

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

"Actualización de un Equipo de Ensayos de Torsión: Incorporación de
Mecanismos de Medición Digitales y Software de Adquisición de Datos"

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Bolívar Kepti Tinoco Vergara

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

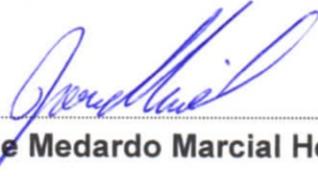
DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Bolívar Kepti Tinoco Vergara* doy mi 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"



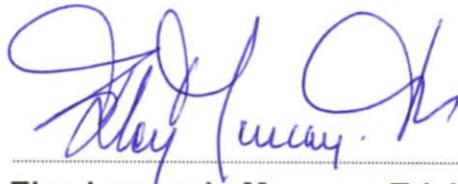
Bolívar Tinoco Vergara

EVALUADORES



Jorge Medardo Marcial Hernández, M.Sc.

PROFESOR DE LA MATERIA



Eloy Leonardo Moncayo Triviño, M.Sc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El laboratorio de Mecánica de Sólidos cuenta con un equipo para ensayos de torsión que data de 1974, con un indicador dial y sistema de carga analógico, para medir torque y ángulo de torsión, los cuales producen datos inexactos y poco precisos para las prácticas estudiantiles. Dichas mediciones no puede ser procesada ni almacenada digitalmente. Se requiere un equipo moderno, que arroje datos precisos que permitan una comprensión real del fenómeno de la torsión y que permita procesar y almacenar dichas mediciones.

Con el proyecto desarrollado se implementaron nuevos sistemas de medición y adquisición de datos de manera digital, mediante un transductor de presión, un encoder óptico y un microprocesador Arduino. Esta información digital, a través de códigos Arduino y Visual Basic, se comunicó con un computador personal con el cual se pudo graficar en tiempo real la curva característica de las pruebas realizadas con el equipo.

Finalmente los resultados obtenidos presentaron un bajo porcentaje de error respecto de torques y ángulos conocidos durante la calibración. Así mismo, se pudo graficar la curva Torque vs Ángulo de Torsión, en tiempo real, durante la realización del ensayo y se comprobó el ángulo medido por el sistema con el ángulo real de deformación plástica.

El prototipo implementado permitió concluir que el uso de sistemas de medición y adquisición de datos digitales modernos en el equipo de ensayos de torsión antiguo es técnicamente factible.

Palabras Clave: Torsión, Máquina de Ensayos, Adquisición de Datos, Arduino.

ABSTRACT

Mechanic Materials Lab has a torsion tests machine dating from 1974, with a dial indicator and analog load system, to measure torque and torsion angle, which produce inaccurate data for student practices. These measurements cannot be processed or stored digitally. Modern equipment is required, with precise data that allow a real understanding of the phenomenon of torsion and that allows to process and store said measurements.

With the developed project, new digital measurement and data acquisition systems were implemented, by means of a pressure transducer, an optical encoder and an Arduino microprocessor. This digital information, through Arduino and Visual Basic codes, was communicated with a personal computer where characteristic curve of tests carried out with the equipment could be plotted in real time.

Finally, the results obtained showed a low percentage of error respect to torques and angles known during calibration. Torque vs Torsion Angle Curve could be plotted, in real time, during the realization of the test. The angle measured by the system with the real plastic deformation angle was checked.

Implemented prototype allowed to conclude that use of modern digital data acquisition and measurement systems in old torsion test equipment is technically feasible.

Keywords: *Torsion, Testing Machine, Data Acquisition, Arduino.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1.Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del proyecto	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3.3 Descripción del Producto que generará el Proyecto.	3
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Torsión.....	3
1.4.2 Equipo de Ensayos de Torsión a intervenir.	3
1.4.3 Medición de torque.	5
1.4.4 Medición del ángulo de torsión.	7
1.4.5 Sistema de Adquisición de Datos basado en PCs.	7
CAPÍTULO 2.....	8
2.Metodología.....	8
2.1 Requerimientos de Diseño	8
2.1.1 Requerimientos de Función	8
2.1.2 Requerimientos de Uso	8

2.1.3	Requerimientos Estructurales	9
2.1.4	Requerimientos Productivos	9
2.2	Alternativas de solución.....	9
2.3	Matrices de Decisión.	10
2.3.1	Matriz de Decisión para medición de torque.	11
2.3.2	Matriz de Decisión para medición de ángulo de torsión.....	11
2.3.3	Matriz de Decisión para Controlador Programable.	12
2.4	Diseño de concepto.....	12
2.5	Instalación de transductor de presión en celda de carga hidráulica.	13
2.6	Instalación de encoder óptico.	15
2.7	Instalación de placa Arduino.	16
2.7.1	Circuito electrónico del sistema.	17
2.8	Software de adquisición de datos y comunicación con PC.	19
2.8.1	Código Arduino utilizado.	20
CAPÍTULO 3.....		28
3.RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		28
3.1	Resultados en la medición de torque	28
3.2	Resultados en la medición del ángulo de torsión.	29
3.3	Resultados finales.	30
3.4	Resumen de Resultados obtenidos por el prototipo.	32
3.5	Análisis de costos del prototipo.	32
CAPÍTULO 4.....		34
4.DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....		34
4.1	Conclusiones.....	35
4.2	Recomendaciones.....	35
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
DC	Corriente Directa
AC	Corriente Alterna
PLC	Controlador Lógico Programable
PC	Computadora Personal
DO	Salida Digital
ADC	Convertidor Análogo Digital
LED	Diodo Emisor de Luz
CVB	Código Visual Basic

SIMBOLOGÍA

HP	Caballo de fuerza
RPM	Revoluciones por minuto
Kg	Kilogramo
lb	Libra
pulg	Pulgada
cm	Centímetros
psi	Libras por pulgada cuadrada
lb.pulg	Libras por pulgada
mA	Mili Amperio
mV	Mili Voltio
	Ohmio
μ F	Mico Faradio

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Componentes del equipo de ensayos de torsión.....	4
Figura 1.2 Cilindro hidráulico que recibe el torque y transmite al dial.....	4
Figura 1.3 Escala graduada para leer el ángulo de rotación.	5
Figura 2.1 Diseño conceptual de la solución propuesta.	13
Figura 2.2 Instalación final de transductor de presión.	14
Figura 2.3 Uso de bomba manual para llenado de sistema con aceite hidráulico.	14
Figura 2.4 Características técnicas de transductor de presión.	15
Figura 2.5 Proceso de instalación de encoder óptico.	15
Figura 2.6 Alineación entre encoder óptico y disco con agujeros.....	16
Figura 2.7 Características técnicas de encoder óptico utilizado.	16
Figura 2.8 Circuito electrónico del sistema.	18
Figura 2.9 Componentes del circuito electrónico del sistema.....	19
Figura 2.10 Determinación de la ecuación $T(V)$ experimentalmente.	22
Figura 2.11 Curva $T(V)$ obtenida experimentalmente. Ecuación de la recta.	22
Figura 2.12 Hoja de Cálculo de Excel. Pantalla inicial.....	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características técnicas del equipo	5
Tabla 2.1 Medición de torque.	11
Tabla 2.2 Matriz de Decisión: Medición de Ángulo.....	11
Tabla 2.3 Matriz de Decisión: Controladores.....	12
Tabla 2.4 Datos experimentales de torque recibido y voltaje del transductor.....	22
Tabla 3.1 Errores obtenidos en medición de torque por sistema dial y prototipo.	29
Tabla 3.2 Análisis de errores obtenidos en la medición del ángulo de torsión.....	30
Tabla 3.3 Detalle de costos en la elaboración del prototipo.	33

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Un equipo de ensayos de torsión es una máquina cuyo objeto es someter una probeta de un material determinado a cargas de giro sobre su eje longitudinal para poder observar su comportamiento y así comprobar experimentalmente sus características mecánicas.

Principalmente se busca relacionar el ángulo en que la probeta ha sido girada sobre su eje longitudinal y el torque que fue requerido para lograr dicho giro o torsión.

A partir de esta información se puede definir de manera experimental el esfuerzo cortante máximo, el esfuerzo cortante al límite proporcional, el módulo de rigidez y la relación entre el torque y el grado de rotación de los materiales probados.

La norma ASTM E143 “Método de prueba estándar para Módulo de corte a temperatura ambiente”, proporciona una descripción detallada de la prueba para aplicaciones industriales, sin embargo el equipo objeto del presente trabajo se utiliza únicamente para fines académicos.

1.1 Descripción del problema

El laboratorio de Mecánica de Sólidos de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción cuenta con un equipo para ensayos de torsión que data de 1974, con un sistema de medición y presentación de datos analógicos, los cuales producen datos inexactos y poco precisos para las prácticas de los estudiantes.

La medición del torque se presenta al estudiante a través de un dial tipo manómetro y el ángulo de torsión se presenta a través de una escala graduada dibujada sobre la circunferencia del mandril sujetador de la probeta. Los estudiantes deben tomar las lecturas de forma simultánea. Un estudiante debe estar pendiente de la rotación y dar alguna señal a otro estudiante

cuando se haya girado un ángulo determinado (la escala dibujada tiene divisiones cada 5 grados), quien debe estar pendiente del dial para anotar el torque correspondiente. Esta es la forma original de adquisición de datos.

Adicionalmente, al manejar información analógica y no digital, se pierde la opción de almacenamiento y procesamiento de datos inmediato, lo que permitiría por ejemplo crear curvas características de diversos materiales y almacenarlas digitalmente para futuras consultas.

1.2 Justificación del proyecto

Las prácticas de ensayos de torsión de los estudiantes, requieren un equipo moderno que arroje datos precisos que permitan una comprensión real del comportamiento de los cuerpos al ser sometidos a esfuerzos de torsión.

Se requiere por tanto un equipo calibrado, con mecanismos de medición que arrojen señales eléctricas, las mismas que puedan ser transformadas y procesadas como señales digitales mediante un software de adquisición de datos automático, para luego graficar y/o almacenar dicha información.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Modernizar el equipo de ensayos de torsión para trabajar con información precisa y digital.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Elaborar un prototipo de sistema de medición y adquisición de datos, que reemplace a los actuales mecanismos de medición analógicos de torque y ángulo de torsión que posee el equipo.
2. Presentar un software de adquisición de datos que permita recibir esa señal digital, procesarla, almacenarla y que permita en tiempo real crear una curva torque-ángulo de torsión.

3. Elaborar la curva de calibración requerida para el sistema de medición propuesto.

1.3.3 Descripción del Producto que generará el Proyecto.

1. Equipo de ensayos de torsión operando con un sistema prototipo de medición de torque y ángulo de torsión que arroje señales digitales.
2. Software de adquisición de datos que permita almacenar las señales digitales emitidas por los mecanismos de medición y procesarlas, graficando curvas de torque vs ángulos de torsión en tiempo real.
3. Curva de calibración requerida para el equipo.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Torsión

Es un momento que tiende a hacer girar a un segmento del cuerpo con respecto a su eje longitudinal (R.C.Hibbeler, 1998).

Es decir, al aplicar un par de torsión a un cuerpo, este rotará sobre su eje longitudinal formando un ángulo entre la posición final de sus elementos y su posición de reposo original.

En la ingeniería es de suma importancia conocer cuál es el comportamiento de cuerpos de diversas formas y materiales ante la torsión, a fin de conocer si se produce deformación, y finalmente a qué magnitud, se produce la ruptura.

1.4.2 Equipo de Ensayos de Torsión a intervenir.

El equipo de ensayo de torsión consiste en un motor eléctrico de velocidad variable, conectado mediante un sistema banda-polea a una caja reductora, en cuyo eje de salida se encuentra una mordaza rotatoria. Todos estos componentes están montados en un carro móvil que se desliza sobre dos carriles paralelos al eje longitudinal de la probeta. En la figura 1.1 pueden apreciarse sus componentes.

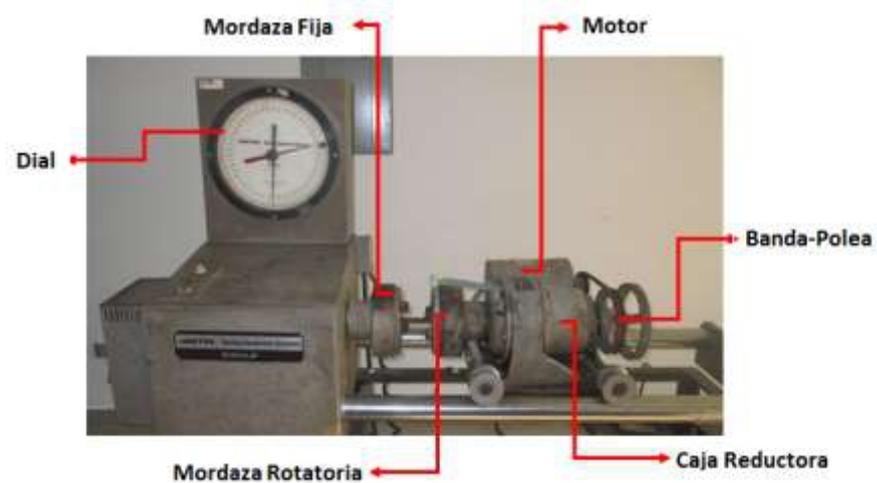


Figura 1.1 Componentes del equipo de ensayos de torsión.

La probeta es sostenida en un extremo por la mordaza rotatoria (impulsada en última instancia por el motor), y en su otro extremo por una mordaza fija, la misma que recibe el torque generado por el motor y lo transmite a un brazo sujeto de forma perpendicular a la prolongación de su eje. Dicho brazo presiona un cilindro hidráulico (figura 1.2), el cual transmite la presión hidráulica hacia el dial, donde se presenta la información del torque generado al estudiante.



Figura 1.2 Cilindro hidráulico que recibe el torque y transmite al dial.

Por otro lado, el ángulo de rotación se lee de una escala graduada en la mordaza rotatoria, como se puede apreciar en la figura 1.3.



Figura 1.3 Escala graduada para leer el ángulo de rotación.

Por tanto, para que el equipo mencionado pueda procesar información digitalmente se requerirá de mecanismos de medición que conviertan tanto torque como rotación en señales eléctricas que puedan ser interpretadas por un dispositivo controlador y que este a su vez pueda comunicarse con un computador para graficar la curva torque versus ángulo de torsión deseada en tiempo real.

Un resumen de las características técnicas más relevantes del equipo se presenta en la Tabla No. 1.

Tabla 1.1 Características técnicas del equipo

Potencia del motor	0,5 HP
Máxima velocidad del motor	1800 RPM
Reducción del sistema banda-polea	2:01
Reducción de la caja de engranajes	1800:1
Reducción total motor-mordaza rotatoria	3600:1
Máximo torque de dial	10.000 lb.pulg
Resolución de dial	20 lb.pulg
Resolución de escala graduada en mordaza rotatoria	5°
Dimensiones máximas del equipo	160 x 56,5 x 158,5 cm

1.4.3 Medición de torque.

Como se mencionó en la descripción del equipo, el par que produce la torsión de la probeta es recibido por la mordaza estacionaria, la misma que

transmite la fuerza producto de ese par al cilindro hidráulico, generando una presión.

El torque o momento de una fuerza con respecto a un punto es el producto de la fuerza por la distancia del punto a la línea de acción de la fuerza (Marks, 2001). Por tanto, conociendo la longitud del brazo transmisor y siendo un valor fijo, para medir el torque pueden utilizarse mecanismos de medición de fuerza o presión. Esto es lo que hace el diseño original del equipo, utilizando una celda de carga hidráulica.

Existen dos tipos de celda de carga mayormente utilizadas:

- Hidráulicas
- Piezoeléctricas.

1.4.3.1 Celdas de Carga Hidráulicas

Funcionan con un fluido interno: aceite hidráulico. Están diseñados para medir fuerza sin necesitar una alimentación eléctrica.

Cuando se le somete a una fuerza, el fluido interior transmite una presión determinada al instrumento de medida, generalmente un Bourdon, tubo de metal curvo con sección transversal elíptica que se deforma de manera mecánica bajo presión (Figliola-Beasley, 2003). Este tubo está dentro del dial conectado mecánicamente a la aguja y es el que genera el movimiento de la misma.

Sin embargo, también puede arrojar señales eléctricas, utilizando un dispositivo conocido como transductor de presión eléctrico. El mismo que es en realidad un sensor-transductor híbrido (Figliola-Beasley, 2003).

En primer lugar un sensor basado en un elemento elástico se deforma y luego un transductor convierte dicha deformación en una señal eléctrica de salida, generalmente mili amperios.

1.4.3.2 Celdas de Carga Piezoeléctricas

Son celdas de fuerza que operan bajo el principio piezoeléctrico. Habilidad de ciertos materiales para desarrollar una carga cuando se someten a una deformación mecánica (Figliola-Beasley, 2003). El cuarzo y el nitrato de litio son ejemplos de estos materiales.

Sus ventajas principales son su instalación sencilla y bajo costo. Existen diversos tipos para diferentes aplicaciones, principalmente usadas en básculas y similares.

1.4.4 Medición del ángulo de torsión.

En la industria, el dispositivo utilizado para mediciones de ángulos de rotación o velocidad angular es conocido como Encoder. Existen diversos tipos según el principio de operación: ópticos, magnéticos, inductivos o capacitivos. Los dos primeros requieren de una rueda con agujeros montada en el eje cuya rotación se va a medir, pues emiten una señal que se bloquea y desbloquea según la presencia de dichos agujeros; los últimos son montados directamente en el eje.

1.4.5 Sistema de Adquisición de Datos basado en PCs.

Son sistemas híbridos que combinan un paquete de adquisición de datos con el microprocesador y la capacidad de interacción con el ser humano de la computadora personal (Figliola-Beasley, 2003). Son sistemas hardware-software que permiten interactuar con múltiples entradas y salidas eléctricas o digitales y comunicarse con el usuario a través de un computador. Para aplicaciones académicas la plataforma Arduino es la más utilizada en nuestro medio, pues es una plataforma electrónica de software libre y componentes económicos fáciles de usar, principalmente de aplicación estudiantil. Sin embargo, Arduino por sí sólo no permite almacenar ni graficar versátilmente los datos recibidos, por lo que es necesario un software adicional.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Requerimientos de Diseño

Previo a la realización del presente trabajo se mantuvo una reunión con los usuarios finales del equipo de laboratorio, docentes del área de Mecánica de Sólidos, de quienes se obtuvo los diferentes requerimientos de diseño, los mismos que fueron catalogados como:

- Requerimientos de función.
- Requerimientos de uso.
- Requerimientos estructurales.
- Requerimientos de producción.

2.1.1 Requerimientos de Función

Para la modernización del equipo de ensayos de torsión, los usuarios finales solicitaron considerar los siguientes parámetros:

- Resolución similar al equipo original, 20 lb.pulg.
- Capacidad máxima de al menos 10,000 lb.pulg, igual al equipo inicial.
- Manejo de datos Digital, tanto en la medición del torque como en la medición del ángulo de torsión.

2.1.2 Requerimientos de Uso

- Características de mantenimiento similares al equipo original, esto es simple y económico.
- Se requirió un software libre o uno cuya licencia posea la Universidad. Se solicitó además que su instalación no sea compleja y sea fácilmente instalable en cualquier ordenador.

2.1.3 Requerimientos Estructurales

- Se solicitó que el prototipo tenga un montaje mínimamente invasivo y adicionalmente que se mantenga el uso del sistema analógico original, a la par con el sistema solución propuesto, con el fin de aprovechar didácticamente ambos sistemas.

2.1.4 Requerimientos Productivos

- Al tratarse de un prototipo los costos de implementarlo para probar el concepto debían ser mínimos.
- Se solicitó una alternativa existente nacionalmente por tiempo, servicio post-venta y refacciones.

2.2 Alternativas de solución.

Para definir las alternativas de solución se subdividió el rediseño o modernización del equipo de ensayos de torsión en tres partes, según la función de los componentes, esto es:

- Mecanismo de medición de fuerza.
- Mecanismo de medición de ángulo de rotación.
- Sistema de adquisición de datos basado en PC.

Cabe señalar, como se indicó en el Capítulo 1, que el presente trabajo tiene por objeto realizar únicamente pruebas experimentales y no hacer modificaciones definitivas, es decir, se instalaron los nuevos mecanismos de medición emisores de señales eléctricas y un controlador que emita señales digitales a un computador, únicamente durante la realización de las pruebas a modo de prototipo. Luego de las mismas, los mecanismos instalados podrán ser retirados y el equipo de ensayos de torsión del laboratorio quedará tal cual estaba operando previo a su intervención. Luego de probar el funcionamiento del sistema propuesto, dentro de las observaciones y recomendaciones se detallará todas las consideraciones a tener en cuenta para el rediseño definitivo de la modernización.

2.3 Matrices de Decisión.

Para definir la mejor opción entre las dos alternativas pre seleccionadas, se utilizaron matrices de decisión, una por cada función pre establecida.

Los criterios escogidos para dicha matriz fueron:

- **Funcionabilidad.** Es decir, que el mecanismo evaluado cumpla con la función específica. Se le otorga una ponderación del 25%.
- **Precisión.** Es decir, que el mecanismo evaluado arroje resultados con el menor rango de variación posible. Se le otorga una ponderación del 15%.
- **Durabilidad.** Es decir, que el mecanismo evaluado funcione por el mayor período de tiempo posible. Al tratarse el presente trabajo de un rediseño momentáneo, para la realización de pruebas experimentales, se le otorga una baja ponderación del 10%.
- **Facilidad de Montaje.** Al tratarse de mecanismos a ser montados en un equipo existente, se evalúa que tan complicado resultará instalar dicho mecanismo en el equipo, es decir, si se requiere de adaptaciones, bases adicionales, etc. Se le otorga una ponderación alta del 20%, pues al tratarse de algo momentáneo se requiere evitar complicaciones mayores.
- **Bajo Costo.** Para el presente trabajo, por ser un prototipo, se evalúa con la mayor ponderación, 30%, el bajo costo de las diferentes alternativas. Luego, para el diseño definitivo, podrá considerarse las alternativas que fueron descartadas por su costo significativamente mayor.

Como se detalló en el marco teórico la industria ofrece diferentes mecanismos alternativos para la medición tanto de fuerza como de ángulos de rotación.

Sin embargo, luego del análisis de los requerimientos de diseño solicitados por los usuarios se optó por las siguientes alternativas:

2.3.1 Matriz de Decisión para medición de torque.

Para el mecanismo de medición de fuerza se preseleccionó el uso de una celda de carga piezoeléctrica versus la actual celda de carga hidráulica más un transductor de presión eléctrico.

Tabla 2.1 Medición de torque.

Medición De Torque	Funcionabilidad	Precisión	Durabilidad	Facilidad de Montaje	Bajo Costo	Total
	25%	15%	10%	20%	30%	100%
Celda de Carga Piezoeléctrica	5	5	5	0	4	3,7
Actual celda hidráulica + transductor de presión	5	4	5	5	3	4,55

Como se puede apreciar en la tabla 2.1, si bien la celda de carga piezoeléctrica posee mayor precisión y un costo menor que el uso de la actual celda de carga hidráulica más un transductor de presión, posee una calificación de 0 en cuanto a facilidad de montaje, pues su uso significaría reemplazar la actual celda de carga hidráulica y esto imposibilitaría cumplir con un requerimiento expreso de los usuarios, esto es mantener el mecanismo de medición de fuerza original.

2.3.2 Matriz de Decisión para medición de ángulo de torsión.

Para el mecanismo de medición de ángulo de rotación, se necesita definir qué tipo de encoder sería el ideal. Se preselecciona un encoder óptico con el uso de una rueda con agujeros montada en el eje versus un encoder de tipo capacitivo montada directamente en el eje.

Tabla 2.2 Matriz de Decisión: Medición de Ángulo.

Medición de Torque	Funcionabilidad	Precisión	Durabilidad	Facilidad de Montaje	Bajo Costo	Total
	25%	15%	10%	20%	30%	100%
Encoder Óptico	5	4	2	5	5	4,55
Encoder Capacitivo	5	4	5	1	1	2,85

Como se aprecia en la tabla, el encoder capacitivo tiene alta funcionabilidad, durabilidad y precisión, pero posee una baja facilidad en el montaje y un costo elevado. Por su parte el encoder óptico es de muy bajo costo y tiene una alta facilidad de montaje, pues incluso ya existía una rueda con agujeros montada en el eje del reductor y una base soporte, ambos componentes elaborados durante un proyecto de tesis pasado (López Villavicencio, 2002). Su durabilidad es baja, pero al tratarse de un prototipo no es significativa. Su funcionabilidad y precisión son similares a la otra opción.

2.3.3 Matriz de Decisión para Controlador Programable.

Para el sistema de adquisición de datos basado en PC, se comparó la conveniencia de usar un Arduino versus un controlador lógico programable PLC usado, considerando que se requería hacer únicamente pruebas experimentales y no una instalación definitiva.

Tabla 2.3 Matriz de Decisión: Controladores.

Medición de Torque	Funcionabilidad	Precisión	Durabilidad	Facilidad de Montaje	Bajo Costo	Total
	25%	15%	10%	20%	30%	100%
Arduino	4	3	2	5	5	4,15
PLC	5	5	5	5	1	3,8

Un PLC, incluso usado, tiene alta funcionabilidad, precisión, durabilidad y facilidad de montaje, sin embargo su costo es sumamente elevado en comparación de una placa Arduino, la misma que posee funcionabilidad, precisión y durabilidad aceptables para la construcción de un prototipo. Si bien Arduino no permite almacenar datos ni graficarlos versátilmente, al trabajar en conjunto con una base de datos, tal como Microsoft Excel, a través de macros de Visual Basic, puede trabajar en tiempo real.

2.4 Diseño de concepto.

Tras el análisis de las diferentes matrices de decisión, se decidió el uso de un transductor de presión eléctrico junto a la celda de carga hidráulica original

como mecanismo de medición de fuerza, un encoder óptico como mecanismo de medición de ángulo de torsión y una placa Arduino como sistema de adquisición de datos trabajando en conjunto con Microsoft Excel, para graficar y almacenar datos en tiempo real.

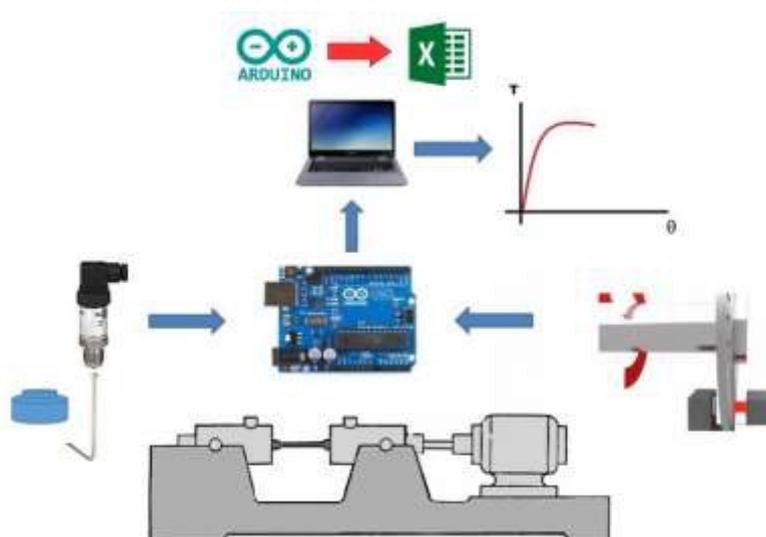


Figura 2.1 Diseño conceptual de la solución propuesta.

2.5 Instalación de transductor de presión en celda de carga hidráulica.

Como se indicó en los puntos anteriores, fue un requerimiento expreso de los usuarios finales, poder seguir utilizando tanto la celda de carga hidráulica como el dial indicador del torque, por tanto, el transductor debió instalarse en paralelo mediante un acople hidráulico tipo T.

Un ramal conduce el aceite hacia el dial y el otro ramal hacia el transductor de presión.

Adicionalmente, para poder aislar en cualquier momento el transductor se instaló una válvula hidráulica de cierre rápido previo al mismo y se instaló también un manómetro en paralelo al transductor (mediante otra T) para control visual de la presión del sistema.



Figura 2.2 Instalación final de transductor de presión.

Cabe señalar que al desconectar los acoples hidráulicos originales e instalar los nuevos, fue inevitable que el aceite contenido dentro del sistema saliera del mismo, por lo que debió utilizarse fundas y trapos absorbentes para evitar contaminación y además, para colocar el aceite nuevo fue necesario la utilización de una bomba hidráulica manual y llenar el sistema de abajo hacia arriba, a fin de evitar que aire permanezca dentro del sistema, ya que al ser un fluido compresible, produciría errores en las mediciones. El fluido utilizado fue aceite hidráulico de baja viscosidad (ISO 46).



Figura 2.3 Uso de bomba manual para llenado de sistema con aceite hidráulico.

Las características técnicas del transductor de presión utilizado pueden apreciarse en la Figura 2.4.



CARÁCTERÍSTICAS TÉCNICAS

- Marca: Allen Bradley
- Modelo: 836E-TO1EQ4-D4
- Rango de medición: 0 – 500 psi.
- Corriente de salida: 4 – 20 mA.
- Voltaje de alimentación: 24 V-DC.

Figura 2.4 Características técnicas de transductor de presión.

2.6 Instalación de encoder óptico.

El equipo de ensayos de torsión contaba ya con un disco con 16 agujeros instalado en el eje de entrada de la caja reductora. Existía también ya instalada una base de soporte en el eje que contienen las ruedas de la parte móvil que pasa justo bajo el eje donde se colocó el disco (López Villavicencio, 2002). Por tanto la instalación del Encoder óptico se realizó aprovechando estas instalaciones previas.



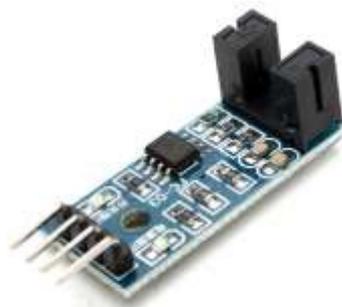
Figura 2.5 Proceso de instalación de encoder óptico.

Es importante mencionar que la instalación del encoder óptico esté perfectamente alineada respecto del disco con agujeros, pues el mismo debe atravesar el encoder entre el emisor y el receptor óptico.



Figura 2.6 Alineación entre encoder óptico y disco con agujeros.

Las características técnicas del encoder óptico utilizado pueden apreciarse en la Figura 2.7.



CARÁCTERÍSTICAS PRINCIPALES

- Sensor de velocidad FC-03.
- Alimentación: 3.3 VDC
- Chip Principal: LM393
- Número de pines: 4
- Formato de salida: 0 y 1.
- LED indicador de alimentación.
- Dimensiones: 3,8 x 1,3 x 1,2 cm

Figura 2.7 Características técnicas de encoder óptico utilizado.

2.7 Instalación de placa Arduino.

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo (software), diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. (Crespo).

La placa Arduino puede recibir señales eléctricas de entrada tanto digitales como analógicas y comunicarse a través de su software con un computador. Para nuestro caso el transductor de presión emite una señal analógica, de 4 a 20 mA, según reciba una presión de 0 a 500 psi, y el encoder óptico emite una señal digital de 1 y 0 según el receptor óptico reciba o no el haz de luz

enviado por el emisor, es decir, según se encuentre con el agujero o la superficie del disco instalado entre emisor y receptor.

La placa contiene diversas entradas y salidas perfectamente identificadas, principalmente entradas digitales, entradas análogas y conexiones de energía, una línea de 5 V, otra de 3,3 V y un par de líneas neutras, principalmente.

El correcto funcionamiento del sistema propuesto depende por tanto de la instalación de un correcto circuito electrónico.

2.7.1 Circuito electrónico del sistema.

Para realizar la conexión del transductor de presión a la placa Arduino lo primero que se observó es que su voltaje de alimentación es de 24 VDC (ver figura 2.4), por lo que fue necesario el uso de una fuente de poder, la misma que transforme y rectifique el voltaje de alimentación del laboratorio de 120 VAC. Se utilizó un switch simple para poder conectar o desconectar dicha fuente de la alimentación del laboratorio.

En segundo lugar, hay que notar que la señal de salida que arroja el transductor es de 4 a 20 mA (figura 2.4), sin embargo, la placa Arduino tiene como opción de entrada analógica únicamente señales de voltaje (de 3,3 y 5V), por tanto fue necesario colocar una resistencia eléctrica en lazo cerrado entre la fuente de poder y el transductor de presión, a fin de que la corriente de salida genere una caída de tensión (voltaje) que pueda ser leída por el Arduino. La resistencia a ser utilizada puede ser calculada utilizando la fórmula:

(2.1)

Donde R es la resistencia en Ohmios (Ω), V el voltaje en Voltios (V) e I la corriente en Amperios (A).

Por tanto

Así mismo, para evitar la presencia de ruido en el sistema se utiliza un filtro capacitor de 10 μ F. El ruido en un sistema de adquisición de datos se define como todo aquello en un conjunto de datos que distorsiona la señal de interés (Flores, 2014).

Es decir que el circuito electrónico final del transductor de presión fue unir el positivo de la fuente con el positivo del transductor, el negativo del transductor se conectó tanto con la resistencia como con el capacitor filtro para luego conectarse con el pin de entrada analógica A0. Finalmente, la línea negativa de la fuente se conectó tanto con la resistencia como con el capacitor, cerrando el lazo, y con la línea neutra de la placa Arduino GND. En la figura 2.8 puede revisarse el circuito electrónico del sistema.

En cuanto al encoder óptico FC-03, su voltaje de alimentación requerido es de 3,3 VDC según sus características técnicas (figura 2.5), por tanto su pin de alimentación de energía se conectó a la salida de alimentación de 3,3 VDC de la placa Arduino. La línea neutra del encoder se conectó con la línea neutra de la placa Arduino GND. Y finalmente la salida de datos digitales (DO) se conectó a la entrada de datos digitales de la placa Arduino en el pin 2. En la figura 2.8 puede revisarse el circuito electrónico del sistema.

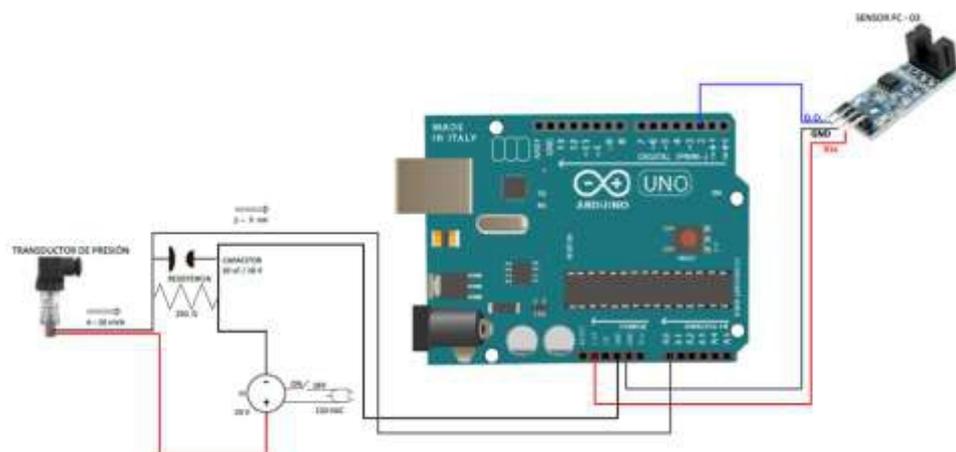


Figura 2.8 Circuito electrónico del sistema.

Respecto a la resolución del sistema de adquisición de datos de la señal analógica del transductor, este viene dado por la fórmula:

$$\text{---} \quad (2.2)$$

Donde R_s es la resolución del sistema, R_m el rango mayor de medición y b el número de bits de la placa de adquisición de datos. En este caso la placa Arduino tiene un manejo de datos de 10 bits y para el voltaje, señal de entrada recibida desde el transductor, el rango mayor es 500 psi.

. Por tanto

Experimentalmente, durante las pruebas realizadas que serán detalladas más adelante, se definió que 1 psi de presión corresponde aproximadamente a 80 lb.pulg de torque, por tanto:

En la figura 2.9 se muestra una imagen final de los componentes del circuito electrónico del sistema ya instalados.

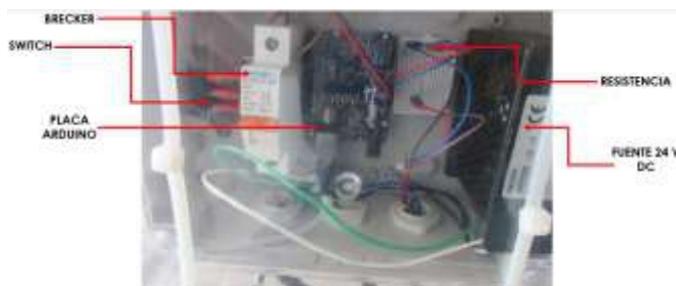


Figura 2.9 Componentes del circuito electrónico del sistema.

2.8 Software de adquisición de datos y comunicación con PC.

Parte de los objetivos del presente trabajo fue poder graficar en tiempo real una curva que relacione ambas variables medidas, torque y ángulo de torsión.

Para ello fue necesario establecer una interfaz de comunicación entre Arduino y Microsoft Excel.

A continuación se presentará los comandos más relevantes del código Arduino creado y de las macros utilizadas en Microsoft Excel, a través de Visual Basic. El detalle de los códigos completos de ambos programas se encuentra en los Apéndices 1 y 2.

2.8.1 Código Arduino utilizado.

En primer lugar se vuelve a recordar que Arduino es una plataforma libre, sus instaladores pueden ser descargados libremente desde su sitio web. Así mismo, existen innumerables foros y tutoriales en línea que permiten manipular las placas Arduino y realizar un sin número de proyectos académicos.

2.8.1.1 Medición de señal analógica de transductor de presión.

Como se indica en el circuito electrónico, la señal analógica generada por el transductor de presión fue ingresada en el pin A0. Por tanto para leer dicha señal se utilizó la función `analogRead()`, la misma que nos arrojará el valor ADC (Analog Digital Convertor) recibido.

Se define entonces la función `getPressure()` como el retorno de la variable `m`, siendo `m` el valor de la lectura de ADC.

Sin embargo, para minimizar digitalmente el ruido generado por el sistema se utiliza una función para sacar el promedio de varias mediciones.

Así, la función `averageADC()`, se define como el cálculo del promedio de un determinado, por ejemplo 100, en base a una función que se desea promediar, en este caso la función `analogRead()`. Es decir se sumarán 100 lecturas de ADC y se retornará únicamente el promedio.

Para convertir ese valor ADC en voltaje, se necesita utilizar la ecuación:

— (2.3)

Donde V es el voltaje, ADC es el valor entregado por la función $analogRead()$, R_m el rango mayor de medición del voltaje y b el número de bits de la placa de adquisición de datos. En este caso la placa Arduino tiene un manejo de datos de 10 bits y para el voltaje, señal de entrada recibida desde el transductor, el rango mayor es 5 V.

Por tanto: —

Pero nuestro interés está en presentar no el valor del voltaje, sino el valor del torque, por lo que es necesaria una ecuación que relacione el Torque medido en función del Voltaje generado por el transductor V .

Dicha ecuación fue calculada de forma experimental, generando torques conocidos y midiendo mediante el código Arduino descrito las lecturas de voltaje arrojadas por el transductor de presión. Para esta prueba experimental se utilizaron pesos conocidos de laboratorio de 4 Kg, 5 Kg y 2,5 Kg, y una barra en forma de L de longitudes conocidas.

El lado más corto de la barra fue sujetado a la mordaza fija y en el extremo libre del lado más largo, 22 pulg de longitud, fueron colocados los pesos conocidos.

El torque está definido por la siguiente fórmula:

(2.4)

Donde T es el torque, d la distancia entre el punto de aplicación de la fuerza y el punto de giro y θ es el ángulo de aplicación de la fuerza (idealmente 90° , es decir una aplicación de la fuerza perpendicular a la barra).



Figura 2.10 Determinación de la ecuación T (V) experimentalmente.

En la tabla 2.1 se presentan los datos obtenidos, mientras en la gráfica 2.1 se presenta la curva linealizada y la ecuación obtenida.

Tabla 2.4 Datos experimentales de torque recibido y voltaje del transductor.

Peso (Kg)	Peso (Lb)	Longitud de Brazo	Torque (lb.pulg)	Voltaje (V)
4,00	8,80	22,00	193,60	1,04826
9,00	19,80	22,00	435,60	1,06821
14,00	30,80	22,00	677,60	1,08445
19,00	41,80	22,00	919,60	1,10552
24,00	52,80	22,00	1161,60	1,12875
26,50	58,30	22,00	1282,60	1,13739
29,00	63,80	22,00	1403,60	1,14921

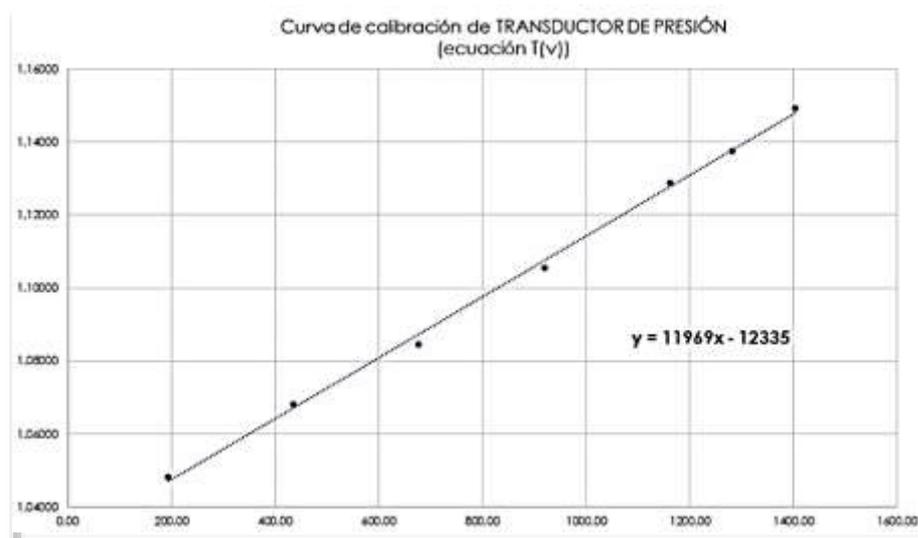


Figura 2.11 Curva T (V) obtenida experimentalmente. Ecuación de la recta.

Es decir, luego de las pruebas experimentales realizadas, se pudo determinar que el torque recibido por el sistema en función del voltaje generado por el transductor viene dado por la ecuación:

Esta ecuación es por tanto utilizada en el código Arduino y se asigna un nombre a la nueva variable, así:

(2.5)

A través de esta ecuación también se puede determinar el valor de cuando vale 0, y este es 1,0265. Así, en el código Arduino también se define que si , el valor de volt sea 0. A fin de evitar la presentación de valores de torque negativos, cuando se reciban valores de voltaje menores al establecido.

2.8.1.2 Medición de señal digital del encoder óptico.

Como se indica en el circuito electrónico, la señal digital salida del encoder fue ingresada en el pin 2, por tanto la función que se utilizó para leer dicha entrada fue .

No obstante, la señal digital entregada por el encoder y leída por la placa Arduino únicamente corresponde a valores de 1 y 0. Por tanto, se requiere una función que contabilice las secuencias de 1 y 0, es decir, cuando se lea 1 e inmediatamente después se lea 0, dicho contador contabilizará 1.

Para ello se establece en el código Arduino la variable , la misma que se define bajo la siguiente prueba lógica:

Como se detalló en el punto 2.6, el encoder fue colocado utilizando un disco con 16 agujeros colocado sobre el eje de ingreso del reductor y el

ángulo de torsión está definido por la rotación de la mordaza móvil, ubicada en el eje de salida del reductor, por tanto es necesario determinar una ecuación que asocie los grados de torsión en función del número de pulsos contabilizados (secuencias 0-1).

Dicha ecuación se obtuvo experimentalmente y por tanto se determinó que 69 pulsos corresponden a 1 grado de torsión.

Adicionalmente, ya que cada lectura de torque debe estar asociada a una lectura de ángulo de torsión, únicamente cada vez que se cuente 1 grado de torsión, se requiere que se calcule el valor .

Así obtenemos parte del código Arduino a utilizar:

2.8.1.3 Transmisión de datos a Excel.

Para la transmisión de datos de Arduino a Excel, se debe tener en cuenta que Excel únicamente puede recibir información como variables de cadenas de caracteres, no así como variables numéricas, por lo que se requiere que el valor a transmitir sea transformado a una cadena de caracteres. Para esto se recurre a la función .

En dicha función debe utilizarse como argumento el nombre de la variable a transformar, el número de dígitos enteros a considerar, el número de dígitos decimales a considerar y el nombre de la nueva variable ahora como cadena de caracteres.

Para transferir el valor de torque por el puerto serial, se utiliza la función *Serial.print*. El código Arduino completo puede revisarse en el Apéndice.

2.8.1.4 Recepción de datos por parte de Excel.

Para la recepción de datos por parte de Excel desde Arduino, fue necesario establecer algunas macros, las mismas que fueron basadas en los códigos Visual Basic desarrollados por David M. Hitchner.

Principalmente se trata de tres funciones: `Abrir_Comunicacion`, `Leer_Arduino` y `Cerrar_Comunicación`, las mismas que están basadas en rutinas establecidas en el Módulo `COMANDOS` (Hitchner). El link para descargar dicho módulo se encuentra mencionado en la bibliografía.

La función `Abrir_Comunicacion` se basa en la función `COMMOPEN` definida en el Módulo `COMANDOS` y consiste principalmente en definir las características de la comunicación, indicando el puerto COM a utilizar y la velocidad de la comunicación en baudios, las cuales deben ser desde luego las mismas que se utilizan desde el código Arduino.

Así mismo, se define la variable "Estado" como un valor entero y se le asigna diferentes valores diferentes de cero a los diferentes errores posibles durante la apertura de la comunicación.

Finalmente, se lee el valor de la variable "Estado", y si este valor es cero se presenta un mensaje: "Comunicación abierta" y queda establecida la comunicación, caso contrario se presenta uno que indique: "Error al abrir comunicación o ya estaba abierta".

La función `Leer_Arduino` está basada en la función `COMMREAD` del Módulo `COMANDOS`, y básicamente consiste en designar a la variable `DATOS` (definida como una cadena de caracteres) los valores leídos desde el puerto COM previamente definido.

Luego se utiliza la función `RIGHT` de VB. Dicha función lee los valores a la derecha de una cadena de caracteres y los devuelve como un valor alfanumérico. Se debe indicar a la función el número de caracteres a la derecha de la cadena a leer.

Finalmente, a través de la función CELLS de VB, se define en que celda exactamente debe presentarse el valor leído. Para esto hay que especificar número de columna y fila.

Como se desea escribir varios valores por toda una columna, basta con definir un contador "i", e indicarle a la función CELLS que se debe escribir, por ejemplo en la celda (3, 10 + i).

Al finalizar, a través de la función COMMFLUSH establecida en el MóduloCOMANDOS, se limpian los buffers de comunicación.

Finalmente, la función Cerrar_Comunicacion está basada en la función COMMCLOSE definida en el MóduloCOMANDOS y finaliza la comunicación con el puerto COM indicado.

Al igual que la función COMMOPEN, define la variable "Estado" como un valor entero y le asigna valores diferentes de cero a los diversos errores posibles durante el cierre de comunicación.

Se lee el valor de la variable "Estado", y si este valor es cero se presenta un mensaje: "Comunicación cerrada" y queda finalizada la comunicación, caso contrario se presenta uno que indique: "Ha habido un error".

Luego de creadas las macros en Visual Basic, en la hoja de cálculo de Excel únicamente fue necesario crear botones que llamen a dichas macros y establecer la gráfica de la curva requerida T vs Θ , dejando seleccionadas las celdas que recibirán los datos una vez iniciada la comunicación con el Arduino.

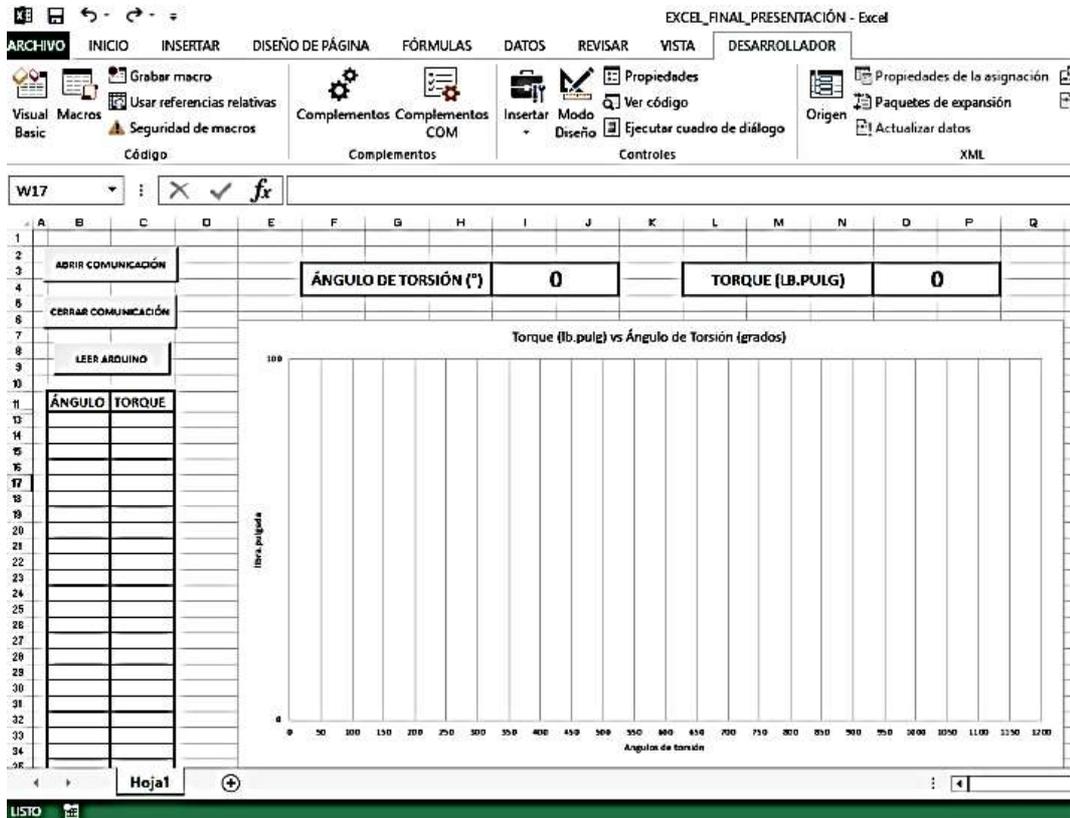


Figura 2.12 Hoja de Cálculo de Excel. Pantalla inicial.

Los módulos completos con todos los comandos utilizados, se encuentran detallados en el Apéndice No. 2.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Durante la realización del presente Proyecto Integrador se elaboró un sistema de medición y adquisición de datos digital, en remplazo de los iniciales mecanismos de medición analógicos de torque y ángulo de torsión que posee el equipo.

Así mismo, se elaboró un software de adquisición de datos que permite recibir esa señal digital, procesarla, almacenarla y que permite en tiempo real crear una curva torque-ángulo de torsión.

Se elaboró también la curva de calibración requerida para el sistema de medición propuesto.

El detalle del funcionamiento de dicho sistema, el software de adquisición de datos y la curva de calibración elaboradas fueron descritos en el capítulo anterior. A continuación se presentan sus resultados.

3.1 Resultados en la medición de torque

Para validar los resultados de las lecturas obtenidas por el transductor de presión, interpretadas por el software Arduino y transmitidas a Microsoft Excel en tiempo real, mediante Visual Basic, se procedió a realizar nuevas lecturas experimentales, similares a las descritas en el punto 2.8.1.1 “Medición de señal analógica de transductor de presión”. Es decir, se tomó la misma barra tipo L de longitud conocida y se utilizaron nuevamente los pesos conocidos de laboratorio, para establecer un torque conocido de entrada y evaluar los resultados arrojados por el sistema.

Adicionalmente se comparó los valores reales del torque de entrada producto de los pesos y la longitud conocida, con los valores de torque entregados por el dial.

Los resultados obtenidos para los diferentes pesos conocidos se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Errores obtenidos en medición de torque por sistema dial y prototipo.

Peso (Kg)	Peso (Lb)	Longitud (Pulg)	Torque Real (lb.pulg)	Torque Dial (lb.pulg)	Error Dial (%)	Torque Prototipo (lb.pulg)	Error Prototipo (%)
4	8,8	22	193,6	220	13,64%	202,51	4,60%
9	19,8	22	435,6	480	10,19%	443,66	1,85%
14	30,8	22	677,6	620	8,50%	689,5	1,76%
19	41,8	22	919,6	980	6,57%	930,19	1,15%
24	52,8	22	1161,6	1120	3,58%	1174,46	1,11%
26,6	58,52	22	1287,44	1240	3,68%	1298,21	0,84%
29	63,8	22	1403,6	1460	4,02%	1395,05	0,61%

En la siguiente figura se representa una curva del valor absoluto del porcentaje de error, en función del torque medido tanto por el dial como por el sistema prototipo.

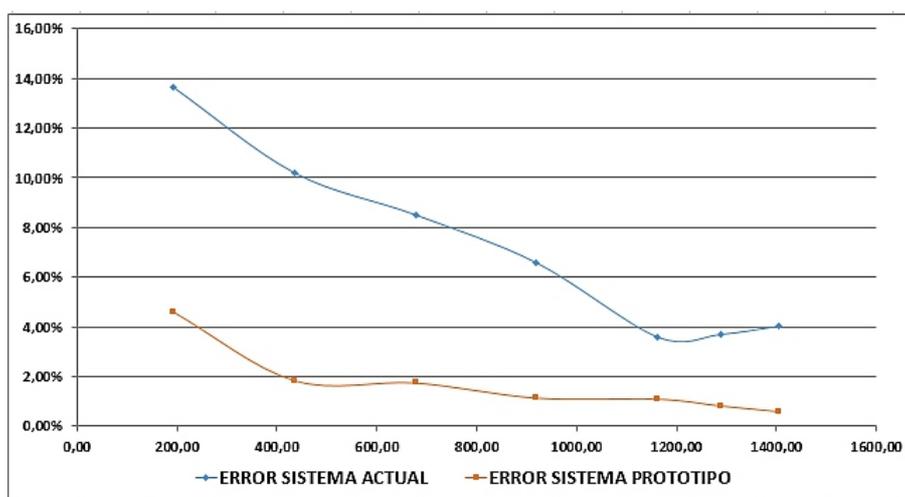


Figura 3.1 Porcentaje de error versus torque medido por dial y prototipo.

3.2 Resultados en la medición del ángulo de torsión.

Para validar los resultados de las lecturas obtenidas por el encoder óptico, interpretadas por el software Arduino y transmitidas a Microsoft Excel en tiempo real, mediante Visual Basic, se procedió a realizar varias lecturas experimentales, comparando el ángulo de torsión contado por el sistema prototipo versus el ángulo de torsión entregado por la carátula graduada de la mordaza móvil. Se esperó que la mordaza completase una vuelta completa (360°) y se contaron los grados contabilizados por el sistema prototipo.



Figura 3.2 Pruebas de la medición del ángulo de torsión realizadas.

Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas se presentan en la tabla 3.2

Tabla 3.2 Análisis de errores obtenidos en la medición del ángulo de torsión.

Prueba #	Valor Carátula	Valor Sistema Prototipo	%Error
1	360°	355°	1,39%
2	360°	356°	1,12%
3	360°	356°	1,12%
4	360°	355°	1,39%
5	360°	356°	1,12%
Promedio	360°	355,6°	1,23%

3.3 Resultados finales.

Finalmente, una vez que se revisaron los resultados de las mediciones arrojadas tanto por el transductor de presión como por el encoder óptico por separado, se realizaron pruebas finales para validar el comportamiento del sistema de adquisición y transmisión de datos en tiempo real considerando las dos variables a la vez.

Para las pruebas finales se utilizó como probeta una varilla corrugada marca NOVACERO antisísmica de 14 mm de espesor.

Se validó la adquisición de datos, lo que implica la construcción de la curva T vs Θ en Excel en tiempo real, lo cual se consiguió satisfactoriamente.



Figura 3.3 Pruebas finales. Gráfica T vs Θ construida en tiempo real.

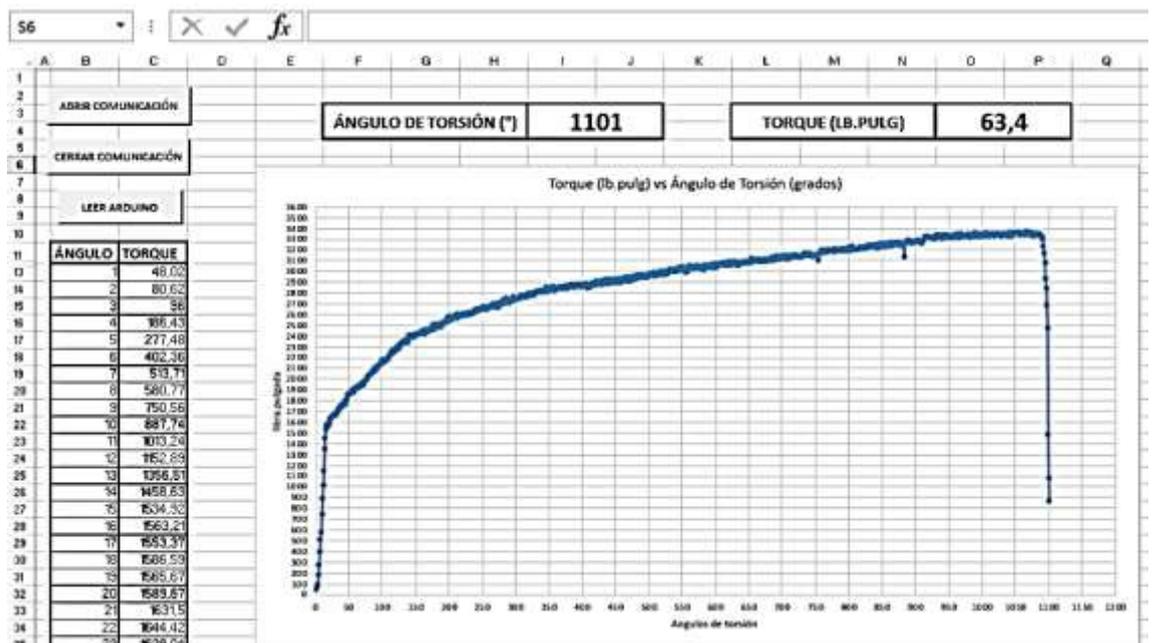


Figura 3.3 Gráfica final obtenida en tiempo real.

El valor del ángulo de torsión total Θ pudo ser comprobado visualmente al momento de revisar el estado final de la varilla usada como probeta, pues se pudo observar que efectivamente giró sobre su eje longitudinal 3 vueltas

completas ($360^\circ \times 3 = 1080^\circ$), valor que concuerda con la deformación plástica descrita por la curva ($1089^\circ - 14^\circ = 1075^\circ$).

3.4 Resumen de Resultados obtenidos por el prototipo.

- Se elaboró un prototipo cuyos resultados obtenidos en las pruebas finales concuerdan con los resultados esperados, según pruebas realizadas anteriormente en el laboratorio. Se encuentra coincidencia en el ángulo de inicio de la fluencia, en el torque máximo y ángulo de torsión total previo a la ruptura.
- Los resultados del sistema prototipo presentan un porcentaje de error aproximado del 5% para valores de torque bajos (<400 lb.pulg). Sin embargo el error disminuye hasta alrededor del 2% para valores de torque mayores a 1000 lb.pulg.
- El error en la medición del ángulo de torsión del sistema prototipo (5 grados por cada 360 en promedio), se considera un error aceptable, puesto que los ángulos de torsión totales de las probetas usadas en el laboratorio están en el orden de 1000 grados o más, lo que derivaría en errores menores al 1,5%.

3.5 Análisis de costos del prototipo.

Durante la elaboración del prototipo se utilizaron componentes de tipo académico e industriales usados, lo que derivó en costos inferiores a los US\$ 350,00.

A continuación se detallan los costos más significativos en la elaboración del prototipo realizado en el presente trabajo.

Tabla 3.3 Detalle de costos en la elaboración del prototipo.

Concepto	Costo Aproximado US\$
Arduino y demás componentes electrónicos tipo académico	50,00
Transductor de presión (usado)	150,00
Fuente 24 V (Usada)	40,00
Acoples hidráulicos	45,00
Manómetro	25,00
Total US\$	310,00

En cuanto a los softwares utilizados en la elaboración del prototipo, se utilizó el entorno de desarrollo integrado IDE de Arduino. Como se detalló anteriormente tanto hardware como softwares Arduino son de carácter académico, de libre acceso, no requieren licencia y son gratuitos (en el caso de softwares) o de muy bajo costo (en caso de hardware).

Adicionalmente se usaron códigos y módulos en Visual Basic, descargados de internet, justamente hallados en foros de discusión Arduino, los mismos que son de libre acceso, siempre reconociendo la autoría intelectual de sus desarrolladores.

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El presente trabajo realizado integró el uso de diversas ramas de la ingeniería a más de la Ingeniería Mecánica. Se utilizaron conocimientos de Oleo hidráulica y Mecánica de Materiales, parte de Ingeniería Mecánica, pero además se requirió conocimientos en Electrónica y Programación. También se demandó conocimientos sobre mecanismos de medición industriales y académicos en el mercado nacional.

Como fortalezas se puede mencionar los conocimientos claros de los principios de Oleo hidráulica y Mecánica de Sólidos que se aplicaron y que permitieron comprender a fondo el problema e incluso considerar varias alternativas de solución. Así mismo, se puso en práctica la comunicación con los usuarios finales del proyecto, lo que permitió ajustar la solución planteada a sus requerimientos para una mayor satisfacción de la necesidad producto del problema planteado.

Dentro de las debilidades y desafíos que deja el presente trabajo está el profundizar los conocimientos adquiridos en cuanto a Electrónica y Programación, pues este trabajo plantea al autor todo un mundo nuevo de aplicaciones de componentes electrónicos y softwares de programación en la solución de problemas industriales.

Cabe señalar que un trabajo con objetivos similares fue efectuado en el año 2002, sin embargo, el presente trabajo ha buscado entregar una solución más versátil, didáctica y sencilla, pues se utiliza transmisión, adquisición y gráfico de datos en tiempo real. Se utilizaron softwares libres y actuales, los mismos que permitieron dar una solución al problema de una forma más simple, sin una programación tediosa y compleja. Así mismo, se utilizaron mecanismos de medición modernos, de simple montaje y funcionamiento, pero también precisos, obteniendo un porcentaje de error relativamente bajo y suficiente para una aplicación de tipo académica.

4.1 Conclusiones

- Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, concordantes con los valores esperados, y los bajos porcentajes de error del prototipo planteado, permiten concluir que la modernización del equipo de ensayos de torsión con mecanismos de medición y adquisición de datos digitales, es técnicamente factible para el Laboratorio de Mecánica de Sólidos FIMCP.
- Los objetivos iniciales del proyecto fueron cumplidos. Se logró elaborar un prototipo de sistema de medición y adquisición de datos, que reemplace a los actuales mecanismos de medición analógicos de torque y ángulo de torsión que posee el equipo. Se presentó un software de adquisición de datos que permita recibir esas señales digitales, procesarlas, almacenarlas y que permita en tiempo real crear una curva torque-ángulo de torsión. Y se elaboró la curva de calibración requerida para el sistema de medición propuesto.
- El sistema prototipo tiene una baja resolución (aprox. 40 lb.pulg), la misma que para bajos valores de torque se vuelve significativa, pero para altos valores de torque se vuelve despreciable. Sin embargo, es mayor que la resolución teórica del sistema analógico (10 lb.pulg).
- El fenómeno de un alto error para bajos torque también ocurre en el sistema analógico, lo que permite concluir que existe deformación en el diafragma hidráulico producto del tiempo transcurrido, ya que ambos sistemas comparten la celda de carga hidráulica como fuente de información para la medición del torque. Adicionalmente, el diafragma se presenta semi-deformado al trabajar sin carga (lo que obliga a deformarlo manualmente para encerrar el dial).

4.2 Recomendaciones

- Para mejorar la resolución del sistema, se recomienda instalar un convertidor externo de 10 a 14 bits, lo que permitirá mejorar la resolución 16 veces, es decir obtener una resolución aproximada de 2,5 lb.pie.
- Como una opción más económica para mejorar la resolución del sistema, dado que la presión real del sistema es de 0 a 150 psi, mientras el transductor utilizado tiene un rango de 0 a 500; se recomienda realizar un

arreglo de resistencias en el circuito electrónico en el lazo de conexión del transductor, a fin de que la caída de tensión efectiva que puede leer el Arduino (de 1 a 4 voltios), ocurra justamente con la caída de presión real operativa.

- Para reducir el error en la medición tanto de torque como de ángulo de torsión, se recomienda caracterizar dichos errores matemáticamente, con el fin de establecer una ecuación de rectificación de resultados.
- Instalar un supresor de picos de voltaje, a fin de proteger el circuito electrónico de variaciones bruscas de voltajes, tales como apagones, etc.
- El sistema prototipo ha sido construido con elementos académicos de bajo costo (inversión total menor a US\$ 310,00), con el único fin de probar el concepto. Para la instalación definitiva de un sistema de medición y adquisición de datos digital, con precisión y calidad industrial, se recomienda el uso de otra placa alternativa a Arduino, tal como las placas BeagleBone o Raspberry, un encoder rotativo incremental montado en el eje y un transductor de presión de 0 – 150psi. Costo aproximado (US\$ 1.500,00).

BIBLIOGRAFÍA

- (s.f.). Obtenido de SENSING: http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES_35/C%C3%A9lulas-de-carga---Sensores-de-fuerza_69/C%C3%A9lulas-de-carga-hidr%C3%A1ulicas_139/
- Baumeister. (1998). *Marks Manual del Ingeniero Mecánico*. Mc Graw Hill.
- Crespo, E. (s.f.). *Aprendiendo Arduino*. Obtenido de <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/12/11/que-es-arduino-2/>
- Figliola-Beasley. (2003). *Mediciones Mecánicas. Teoría y Diseño*. Alfaomega.
- Flores, J. M. (2014). *ACADEMICO UNAM*. Obtenido de <http://www.academicos.ccadet.unam.mx/jorge.marquez/cursos/Instrumentacion/Ruido.pdf>
- Hitchner, D. M. (s.f.). *Perform serial port communication with VB*. Obtenido de <http://www.thescarms.com/VBasic/commio.aspx>
- López Villavicencio, A. A. (2002). *Desarrollo de un Sistema de Adquisición de Datos para la Máquina de Ensayos de Torsión*.
- Marks. (2001). *Manual del Ingeniero Mecánico*. McGraw Hill.
- R.C.Hibbeler. (1998). *Mecánica de Materiales*.

ANEXOS

ANEXO A.

CÓDIGO ARDUINO UTILIZADO

//Declaración de variables para el lazo entre encoder y generador de torsión

```
boolean anterior = 0;
boolean actual = 0;
int contador = 0;
int i=1;
float measureN=0;
float volt=0;
float lxp=0;
```

//Declaración de variables para comunicación con Excel

```
float Datos;
char Se_Envia[10];
```

```
void setup()
```

```
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(2,INPUT);
  //delay(1000);
}
```

```
void loop()
```

```
{
  actual = debounce(anterior);
  //Condición que me determina los pulsos
  if ( anterior == 0 && actual == 1) {
    contador++;      //contador suma cada vez que censa un pulso.
    delay (0.00001);
  }
}
```

```
//Condición que se ejecuta cada 69 pulsos que equivale a 1° de Torsión  
if(contador==69*i){  
measureN = MeasureN(95, getMeasure); //Rectifica la lectura ADC con 95  
mediciones  
volt= (measureN*5)/1024; //Calcula el Voltaje
```

```
//Condición que encera cada vez que no haya voltaje, o no esté conectado el  
circuito  
if (volt<=1.0305789){  
lxp=0;  
}else  
{  
lxp=(11969*volt)-12335; //Ecuación Basada en ensayo LibrasPie/Torsion  
}
```

```
//La variable datos es la que almacenará el valor que se enviará a las celdas de  
Excel  
Datos=lxp;  
if(contador<=1000000){  
dtostrf(Datos,5, 2, Se_Envia); // Función que convierte un float en string.  
Serial.print(Se_Envia); // y a su vez lo guarda en el arreglo de caracteres.  
delay(10); // "Se_Envia" para que Excel lo reciba.  
}
```

```
i=i+1;  
  
}  
anterior = actual;  
}
```

```
//Función que detecta el pulso que se está leyendo actualmente.  
boolean debounce(boolean dato_anterior)
```

```
{  
  
boolean dato_actual = digitalRead(2);  
if (dato_anterior != dato_actual)  
{  
delay(1);  
dato_actual = digitalRead(2);  
}  
return dato_actual;  
}
```

//Función que rectifica la lectura ADC y saca una media de lecturas

```
float MeasureN(int samplesNumber, float funct()){  
float sum;  
for (int i = 0; i < samplesNumber; i++){  
//sum += funct();  
sum = sum + getMeasure();  
}  
return sum / samplesNumber;  
}
```

//Función que arroja la medición de un sensor analógico

```
float getMeasure(){  
float m=analogRead(0);  
return m;  
}
```

ANEXO B.

CVB – MÓDULO PRINCIPAL

Sub ABRIR_COMUNICACION()

Dim ID_Puerto As Integer ' **Se declara la variable ID_Puerto como entero.**

Dim Estado As Long ' **Se declara la variable Estado como entero largo.**

ID_Puerto = 6 ' **Se define puerto COM (debe ser el mismo que en el Arduino).**

'Se utiliza la rutina CommOpen del MóduloCOMANDOS, la misma que permite establecer comunicación con el puerto COM designado en ID_Puerto. Y arroja un código de error diferente de 0 en caso de existir.

Estado = CommOpen(ID_Puerto, "COM" & CStr(ID_Puerto), _

"baud=9600 parity=N data=8 stop=1")

If Estado <> 0 Then ' **Se muestra un mensaje si ha habido algún error.**

MsgBox "Error al abrir comunicación o ya estaba abierta."

Else

MsgBox "Comunicación abierta."

End If

End Sub

Sub LEER_ARDUINO()

Dim ID_Puerto As Integer ' **Se declara la variable ID_Puerto como entero.**

Dim Estado As Long ' **Se declara la variable Estado como entero largo.**

Dim Datos As String ' **Se declara la variable Datos como cadena.**

Dim i As Integer ' **Se declara la variable i como entero, para iteraciones.**

ID_Puerto = 6 ' **Define puerto COM.**

Datos = "" ' **Se inicializa la variable Datos "vacía".**

i = 0 ' **Se inicia i con un valor de 0.**

Do

Estado = CommRead(ID_Puerto, Datos, 10)

'**Se leen los datos del puerto enviados por Arduino.**

'**Se utiliza la rutina CommRead del MóduloCOMANDOS, para leer el puerto de comunicación.**

If Datos <> "" Then ' **Si aún no hay datos no se muestra nada.**

Cells(13 + i, 3) = Right(Datos, 10) '**Se escribe en Excel, fila 13+i/columna 3, los 10 valores a la derecha de Datos (contienen información útil).**

i = i + 1

End If

CommFlush (ID_Puerto) ' **Se limpian los buffers de entrada y salida. Se utiliza la rutina CommFlush del MóduloCOMANDOS.**

Loop Until i = 10000 ' **Se sigue escribiendo hasta la celda 10013.**

End Sub

Sub CERRAR_COMUNICACION()

Dim ID_Puerto As Integer ' **Se declara la variable ID_Puerto como entero.**

Dim Estado As Long ' **Se declara la variable Estado como entero largo.**

ID_Puerto = 6 ' **Define puerto COM.**

Estado = CommClose(ID_Puerto)

'**Se utiliza la rutina CommRead del MóduloCOMANDOS, para cerrar el puerto de comunicación.**

If Estado <> 0 Then ' **Se muestra un mensaje si ha habido algún error.**

MsgBox "No se pudo cerrar comunicación.", vbExclamation, "Ha habido un error"

Else

MsgBox "Comunicación cerrada."

End If

End Sub