

Control del módulo de calentamiento e instrumentación de una máquina para ensayos de torsión en caliente

Gustavo Aquino Mendieta

Instituto Politécnico Nacional, ESIME UA, Av. de las Granjas 682, Col. Santa Catarina, C.P. 02250,
Deleg. Azcapotzalco, México D.F., Teléfono: 55-16-80-53-30
gustavo_aquino@hotmail.es

Miguel Magos Rivera

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo No.180 Col. Reynosa Tamaulipas,
C.P.02200, Deleg. Azcapotzalco, México D.F., Teléfono: 53-18-90-00
mrm@correo.azc.uam.mx

Juana Eloína Mancilla Tolama

Instituto Politécnico Nacional, ESIME UA, Av. de las Granjas 682, Col. Santa Catarina, C.P. 02250,
Deleg. Azcapotzalco, México D.F., Teléfono: 55-16-80-53-30
jmancilla@ipn.mx

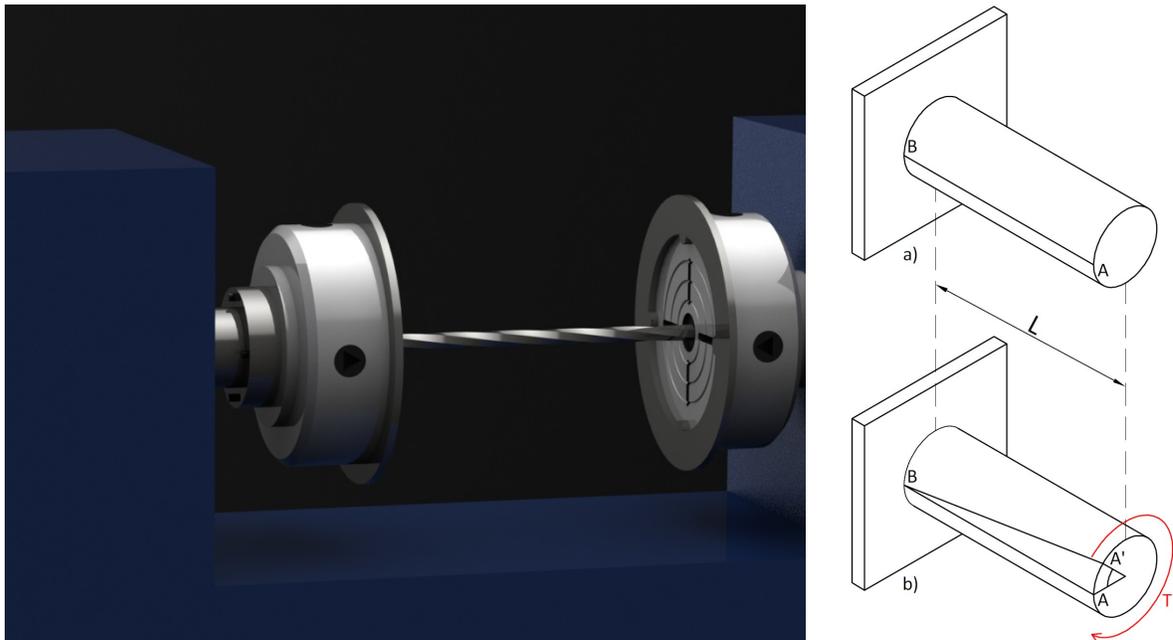
Resumen

El presente artículo aborda la instrumentación así como el control de temperatura de las probetas utilizadas en una máquina para ensayos de torsión en caliente. Se caracterizó el funcionamiento de la fuente potencia, así como el calentamiento de las probetas. Fueron desarrollados varios programas en LabVIEW[®], para efectuar el control y la adquisición de datos de los distintos módulos que componen la máquina. Debido a la no linealidad y al método de calentamiento utilizado, el control de la temperatura de la probeta es efectuado a través de un controlador con parámetros variables. Se encontró que con este controlador se obtuvieron mejores resultados que con uno con parámetros fijos.

Palabra(s) Clave(s): control de proceso, control PID, ensayo de torsión, instrumentación.

1. Introducción

En un ensayo de torsión se miden simultáneamente el ángulo de giro y el torque aplicado en el eje longitudinal de una probeta con geometría estandarizada. A partir de estos datos es posible encontrar la curva de esfuerzo contra deformación al cortante, lo anterior con el fin de obtener un modelo experimental del comportamiento plástico del material a altas velocidades y tasas de deformación. La figura 1 muestra una probeta de acero durante un ensayo de torsión, nótese que uno de los extremos de la probeta deberá estar fijo para lograr la deformación del elemento.



**Fig. 1. Ensayo de torsión. a) Probeta antes de la aplicación del par de torsión T.
b) Probeta deformada por el par de torsión.**

Una de las principales características del ensayo de torsión radica en el hecho de que un esfuerzo cortante y una deformación angular (ambos constantes), pueden ser impuestos por la torsión de uno de los extremos de la probeta a una velocidad angular constante [1].

1.1. Ensayo de torsión en caliente

Mientras que un ensayo de torsión a temperatura ambiente es adecuado para materiales con grandes módulos de elasticidad (muy dúctiles), como el aluminio, cobre, etc., es menos adecuado para materiales rígidos como el acero. Lo anterior se debe a que el par de torsión necesario para generar una velocidad y tasa de deformación lo suficientemente elevadas es muy grande, esto ocasiona el encarecimiento del equipo requerido para la realización del ensayo, por lo que es preferible la utilización del llamado *Ensayo de Torsión en Caliente*.

El ensayo de torsión en caliente ha sido uno de los métodos más populares para determinar la trabajabilidad de los metales y aleaciones en procesos de conformado durante las últimas décadas. Además es una de las mejores formas de simulación de los procesos de fabricación en caliente ya que en estos se requiere conocer las características mecánicas y estructurales de los metales a altas temperaturas [2].

La principal diferencia con respecto al ensayo de torsión en frío consiste en la temperatura a la cual se encuentra la probeta (entre 700 y 1400°C), a estos valores el acero es mucho más maleable, lo que permite generar una deformación con un par de torsión menor al requerido a temperatura ambiente, así como generar altas velocidades y mayores tasas de deformación. En la bibliografía ha sido reportado como los ensayos de torsión en caliente han sido utilizados con múltiples propósitos [3-7].

En este artículo se aborda el control y caracterización del subsistema de calentamiento, así como la instrumentación de los bloques que integran una máquina para ensayos de torsión en caliente. La sección dos describe el procedimiento necesario para la realización de un ensayo así como las partes principales de la máquina. En el apartado tres se aborda la caracterización de la fuente de inducción y el control de la etapa de calentamiento de la máquina. Finalmente las secciones cuatro y cinco presentan los resultados y conclusiones del trabajo realizado.

2. Descripción de la máquina de torsión en caliente

Con el fin de comprender adecuadamente el funcionamiento de la máquina de torsión, en esta sección se describirán los componentes que la conforman, así como el procedimiento que se lleva a cabo para efectuar el ensayo. La figura 2 muestra una imagen de la máquina de torsión en caliente, sobre la cual se realizaron los trabajos que se describen en este documento.

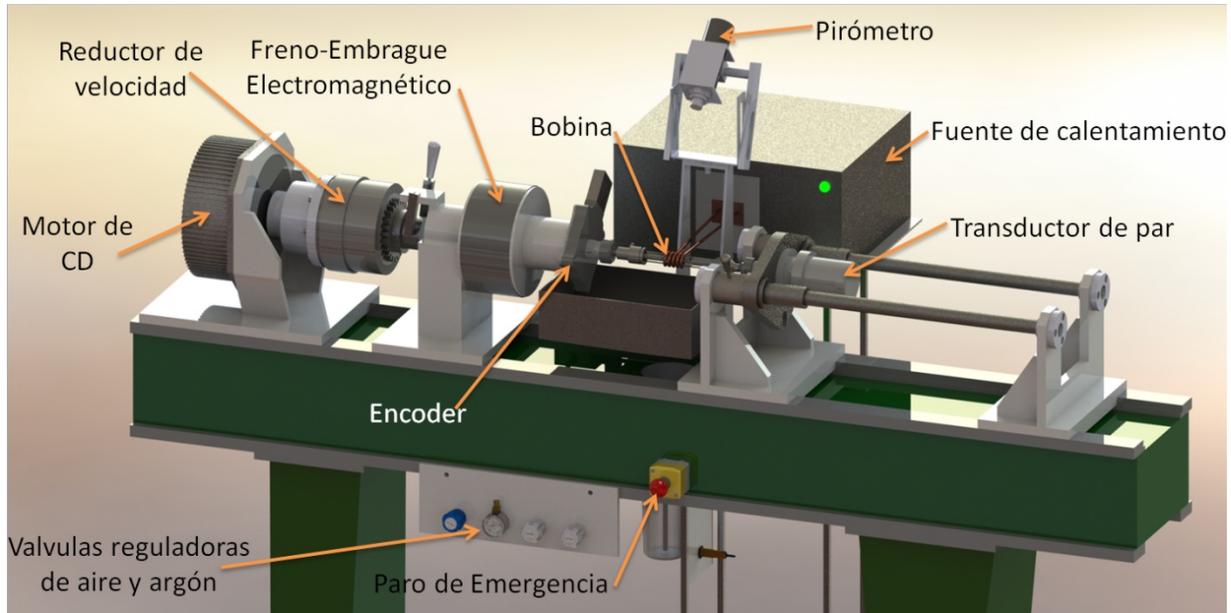


Fig. 2. Máquina para ensayos de torsión en caliente.

Para efectuar el ensayo de torsión en caliente es necesario elevar la temperatura superficial de la probeta que se desea evaluar hasta alcanzar 1250°C y mantenerla en ese valor durante 10 minutos, lo anterior con el fin de homogeneizar la temperatura en toda la sección transversal. Para lograr esto se emplea una fuente de calentamiento por inducción. A la par se debe controlar la velocidad angular del motor que generará el par de torsión. Una vez que ambas variables cumplen las condiciones requeridas por el ensayo, el par de torsión es aplicado a la probeta a través del accionamiento de un embrague electromagnético, lo cual generará una deformación angular en el material, misma que es medida utilizando un encoder acoplado a la flecha que conecta la probeta con el embrague. Mientras el material está siendo deformado, se mide el torque

experimentado por la probeta a través de un transductor de par de torsión. Tanto los datos de deformación instantánea como de torque son registrados para su posterior análisis. Cuando la deformación alcanza el valor establecido por el usuario, el embrague es desacoplado e inmediatamente se acciona un freno electromagnético para detener la deformación del material.

Con el fin de evitar la oxidación de la probeta debido a las altas temperaturas alcanzadas durante el ensayo, es necesario mantener a ésta inmersa en una atmosfera inerte, lo anterior se consigue colocando la probeta en el interior de un tubo de cuarzo por el cual se hace fluir gas argón. En algunos ensayos se debe templar la probeta una vez finalizada la prueba, lo anterior para mantener a temperatura ambiente la microestructura obtenida a alta temperatura, para ello, una vez concluida la prueba, se reemplaza el gas argón por agua a presión en el tubo de cuarzo. En la figura 3, se muestra el diagrama de flujo de las operaciones que se llevan a cabo durante un ensayo de torsión en caliente. Este es únicamente para fines demostrativos, por lo cual difiere de la programación real.

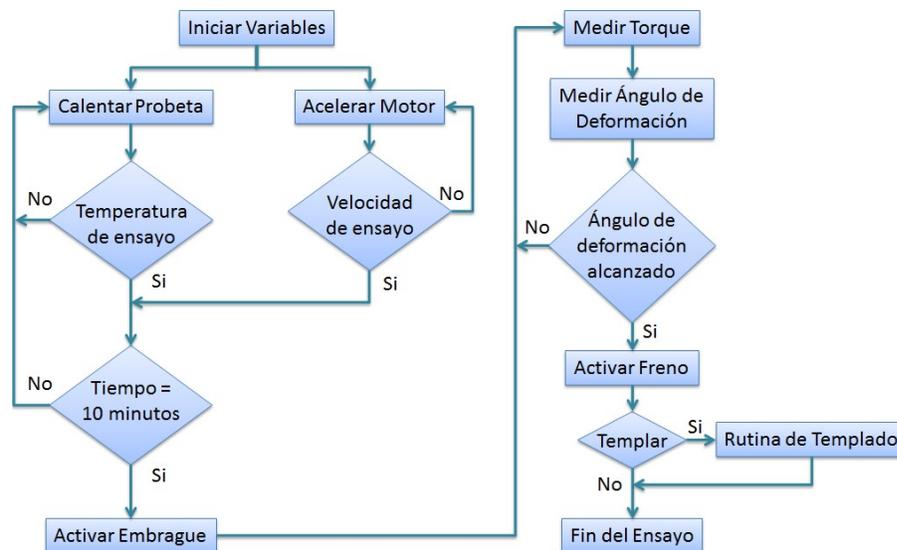


Fig. 3. Diagrama de flujo del ensayo de torsión en caliente.

Como puede observarse, es de suma importancia tener control de la secuencia de operaciones durante el ensayo para asegurar la validez de los resultados. Otro aspecto

a subrayar, es la importancia del control, tanto de la temperatura a la cual se encuentra la probeta, como de la velocidad angular del motor que genera la deformación. En este artículo se aborda el control de la temperatura, así como la instrumentación necesaria para la futura automatización de la secuencia de operaciones y monitoreo de las variables del proceso. El control de velocidad angular del motor ha sido reportado anteriormente [8, 9]. Para facilitar la comprensión del sistema, éste puede ser separado en 5 bloques, mismos que se muestran en la figura 4 y que se explican en las siguientes secciones.

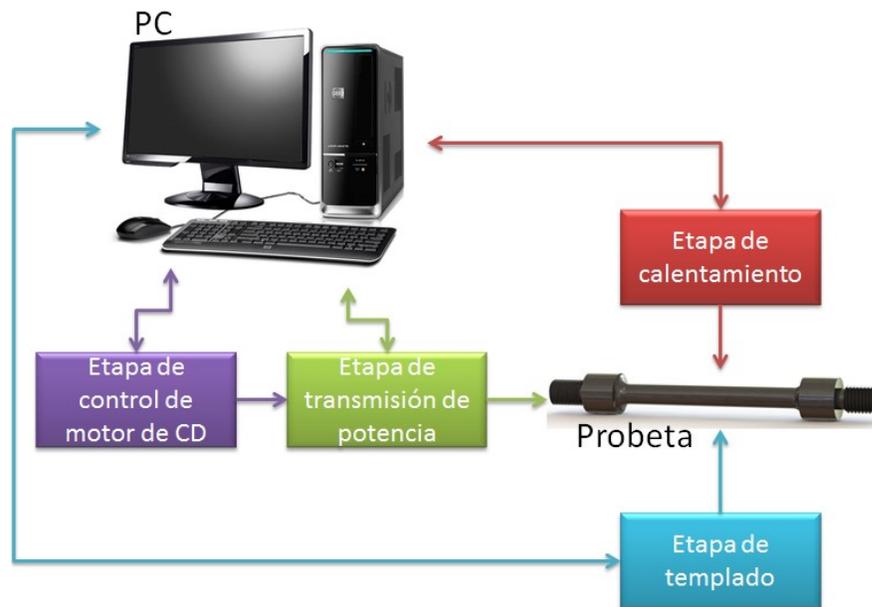


Fig. 4. Diagrama bloques de los sistemas principales de la máquina.

2.1 Etapa de calentamiento

Se encarga de calentar la probeta hasta la temperatura de ensayo requerida así como de controlar su enfriamiento, se encuentra compuesta por una fuente de calentamiento por inducción RDO modelo HFI-5 [10] y una bobina de inducción. La medición de la temperatura en la probeta se realiza por medio de un pirómetro óptico marca Raytek modelo RAYMR1SACF [11], el cual tiene un rango efectivo de operación de 600 a 1400°C y cuenta con una salida de 4-20mA. La señal de control de la fuente de calentamiento es proporcionada por una computadora la cual a su vez recibe la

información del pirómetro, la descripción del programa de cómputo encargado de la caracterización y control de temperatura, así como los elementos de adquisición de datos para la computadora se explican más adelante. La figura 5. muestra el diagrama de bloques de la etapa de calentamiento.

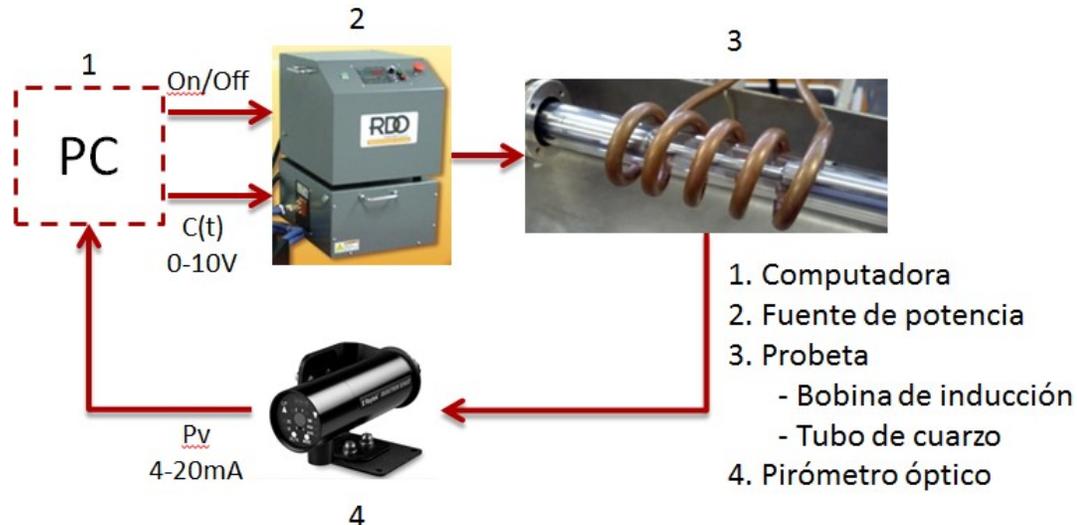


Fig. 5. Diagrama de bloques de la etapa de calentamiento de la máquina de ensayos de torsión en caliente.

2.2. Etapa de control motor cd

Se encarga de generar el par de torsión necesario para deformar la probeta a una velocidad determinada. Está formada por un motor de imanes permanentes Mavilor MO-3001 y un variador de velocidad Baldor tipo SCR serie 19H [13], el cual se encarga de controlar la velocidad angular del motor. El controlador cuenta con un módulo de control PID el cual debe ser sintonizado de acuerdo al motor que se utiliza, este equipo posee una entrada analógica (0-10V) por medio de la cual se le indica el valor al cual debe mantener la velocidad angular del motor en un rango de 0 a 3000 RPM. La señal analógica es enviada desde la computadora. Como elemento final, la etapa cuenta con un sensor de velocidad angular, se trata de un encoder Omron E6B2-C [14]. Para bajas velocidades la máquina posee un reductor de velocidad de 10/1, el cual es acoplado

manualmente por medio de una palanca. La figura 6. Muestra el diagrama de bloques de la etapa de generación de par de torsión y velocidad de deformación.

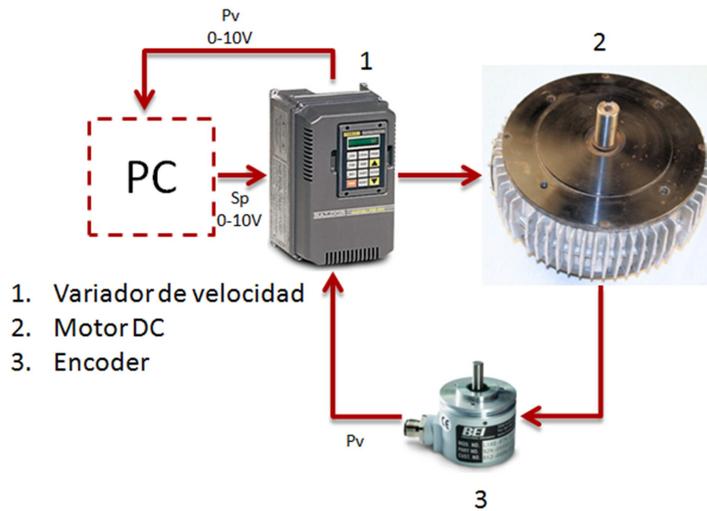


Fig. 6. Diagrama de bloques de la etapa de generación de par de torsión y velocidad de deformación.

2.3. Etapa de transmisión de potencia

Este bloque se encarga de transmitir la potencia del motor a la probeta, así como de medir el par de torsión necesario para generar la deformación de ésta. Se compone de un sistema freno-embrague electromagnético, cuando este se activa en modo “embrague” es transmitido de forma instantánea el par de torsión generado por el motor a la probeta. Así mismo, cuando se activa en forma de “freno”, desacopla el motor y frena la probeta instantáneamente para detener la deformación angular de ésta. La alimentación del freno-embrague es de 24VCD, 3A, por lo cual es necesario una interfaz de potencia para poder activarlo desde la computadora. Esta interfaz cuenta con entradas optoacopladas, para proteger los elementos de salida de la computadora y está fabricada con transistores, lo anterior permite tener un tiempo de respuesta menor que el se tendría con elementos electromecánicos como relevadores. Un encoder marca NorthStar modelo SLIM Tach[®] ST67 [15], es utilizado para medir la deformación angular de la probeta. Los pulsos generados por este elemento son

enviados a la computadora, la cual determina el momento en el que se deberá accionar el freno electromagnético. Durante la aplicación del par de torsión un transductor FUTEK MBA500 [16], mide el par experimentado por la probeta. En el momento en el que se escribe este artículo aún se trabaja en la adquisición de datos del sensor de par de torsión. Tanto los datos de deformación instantánea como de par de torsión son almacenados por la computadora para su posterior análisis. La figura 7. muestra el diagrama de bloques de la etapa de deformación angular y medición de par de torsión.

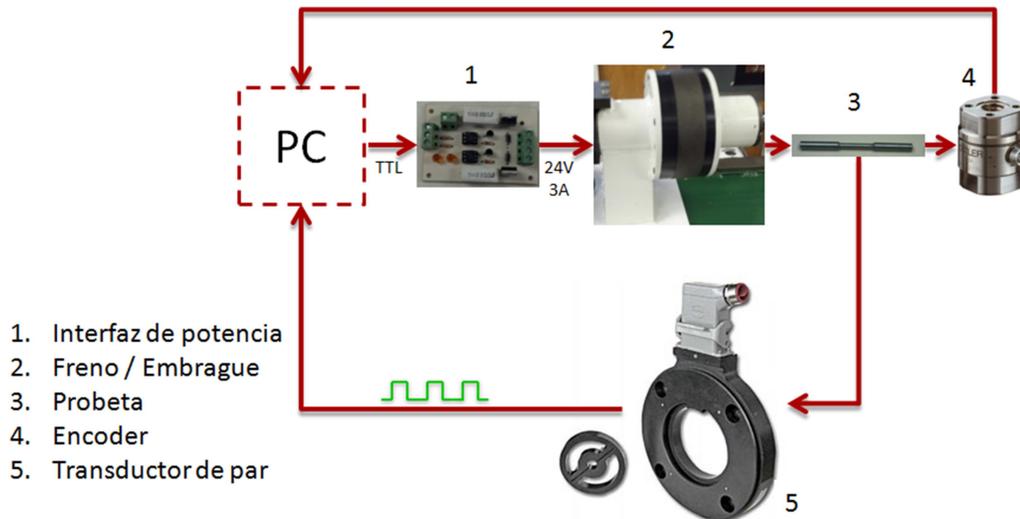


Fig. 7. Diagrama de bloques de la etapa de deformación angular y medición de par de torsión.

2.4. Etapa de templado

Como se mencionó en párrafos anteriores, en ciertas ocasiones dependiendo del objetivo del ensayo, se deberá templar la probeta haciendo pasar agua a presión por el tubo de cuarzo que la protege. Lo anterior se realiza por medio de tres electroválvulas controladas por un PLC Unitronics Vision 130 [17,18]. La primera de estas electroválvulas es de 1/1 vías y controla el paso de agua a un depósito hidroneumático. El nivel de agua en el depósito es detectado por dos sensores capacitivos IFM KI5060 [19] ubicados en la parte superior e inferior respectivamente. Cuando el sensor detecta que el depósito está lleno, el PLC cierra la válvula de agua y abre una válvula de 1/1

vías para permitir el paso de aire al depósito para presurizarlo. Finalmente una válvula de 2/1 vías permite conmutar el flujo al tubo de cuarzo, entre gas argón y agua presurizada. La figura 8. muestra un esquema general del sistema de templado.

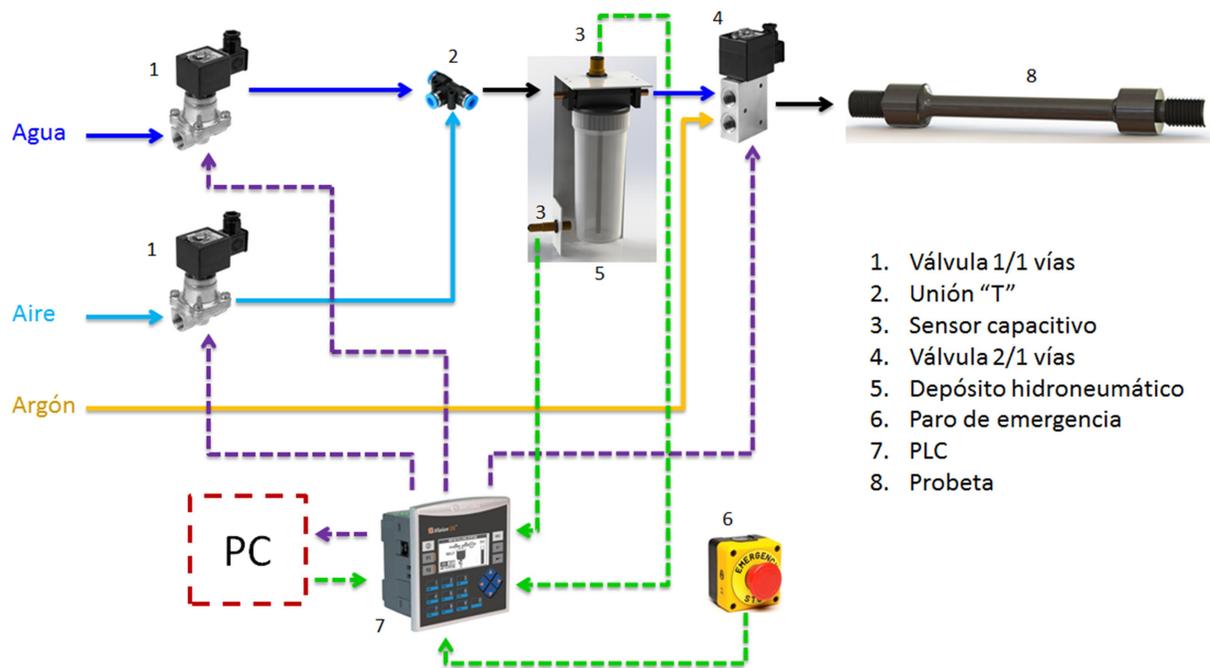


Fig. 8. Diagrama general del sistema de templado.

2.5. Sistema de cómputo

Por medio de un programa de cómputo desarrollado en LabVIEW® R11 se llevan a cabo las funciones de control y adquisición de datos de la máquina para ensayos de torsión en caliente. Como interfaz entre los elementos físicos (variador de velocidad, fuente de calentamiento, etc.) y la computadora se empleó una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) NI-PCI6024E [12]. El programa desarrollado se encarga de ajustar los valores de temperatura y velocidad angular requeridos por el usuario, a través de dos salidas analógicas de la DAQ. La activación de la fuente de calentamiento y el variador de velocidad se realiza mediante entradas de contacto seco, las cuales son controladas con dos salidas digitales de la DAQ. A su vez, tanto el control de temperatura como el variador de velocidad, envían el valor de la variable de proceso a la computadora a través de dos entradas analógicas de voltaje. El programa también se encarga de

controlar la deformación de la probeta, por medio de la etapa descrita en el punto 2.3. Así mismo, cuando es requerido por el usuario, el programa envía la señal de templar al PLC. Finalmente la aplicación revisa continuamente el estado del botón de paro de emergencia conectado a una entrada digital, en caso de que éste sea presionado, tanto el PLC como la computadora ejecutan una rutina de emergencia. La figura 9. muestra un diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos y control por computadora.

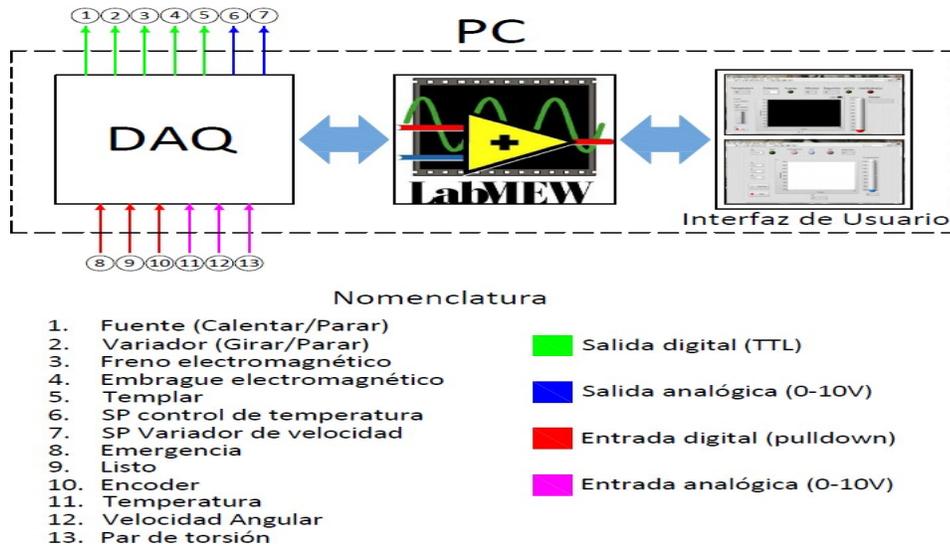


Fig.9. Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos y control por computadora.

Una vez que se ha descrito el funcionamiento de la máquina de torsión y los bloques que lo componen, se detallará la manera en que fue realizada la caracterización y el control de la etapa de calentamiento.

3. Control de la etapa de calentamiento

Para implementar un controlador que se adecue a las necesidades del proceso, se deben conocer las particularidades del sistema. Por tal motivo se caracterizó, tanto la salida de potencia de la fuente, como el calentamiento de la probeta.

3.1. Caracterización de la fuente de potencia

La fuente de calentamiento por inducción cuenta con una entrada analógica de 0 a 10V con la que se puede ajustar la potencia que es suministrada a la bobina. Esta señal analógica es controlada desde la computadora a través de la DAQ. La potencia suministrada por la fuente es medida a través de un indicador numérico integrado en el propio equipo. Para conocer la potencia que suministra la fuente en su salida, se aplicaron desde la computadora distintos voltajes a la entrada de control del equipo. La figura 10 muestra la gráfica con los datos obtenidos.

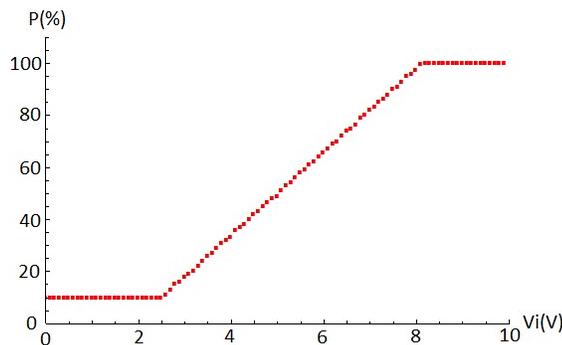


Fig. 10. Gráfica de potencia de salida contra voltaje de entrada para la fuente de calentamiento por inducción.

De acuerdo al manual de la fuente [10], la relación entre voltaje aplicado y potencia suministrada debería ser lineal en todo el intervalo 0-10V. Sin embargo se encontró que por debajo de 2.5 V, la potencia suministrada se mantiene constante en 10%. Igual comportamiento se observó en la región alta del rango de operación, a partir de 8 V la salida proporciona el 100%. Utilizando el método de mínimos cuadrados para ajustar la parte lineal de la gráfica se obtuvo la ecuación (1). Este resultado se consideró al momento de implementar los algoritmos de control del bloque.

$$P = \frac{V - 1.897}{0.0625} \quad (1)$$

Donde P representa el porcentaje de potencia suministrado por la fuente de inducción y V el voltaje de entrada de ésta.

3.2. Caracterización del calentamiento de la probeta

Se realizaron varias pruebas para conocer la respuesta dinámica del sistema de calentamiento. Estas consistieron en aplicar entradas de tipo escalón de diferentes magnitudes a la fuente de calentamiento y medir la temperatura alcanzada por la probeta. Mediante estas pruebas se determinó que la potencia mínima que permite generar una temperatura medible por el pirómetro es de 17%. Se encontró además que la respuesta del sistema no corresponde a la esperada para un sistema lineal. Pues no cumple con la propiedad de escalamiento tal y como puede observarse en la figura 12.

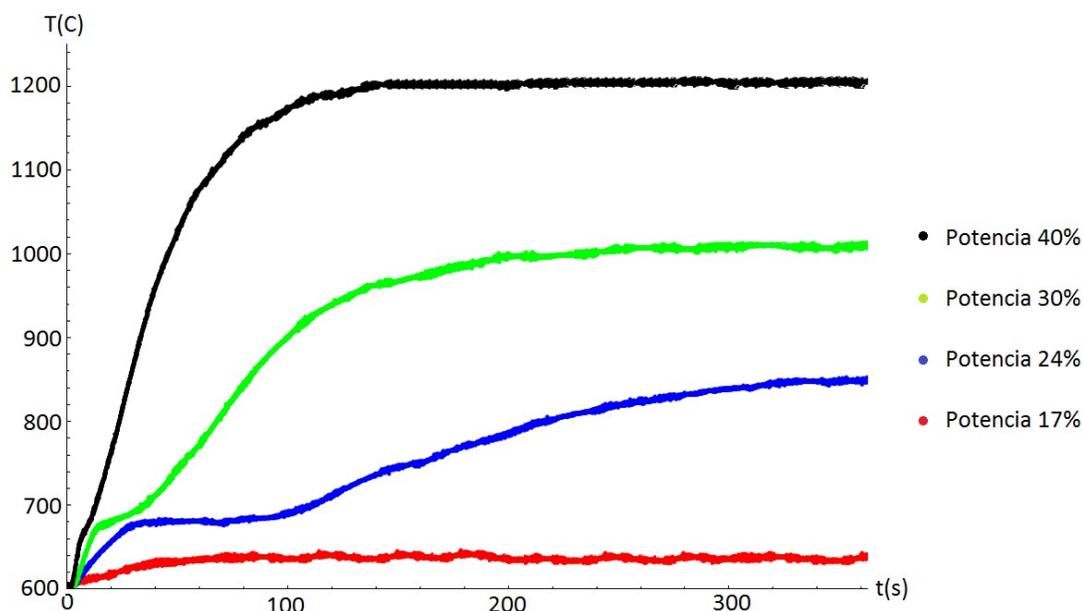


Fig. 12. Respuesta del sistema a un escalón de 19, 22 y 26 % de potencia.

Se encontró que el sistema presenta tres comportamientos muy particulares en todo el intervalo de temperatura requerido para el ensayo, la tabla 1 muestra dichos intervalos.

	Intervalo	Sección
A	$600 < T \leq 800^{\circ}\text{C}$	Baja temperatura
B	$800 < T \leq 1000^{\circ}\text{C}$	Media temperatura
C	$1000 < T \leq 1250^{\circ}\text{C}$	Alta Temperatura

Tabla 1. Intervalos de temperatura.

3.3. Control de temperatura de la probeta para ensayos de torsión

Como se mostró en la sección anterior el sistema no posee un comportamiento único, por lo cual se diseñó un controlador con tres juegos de parámetros distintos. El programa elige automáticamente entre los parámetros dependiendo de la temperatura a la cual se encuentre la probeta. El control de temperatura se realizó utilizando un algoritmo PI programado en LabVIEW®. Debido a las características del pirómetro que se utiliza no es posible medir la temperatura de la probeta por debajo de 600°C; por lo que fue necesario implementar una etapa de precalentamiento en lazo abierto la cual opera hasta que la probeta alcanza la temperatura mínima detectable por el sensor, momento en el cual se activa el controlador PI. Lo anterior evita que la salida del controlador aumente demasiado debido a la acción integral de éste. La sintonización del se efectuó utilizando la metodología de Ziegler-Nichols para cada uno de los intervalos descritos en el punto anterior. La tabla 2 muestra los parámetros obtenidos para el controlador en cada intervalo, los resultados obtenidos se describen en la siguiente sección del documento.

	Intervalo	Kp	Ti
Controlador A	$600 < T \leq 800^{\circ}\text{C}$	2.1	12
Controlador B	$800 < T \leq 1000^{\circ}\text{C}$	1.25	15
Controlador C	$1000 < T \leq 1250^{\circ}\text{C}$	1.8	11

Tabla 2. Parámetros del controlador PI.

4. Resultados y discusión

Se realizaron pruebas con perfiles de enfriamiento en escalones simulando los pasos que se efectuarían durante un ensayo real, a excepción del tiempo de estabilización de la temperatura en el punto más alto (1200°C), para ahorrar tiempo y gas de arrastre, la figura 13 muestra la probeta durante las pruebas del controlador.

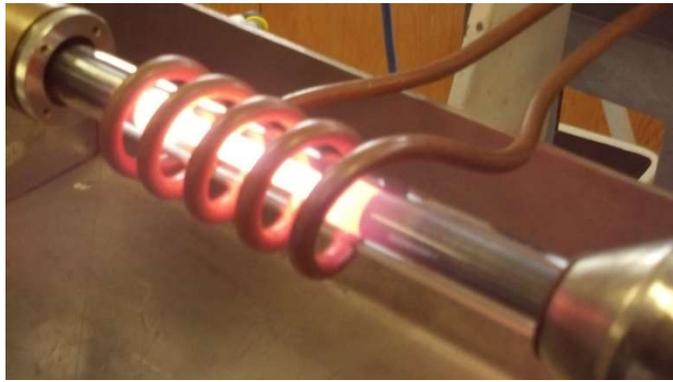


Fig. 13. Probeta para ensayo de torsión a elevada temperatura.

La figura 14 muestra el perfil de temperatura con escalones de bajada de 100°C y períodos estables de 2 minutos utilizando un control PI con los tres juegos de parámetros mostrados en la tabla 2.

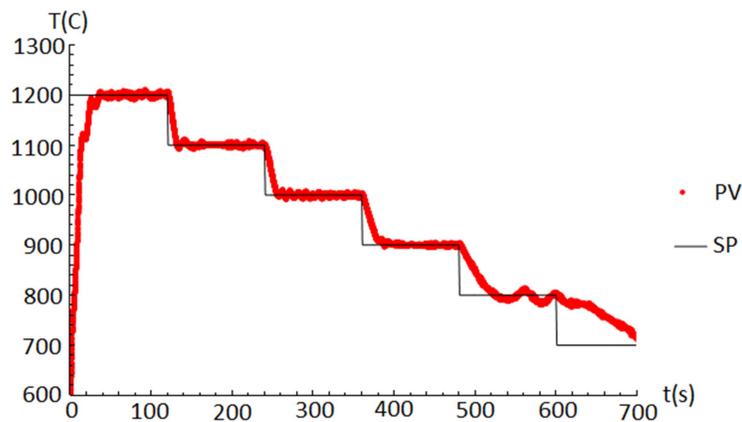


Fig. 14. Perfil de enfriamiento utilizando los tres juegos de parámetros.

Como comparación, en las figuras 15 a 17, se muestra el comportamiento del controlador utilizando un sólo juego de parámetros. Puede observarse que el controlador "A", es poco efectivo en la sección de temperatura más elevada funcionando mejor en la sección de media y baja temperatura.

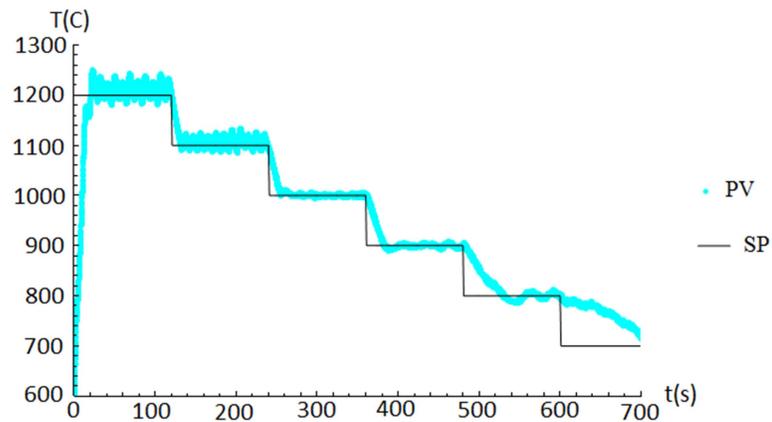


Fig. 15. Perfil de enfriamiento utilizando en controlador "A".

El controlador "B" presenta una mayor efectividad en el intervalo de media temperatura y menor en los intervalos de alta y baja temperatura, tal como lo muestra la figura 16.

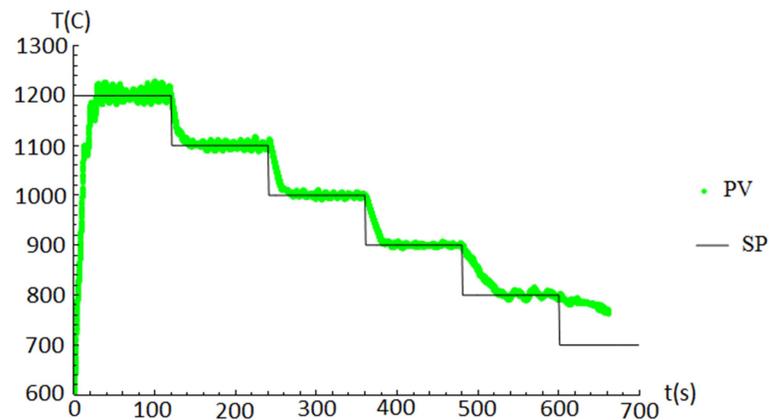


Fig. 16. Perfil de enfriamiento utilizando en controlador "B".

Por último en la figura 17 se observa que el controlador "C" es más efectivo en la región de alta temperatura y menos en las regiones de media y baja temperatura.

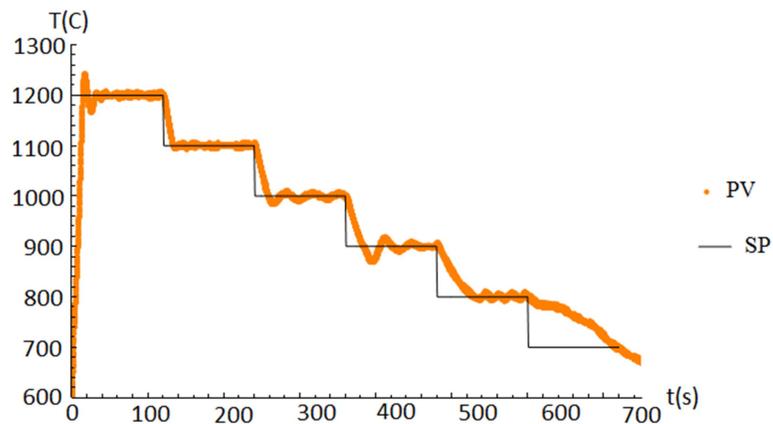


Fig. 17. Perfil de enfriamiento utilizando en controlador “C”.

Como puede observarse en las figuras 14 a 17, la temperatura no es capaz de alcanzar el valor de la consigna entre 800 y 700°C para el intervalo de tiempo establecido en la prueba. Esto puede deberse al comportamiento irregular de la temperatura en dicho intervalo, tal como puede observarse en la Fig.11. El motivo de este comportamiento puede ser causado por los cambios en la estructura interna del material así como a un funcionamiento inestable de la fuente de calentamiento en ciertos intervalos de operación, el análisis de tales fenómenos escapa del alcance de este artículo.

5. Conclusiones

Se describieron las partes principales que conforman en conjunto la máquina para ensayos de torsión en caliente. Así como su funcionamiento y características técnicas principales. La caracterización de la fuente de calentamiento, mostró que el proceso no corresponde a un sistema lineal. Este comportamiento puede ser debido a los fenómenos físicos inherentes al material que se desea ensayar y al método de calentamiento empleado.

Toda vez que se identificaron tres rangos de comportamiento bien definidos de la fuente de calentamiento, se decidió utilizar un controlador PI, con tres juegos de parámetros distintos, haciendo que el programa de control en LabVIEW® conmute automáticamente

entre ellos, dependiendo del valor de la variable de proceso, lo anterior permitió reducir el error a menos del 5% en régimen estacionario.

Como trabajo futuro se contempla la caracterización del sensor de par de torsión. Además de la automatización de la secuencia completa de operación de la máquina a partir de la integración de cada uno de sus boques.

6. Reconocimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo económico del CONACYT a través del programa de becas para estudios de posgrado inscritos al PNPC #591875 y al Instituto Politécnico Nacional a través del proyecto 25151609 “Caracterización por TEMP-PEELS y AFM de los precipitados inducidos por deformación de dos aceros de ultra-bajo Carbono al Niobio”.

7. Referencias

- [1] J. Bressan, R. Unfer, “Construction and validation tests of a torsion test machine”. *Journal of Materials Processing Technology*.
- [2] A. Oudin, P. D. Hodgson, “EBSD analysis of a Ti-IF steel subjected to hot torsion in the ferritic region”. *Materials Science and Engineering*. Vol. 486. Julio de 2008. 72-79 pp.
- [3] J. Pereira, L. Durán, “Comportamiento mecánico a torsión de la aleación de aluminio AA6061 tratada térmicamente”. *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. No. S1. 2009. 183-190 pp.
- [4] R. Pernis, J. Bidulská, “Applications of the torsion test in calculating the extrusion force”. *Archives of metallurgy and materials*. Vol. 56. 2011. 22-27 pp.
- [5] M. R. Barnett, F. Montheillet, “The generation of new high-angle boundaries in aluminium during hot torsion”. *Acta Materialia*. Vol. 50. No. 9. Mayo de 2002. 2285-2296 pp.

- [6] A. Karch, D. Sornin, "Microstructural characterizations of 14Cr ODS ferritic steels subjected to hot torsion". *Journal of Nuclear Materials*. No. 459. Abril de 2015. 53-61 pp.
- [7] M. Zhou, M. P. Clode, "Thermal analysis of the torsion test under hot-working conditions". *Computational Materials Science*. Vol. 9. No. 3-4. Enero de 1998. 411-419 pp.
- [8] C. J. Pérez Morales, "Monitoreo y adquisición de datos de un motor de corriente directa de imanes permanentes". Tesis de especialidad. SEPI ESIME UA. Junio de 2011.
- [9] R. García Segundo, "Automatización del subsistema de velocidad de una máquina de torsión en caliente". Tesis de maestría. SEPI ESIME UA. Agosto de 2014.
- [10] Flex Heat-Series, Universal Induction Heating System, Flex Heat 5-8 kW. RDO Induction L.L.C. USA. 2010.
- [11] MR1S High Performance infrared Ratio Thermometers. RAYTEK. USA. 2013
- [12] DAQ 6023E/6024E/6025E User Manual. National Instruments. USA. 2000.
- [13] SERIES 19H Digital DC SCR Control. BALDOR Motors and Drives. USA. 2007.
- [14] Rotary Encoder E6B2-C. OMRON. Japón. 2010.
- [15] Encoder Manual SLIM Tach ST67. NorthStar brand. USA. 2013.
- [16] Torque and Thrust Biaxial Sensor MBA500. FUTEK. USA. 2013.
- [17] Vision OPLC V130-33-R64 Technical Specifications and Installation Guide. Unitronics. USA. 2010.
- [18] VisiLogic Software Manual. Unitronics. USA.2010.
- [19] Sensor Capacitivo KI5060. IFM. Alemania. 2006.

8. Autores

Ing. Gustavo Aquino Mendieta. Es Ingeniero en Mecánica por la Universidad Autónoma Metropolitana, actualmente se encuentra realizando la Maestría en Ingeniería de Manufactura en la SEPI ESIME Unidad Azcapotzalco del IPN.

Dr. Miguel Magos Rivera. Es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana, Maestro y Doctor en Control Automático por la Universidad Claude Bernard de Lyon (Francia). Actualmente es profesor investigador en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

Dra. Juana Eloína Mancilla Tolama. Es Licenciada en Física por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Maestra en Ingeniería Metalúrgica por la ESIQIE-IPN y Doctora en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. Actualmente es profesora titular "C" en la ESIME Unidad Azcapotzalco del IPN.