

## MEDICIONES DE CAMBIO DE INTENSIDAD EN LUZ LÁSER ESPARCIDA, APLICADA AL MONITOREO DE DESGASTE.

Iván Domínguez L., Jorge A. Huerta R., Ricardo I. Montes R.,  
Juan de D. Ortiz A., Jesús Pichardo C., Adrián L. García G.  
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro, I.P.N.  
José Siurob 10, Col. Alameda, C.P. 76040, Santiago de Querétaro, Qro., México.  
Tel. y Fax (442) 212-1111, [idinguezl@ipn.mx](mailto:idinguezl@ipn.mx)

Miguel Aguilar C., David Jaramillo V.  
Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, I.P.N.  
Cerrada CECATI s/n, Col. Santa Catarina, C.P. 02250, Azcapotzalco, México, D.F.  
Tel. (55) 5729-6000 Ext. 64346 y 64375, Fax. (55) 5561-7536

**Resumen:** El programa de tribología del CICATA-IPN, Unidad Querétaro, contempla el desarrollo de aplicaciones para la industria. Para ello, se construyó un tribómetro de perno en disco al que se ha adaptado la técnica de luz láser esparcida, mediante la cual se monitorean cambios en una superficie bajo un proceso de desgaste controlado. La luz láser esparcida por la huella de desgaste en el disco se registra con un detector de Si y la señal se procesa por medio de un amplificador sensible a la fase; simultáneamente se miden cambios en la velocidad angular de giro. Se presentan los primeros resultados obtenidos al aplicar esta metodología.

### 1. INTRODUCCIÓN

A mediados de la década de los 60 del siglo pasado se publicó un reporte acerca del uso de los recursos energéticos, materiales y financieros de la industria inglesa [1,2]. Como resultado de éste, se inició un programa multidisciplinario de estudio de los fenómenos que ocurren durante la interacción de superficies en movimiento relativo, tales como la fricción, la lubricación y el desgaste. La importancia económica de este programa, al que se denominó *tribología*, radica en las prácticas y aplicaciones que se derivan del estudio de los fenómenos *tribológicos*; por ejemplo, el desgaste es la causa principal de que los bienes materiales pierdan su utilidad [3].

La metodología usada para el estudio del desgaste adhesivo, utilizando el tribómetro de perno en disco (pin-on-disc), se basa en la norma ASTM G-99-05 [4], por medio de la cual se determina el desgaste causado por un perno cargado, apoyado sobre una probeta en forma de disco girando a una velocidad angular constante. Esta metodología se utiliza comúnmente para hacer estudios *comparativos* de desgaste en sistemas tribológicos. La cantidad de desgaste se determina midiendo las dimensiones

lineales apropiadas en el perno y en el disco, antes y después de la prueba.

Es importante mencionar que la norma ASTM G-99-05 hace una recomendación especial para no llevar a cabo mediciones de contacto durante el desarrollo de la prueba. Es decir, el resultado de la prueba se obtiene estrictamente *a posteriori*.

En contraste con la prueba ASTM G-99-05, limitada a estudios comparativos *a posteriori*, las mediciones realizadas en *tiempo real*, permitirían el estudio de las primeras etapas de desgaste en un sistema tribológico, antes de que exista transferencia o remoción de material, con el consecuente daño en las superficies; de ahí la importancia de desarrollar metodologías que permitan el estudio y la detección del desgaste *in situ*, en tiempo real.

Para el estudio de desgaste en tiempo real se han implementado técnicas de medición que utilizan el análisis de señales eléctricas [5], la espectroscopía Raman [6], o la detección de isótopos radiactivos [7].

Por otro lado, las técnicas ópticas no destructivas han encontrado aplicación en diversos procesos industriales, incluso existen estudios en los que la

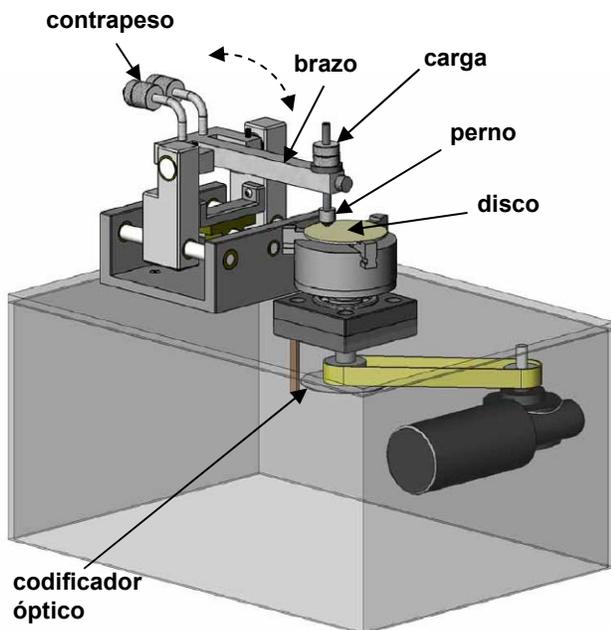
técnica de esparcimiento de luz láser ha sido usada como herramienta para medir la rugosidad de superficies [8, 9, 10].

Este trabajo reporta la aplicación del análisis de cambios en la intensidad de luz láser esparcida, técnica comúnmente conocida como LLS (*Laser Light Scattering*), al estudio de fenómenos de desgaste utilizando un tribómetro de perno en disco.

Hasta donde se conoce, esta es la primera vez que se aplica la combinación de estas técnicas para el estudio y monitoreo del desgaste. Se espera que la correlación temporal de la señal de LLS, con otras variables tribológicas, en conjunto con el análisis y medición establecidos en la norma ASTM G-99-05, hará posible entender mejor los mecanismos de desgaste.

## 2. TRIBÓMETRO DE PERNO EN DISCO

El tribómetro utilizado para el presente trabajo se fabricó en los talleres del CIITEC-IPN. La unidad de potencia del tribómetro es un motorreductor de corriente directa de 184 W. La velocidad de giro puede ajustarse en un intervalo que va desde 150 a 600  $\text{min}^{-1}$ .



**Fig. 1** Tribómetro de perno en disco (*pin-on-disc*).

En el extremo inferior del eje principal, se encuentra un codificador óptico por medio del cual se contabilizan las revoluciones del disco y se

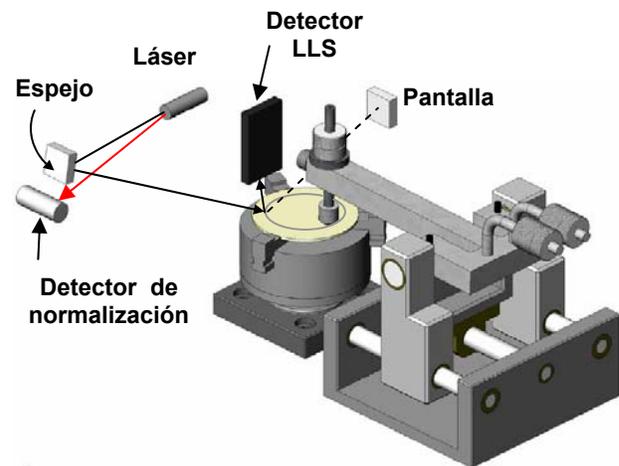
monitorean regiones específicas del espécimen; este codificador (encoder) también se usará para el control de velocidad angular (ver figura 1).

El sistema tribológico bajo estudio consta de dos especímenes: el perno, colocado en un extremo del brazo oscilatorio, y el disco.

## 3. TÉCNICA DE LUZ LÁSER ESPARCIDA

El arreglo experimental de la técnica LLS es relativamente sencillo y no requiere un proceso de alineación preciso. Puesto que la luz láser se esparce en todas direcciones después de incidir en la superficie bajo estudio, el detector puede ubicarse en el sitio más conveniente. Esta flexibilidad le confiere a la técnica de LLS la posibilidad de adaptarse a varios sistemas tribológicos de interés para la industria, donde la alineación de un sistema óptico podría ser una limitante [11].

En la figura 2 se muestra un esquema del sistema de medición. Se utilizó un láser semiconductor fabricado por LASERMATE que emite a una longitud de onda centrada en 643 nm, de intensidad modulable y con óptica integrada para focalizar en el punto de interés.



**Fig. 2** Esquema del arreglo óptico para la detección de la luz láser esparcida adaptada al tribómetro.

El haz del láser se hace pasar por un polarizador tipo Glan-Taylor para dividirlo en dos haces. La intensidad de uno de ellos se utiliza para normalizar la señal; el otro, se hace incidir en una montura con un espejo que permite guiarlo hasta el punto de interés en la probeta (disco). En este estudio no se consideran estados de polarización de la luz, ni para

el haz incidente, ni para la luz esparcida. Los análisis del efecto en el estado de polarización se tienen contemplados y se realizarán en estudios posteriores.

El ángulo de incidencia es de  $45 \pm 5$  grados, respecto a la normal al plano del disco. Para coleccionar la luz esparcida se utilizó un detector de Silicio de 35 mm de diámetro nominal, modelo UV-035, fabricado por UDT, con un amplificador operacional TL-071. El detector se ubicó a una distancia de  $20,0 \pm 0,5$  cm del punto de interés, con un ángulo de visión de 90 grados respecto al plano de giro. La señal se procesó mediante un amplificador sensible a la fase (Lock-in) modelo SR830 de Stanford Research Systems.

El sistema de adquisición de datos se programó en LabView™ para realizar las funciones de registro de la variables de intensidad de luz esparcida y de normalización, la velocidad angular del motor, así como el despliegue de gráficas y el almacenamiento de datos. La adquisición se realiza vía puertos serial y paralelo.

El programa desarrollado adquiere las mediciones de la intensidad LLS promedio normalizada a la intensidad incidente, la cual esta asociada a la rugosidad generada en la huella de desgaste. En este caso, la intensidad del láser se moduló a 50 kHz con el oscilador interno del amplificador, y la velocidad de giro se ajustó a  $155 \pm 2 \text{ min}^{-1}$ . El muestreo se realizó cada segundo.

## 4. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

### 4.1. Preparación de los especímenes

En los experimentos realizados se utilizaron discos de acero estirado en frío tipo 1018, con un diámetro de  $100,0 \pm 0,1$  mm, y  $7,0 \pm 0,1$  mm de espesor, fabricados con una rugosidad promedio  $R_a$  menor que  $1 \mu\text{m}$ . En el perno se usaron bolas comerciales de acero inoxidable galvanizado grado 1000, de 7,144 mm de diámetro nominal.

### 4.2. Condiciones experimentales

Se realizaron pruebas con condiciones de carga y duración diferente, los valores nominales utilizados durante las pruebas se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Variables del experimento.

Carga (g)	Intervalo (s)	$\omega$ ( $\text{min}^{-1}$ )
400	1500	152.7
800	1800	147.9

Se mantuvo fijo el diámetro de la huella de desgaste sobre el disco ( $83,5 \pm 0,05$  mm), y la velocidad angular del disco se ajustó a  $155 \pm 2 \text{ min}^{-1}$ , con variaciones menores al 1% sin carga.

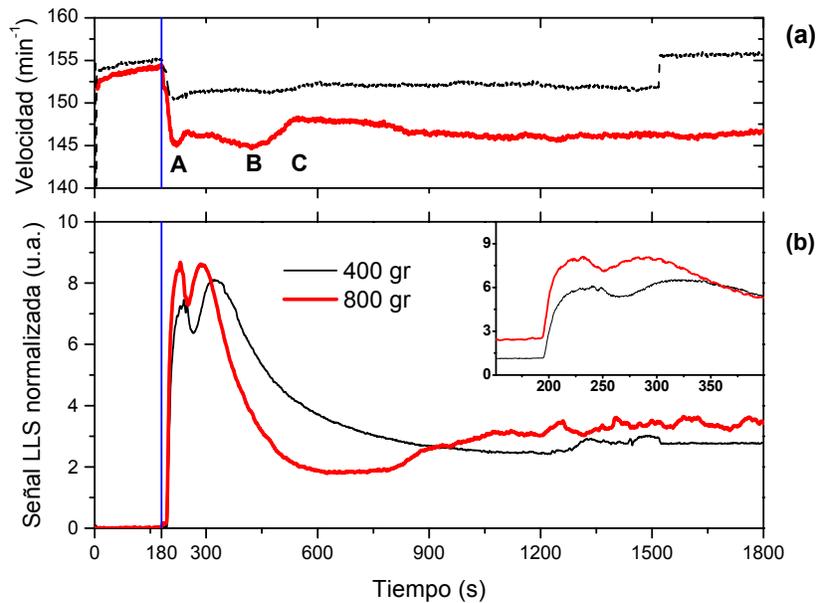
## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 3a muestra el cambio de velocidad angular del disco al ponerle en contacto con el perno. El monitoreo inicia con el arranque del motor. La línea vertical a  $t = 180$  s, muestra el momento en el que el perno entra en contacto con el disco. En la misma figura puede observarse que el cambio de velocidad es mayor para la carga de 800 g, lo que corresponde a una mayor fricción. Para la carga de 400 g, el perno fue retirado al tiempo igual a 1500 s, lo que aumenta la velocidad de giro como es de esperarse.

Después de una pronunciada caída, la velocidad alcanza un mínimo en **A** antes de aumentar nuevamente, para decaer en **B** y, posteriormente, alcanzar otro valor máximo en **C**, indicativo de una reducción en la fuerza de fricción. Finalmente, la velocidad  $\omega$  se estabiliza alrededor de  $145 \text{ min}^{-1}$ . Un comportamiento similar se observa para la carga de 400 g, aunque los efectos tribológicos, es decir, cambios de pendiente en la curva, parecen retrasados con respecto a la carga de 800 g, y menos pronunciados.

En la figura 3b se muestra la variación de la intensidad de la luz láser esparcida proveniente de la huella de desgaste en el disco. Para fines de comparación, el nivel de las líneas de base en las dos mediciones se ha hecho coincidir, aunque en el recuadro superior derecho de la misma gráfica se muestra una ampliación de los datos originales. Se observa un pronunciado cambio en la intensidad de la señal en el momento en que el perno se pone en contacto con el disco, causando un daño en la superficie del disco y por lo tanto un cambio en la rugosidad a lo largo de la huella de desgaste, que se registra como un cambio substancial en la señal de LLS. El intervalo de tiempo de interés se ubica en los primeros 400 segundos de inicio de la prueba.

La correlación de los picos observados en la señal de velocidad angular con los de la señal de LLS, es indicativa de la destrucción de las capas superficiales de óxido y galvanizado del sistema tribológico. El comportamiento complejo ulterior de la señal LLS, es más difícil de explicar y requiere de estudios más detallados del sistema tribológico en



**Fig. 3** (a) Velocidad angular del disco como función del tiempo, (b) señal LLS, normalizada a la intensidad del láser y ajustando el inicio a cero, para dos cargas distintas. Nótese el comportamiento similar para ambas cargas, tanto en la velocidad de giro como en la señal LLS, y el retraso de los efectos tribológicos para la carga de 400 g.

cuestión y de una instrumentación más completa, en la que ya se está trabajando.

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados que se presentan indican que la aplicación de la técnica LLS al estudio de fenómenos tribológicos es una herramienta útil en la investigación de un fenómeno tan complejo como es el desgaste; especialmente para estudiar la fase inicial del mismo, donde las técnicas de contacto están muy limitadas, como en el caso del tribómetro de perno en disco.

Animados por los resultados obtenidos, se planea perfeccionar y desarrollar la instrumentación que se ha implementado hasta ahora, para llevar a cabo experimentos conducentes a explorar con mayor detalle las regiones observadas en la señal de LLS durante las fases iniciales del proceso de desgaste.

Para correlacionar la aplicación de LLS que aquí se presenta, con la medición de desgaste, se está desarrollando una metodología que permita

muestrear localmente distintos parámetros tribológicos en varios puntos de la probeta, así como los marcados en la norma ASTM G-99-05.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los estudiantes María Guadalupe Sánchez Rodríguez y Armando López Villanueva de la carrera de electrónica y automatización de la UTEQ, por su participación en el desarrollo del prototipo de la electrónica del sistema de adquisición de datos. Este proyecto se llevó a cabo con el apoyo del IPN, a través de varios proyectos SIP.

## REFERENCIAS

- [1] H. P. Jost, Lubrication (Tribology) - Education and Research. A Report on the Present Position and Industry Needs, Department of Education and Science, HM Stationary Office, London, 1966.

- [2] E. Rabinowicz, Friction and Wear of Materials, 1995, pp. 1-13.
- [3] ASME Research Committee on Lubrication, Strategy for Energy Conservation through Tribology, The American Society of Mechanical Engineers, 1977.
- [4] ASTM G 99-05, "Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disc Apparatus", ASTM International. [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [5] J. Sun, R.J.K. Wood, I. Care and H.E.G. Powrie, Wear monitoring by acoustic emission(AE) and electrostatic (ES) technologies, IMECHE, 2003: <<http://www.imeche.org.uk/>>, Julio de 2005.
- [6] I. L. Singer, S. D. Dvorak, K.J. Wahl, T. W. Scharf, Role of third bodies in friction and wear of protective coatings, J. Vac. Sci. Technol. A 21, 2003, pp. S232-S240
- [7] C. M. Wall, D. C. Eberle, M. B. Treuhaft and J. H. Arps. Applications of Radioactive Tracer Technology in the Real-Time Measurement of Wear and Corrosion. Wear, 259, 2005, pp. 1462-1471.
- [8] J.M. Bennett, L. Muttsson. Introduction to surface roughness and scattering. Optical Society of America. Washington.1989.
- [9] U. Persson, In-process measurement of surface roughness using light scattering, Wear, 215, 1998, pp. 54-58.
- [10] J. Huerta-Ruelas, M. López-López, O. Zelaya-Angel, Observation of thermal desorption and MBE growth rate using laser light scattering, Thin Solid Films, 2000, pp. 239-242.
- [11] J. C. Stover, Optical Scattering Measurement and Analysis, 1995, pp. 246-252.