

“BANCO DIDACTICO DE ENSAYOS A TORSIÓN”

PRESENTADO POR:

LUHER JEHINS OLAYA MORENO

DANIEL FELIPE PARRA ROJAS

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA Y BIOMÉDICA

IBAGUÉ, COLOMBIA

2020

“BANCO DIDÁCTICO DE ENSAYOS A TORSIÓN”

LUHER JEHINS OLAYA MORENO  
DANIEL FELIPE PARRA ROJAS

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

DIRECTOR (A): JESUS ARMANDO FANDIÑO  
INGENIERO MECANICO

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA Y BIOMÉDICA  
IBAGUÉ, COLOMBIA

2020

(Dedicatoria)

**Luher Jehins Olaya Moreno**

Dedico este trabajo principalmente a Dios. A mis padres y hermanos por su apoyo, por que estuvieron en este proceso de formación siempre motivándome y guiándome para la culminación de mi proceso formativo.

**Daniel Felipe Parra Rojas**

Dedico este trabajo a Dios, a mis padres y hermanos que son la principal motivación para la culminación de este arduo proceso formativo.

## (Agradecimientos)

Agradecemos al ingeniero Jesús Armando Fandiño, director de tesis, por su valiosa guía, porque siempre estuvo dispuesto a ofrecer su ayuda y colaboración durante el proceso del presente.

Agradecemos al ingeniero Luis Humberto Palmeth por su apoyo y asesoramiento a la realización de la misma

A todos los profesores que hicieron y hacen parte de la universidad Antonio Nariño sede Ibagué, los cuales brindaron todos sus conocimientos y dedicación para que pudiésemos culminar nuestros estudios.

Agradecemos a nuestra compañera y amiga Kimberly Johana Rincón estudiante de Ingeniería Electrónica la cual nos prestó asesoría constante y total disposición en la programación y conexión de los componentes electrónicos.

## RESUMEN

En este trabajo se presenta como fue el proceso para obtener la fabricación y puesta a punto de un banco didáctico que efectúa ensayos de torsión a probetas normalizadas según la norma ASTM-E143. La primera actividad consistió en que se realizó un análisis de sensibilidad en el sistema de medición del ángulo de giro y del par torsor del prototipo, y este se efectuó con base a la teoría del error; Al contar con estos criterios se determinó el error que se comete en el sistema de medición. Luego se compró los dispositivos electrónicos requeridos para las mediciones. Seguido a esto se procedió a la fabricación en el mercado local de las piezas requeridas guiándose de los planos del diseño detallado, para posteriormente ejecutar el ensamble, se realizaron los ajustes y la calibración del prototipo y se ejecutaron pruebas para la verificación de un correcto funcionamiento.

Finalmente se realizó material pedagógico con un paso a paso de cómo realizar los ensayos y un Manual de mantenimiento para garantizar una mayor vida útil del prototipo.

**Palabras clave:** Torsión, Ensayo experimental, Prototipo industrial, Caracterización de Materiales.

## ABSTRACT

This work presents the process followed to obtain the manufacturing and tuning of a didactic bench that performs torsion tests on standardized specimens according to the ASTM-E143 standard. The first activity was that a sensitivity analysis was performed on the prototype turning angle and torque measurement system, and this was carried out based on the theory of error; having these criteria, the error made in the measurement system was determined. Then the electronic devices required for the measurements were purchased. Following this, the required parts were manufactured in the local market, guided by the detailed design drawings, to subsequently carry out the assembly, adjustments and calibration of the prototype were carried out, and tests were carried out to verify correct operation. .

Finally, pedagogical material was made with a step-by-step of how to carry out the tests and a Maintenance Manual to guarantee a longer useful life for the prototype.

Key words: Torsion, Experimental test, Industrial prototype, Characterization of Materials.

## TABLA DE CONTENIDO

|   |      |
|---|------|
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL                        | pág. |
| 1 Introducción  | 1    |
| 1.1 Contextualización   | 1    |
| 1.2 Planteamiento del problema  | 2    |
| 1.3 Justificación   | 2    |
| 1.4 Objetivos   | 2    |
| 1.4.1 Objetivo general  | 2    |
| 1.4.2 Objetivo específico   | 2    |
| 1.5 Alcance   | 3    |
| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO   |      |
| 2.1 Antecedentes  | 3    |
| 2.2 Marco Conceptual  | 4    |
| 2.2.1 Ensayos a torsión y maquinaria                                  | 4    |
| 2.2.2 Norma ASTM E143   | 5    |
| 2.2.3 Definición básicas ingenieriles                                 | 6    |
| CAPITULO 3. DISEÑO METODOLÓGICO                                       |      |
| 3.1 Metodología   | 8    |
| CAPITULO 4. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL SISTEMA DE MEDICION          |      |
| 4.1 La medida   | 9    |
| 4.2 Los errores y su clasificación                                    | 9    |
| 4.3 Propagación de errores sistemáticos en determinaciones indirectas | 10   |
| 4.3.1 Suma  | 10   |
| 4.3.2 Diferencia  | 10   |
| 4.3.3 Producto  | 10   |
| 4.3.4 Cociente  | 10   |
| 4.3.5 Potencia  | 10   |
| 4.4 Calculo del análisis de sensibilidad del prototipo                | 11   |
| 4.4.1 Análisis de error del torque                                    | 11   |
| 4.4.2 Análisis de error del ángulo de giro                            | 12   |
| CAPITULO 5. FABRICACION Y ENSAMBLE DEL PROTOTIPO                      |      |
| 5.1 Clasificación de componentes                                      | 15   |
| 5.1.2 Piezas mecánicas producidas locamente por tercero               | 16   |
| 5.1.2.1 Transmisión de potencia                                       | 16   |
| 5.1.2.2 Sistema de adquisición del torque                             | 17   |
| 5.1.2.3 Base en lamina de acero                                       | 18   |
| 5.1.2.4 Estructura de soporte general                                 | 18   |
| 5.1.2.5 Volante   | 19   |
| 5.1.3 Piezas electrónicas producidas en otra ciudad                   | 20   |
| 5.1.3.1 Celdas de carga   | 20   |

|   |    |
|---|----|
| 5.1.3.2 Encoder óptico                              | 20 |
| 5.1.3.3 Arduino                                     | 21 |
| 5.1.4 Otros insumos                                 | 21 |
| 5.1.4.1 Chumaceras                                  | 21 |
| 5.1.4.2 Tornillos y tuercas                         | 22 |
| 5.2 Ensamble del prototipo                          | 22 |
| <b>CAPITULO 6. VERIFICACION Y PUESTA A PUNTO</b>    |    |
| 6.1 Banco didáctico torsión                         | 24 |
| 6.2 Banco de tensión                                | 26 |
| 6.3 Resultados obtenidos pruebas a torsión          | 26 |
| 6.4 Comparación de resultados                       | 26 |
| 6.5 Resultados obtenidos pruebas a tension          | 36 |
| 6.6 Comparación de resultados                       | 39 |
| 6.7 Resultados y conclusiones de las pruebas        | 39 |
| 6.8 Guía de laboratorio                             | 40 |
| 6.9 Manual de mantenimiento                         | 44 |
| <b>CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>   |    |
| 7.1 Conclusiones                                    | 45 |
| 7.2 Recomendaciones                                 | 46 |
| <b>CAPITULO 8. BIBLIOGRAFIA</b>                     |    |
| <b>CAPITULO 9. ANEXOS</b>                           |    |
| 9.1 Presupuestos                                    | 50 |
| 9.2 Cronograma de actividades                       | 52 |
| 9.3 Plano explosionado ensamble del prototipo       | 53 |
| 9.4 Diagrama para las conexiones de celdas de carga | 54 |
| 9.5 Diagrama para la conexión del encoder           | 55 |
| 9.6 Diagrama de conexión eléctrico                  | 56 |
| 9.7 Programación Arduino                            | 57 |

## LISTA DE FIGURAS

|   | pág. |
|---|------|
| Figura 8. Diagrama esfuerzo deformación de materiales dúctiles en tensión (Bocanegra):: | 15   |
| Figura 9. Ejes y engranes (Autor)   | 27   |
| Figura 10. Adquisición de torque (Autor)  | 28   |
| Figura 11. Base en lamina de acero (Autor)  | 29   |
| Figura 12. Estructura soporte general (Autor)   | 29   |
| Figura 13. Volante transmisión de potencia (Autor)                                      | 30   |
| Figura 14. Celdas de carga (Autor)  | 31   |
| Figura 15. Encoder óptico (Autor)   | 31   |
| Figura 16. Arduino uno (Autor)  | 32   |
| Figura 17. Chumaceras (Autor)   | 32   |
| Figura 18. Tornillos (Autor)  | 33   |
| Figura 19. Pano de ensamble explotado (Autor)   | 72   |

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL**

Como sabemos, los ensayos de materiales que se realizan en la vida cotidiana son de mucha importancia ya que de estos podemos entender como es el comportamiento de ellos, comprender las propiedades tanto mecánicas, físicas y químicas entre muchas otras son una prioridad para los ingenieros ya que basándose en esto pueden garantizar que sus diseños sean confiables y económicos según sea el requerimiento. Uno de los ensayos más importantes son los ensayos de torsión, ya que describe de una forma correcta la transmisión de potencia.

La mayoría de las máquinas de hoy en día pueden transmitir potencia de una manera muy efectiva, esto se debe a que tienen piezas que son resistentes y son capaces de soportar las cargas a la que están sometidas (Hibbeler, 2006).

Para la consolidación del presente trabajo se realizará un proceso de fabricación y puesta a punto. Siguiendo los lineamientos fundamentales de diseño y se sustentara el paso a paso a lo largo del mismo.

#### **CONTEXTUALIZACIÓN**

Es importante para la Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica contar con capacidad experimental en sus laboratorios, ya que esto, es de suma importancia en el proceso de formación de un ingeniero ya que se hace necesario conocer experimentalmente los comportamientos de los materiales y con esto los estudiantes fortalecerán y comprenderán las estructuras conceptuales aprendidas en el aula de clases que luego podrán usar en su vida laboral. Se requiere fabricar y ensamblar una máquina para ensayos de torsión para el laboratorio de la Universidad Antonio Nariño sede Ibagué.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las competencias experimentales en la universidad Antonio Nariño sede Ibagué se encuentran limitadas debido a la falta de máquinas y espacios pedagógicos experimentales, esto hace que la adquisición de la información en los programas académicos sea desde una perspectiva netamente teórica.

Lo anterior genera la necesidad de contar con equipos de laboratorio que solucionen las carencias encontradas. Es así como este proyecto pretende fabricar y poner a punto un banco didáctico que permita realizar ensayos de torsión.

## JUSTIFICACIÓN

En el proceso de formación de un ingeniero electromecánico, es una prioridad que se conozca a ciencia cierta como es el comportamiento general de los materiales, ya que entendiendo como se comporta es más fácil asegurar que los diseños sean confiables y/o económicos, ya sean diseños de componentes, equipos, y sistemas, según sean los requerimientos

Por lo tanto, el presente proyecto pretende brindar un espacio que garantice el aprendizaje significativo. Esto fortalecerá la visión y actuar ingenieril.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

- Construir un banco didáctico para efectuar ensayos de torsión y verificar su funcionamiento.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis de sensibilidad de las variables ángulo de giro y torque.
- Fabricar y ensamblar el banco de torsión.
- Realizar ensayos experimentales para la calibración y puesta a punto del banco didáctico.
- Realizar los manuales de operación y mantenimiento del banco.
- Realizar guías de laboratorio del banco didáctico.

## ALCANCE

El banco didáctico de ensayos a torsión que se fabricó, está destinado al laboratorio de la Universidad Antonio Nariño sede Ibagué, con la finalidad de ser usada en los diferentes cursos relacionados al propósito de la máquina. Principalmente a los profesores y estudiantes de ingeniería Electromecánica y Mecánica.

## **CAPÍTULO 2.**

### **MARCO TEÓRICO**

#### ANTECEDENTES

El siguiente trabajo de grado es la continuación de un proyecto realizado en la universidad Antonio Nariño en el primer semestre del año 2019, en el cual se realizó el diseño de un prototipo de banco didáctico a torsión, a continuación, se dará una breve descripción del proyecto de grado que se realizó en la primera etapa “diseño del banco didáctico a torsión”.

MAHECHA NARANJO, Omar David 2019. Realizo el diseño de una maquina didáctica de ensayos a torsión para materiales de bajo contenido de carbono y siguió la norma ASTM E143-02. Su finalidad es calcular el módulo de rigidez de materiales. Determino las fuerzas máximas requeridas para la ruptura de las probetas normalizadas según DIN 50125 (normaliza las probetas para diferentes ensayos).

(López & Mejía Cholo, 2010) realizaron una tesis donde diseñaron un sistema de control para la adquisición de datos que facilita la operación de un ensayo axial-torsión en una máquina de ensayo de materiales, como objetivo general plantearon mejorar y reactivar el sistema hidráulico que posee la fuerza necesaria que necesita el sistema axial-torsión para un buen funcionamiento. A través de un proceso de selección utilizaron una tarjeta de adquisición de datos (daq) de nacionales instrumentos para poner a prueba el

sistema. Según los resultados obtenidos de las pruebas demostraron que el sistema de control resulto adecuado y confiable.

(Caballero Agüero, Astillo Arizola, Carlos Enrique 2017). Diseñaron y realizaron una máquina para ensayos de torsión de alambres que seguían la norma ISO 7800. Como objetivo plantearon investigar, diseñar y realizar una máquina para ensayos a torsión. Y como finalidad de este trabajo se realizó exitosamente lo planteado y se logró todos los objetivos planteados.

## MARCO CONCEPTUAL

### ENSAYOS A TORSIÓN Y MAQUINARIA

El ensayo a torsión es una prueba muy común que se aplica a diferentes materiales para poder determinar cuáles son las propiedades mecánicas, estas son muy útiles ya que gracias a esto se puede: Analizar cómo se comportan los materiales cuando son sometidos a esfuerzos cortantes, analizar resultados basados en graficas construidas observando comportamientos de esfuerzo vs Angulo de giro, de igual manera se puede determinar: módulos de rigidez, limites elásticos y resistencia a la fluencia entre otros.

### PRUEBA DE TORSIÓN

Los ensayos de torsión se realizan en máquinas específicas para tal fin. Normalmente se realizan con probetas normalizadas, en donde un extremo de la probeta esta fijo y el otro extremo de la probeta es la que gira produciendo los esfuerzos cortantes. El extremo libre gira gracias a que existe una transmisión de potencia, esta se puede dar por medio de un motor o de forma manual por medio de volantes o manivelas.

Las pruebas de torsión básicamente requieren conocer cuál es la longitud de la probeta, cual es el par torsor en cada instante y requieren conocer cuál es el Angulo de giro que se produce con respecto al par torsor.

## NORMA ASTM-E143

Esta norma consiste en realizar pruebas de torsión que se usa comúnmente para calcular el módulo de rigidez de los materiales. Esta norma específica que se usan en materiales en donde la fluencia es despreciable con respecto a la carga.

Lo que se busca obtener en el ensayo a torsión con esta norma son:  
El par torsor aplicado y el Angulo de torsión para determinar el G (Modulo de corte).  
(E143-02 2002)

## CONSIDERACIONES GENERALES

El módulo de rigidez se puede determinar usando la ecuación matemática explicita que se encuentran dada en la resistencia de materiales la cual se da de la siguiente manera:

G: Modulo de corte de la muestra

T: Torque

L: Longitud Del calibre

J: momento polar de inercia sobre su centro

$\Theta$ : Angulo de giro

(E143-02 2002).

$$G = \frac{TL}{J\theta}$$

## DEFINICIONES BÁSICAS INGENIERILES PARA ESTE ENSAYO

La mecánica de materiales es la encargada de estudiar el comportamiento de los materiales que pueden ser sometidos a diferentes tipos de cargas, al mismo tiempo esta tiene diferentes métodos analíticos encargados de determinar las propiedades de dichos materiales.

Para el diseño de una estructura se debe determinar las cargas a la que esta está sometida y se debe acudir a las técnicas de la estática que nos facilitan hallar dichas cargas.

De igual manera nos permite determinar tamaños de piezas como también los materiales que se deben usar (Budynas, 2008)



**Figura 1** curva de esfuerzo y deformación en torsión (V́ctor Leonardo Carmona, 2016)

Un caso típico es el diagrama indicado en la figura 8, en donde se visualiza un gráfico de esfuerzo vs deformación, y las zonas conocidas por las que pasa un material cuando es sometido a una carga, A continuación una breve descripción de las zonas de esta gráfica.

#### A) ZONA ELASTICA

Como se puede observar en la gráfica el inicio del comportamiento del material, (pendiente azul), es denominada zona elástica o región elástica. El comportamiento del esfuerzo varia linealmente con respecto a la deformación, de igual manera si el material es liberado y aún se encuentra en esta zona entonces el volverá a su estado original. (Esta es la zona de interés para este proyecto). (Budynas, 2008)

#### B) ZONA PLASTICA

Como se puede observar en la gráfica después de la zona elástica el material entra en una región denominada zona plástica. El comportamiento del esfuerzo deja de variar linealmente con respecto a la deformación, De igual manera si el material es liberado en esta zona el no volverá a su estado original y además su sección transversal empieza a disminuir (Budynas, 2008).

### C) ZONA DE ESTRICCIÓN.

Como se puede observar en la gráfica después de la zona plástica el material llega a la zona de estricción o ruptura, el material no logra compensar la disminución de la sección transversal y de esta manera llega a la ruptura. (Budynas, 2008).

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGIA**

A continuación, se relatarán las etapas y actividades realizadas para culminar el proyecto de fabricación y puesta a punto del banco, en cada etapa se relaciona el objetivo respectivo de modo que sea visible el cumplimiento de la misma.

**Etapa 1:** Análisis de sensibilidad en el sistema de medición del Angulo de giro y par torsor del prototipo.

Actividades:

1. Se calcula el error que se comete en el sistema de medición desde una perspectiva teórica por medio de la teoría del error, se aplican las fórmulas planteadas en dicha teoría para el cálculo del error.

**Etapa 2:** Fabricación y ensamble del prototipo

Actividades:

1. Se mandó a fabricar las piezas mecánicas requeridas siguiendo los planos dados en el diseño detallado obtenido.

2. Se comprarán los dispositivos electrónicos quienes darán las lecturas correspondientes al par torsor y Angulo de giro.
3. Se ensamblará el prototipo con ayuda de: escuadras, niveles, centro punto, taladros y machuelos.

**Etapa 3.** Etapa de puesta a punto y verificación del prototipo

Actividades:

2. Realización de ensayos de torsión para verificación del correcto funcionamiento.
3. Comparación de resultados por medios de resultados teóricos ya establecidos en libros y ensayos a tensión.
4. Realización de ensayos finales.

**Etapa 4.** Documentación del proyecto.

1. Escritura del proyecto de grado
2. Realización de un manual de mantenimiento.
3. Realización de guía de laboratorio.

## **CAPÍTULO 4.**

### **ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL SISTEMA DE MEDICIÓN**

#### **LA MEDIDA**

La medida de una magnitud, básicamente es una operación que se da después de ser comparada con otro valor de la misma especie que se tomó como referencia. Se plantean dos casos de medidas las cuales son: Medida directa y medida indirecta. La primera se da cuando se usa un instrumento de medida y la segunda se da cuando se realizan varias medidas con diferentes unidades y estas se relacionan acudiendo a cálculos matemáticos. (Hidalgo and Medina, n.d.).

## LOS ERRORES Y SU CLASIFICACION

En la práctica frecuentemente es imposible que una medida no tenga error, y es de mucha dificultad establecer el valor exacto del error, lo que se puede determinar son unos límites en donde se establece el rango donde se supone que se encuentra dicho error y este es el objetivo del cálculo de errores.

Los errores sistemáticos se pueden dar por 3 casos: (instrumentales, de método o personales), los instrumentales se dan por una falta de precisión de los dispositivos con que se tomaran la medidas, de método se dan cuando se requiere hacer una simplificación debido a la complejidad de la ecuaciones y esta simplificación no es correcta y los personales se dan por falta de precisión de la persona que esté tomando las medidas.

### PROPAGACIÓN DE ERRORES SISTEMÁTICOS EN DETERMINACIONES

#### INDIRECTAS

El error de una manera indirecta es más común, normalmente una medida indirecta surge a partir de una medida directa, siendo la magnitud representada por  $Z$ , y la función de las medidas directas son representadas con  $(A, B)$ .

(Hidalgo and Medina, n.d.) Se plantea las ecuaciones del error absoluto dado en las diferentes operaciones que existen.

| OPERACIÓN  | FORMA            | ERROR ABSOLUTO  |
|------------|------------------|---|
| SUMA       | $Z = A + B$      | $\Delta Z = \Delta A + \Delta B$ Ecuación 4.3.1                                     |
| DIFERENCIA | $Z = A - B$      | $\Delta Z = \Delta A + \Delta B$ Ecuación 4.3.2                                     |
| PRODUCTO   | $Z = A \times B$ | $\Delta Z = (A \times \Delta B) + (B \times \Delta A)$ Ecuación 4.3.3               |
| COCIENTE   | $Z = A / B$      | $\Delta Z: z \left( \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} \right)$ Ecuación 4.3.4 |

|          |           |   |
|----------|-----------|---|
| POTENCIA | $Z = A^m$ | $\Delta Z: (A \pm \Delta A)^m = A \pm A^m \left(\frac{m\Delta A}{A}\right)$<br>Ecuación 4.3.5 |
|----------|-----------|---|

## CALCULO DEL ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL PROTOTIPO

### ANALISIS DE ERROR

De acuerdo con la teoría del error se puede obtener la incertidumbre por medio de las ecuaciones que se plantean. Para esto se deben conocer algunos datos.

#### DATOS CONOCIDOS:

**Fuerza:** 98,1 N (Fuerza máxima ejercida por el operario “criterio de diseño”)

**Torque Max:** 15 Nm (Torque máximo requerido para la ruptura de las probetas criterio de diseño”)

**$\Delta f$ :** Precisión de la celda de carga: 0,02 kg

**$\Delta d$ :** Precisión de la fresadora: 0,01mm

**G:** Modulo de rigidez del acero: 79,36 Gpa

**$\Delta G$ :** Error del módulo de rigidez del acero: 1,26 Gpa (Error del módulo de rigidez del acero según ensayos experimentales)

**d:** Distancia entre el centro del disco y las celdas de carga: 50mm “Criterio de diseño”

**L:** Longitud total de los ejes: 310mm = 0,31m “criterio de diseño”

**de:** Diámetro entre ejes: 0,0254m “criterio de diseño”

## ANALISIS DE ERROR DEL TORQUE

Conociendo que el torque es el resultado del producto de fuerza por distancia se aplicara la ecuación 4.3.3 (El error de un producto)

$$\Delta Z = (A \times \Delta B) + (B \times \Delta A)$$

$$\Delta T: (f \Delta d + d \Delta f)$$

$$\Delta T: (98,1N * 0,01mm + 50mm * 0,02kg * 9.8m/s^2)$$

$$\Delta T: \mathbf{0,010781 Nm}$$

CONCLUSION: El error desde una perspectiva teórica que se está teniendo en el sistema de medición del par torsor es muy pequeño. Lo cual garantiza que es confiable la medida que se obtendrá.

## ANALISIS DE ERROR DEL ANGULO DE GIRO

El Angulo de giro de las probetas es el resultado de un procedimiento matemático detallado que dentro de sus operaciones lleva: (producto, cociente y potencias) se aplicaran las ecuaciones 4.3.3 (El error de un producto), 4.3.4 (El error de un cociente) y 4.3.5 (El error de una potencia)

## ANALISIS DE ERROR DEL ANGULO DE GIRO

Fórmula para el Angulo de giro

$$\Phi = \frac{T L}{G I_p}$$

Para hacer más sencillo el cálculo se usa un cambio de variable:

$$W = T L \quad Y = G I_p$$

En donde se reemplaza de la siguiente manera

$$\Phi = \frac{W}{Y}$$

Se plantea la ecuación 2.2.4 (Error de un cociente).

$$\Delta Z: z \left( \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} \right)$$

$$\Delta \Phi: \Phi \left( \frac{\Delta W}{W} + \frac{\Delta Y}{Y} \right)$$

Se determina cada variable para realizar los cálculos correspondientes

Cálculo de la variable W

$$W: T L \quad W: (15 \text{ Nm}) (0,31\text{m})$$

$$W: 4,64 \text{ Nm}^2$$

Cálculo de la variable  $\Delta W$ .

Se aplica la ecuación 4.2.3 (El error de un producto)

$$\Delta W: (T \Delta L + L \Delta T)$$

$$\Delta W: (15\text{Nm} * 1 \times 10^{-5}\text{m} + 0,31\text{m} * 0,010781\text{Nm})$$

$$\Delta W: 3,49211 \times 10^{-3} \text{ Nm}^2$$

Cálculo de la variable Y

$$Y: G IP$$

$$Y: (79,36 \times 10^9 \frac{N}{m^2}) \left( \frac{\pi}{32} (0,0254\text{m})^4 \right)$$

$$Y: 3242,92138 \text{ Nm}^2$$

Cálculo de la variable  $\Delta Y$

Se aplica la ecuación 4.2.3 (El error de un producto)

$$\Delta Y: (G \Delta IP + IP \Delta G)$$

El incremento IP está condicionado por una potencia ya que el diámetro es elevado a la 4 se usa la fórmula 4.2.5 (Error de una potencia).

## ERROR DE UNA POTENCIA

$$\Delta IP: (d \pm \Delta d)^m : d^m \pm d^m \left(\frac{m\Delta d}{d}\right)$$

$$\Delta IP: (0,0254m)^4 \left(\frac{4 * 0,01mm}{25,4 mm}\right)$$

$$\Delta IP: 6,554 \times 10^{-10} m^4$$

Cálculo de  $\Delta Y$

Se aplicará la ecuación 4.2.3 (El error de un producto)

$$\Delta Y: (G \Delta IP + IP \Delta G)$$

$$\Delta Y: (79,36 \times 10^9 \frac{N}{m^2} * 6,554 \times 10^{-10} m^4 + 40.8634 \times 10^{-9} m^4 * 1,26 \times 10^9 \frac{N}{m^2})$$

$$\Delta Y: 103,5004 Nm^2$$

Cálculo del Angulo de giro

$$\Phi: \frac{TL}{G IP} \quad \Phi: \frac{(15 Nm) (0,31m)}{(79,3 GPa) (4,0863 \times 10^{-8})}$$

$$\Phi: 0,08^\circ$$

Una vez obtenidas todas las variables se procede a aplicar las formula original.

$$\Delta \Phi: \Phi \left( \frac{\Delta W}{W} + \frac{\Delta Y}{Y} \right)$$

$$\Delta \Phi: 0,082^\circ \left( \frac{3,49211 \times 10^{-3} Nm^2}{4,64 Nm^2} + \frac{103,5004 Nm^2}{3242.92138 Nm^2} \right)$$

$$\Delta \Phi: 0,0026^\circ$$

CONCLUSION: El error desde una perspectiva teórica que se está teniendo en el sistema de medición del Angulo de giro es muy pequeño. Lo cual garantiza que es confiable la medida que se obten

## **CAPITULO 5.**

### **FABRICACIÓN Y ENSAMBLE DEL PROTOTIPO**

#### CLASIFICACIÓN DE COMPONENTES

La máquina de ensayos a torsión está compuesta por diversos tipos de componentes, los cuales los dividimos en 3 grupos.

- Piezas mecánicas
- Piezas electrónicas
- Otros insumos

Para las piezas mecánicas se seleccionó un proveedor, a quien se dieron los planos de las piezas a producir.

Las piezas electrónicas fueron adquiridas en otra ciudad ya que en el mercado local no se encontraron proveedores para los dispositivos electrónicos.

Dentro de “otros insumos” se incluyen todos aquellos componentes estándar que se consiguen sin dificultad en el mercado local sin necesidad de producirlos especialmente para este proyecto, como tornillos, tuercas y arandelas.

## PIEZAS MECÁNICAS

### TRANSMISIÓN DE POTENCIA



**Figura 9** Ejes y engranes. (Autor)

La figura 9 corresponde a los engranes y ejes fabricados cuyo material son Acero 1045 con dimensiones de un eje de 350mm de largo y diámetro de 20mm, el otro eje con una dimensión de 260mm de largo y una pulgada de diámetro. Un engrane con un diámetro externo de 105mm y 40 dientes finalmente un piñón con diámetro externo de 45mm y 16 dientes. (Los ejes y engranes se acoplan por medio de cuñeros).

### SISTEMA DE ADQUISICIÓN DEL TORQUE



***Figura 10 Adquisición del torque. (Autor)***

La figura 10 corresponde al sistema de adquisición del torque lo cual está constituido por 2 diferentes elementos. (Componente estructural fijo y un componente estructural móvil).

**COMPONENTE ESTRUCTURAL FIJO:** puede movilizar todo el sistema de adquisición de torque en la probeta, y este acoplado a la estructura por medio de tornillos. Está definido por un material laminado en acero A36 y su longitud es de 149mm un ancho de 216mm una altura de 109mm y un espesor de 6mm, de igual forma tiene acoplado por medio de tornillos dos cuadrantes 13mm x 13mm x 6mm donde se ubican las celdas de carga.

**COMPONENTE ESTRUCTURAL MÓVIL:** Está definido por un eje y con un acople que lleva un cuadrante en acero 1045 para la sujeción de la probeta, tiene una longitud de 113mm, está compuesto por dos diámetros externos, uno de 25.4mm el otro de 140mm y un espesor de 6mm, de igual forma que la componente estructural fija lleva acoplado por medio de tornillos dos cuadrantes de 13mm x 13mm x 6mm.

**BASE EN LAMINA DE ACERO A36**



***Figura 11 Base en lamina de acero. (Autor)***

La figura 11 corresponde a un soporte específico laminar de los demás componentes de la máquina, tiene un largo de 590mm, un ancho de 460mm y un espesor de 6mm. Este fue elaborado en Acero estructural laminado A36-

## ESTRUCTURA DE SOPORTE GENERAL



*Figura 12 Estructura soporte general. (Autor)*

La figura 12 corresponde a un soporte general estructural brindado por la universidad Antonio Nariño sede Ibagué conformada por perfiles comerciales cuadrados. Los perfiles están unidos por medio de soldadura en cada una de las esquinas.

## VOLANTE



**Figura 13** Volante transmisión de potencia (Autor)

La figura 13 corresponde a un volante de 30cm de diámetro externo fabricado en aluminio y un diámetro interno de 20mm para ser acoplado al eje de 20mm por medio de cuñero y prisioneros.

## PIEZAS ELECTRÓNICAS

### CELDAS DE CARGA



**Figura 14** Celdas de carga. (Autor)

La figura 14 corresponde a dos celdas de carga con capacidad de 50 kg para la lectura de la fuerza ejercida entre la componente estructural fija y la componente estructural móvil.

### ENCODER ÓPTICO



***Figura 15 Encoder óptico. (Autor)***

La figura 15 corresponde a un encoder óptico de 2000 pulsos por revolución para la medición del avance angular de las probetas.

## ARDUINO UNO



***Figura 16 Arduino uno. (Autor)***

La figura 16 corresponde al Arduino uno que se usara para el programa que tomara las lecturas de nuestras medidas.

## OTROS INSUMOS

### CHUMACERAS



***Figura 17 Chumaceras. (Autor)***

La figura 17 corresponde a las chumaceras que se usaran para el sistema de alineación de los ejes.

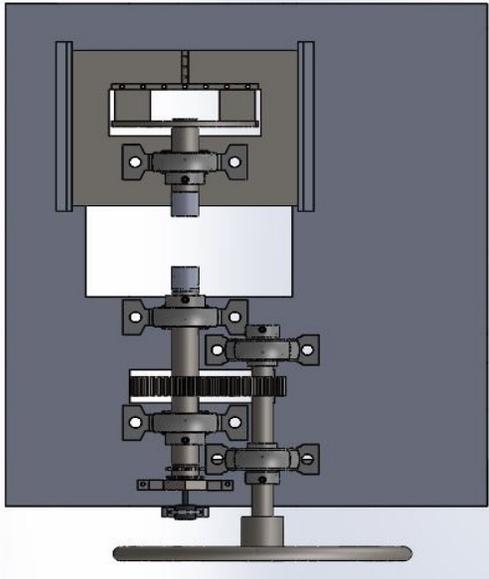
**TORNILLOS Y TUERCAS**



***Figura 18 Tornillos (Autor)***

La figura 18 corresponde a tornillos, tuercas que se usaran para el proceso de ensamble del prototipo.

**ENSAMBLE DEL PROTOTIPO**



**Figura 19** Ensamble CAD (Autor)



**Figura 20** Ensamble (Autor)

Para el ensamble del prototipo se llevaron a cabo diferentes tipos de mediciones, trazos y perforaciones para unir y acoplar todas las partes del banco didáctico.

Se realizaron los siguientes pasos:

1. Se verificó que la base en la cual irá soportada toda la estructura de medición y ejecución del banco, estuviera alineada. Para esto se tomaron las mediciones correspondientes con niveles, ángulos y se dieron los ajustes necesarios para dar nivel a la estructura. Se realizaron cuatro perforaciones en la parte superior de la estructura (una en cada esquina) y se colocaron cuatro tornillos de diámetro 3/8 en donde se soportará la base en lámina.
2. Se soporta la base en lámina A36 en la estructura de perfiles laminados. Para dar ajuste a la lámina sobre la estructura, se realizan cuatro perforaciones con un taladro de árbol, uno en cada esquina y se utilizaron los tornillos colocados anteriormente. Para dar ajuste a la lámina se utilizaron tuercas de 3/8.
3. Para el ensamble de las chumaceras con los ejes, se realizaron 8 perforaciones de 3/8. Se colocaron las chumaceras y se les dio ajuste con tornillos y tuercas 3/8. Se colocaron los ejes con los piñones ya acoplados y se les dio ajuste.

4. Para el acople del trinquete el cual es la pieza mecánica que nos garantizara que el giro del banco se de en un solo sentido, se colocó sobre uno de los extremos del eje de pulgada. Para la sujeción de este y que al momento del giro del eje no gire el trinquete también, se adecuo una estructura con dos ángulos en lámina las cuales se ajustan a la base. Se realizaron dos perforaciones en las láminas en la parte superior y se ajustan al trinquete con tornillos de 1/4. Con este sistema se garantiza que el giro solo se dé hacia un solo sentido.
5. Para el acople del encoder óptico, este se situó dentro del trinquete y se le dio ajuste con un buje para que, al momento del giro del eje de pulgada, también gire el eje del encoder. Para soportarlo, se utilizó un ángulo en lámina y se ajustó con una abrazadera ajustable.
6. El sistema de adquisición de torque consta de dos partes, una móvil y fija. Para ajustar la móvil a la fija, se realiza dos perforaciones para ajustar la chumacera en donde ira un eje acoplado a un círculo en lámina. Este círculo se sitúan dos soportes y se ajustan con tornillos brístol. En la parte fija, se ajustan dos soportes también con tornillos brístol en el cual se situación las celdas de carga y se ajustaron con pegamento industrial.
7. Se colocan dos rieles en aluminio, los cuales permitirán que el sistema de adquisición de torque se deslice y permita colocar la probeta libremente.
8. Se sitúa una caja en acrílico a la base de acero 1045 en donde se coloca y ajusta el sistema de medición y adquisición de datos. Allí irán conectadas las celdas de carga y el encoder.
9. Se ajusta el volante al eje de diámetro 3/4.

## CAPITULO 6.

### PUESTA A PUNTO Y VERIFICACION DEL PROTOTIPO

A lo largo del desarrollo de este proyecto de tesis, se realizó un banco didáctico que efectuara ensayos a torsión. Para cuando finalizo el ensamble tanto lo estructural como lo electrónico, se procedió a aplicar ensayos para analizar dos tipos de materiales: ACERO 1020 Y Aluminio.

El ya conocimiento de las propiedades mecánicas de dichos materiales desde una perspectiva teórica permite establecer cuáles deben ser los resultados aproximados desde la experimentación.

Se establecen dos formas para determinar el correcto funcionamiento del banco didáctico de ensayos a torsión:

- Banco didáctico de ensayos a torsión:
  - 1) Se realizan pruebas con varias probetas normalizadas de los materiales ya especificados.
  - 2) Una vez obtenido los resultados de las variables ángulo de giro y par torsor se procede a registrar los datos y graficar en una plantilla de Excel las variables esfuerzo vs ángulo de giro.
  - 3) Se calcula el módulo de rigidez en cada punto registrado en la zona elástica
  - 4) Se sacan el promedio del módulo de rigidez entre todas las probetas y se compara con el módulo de rigidez dado en libros.
- Banco de ensayos a tensión
  - 1) Se busca en el historial de la máquina de ensayos a tensión pruebas realizadas con los mismos materiales.
  - 2) Se registran los datos obtenidos y sus gráficas.
  - 3) Una vez obtenido el módulo de elasticidad de los materiales se calcula por medio de las ecuaciones matemáticas ya explícitas cual debe ser el módulo de rigidez.

- 4) Se compara el módulo de rigidez obtenido del ensayo de tensión con el módulo de rigidez obtenido desde los ensayos a torsión

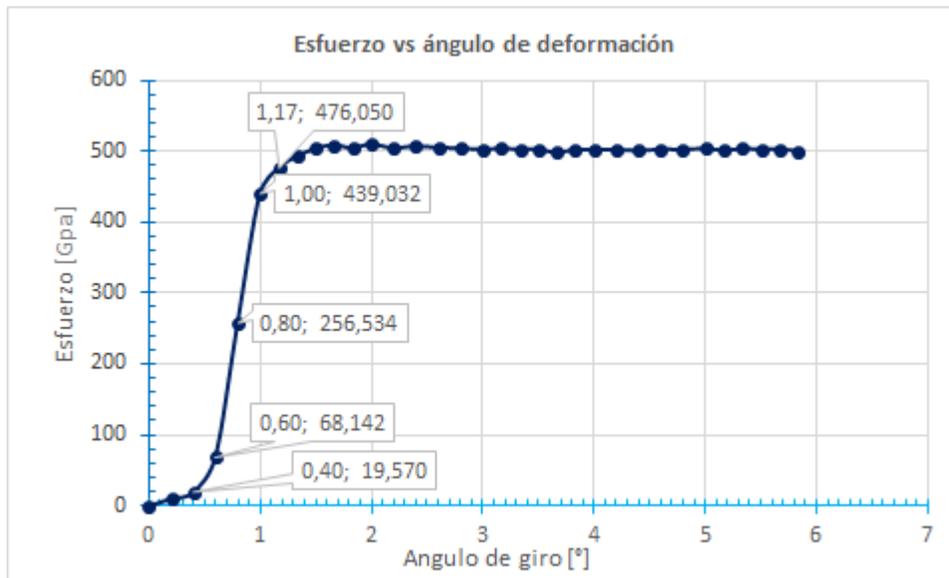
#### RESULTADOS OBTENIDOS PRUEBAS A TORSION

Para la etapa de la realización de las pruebas se determinó la cantidad de 5 pruebas para el ensayo de cada material, esto debido a que en estadística no es posible desarrollar las técnicas de muestreo para definir el número de pruebas a realizar, ya que las técnicas se aplican cuando se conoce un tipo de población específica lo cual no corresponde al caso. Teniendo en cuenta lo anterior, el diseño experimental y el número de pruebas asignadas para los ensayos son definidos por las personas que quieran realizar la calibración.

Al analizar los datos obtenidos y realizar sus correspondientes graficas en Excel se obtuvo los siguientes resultados.

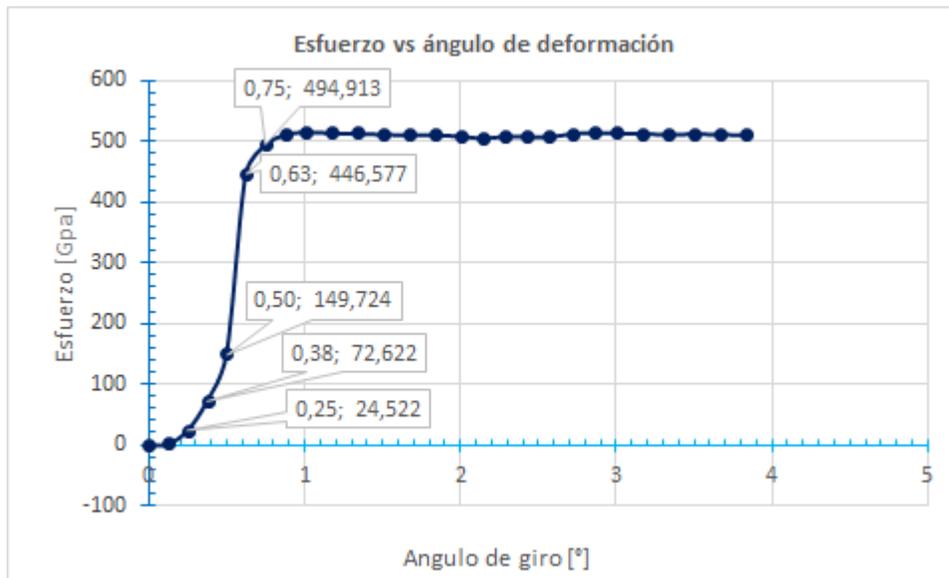
## PROBETAS DE ACERO 1020

### PROBETA 1 ACERO 1020



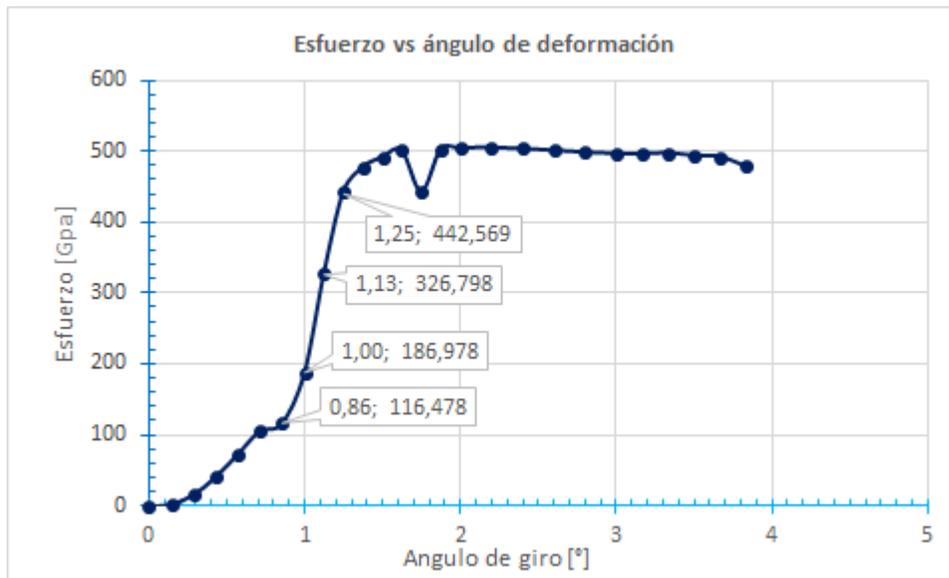
Como se puede visualizar la zona interesada, “zona elástica” termina con un esfuerzo cortante de 439,03Gpa y un Ángulo de giro de 1 de grado, Aplicando la fórmula del módulo de rigidez, se obtiene un módulo de rigidez promedio de:  $G: 89,6 \text{ Gpa}$

## PROBETA 2 ACERO 1020



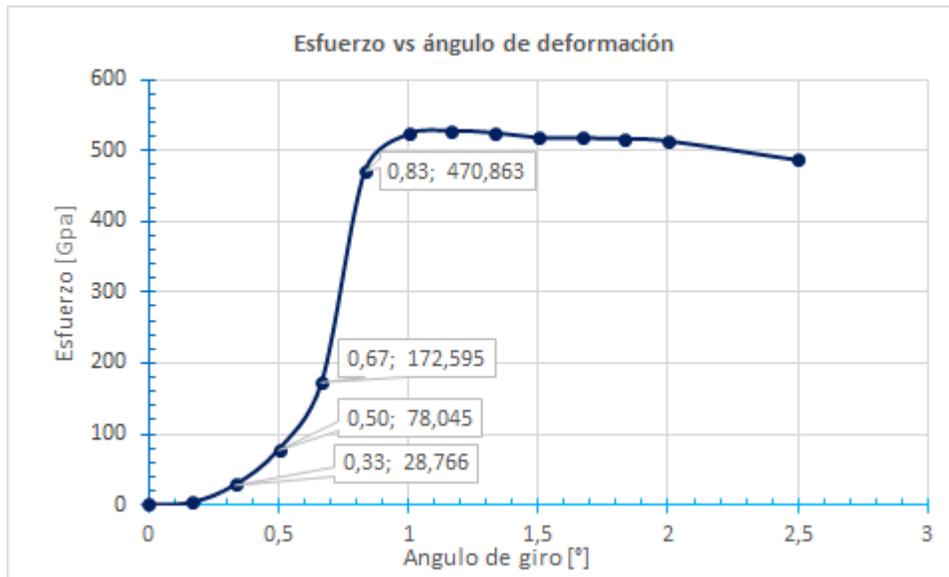
Como se puede visualizar la zona interesada, “zona elástica” termina con un esfuerzo cortante de 446,5769 Gpa y un Ángulo de giro de 0,63 grados, Aplicando la fórmula del módulo de rigidez, se obtiene un módulo de rigidez promedio de:  $G: 101,95 \text{ Gpa}$

### PROBETA 3 ACERO 1020



Como se puede visualizar la zona interesada, “zona elástica” termina con un esfuerzo cortante de 442,5636 Gpa y un Ángulo de giro de 1,25 grados, Aplicando la fórmula del módulo de rigidez, se obtiene un módulo de rigidez promedio de:  $G: 88,03\text{Gpa}$

## PROBETA 4 ACERO 1020



Como se puede visualizar la zona interesada, “zona elástica” termina con un esfuerzo cortante de 470,86 Gpa y un Ángulo de giro de 0,83 grados, Aplicando la fórmula del módulo de rigidez, se obtiene un módulo de rigidez promedio de:  $G: 87,03\text{Gpa}$

## PROBETA 5 ACERO 1020



Como se puede visualizar la zona interesada, “zona elástica” termina con un esfuerzo cortante de 185,32 Gpa y un Ángulo de giro de 1 grados, Aplicando la fórmula del módulo de rigidez, se obtiene un módulo de rigidez promedio de:  $G: 41,60 \text{ Gpa}$

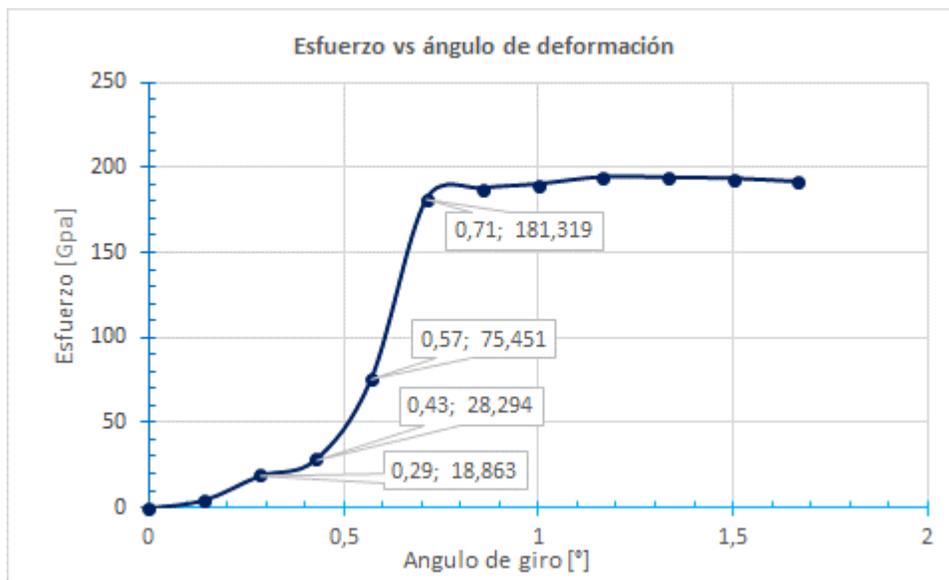
## CONCLUSION

Se obtuvo el módulo de rigidez calculado para cada probeta para finalmente calcular el promedio de rigidez total de las 5 probetas llegando a un resultado:

**G: 81,642 Gpa**

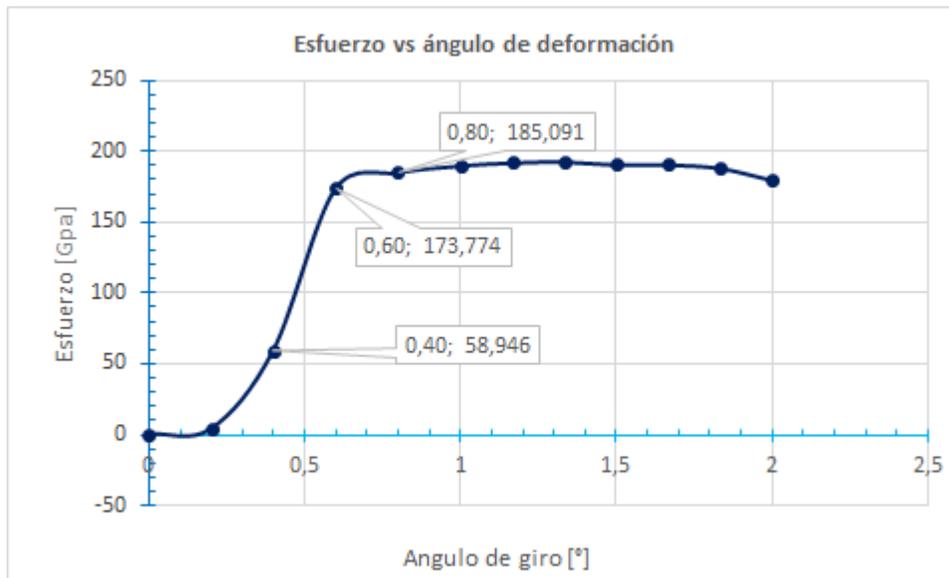
## PROBETAS DE ALUMINIO

### PROBETA 1 ALUMINIO



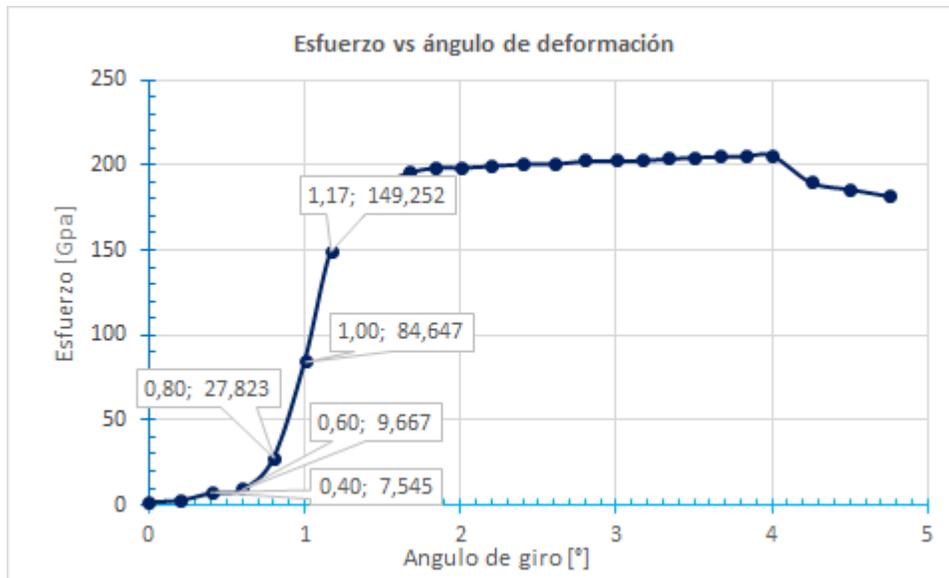
Como se puede visualizar la zona interesada, “zona elástica” termina con un esfuerzo cortante de 181,313 Gpa y un Ángulo de giro de 0,71 grados, Aplicando la fórmula del módulo de rigidez, se obtiene un módulo de rigidez promedio de:  $G: 49,5$  Gpa

## PROBETA 2 ALUMINIO



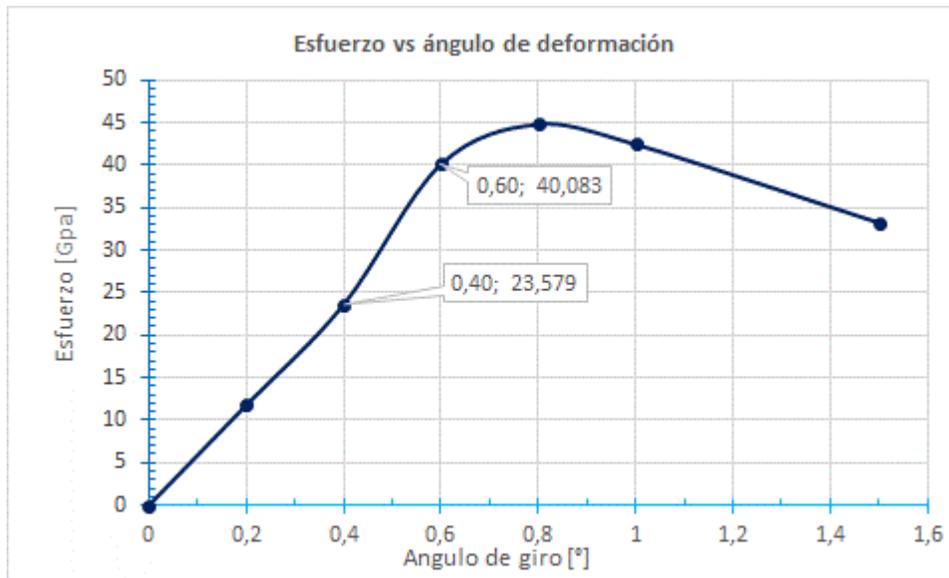
Como se puede visualizar la zona interesada, “zona elástica” termina con un esfuerzo cortante de 173,7 Gpa y un Ángulo de giro de 0,60 grados, Aplicando la fórmula del módulo de rigidez, se obtiene un módulo de rigidez promedio de:  $G: 55,16 \text{ Gpa}$

### PROBETA 3 ALUMINIO



Como se puede visualizar la zona interesada, “zona elástica” termina con un esfuerzo cortante de 149,25 Gpa y un Ángulo de giro de 1,17 grados, Aplicando la fórmula del módulo de rigidez, se obtiene un módulo de rigidez promedio de:  $G: 22,85 \text{ Gpa}$

## PROBETA 4 ALUMINIO



Como se puede visualizar la zona interesada, “zona elástica” termina con un esfuerzo cortante de 40,083 Gpa y un Ángulo de giro de 0,60 grados, Aplicando la fórmula del módulo de rigidez, se obtiene un módulo de rigidez promedio de:  $G: 39,40$  Gpa

## CONCLUSION

Se obtuvo el módulo de rigidez calculado para cada probeta para finalmente calcular el promedio de rigidez total de las 4 probetas llegando a un resultado:

**G: 41,715 Gpa**

COMPARACION CON LAS TABLAS DE PROPIEDADES MECANICAS DEL LIBRO

| Material                        | Módulo de elasticidad E |       | Módulo de rigidez G |       | Relación de Poisson $\nu$ | Peso unitario w      |                    |                   |
|---------------------------------|-------------------------|-------|---------------------|-------|---------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
|                                 | Mpsi                    | GPa   | Mpsi                | GPa   |                           | lb/pulg <sup>3</sup> | lb/ft <sup>3</sup> | kN/m <sup>3</sup> |
| Aluminio (todas las aleaciones) | 10.3                    | 71.0  | 3.80                | 26.2  | 0.334                     | 0.098                | 169                | 26.6              |
| Cobre al berilio                | 18.0                    | 124.0 | 7.0                 | 48.3  | 0.285                     | 0.297                | 513                | 80.6              |
| Latón                           | 15.4                    | 106.0 | 5.82                | 40.1  | 0.324                     | 0.309                | 534                | 83.8              |
| Acero al carbono                | 30.0                    | 207.0 | 11.5                | 79.3  | 0.292                     | 0.282                | 487                | 76.5              |
| Fundición de hierro (gris)      | 14.5                    | 100.0 | 6.0                 | 41.4  | 0.211                     | 0.260                | 450                | 70.6              |
| Cobre                           | 17.2                    | 119.0 | 6.49                | 44.7  | 0.326                     | 0.322                | 556                | 87.3              |
| Abeto Douglas                   | 1.6                     | 11.0  | 0.6                 | 4.1   | 0.33                      | 0.016                | 28                 | 4.3               |
| Vidrio                          | 6.7                     | 46.2  | 2.7                 | 18.6  | 0.245                     | 0.094                | 162                | 25.4              |
| Inconel                         | 31.0                    | 214.0 | 11.0                | 75.8  | 0.290                     | 0.307                | 530                | 83.3              |
| Plomo                           | 5.3                     | 36.5  | 1.9                 | 13.1  | 0.425                     | 0.411                | 710                | 111.5             |
| Magnesio                        | 6.5                     | 44.8  | 2.4                 | 16.5  | 0.350                     | 0.065                | 112                | 17.6              |
| Molibdeno                       | 48.0                    | 331.0 | 17.0                | 117.0 | 0.307                     | 0.368                | 636                | 100.0             |
| Metal Monel                     | 26.0                    | 179.0 | 9.5                 | 65.5  | 0.320                     | 0.319                | 551                | 86.6              |
| Niquel plata                    | 18.5                    | 127.0 | 7.0                 | 48.3  | 0.322                     | 0.316                | 546                | 85.8              |
| Acero al niquel                 | 30.0                    | 207.0 | 11.5                | 79.3  | 0.291                     | 0.280                | 484                | 76.0              |
| Bronce fosforado                | 16.1                    | 111.0 | 6.0                 | 41.4  | 0.349                     | 0.295                | 510                | 80.1              |
| Acero inoxidable (18-8)         | 27.6                    | 190.0 | 10.6                | 73.1  | 0.305                     | 0.280                | 484                | 76.0              |

(Douglas and Monel, n.d."Diseño en ingeniería mecánica de Shigley 8 edición.")

| COMPARACION DE RESULTADOS            |                           |
|--------------------------------------|---------------------------|
| Módulo de rigidez a partir de ensayo | Módulo de rigidez teórico |
| Acero 1020: 81,6Gpa                  | Acero 1020: 79,3 Gpa      |
| Aluminio: 41,7 Gpa                   | Aluminio: 26,2 Gpa        |

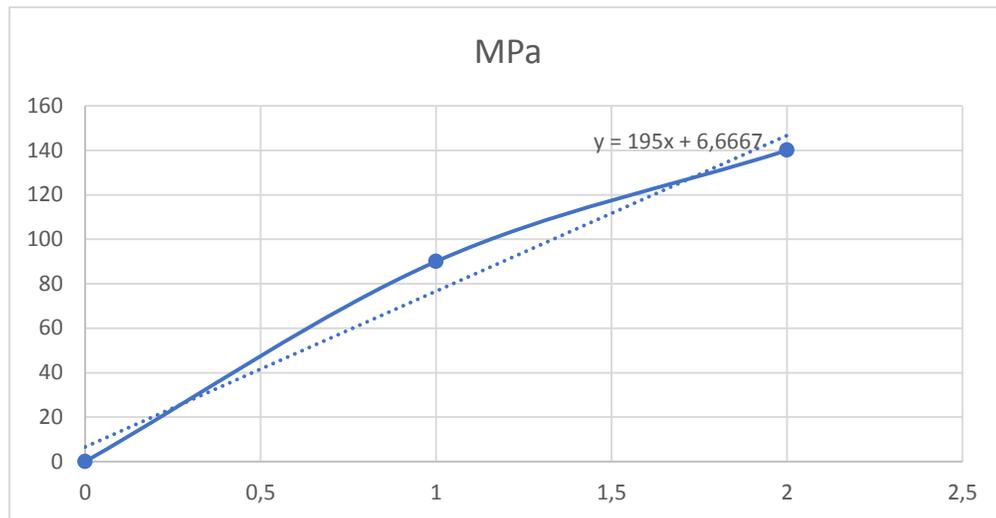
## RESULTADOS OBTENIDOS PRUEBAS A TENSION.

### HISTORIAL DE RESULTADOS GENERALES.

ACERO 1020

PENDIENTE  
RESP.  
ACERO

| % | Gpa |
|---|-----|
| X | Y   |
| 0 | 0   |
| 1 | 90  |
| 2 | 140 |



Como se puede visualizar la ecuación que describe la recta anterior es  $Y = 195x + 6,6667$  y conociendo que el módulo de elasticidad  $E$  es la pendiente de la ecuación se concluye que el módulo de elasticidad del acero 1020 es:  $E = 195 \text{ Gpa}$

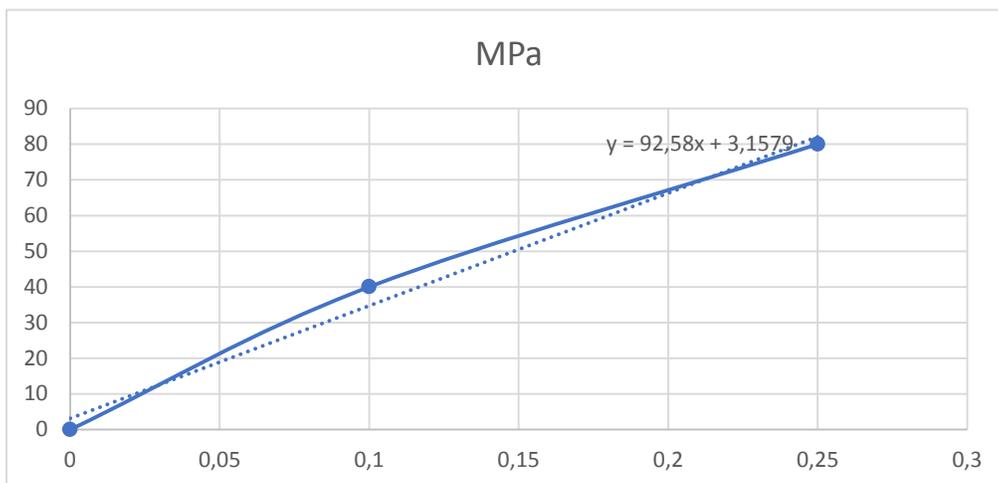
Al relacionar el módulo de elasticidad con el coeficiente de poisson se calcula el módulo de rigidez teórico:  $G: \frac{E}{2(1+\nu)}$

$G: 75 \text{ Gpa}$

## ALUMINIO

PENDIENTE  
RESP.  
ALUMINIO

| %    | GPa |
|------|-----|
| X    | Y   |
| 0    | 0   |
| 0.1  | 40  |
| 0.25 | 80  |



Como se puede visualizar la ecuación que describe la recta anteriores  $Y = 92,58x + 3,1579$  y conociendo que el módulo de elasticidad  $E$  es la pendiente de la ecuación se concluye que el módulo de elasticidad del Aluminio es:  $E = 92,59 \text{ GPa}$

Al relacionar el módulo de elasticidad con el coeficiente de poisson se calcula el módulo de rigidez teórico:  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

$G: 35,6 \text{ GPa}$

| COMPARACION DE RESULTADOS                      |  |
|--|--|
| Módulo de rigidez a partir de ensayo a torsión | Módulo de rigidez a partir de ensayo a tensión |
| Acero 1020: 81,6Gpa                            | Acero 1020: 75 Gpa                             |
| Aluminio: 41,7 Gpa                             | Aluminio: 35,6 Gpa                             |

Teniendo en cuenta que los resultados obtenidos de la máquina de tensión son confiables, puesto que esta máquina fue adquirida por la universidad con altos estándares de calidad de sus fabricantes. Los resultados del banco didáctico de torsión se compararán con estos para determinar el factor de calibración del banco.

Porcentaje de relación que hay entre ensayos de tensión y torsión:

$$\% \text{ de relación de acero 1020} = \frac{G_{tension}}{G_{torsion}} = \frac{75}{81,6} = 0,92$$

$$\% \text{ de relación de aluminio} = \frac{G_{tension}}{G_{torsion}} = \frac{35,6}{41,7,6} = 0,86$$

$$\text{Factor de calibración del prototipo} = \frac{0,92+0,86}{2} = 0,899 \approx 0,9$$

**FACTOR DE CALIBRACION = 0,9**

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS

| COMPARACION DE RESULTADOS                      |  |  |
|--|--|--|
| Módulo de rigidez a partir de ensayo a torsión | Módulo de rigidez a partir de ensayo a tensión | Módulo de rigidez a partir de ensayo teórico |
| Acero 1020: 73,5 Gpa                           | Acero 1020: 75 Gpa                             | Acero 1020: 79,3 Gpa                         |
| Aluminio: 37,6 Gpa                             | Aluminio: 35,6 Gpa                             | Aluminio: 26,2 Gpa                           |

Al realizar los ensayos a torsión y calcular el módulo de rigidez de los materiales para posteriormente compararlo con los resultados experimentales dados en los libros se obtuvo resultados satisfactorios, para el caso del acero se evidencio una variación del módulo de rigidez igual a:  $\Delta G = 5,8$  Gpa, y para el caso del aluminio una variación del módulo de rigidez igual a  $\Delta G = 11,4$  Gpa. Se debe considerar que las tablas que contienen los datos experimentales de las propiedades mecánicas de los materiales no son del todo precisas y existen diferencias hasta de 40Gpa entre diferentes libros.

Se realizó una revisión detallada de las pruebas ejecutadas para probetas de acero 1020 y aluminio en el banco de pruebas a tensión, con base a ello se analizaron los resultados y se calculó el módulo de rigidez matemáticamente por medio del coeficiente de poisson de dichos materiales, para posteriormente compararlos con los módulos de rigidez obtenidos en el ensayo de torsión. De igual manera se obtuvieron resultados satisfactorios.

Para el caso del acero se evidencio una variación del módulo de rigidez igual a:  $\Delta G = 1.4$  Gpa y para el caso del aluminio una variación del módulo de rigidez igual a  $\Delta G = 2$  Gpa.

Se obtuvieron los resultados esperados tanto de la máquina de tensión como de la máquina de torsión. Los materiales se comportaron de la manera la cual estaba prevista en los cálculos teóricos, al comparar las gráficas de tensión y torsión, se observa que las

dos presentan el mismo comportamiento de deformación dentro de lo que mide y calcula cada máquina teniendo en cuenta el factor de calibración en el banco didáctico de torsión.

Para graficar los resultados obtenidos en el ensayo a torsión, se debían obtener como mínimo 20 mediciones dentro de cada grado, para así poder visualizar más detalladamente el comportamiento de deformación de cada material

### GUIA DE LABORATORIO

Para garantizar un correcto funcionamiento en las pruebas del banco didáctico para ensayos a torsión se creó un material pedagógico “Guía de laboratorio” con un paso a paso detallado que se debe revisar antes de realizar el ensayo. Asimismo, se implementa un manual de mantenimiento preventivo para tener en óptimas condiciones el prototipo.

La guía de laboratorio queda definida de la siguiente manera:



**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO**  
**LABORATORIO DE MATERIALES**  
**PROFESOR:**  
**ALUMNO:**  
**FECHA:**

## **GUIA DE LABORATORIO “ENSAYOS A TORSIÓN”**

### **1. INTRODUCCIÓN.**

Como sabemos, los ensayos de materiales que se realizan en la vida cotidiana son de mucha importancia ya que de estos podemos entender como es el comportamiento de ellos, comprender las propiedades tanto mecánicas, físicas y químicas entre muchas otras son una prioridad para los ingenieros ya que basándose en esto pueden garantizar que sus diseños sean confiables y económicos según sea el requerimiento. Uno de los ensayos más importantes son los ensayos de torsión, ya que describe de una forma correcta la transmisión de potencia.

### **2. OBJETIVO.**

- **GENERAL:** Conocer el funcionamiento de una máquina para el ensayo de torsión donde se produce la ruptura de una probeta, poder identificar y valorar mediante este ensayo las capacidades del módulo de rigidez del material.

### **ESPECIFICOS:**

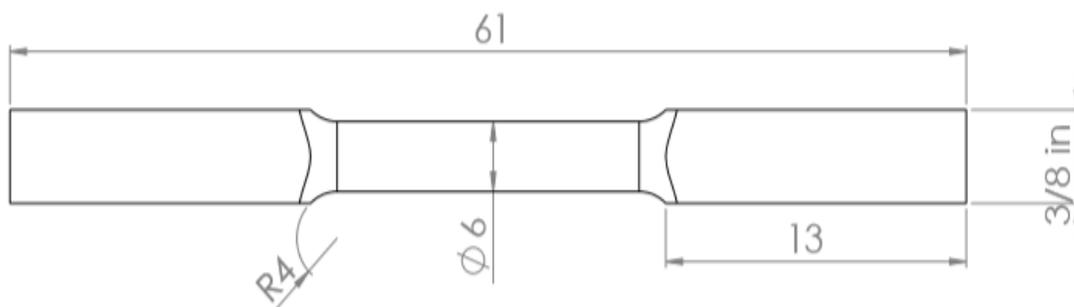
- Realizar el ensayo con probeta normalizada según ASTM E143
- Analizar el comportamiento de los materiales
- Determinar de manera experimental las propiedades mecánicas de los materiales.

- Construir e interpretar la gráfica Esfuerzo Cortante Vs Deformación Angular Unitaria para el ensayo de torsión.
- Calcular el módulo de rigidez y compararlo con los resultados obtenidos en las otras probetas.

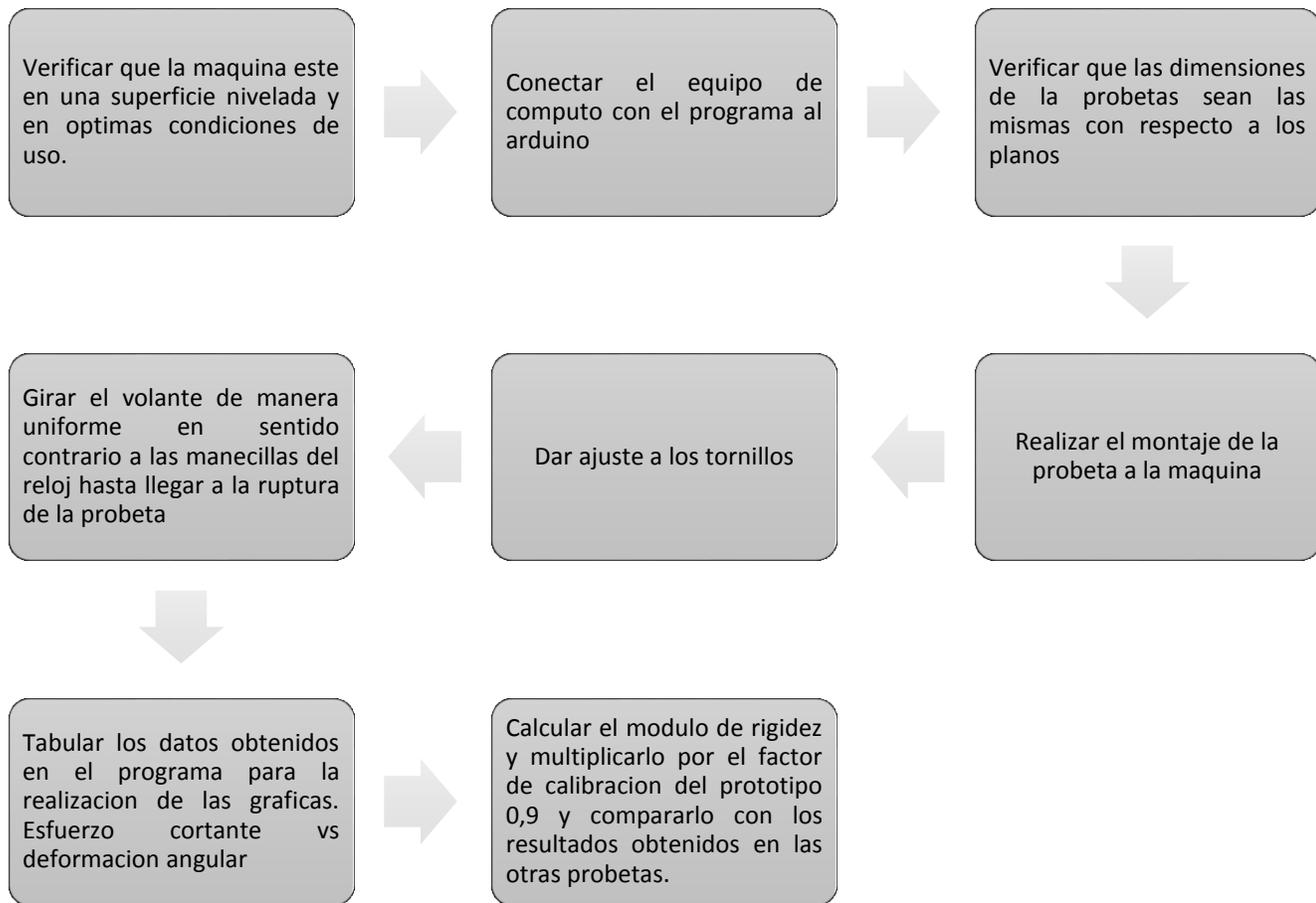
### 3. MATERIALES.

- **BANCO DIDACTICO DE ENSAYOS A TORSIÓN:** El banco es mecánico, consta de acoples mecanizados con cuadrantes en 3/8 en los ejes para dejar firme la probeta, un encoder óptico el cual es el dispositivo encargado de medir el ángulo de giro y dos celdas de carga las cuales son las encargadas de medir el par torsor cuando la sección transversal de la probeta se empieza a deformar.
- **PROBETAS DE ACERO 1020 Y ALUMINIO:** Probetas con medidas establecidas por la ASTM E-143 para realizar el ensayo.
- **EQUIPO DE COMPUTO:** Un computador el cual debe contar con el programa Arduino en cualquiera de sus versiones. También debe contar con el programa Excel con el cual se tabularán los datos y se graficarán los comportamientos de las probetas.

#### PROBETA ESTABLECIDA



#### 4. PASOS



### MANUAL DE MANTENIMIENTO

En el siguiente manual se estipula el tipo de mantenimiento que se requiere para prolongar la vida útil del banco didáctico, y este también garantiza un funcionamiento normal y eficiente.

#### MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo, es el tipo de mantenimiento que más se ajusta y el necesario, ya que el uso del banco didáctico no será constante ni prolongado.

Dentro del conjunto de acciones que se deben realizar para ejecutar este tipo de mantenimiento a nuestro prototipo son las siguientes:

1. Limpieza del banco: Se debe realizar la respectiva limpieza del banco antes y después de su manipulación ya que como se menciona anterior mente, el uso del banco no será prolongado ni constante.
2. Lubricación de ejes: El banco cuenta con dos ejes los cuales deben estar en constante lubricación ya que, si no se encuentran siempre con aceite, estos se llegarán a corroerse con el tiempo.
3. Lubricación de engranes: El banco cuenta con un engrane y un piñón, los cuales tienen que estar siempre lubricados ya que, si no se encuentran de esta manera, se corroerán con el tiempo.
4. Lubricación de chumaceras: El banco cuenta con 5 chumaceras, las cuales se lubricarán justo antes de manipular y realizar pruebas en el banco. Cada chumacera cuenta con una grasera de 1/4 la cual facilitara la lubricación de sus rodamientos.
5. Ajuste a tornillería: Se debe realizar el ajuste a la tornillería de las chumaceras, tornillería brístol la cual se encuentra en el sistema de adquisición de torque y al soporte donde va situado el encoder.
6. Revisión de celdas de carga: Realizar la revisión de las celdas de carga antes y después de la manipulación del equipo ya que estas se someten a cargas y se pueden desprender de sus soportes.
7. Limpieza de caja electrónica: Utilizar limpia contactos sobre el sistema electrónico antes de utilizar y conectar el equipo de cómputo con el que se realizaran las mediciones.

## **CAPITULO 7.**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

La fabricación efectuada es la fase final de un proyecto que se planifico a dos fases. La fase inicial fue realizar el diseño del prototipo. La segunda fase fue realizar la fabricación del banco didáctico, en donde se tuvo que realizar antes un rediseño y modificaciones a los planos que se tenían planteados en el diseño original. Ya que existieron unos imprevistos, los cuales eran de espacio y que no se habían tenido en cuenta en el momento del diseño.

También podemos concluir que los materiales a los cuales se le realizaron las pruebas en nuestro banco presentaron resultados del módulo de rigidez muy aproximados a los datos teóricos, para el caso del acero 1020 una variación del módulo de rigidez  $\Delta G= 5,8$  Gpa, y para el caso del aluminio una variación del módulo de rigidez igual a  $\Delta G= 11,4$  Gpa. Cabe destacar que las tablas que contienen los datos experimentales de las propiedades mecánicas de los materiales no son del todo precisas, pues existen diferencias hasta de 40Gpa entre libros.

Al comparar los resultados por medio de la ecuación para el módulo de rigidez (G) con los resultados obtenidos en el banco de torsión aplicando el factor de corrección (0,9) y los resultados obtenidos por medio de la ecuación de módulo de elasticidad (E) obtenido en la máquina de tensión. Por medio de tablas comparativas, pudimos determinar que los resultados se asemejan a los resultados obtenidos teóricamente

| COMPARACION DE RESULTADOS                      |  |                           |
|--|--|---------------------------|
| Módulo de rigidez a partir de ensayo a torsión | Módulo de rigidez a partir de ensayo a tensión | Módulo de rigidez teórico |

|                     |                    |                      |
|---------------------|--------------------|----------------------|
| Acero 1020: 73,5Gpa | Acero 1020: 75 Gpa | Acero 1020: 79,3 Gpa |
| Aluminio: 37,6 Gpa  | Aluminio: 35,6 Gpa | Aluminio: 26,2 Gpa   |

## RECOMENDACIONES

El medio por el cual obtenemos el ángulo de deformación para el banco de ensayos a torsión es el encoder. Este nos permite por medio de sus pulsaciones obtener en medio de cada ángulo 5 mediciones. Estas mediciones no son suficientes al momento de graficar los resultados, ya que la elasticidad en las probetas de torsión solo ocurre en el primer grado de deformación. Se sugiere el cambio de obtención de los grados de deformación o hallar la manera en que se obtengan más mediciones en ese grado.

Para la sujeción de las probetas, se recomienda cambiar las copas de 3/8 por mordazas para que, al momento de la fabricación de las probetas, no tener ninguna dificultad al momento de introducir las probetas en ese cuadrante.

## CAPITULO 8.

### Bibliografía

AG, M. W. (s.f.). *direct industry* . Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/mack-werkzeuge-ag/product-98189-1342109.html>

*Andromina robot*. (s.f.). Obtenido de <http://androminarobot.blogspot.com/2016/07/en-este-tutorial-mostramos-como-usar-el.html>

*Autodesk*. (s.f.). Obtenido de <https://www.autodesk.com/solutions/cnc-machining-software>

Autor, E. (s.f.). Ibagué-tolima.

*avebmx*. (s.f.). Obtenido de <https://avebmx.pl/Driver-do-piasty-Colony-Wasp-Cassette-CrMo>

- Bocanegra , L., Morales, A., & Mora , F. (2010). *RODAS*. Obtenido de [https://rodas5.us.es/items/9e078194-9c0c-34a2-b657-0fd5c59d6a2f/2/viewcontent?\\_sl.t=true](https://rodas5.us.es/items/9e078194-9c0c-34a2-b657-0fd5c59d6a2f/2/viewcontent?_sl.t=true)
- Budynas, R. G. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Caballero Agüero, L. A., & Castillo Arizola, C. E. (2017). Diseño, Construcción Y Calibración De Una Máquina Para Ensayos De Torsión De Alambres Según La Norma Iso 7800.
- Colchester-Harrison. (s.f.). *direct industry*. Obtenido de [http://www.directindustry.es/prod/colchester-harrison/product-29681-1983710.html?utm\\_source=ProductDetail&utm\\_medium=Web&utm\\_content=SimilarProduct&utm\\_campaign=CA](http://www.directindustry.es/prod/colchester-harrison/product-29681-1983710.html?utm_source=ProductDetail&utm_medium=Web&utm_content=SimilarProduct&utm_campaign=CA)
- componentes y circuitos eléctricos*. (s.f.). Obtenido de <http://componentesycircuitos.blogspot.com/2018/07/tipos-de-interruptores.html>
- Comsol. (s.f.). *análisis de estructuras, de análisis mecánico*. Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/comsol/product-26402-1587812.html>
- Cuenca, Á. V. (2011). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PARA ENSAYOS DE TORSIÓN. Loja, Ecuador: (Bachelor's thesis).
- Derevyanchuk, V. (2014). Obtenido de <https://grabcad.com/library/off-road-vehicl-suspension-and-steering-1>
- direct industry*. (s.f.). Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/bodine-electric-company/product-9033-23504.html>
- distrimotor*. (s.f.). Obtenido de <https://www.distrimotor.es/motores-trif%C3%A1sicos/motores-trif%C3%A1sicos-con-patas-3000-rpm/>
- EASYDUR. (2012). *EASYDUR*. Obtenido de <https://www.easydur.com/es/torsione/>
- EASYDUR*. (2013). Obtenido de <https://www.easydur.com/es/torsione/>
- electricbricks*. (s.f.). Obtenido de <http://blog.electricbricks.com/2011/10/pinon-libre-y-trinquete/>
- Ferretrónica*. (s.f.). Obtenido de <https://ferretronica.com/products/celda-de-carga-50kg-sensor-de-peso>
- Giuseppe Mirlisenna, M. (2006). *Método de los elementos finitos: ¿qué es?* Obtenido de ESSS: <https://www.esss.co/blog/es/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>

- hetpro-store* . (s.f.). Obtenido de <https://hetpro-store.com/ouno-arduino-uno-generico/>
- Hibbeler, R. ( 2006). *Mecánica De Materiales*. (Sexta Edición). Naucalpan de Juárez, Edo.
- Hibbeler, R. C. (2006). *Mecánica De Materiales (Sexta Edición)*. Naucalpan de Juárez: Edo.
- Limited, K. E. (s.f.). *direct industry*. Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/kitagawa-europe-limited/product-88623-851367.html>
- López, R. A., & Mejía Cholo, c. A. (2010). Araguillín López, R. D., & Mejía Cholo, C. A. (2010). Diseño de un sistema de control y automatización de una máquina axial-torsional de ensayo de materiales. Quito, Ecuador: (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2010).
- luisllamas*. (s.f.). Obtenido de <https://www.luisllamas.es/usar-un-optointerruptor-con-arduino/>
- Mecanismos de transmision de movimiento* . (s.f.). Obtenido de <http://cojatecnologia.blogspot.com/2009/11/pinon-cremallera.htm>
- naylampmechatronics*. (s.f.). Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/sensores/396-celda-de-carga-50kg.html>
- nbcorporation*. (s.f.). Obtenido de <https://www.nbcorporation.com/es/shop/slide-guide-es/sgl-type-es/>
- NEMA. (s.f.). *bigtronica*. Obtenido de <https://www.bigtronica.com/centro/motores/paso-a-paso/914-motor-paso-a-paso-bipolar-nema-34-78kg-cm-5053212009144.html>
- Orantes Franco, O., & Díaz Domínguez, F. I. (2016). Diseño, construcción y evaluación de un sistema de péndulo de torsión, para el cálculo del valor del módulo de rigidez de un alambre metálico.
- P A Hilton*. (2013). Obtenido de <https://www.p-a-hilton.co.uk/>
- pce-instruments*. (s.f.). Obtenido de [https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/torquimetro-pce-instruments-torqu\\_metro-pce-fb-100tw-det\\_2822265.htm](https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/torquimetro-pce-instruments-torqu_metro-pce-fb-100tw-det_2822265.htm)
- Ramírez Pérez, C. J. (2004). Estudio Integral del Ensayo de Torsión . (Doctoral dissertation, Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas).

Record, S. (1914). The mechanical properties of wood: including a discussion of the factors affecting the mechanical properties, and methods of timber testing. J. Wiley & Sons, Incorporated.

researchgate.net. (s.f.). Obtenido de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-219-Tornillo-de-potencia-con-tuerca-de-bronce\\_fig19\\_316464933](https://www.researchgate.net/figure/Figura-219-Tornillo-de-potencia-con-tuerca-de-bronce_fig19_316464933)

Rojas Lazo, O., & Rojas, L. (2006). *Diseño asistido por computador*. Industrial Data.

SENSING. (s.f.). Obtenido de <https://sensores-de-medida.es/medicion/sensores-y-transductores/sensores-de-angulo-y-rotacion/encoders-absolutos/>

SENSING. (s.f.). Obtenido de <https://sensores-de-medida.es/medicion/sensores-y-transductores/sensores-de-angulo-y-rotacion/encoders-incrementales-magneticos/>

Tatis, P. J. (2013). Diseño de máquina para ensayo de torsión. Envigado, Colombia: Universidad EIA.

## CAPITULO 9.

### ANEXOS

#### PRESUPUESTO.

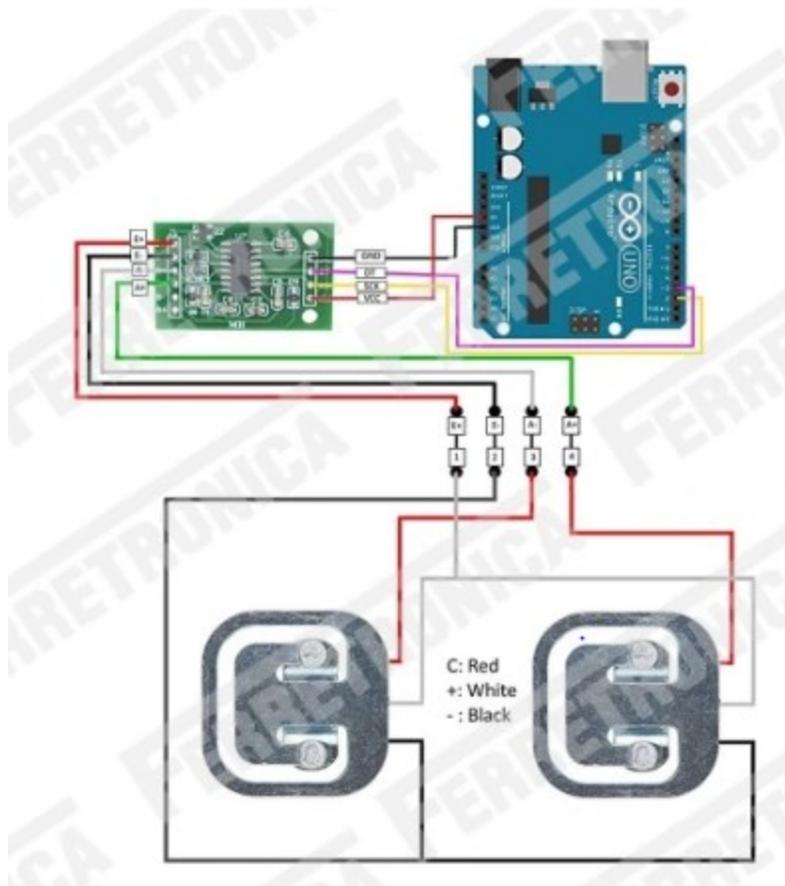
| Cotizaciones                                    |                |            |
|---|----------------|------------|
| BANCO DIDÁCTICO DE ENSAYOS A<br>TORSIÓN         | Precios<br>p/u | precio     |
| 2 celdas de carga 50kg +<br>Hx711(Amplificador) | \$ 13.500      | \$ 27.000  |
| Disco fijo para medir torque                    | \$ 55.000      | \$ 55.000  |
| Disco móvil para medir torque                   | \$ 45.000      | \$ 45.000  |
| Cableado 3 metros                               | \$ 1.200       | \$ 3.600   |
| Encoder óptico                                  | \$ 187.000     | \$ 187.000 |
| Arduino 1                                       | \$ 30.000      | \$ 30.000  |
| 2 chumaceras para eje de 1"                     | \$ 25.000      | \$ 50.000  |
| 3 chumaceras para eje de 20mm                   | \$ 32.000      | \$ 96.000  |

|                                     |             |              |
|-------------------------------------|-------------|--------------|
| PIÑON Y ENGRANE                     | \$ 200.000  | \$ 200.000   |
| Primer eje piñón                    | \$ 110.000  | \$ 110.000   |
| SEGUNDO EJE PIÑON                   | \$ 120.000  | \$ 120.000   |
| Reten Trinquete                     | \$ 300.000  | -\$ 300.000  |
| Volante                             | \$ 60.000   | \$ 60.000    |
| Mano de obra mecanización           | \$220000    | \$ 220.000   |
| Material para las probetas          | \$ 55.000   | \$ 55.000    |
| 5 PROBETAS ALUMINIO MANO DE OBRA    | \$ 8.000    | \$40000      |
| 5 probetas ACERO 1020 MANO DE OBRA  | \$ 5.000    | \$25.000     |
| Dos tubos cuadrados 50x50x2mm       | \$ 76.000   | -\$ 152.000  |
| Soldadura y estructura              | \$ 120.000  | -\$ 120.000  |
| papelería                           | \$ 50.000   | \$ 50.000    |
| Tornillos                           | \$ 30.000   | \$ 30.000    |
| # Base Lamina acero 1045            | \$ 53.000   | \$ 53.000    |
| Imprevistos                         | \$ 200.000  | \$ 200.000   |
| <b>SUBTOTAL</b>                     | -----<br>-- | \$ 1.401.600 |
| 30 horas tutoriales de programacion | \$ 40.000   | \$ 1.200.000 |
| 350 horas estudiante                | \$ 7.000    | \$ 1.750.000 |
| Transportes estudiantes             | \$ 400.000  | \$ 400.000   |
| <b>TOTAL</b>                        | -----       | \$ 4751600   |

## CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.

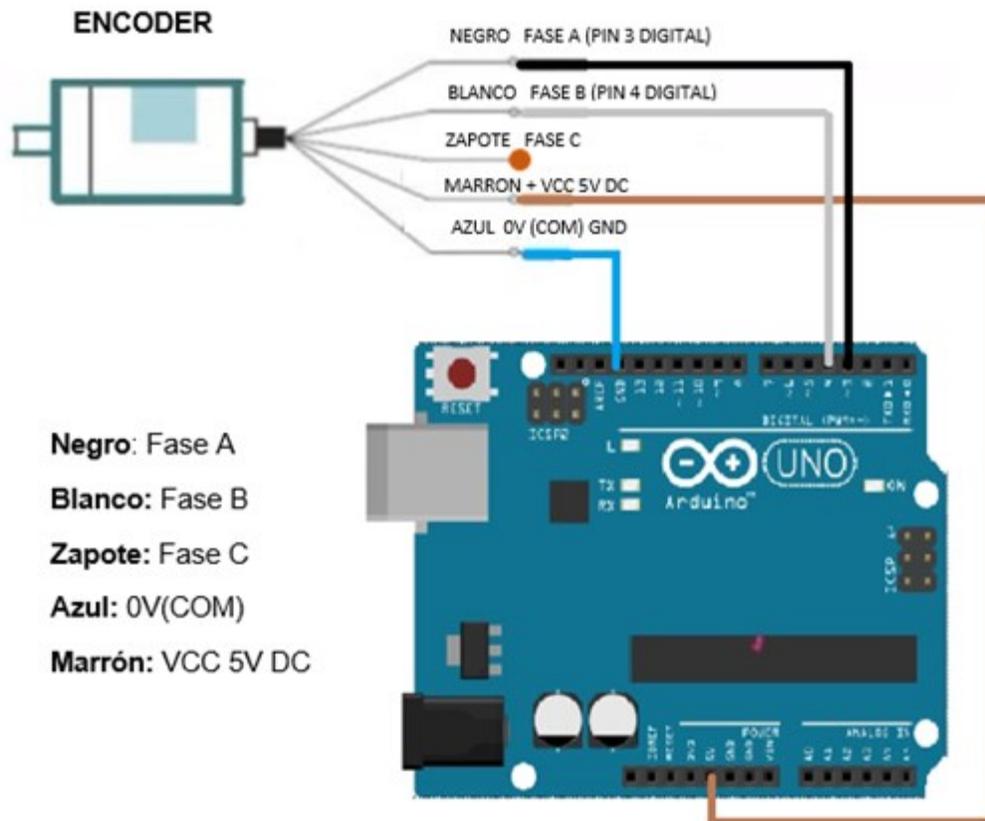
| F<br>A<br>S<br>E | ACTIVIDADES  | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL |     |     |     |     |   |
|------------------|--|--------|------------|---------|-----------|-----------|-------|---------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|---|
|                  |  | 1      | 2          | 3       | 4         | 1         | 2     | 3       | 4     | 1     | 2   | 3   | 4   | 1   | 2 |
|                  |  | 1      | 2          | 3       | 4         | 1         | 2     | 3       | 4     | 1     | 2   | 3   | 4   | 1   | 2 |
| 1                | Analisis de sensibilidad en la medicion del torque |        | 6h         | 6h      | 6h        | 6h        |       |         |       |       |     |     |     |     |   |
|                  | Analisis de sensibilidad en la medicion del angulo |        | 6h         | 6h      | 6h        | 6h        |       |         |       |       |     |     |     |     |   |
| 2                | Recotizar materiales                               |        |            |         |           | 30h       | 30h   |         |       |       |     |     |     |     |   |
|                  | Comprar materiales                                 |        |            |         |           | 30h       | 30h   |         |       |       |     |     |     |     |   |
|                  | Mandar a fabricar                                  |        |            |         |           | 8h        | 8h    |         |       |       |     |     |     |     |   |
|                  | Comprar sistema de adquisicion                     |        |            |         |           | 30h       |       |         |       |       |     |     |     |     |   |
|                  | Ensamble mecanico del prototipo                    |        |            |         |           | 18h       | 18h   | 18h     | 18h   | 18h   | 18h |     |     |     |   |
|                  | Ensamblar sistema de adquisicion                   |        |            |         |           |           |       |         | 18h   | 18h   |     |     |     |     |   |
| 3                | Planificar los ensayos                             |        |            |         |           |           |       | 3h      |       |       |     |     |     |     |   |
|                  | Realizar los ensayos 1                             |        |            |         |           |           |       | 18h     |       |       |     |     |     |     |   |
|                  | Realizar ajustes                                   |        |            |         |           |           |       | 18h     |       |       |     |     |     |     |   |
|                  | Realizar los ensayos 2                             |        |            |         |           |           |       | 18h     |       |       |     |     |     |     |   |
|                  | Analisis de resultado                              |        |            |         |           |           |       | 18h     | 18h   |       |     |     |     |     |   |
| 4                | Manual de mantenimiento                            |        |            |         |           |           |       |         | 18h   | 18h   |     |     |     |     |   |
|                  | Guia de laboratorio                                |        |            |         |           |           |       |         | 18h   | 18h   |     |     |     |     |   |
|                  | Realizar trabajo escrito                           |        |            |         |           |           |       |         |       |       | 18h | 18h | 18h | 18h |   |

## DIAGRAMA DE CONEXIÓN DE CELDAS DE CARGA

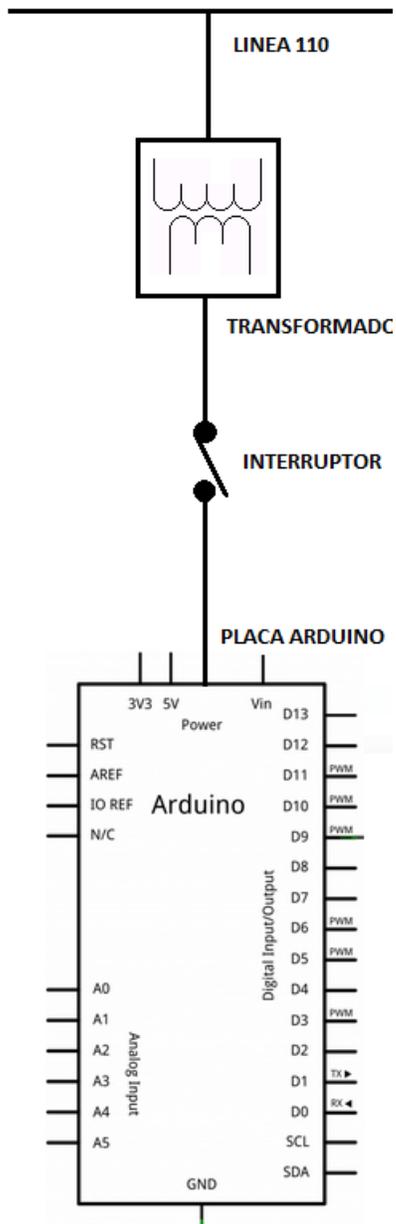


*Diagrama para la conexión de celdas de carga. (Ferretrónica, s.f.)*

## DIAGRAMA ENCODER



# DIAGRAMA ELECTRICO



## PROGRAMACION EN ARDUINO

```
//celdas

//*****
*****

*****

#include <HX711.h>//librería para el convertidor análogo /digital Hx711

HX711 celdas;,

//calibración

float factor_calibracion = 44000.0;//factor de calibración que se tiene que hallar con
las pruebas

float K=0;

//*****
*****

*****

//encoder

int long encoder1PinA = 3; //pin 3 Arduino uno (negro)

int long encoder1PinB = 4; //pin 4 Arduino uno(blanco)

int long encoder1Pulsos = 0; // variables de tipo long son variables de tamaño
extendido para el almacenamiento de números y almacenan 32 bits (4 bytes)
```

```

int encoder1PinAUltimo = LOW;

int k2 = LOW;

float grados=0;

//*****

*****

*****

void setup () {

// put your setup code here, to run once:

//*****

*****

*****

//encoder

pinMode (encoder1PinA,INPUT);

pinMode (encoder1PinB,INPUT);//pin está configurado como entrada

Serial. Begin (115200) ;//inicie comunicación con la computadora con una velocidad
de comunicación serial de 115200 bits por segundo (baudios)

//*****

*****

*****

```

```

//celdas

celdas.Begin(5, 6) ;// asignacion de pin de datos y pin de reloj

celdas.set_scale ();// calibracion

celdas.tare();

long zero_factor =celdas.read_average(); // Obtener la primera lectura de referencia

// Serial.print("Zero factor: ");// Mostrar los valores

// Serial.println(zero_factor);//para poder modificar el factor de calibracion que se
requiere

}

void loop() {

// put your main code here, to run repeatedly:

//encoder

k2 = digitalRead(encoder1PinA); // pin leido

if ((encoder1PinAUltimo == LOW) && (k2 == HIGH)) {

if (digitalRead(encoder1PinB) == LOW) {

encoder1Pulsos--;

grados = ((encoder1Pulsos*360/2000)); //pulsos del encoder*360/revoluciones
por minuto del encoder

if (encoder1Pulsos == -2000){(encoder1Pulsos = 0);}

}

else {

```

```
encoder1Pulsos++;  
  
grados = ((encoder1Pulsos*360/2000));  
  
if (encoder1Pulsos == 2000){(encoder1Pulsos = 0);}  
  
}  
  
Serial.print ("  GRADOS =; ");  
  
Serial.print (grados);  
  
Serial.print(";");  
  
// Serial.println();
```

```
//*****  
  
*****  
  
*****
```

```
//ENCODER
```

```
celdas.set_scale(factor_calibracion);// definir el factor de calibracion.Para calibrar el  
sensor para fijar la retroalimentación flotante de un sensor
```

```
//diferente, es necesario configurar la escala usando la función  
llamada" setScale
```

```
Serial.print("  DATO:;");  
  
Serial.print(celdas.get_units(), 1);// obtener los datos de peso medidos por las celdas  
  
Serial.print(";");  
  
Serial.print(" KG");
```

```
Serial.print(";");  
  
Serial.print("  FACTOR DE CALIBRACION: ");  
  
Serial.print(factor_calibracion);  
  
Serial.print(";");  
  
K=(celdas.get_units()*(9.8)*(0.05);  
  
Serial.print("  TORQUE:");  
  
Serial.print(K);  
  
Serial.print(";");  
  
Serial.println();//cambio de line en el monitor serial
```

```
//*****
```

```
}
```

```
encoder1PinAUltimo = k2;
```

PLANO EXPLOSIONADO ENSAMBLE DEL PROTOTIPO

