



Informe Técnico

Sistema electrónico para un perfilómetro

**Benjamín Valera Orozco
Gerardo Antonio Ruiz Botello**

Octubre 2019

Proyecto Interno

Financiamiento interno

Sistema electrónico para un perfilómetro

Benjamín Valera Orozco y Gerardo Antonio Ruiz Botello

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología
Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Ciudad
Universitaria AP 70-186, C.P. 04510, México D.F. México

Resumen

La rugosidad mecánica es un parámetro que indica el nivel de acabado de un tipo de maquinado. Generalmente es utilizado como parámetro de control de calidad en la elaboración de piezas mecánicas. Existen diversos instrumentos y técnicas que se pueden utilizar para determinar este parámetro. En particular, en los laboratorios de metrología dimensional se utilizan instrumentos conocidos con el nombre de “perfilómetro” para determinar diversos parámetros de rugosidad. En el presente trabajo se describe el diseño e implementación de un sistema electrónico y de programación para el perfilómetro comercial Federal 4000, el cual remplace a la consola original con la cual se comercializaba el equipo y que ha sido sustituida debido a su deterioro normal ocasionado por el paso del tiempo. El sistema electrónico desarrollado permite la adquisición del desplazamiento generado por el transductor micrométrico del perfilómetro original. Este mismo sistema impulsa el motor de desplazamiento horizontal en el dispositivo de rastreo del equipo original. El sistema es complementado con un programa para PC expofeso en donde se implementan los algoritmos de control, medición e interface de operación. Se describen el diseño y construcción del circuito electrónico desarrollado y la programación de los algoritmos de medición y control. Se presentan los resultados obtenidos en la medición de patrones de rugosidad propios del perfilómetro. Los anexos contienen los diagramas electrónicos y código fuente que permiten la reproducción del desarrollo aquí descrito.

Indice

Introducción	5
Definición del problema	5
Entorno actual	5
Descripción del problema a resolver y motivación	5
Relevancia y limitaciones	6
Relación con otras áreas	6
Método	6
Objetivos y resultados esperados	7
Organización del informe	7
1 Sistema electrónico para el perfilómetro	9
1.1 Descripción general	9
1.2 Sistema electrónico	10
1.3 Interface de operación, medición y control	11
1.4 Descripción de la programación	14
1.4.1 Clases insertadas automáticamente en el ambiente de programación	14
1.4.2 Clase para la interface de operación, medición y control	15
1.5 Procedimiento de instalación	17
1.5.1 Instalación del control NTGraph	17
1.5.2 Instalación del software de la NI USB-6211	18
1.6 Procedimiento de operación	18
2 Resultados y discusión	21
2.1 Resultados	21
2.1.1 Prototipo desarrollado	21
2.1.2 Software de operación	21
2.1.3 Medición de patrones de rugosidad	22
2.2 Discusión y trabajo a futuro	24
2.3 Especificaciones del equipo desarrollado	24
2.4 Guía para la detección de fallas	25
Conclusiones	26
Referencias	27
Anexo A Diagrama esquemático	28
Anexo B Circuito impreso	29
Anexo C Lista de partes	31

Anexo D Código fuente	33
Anexo E Trabajo en congreso	42

Indice de figuras

Figura 1. Perfilómetro Federal 4000.	5
Figura 2. Método a emplear.	7
Figura 3. Esquema general del sistema electrónico desarrollado y su interface de operación.	9
Figura 4. Sistema electrónico.	10
Figura 5. Interface de operación.	11
Figura 6. Algoritmo de medición y control.	12
Figura 7. Curva de calibración.	13
Figura 8. Clases y solución del proyecto PerfillCAT.	14
Figura 9. ClaseCPerfillCATDlg.	15
Figura 10. Montaje sobre mesa de planitud.	19
Figura 11. Conexiones del sistema electrónico.	19
Figura 12. Ajustes en el mecanismo de desplazamiento horizontal.	20
Figura 13. Perfilómetro desarrollado.	21
Figura 14. Pantalla de operación.	22
Figura 15. Diente de sierra, pantalla de operación.	22
Figura 16. Diente de sierra, hoja de cálculo.	23
Figura 17. Pulso, pantalla de operación.	23
Figura 18. Pulso, hoja de cálculo.	24
Figura 19. Dibujo esquemático.	28
Figura 20. Circuito impreso, soldadura.	29
Figura 21. Circuito impreso, componentes.	29
Figura 22. Circuito impreso, mascarilla.	30

Introducción

Definición del problema

La rugosidad es un parámetro que debe ser inspeccionado en la industria metal mecánica para asegurar el acabado de piezas manufacturadas. Un ejemplo de ello es el acabado superficial en los pistones de motores a combustión. Está comprobado que cuando estas superficies tienen acabados más finos se utiliza mejor la potencia disponible en la transmisión de movimiento. Existen diversas técnicas para inspeccionar los acabados superficiales pero en particular para la medición de rugosidad lo más común es emplear aparatos de medición conocidos como perfilómetros. Un perfilómetro en esencia es un aparato de desplazamiento en un eje horizontal sobre el cual se monta un transductor de desplazamiento o LVDT (Linear Variable Differential Transformer, Transformador Diferencial Variable Lineal). El LVDT registra las pequeñas imperfecciones dimensionales de la superficie sobre la trayectoria horizontal por la cual viaja, generalmente micrométricas. Con este aparato se obtiene una gráfica de desplazamiento contra el tiempo conocida como perfil de rugosidad. La gráfica puede ser analizada numéricamente para obtener parámetros estandarizados de rugosidad como son la rugosidad promedio, la rugosidad cuadrática media, la rugosidad ponderada por diez puntos, etc.

Entorno actual

En el Laboratorio de Metrología del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM, ICAT UNAM, se cuenta con el perfilómetro Federal 4000, mostrado en la figura 1 (Federal, 1985), el cual data su construcción del año de 1985.

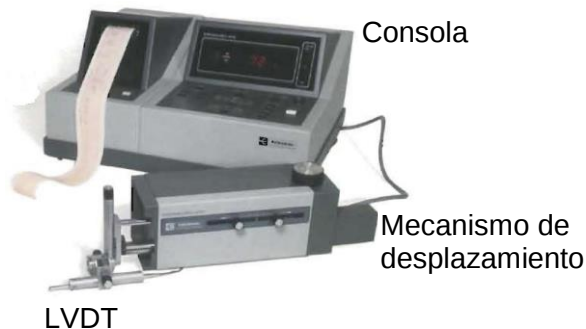


Figura 1. Perfilómetro Federal 4000.

A la fecha, su deterioro se ha manifestado en fallas relacionadas con la consola de operación original construida sobre la base de la arquitectura de las primeras computadoras personales XT.

Descripción del problema a resolver y motivación

Debido a estas fallas y a la oportunidad de implementar una nueva consola de operación con base en circuitos electrónicos modernos y técnicas de procesamiento

digital de señales, se decidió la rehabilitación del mencionado perfilómetro reemplazando su consola original y utilizando exclusivamente el mecanismo de desplazamiento horizontal y el transductor LVDT. En este informe se describe el sistema electrónico desarrollado en este proceso de rehabilitación con base en una tarjeta de adquisición de señales y técnicas de procesamiento digital para extraer la información analógica del LVDT y controlar el desplazamiento del mecanismo. Se utiliza la tarjeta de adquisición de señales es la NI USB6-211 especificada para discretizar señales analógicas a 250000 muestras/s (National Instruments, 2007). Además posee entradas y salidas digitales de propósito general. Como parte de la metodología adoptada, la tarjeta de adquisición digitaliza las señales senoidales de 25000 Hz provenientes de los devanados primario y secundario del LVDT para, mediante la correlación de ambas señales (Proakis y Manolakis, 1996), extraer la información de desplazamiento. Por otra parte el sistema electrónico se complementa con los circuitos electrónicos para mover el motor de desplazamiento de fase que impulsa el mecanismo de desplazamiento horizontal.

Relevancia y limitaciones

La principal relevancia del proyecto radica en la implementación de algoritmos de procesamiento digital de señales en sustitución de las tradicionales técnicas de circuitos electrónicos analógicos que se utilizaban originalmente para obtener la medición de desplazamiento del transductor LVDT. Por otra parte, se fomenta la creación de infraestructura de desarrollo propio que puede ser ofrecida como una transferencia tecnológica.

El alcance del presente proyecto es el desarrollo de un prototipo funcional que pueda ser utilizado confiablemente para la medición de rugosidad.

La potencial limitación del prototipo radica en el probable deterioro de los componentes reutilizados como LVDT y mecanismo de desplazamiento.

Relación con otras áreas

El trabajo del presente proyecto esta relacionado con las áreas de procesamiento digital de señales, metrología dimensional y programación de computadoras.

Método

En este informe se describe el desarrollo hardware y software para rehabilitar el perfilómetro Federal 4000. El esquema general se presenta en la figura 2.

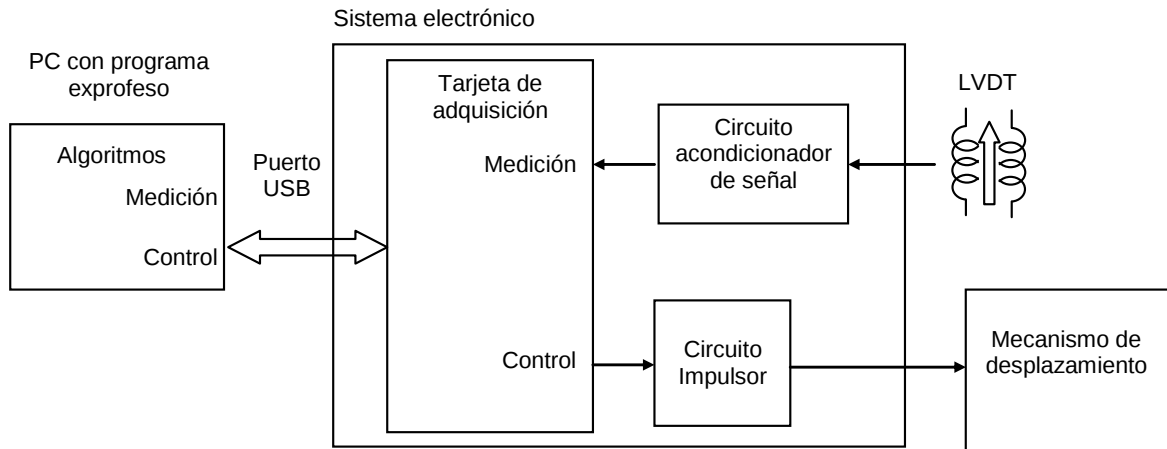


Figura 2. Método a emplear.

En el esquema de la figura 2 un sistema electrónico, con base en la tarjeta de adquisición de señales recibe las señales del transductor LVDT para ser digitalizadas y transferidas a la PC para su procesamiento mediante algoritmos de medición. La PC ejecuta el algoritmo de medición para interpretar las señales eléctricas como información del desplazamiento generado por la rugosidad en contacto con el palpador LVDT. A su vez, el programa para PC contiene la interface de operación para que el usuario introduzca los parámetros de control y así generar el desplazamiento deseado sobre la superficie rugosa a analizar.

Objetivos y resultados esperados

El objetivo del presente informe es mantener documentado el desarrollo tecnológico que aquí se describe. De forma puede ser de utilidad al tomarlo como referencia para desarrollos similares.

El objetivo general del proyecto es rehabilitar un perfilómetro Federal 4000 propiedad del ICAT UNAM que a la fecha presenta diversas fallas electrónicas y que se ha optado por sustituir su consola de operación original. Los siguientes son los objetivos particulares:

- Desarrollar y construir un sistema electrónico que remplace la consola original del perfilómetro Federal 4000.
- Desarrollar y programar la interface de usuario para PC del nuevo perfilómetro.
- Obtener la resolución mínima de $0.1\mu\text{m}$ con la cual se contaba en el perfilómetro original Federal 4000.

Organización del informe

La sección de introducción plantea el problema, el método empleado para resolverlo y expone los resultados esperados. En el capítulo uno se describe el desarrollo del sistema electrónico en detalle. Además contiene la descripción del programa para PC

desarrollado para la presente aplicación y los procedimientos de instalación y operación del instrumento desarrollado. El capítulo dos describe los resultados obtenidos con la rehabilitación concluida. Finalmente los anexos contienen información detallada para la reproducibilidad del presente desarrollo.

1 Sistema electrónico para el perfilómetro

El sistema electrónico que se describe en este informe está construido sobre la base de la tarjeta de adquisición de señales NI USB-6211 y componentes reutilizados del perfilómetro Federal 4000 original.

1.1 Descripción general

La figura 3 muestra el esquema general del sistema electrónico desarrollado y su interface de operación por medio de una computadora.

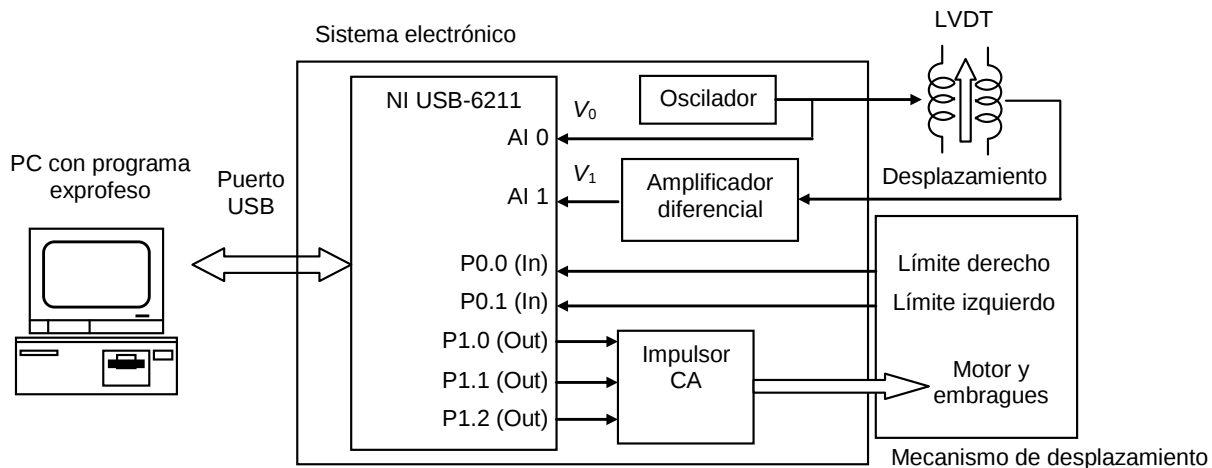


Figura 3. Esquema general del sistema electrónico desarrollado y su interface de operación.

La consola de operación del instrumento mostrado en la figura 1 se reemplaza por el sistema electrónico y de programación que se muestra en la figura 3.

En la figura 3 el sistema electrónico está construido sobre la base de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6211 que realiza las siguientes funciones:

- Digitaliza las formas de onda senoidales del LVDT: la señal V_0 del primario en la entrada analógica AI 0 y la señal V_1 del secundario en la entrada analógica AI 1. Posteriormente con estas señales el algoritmo de medición en la PC se utiliza para extraer la información del desplazamiento micrométrico correspondiente a la rugosidad de la muestra por analizar.
- Obtiene las posiciones límite del mecanismo de desplazamiento: derecha en la entrada digital P0.0 e izquierda en la entrada digital P0.1. Con estas posiciones se indica al algoritmo de control en la PC el intervalo de recorrido horizontal sobre la muestra.
- Genera las señales para mover el mecanismo de desplazamiento con dos distintas velocidades: lento y rápido. Dos señales de salida, P1.0 y P1.1, se utilizan para mover el motor de fase dividida en ambos sentidos horario y anti horario para desplazar el mecanismo hacia la izquierda o derecha. La restante señal de salida,

P1.2, se utiliza para energizar el embrague que permite conectar el juego de engranes lento y rápido del mecanismo de desplazamiento a la flecha del motor.

- Se comunica mediante el puerto USB con la interface de usuario, medición y control en la PC.

1.2 Sistema electrónico

La figura 4 muestra el circuito electrónico desarrollado y los anexos A, B y C contienen los detalles de fabricación. Con referencia a la figura 3, en la figura 4 se muestra que el control del motor de fase dividida en el mecanismo de desplazamiento horizontal es controlado mediante los relevadores Re1 y Re2 que conmutan la energía de la línea de 127V AC en el conector J3 hacia los dos devanados del motor, azul-rojo y azul-negro en el conector J2. Con esto se consigue alternar la dirección de giro y el sentido de desplazamiento. Las salidas digitales de control en la NI USB-6211, P1.0 y P1.1, son acopladas a los relevadores mediante los transistores Q1 y Q2. La velocidad del mecanismo de desplazamiento horizontal se controla mediante un juego de engranes con dos posiciones. Los engranes son acoplados a la flecha del motor mediante dos solenoides de 127V DC que son impulsados por el relevador Re3 y su respectivo acoplamiento mediante el transistor Q3 a la salida digital de control P1.2. La alimentación de 127V DC se obtiene al rectificar el voltaje de la línea 127V AC mediante el puente rectificador de onda completa D5. Los dos solenoides de 127V DC se conectan al sistema electrónico mediante el conector J6.

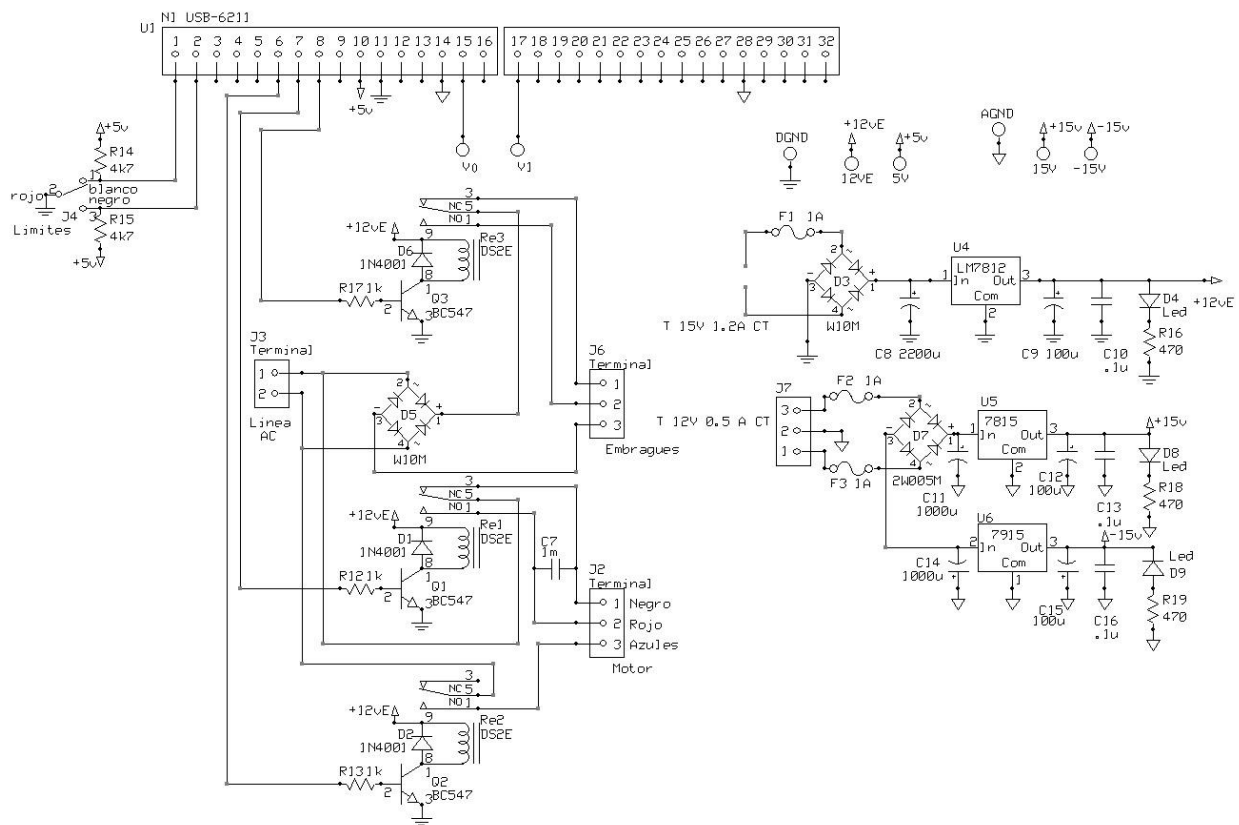


Figura 4. Sistema electrónico.

Por otra parte, los límites derecho e izquierdo del mecanismo de desplazamiento permiten acotar la trayectoria y están formados por un interruptor de dos posiciones montado sobre el mismo mecanismo de desplazamiento que es registrado en las entradas digitales P0.0 y P0.1 de la NI USB-6211. El interruptor de dos posiciones se conecta en J4 y se acopla a la tarjeta NI USB-6211 mediante los dos resistores R14 y R15 conocidos como “pull up resistors”, los cuales aseguran los niveles lógicos “1” y “0”.

Las señales senoidales de 25kHz del LVDT, V_0 y V_1 son digitalizadas en las entradas analógicas AI0 y AI1 de la NI USB-6211 conforme a la técnica de muestreo continuo a 250kmuestras/s que repartidas entre dos canales resulta en una frecuencia de 125kmuestras/s por cada uno de los canales.

Se implementaron dos fuentes de voltaje: una sencilla de 12 VDC para energizar al circuito electrónico y una doble de ± 15 VDC para energizar el circuito oscilador y amplificador diferencial que se retomó del equipo original.

1.3 Interface de operación, medición y control

En la figura 5 se muestra una captura de pantalla de la interface de operación desarrollada en Visual C++ 2012 para la presente aplicación que también contiene los algoritmos de medición y de control.

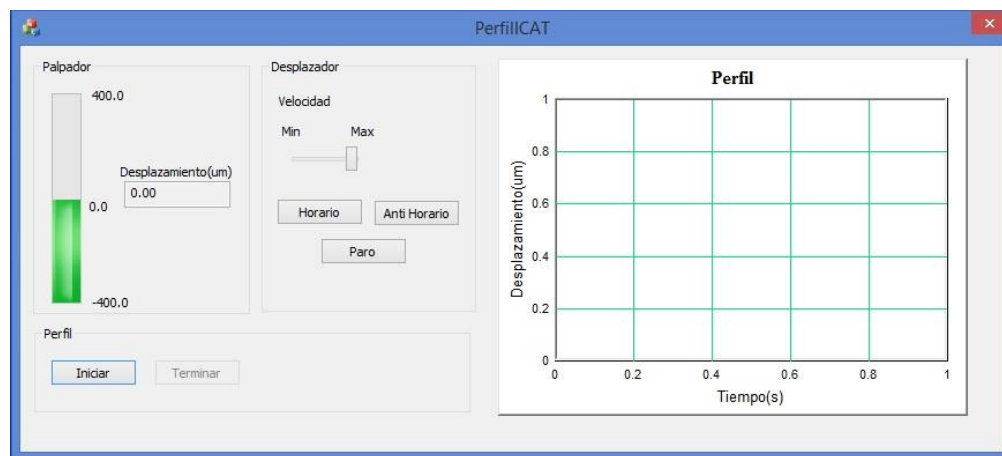


Figura 5. Interface de operación.

En la figura 5 se aprecian 4 zonas de la pantalla con la siguiente funcionalidad:

- Palpador. Se muestra de manera analógica y numérica el valor en tiempo real del desplazamiento en el LVDT.
- Desplazador. Contiene los controles para mover el mecanismo de desplazamiento horizontal.
- Perfil (botones). Permite iniciar y terminar una corrida de medición de perfil.

- Perfil (gráfica). Despliega la gráfica de perfil, es decir, desplazamiento del LVDT contra tiempo.

Los algoritmos de control y medición se ejecutan sobre la base de un temporizador que cada 250ms genera una lectura de desplazamiento en micrómetros. Para generar una lectura de desplazamiento, cada 250 ms se ejecuta el algoritmo de la figura 6.

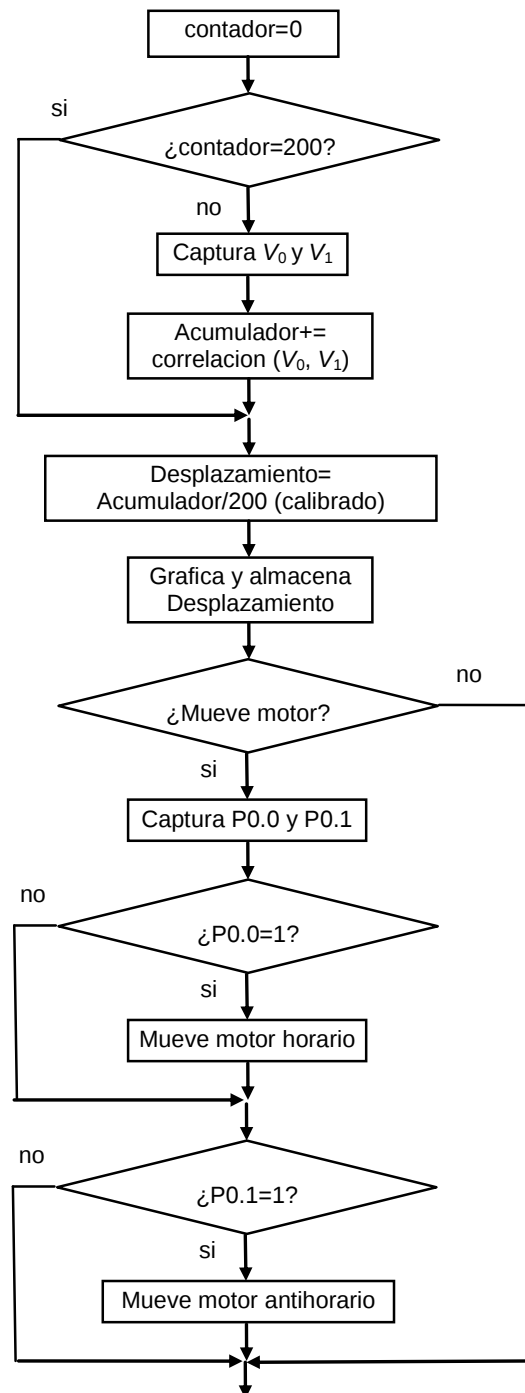


Figura 6. Algoritmo de medición y control.

La función de correlación de secuencias discretas es una formula ampliamente utilizada en el ámbito del procesamiento digital de señales (Proakis y Manolakis, 1996). En el presente proyecto la fórmula de correlación es la siguiente.

$$Acumulador = \sum_{n=l}^N V_0(n)V_1(n-l) \text{ para } N = 128, l = 0 \quad (1)$$

En donde $l=0$ ya que la correlación en el origen siempre es máxima y útil para la medida de semejanza entre V_0 y V_1 . Por otra parte $N=128$ es el número de muestras discretas. Debido a que la variación de desplazamiento en el LVDT se ve reflejada en la amplitud y fase de V_1 , mientras que V_0 permanece constante en amplitud, frecuencia y fase, V_0 se utiliza como señal de referencia para extraer la magnitud y signo del desplazamiento en el LVDT (Guzmán et al, 2001).

La calibración en la lectura de desplazamiento del LVDT se realizó utilizando como patrón un tornillo micrométrico Mitutoyo de $0.2\mu\text{m}$ de división mínima. El procedimiento consistió en generar desplazamientos patrón mediante el tornillo micrométrico y observar la magnitud de la variable *Acumulador* que se registraba en la interface de medición, obteniendo la curva de calibración de la figura 7. En esta misma figura se puede apreciar que la densidad de puntos de calibración es mayor cerca del origen. Lo anterior debido a la gran carga de trabajo que normalmente tiene un perfilómetro alrededor del cero del instrumento.

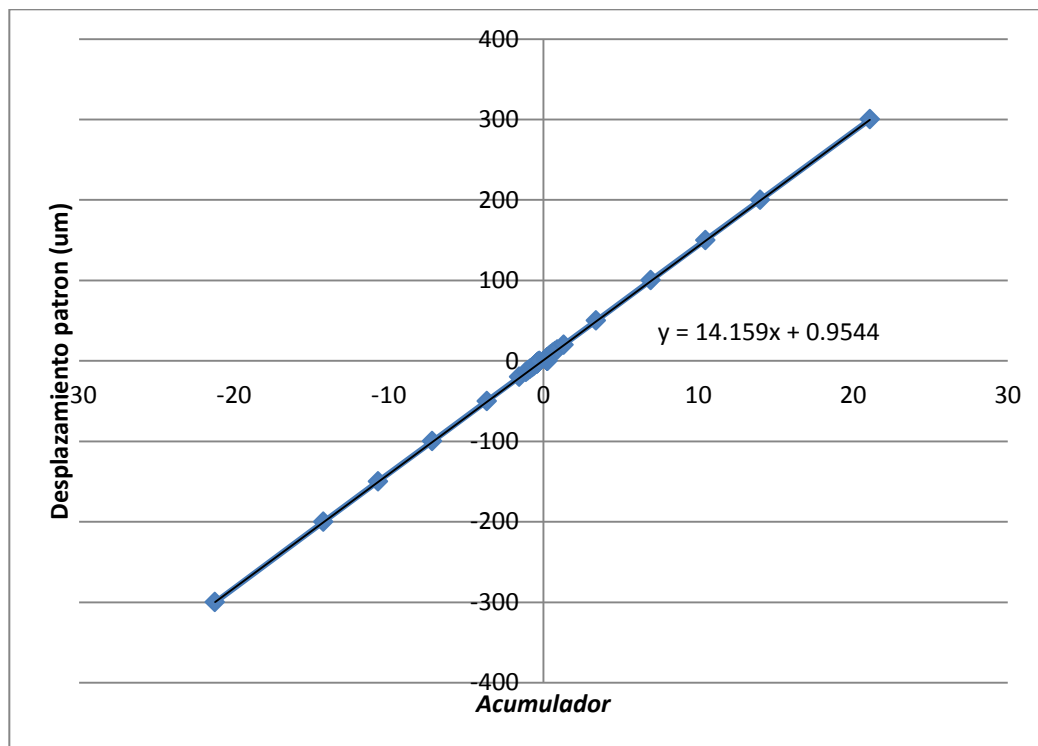


Figura 7. Curva de calibración.

Por lo tanto, el desplazamiento convertido de volts a micrómetros es mediante la siguiente ecuación

$$\text{Desplazamiento}(\mu\text{m}) = \frac{\text{Acumulador}}{200} * 14.159 \quad (2)$$

En donde 200 es el número de promedios que se realizan en el algoritmo de la figura 6.

1.4 Descripción de la programación

El programa de la figura 5 fue desarrollado exprofeso utilizando Visual Studio 2012, en particular el lenguaje C++ y la librería Microsoft Foundation Class, MFC, como una aplicación en un cuadro de diálogo (Kruglinski et al, 1988). La figura 8 muestra las clases que componen el proyecto de la aplicación y la librería NIDAQmx.lib agregada como elemento existente a la solución. El archivo NIDAQmx.lib se copia en el directorio C:\Program Files (x86)\National Instruments\NI-DAQ\DAQmx ANSI C Dev\lib\msvc como parte de la instalación del software para la tarjeta de adquisición NI USB-6211 que se explica en la sección 1.5.2. Para utilizar esta librería también se requiere agregar el archivo de definiciones NIDAQmx.h que se copia en el directorio C:\Program Files (x86)\National Instruments\NI-DAQ\DAQmx ANSI C Dev\include.

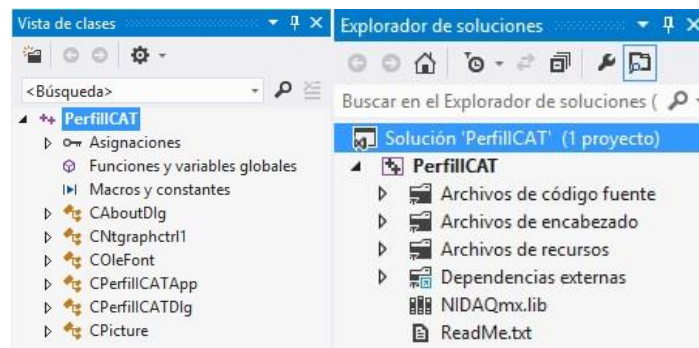


Figura 8. Clases y solución del proyecto PerfillCAT.

Las clases de la figura 8 se pueden dividir en dos rubros: Las clases que han sido insertadas de manera automática en el ambiente de programación y la clase que soporta el grueso de la interface de operación, medición y control, como se describe a continuación.

1.4.1 Clases insertadas automáticamente en el ambiente de programación

La clase CAboutDlg se inserta por omisión por el asistente para la creación de la aplicación con base en cuadro de diálogo.

La clase CNTgraphctrl1 se agrega al proyecto al insertar el control ActiveX NTGraph.ocx (Teofilov, 2003) en el editor de recursos de la presente aplicación. El control permite la

visualización de datos 2D en tiempo de ejecución de una aplicación. Para utilizar el control se requiere su registro como componente COM en el sistema de registro de Windows como se explica en la sección 1.5.1.

La clase COleFont es una clase de soporte para el control ActiveX NTGraph insertada por omisión al crear la clase CNtgraphctrl1.

La Clase CPerfillCATApp es insertada por omisión por el asistente para la creación de la aplicación con base en cuadro de diálogo. Contiene la inicialización estándar de la caja de diálogo.

La clase CPicture es una clase de soporte para el control ActiveX NTGraph insertada por omisión al crear la clase CNtgraphctrl1.

1.4.2 Clase para la interface de operación, medición y control

La clase CPerfillCATDlg que se muestra en la figura 9 originalmente fue agregada por el asistente para la creación de la aplicación pero es en donde se tuvieron que agregar los métodos y variables que soportan la interface de operación, medición y control. En esta clase reside la totalidad del código fuente que se desarrolló para la presente aplicación, como se muestra en el anexo D.

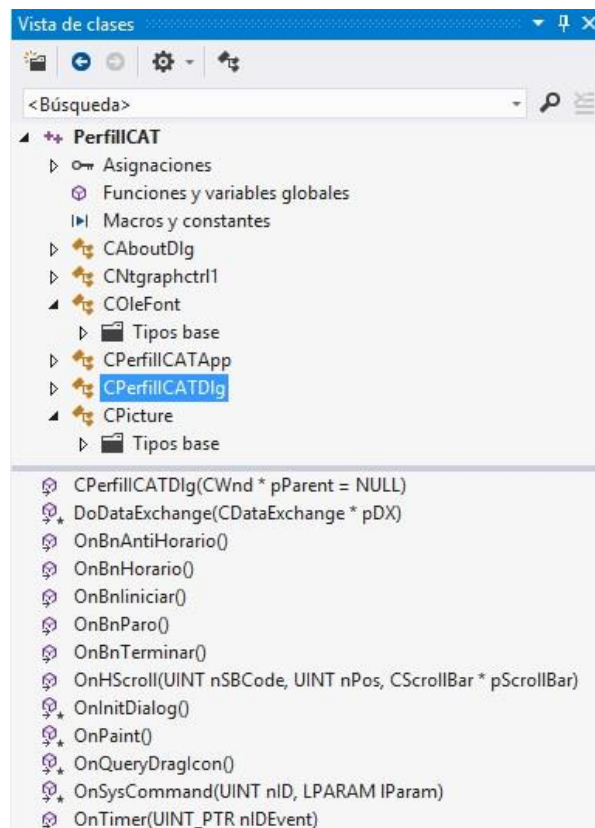


Figura 9. ClaseCPerfillCATDlg.

A continuación una descripción de los métodos de la clase CPerfillCATDIg de la figura 9.

CPerfillCATDIg::CPerfillCATDIg(CWnd* pParent /*=NULL*/). Es el constructor de la clase en donde se inicializan las variables globales.

void CPerfillCATDIg::DoDataExchange(CDataExchange* pDX). Es la clase que permite el mecanismo de actualización de las variables correspondientes a los controles de la caja de diálogo para su visualización en tiempo de ejecución.

void CPerfillCATDIg::OnBnAntiHorario(). Es el método que atiende el evento por presionar el botón “Anti Horario” de la aplicación. En este método se actualizan las salidas digitales P1.0 y P1.1 de la NI USB-6211 para que el motor de fase dividida gire en sentido anti-horario y el mecanismo de desplazamiento horizontal se mueva hacia la derecha.

void CPerfillCATDIg::OnBnHorario(). Es el método que atiende el evento por presionar el botón “Horario” de la aplicación. En este método se actualizan las salidas digitales P1.0 y P1.1 de la NI USB-6211 para que el motor de fase dividida gire en sentido horario y el mecanismo de desplazamiento horizontal se mueva hacia la izquierda.

void CPerfillCATDIg::OnBnIniciar(). Es el método que atiende el evento por presionar el botón “Iniciar” de la aplicación. Al presionar este botón se inicia el procedimiento de medición de rugosidad con el desplazamiento del mecanismo horizontal de izquierda a derecha y la captura de la gráfica de perfil. En éste método se despliega primero una caja de diálogo para introducir el nombre y ruta del archivo que almacenará las mediciones de rugosidad. Además se inician las variables que se alteran durante el proceso y se controla la actividad de los botones.

void CPerfillCATDIg::OnBnParo(). Es el método que atiende el evento por presionar el botón “Paro” de la aplicación. En este método se actualizan las salidas digitales P1.0 y P1.1 de la NI USB-6211 para que el motor de fase dividida se detenga en conjunto con el mecanismo de desplazamiento horizontal.

void CPerfillCATDIg::OnBnTerminar(). Es el método que atiende el evento por presionar el botón “Terminar” de la aplicación. Al presionar este botón se termina el procedimiento de medición de rugosidad con la detención del mecanismo, el control de la actividad de los botones y el cierre del archivo de mediciones.

void CPerfillCATDIg::OnHScroll(UINT nSBCode, UINT nPos, CScrollBar* pScrollBar). Es el método que atiende el evento por modificar la posición del control deslizable “Velocidad” de la aplicación. En este método se actualiza la salida digital P1.2 de la NI USB-6211 para que el motor de fase dividida se embrague al mecanismo de desplazamiento horizontal y éste proporcione dos tipos de velocidad: mínima y máxima.

BOOL CPerfillCATDlg::OnInitDialog(). En éste método se realizan diversas actividades para la inicialización de la aplicación. En primer lugar se realiza la inicialización estándar de la aplicación. Después se inicia la gráfica que despliega el perfil de rugosidad. Posteriormente se inicia el modo de operación de la tarjeta NI USB-6211. Después se inician los controles de la caja de diálogo y finalmente se inicia un temporizador de 250ms que es atendido por el método OnTimer.

void CPerfillCATDlg::OnPaint(). Es el método estándar para dibujar en la aplicación. No se modifica de su forma original.

HCURSOR CPerfillCATDlg::OnQueryDragIcon(). El sistema llama a esta función para obtener el cursor que se muestra mientras el usuario arrastra la ventana minimizada.

void CPerfillCATDlg::OnSysCommand(UINT nID, LPARAM lParam). Es el método que permite el despliegue de la caja de diálogo “Acerca de...”.

void CPerfillCATDlg::OnTimer(UINT_PTR nIDEvent). Desempeña el algoritmo de la figura 6 para implementar la interface de medición y control en la obtención de la gráfica de perfil de rugosidad.

1.5 Procedimiento de instalación

La instalación del programa PerfillCAT ya sea para su operación o para su compilación en Visual C++ requiere de dos procedimientos preliminares que se describen a continuación.

1.5.1 Instalación del control NTGraph

El control NTGraph se instala para su uso por otras aplicaciones que soportan componentes COM mediante el registro del archivo NTGraph.ocx en el sistema de Windows. Para el registro se requieren seguir los siguientes pasos:

- Deshabilitar el control de cuentas de usuario en el panel de control.
- Reiniciar la computadora.
- Ejecutar el símbolo del sistema con privilegios de administrador.
- Teclear el comando `regsvr32 NTGraph.ocx`

Al finalizar se deberá desplegar una ventana en donde se indica que la instalación fue correcta.

Posteriormente al registro, las aplicaciones que soportan componentes COM como Excel, PowerPoint o Visual Studio deberán contener en su lista de objetos controladores ActiveX el control NTGraph.

1.5.2 Instalación del software de la NI USB-6211

El software NI DAQmx permite a los usuarios y programadores de tarjetas de adquisición de datos de National Instruments contar con una interface de programación y software básico de depuración para los dispositivos que comercializa esta empresa.

El software se distribuye con la compra de cualquier tarjeta de adquisición de National Instruments o mediante la página WEB (National Instruments, 2019).

El procedimiento de instalación es muy sencillo y solamente hay que seguir los siguientes pasos:

- Insertar el disco en donde se distribuye DAQmx.
- Iniciar la aplicación.
- Seleccionar los componentes adecuados.
- Reiniciar la computadora.
- Conectar la tarjeta de adquisición de datos.
- Ejecutar Measurement & Automation Explorer para verificar el desempeño del dispositivo.

1.6 Procedimiento de operación

Una medición típica de rugosidad con el equipo desarrollado requiere de instalaciones y equipo propios del área de metrología dimensional. En primer lugar es importante contar con una mesa de planitud o granito de Arkansas que soporte al mecanismo de desplazamiento horizontal y la muestra por analizar. Con este arreglo se busca asegurar un desplazamiento firme y alineado del transductor LVDT sobre la muestra por analizar, como se muestra en la figura 10.

Una vez conseguido el arreglo de la figura 10 se procede a las conexiones eléctricas que se muestran en la figura 11.

Posteriormente se encienden la computadora y el sistema electrónico y se ejecuta el archivo PerfillCAT.exe.

Se verifica que el LVDT registre un desplazamiento en la pantalla de operación al desplazar manualmente el palpador y observar las variaciones en la sección “Palpador” de la pantalla.



Figura 10. Montaje sobre mesa de planitud.

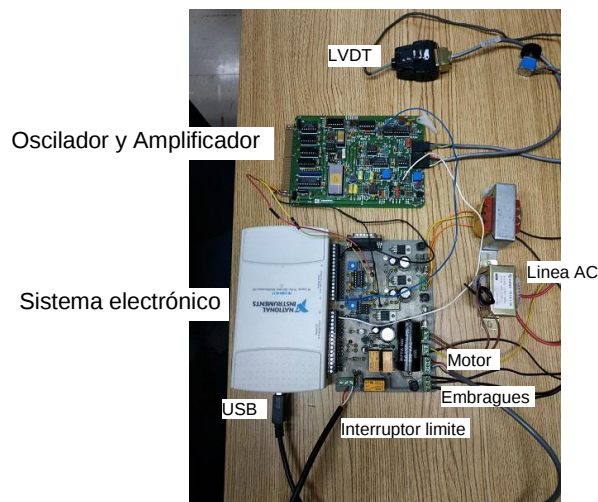


Figura 11. Conexiones del sistema electrónico.

Previamente al registro de una gráfica de rugosidad, se requiere un buen alineamiento y nivelación entre la muestra y el mecanismo de desplazamiento. Para el alineamiento se ajusta el recorrido del mecanismo de desplazamiento para que coincida con la longitud de la muestra mediante los controles de la figura 12. Por otra parte, se deben realizar corridas previas en sentido horario y anti horario en la pantalla del programa PerfillCAT para observar el desnivel que existe entre el mecanismo de desplazamiento y la muestra entre los puntos inicial y final del recorrido. Para lograr un nivel lo más homogéneo posible se puede mover el tornillo de nivelación en el mecanismo horizontal, como se muestra en la figura 12. Es importante mencionar que al alterar el nivel del mecanismo se desplaza el alcance de medición del transductor LVDT. Por esta

razón se debe posicionar al LVDT constantemente dentro del alcance de medición mediante el tornillo de posición que se muestra en la figura 12.

Una vez conseguidos los mejores alineamiento y nivelación posibles, se procede con la obtención de una gráfica de perfil de rugosidad al presionar el botón “Iniciar” de la interface de operación. Al presionar el botón, el programa desplegará una caja de diálogo en donde se deberá introducir el nombre del archivo que almacenará las mediciones. Posteriormente iniciará el recorrido del mecanismo de desplazamiento de derecha a izquierda y viceversa con la obtención de la gráfica de rugosidad hasta que se presione el botón “Terminar” de la interface.

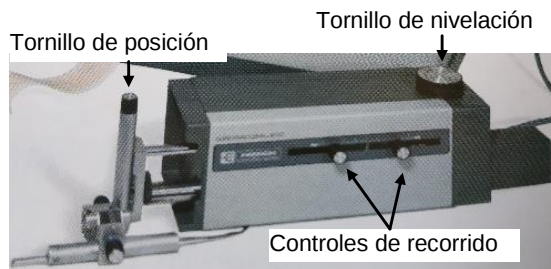


Figura 12. Ajustes en el mecanismo de desplazamiento horizontal.

2 Resultados y discusión

Se rehabilitó un instrumento para la medición de perfiles de rugosidad sobre la base de técnicas modernas de procesamiento digital de señales.

2.1 Resultados

Los resultados obtenidos se pueden expresar de manera cualitativa y cuantitativa como se muestra a continuación.

2.1.1 Prototipo desarrollado

La figura 13 muestra el sistema de medición desarrollado.



Figura 13 Perfilómetro desarrollado.

La figura 13 muestra como la consola original de operación del perfilómetro Federal 4000 ha sido remplazada por el sistema electrónico y computadora personal.

2.1.2 Software de operación

Se desarrolló el software de operación a partir de herramientas básicas de programación como lo es Visual C++ como parte de Visual Studio 2012. La pantalla de operación del software se muestra en la figura 14.

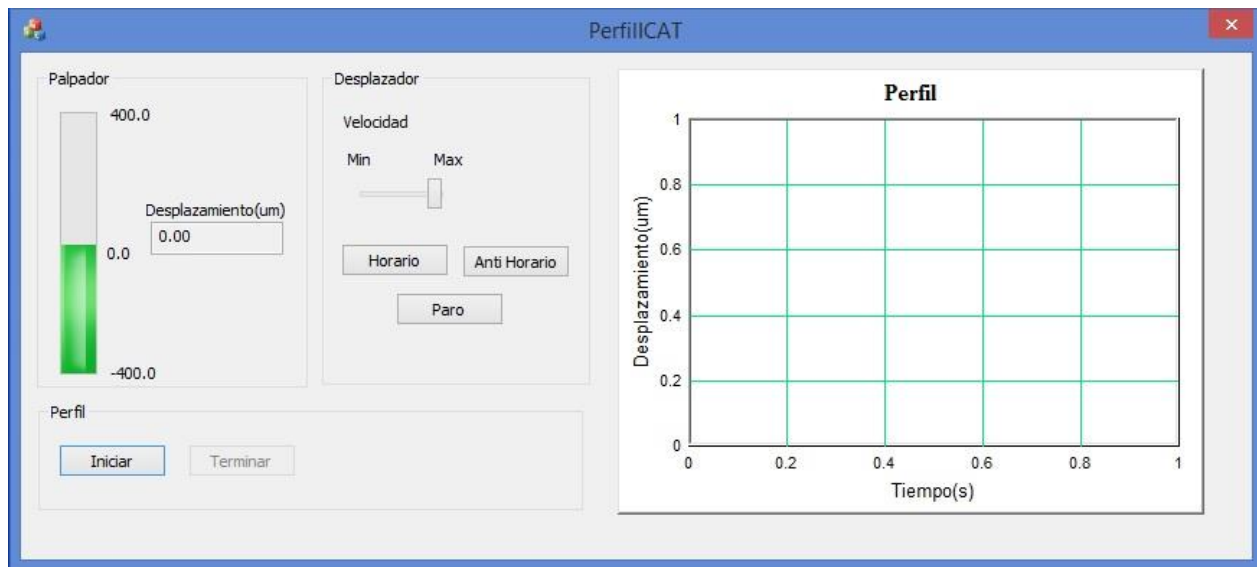


Figura 14. Pantalla de operación.

La pantalla de la figura 14 recupera la funcionalidad original del perfilómetro Federal 400 en una interface sencilla y simple para el operador ya que cuenta con un número mínimo de controles.

2.1.3 Medición de patrones de rugosidad

Se midieron, con el nuevo sistema electrónico para el perfilómetro, dos patrones de rugosidad que originalmente se suministraron con el equipo Federal 4000. El primero es un patrón con perfil de rugosidad del tipo “diente de sierra”. La figura 15 muestra el despliegue de la medición en la pantalla de operación.

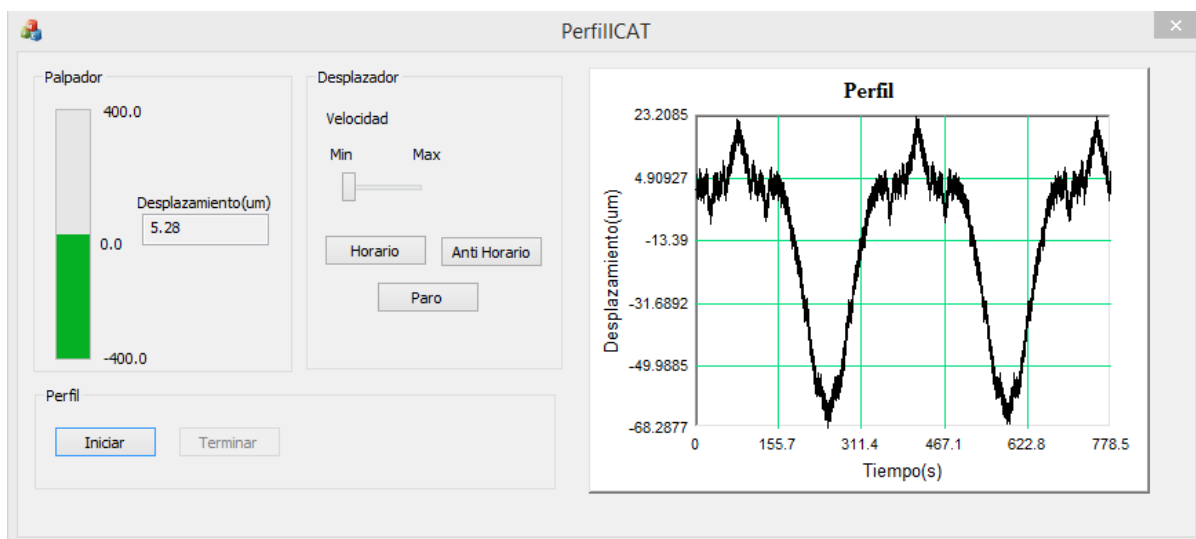


Figura 15. Diente de sierra, pantalla de operación.

Los datos de la medición fueron capturados en archivo de texto e importados como una hoja de cálculo en Excel, como lo muestra la figura 16.

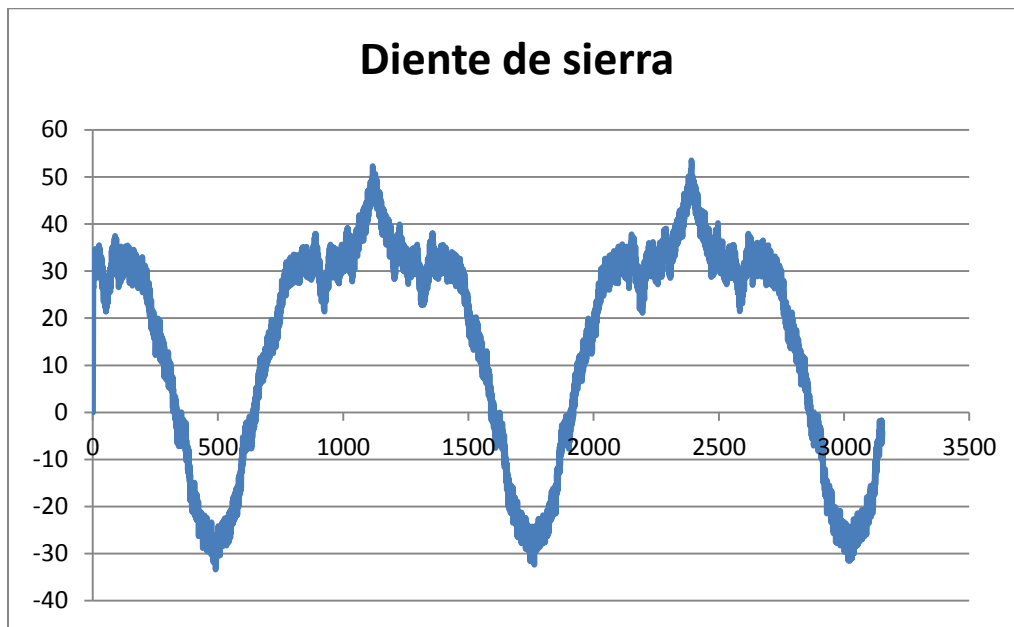


Figura 16. Diente de sierra, hoja de cálculo.

Por otra parte, se midió un segundo patrón de rugosidad del tipo “pulso”. La figura 17 muestra la pantalla de operación con las mediciones del patrón “pulso”.

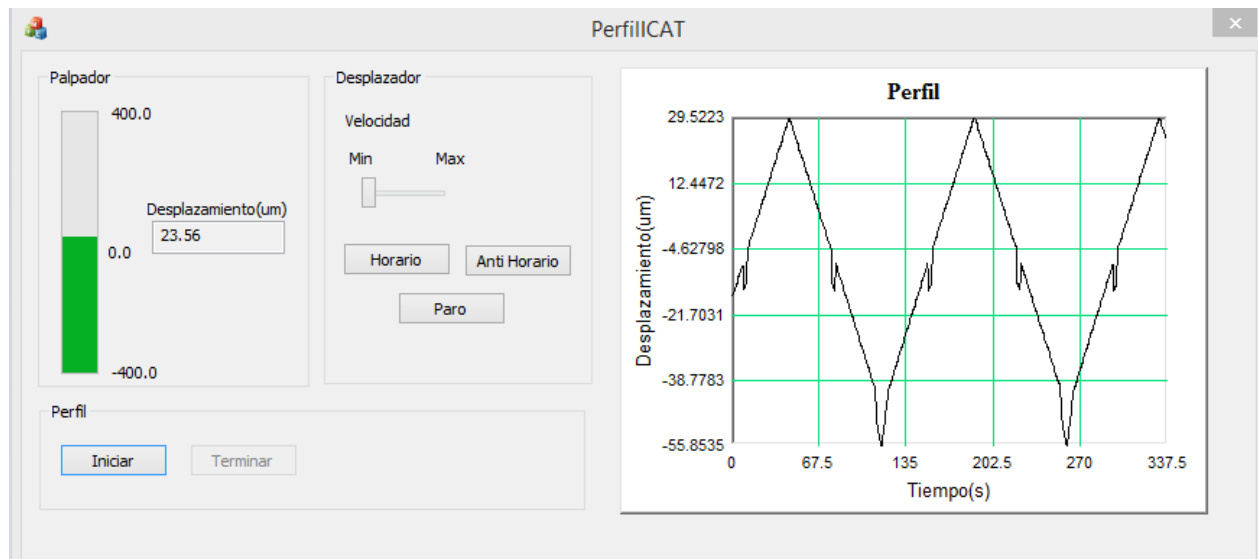


Figura 17. Pulso, pantalla de operación.

Los datos de la medición fueron capturados en archivo de texto e importados como una hoja de cálculo en Excel, como lo muestra la figura 18.

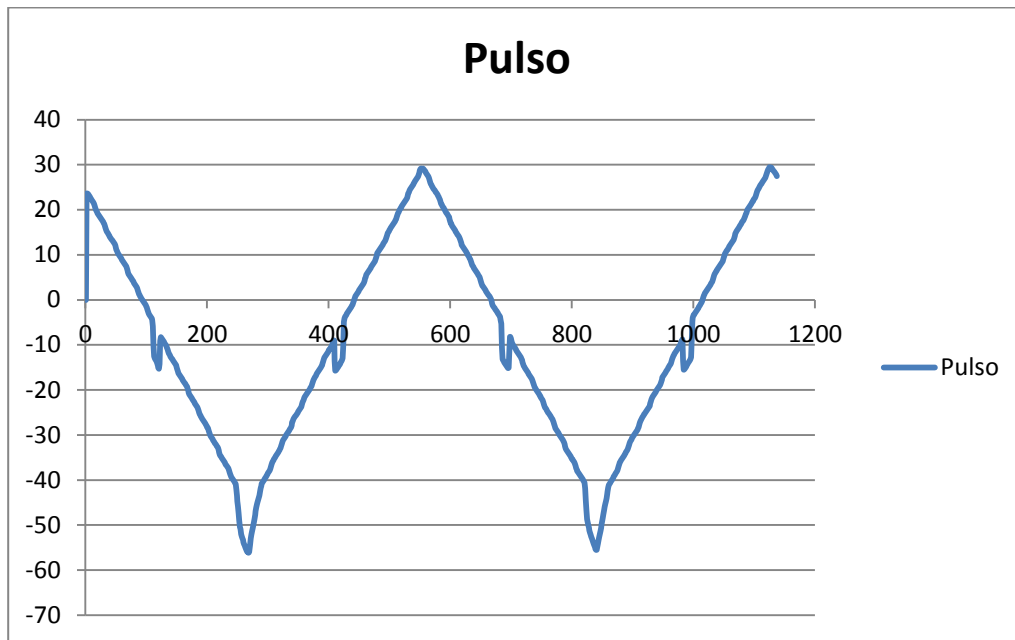


Figura 18. Pulso, hoja de cálculo.

Los archivos de medición almacenados como hojas de cálculo permiten la impresión, edición y procesamiento avanzado para el análisis de datos que se pueden implementar como parte de las características que ofrece Excel a los programadores.

2.2 Discusión y trabajo a futuro

El sistema desarrollado preserva la totalidad de las funciones del equipo original Federal 4000, es decir, alcances de medición, capacidad de despliegue, impresión de las gráficas de rugosidad y procedimientos de alineación y medición. Adicionalmente, se obtiene la enorme ventaja de mantener actualizado el equipo a los nuevos dispositivos de medición controlados por una computadora.

Como trabajo a futuro se plantea lo siguiente:

- Desarrollar y construir una caja protectora para el sistema electrónico.
- Desarrollar algoritmos de procesamiento digital de señales para poder extraer parámetros como rugosidad promedio, rugosidad cuadrática media, etc., a partir de los archivos de medición (Smith, 2002).

2.3 Especificaciones del equipo desarrollado

- Alcance en el desplazamiento longitudinal: 100mm
- Velocidad de desplazamiento longitudinal: 2.5mm/s y 0.25mm/s.

- Alcance del palpador LVDT: $\pm 400\mu\text{m}$.
- División mínima del palpador LVDT: $0.01\mu\text{m}$.
- Estabilidad del palpador LVDT: $\pm 0.02\mu\text{m}$

2.4 Guía para la detección de fallas

Para el sistema electrónico se requieren las condiciones de operación satisfactoria que se listan en la tabla 1.

Situación del sistema de medición	Indicadores de buen funcionamiento
Conexión del sistema electrónico a la computadora y tarjeta PCB energizada	Led verde en la tarjeta NI USB-6211 parpadeando 2 Leds en la tarjeta PCB encendidos
Ejecución del programa PerfillCAT.	Desplazando manualmente el palpador LVDT se debe modificar el despliegue "Palpador" de la pantalla de operación

Tabla 1. Condiciones normales de operación para el sistema de medición de rugosidad.

En caso de presentarse otras circunstancias distintas a las mencionadas en la tabla 1, revise lo siguiente:

- Las conexiones adecuadas del sistema electrónico, mecanismo de desplazamiento horizontal y palpador LVDT.
- La correcta instalación del software de la tarjeta NI USB-6211 como se describió en la sección 1.5.1.
- La correcta instalación del control ActiveX NTGraph como se describió en la sección 1.5.2.

Conclusiones

Se diseñó y construyó un sistema electrónico para la rehabilitación de un perfilómetro comercial que presentaba fallas ocasionadas por el envejecimiento. La consola original fue remplazada por el sistema descrito en el presente informe y se mantuvo el dispositivo mecánico de palpación del perfilómetro original. Se programó una aplicación conteniendo la interface de operación del equipo así como los algoritmos de control y medición de desarrollo propio. Se comprobó que con el procesamiento digital de señales se puede mantener el mismo alcance y resolución en la medición micrométrica del LVDT en comparación con las técnicas analógicas utilizadas en el equipo analógico original.

Los resultados alcanzados con el sistema de medición comprueban su buen desempeño y viabilidad para usar esta tecnología en casos prácticos como pueden ser las mediciones de rugosidad en los patrones propiedad del Laboratorio de Metrología del ICAT UNAM o en mediciones comparativas de rugosidad con otro tipo de equipos.

Se presentó parte de este trabajo en el Congreso SOMI XXXIV con fines de divulgación, ver Anexo E.

Referencias

Federal (1985) Operating Instructions Surfanalyzer System 4000, Federal, USA, 55 pp.

Guzmán, J; Valera, B; Ruiz, G; Nava, R. (2001) High-resolution angle and displacement measurements from inductive transducers using digital signal processing oriented approach. **Instrumentation & Development**, 5(2), Julio, p. 83-89.

Kruglinski DJ, Shepherd G y Wingo S. (1988) *Programming Microsoft Visual C++*. Microsoft Press, USA, 1153 pp.

National Instruments (2007) *NI USB-621x User Manual*, National Instruments, USA, 179 pp.

National Instruments (2019) USB-6211 Dispositivo de E/S Multifunción [Internet], **National Instruments**. Disponible desde <<http://www.ni.com/es-mx/support/model.usb-6211.html>> [Acceso 8 de noviembre de 2019].

Proakis, J; Manolakis, D. (1996) *Digital Signal Processing*. Prentice Hall, USA, 968 pp.

Smith, GT. (2002) *Industrial Metrology*, Springer-Verlag, Great Britain, 336 pp.

Teofilov N. (2003) 2D Graph ActiveX Control [Internet], **Code Project**. Disponible desde <<https://www.codeproject.com/Articles/3214/2D-Graph-ActiveX-Control>> [Acceso 8 de noviembre de 2019].

Anexo A Diagrama esquemático

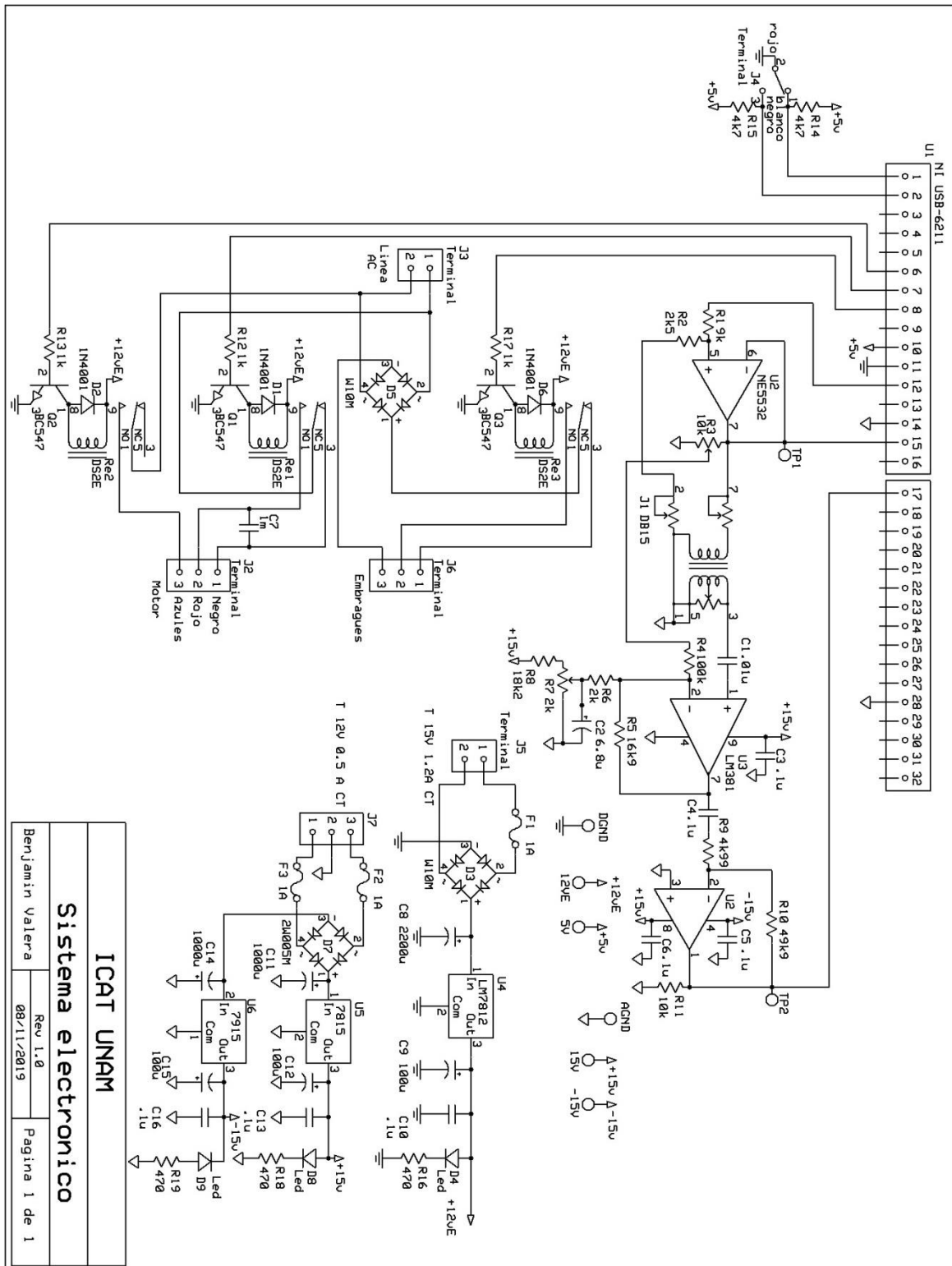


Figura 19. Dibujo esquemático.

Anexo B Circuito impreso

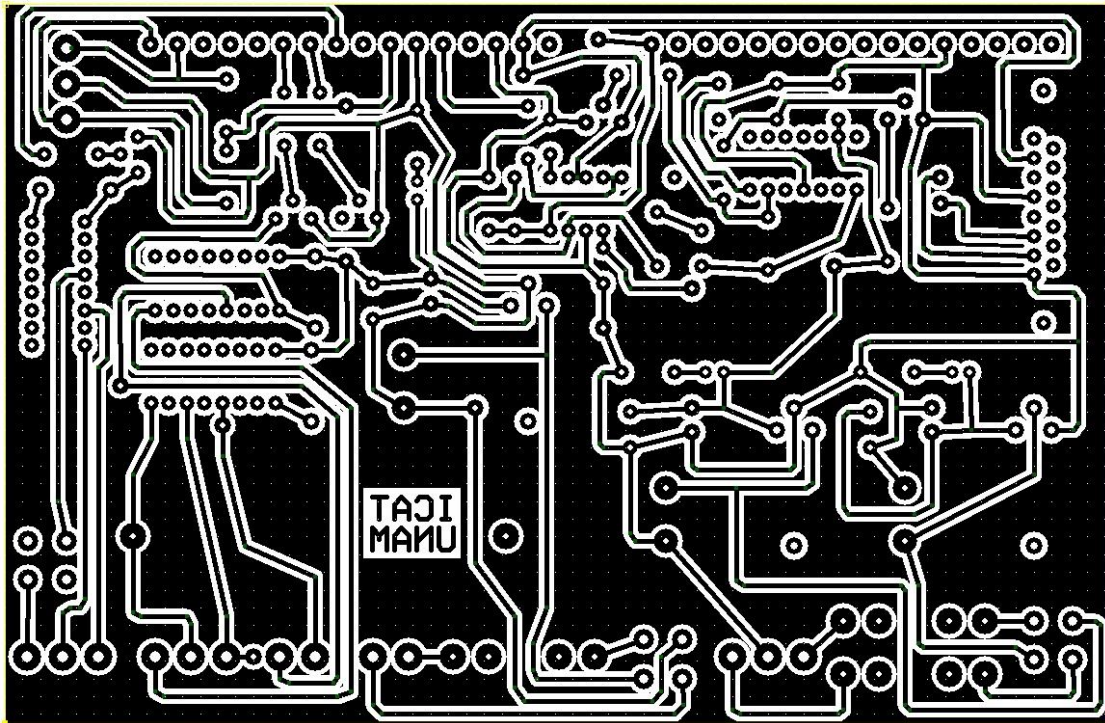


Figura 20. Circuito impreso, soldadura.

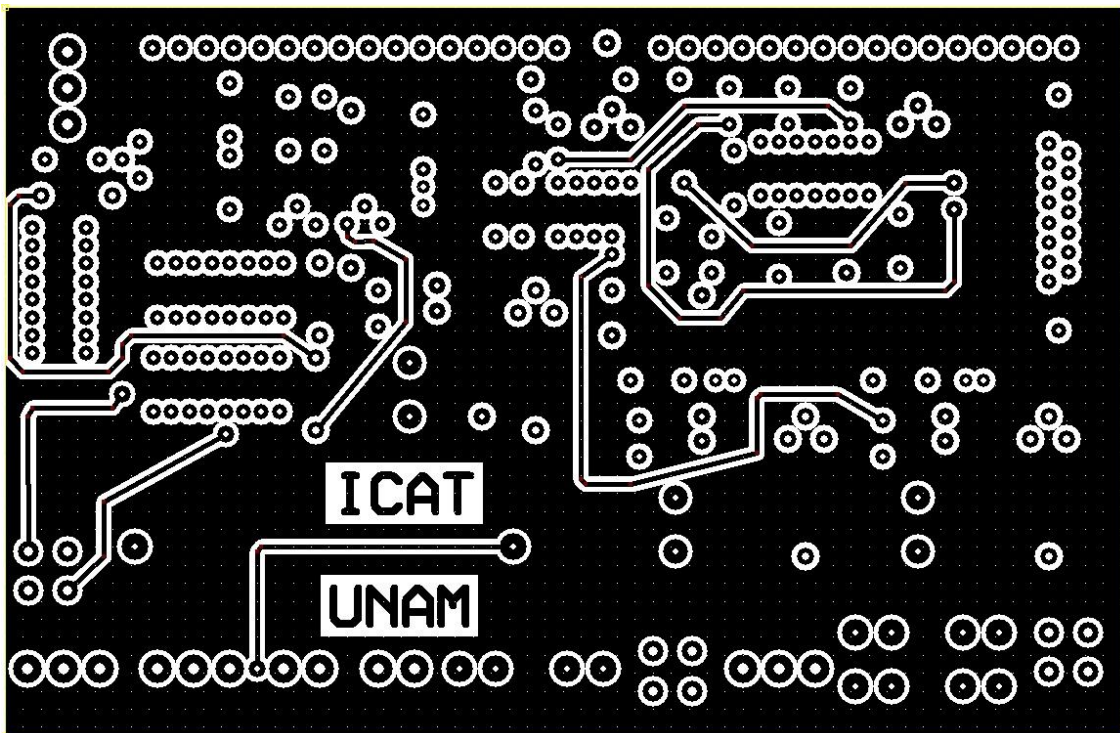


Figura 21. Circuito impreso, componentes.

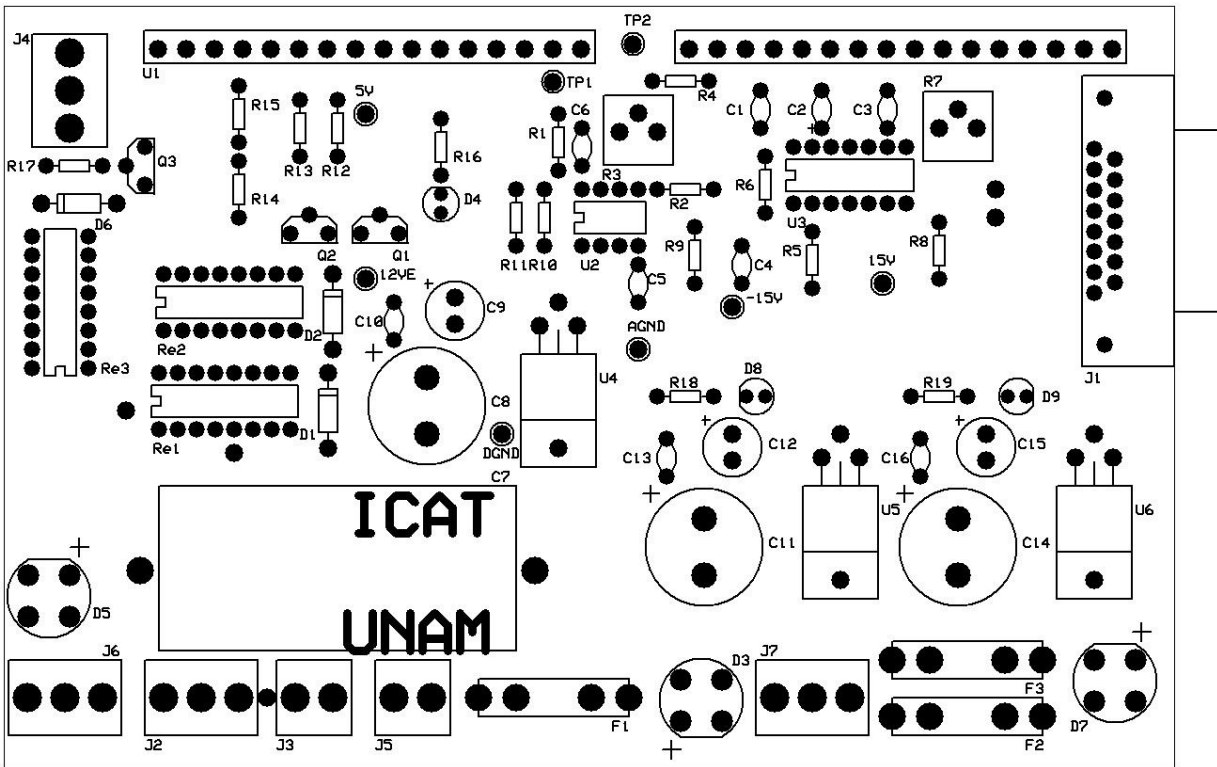


Figura 22. Circuito impreso, mascarilla.

Anexo C Lista de partes

ID	Descripción	Proveedor
-15V	Punta de prueba	AGElectronica HEADER-1
12VE	Punta de prueba	AGElectronica HEADER-1
15V	Punta de prueba	AGElectronica HEADER-1
5V	Punta de prueba	AGElectronica HEADER-1
AGND	Punta de prueba	AGElectronica HEADER-1
C1	Capacitor monolítico .01u	AGElectronica CM-.01/50V
C2	Capacitor de tantalio 6.8u	AGElectronica CT-6.8/35V
C3	Capacitor monolítico .1u	AGElectronica CM-.1/50V
C4	Capacitor monolítico .1u	AGElectronica CM-.1/50V
C5	Capacitor monolítico .1u	AGElectronica CM-.1/50V
C6	Capacitor monolítico .1u	AGElectronica CM-.1/50V
C7	Capacitor Federal 1m	Federal
C8	Capacitor electrolítico 2200u	AGElectronica CE-2200/50V-TEAPO
C9	Capacitor electrolítico 100u	AGElectronica CE-100/50V-TEAPO
C10	Capacitor monolítico .1u	AGElectronica CM-.1/50V
C11	Capacitor electrolítico 1000u	AG Electronica CE-1000/50V
C12	Capacitor electrolítico 100u	AG Electronica CE-100/50V
C13	Capacitor monolítico .1u	AG Electronica CM-.1/50V
C14	Capacitor electrolítico 1000u	AG Electronica CE-1000/50V
C15	Capacitor electrolítico 100u	AG Electronica CE-100/50V
C16	Capacitor monolítico .1u	AG Electronica CM-.1/50V
D1	Diodo rectificador 1N4001	AGElectronica 1N4001
D2	Diodo rectificador 1N4001	AGElectronica 1N4001
D3	Puente de diodos W10M	AGElectronica W10M
D4	Diodo Led	AGElectronica LED-R5D-AC-R30
D5	Puente de diodos W10M	AGElectronica W10M
D6	Diodo rectificador 1N4001	AGElectronica 1N4001
D7	Puente de diodos W10M	AG Electronica W10M
D8	Diodo Led	Steren 10/AZUL ULTRA
D9	Diodo Led	Steren 10/AZUL ULTRA
DGND	Punta de prueba	AGElectronica HEADER-1
F1	Portafusible europeo 1A	AGElectronica FUS-EUR
F2	Portafusible europeo 1A	Steren FEUR 1
F3	Portafusible europeo 1A	Steren FEUR 1
J1	Conector DB15 macho	AGElectronica DB-15PAR
J2	Terminal con 3 tornillos	AGElectronica TRT-03
J3	Terminal con 2 tornillos	AGElectronica TRT-02
J4	Terminal con 3 tornillos	AGElectronica TRT-03
J5	Terminal con 2 tornillos	AGElectronica TRT-02
J6	Terminal con 3 tornillos	AGElectronica TRT-03
J7	Terminal con 3 tornillos	Steren TRT-03
Q1	Transistor BC547	AGElectronica BC547B
Q2	Transistor BC547	AGElectronica BC547B
Q3	Transistor BC547	AGElectronica BC547B
R1	Resistencia de precisión 9k	AGElectronica RP-9K09
R2	Resistencia de precisión 2k5	AGElectronica RP-2K55

R3	Potenci6metro de precisi6n 10k	AGElectronica 3386P-1-103/SUNTAN
R4	Resistencia de precisi6n 100k	AGElectronica RP-100K
R5	Resistencia de precisi6n 16k9	AGElectronica RP-16K9
R6	Resistencia de precisi6n 2k	AGElectronica RP-2K0
R7	Potenci6metro de precisi6n 2k	AGElectronica 3386P-1-202/SUNTAN
R8	Resistencia de precisi6n 18k2	AGElectronica RP-18K2
R9	Resistencia de precisi6n 4k99	AGElectronica RP-4K99
R10	Resistencia de precisi6n 49k9	AGElectronica RP-49K9
R11	Resistencia de precisi6n 10k	AGElectronica RP-10K
R12	Resistencia de carb6n 1k	AGElectronica RC-1K/1/4
R13	Resistencia de carb6n 1k	AGElectronica RC-1K/1/4
R14	Resistencia de carb6n 4k7	AGElectronica RC-4K7/1/4
R15	Resistencia de carb6n 4k7	AGElectronica RC-4K7/1/4
R16	Resistencia de carb6n 470	AGElectronica RC-470E/1/4
R17	Resistencia de carb6n 1k	AGElectronica RC-1K/1/4
R18	Resistencia de carb6n 470	Steren R470 1/4
R19	Resistencia de carb6n 470	Steren R470 1/4
Re1	Relevador DS2E	AGElectronica DS2E-M-DC12V
Re2	Relevador DS2E	AGElectronica DS2E-M-DC12V
Re3	Relevador DS2E	AGElectronica DS2E-M-DC12V
TP1	Punta de prueba	AGElectronica HEADER-1
TP2	Punta de prueba	AGElectronica HEADER-1
U1	Tarjeta de adquisici6n NI USB-6211	National Instruments
U2	Circuito integrado NE5532	AGElectronica NE5532P
U3	Circuito integrado LM381	AGElectronica LM381AN
U4	Regulador 7812	AGElectronica L7812CV
U5	Regulador 7815	AGElectronica L7812CV
U6	Regulador 7915	AG Electronica L79L05ACZ

Tabla 2. Lista de partes.

Anexo D Código fuente

```
// PerfilICATDlg.h: archivo de encabezado
//

#pragma once
#include "ntgraphctrl11.h"

#include "NIDAQmx.h"
#include "afxcmn.h"
#include "afx.h"

// Cuadro de diálogo de CPerfilICATDlg
class CPerfilICATDlg : public CDialogEx
{
// Construcción
public:
    CPerfilICATDlg(CWnd* pParent = NULL);    // Constructor estándar

// Datos del cuadro de diálogo
    enum { IDD = IDD_PERFILICAT_DIALOG };

    protected:
        virtual void DoDataExchange(CDataExchange* pDX);    // Compatibilidad con DDX/DDV

// Implementación
protected:
    HICON m_hIcon;

    // Funciones de asignación de mensajes generadas
    virtual BOOL OnInitDialog();
    afx_msg void OnSysCommand(UINT nID, LPARAM lParam);
    afx_msg void OnPaint();
    afx_msg HCURSOR OnQueryDragIcon();
    DECLARE_MESSAGE_MAP()
public:
    //
    UINT m_idEvent;
    //
    UINT m_uResolution;
    afx_msg void OnBnIniciar();
    afx_msg void OnBnTerminar();
    //
    afx_msg LRESULT OnMessageMeasureLoop(WPARAM wParam, LPARAM lParam);
    CNTgraphctrl11 m_GraphPrimario;
    TaskHandle m_AI0I1;
    TaskHandle m_DO;
    TaskHandle m_DI;
    UInt8 m_data[4];
    CString m_Fase;
    bool m_motor;
    int m_indice;
    CSliderCtrl m_sliderValue;
    afx_msg void OnHScroll(UINT nSBCode, UINT nPos, CScrollBar* pScrollBar);
    afx_msg void OnBnHorario();
    afx_msg void OnBnAntiHorario();
    afx_msg void OnBnParo();
    float64 minimo;
    float64 maximo;
    CStdioFile f;
```

```

        int m_Timer;
        afx_msg void OnTimer(UINT_PTR nIDEvent);
        float m_tiempo;
};

// PerfilICATDlg.cpp: archivo de implementación
//

#include "stdafx.h"
#include "PerfilICAT.h"
#include "PerfilICATDlg.h"
#include "afxdialogex.h"

#include "math.h"
// #include "Mmsystem.h"
#include "afxmsg_.h"

#define pi 3.1415926535897932384626433832795

#ifdef _DEBUG
#define new DEBUG_NEW
#endif

// Cuadro de diálogo CAboutDlg utilizado para el comando Acerca de

class CAboutDlg : public CDialogEx
{
public:
    CAboutDlg();

// Datos del cuadro de diálogo
    enum { IDD = IDD_ABOUTBOX };

    protected:
        virtual void DoDataExchange(CDataExchange* pDX);    // Compatibilidad con DDX/DDV

// Implementación
protected:
    DECLARE_MESSAGE_MAP()
};

CAboutDlg::CAboutDlg() : CDialogEx(CAboutDlg::IDD)
{
}

void CAboutDlg::DoDataExchange(CDataExchange* pDX)
{
    CDialogEx::DoDataExchange(pDX);
}

BEGIN_MESSAGE_MAP(CAboutDlg, CDialogEx)
END_MESSAGE_MAP()

// Cuadro de diálogo de CPerfilICATDlg

CPerfilICATDlg::CPerfilICATDlg(CWnd* pParent /*=NULL*/)
    : CDialogEx(CPerfilICATDlg::IDD, pParent)
//      , m_idEvent(0)

```

```

//      , m_uResolution(0)
//      , m_Fase(_T(""))
//      , m_motor(false)
//      , minimo(0)
//      , maximo(0)
//      , m_Timer(0)
//      , m_tiempo(0)
{
    m_hIcon = AfxGetApp()->LoadIcon(IDR_MAINFRAME);
}

void CPerfilICATDlg::DoDataExchange(CDataExchange* pDX)
{
    CDialogEx::DoDataExchange(pDX);
    DDX_Control(pDX, IDC_NTGRAPHCTRL2, m_GraphPrimario);
    DDX_Text(pDX, IDC_EDIT4, m_Fase);
    DDX_Control(pDX, IDC_SLIDER1, m_sliderValue);
}

BEGIN_MESSAGE_MAP(CPerfilICATDlg, CDialogEx)
    ON_WM_SYSCOMMAND()
    ON_WM_PAINT()
    ON_WM_QUERYDRAGICON()
    ON_BN_CLICKED(IDC_BUTTONINICIAR, &CPerfilICATDlg::OnBnIiniciar)
    ON_BN_CLICKED(IDC_BUTTONTERMINAR, &CPerfilICATDlg::OnBnTerminar)
    ON_WM_HSCROLL()
    ON_WM_HSCROLL()
    ON_BN_CLICKED(IDC_BUTTONHORARIO, &CPerfilICATDlg::OnBnHorario)
    ON_BN_CLICKED(IDC_BUTTONANTOHORARIO, &CPerfilICATDlg::OnBnAntiHorario)
    ON_BN_CLICKED(IDC_BUTTONPARO, &CPerfilICATDlg::OnBnParo)
    ON_WM_TIMER()
END_MESSAGE_MAP()

// Controladores de mensaje de CPerfilICATDlg

BOOL CPerfilICATDlg::OnInitDialog()
{
    CDialogEx::OnInitDialog();

    // Agregar el elemento de menú "Acerca de..." al menú del sistema.

    // IDM_ABOUTBOX debe estar en el intervalo de comandos del sistema.
    ASSERT((IDM_ABOUTBOX & 0xFFF0) == IDM_ABOUTBOX);
    ASSERT(IDM_ABOUTBOX < 0xF000);

    CMenu* pSysMenu = GetSystemMenu(FALSE);
    if (pSysMenu != NULL)
    {
        BOOL bNameValid;
        CString strAboutMenu;
        bNameValid = strAboutMenu.LoadString(IDS_ABOUTBOX);
        ASSERT(bNameValid);
        if (!strAboutMenu.IsEmpty())
        {
            pSysMenu->AppendMenu(MF_SEPARATOR);
            pSysMenu->AppendMenu(MF_STRING, IDM_ABOUTBOX, strAboutMenu);
        }
    }
}

```

```

        // Establecer el icono para este cuadro de diálogo. El marco de trabajo realiza
esta operación
        // automáticamente cuando la ventana principal de la aplicación no es un cuadro de
diálogo
        SetIcon(m_hIcon, TRUE);           // Establecer icono grande
        SetIcon(m_hIcon, FALSE);        // Establecer icono pequeño

        // TODO: agregar aquí inicialización adicional
        // Inicia grafica
        m_GraphPrimario.SetPlotAreaColor(RGB(255,255,255));
        m_GraphPrimario.SetGridColor(RGB(0,225,125));
        m_GraphPrimario.SetShowGrid(TRUE);
        m_GraphPrimario.SetFrameStyle(1);
        m_GraphPrimario.SetCaption(_T("Perfil"));
        m_GraphPrimario.SetXLabel(_T("Tiempo(s)"));
        m_GraphPrimario.SetYLabel(_T("Desplazamiento(um)"));

// Inicia entradas analógicas
        DAQmxCreateTask("", &m_AI0I1);
        DAQmxCreateAIVoltageChan(m_AI0I1, "Dev1/ai0:1", "", DAQmx_Val_RSE, -1.0,
1.0, DAQmx_Val_Volts, NULL);
        DAQmxCfgSampClkTiming(m_AI0I1, "", 125000.0, DAQmx_Val_Rising, DAQmx_Val_ContSamps, 128)
;
        DAQmxStartTask(m_AI0I1);

// Inicia entradas digitales
        DAQmxCreateTask("", &m_DI);
        DAQmxCreateDIDChan(m_DI, "Dev1/port0", "", DAQmx_Val_ChannelsForAllLines);
        DAQmxStartTask(m_DI);

// Inicia salidas digitales
        m_data[0]=0;
        m_data[1]=0;
        m_data[2]=0;
        m_data[3]=0;
        DAQmxCreateTask("", &m_DO);
        DAQmxCreateDOChan(m_DO, "Dev1/port1", "", DAQmx_Val_ChannelsForAllLines);
        DAQmxStartTask(m_DO);
        DAQmxWriteDigitalLines(m_DO, 1, 1, 10.0, DAQmx_Val_GroupByChannel, m_data, NULL, NULL);

// Inicia timer
        m_Timer=SetTimer(1, 250, NULL);

// Inicia velocidad de desplazamiento
        m_sliderValue.SetRange(1, 2, TRUE);
        m_sliderValue.SetPos(2);

// Inicia botones
        GetDlgItem(IDC_BUTTONTERMINAR)->EnableWindow(false);

// Inicia indicador
        CProgressCtrl* pPalpador=(CProgressCtrl*) GetDlgItem(IDC_PROGRESSDESPLAZAMIENTO);
        pPalpador->SetRange(0, 800);
        pPalpador->SetPos(0);

        UpdateData(FALSE);

```

```

        return TRUE; // Devuelve TRUE a menos que establezca el foco en un control
    }

void CPerfilICATDlg::OnSysCommand(UINT nID, LPARAM lParam)
{
    if ((nID & 0xFFF0) == IDM_ABOUTBOX)
    {
        CAboutDlg dlgAbout;
        dlgAbout.DoModal();
    }
    else
    {
        CDialogEx::OnSysCommand(nID, lParam);
    }
}

// Si agrega un botón Minimizar al cuadro de diálogo, necesitará el siguiente código
// para dibujar el icono. Para aplicaciones MFC que utilicen el modelo de documentos y
// vistas,
// esta operación la realiza automáticamente el marco de trabajo.

void CPerfilICATDlg::OnPaint()
{
    if (IsIconic())
    {
        CPaintDC dc(this); // Contexto de dispositivo para dibujo

        SendMessage(WM_ICONERASEBKGND, reinterpret_cast<WPARAM>(dc.GetSafeHdc()),
0);

        // Centrar icono en el rectángulo de cliente
        int cxIcon = GetSystemMetrics(SM_CXICON);
        int cyIcon = GetSystemMetrics(SM_CYICON);
        CRect rect;
        GetClientRect(&rect);
        int x = (rect.Width() - cxIcon + 1) / 2;
        int y = (rect.Height() - cyIcon + 1) / 2;

        // Dibujar el icono
        dc.DrawIcon(x, y, m_hIcon);
    }
    else
    {
        CDialogEx::OnPaint();
    }
}

// El sistema llama a esta función para obtener el cursor que se muestra mientras el
// usuario arrastra
// la ventana minimizada.
HCURSOR CPerfilICATDlg::OnQueryDragIcon()
{
    return static_cast<HCURSOR>(m_hIcon);
}

void CPerfilICATDlg::OnBnIniciar()
{
    // TODO: Agregue aquí su código de controlador de notificación de control

```

```

CFileDialog dlg(FALSE, NULL, NULL, OFN_HIDEREADONLY | OFN_OVERWRITEPROMPT, L"Text
files (*.txt)|*.txt||", this);
if(dlg.DoModal()==IDOK)
{
    f.Open(dlg.GetPathName(), CFile::modeCreate | CFile::modeWrite);
    CString medicion;
    medicion.Format(_T("Desplazamiento (um), Tiempo (s)\n"));
    f.WriteString(medicion);
    m_GraphPrimario.ClearGraph();
    GetDlgItem(IDC_BUTTONINICIAR)->EnableWindow(false);
    GetDlgItem(IDC_BUTTONTERMINAR)->EnableWindow(true);
    m_motor=true;
    m_tiempo=0;
    minimo=100000;
    maximo=-100000;
}
else
{
}
}

void CPerfilICATDlg::OnBnTerminar()
{
    // TODO: Agregue aquí su código de controlador de notificación de control
    GetDlgItem(IDC_BUTTONINICIAR)->EnableWindow(true);
    GetDlgItem(IDC_BUTTONTERMINAR)->EnableWindow(false);

    // Para motor
    m_data[0]=0;
    m_data[1]=0;
    DAQmxWriteDigitalLines(m_DO,1,1,10.0,DAQmx_Val_GroupByChannel,m_data,NULL,NULL);
    m_motor=false;

    f.Close();
}

void CPerfilICATDlg::OnHScroll(UINT nSBCode, UINT nPos, CScrollBar* pScrollBar)
{
    // TODO: Agregue aquí su código de controlador de mensajes o llame al valor
    predeterminado

    if (pScrollBar == (CScrollBar *)&m_sliderValue)
    {
        int value = m_sliderValue.GetPos();
        if(value==2) m_data[2]=0;
        else m_data[2]=1;

        DAQmxWriteDigitalLines(m_DO,1,1,10.0,DAQmx_Val_GroupByChannel,m_data,NULL,NULL);
    }
    else
    {
        CDialog::OnHScroll(nSBCode, nPos, pScrollBar);
    }
}

void CPerfilICATDlg::OnBnHorario()
{
    m_data[0]=1;

```

```

        m_data[1]=1;
        // DAQmx Write Code
        DAQmxWriteDigitalLines(m_D0,1,1,10.0,DAQmx_Val_GroupByChannel,m_data,NULL,NULL);
    }

void CPerfilICATDlg::OnBnAntiHorario()
{
    m_data[0]=1;
    m_data[1]=0;
    // DAQmx Write Code
    DAQmxWriteDigitalLines(m_D0,1,1,10.0,DAQmx_Val_GroupByChannel,m_data,NULL,NULL);
}

void CPerfilICATDlg::OnBnParo()
{
    m_data[0]=0;
    m_data[1]=0;
    // DAQmx Write Code
    DAQmxWriteDigitalLines(m_D0,1,1,10.0,DAQmx_Val_GroupByChannel,m_data,NULL,NULL);
}

void CPerfilICATDlg::OnTimer(UINT_PTR nIDEvent)
{
    // TODO: Agregue aquí su código de controlador de mensajes o llame al valor
    predeterminado
    float64 m_fCaptura[256];
    float64 primario[128], secundario[128], operacion[1];
    float64 Magnitud, acumulador, AcumuladorMag;
    uInt32 dataIn;
    CString cadena;
    int32 iRead, i, n, l, indice, contador;

    AcumuladorMag=0;
    for(contador=0; contador<200; contador++)
    {
        // Captura señal del primario ai0 y secundario ai1 (5 muestras/periodo X 25
        periodos y 2 canales)

        DAQmxReadAnalogF64(m_AI0I1,128,10.0,DAQmx_Val_GroupByScanNumber,m_fCaptura,256,&iRead,NULL);

        indice=0;
        for(i=0; i<(2*iRead); i++)
        {
            primario[indice]=m_fCaptura[i];
            i++;
            secundario[indice]=m_fCaptura[i];
            indice++;
        }

        // Correlacion
        for(l=0; l<1; l++)
        {
            acumulador=0;
            for(n=1; n<(iRead-1); n++)
            {
                acumulador=acumulador+(primario[n]*secundario[n-1]);
            }
        }
    }
}

```

```

        operacion[1]=acumulador;
    }

    AcumuladorMag+=operacion[0];
}
Magnitud=(AcumuladorMag/200)*14.1343;
// Magnitud=(AcumuladorMag/200);
m_Fase.Format(_T("%3.2f"),Magnitud);
CProgressCtrl* pPalpador=(CProgressCtrl*) GetDlgItem(IDC_PROGRESSDESPLAZAMIENTO);
int posicion;
if(Magnitud>400)
{
    posicion=800;
}
else if(Magnitud<-400)
{
    posicion=0;
}
else
{
    posicion=(int)Magnitud+400;
}
pPalpador->SetPos(posicion);
UpdateData(false);

if(m_motor)
{
    if(Magnitud>maximo) maximo=Magnitud;
    if(Magnitud<minimo) minimo=Magnitud;

    m_GraphPrimario.SetElementLineColor(RGB(0,0,0));
    m_GraphPrimario.SetRange(0,m_tiempo+1,minimo-.1,maximo+.1);
    m_GraphPrimario.PlotXY(m_tiempo,Magnitud,0);

    CString medicion;
    medicion.Format(_T("%4.2f, %4.2f\n"), Magnitud, m_tiempo);
    f.WriteString(medicion);
    m_tiempo=m_tiempo+(float)0.25;
}

// Desplazamiento
if(m_motor)
{
    DAQmxReadDigitalU32(m_DI,1,10.0,DAQmx_Val_GroupByChannel,&dataIn,1,&iRead,NULL);

    if(dataIn==2)
    {
        // Gira horario
        m_data[0]=1;
        m_data[1]=1;

    }

    DAQmxWriteDigitalLines(m_DO,1,1,10.0,DAQmx_Val_GroupByChannel,m_data,NULL,NULL);
    }
    else
    {
        // Gira antihorario
    }
}

```

```
        m_data[0]=1;
        m_data[1]=0;

        DAQmxWriteDigitalLines(m_D0,1,1,10.0,DAQmx_Val_GroupByChannel,m_data,NULL,NULL);
    }
    else
    {
    }

    CDialogEx::OnTimer(nIDEvent);
}
```

Sistema electrónico para un perfilómetro

Benjamín Valera Orozco, Gerardo Antonio Ruíz Botello

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología
Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México
benjamin.valera@icat.unam.mx, gerardo.ruiz@icat.unam.mx

RESUMEN

La rugosidad mecánica es un parámetro que indica el nivel de acabado de un tipo de maquinado. Generalmente es utilizado como parámetro de control de calidad en la elaboración de piezas mecánicas. Existen diversos instrumentos y técnicas que se pueden utilizar para determinar este parámetro. En particular, en los laboratorios de metrología dimensional se utilizan instrumentos conocidos con el nombre de “perfilómetro” para determinar diversos parámetros de rugosidad. En el presente trabajo se describe el diseño e implementación de un sistema electrónico y de programación para el perfilómetro comercial Federal 400, el cual reemplaza a la consola original con la cual se comercializaba el equipo y que ha sido sustituida debido a su deterioro normal ocasionado por el paso del tiempo. El sistema electrónico desarrollado permite la adquisición del desplazamiento generado por el transductor micrométrico del perfilómetro original. Este mismo sistema impulsa el motor de desplazamiento horizontal en el dispositivo de rastreo del equipo original. El sistema es complementado con un programa para PC expofeso en donde se implementan los algoritmos de control, medición e interface de operación. Se describen el diseño y construcción del circuito electrónico desarrollado y la programación de los algoritmos de medición y control. Se presentan los resultados obtenidos en la medición de patrones de rugosidad propios del perfilómetro

PALABRAS CLAVE: Metrología dimensional, rugosidad, procesamiento de señales.

1 INTRODUCCIÓN

La rugosidad es un parámetro que debe ser inspeccionado en la industria metal mecánica para asegurar el acabado de piezas manufacturadas. Un ejemplo de ello es el acabado superficial en los pistones de motores a combustión. Está comprobado que cuando estas superficies tienen acabados más finos se utiliza mejor la potencia disponible en la transmisión de movimiento. Existen diversas técnicas para inspeccionar los acabados superficiales pero en particular para la medición de rugosidad lo más común es emplear aparatos de medición conocidos como perfilómetros. Un perfilómetro en esencia es un aparato de desplazamiento en un eje horizontal sobre el cual se monta un transductor de desplazamiento o LVDT (Linear Variable Differential Transformer, Transformador Diferencial Variable Lineal). El LVDT registra las pequeñas imperfecciones dimensionales de la superficie sobre la trayectoria horizontal por la cual viaja, generalmente micrométricas. Con este aparato se obtiene una gráfica de desplazamiento contra el tiempo conocida como perfil. La gráfica puede ser analizada numéricamente para obtener

parámetros estandarizados de rugosidad como son la rugosidad promedio, la rugosidad cuadrática media, la rugosidad ponderada por diez puntos, etc. En el Laboratorio de Metrología del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM se cuenta con el perfilómetro Federal 400, mostrado en la figura 1 [1], el cual data su construcción del año de 1985.



Figura 1. Perfilómetro Federal 400.

A la fecha, su deterioro se ha manifestado en fallas relacionadas con la consola de operación original construida sobre la base de la arquitectura de las primeras computadoras personales XT. Debido a estas fallas y a la oportunidad de implementar una nueva consola de operación con base en circuitos electrónicos modernos y técnicas de procesamiento digital de señales, se decidió la rehabilitación del mencionado perfilómetro reemplazando su consola original y utilizando exclusivamente el mecanismo de desplazamiento horizontal y el transductor LVDT. En este trabajo se describe el sistema electrónico desarrollado en este proceso de rehabilitación con base en una tarjeta de adquisición de señales y técnicas de procesamiento digital para extraer la información analógica del LVDT y controlar el desplazamiento del mecanismo. Se utiliza la tarjeta de adquisición de señales es la NI-USB6211 especificada para discretizar señales analógicas a 250000 muestras/s [2]. Además posee entradas y salidas digitales de propósito general. Como parte de la metodología adoptada, la tarjeta de adquisición digitaliza las señales senoidales de 25000 Hz provenientes de los devanados primario y secundario del LVDT para, mediante la correlación de ambas señales [3], extraer la información de desplazamiento. Por otra parte el sistema electrónico se complementa con los circuitos electrónicos para mover el motor de desplazamiento de fase que impulsa el mecanismo de desplazamiento horizontal.

2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La consola de operación del instrumento mostrado en la figura 1 se reemplaza por el sistema electrónico y de programación que se muestra en la figura 2.

En la figura 2 el sistema electrónico está constituido sobre la base de la tarjeta de adquisición de datos NI USB6211 que realiza las siguientes funciones:

- Digitaliza las formas de onda senoidales del LVDT: primario, V_0 y secundario, V_1 , para posteriormente extraer la información del desplazamiento micrométrico.
- Obtiene las posiciones límite del mecanismo de desplazamiento: izquierda y derecha.
- Genera las señales para mover el mecanismo de desplazamiento con dos distintas velocidades: lento y rápido.

- Se comunica mediante el puerto USB con la interface de usuario, medición y control en la PC.

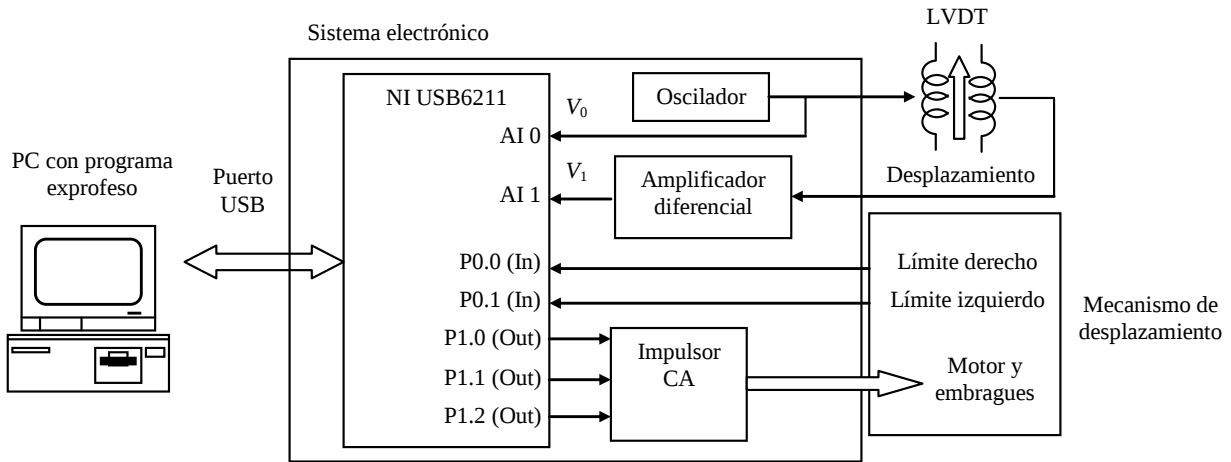


Figura 2. Esquema general del sistema electrónico y de programación para el perfilómetro.

2.1 Componente electrónica

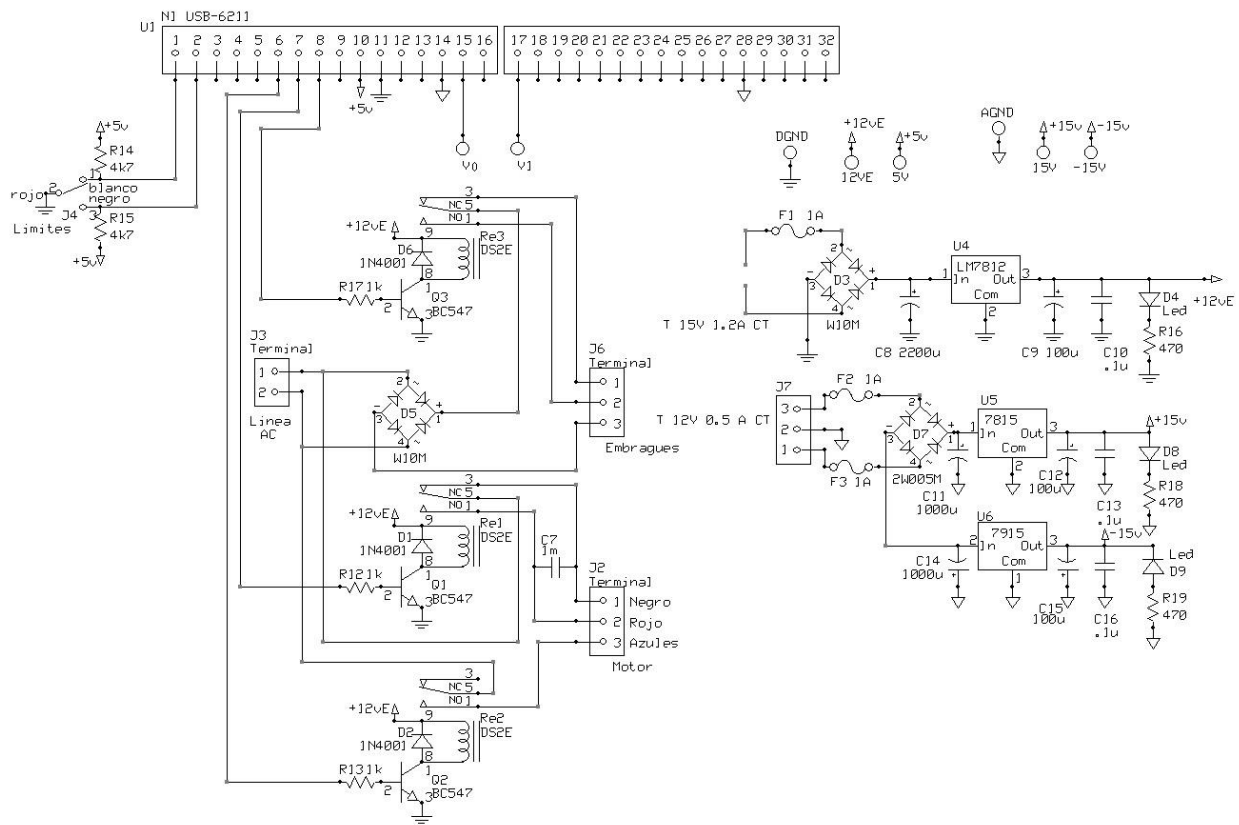


Figura 3. Diagrama esquemático de la componente electrónica.

La figura 3 muestra el circuito electrónico desarrollado. Con referencia a la figura 2, en la figura 3 se muestra que el control del motor de desplazamiento de fase en el mecanismo de desplazamiento horizontal es controlado mediante los relevadores Re1 y Re2 que conmutan la energía de la línea AC de 127V hacia los dos devanados del motor. Con esto se consigue alternar la dirección de giro y el sentido de desplazamiento. Las salidas digitales de control en la NI USB 6211, P1.0 y P1.1, son acopladas a los relevadores mediante los transistores Q1 y Q2. La velocidad del mecanismo de desplazamiento horizontal se controla mediante un juego de engranes con dos posiciones. Los engranes son acoplados a la flecha del motor mediante un solenoide de 127V DC que es impulsado por el relevador Re3 y su respectivo acoplamiento mediante el transistor Q3 a la salida digital de control P1.2.

Por otra parte, los límites derecho e izquierdo del mecanismo de desplazamiento permiten acotar la trayectoria y están constituidos por un interruptor de dos posiciones que es registrado en las entradas digitales P0.0 y P0.1 de la NI USB 6211.

Las señales senoidales del LVDT, V_0 y V_1 son digitalizadas en las entradas analógicas AI0 y AI1 de la NI USB 6211.

Se implementaron dos fuentes de voltaje: una sencilla de 12 VDC para energizar al circuito electrónico y una doble de ± 15 VDC para energizar el circuito oscilador y amplificador diferencial que se retomó del equipo original.

2.2 Componente de programación

La captura de pantalla de la figura 4 muestra la interface de operación desarrollada en Visual C++ 2012 para la presente aplicación que también contiene los algoritmos de medición y de control.

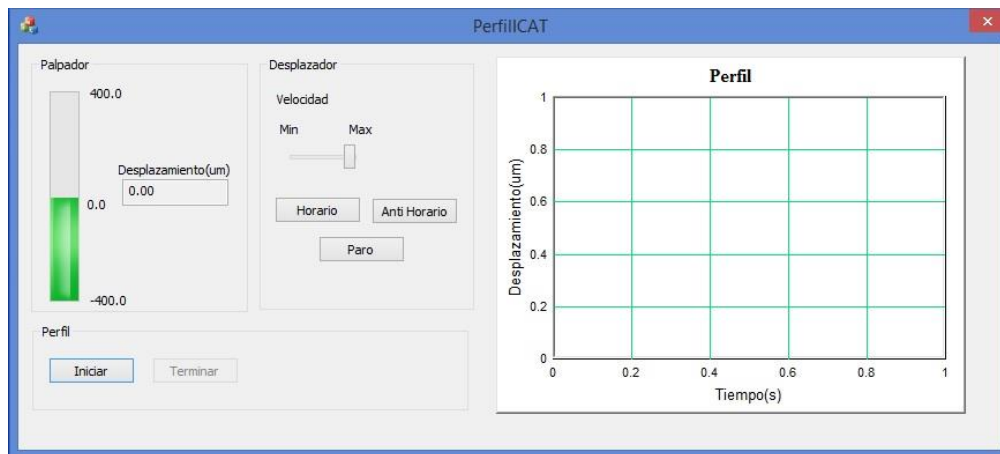


Figura 4. Interface de operación.

En la figura 4 se aprecian 4 zonas de la pantalla con la siguiente funcionalidad:

- **Palpador.** Se muestra de manera analógica y numérica el valor en tiempo real del desplazamiento en el LVDT.
- **Desplazador.** Contiene los controles para mover el mecanismo de desplazamiento horizontal.
- **Perfil (botones).** Permite iniciar y terminar una corrida de medición de perfil.

- Perfil (gráfica). Despliega la gráfica de perfil, es decir, desplazamiento del LVDT contra tiempo.

Los algoritmos de control y medición se ejecutan sobre la base de un temporizador que cada 250ms genera una lectura de desplazamiento en micrómetros. Para generar una lectura de desplazamiento, cada 250 ms se ejecuta el algoritmo de la figura 5.

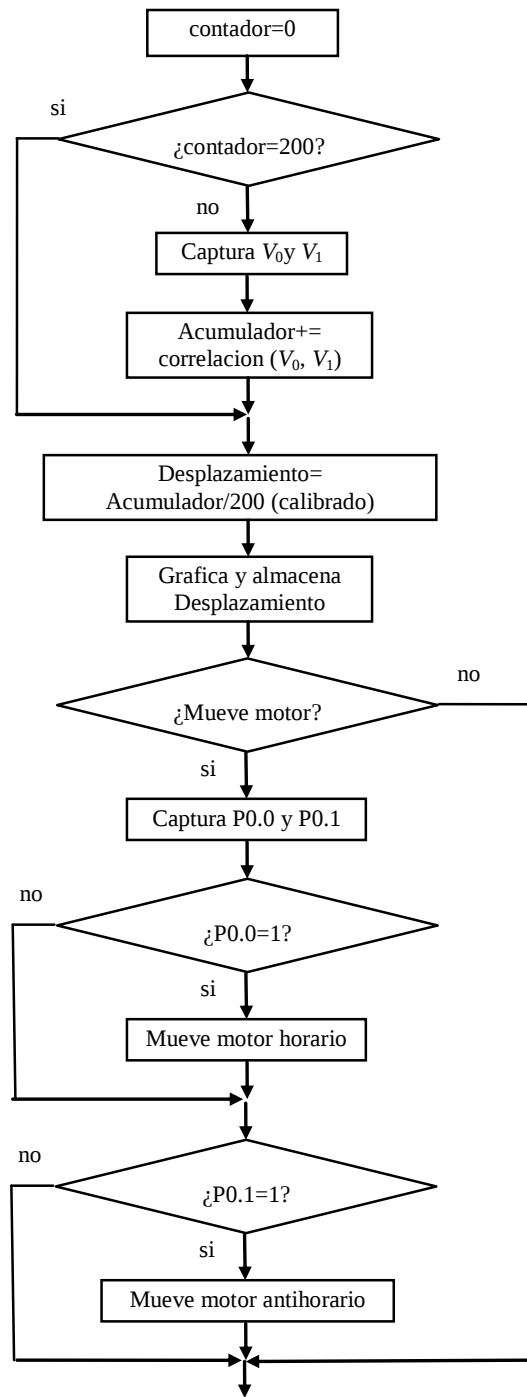


Figura 5. Algoritmo de medición y control.

La función de correlación de secuencias discretas es una formula ampliamente utilizada en el ámbito del procesamiento digital de señales [3]. La calibración en la lectura de desplazamiento se realizó con un ajuste por mínimos cuadrados a la ecuación de una recta.

3 RESULTADOS

Los resultados obtenidos están relacionados principalmente con el desempeño cuantitativo del instrumento y los datos cualitativos de las gráficas de perfil.

3.1 Resultados cualitativos

Se diseñó, construyó y programó el sistema de medición mostrado en la figura 6. Su desempeño fue el esperado y se mantiene la funcionalidad del equipo original en una interface de operación de fácil uso.

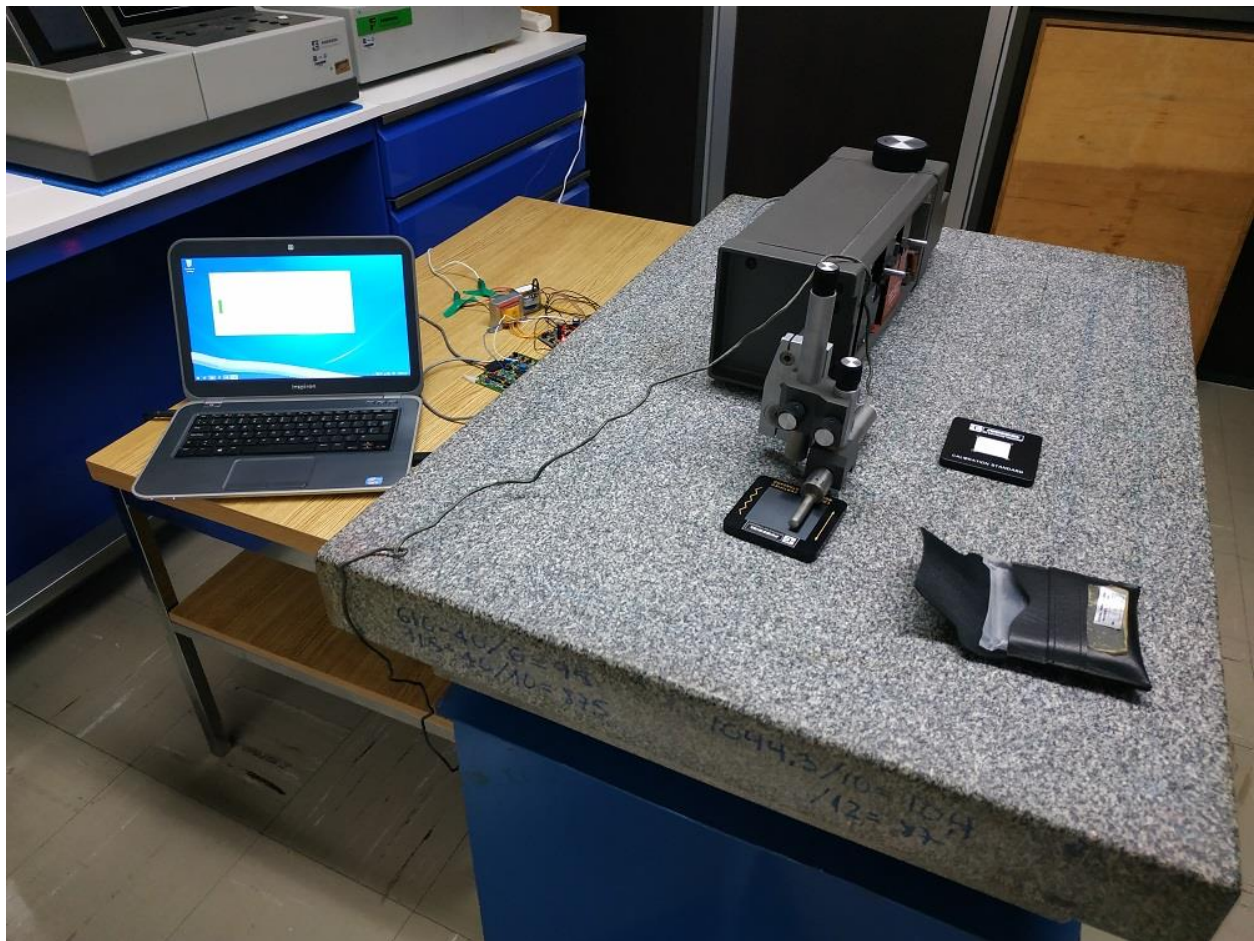


Figura 6. Sistema electrónico para el perfilómetro.

3.2 Resultados cuantitativos

Se comprobó el desempeño cualitativo del instrumento al medir dos patrones de rugosidad: pulso y diente de sierra. La figura 7 muestra las gráficas obtenidas en excel.

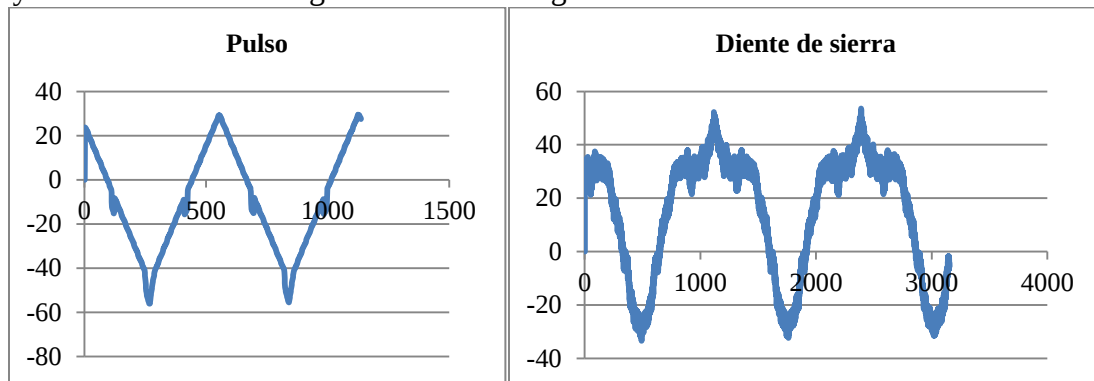


Figura 7. Patrones de rugosidad pulso y diente de sierra.

La periodicidad en las gráficas de la figura 7 está relacionada con los diversos recorridos de ida y vuelta que se realizaron en el procedimiento de medición. De esta manera una pendiente hacia arriba corresponde a la dirección de ida en el mecanismo de desplazamiento y una pendiente hacia abajo corresponde a la dirección de vuelta.

4 CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un sistema electrónico para la rehabilitación de un perfilómetro comercial que presentaba fallas ocasionadas por el envejecimiento. Se programó una aplicación conteniendo la interface de operación del equipo así como los algoritmos de control y medición. Las especificaciones alcanzadas en el nuevo equipo son las siguientes:

- Alcance en el desplazamiento longitudinal: 100mm
- Velocidad de desplazamiento longitudinal: 2.5mm/s y 0.25mm/s.
- Alcance del palpador LVDT: $\pm 400\mu\text{m}$.
- División mínima del palpador LVDT: $0.01\mu\text{m}$.
- Estabilidad del palpador LVDT: $\pm 0.02\mu\text{m}$

REFERENCIAS

- [1] Federal Products Corporation. Operating Instructions: Surfanalyzer System 400. Rhode Island: Federal 1985.
- [2] National Instruments. DAQ M Series: NI USB 621x User Manual. USA: National Instruments 2007.
- [3] Proakis JG, Manolakis DG. Digital Signal Processing. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall 1996.