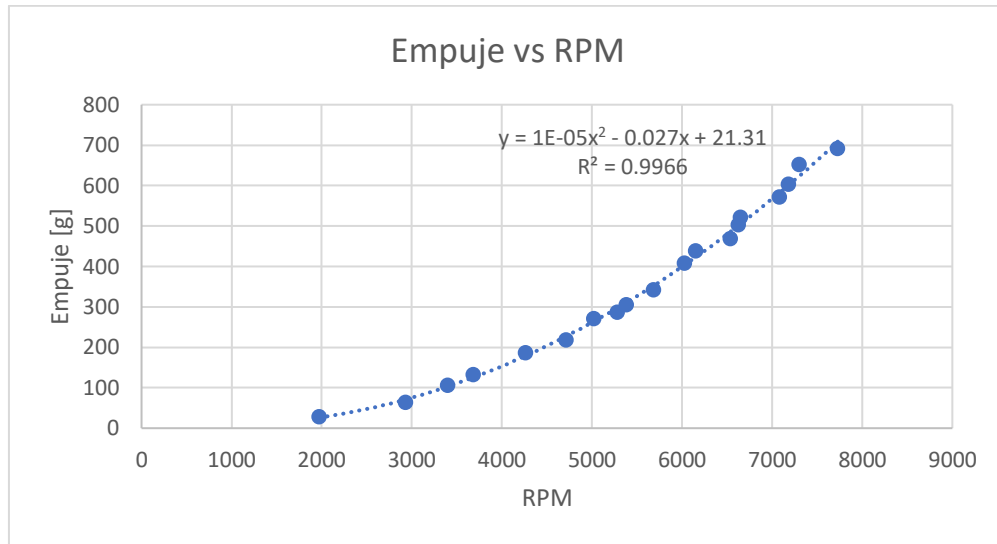


Figura 3.17 Curva Empuje-RPM del motor-hélice

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.

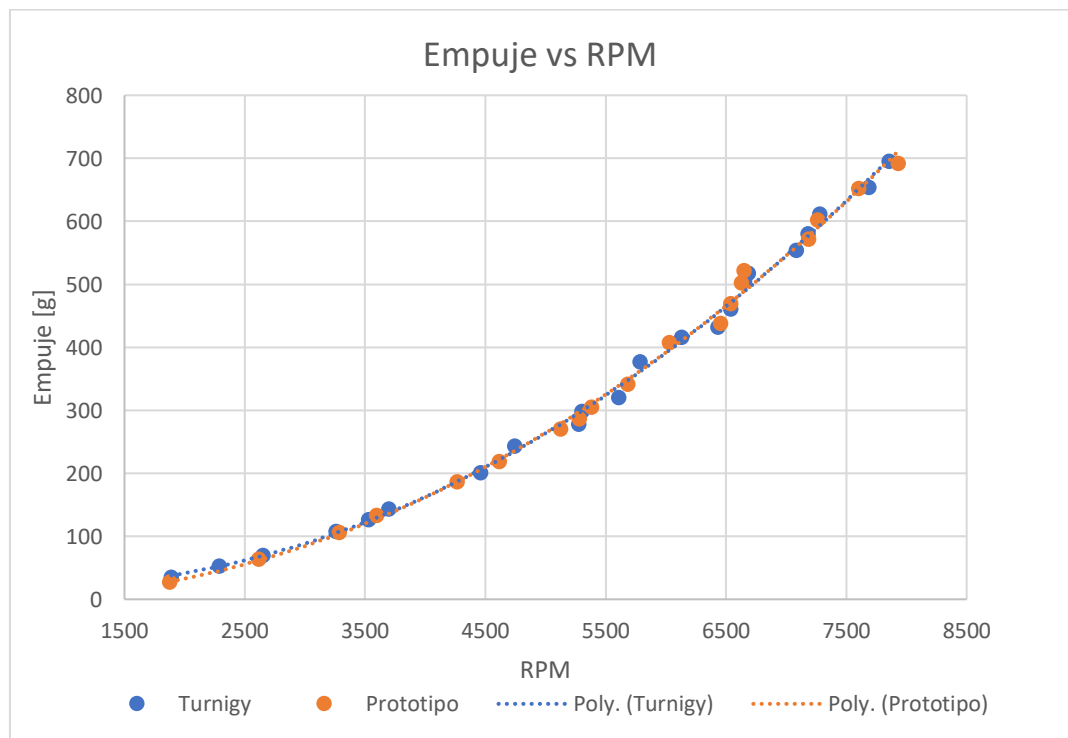


Figura 3.18 Comparación de curva de empuje

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.

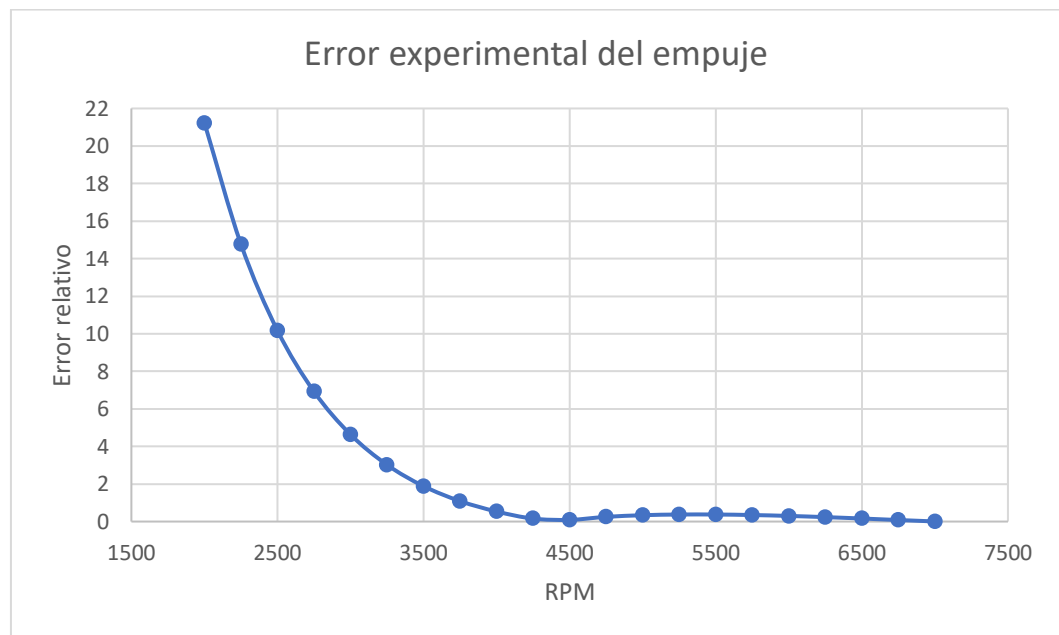


Figura 3.19 Error absoluto entre las dos curvas de empuje

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.

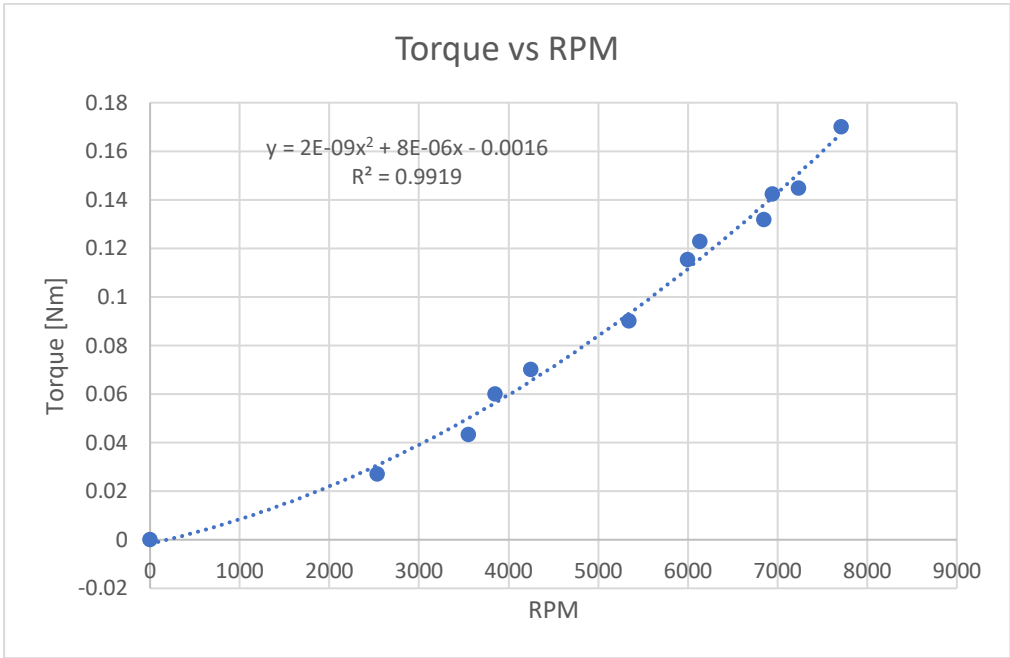


Figura 3.20 Curva Torque-RPM del motor-hélice

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
Electrico y electronico			
Galgas extensometricas	10	\$ 14.00	\$ 140.00
Cables Jumpers 22 AWG	40	\$ 0.07	\$ 2.80
Terminales	8	\$ 1.00	\$ 8.00
Mecanizacion			
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
Otros			
Pernos M6	20	\$ 0.31	\$ 6.20
Tuercas M6	20	\$ 0.22	\$ 4.40
Total			\$ 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 - Puente completo					
Masa [g]	Voltage lectura [mV]				
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 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 [g]	Voltage lectura [mV]				
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 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

Celda de torque - Puente completo					
Masa [g]	Voltaje lectura [mV]				
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Promedio	Encerado
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

Celda de torque - Medio puente					
Masa [g]	Voltaje lectura [mV]				
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Promedio	Encerado
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

Celda de torque - Cuarto de puente					
Masa [g]	Voltaje lectura [mV]				
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Promedio	Encerado
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

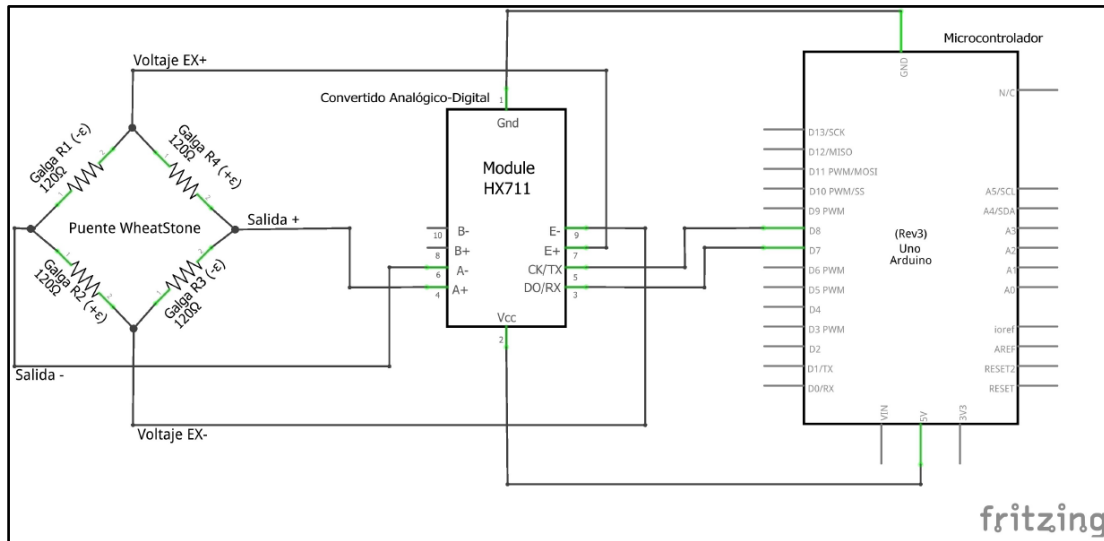
Table 2. NI 9219 Terminal Assignments by Mode

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 – IMPLMENTACION DE SISTEMA DE ADQUISION 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

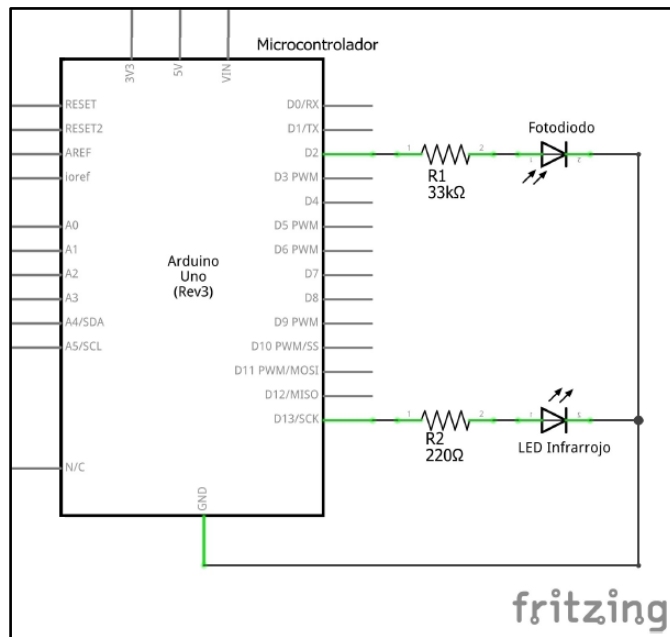
Para la amplificación del sistema y su compatibilidad con Arduino se usará el módulo HX711, que es un convertidor analógico-digital de 24 bits con una ganancia de 64 y 128.

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 que 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:

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

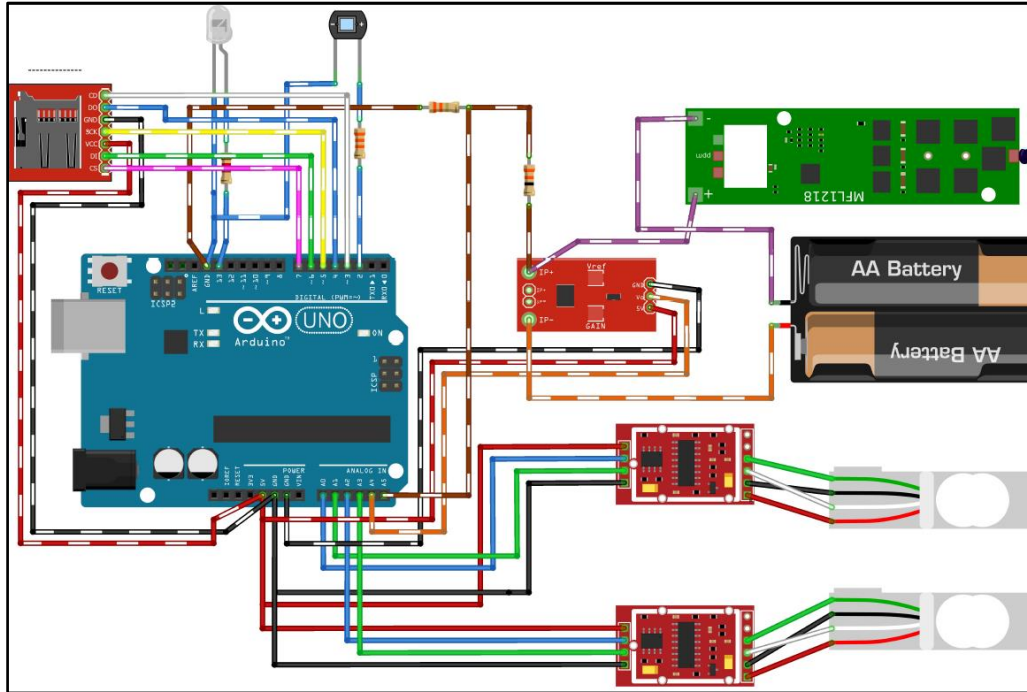
En donde:

V_e es el voltaje de la batería

V_l es el voltaje de lectura

Arduino

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

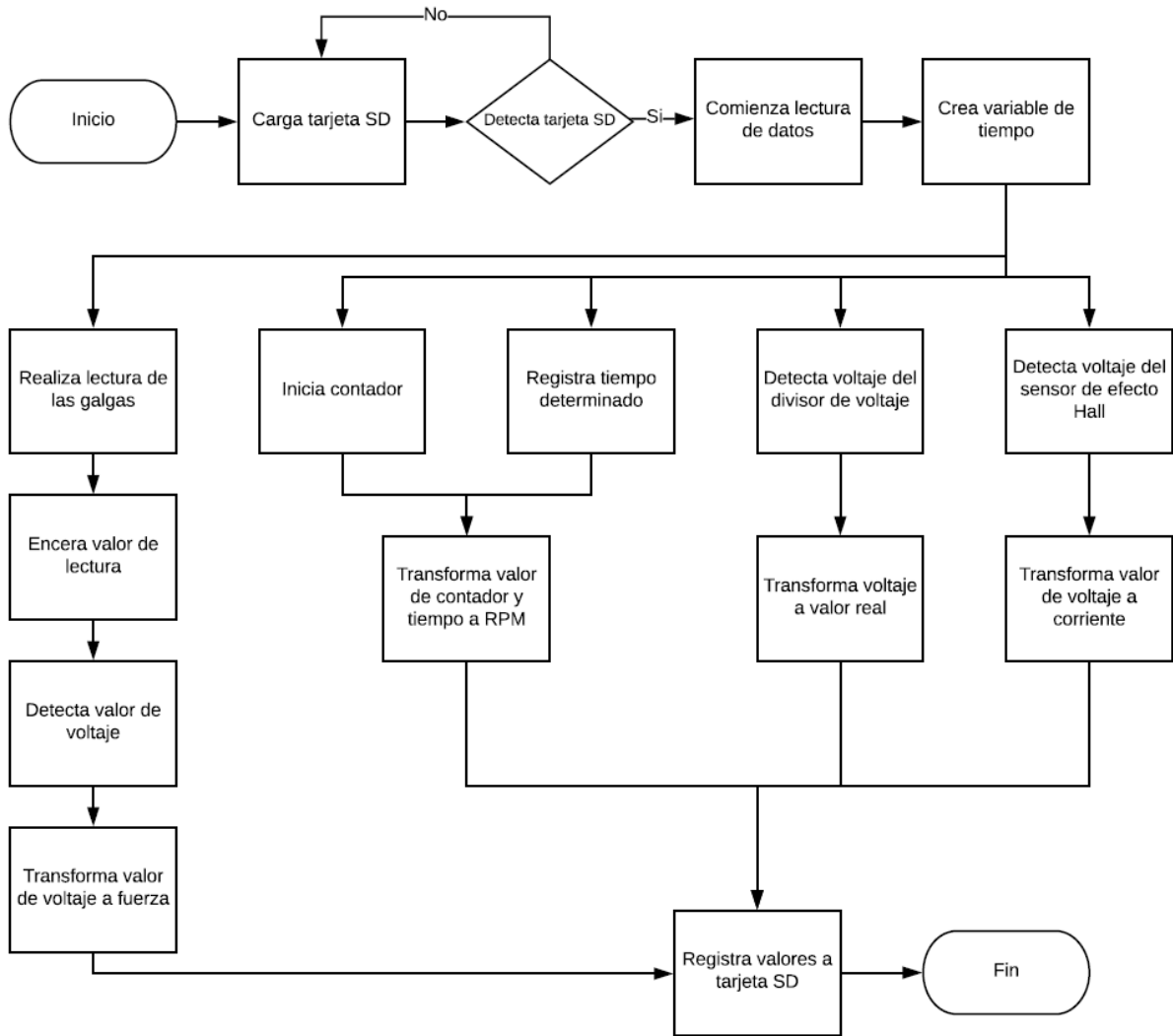


Esquema del sistema de adquisición de datos basado en Arduino

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);
```

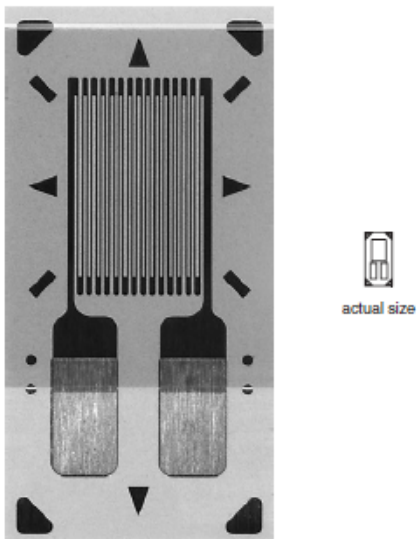
```
} else {  
  Serial.println("Error al abrir el archivo");  
}  
delay(100);  
}
```


ANEXO E – DATASHEET DE LAS GALGAS EXTENSIOMETRICAS



125UN

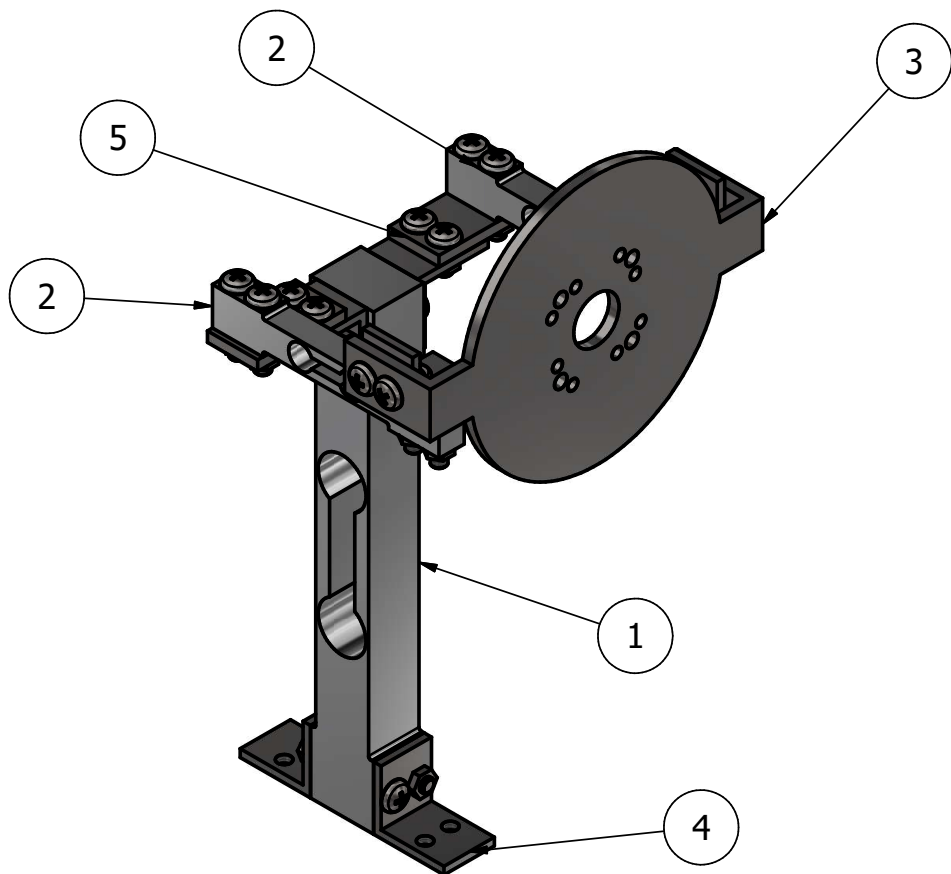
General Purpose Strain Gages – Linear Pattern

GAGE PATTERN DATA					
			GAGE DESIGNATION <small>See Note 1</small>	RESISTANCE (OHMS)	OPTIONS AVAILABLE <small>See Note 2</small>
			CEA-XX-125UN-120 CEA-XX-125UN-350	120 ± 0.3% 350 ± 0.3%	P2 P2
DESCRIPTION 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.					
GAGE DIMENSIONS		Legend			inch millimeter
		<small>ES = Each Section S = Section (S1 = Section 1)</small>	<small>CP = Complete Pattern M = Matrix</small>		
Gage Length	Overall Length	Grid Width	Overall Width	Matrix Length	Matrix Width
0.125 3.18	0.275 6.99	0.100 2.54	0.120 3.05	0.38 9.7	0.19 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)

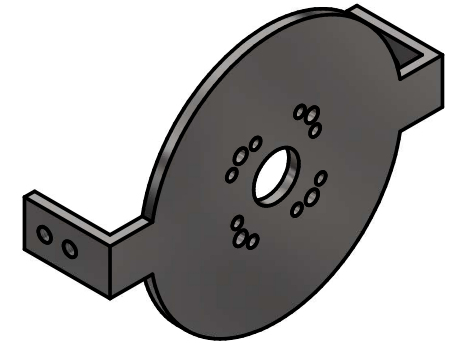
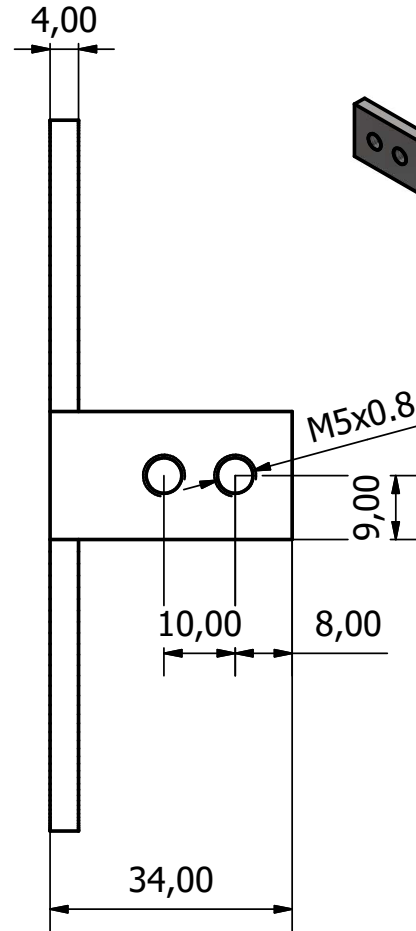
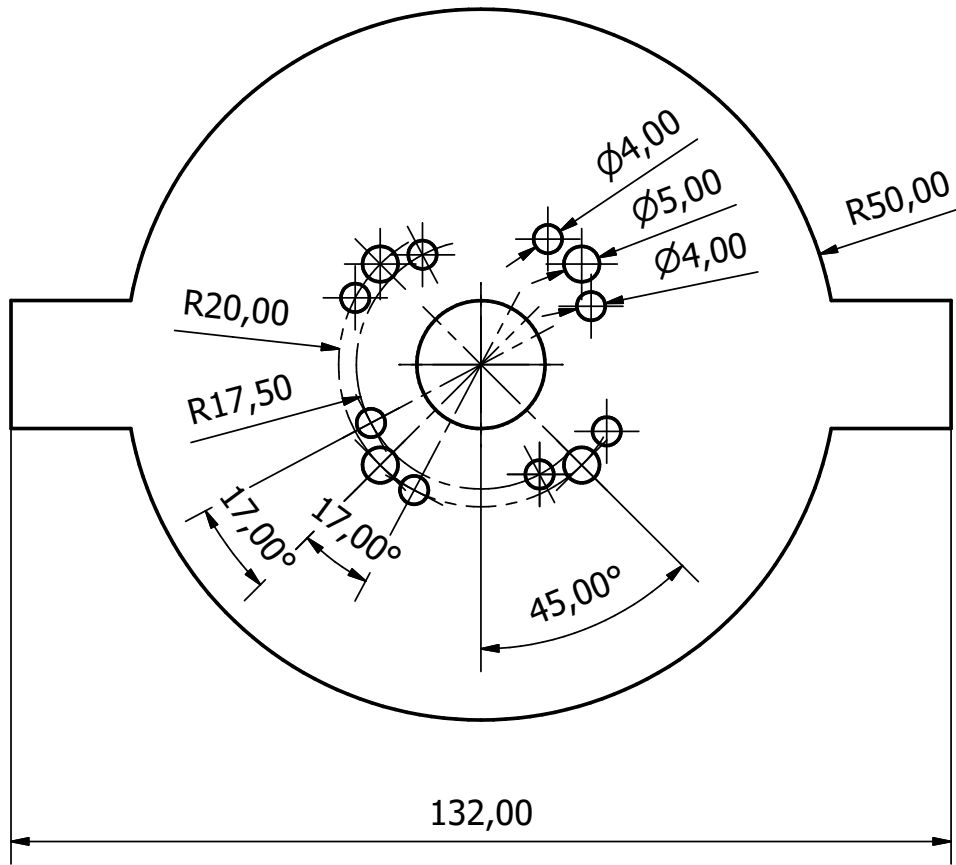
Note 1: Insert desired S-T-C number in spaces marked XX.
Note 2: Products with designations and options shown in bold are not RoHS compliant.

ANEXO F – PLANOS DE CONSTRUCCIÓN



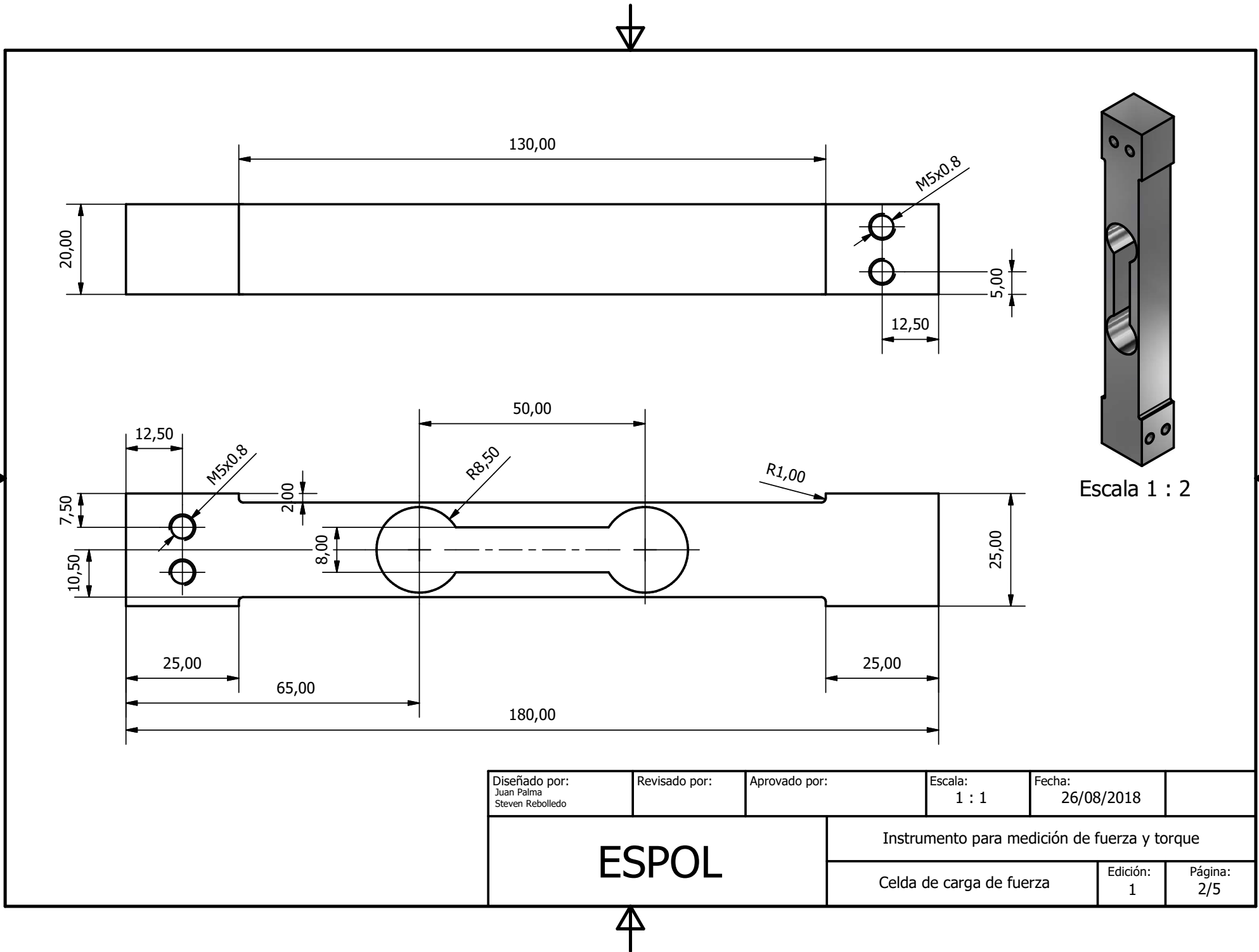
Lista de partes		
Item	Cantidad	Descripción
1	1	Celda de carga de fuerza
2	2	Celda de carga de torque
3	1	Soporte de motor
4	6	Union en L
5	2	Platina

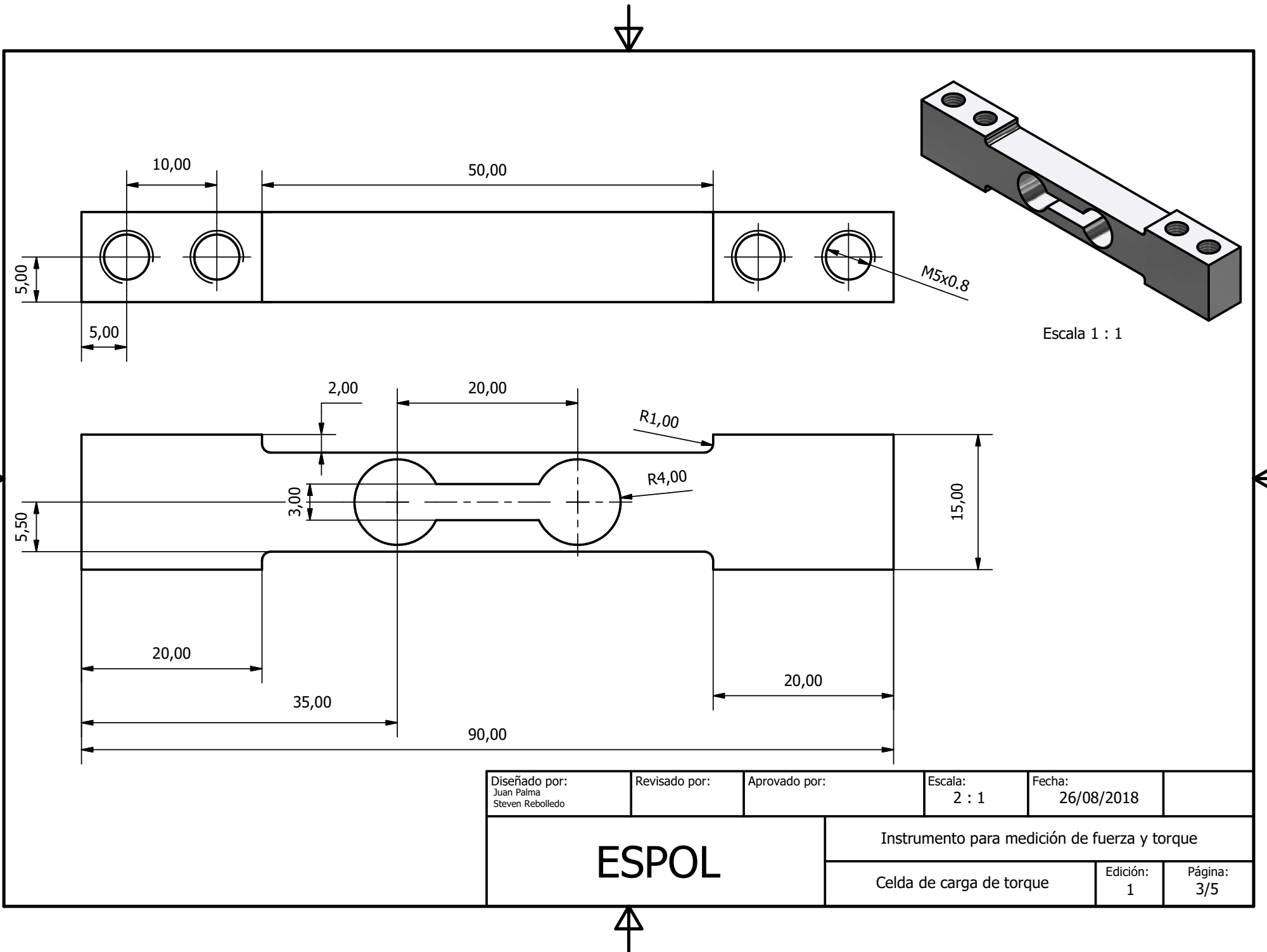
Diseñado por: Juan Palma Steven Rebolledo	Revisado por:	Aprovado por:	Escala: 1 : 2	Fecha: 26/08/2018	
<h1>ESPOL</h1>			Instrumento para medición de fuerza y torque		
			Ensamble del instrumento	Edición: 1	Página:



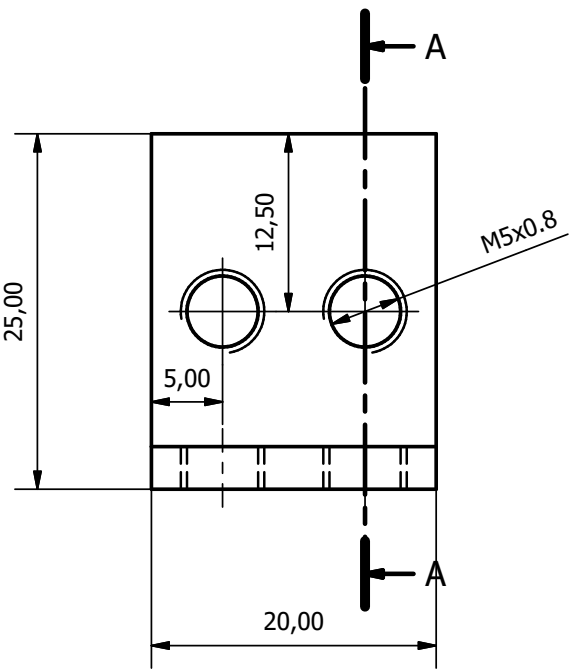
Escala 1 : 2

Diseñado por: Juan Palma Steven Rebolledo	Revisado por:	Aprobado por:	Escala: 1 : 1	Fecha: 26/08/2018
ESPOL		Instrumento para medición de fuerza y torque		
		Soporte para motor	Edición: 1	Página: 1/5

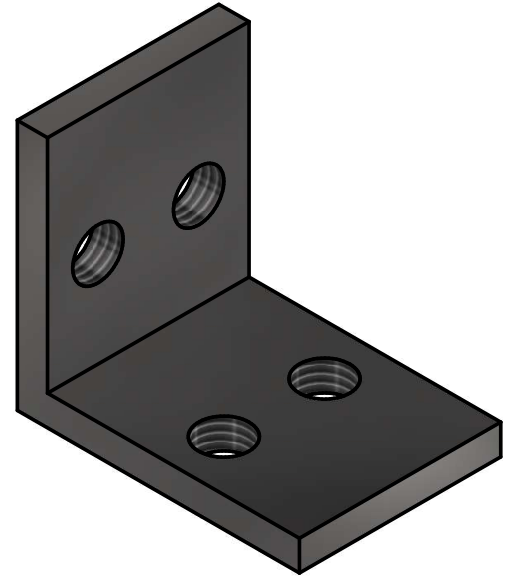
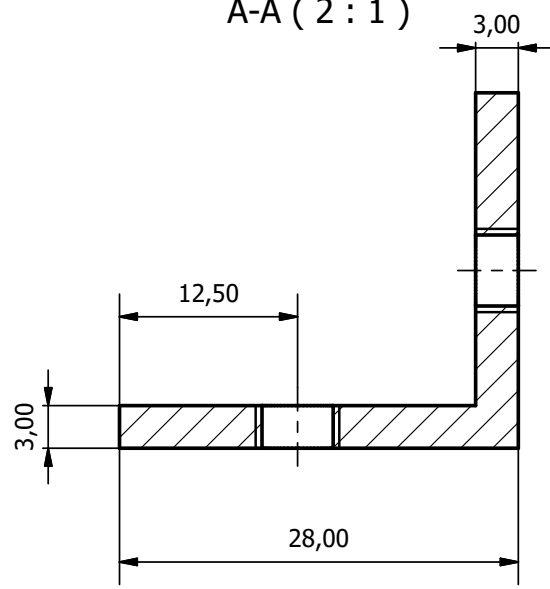




Diseñado por: Juan Palma Steven Rebolledo	Revisado por:	Aprobado por:	Escala: 2 : 1	Fecha: 26/08/2018	
ESPOL			Instrumento para medición de fuerza y torque		
			Celda de carga de torque	Edición: 1	Página: 3/5

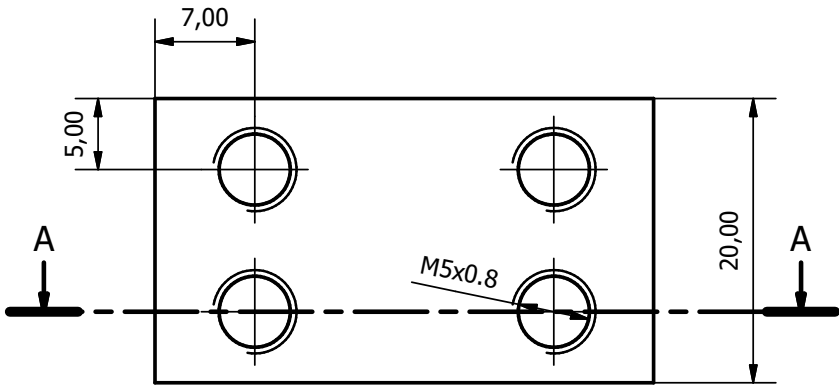
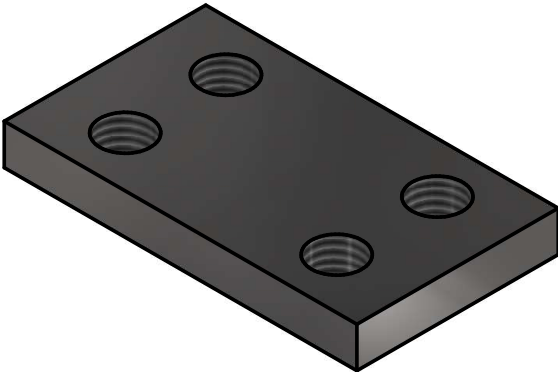


A-A (2 : 1)

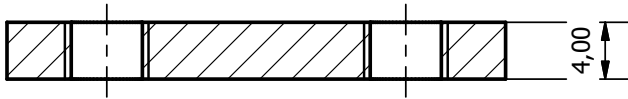


Diseñado por: Juan Palma Steven Rebolledo	Revisado por:	Aprobado por:	Escala: 2 : 1	Fecha: 26/08/2018	
ESPOL			Instrumento para medición de fuerza y torque		
			Union en L	Edición: 1	Página: 4/5





A-A (2 : 1)



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