Científica

vol. 30, no. 2, July-December 2026, pp. 01-14
ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO
e300212 | DOI: 10.46842/ipn.cien.v30n2a12

ARTICLE

Desarrollo de una interfaz gráfica para la adquisición de datos de un tribómetro electrohidráulico

Development of a Graphical Interface for Data Acquisition from an Electrohydraulic Tribometer

Daniel Eduardo **Tuxpan Espinosa** [1]
Andrés **Lopéz Velázquez** [2]
Fernando **Aldana Franco** [3]
Ervin Jesús **Alvarez Sánchez** [4]
Ramiro de Jesús **García Mesa** [5]

Universidad Veracruzana,
Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica,
Xalapa, MÉXICO
[1] ORCID: 0009-0002-6689-4070 / zS21014429@estudiantes.uv.mx
[2] ORCID: 0000-0003-0939-2787 / andlopez@uv.mx
[3] ORCID: 0000-0003-4532-8782 / faldana@uv.mx
[4] ORCID: 0000-0002-0790-0429 / eralvarez@uv.mx
Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat,
Veracruz, MÉXICO
[5] ORCID: 0009-0003-3087-565X / ramiro.garme@outlook.com

https://científica.site

Recibido 30/10/2026, aceptado 28/11/2026, publicado 30/11/2026.

 Creative Commons License: Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International CC BY-NC-SA 4.0

Resumen

La tribología es la ciencia que estudia los fenómenos de desgaste, fricción y lubricación entre superficies en movimiento relativo, para ello se emplean equipos llamados tribómetros, los cuales permiten realizar ensayos acelerados de fricción y desgaste. En este trabajo, se propone el desarrollo de una interfaz gráfica que permita adquirir datos de un tribómetro electrohidráulico y que, a su vez, permita que el usuario interaccione con dicho equipo, así como la obtención de una base de datos, que facilite el análisis de los resultados obtenidos. El control y lectura de datos del tribómetro se realizan mediante una tarjeta Arduino, y los softwares de programación usados son Arduino IDE y Microsoft Visual Studio Community, ambos son libres de licencia y amigables con el usuario al momento de realizar la programación.

Se realiza la calibración correspondiente en los sensores de fuerza normal y fuerza tangencial, para obtener, mediante cálculos, el coeficiente de fricción. Como resultado, se obtiene una interfaz gráfica adecuada con el usuario que le permite introducir las condiciones de operación del equipo, así como la descripción de los datos de la muestra, el contracuerpo y el lubricante que se emplea, además de una representación gráfica de los valores medidos por los sensores. Los resultados de temperatura ambiental, humedad relativa, fuerza normal y coeficiente de fricción se grafican dentro de la interfaz gráfica en tiempo real, durante el ensayo.

Palabras clave: tribología, tribómetro electrohidráulico, interfaz gráfica, sensores, coeficiente de fricción.

Abstract

Tribology is a science that studies the phenomena of wear, friction, and lubrication between surfaces in relative motion. This field utilizes instruments known as tribometers, which enable accelerated friction and wear testing. This work proposes the development of a graphical interface designed to acquire data from an electro-hydraulic tribometer and facilitate user interaction with the equipment. It also includes the creation of a database to support the analysis of the results obtained. The tribometer is controlled and its data read via an Arduino board, using the Arduino IDE and Microsoft Visual Studio Community software - both of which are license-free and user-friendly for programming purposes.

The sensors for normal and tangential force are calibrated to allow for the calculation of the friction coefficient. The resulting user-friendly graphical interface enables the input of operating conditions, as well as descriptions of the sample, the counter-body, and the lubricant used. It also provides a graphical representation of the values measured by the sensors. Data regarding ambient temperature, relative humidity, normal force, and the friction coefficient are plotted within the interface in real time during the test.

Index terms: tribology, electrohydraulic tribometer, graphical user interface, sensors, coefficient of friction.

CC BY-NC-SA 4.0

I. Introducción

La tribología es una ciencia y tecnología que estudia los fenómenos de desgaste, fricción y lubricación, entre superficies en interacción, así mismo, implica la mecánica del contacto y la geometría de las superficies [1]. Para el desarrollo de pruebas a nivel laboratorio es importante contar con un instrumento de ensayos de desgaste acelerado, este instrumento es conocido como tribómetro. Existen diversos tipos de tribómetros, dependiendo de la configuración de contacto y geometría de las superficies, entre ellos se encuentran los tribómetros tipo ball-on-disc, los cuales rigen su funcionamiento bajo la norma ASTM G99 [16].

En el Laboratorio de Investigación en Tribología, adscrito a la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, región Xalapa, de la Universidad Veracruzana, se desarrolló y patentó un tribómetro electrohidráulico, el cual opera bajo la norma antes mencionada. Este equipo se caracteriza por aplicar la fuerza normal mediante un pistón electrohidráulico, así como por contar con posicionamiento automatizado del contracuerpo.

Para introducir al equipo los parámetros del ensayo tribológico se cuenta con un sistema basado en plataforma Arduino que permite indicar la velocidad lineal, la distancia a recorrer durante el ensayo y la fuerza normal a aplicar mediante el uso de un panel de control incorporado dentro del equipo, sin embargo, el equipo no permite obtener datos de salida cruciales durante los ensayos tribológicos, como lo es la fuerza tangencial, la cual es importante para calcular el coeficiente de fricción.

Por ello, se decide implementar la instrumentación necesaria para medir la fuerza tangencial, así como una interfaz gráfica que permita recopilar datos en tiempo real del tribómetro electrohidráulico, para ser procesados posterior a la realización del ensayo tribológico. La interfaz también permitirá introducir los parámetros del ensayo tribológico, información de la muestra y el contracuerpo a ensayar, condiciones ambientales de trabajo y otros parámetros medidos en tiempo real.

II. Metodología

El tribómetro electrohidráulico cuenta con un sensor de tensión – compresión tipo S CALT DYLY-108, el cual permite medir la fuerza normal (F_N) que se ejerce en el ensayo tribológico, así como un sensor DHT 11, que permite la medición de temperatura y humedad ambiental. Sin embargo, es importante la integración de un sistema que permita medir la fuerza tangencial (F_T), ya que dicha medición, junto con la F_N, permiten calcular el coeficiente de fricción (μ), tal como se muestra en la ecuación (1):

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \tag{1}$$

El coeficiente de fricción (μ) es un valor adimensional que expresa la relación entre la F_T y la F_N, y depende de la naturaleza de las superficies [19]. La F_T en un ensayo tribológico se presenta debido a que el contracuerpo se opone al movimiento de la muestra, la cual, para los ensayos de tipo ball-on-disc, rota sobre un eje a una velocidad lineal constante, mientras el contracuerpo ejerce una fuerza en un punto de contacto [2].

A. Medición de fuerza tangencial

Para la medición de la fuerza tangencial, se propone el empleo de dos sensores inductivos BMN4-GM12-I de señal analógica de 4 a 20 mA. Dado que la plataforma de operación del tribómetro electrohidráulico es Arduino, y esta no

CC BY-NC-SA 4.0

es capaz de leer este tipo de señales en forma de corriente, se acopla un módulo HW-685 a cada sensor, los cuales convierten la señal analógica de entrada de corriente a una señal de salida de voltaje, la cual pueda ser leída por un puerto analógico de una tarjeta Arduino.

Dichos sensores, deben ser acoplados al tribómetro de tal manera que permitan detectar la fuerza tangencial originada por el par tribológico, por lo que se diseña un prototipo de brazo, que realice la función de galga extensiométrica. Además, se consideran las cavidades necesarias para colocar los sensores inductivos. Para fines prácticos, se emplea el método de manufactura aditiva, en este caso impresión 3D en ácido poliláctico (PLA) [17]. Se diseña un brazo en un software CAD, este caso se utiliza SolidWorks [3], tal como se muestra en la Figura 1.

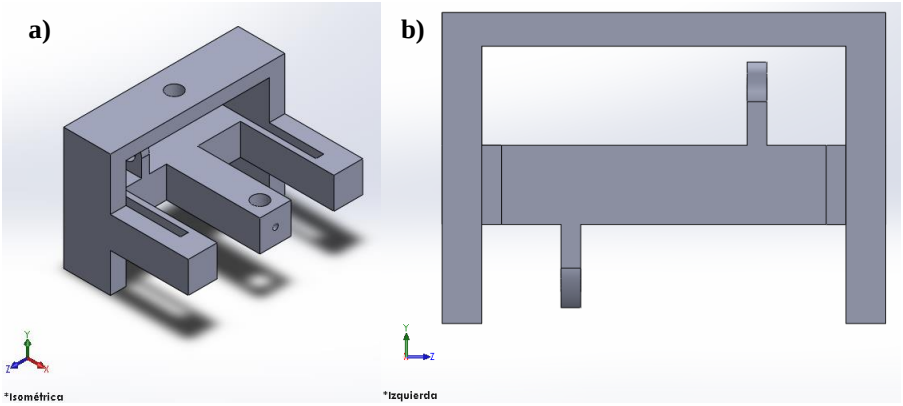

Fig. 1. Brazo donde se montarán los sensores inductivos, a) vista isométrica, b) vista lateral izquierda.

B. Interfaz gráfica

Para el desarrollo de la interfaz gráfica, se decide emplear el uso de un software de licencia gratuita, en este caso Microsoft Visual Studio Community 2022, versión 17.13.1, el cual es un entorno de desarrollo integrado que permite escribir y compilar código en diversos lenguajes de programación. En este caso, se decide emplear el lenguaje de programación C#, ya que permite generar actualizaciones, implementar parámetros nuevos y realizar operaciones de forma simple dentro del código de la interfaz gráfica [20].

Como punto de partida, es importante tener presente los elementos que se desean implementar y como el usuario interaccionará con dichos elementos. Así mismo, ya que se requiere que el usuario visualice, en tiempo real, las condiciones de operación del tribómetro electrohidráulico, como son las condiciones ambientales y el coeficiente de fricción. Además, se debe considerar que el sistema trabajará de la mano con las señales que reciba del tribómetro, por tal motivo, las tarjetas de control Arduino deben mandar y recibir información. Para ello, se desarrolla este código de control en Arduino IDE [4], ya que permitirá que haya una interacción directa entre el tribómetro y la interfaz gráfica.

La forma de enlace entre el tribómetro electrohidráulico y la interfaz gráfica es por medio de un puerto USB, en donde es posible ajustar la velocidad de transferencia de información, y dado que se requiere que múltiples datos sean recibidos en cortos intervalos de tiempo, se emplea un Baud Rate de 115,200.

CC BY-NC-SA 4.0

C. Calibración de sensores

Para la calibración de la medición de F_N se emplea una celda de carga de 10 kg y una tarjeta Arduino programada para convertir la señal del sensor en valores de peso, en kg, y de fuerza, en N, con el fin de obtener los valores medidos por el sensor tipo S, asignándoles su equivalente en valores de fuerza. Se realizan múltiples mediciones, aplicando fuerza de forma progresiva 0.5 N/s, aproximadamente, desde 30 N a 100 N, a fin de generar un gráfico donde se visualice el comportamiento que sigue la señal de sensor tipo S para, posteriormente, obtener la tendencia de los datos, expresada en forma de una ecuación, para ser programada en la tarjeta Arduino del tribómetro.

Para la fuerza tangencial se realiza el mismo proceso como el seguido con el de la fuerza normal, sin embargo, el método de obtención de datos cambia, ya que se realiza un acomodo de elementos en el tribómetro, de tal manera que permita que este pueda sujetar una pesa por medio de una polea, mediante el uso de una cuerda o lazo, como se aprecia en la Figura 2, a fin de obtener los datos de señal que mandan los sensores al sistema dependiendo la carga acoplada. Se emplea el uso de pesas de 1, 2, 5 y 10 N, lo que permite obtener coordenadas para el procesamiento de datos.

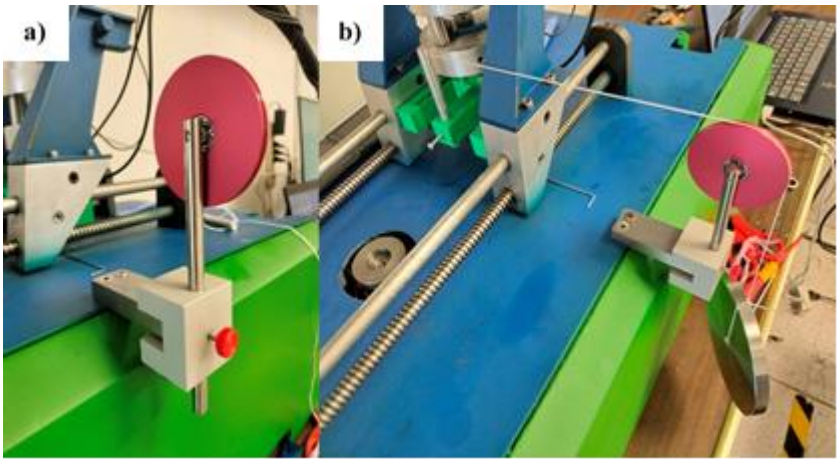

Fig. 2. Sistema de calibración del brazo del tribómetro electrohidráulico, a) Instalación del sistema, b) aplicación de carga para calibración de la fuerza tangencial.

D. Realización de ensayo tribológico con la interfaz gráfica implementada

Para la verificación del funcionamiento adecuado del tribómetro electrohidráulico, mediante el uso de la interfaz gráfica, se realiza un ensayo tribológico con las condiciones de operación mostradas en la Tabla 1, con lo cual, se busca verificar la adquisición simultanea de datos, así como la replicabilidad de resultados. Para corroborar este último, se realiza el ensayo tribológico por triplicado y se evalúan los resultados por métodos estadísticos.

CC BY-NC-SA 4.0

Científica, vol. 30, no. 2, pp. 01-14, July-December 2026,
ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional, México
e300212 | DOI: 10.46842/ipn.cien.v30n2a12

TABLA 1
CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL ENSAYO TRIBOLÓGICO EN EL TRIBÓMETRO ELECTROHIDRÁULICO CON LA INTERFAZ GRÁFICA IMPLEMENTADA

Parámetro	Valor
Velocidad lineal (V_l)	125 mm/s
Fuerza normal (F_N)	100 N
Distancia de recorrido (D)	100 m
Radio de huella (R)	2 mm
Material del cuerpo	AISI 1045
Material del contracuerpo	AISI 52100
Radio del contracuerpo (r)	3 mm
Lubricante a emplear	SAE 15W-40
Cantidad de aceite	0.25 ml

Los ensayos tribológicos son multifactoriales, por lo que es importante hacer constantes dichos factores para dar garantía de la replicabilidad de los ensayos. Uno de estos factores es la rugosidad promedio (R_a) de la superficie de la muestra, para lo cual se realiza un procedimiento de lijado y pulido de las muestras a ensayar. Este proceso se realiza en una pulidora metalográfica, empleando lijas de carburo de silicio (SiC) para el lijado y un paño de pulido con alúmina en agua destilada para el pulido de las superficies.

Una vez preparadas las superficies de las muestras, se realiza una medición empleando un rugosímetro TIME TR200. Se busca que la R_a medida se encuentre dentro del grado N1 según la ISO 1302 ($R_a \leq 0.025$ µm) [18].

Una vez realizados los ensayos tribológicos, es necesario medir el ancho de la huella de desgaste generada en la superficie de las muestras, empleando el uso de un microscopio óptico MEIJI ML7100 y el software Infinity Analyze 7. Se realizan 20 mediciones a lo largo de la huella, obteniendo un ancho promedio de la huella (d), la cual sirve para calcular el volumen de desgaste ($V_{desgaste}$) y la tasa de desgaste (k), empleando las ecuaciones (2) y (3), respectivamente [16]. En estas ecuaciones no se considera el desgaste generado en el contracuerpo.

$$V_{desgaste} = 2\pi R\left[r^2 \sin^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right) - \left(\frac{d}{4}\right)\sqrt{4r^2 - d^2}\right] \quad (2)$$

$$k = \frac{V_{desgaste}}{F_N \cdot D} \quad (3)$$

El método estadístico para verificar la replicabilidad de los resultados consiste en obtener la desviación estándar (s) y el promedio de los resultados ($\hat{x}$), para dividir dichos valores y obtener el coeficiente de variación de los resultados (CV), tal como se expresa en la ecuación (4). Para este proceso se considera un nivel de confianza del 95%, por lo que para un método donde se emplean 3 réplicas es necesario un coeficiente de variación menor al 4% [2].

$$CV = \frac{s}{\hat{x}} * 100 \quad (4)$$

III. RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez obtenido el diseño del brazo en CAD, se realiza el proceso de impresión 3D al 40% de relleno tipo giroide, con una boquilla de 0.4 mm. Una vez impreso el brazo, se instalan ambos sensores inductivos dentro de los espacios designados, además se coloca una placa de acero, que tiene la función de activar a estos sensores. Durante la operación del tribómetro, uno de los sensores se acerca a la placa de acero, mientras que el otro se aleja de la placa.

CC BY-NC-SA 4.0

Al realizarse la calibración de los sensores inductivos, se debe siempre considerar que al acoplarse una fuerza a ambos sensores se les asignará un valor de fuerza. Dado el funcionamiento de estos, la cual indica que al encontrarse más cerca de la placa de acero la señal analógica tiende a disminuir, por lo que el sensor que se acerca a la placa decrementará su señal, mientras que el otro que se aleja de la placa aumentará su señal.

Al acoplarse las cargas correspondientes para la calibración de F_T, se obtiene la gráfica mostrada en la Figura3a, mientras que al realizarse la calibración de F_N, se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 3b.

Así mismo, se obtienen dos ecuaciones para F_T, una por cada sensor, la cuales se expresan en la ecuación (4) y (5) y una ecuación para F_N, la cual se expresa en la ecuación (6). Dado que la F_T calculada por ambos sensores inductivos tienden al mismo valor, se realiza un promedio de los resultados calculados por ambos sensores, para obtener una nueva ecuación, que se expresa en la ecuación (7).

$$y_1 = 0.025x_1 + 0.6024 \tag{4}$$

$$y_2 = -0.0003{x_2}^2 + 0.2349x_2 - 33.387 \tag{5}$$

$$F_N = -3.3035x_3 + 869.75 \tag{6}$$

$$F_T = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{0.025x_1 + 0.6024 - 0.0003{x_2}^2 + 0.2349x_2 - 33.387}{2} \tag{7}$$

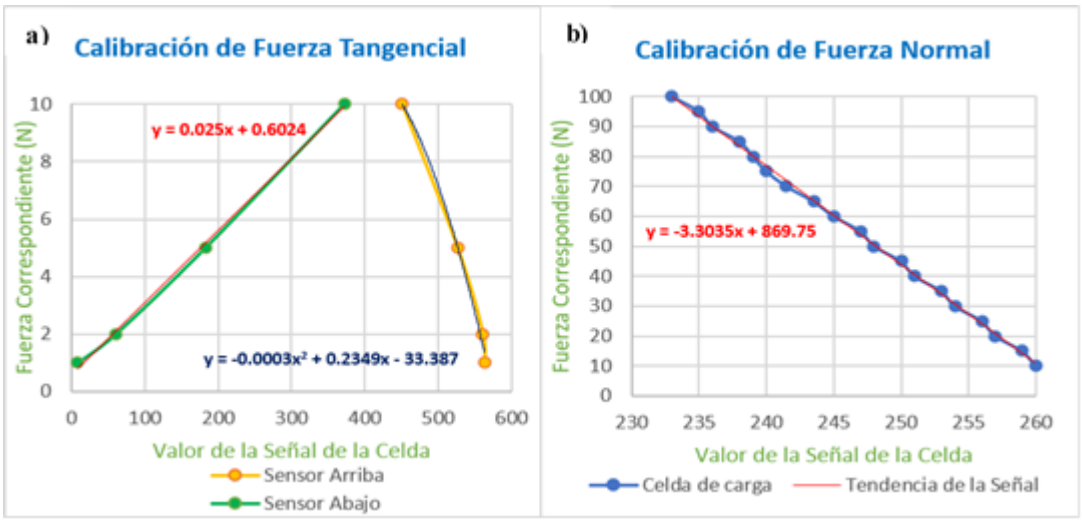

Fig. 3. Graficas de calibración, a) calibración de fuerza tangencial, b) calibración de fuerza normal.

Se considera para las ecuaciones (4), (5), (6) y (7) que y_1 es el valor calculado por sensor inductivo 1, x_1 es el valor el valor de la señal analógica leído del sensor inductivo 1, y_2 es el valor calculado por sensor inductivo 2, x_2 es el valor el valor de la señal analógica leído del sensor inductivo 2, y x_3 es el valor el valor de la señal analógica leído del sensor tipo S. En la Figura 4 se muestra el código correspondiente a la conversión de las señales medidas a magnitudes físicas.

CC BY-NC-SA 4.0

```
float fuerza;
float sensorarriba;
float sensorabajo;
float ft;
```

```
if (tribometroActivo) {
  float humedad = dht.readHumidity();
  float temperatura = dht.readTemperature();
  float fuerzaSP = analogRead(A0);
  fuerza = (3.3035*fuerzaSP)-894.75;
  sensorarriba = analogRead(A2);
  sensorabajo = analogRead(A1);
  ft = (((0.025*sensorabajo + 0.6024)+(-0.0003*(sensorarriba*sensorarriba) + 0.2349*sensorarriba - 33.387))/2);

  if (isnan(humedad) || isnan(temperatura)) {
    Serial.println("0");
    return;
  }
```

Fig. 4. Código para conversión de señales leídas a magnitudes físicas.

Una vez obtenidas las ecuaciones correspondientes, se introducen en el código que manejará la tarjeta Arduino destinada para estar en comunicación con la interfaz gráfica. Debido a que todos los parámetros medidos durante el ensayo se estarán sobrescribiendo de manera constante, se manejan como valores flotantes, por lo que, estos serán manejados de la misma forma por la interfaz gráfica.

Para el diseño de la interfaz gráfica se considera añadir diversos espacios de interacción con el usuario, siendo estos el de declaración de condiciones de operación del tribómetro electrohidráulico, datos sobre la muestra y el contracuerpo, el tipo de lubricante que se emplea, y una serie de botones de interacción para iniciar o interrumpir el ensayo tribológico. Así mismo, debe apreciarse, de manera gráfica, los valores calculados dada la medición de las señales analógicas de los sensores instalados en el tribómetro, los cuales son la temperatura ambiental, la humedad relativa, la F_N y el coeficiente de fricción.

El software Microsoft Visual Studio permite generar una ventana o interfaz gráfica mediante la designación de espacios concretos para escritura de datos, colocación de botones de interacción y gráficos. Dados los requerimientos mencionados, se disponen los elementos de la manera que se muestra en la Figura 5.



Fig. 5. Interfaz gráfica.

CC BY-NC-SA 4.0

Para la declaración de las condiciones de operación del tribómetro, se emplean Numeric Up-Down (Cuadro Numérico Incremental) en donde se pueden indicar los valores de F_N, velocidad lineal (V_L) y la distancia a recorrer (D_R). Sin embargo, se debe declarar un límite inferior y superior, para evitar que el usuario que opere el equipo indique valores fuera de los márgenes de operación, siendo de 30 N a 200 N de F_N, de 25 mm/s a 125 mm/s de V_L y de 1 m. a 10,000 m. de D_R.

En la parte de declaración de datos sobre la muestra y el contracuerpo, y del tipo de lubricante que se emplea en el ensayo tribológico, es necesario indicar, por medio de un recuadro de texto, la información pertinente. Para la muestra, se solicita indicar el material, espesor y geometría de la muestra, si esta cuenta con un recubrimiento y, en caso de ser así, indicar que tipo de recubrimiento contiene, rugosidad promedio (R_a) de la superficie, método de limpieza y agente de limpieza de la muestra. Así mismo, para el contracuerpo se solicita indicar el material y geometría del contracuerpo, el diámetro que tiene (considerando que el contracuerpo es esférico), si este cuenta con un recubrimiento y, en caso de ser así, indicar que tipo de recubrimiento contiene, método de limpieza y agente de limpieza del contracuerpo.

Para indicar el tipo de lubricante a emplear, es necesario especificar si se trata de una grasa, aceite u otro tipo, así como la condición de este, ya sea nuevo o usado, además, de anexar las especificaciones del lubricante, como norma que sigue, marca, modelo, la cantidad que se aplica y el método de aplicación. Al interactuar con los botones para la interacción del tribómetro, es emplean 4 botones, los cuales se describen en la Tabla 2.

Cuando el equipo comienza con el ensayo tribológico, se comienzan a graficar los datos calculados en base a las mediciones de los sensores, y al finalizar dicho ensayo, los datos graficados se escriben automáticamente en un archivo de texto con extensión .txt, el cual permitirá al usuario rescatar la información necesaria para la su posterior procesamiento e interpretación de datos [21]. Dicho archivo se programa para ser guardado en la raíz del disco duro de la computadora donde se tenga el software del tribómetro (La raíz del disco duro suele ser normalmente nombrada con la letra C:) [22].

TABLA 2
DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE LOS BOTONES DE INTERACCIÓN DEL TRIBÓMETRO ELECTROHIDRÁULICO

Botón	Descripción
Encendido / Reanudar	Cuando el equipo esté listo para comenzar a realizar un ensayo tribológico, será el único botón habilitado para interaccionar. Al presionarse se deshabilita y cambia su texto a Reanudar, así mismo, habilita los botones de Pausa y Emergencia. Cuando la prueba empiece a ejecutarse, se comenzará con la adquisición de datos y su graficación correspondiente. En caso de haber una Pausa y presionarse, posteriormente, el botón de Reanudar, el ensayo tribológico continuará con normalidad. Deshabilitándose, nuevamente, el botón de Reanudar y habilitando el botón de Pausa.
Pausa	Este botón permite detener de manera temporal el ensayo tribológico, pausando también la adquisición de datos y su graficación correspondiente. Al presionarse, se habilita el botón de Reanudar y se deshabilita el botón de Pausa.
Emergencia	Al presionarse este botón, se apaga el sistema entero del tribómetro, deteniendo el ensayo y la adquisición de datos. Al presionarse, se deshabilitan los botones de Reanudar, Pausa, y Emergencia, y se habilita el botón de Reestablecer.
Reestablecer	Este botón permite volver a encender los sistemas del tribómetro una vez que la situación de emergencia ocurrida allá sido corregida. Al presionarse, el botón de Reestablecer se deshabilita, y el botón de Reanudar cambia su texto a Encendido y se habilita.

CC BY-NC-SA 4.0

Una vez implementada la interfaz gráfica en el tribómetro electrohidráulico, se realizan los ensayos tribológicos necesarios para verificar la adquisición simultanea de datos y la replicabilidad de los resultados. Como se aprecia en la Figura 6a y 6b, los datos de humedad relativa, temperatura ambiental, F_N y F_T, se agrupan en línea, separados por una coma, y se solicitan cada 20 ms, por lo que se obtienen 50 datos por segundo. Los datos solo son solicitados por la interfaz gráfica cuando esta le manda el comando "$on", mientras que al recibir el comando "$off" se detiene el envío de datos a la interfaz, este proceso se lleva a cabo dado por el código que se muestra en la Figura 6c.

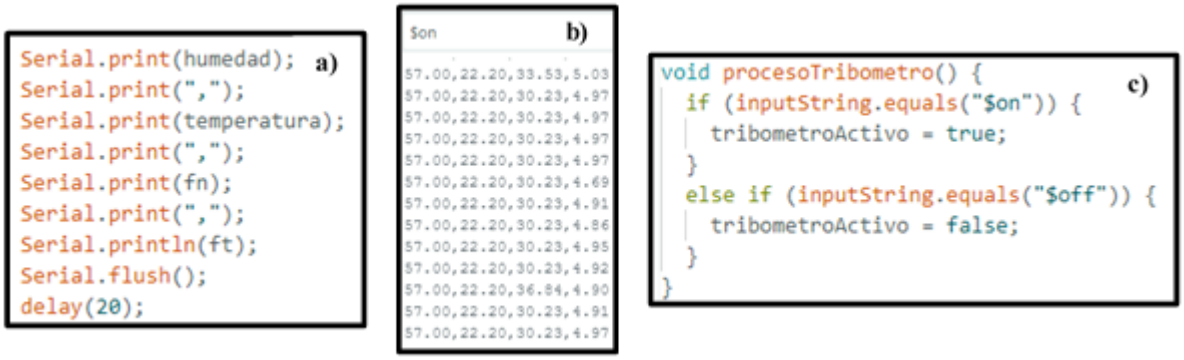

Fig. 6. Adquisición de datos para la interfaz gráfica, a) código para agrupación en línea de las condiciones operativas del tribómetro, b) ejemplo de lectura y envío de condiciones a la interfaz gráfica al activar el comando "$on", c) código para activar y desactivar la adquisición de datos.

El comando "$on" es mandado por la interfaz gráfica al presionar el botón Encendido / Reanudar, y el comando "$off" al presionar el botón Pausa o Emergencia, como se visualiza en la Figura 7. Además, en caso de perderse la comunicación con el tribómetro electrohidráulico, la interfaz gráfica detiene la adquisición de datos de manera inmediata. Así mismo, se presenta en la Figura 7d el código que se ejecuta siempre y cuando se cumpla que el botón de Encendido / Reanudar allá sido activado, que el enlace con el tribómetro esté habilitado y que la lectura de bytes sea mayor que 0, el cual genera un archivo .txt y almacena los valores que recibe del tribómetro dentro de este cada que se recibe una medición nueva, además de separar los datos obtenidos y conservándolos en una matriz. Cada 10 datos leídos, se genera un promedio de estos y se muestran de forma gráfica dentro de la interfaz gráfica, a excepción de la temperatura y humedad, donde se necesitan 50 datos.

CC BY-NC-SA 4.0



Fig. 7. Código de funcionamiento de los botones dentro de la interfaz gráfica resaltándose el comando "$on" u "$off" correspondiente, así como del encendido o apagado del enlace con el tribómetro, a) botón Encendido / Reanudar con comando "$on", b) botón Pausa con el comando "$off", c) botón Emergencia con el comando "$off", d) almacenamiento de variables en archivo .txt y de forma gráfica dentro de la interfaz.

CC BY-NC-SA 4.0

En la Figura 7 también se muestra que en caso de haber algún error en la ejecución de un código u otra situación, se mostrará al usuario un mensaje de error y solo será posible continuar hasta que se corrija dicho error.

Los ensayos realizados muestran que la F_N mantiene un comportamiento estable y con tendencia a mantenerse dentro del valor programado. Para este caso, la tendencia de los datos muestra que se la F_N se encuentra en 100 N, esto se puede visualizar en la Figura 8a. Así mismo, el comportamiento del coeficiente de fricción se mantiene estable y presenta cierta tendencia a la alza al ejecutarse el ensayo, como se presenta en la Figura 8b.

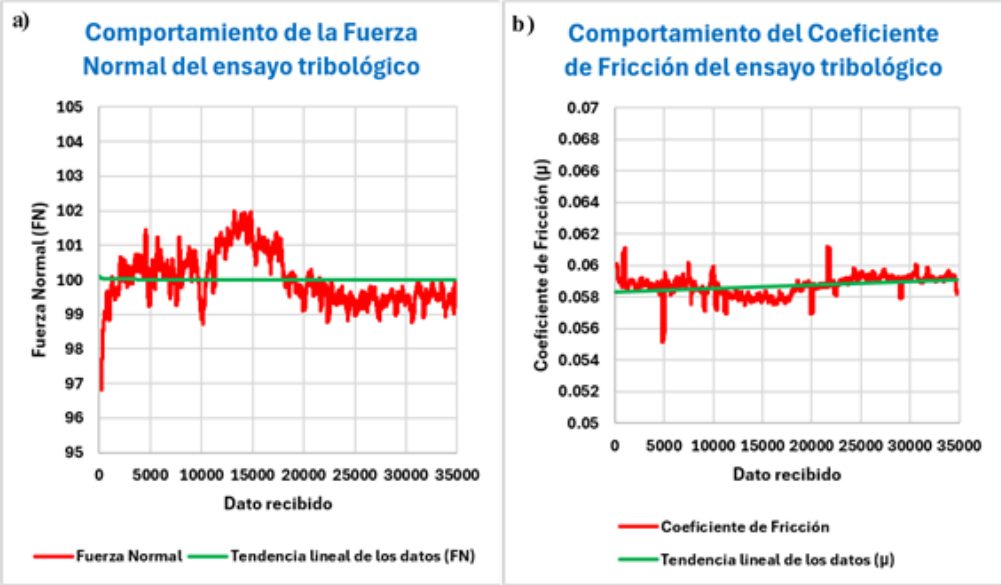

Fig. 8. Resultados graficados obtenidos, a) fuerza normal (F_N), b) coeficiente de fricción (μ)

Para la realización del análisis estadístico de los datos, se obtienen los promedios de los datos obtenidos de cada ensayo tribológico, además del promedio y desviación estándar de los 3 promedios obtenidos de μ y de $V_{desgaste}$, con el fin de obtener el coeficiente de variación igual o menor a 4%. Además se calcula $V_{desgaste}$ y la tasa de desgaste (k). Estos datos se recopilan en la Tabla 3.

TABLA 3
RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Ensayo	Humedad Relativa (%)	Temperatura Ambiental (°C)	μ	Ancho de huella (d) (mm)	$V_{desgaste}$ (mm^3)	Tasa de desgaste (k) ($mm^3/N \cdot m$)
1	48.15	24.16	0.05873	0.5372	0.05425	$5.4245 * 10^{-6}$
2	49.18	24.53	0.05798	0.5325	0.05283	$5.2832 * 10^{-6}$
3	47.65	24.66	0.05834	0.5362	0.05394	$5.3943 * 10^{-6}$
Promedio			0.05835		0.05367	
Desv. Estándar			0.000375		0.000744	
CV			0.6428%		1.3867%	

Con los resultados mostrados, se considera que el estudio es valido y replicable, ya que los valores de CV son menores al 4%, lo que significa que se cuenta con un nivel de confianza del 95%.

CC BY-NC-SA 4.0

Científica, vol. 30, no. 2, pp. 01-14, July-December 2026,
ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO
e300212 | DOI: 10.46842/ipn.cien.v30n2a12

IV. Conclusiones

El tribómetro electrohidráulico es un equipo que permite realizar ensayos de desgaste acelerado, sin embargo, el hecho de no haber sido creado en un inicio con una interfaz gráfica dedicada a la adquisición de datos, limitaba a los usuarios al realizar un análisis tribológico, ya que, sin esta, solo es posible obtener la información de la huella de desgaste sin tener conocimiento del coeficiente de fricción.

Los equipos tribológicos comerciales suelen emplear sensores de medición de alta precisión, lo cual origina a su elevado precio. Considerando esta limitación, se decide emplear el uso de sensores de bajo costo, pero que no reducen su precisión, como lo son un sensor tipo S CALT DYLY-108, 2 sensores inductivos con señal analógica, y un sensor de temperatura / humedad DTH 11.

Con la implementación de nuevos sensores y una interfaz gráfica, se amplía la operatividad del equipo, permitiendo que el usuario describa datos, ajuste condiciones de operación, visualice mediciones en tiempo real y obtenga un reporte de ejecución de forma simple. Así mismo, esto abre múltiples oportunidades de innovación, como la incorporación de nuevos sensores de medición, además de desarrollar nuevas interfaces gráficas para otros equipos de tecnología propia.

Para corroborar que la replicabilidad de los resultados, se realizan 3 ensayos tribológicos que permitan evaluar el funcionamiento adecuado del tribómetro. Se realiza un análisis estadístico con un nivel de confianza del 95%, en donde se encuentra que el coeficiente de variación resulta ser menor al 4%, tanto en los resultados de coeficiente de fricción, como también en el volumen de desgaste presentado, lo cual permite respaldar la replicabilidad de los ensayos realizados en este equipo.

CRediT (*Contributor Roles Taxonomy*)
Contribuciones de los autores: Conceptualización: DETE, ALV, RJGM; Metodología: DETE, ALV; Software: DETE; Investigación: EJAS, FAF; Redacción y preparación del borrador original: DETE, Redacción, revisión y edición: DETE, RJGM, EJAS, FAF; Supervisión: ALV; Análisis formal: ALV, Administración del proyecto: ALV; Adquisición de fondos: AIV.
Financiamiento: Los autores declaran que el financiamiento para este proyecto fue propio.
Declaración de disponibilidad de datos: Los datos se encuentran en el artículo.
Agradecimientos: Agradecemos al Dr. Arturo Barba Pingarrón, Investigador de CENISA-UNAM por el apoyo otorgado para la adquisición de un equipo de cómputo.
Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Referencias

[1] M. B. Peterson, W. O. Winer, *Wear Control Handbook*, 1ª ed., New York, NY, USA: ASME, 1980.
[2] R. O. Kuehl, *Diseño de experimentos, principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*, 2ª ed. México, DF, México: Thomson, 2001.
[3] SolidWorks Education, *Guía del estudiante para el aprendizaje del software SolidWorks*, 1ª ed. Concord, MA, USA: Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, 2010.
[4] J. M. Ruiz, *Manual de programación Arduino*, 1ª ed., San Francisco, CA, USA: 2007.
[5] P. Itterheimová, F. Foret, P. Kubáň, "High-resolution Arduino-based data acquisition devices for microscale separation systems," *Analytica Chimica Acta*, vol. 1153, pp. 338294, Feb. 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338294

CC BY-NC-SA 4.0

[6] E. H. Rodríguez, et al., "Reliability testing of a Low-Cost, Multi-Purpose Arduino-Based data logger deployed in several applications such as outdoor air quality, human activity, motion, and exhaust gas monitoring," *Sensors*, vol. 23, no. 17, pp. 7412, Aug. 2023, doi: https://doi.org/10.3390/s23177412

[7] D. Goyal, S. Patra, A. Sapre, M. Kaur, and N. S. Ramgir, "Design and Development of Arduino-Based Four-Channel Data Acquisition System with Digital Temperature Control for Chemiresistive Sensors," *Sensing and Imaging*, vol. 25, no. 1, pp. 30, May 2024, doi: https://doi.org/10.1007/s11220-024-00477-2

[8] H. Louw, A. Broekman, E. Kearsley, "MADV-DAQ: Multi-channel Arduino-based differential voltage data acquisition system for remote strain measurement applications," *HardwareX*, vol. 12, p. e00360, Sep. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00360

[9] K. Chand, A. Khosla, "MATLAB-Based Real-Time data acquisition tool for multimodal biofeedback and Arduino-Based instruments," *Journal of Information Technology Research*, vol. 15, no. 1, pp. 1–20, Mar. 2022, doi: https://doi.org/10.4018/JITR.299922

[10] S. Oberloier, N. G. Whisman, F. Hafting, J. M. Pearce, "Open source framework for a Broadly Expandable and Reconfigurable data acquisition and automation device (BREAD)," *HardwareX*, vol. 15, pp. e00467, Aug. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00467

[11] S. M. Vargas, et al., "Monitoring multiple parameters in complex water scenarios using a low-cost open-source data acquisition platform," *HardwareX*, vol. 16, pp. e00492, Nov. 2023, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00492

[12] E. Celislami, O. Rawashdeh, D. DelVescovo, *Low-Cost Open-Source Data Acquisition for High-Speed Cylinder Pressure Measurement with Arduino*, vol. 1, Apr. 2024. doi: https://doi.org/10.4271/2024-01-2390

[13] W. Phongphattarawut, S. Nampromma, J. Nithikarnjanatharn, "Low-cost dimensional measurement using an Arduino embedded system with real-time logging via Microsoft Excel Data Streamer", *RMUTSB ACADEMIC JOURNAL*, vol. 14, no. 1, pp. 268561, Dec. 2025, doi: https://doi.org/10.64989/rmutsbj.2026.268561

[14] Y. Zhou, et al., "Open-source tribometer with high repeatability: Development and performance assessment," *Tribology International*, vol. 184, pp. 108421, Mar. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108421

[15] A. Perovic, S. Cukic, S. Miladinovic, M. Matejic, S. Gajevic, B. Stojanovic, "Development and experimental validation of a Pin-on-Disc tribometer for friction testing of different metal materials," *Tribology in Industry*, vol. 48, no. 1, pp. 188–198, Mar. 2026, doi: https://doi.org/10.24874/ti.2135.02.26.03

[16] *Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus*, ASTM G99-23, American Society for Testing and Materials, USA, Nov. 2023, doi: https://doi.org/10.1520/g0099-23

[17] *Additive manufacturing - Material extrusion-based additive manufacturing of plastic materials, Part 1: Feedstock materials*, ISO/ASTM 52903-1:2020, International Organization for Standardization / American Society for Testing and Materials, Suiza / USA, Apr. 2020, doi: https://doi.org/10.1520/f3241-20

[18] *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile, Part 1: Indication of surface texture*, ISO 21920-2:2021, International Organization for Standardization, Suiza, Dec. 2021, URL: https://www.iso.org/es/contents/data/standard/07/21/72196.html

[19] D. C. Ordoñez Ordoñez, "Validación del coeficiente de fricción dinámico mediante tres procedimientos para materiales de uso común en ingeniería," tesis de grado, ingeniería mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, 2015. Accedido: 27 de octubre de 2026. Disponible: https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/fe59b5d8-dad8-4384-b22d-760eb4b64391/content

[20] Microsoft, "Tutoriales de Visual Studio | C#," Microsoft. Disponible: https://learn.microsoft.com/es-es/visualstudio/get-started/csharp/?view=visualstudio (accesed Feb. 18, 2026)

[21] Microsoft, "Cómo: Crear un archivo - Visual Basic," Microsoft. Disponible: https://learn.microsoft.com/es-es/dotnet/visual-basic/developing-apps/programming/drives-directories-files/how-to-create-a-file (accesed May 22, 2026)

[22] Microsoft, "Lectura y escritura en un archivo de texto mediante Visual C# - C#," Microsoft. Disponible: https://learn.microsoft.com/es-es/troubleshoot/developer/visualstudio/csharp/language-compilers/read-write-text-file (accesed May 21, 2026)

CC BY-NC-SA 4.0

Científica, vol. 30, no. 2, pp. 01-14, July-December 2026,
ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional, México
e300212 | DOI: 10.46842/ipn.cien.v30n2a12