

# Análisis de las Propiedades Plásticas del Carbón mediante Instrumentación Virtual

Fabián R. Jiménez López, MSc<sup>1</sup>, Marco Ardila Barragán, PhD (c)<sup>2</sup>, e Ilber Ruge Ruge, MSc<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación I<sup>2</sup>E – Escuela de Ingeniería Electrónica – Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia, fabian.jimenez02@uptc.edu.co, ilber.ruge@uptc.edu.co

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Carbones y Carboquímica – Escuela de Ingeniería Metalúrgica – Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia, marco.ardila@uptc.edu.co

*Abstract– This paper presents the design and implementation of a virtual instrumentation system for equipment plastometer and dilatometer to determine the degree of oxidation of coal samples by analyzing its plastic properties. The experimental design and implementation of the sensing, conditioning and acquisition system of the variables that define the plastic properties of the coal supplied by the plastometer and dilatometer and then the design of the virtual instrumentation through the use of the LabVIEW™ platform with the functions of Capture, pre-processing, storage, visualization and identification of the properties of the coals for their characterization. The electronic instrumentation system implemented was tested using three coal samples previously collected and selected from different coal mines in the Department of Boyacá in Colombia, where satisfactory results were obtained in terms of plasticity and dilatation to determine their application. The implemented prototype applied virtual instrumentation techniques for the measurement of temperature variables and linear displacement of position proportional to the dilation and plasticity of coal using digital signal processing algorithms with benefits such as safety, portability, adaptability and reliability to estimate the rheological properties of the samples coal tested and establish their quality and industrial application.*

*Keywords-- Plastic Properties of Coal, Virtual Instrumentation, Digital Signal Processing, Data Acquisition Systems.*

## I. INTRODUCCIÓN

El comportamiento plástico de un carbón se afecta por muchos factores entre los cuales se tienen: rango, composición petrográfica, velocidad de calentamiento, tamaño de partícula, presión, atmósfera, contenido de hidrógeno y oxidación [1]. La determinación de este comportamiento plástico se hace mediante ensayos establecidos por la American Society of Testing Materials (ASTM) como lo son el ensayo de dilatometría que indica el cambio de volumen de una muestra (ASTM D5515) [2] y el ensayo de plastometría que determina la fluidez (ASTM D2639) [3].

El desarrollo de la plasticidad de los carbones involucra cambios físicos y químicos en el carbón [4], que han sido objeto de varios trabajos de investigación [5-11] intentando explicar este comportamiento y que puede describirse por tres reacciones consecutivas.

Las propiedades de dilatación y plasticidad del carbón ante el efecto de oxidación requieren ser analizadas mediante protocolos estandarizados realizados en equipos especializados de ensayo como lo son el dilatómetro y el plastómetro. El principio de operación de estos instrumentos se fundamenta en el sometimiento del carbón a variaciones de

temperatura controlada para determinar su índice de expansión o contracción y su índice de fluidez, fundamentales para identificar la relación de estas características con la oxidación del carbón.

En este sentido, el laboratorio de carbones de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Uptc) cuenta con estos dos equipos los cuales demandan su modernización mediante la adaptación e incorporación de tecnología para mejorar y hacer más eficiente la medición, adquisición y análisis de las propiedades de los carbones. Este documento describe la actualización de tecnologías de sensado, acondicionamiento, adquisición y monitoreo de señales de los equipos plastómetro y dilatómetro con el propósito de medir las características reológicas de muestras de carbón de la Provincia Centro del Departamento de Boyacá que permitan establecer su calidad y aplicación mediante el uso de instrumentación virtual.

Este trabajo se desarrolla de la siguiente manera: a continuación se establece una introducción a los equipos de medida de dilatación y plasticidad de carbones, luego se describe el diseño experimental de la arquitectura de sensado, acondicionamiento y adquisición de señales utilizada para medir las propiedades plásticas de los carbones en los equipos plastómetro y dilatómetro. Posteriormente se contempla el diseño de la instrumentación virtual usando la plataforma de LabVIEW™ y finalmente se realiza el análisis de los resultados de las propiedades plásticas de muestras de carbón previamente seleccionadas y recolectadas para su caracterización para sus diferentes usos tecnológicos.

### A. Análisis Reológicos

La reología del carbón estudia el fenómeno de la deformación y plasticidad cuando los carbones se someten a calentamiento [11].

#### 1. Plastometría

Este método se utiliza para obtener una medida semicuantitativa de las propiedades plásticas de un carbón o mezclas de carbones. La prueba se realiza en un plastómetro que actúa como un viscosímetro adaptado a la medida de viscosidades elevadas que presentan estos materiales en el estado “plástico”. El modelo más usado es el plastómetro de Gieseler, que dispone de un crisol metálico sumergido en un baño de aleación de plomo-estaño que permite calentar uniformemente, en ausencia de aire, aproximadamente 5 gramos de carbón finamente molido [3].

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2017.1.1.383>

ISBN: 978-0-9993443-0-9

ISSN: 2414-6390

Dentro de la masa de carbón se encuentra incrustado un pequeño agitador en forma de aspa al cual se le aplica un torque constante. Este torque es suficientemente leve para no hacer girar el agitador cuando el carbón aun es sólido. La velocidad de calentamiento de la muestra generalmente es de  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  y cuando se llega a cierta temperatura, que es característica para un carbón con propiedades aglomerantes (generalmente comprendida entre  $350$  y  $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), el agitador comienza a girar lentamente a medida que la temperatura se incrementa y la masa de carbón adquiere un carácter plástico más fuerte. La plasticidad alcanza un máximo valor para temperaturas entre  $450$  a  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$  y disminuye a continuación bastante rápido. Después de unos minutos, el agitador se detiene definitivamente, alrededor de los  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

En la Fig. 1 se muestra una curva típica de plastometría de un carbón coquizable indicando las temperaturas a las cuales se inicia la etapa plástica (T1), alcanza su máximo (T2) y finaliza (T3). De este ensayo también puede obtenerse la máxima fluidez expresada como las veces que gira el dial en un minuto (ddpm – dial divisions per minute) [3].

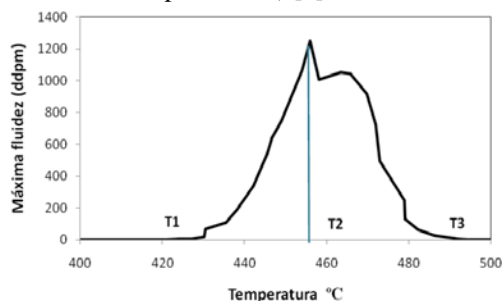


Fig. 1. Curva Típica de Fluidez de un Carbón. T1: Temperatura de Ablandamiento, T2: Temperatura de Máxima Fluidez, T3: Temperatura de Resolidificación.

## 2. Dilatometría

El ensayo dilatométrico mide el cambio de volumen que acompaña la etapa plástica de los carbones. Para determinar este comportamiento, se utiliza principalmente el dilatómetro Audibert – Arnou que consiste en preparar un lápiz de carbón y determinar los cambios de la altura del lápiz de carbón en un tubo de retorta durante un ciclo de calentamiento prescrito [2].

La medición de los cambios del desplazamiento del lápiz cilíndrico aglomerado (hecho a partir de la muestra de carbón) en función de la temperatura de calentamiento generan una curva típica de dilatación. Se obtiene una curva típica como la mostrada en la Fig. 2, en la que se indica la temperatura de ablandamiento (T1), la temperatura de máxima contracción (T2), porcentaje de contracción (a), temperatura de máxima dilatación (T3) y porcentaje de máxima dilatación (b).

La contracción es el resultado del ablandamiento de los granos de carbón que se aglutinan unos con otros y se comprimen con el peso del émbolo; la liberación de las materias volátiles compensa este efecto y provoca un aumento del volumen inicial dando como resultado la dilatación.

La amplitud de la contracción, de la dilatación y las temperaturas a las cuales tienen lugar, caracterizan las

propiedades de dilatación de los carbones para predecir o explicar el comportamiento de un carbón o en otros procesos tales como gasificación, licuefacción y combustión.

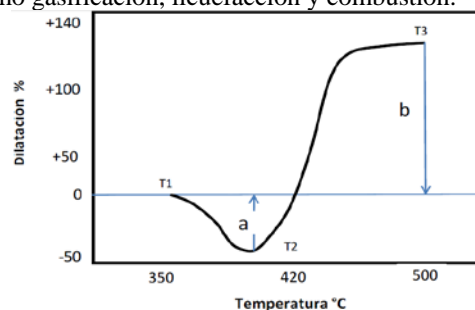


Fig. 2. Curva Típica de Prueba Dilatométrica de un Carbón. T1: Temperatura de Ablandamiento, T2: Temperatura de Máxima Contracción, T3: Temperatura de Máxima Dilatación; a): Máxima Contracción, b): Máxima Dilatación.

## II. SISTEMA DE SENSADO, ACONDICIONAMIENTO Y ADQUISICIÓN DE EQUIPO DILATÓMETRO Y PLASTÓMETRO.

### A. Equipo Dilatómetro y Protocolo de Operación

Este equipo se usa para medir los cambios de volumen debido a la expansión térmica de muestras de carbón. Existen dilatómetros basados en diversos principios de operación tales como capacitivos, laser u ópticos y basados en desplazamiento lineal LVDT (Linear Variable Differential Transformer). La disposición de un dilatómetro típico se muestra en la Fig. 3:

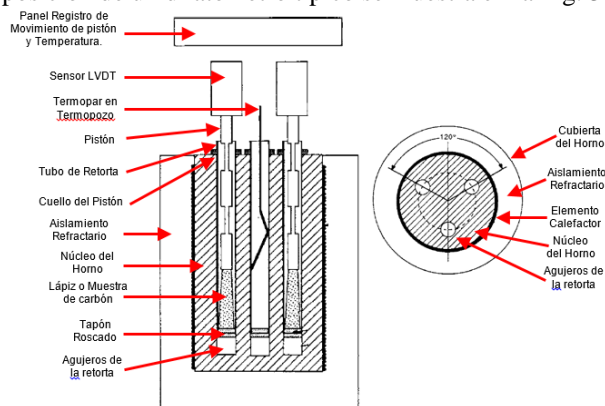


Fig. 3. Esquema de Componentes de un Equipo Dilatómetro.

El horno eléctrico del dilatómetro tiene un núcleo cilíndrico de bronce y aluminio, resistente a la oxidación con punto de fusión suficientemente alto. El horno tiene tres agujeros taladrados simétricamente de  $15\text{ mm}$  de diámetro para aceptar tres tubos de retorta. El núcleo se calienta eléctricamente mediante devanados de resistencia aislados y controlados a una tasa de temperatura de  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  por minuto hasta alcanzar una temperatura final de  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Un termopar se ubica en un termopozo que está en contacto con la pared del tubo de retorta, encima del fondo del tapón. Debe tener un collar de soporte en la parte superior y ser roscado para aceptar un tapón hermético, roscado en su base [2].

En los orificios de la retorta se ubican dos pistones donde se instalan los sensores para medir el desplazamiento lineal de la muestra de carbón al ser sometido a cambios de temperatura.

El pistón tiene una longitud suficiente para permitir que el conjunto mecánico del transductor registre una altura de lápiz de carbón de 30 mm. El conjunto o ensamble pistón–transductor pesa aproximadamente 150 g. El pistón y tubo retorta se deben marcar a una referencia de nivel de base o BLMR (Basement Level Reference Mark) si la medición de dilatación se realiza mecánicamente.

En la Fig. 4 se ilustra el equipo dilatómetro disponible en el Laboratorio de Carbones fabricado por Applied Test Systems Inc, con tecnología de los años ochenta. Esta tecnología utiliza un termopar tipo J para medición de temperatura y dos sensores LVDT para medición de desplazamiento lineal.

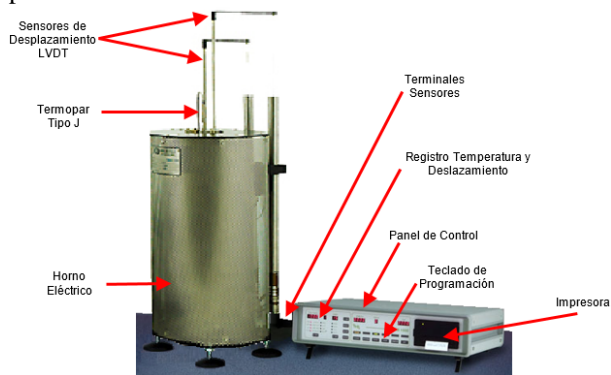


Fig. 4. Equipo Dilatómetro disponible en Laboratorio de Carbones de la Uptc.

El protocolo de operación del equipo para realizar el test de dilatometría comienza mediante la limpieza de los dos ensambles tubo de retorta–pistón y la fijación de los tapones a la misma altura. Se preparan dos muestras de carbón que se moldean en forma de lápiz de 60 mm de longitud y de 50 g de peso, formadas por compresión en un molde de carbón que ha sido pulverizado para pasar un tamiz de 250 μm. Se ensambla el conjunto retorta–pistón–lápiz.

A continuación se energiza el tablero de control e impresora del dilatómetro mediante un interruptor que se encuentra en el panel frontal. Luego se programan los parámetros de control de temperatura para iniciar el calentamiento del horno hasta que alcance una temperatura entre 315–320 °C. Cuando esta temperatura se alcance se cargan los dos ensambles retorta–pistón–lápiz en el horno con ayuda de unas pinzas. Después de completar la carga se programa el control de seguimiento de temperatura a una tasa de 3 °C por minuto hasta una temperatura final de 520 °C.

En todo momento el termopar debe registrar la lectura de temperatura y las LVDT el desplazamiento lineal para poder graficar la curva de dilatación característica. Cuando ningún movimiento del pistón se presente durante 5 minutos después de finalizar el proceso de dilatación se da por terminado el ensayo. Es decir que a una tasa de muestreo de un minuto si cinco lecturas consecutivas de la impresora son iguales se finaliza la prueba. En caso de no dilatación se termina el ensayo cuando la temperatura del horno alcance los 500 °C.

Finalmente se enfría el horno para que reestablezca su temperatura alrededor de 320–400 °C según el ensayo, se retiran los dos ensambles retorta–pistón–lápiz, se ubican sobre una superficie plana aislada térmicamente donde se mide longitud y peso, y finalmente se desenergiza el dilatómetro con el interruptor principal. Se considera realizar todos los ensayos por duplicado y se promedian los resultados.

#### B. Equipo Plastómetro y Protocolo de Operación

El equipo Plastómetro Gieseler está compuesto por un horno eléctrico y un cabezal. El horno eléctrico proporciona el calentamiento de la muestra de carbón que se introduce en un crisol sobre una retorta. La temperatura del horno se controla a una tasa de calentamiento de 3 °C/min, para un rango de temperatura de 300 a 550 °C. El horno contiene un baño de soldadura fundido de aproximadamente 50% de plomo y 50% de composición de estaño.

La temperatura de la muestra se mide con un termopar sumergido en el baño de modo que este en contacto con la pared exterior del crisol, de tal manera que el sensor esté a la misma altura del centro de la muestra de carbón. Se utiliza un brazo agitador introducido en la retorta para batir la muestra de carbón disponible en el crisol. Los componentes del horno del plastómetro se exponen en la Fig. 5.

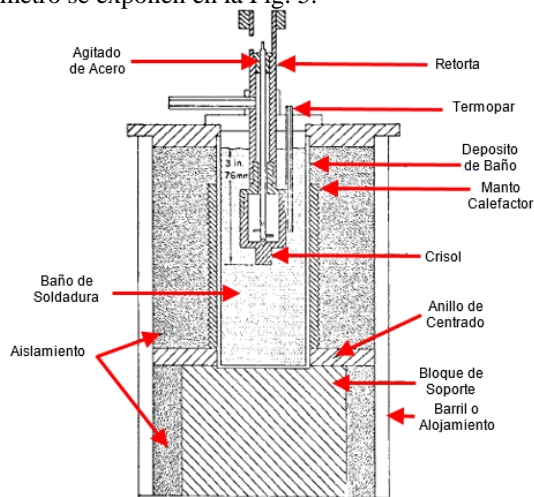


Fig. 5. Esquema de Componentes del Horno Eléctrico de un Equipo Plastómetro.

El agitador está provisto de un eje recto de acero con cuatro brazos en su parte inferior distribuidos alrededor del eje. El extremo superior del agitador se adapta con el eje de un motor ubicado en el cabezal del plastómetro. El cabezal del plastómetro está constituido por un motor DC de velocidad constante conectado directamente a un freno de histéresis o clutch con par ajustable entre 2.9 a 29 g·cm (11.4 a 114 g·pulg). Cada revolución completa o 100 divisiones de dial, se registran en un contador magnético accionado por un encoder.

El par de histéresis de giro se calibra con una polea de transferencia y unos pesos preestablecidos donde por ejemplo se ajusta para elevar un peso de 38 g sobre una rotación completa del eje ranurado sin elevar un peso de 42 g.

500 gramos de la muestra de carbón se tritura y es pasada por un tamiz a una granulometría desde  $425\mu m$  hasta  $2.36mm$ , se seca a  $15\text{ }^{\circ}C$  y se comprime durante 15 minutos mediante un dispositivo de carga que aprisiona uniformemente el carbón dentro del crisol con una carga de envasado de 10 kg, de tal manera que, después de la compresión, el crisol y su contenido pueda ser fácilmente retirado sin afectar el contenido.

El horno del plastómetro disponible en el Laboratorio de Carbones se alimenta con una tensión monofásica de 120 VAC controlada por un controlador PID para trabajar hasta una temperatura máxima de  $1000\text{ }^{\circ}C$ , dentro del horno está adaptado un crisol donde se introduce la muestra de carbón y tiene instalado en su interior una termopar tipo J. El cabezal está compuesto por un motor DC adaptado a un encoder en cuadratura con capacidad de medición de 1000 pulsos por revolución y registro análogo de 0 a 99999 ddpmm.

Las señales del contador y el termopar se concentran en un tablero de control análogo que registra la velocidad de rotación del agitador en ddpmm y la temperatura del horno a una tasa de muestreo configurable desde 1 minuto. Los valores de temperatura y revoluciones medidos se visualizan en un display análogo y se imprimen en una cinta de papel. En la Fig. 6 se ilustra el equipo plastómetro disponible en el Laboratorio de Carbones.

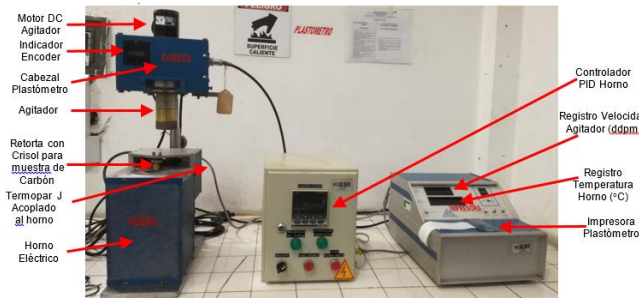


Fig. 6. Equipo Plastómetro disponible en Laboratorio de Carbones de la Uptc.

El protocolo de operación del equipo para realizar el test de plastometría comienza mediante el ajuste del agitador para un par de giro con histéresis nominal de  $102\text{ g}\cdot\text{cm}$ . A continuación se energiza el tablero de control e impresora mediante un interruptor que se encuentra en el panel frontal y se programa el controlador PID para que incremente la temperatura del horno hasta alcanzar una temperatura regulada de  $300\text{ }^{\circ}C$  o  $320\text{ }^{\circ}C$ . Luego se carga la muestra de carbón (5 g) en el crisol junto con la retorta y el agitador y se monta en el horno del plastómetro. Seguidamente se acopla la varilla del agitador al cabezal, asegurándose de que la parte superior del agitador se acople con el eje del motor DC.

En ese momento se programa el PID para que reanude un nuevo ciclo de control de calentamiento del horno a una tasa de  $3\text{ }^{\circ}C$  por minuto hasta alcanzar los  $350\text{ }^{\circ}C$  en donde se realizan las mediciones y registro de velocidad de rotación del agitador y la temperatura a intervalos de 1 minuto entre las temperaturas iniciales de ablandamiento y solidificación de la muestra de análisis de carbón analizada. Estas mediciones se realizan hasta

que las divisiones del dial alcancen un tope superior después del cual decrece y cuando tres lecturas consecutivas den cero, el ensayo habrá terminado.

Finalmente se reinicia el tablero de control para que inicie el descenso de la temperatura, se desconecta el motor del agitador, se saca la retorta del baño, se suelta el crisol y se apaga y desconecta el equipo. Todos los ensayos se realizan por duplicado y se reportan los valores promedio. A partir de las lecturas de división por minuto calculadas se determina la fluidez máxima de la muestra de ensayo y se realiza el respectivo informe [11-13].

### C. Descripción del Sistema de Instrumentación y Monitoreo

La arquitectura general del sistema de instrumentación y monitoreo propuesto en este trabajo se muestra en la Fig. 7. Para rehabilitar el uso de los equipos plastómetro y dilatómetro se realizó un mantenimiento mecánico y eléctrico general y se probaron los elementos de sensado y actuación para establecer la naturaleza de las señales que generaban. Una vez se verificó el estado de los sensores se diseñaron los circuitos de acondicionamiento respectivos y la selección de la tecnología de adquisición para capturar las señales sensadas.

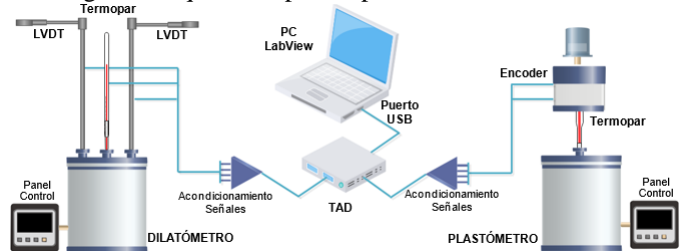


Fig. 7. Arquitectura Sistema de Instrumentación Virtual Equipo Dilatómetro y Plastómetro.

Las señales de temperatura y desplazamiento lineal provenientes del Termopar J y los LVDT 1 y 2 del equipo dilatómetro, así como las señales de temperatura y revoluciones provenientes del Termopar J y encoder del equipo plastómetro se acondicionan e ingresan a la Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD) de referencia NI USB 6001 de National Instruments™. La tarjeta de adquisición se comunica a través del puerto USB con un computador que actúa como unidad de monitoreo, visualización, registro y generación de reportes para analizar las propiedades plásticas de las muestras de carbón utilizando una Interfaz Gráfica sobre la Plataforma de LabVIEW™.

Una de las características del desarrollo es que es modular y fácil de manipular por parte de los operarios que realizan los ensayos de plastometría y dilatometría, debido a que la interfaz humano maquina (HMI) es amigable al usuario, trabaja en tiempo real para satisfacer los requerimientos de operatividad, portabilidad, visualización gráfica, almacenamiento de datos, generación de reportes y fácil configuración, entre otras.

#### 1. Instrumentación Equipo Dilatómetro

El dilatómetro dispone de dos sensores de deformación LVDT (Transformador Diferencial Variable Lineal) y un Termopar tipo J [14].

1) *Acondicionamiento Sensor de Deformación LVDT*. Un LVDT es un sensor electromecánico que transforma el desplazamiento mecánico de un núcleo móvil de un transformador, en un voltaje AC de salida proporcional a la posición del núcleo. El transductor se compone de un devanado primario que es alimentado por una señal sinusoidal externa, dos devanados secundarios conectados en serie (sin derivación central) y el núcleo móvil para acoplar el flujo magnético entre los devanados primario y secundario. La dirección del movimiento se detecta midiendo la fase de la salida. El dispositivo se comporta de manera similar a un divisor de tensión resistivo [15].

Para los dos LVDT se diseñó e implementó un circuito de acondicionamiento de señal utilizando el circuito integrado AD698 de Analog Devices™ para entregar un voltaje DC unipolar proporcional a la deformación de la muestra de carbón con alto grado de precisión y repetitividad. El diagrama de bloques del circuito de acondicionamiento de señal de la LVDT se ilustra en la Fig. 8 [16, 17].

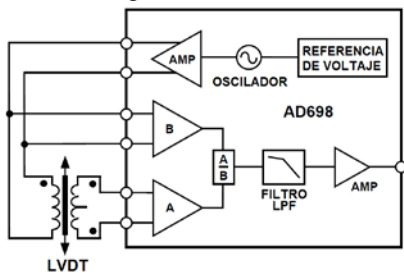


Fig. 8. Diagrama de Bloques Circuito de Acondicionamiento de Señal LVDT Equipo Dilatómetro.

El LVDT de cuatro hilos se conecta a la entrada del AD698. El AD698 energiza el devanado primario del LVDT, sensa el voltaje de salida del devanado secundario y proporciona una tensión DC de salida proporcional a la posición del núcleo. El AD698 tiene integrado un oscilador sinusoidal y un amplificador de potencia para el LVDT.

La Fig. 9 muestra el diagrama de bloques del circuito integrado AD698. Las entradas corresponden a dos canales de modulación sincrónica independientes. El canal B está diseñado para monitorear la excitación del convertidor al LVDT. La salida de onda completa rectificada es filtrada por C2 y enviada al circuito de cálculo de división. El canal A es idéntico al B, pero con la diferencia de que el comparador (ACOMP) está conectado por separado. Dado que el canal A puede alcanzar una salida de 0V a un desplazamiento nulo del LVDT, el demodulador del canal A normalmente se activa por la tensión del primario (canal B). Para LVDT de cuatro hilos es necesario implementar una red de compensación de fase para añadir un adelanto o atraso de fase al canal A para compensar el desplazamiento de fase de la señal primario al secundario.

Una vez demodulados y filtrados los dos canales, el circuito de división implementado con un multiplicador, calcula la relación A / B, donde la salida del divisor es un ciclo de trabajo. Cuando A / B es igual a 1, el ciclo de trabajo será

igual al 100%. El ciclo de trabajo activa un circuito que modula y filtra una corriente de referencia proporcionalmente.

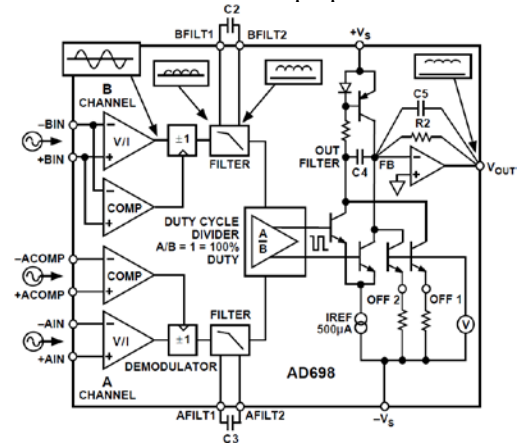


Fig. 9. Diagrama de Bloques del Circuito Integrado AD698.

El amplificador de salida escala la corriente de referencia de 500 µA convirtiéndola en un voltaje. La función de transferencia a la salida del circuito es así:

$$V_{OUT} = I_{REF} \times \frac{A}{B} \times R2 \quad \text{donde } I_{REF} = 500\mu A \quad (1)$$

Todas las funciones del circuito están incluidas en el chip y con la adición de unos pocos componentes pasivos externos se ajusta la frecuencia y la ganancia, con buena estabilidad de operación [16-17].

2) *Procedimiento de Diseño Acondicionamiento LVDT*. El AD698 se configuró para trabajar con una fuente de alimentación simple a un voltaje de +15V como se muestra en la Fig. 10.

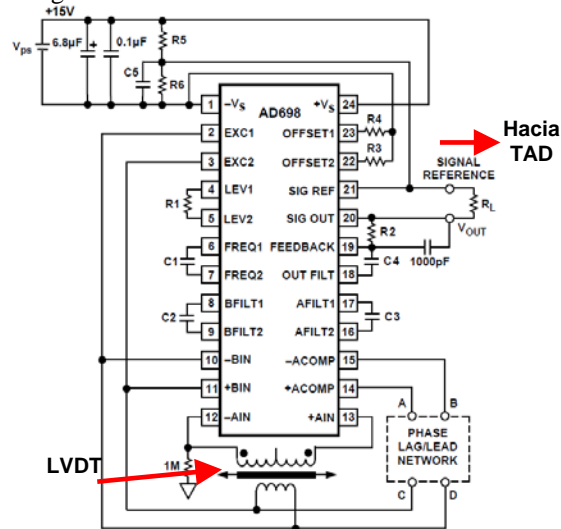


Fig. 10. Diagrama Esquemático del Circuito de Acondicionamiento de LVDT.

En primera instancia se determina la frecuencia de operación del oscilador que se define a partir de del ancho de banda del sistema de medición de posición, en este caso se estableció un ancho de banda  $F_{LVDT} = 250 \text{ Hz}$  ya que la LVDT según hoja técnica de datos puede excitarse a frecuencias entre 500 Hz hasta 10 kHz.

Utilizando la teoría de muestreo se seleccionó una frecuencia mínima de excitación en el primario de la LVDT  $F_{EXCIT} = 10 \times F_{LVDT} = 2,5 \text{ kHz}$  [18]. Se selecciona el capacitor que determina la frecuencia de excitación  $C1$  conectado entre los pines 6 y 7 ( $FREQ1$  y  $FREQ2$ ) del circuito integrado AD698 [16]:

$$C1 = \frac{35 \mu F \cdot Hz}{F_{EXCIT}} = \frac{35 \mu F}{2500 Hz} = 15 \text{ pF} \quad (2)$$

La amplitud del oscilador se establece de tal manera que la señal en el devanado primario esté en el rango de  $1 \text{ V}$  a  $3,5 \text{ V rms}$  y la señal en el devanado secundario esté en el rango de  $0,25 \text{ V}$  a  $3,5 \text{ V rms}$  cuando el LVDT alcance la posición mecánica a escala completa. Esto optimiza la linealidad y minimiza la susceptibilidad al ruido. Para la LVDT de 4 hilos la relación de transformación de voltaje  $VTR$  a escala completa dada por la sensibilidad  $S_{LVDT}$  definida por el fabricante y la longitud máxima de carrera del LVDT desde su posición cero  $L_{LVDT}$  así:

$$VTR = S_{LVDT} \times L_{LVDT} = 7.1 \text{ mV} / \text{V} / \text{mm} \times 30 \text{ mm} = 0.213 \quad (3)$$

Luego el voltaje de excitación primario se multiplica por el  $VTR$  para obtener el voltaje secundario esperado a escala completa. Suponiendo la máxima excitación de  $3,5 \text{ V rms}$ , la tensión en el secundario máxima será  $3,5 \text{ V rms} \times 0,213 = 0,7455 \text{ V rms}$ , que está en el rango aceptable. Para configurar el voltaje de excitación teniendo fuente de alimentación simple de  $+15 \text{ V}$ , se selecciona el valor del resistor  $R1$  conectado a los pines 4 y 5 del AD698 ( $LEVI$  y  $LEV2$ ) mediante la lectura de la curva proporcionada por el fabricante mostrada en la Fig. 11 [16].

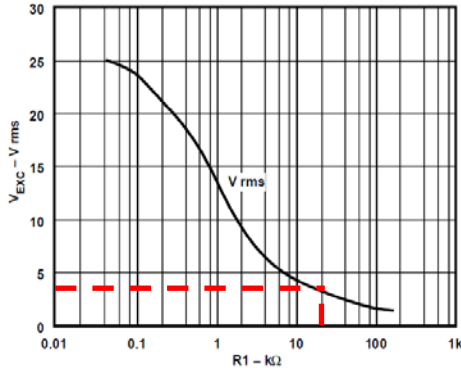


Fig. 11. Curva Voltaje de Excitación  $V_{exc}$  vs  $R1$ .

Aproximadamente  $R1$  se selecciona aun valor de  $R1 = 20 \text{ K}\Omega$ . Los capacitores  $C2$ ,  $C3$  y  $C4$  se calculan en función del ancho de banda deseado para el sistema de medición de posición AD698 y deben ser nominalmente iguales:

$$C2 = C3 = C4 = \frac{10^{-6} \text{ Hz} \cdot F}{F_{LVDT}} = \frac{10^{-6} \text{ Hz} \cdot F}{250 \text{ Hz}} = 0,4 \mu F \quad (4)$$

Estos capacitores se conectan respectivamente a los pines 8, 9 ( $BFILT1$ ,  $BFILT2$ ); 16, 17 ( $AFILT2$ ,  $AFILT1$ ) y 18, 19 ( $OUT FILT$ ,  $FEEDBACK$ ) del AD698. Se configuró el ajuste del voltaje de salida a escala completa calculando el valor del resistor  $R2$ , que establece la ganancia AD698 del amplificador

para el rango de salida a escala completa la define el fabricante teniendo el desplazamiento de carrera en pulgadas y estableciendo el voltaje de salida requerido que en este caso se estableció de  $V_{OUT} = +10 \text{ V}$ . Realizando la transformación de  $L_{LVDT} = 30 \text{ mm}$  a pulgadas se tiene que  $L_{INCH} = 1,18 \text{ pulg}$  así:

$$R2 = \frac{V_{OUT}}{S_{LVDT} \cdot L_{INCH} \cdot 500 \mu A} = \frac{10 \text{ V}}{7.1 \cdot 1.18 \cdot 500 \mu A} = 2.5 \text{ K}\Omega \quad (5)$$

Para el funcionamiento del circuito los valores de los resistores  $R5$ ,  $R6$  y el capacitor de bypass  $C5$  conectados a la alimentación del LVDT ( $GND$ ,  $+V_s$ ) son valores a determinar para definir el voltaje de referencia para la salida de voltaje acondicionada  $V_{OUT}$ .  $V_{OUT}$  se mide con respecto a los pines 20 y 21 del AD698 ( $SIG OUT$ ,  $SIG REF$ ) de *Signal Reference*. El valor máximo de  $R5$  y  $R6$  se fundamenta en la relación:

$$R5 + R6 \leq \frac{V_{PS}}{100 \mu A} \leq \frac{15 \text{ V}}{100 \mu A} \leq 150 \text{ K}\Omega \quad (6)$$

Donde la caída de tensión en  $R5$  debe ser mayor que:

$$2 + 10 \text{ K}\Omega \left( \frac{1.2 \text{ V}}{R4 + 2 \text{ K}\Omega} + 250 \mu A + \frac{V_{OUT}}{4 \times R2} \right) \text{ V} \quad (7)$$

Entonces:

$$R5 \geq \frac{2 + 10 \text{ K}\Omega \left( 250 \mu A + \frac{10 \text{ V}}{4 \times 2.4 \text{ K}\Omega} \right) \Omega}{100 \mu A} = 149.16 \text{ K}\Omega \quad (8)$$

Basándose en las restricciones de  $R5 + R6$  (6) y  $R5$  (7), se selecciona un valor de  $R6 = 149,2 \text{ K}\Omega$  y  $R7 = 630 \Omega$ . En este sentido, la corriente de carga a través de  $RL$  retorna a la unión de  $R5$  y  $R6$  y fluye de nuevo a la alimentación  $V_{PS}$ . Bajo condiciones de carga máxima, se asegura que la caída de voltaje a través de  $R5$  se cumpla como se define en (8). El capacitor  $C5$  conectado entre el pin 21 y 1 del AD698 ( $SIG REF$ ,  $-V_s$ ) es un condensador de derivación que se selecciona con un valor de  $0,1 \mu F$  [16].

Como el LVDT se utiliza a lazo abierto no se requirió conocer las características dinámicas de los elementos del transductor y de la interfaz, y el transductor en sí es muy rápido y con buena precisión para responder una vez que el núcleo se mueve, por lo cual no fue necesario implementar alguna red de compensación de fase. La señal de salida de cada circuito de acondicionamiento de LVDT se promedia utilizando un CI LF353 en configuración sumador e ingresa a la entrada analógica en modo diferencial  $A10$  y  $A14$  ( $AI+$ ,  $AI-$ ) de la Tarjeta de Adquisición NI 6001 [17].

3) *Acondicionamiento Sensor de Temperatura Termopar J*: En el dilatómetro un termopar tipo J (Hierro-Constantan) se usa para medir la temperatura sobre la muestra de carbón a que su de operación es de  $-270$  a  $+1200 \text{ }^\circ\text{C}$  [19-24]. Para la aplicación el termopar es una solución debido a que es económico, estable, respuesta rápida y resistente a largo plazo.

Para el acondicionamiento de señal de temperatura se diseñó e implementó el circuito integrado AD594 [25] de Analog Devices™ con el propósito de entregar un voltaje DC unipolar proporcional a la temperatura de la muestra de

carbón que se deforma en el dilatómetro. El diagrama de bloques del circuito de acondicionamiento del Termopar se ilustra en la Fig. 12.

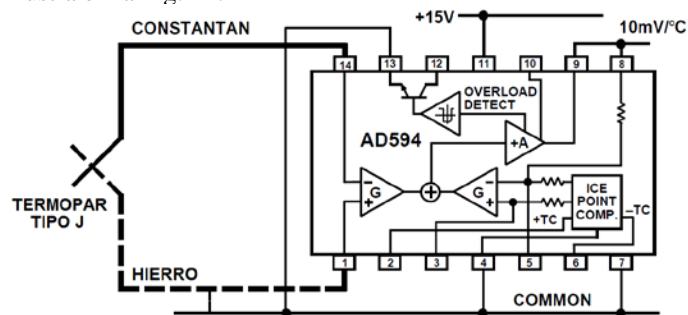


Fig. 12. Diagrama Esquemático de Acondicionamiento de Señal Termopar Equipo Dilatómetro.

El circuito integrado AD594 [25] es un amplificador de instrumentación que mide, linealiza y compensa la lectura temperatura entregada en voltaje por el termopar, produciendo una señal de salida proporcional en una relación de  $10\text{ mV}$  por cada grado centígrado. El circuito de acondicionamiento se configuró para trabajar con fuente de alimentación unipolar para la transducción de temperaturas positivas, donde las resistencias de control de ganancia están disponibles en el encapsulado, pero puede ser recalibrado mediante la adición de dos o tres resistencias.

Para obtener una salida de voltaje DC proporcional a la temperatura de  $10\text{ mV}/^\circ\text{C}$  y compensar con precisión la unión de referencia en el rango de operación nominal del circuito, el AD594 realiza un ajuste de ganancia que coincide con la función característica de transferencia de los termopares tipo J a  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . Para una salida tipo J a una temperatura de  $1^\circ\text{C}$  el voltaje en el punto  $+TC$  en el circuito integrado es de  $51,70\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , y la ganancia resultante es de  $193,4$  ( $10\text{ mV}/^\circ\text{C}$  dividido por  $51,7\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ).

Debido a que el voltaje de salida del termopar  $V_{TERMJ}$  no es lineal con respecto a la temperatura, el AD594 amplifica linealmente la señal compensada con  $16\text{ }\mu\text{V}$  usando la siguiente función de transferencia para determinar la tensión real de salida:

$$V_{OUT} = (V_{TERMJ} + 16\text{ }\mu\text{V}) \times 193.4 \quad (9)$$

Donde:

$$V_{TERMJ} = (V_{OUT} / 193.4) - 16\text{ }\mu\text{V} \quad (10)$$

Los valores de salida para temperaturas intermedias pueden ser interpolados o calculados usando las ecuaciones de salida y las tablas de voltaje del termopar Tipo J. Usando una sola fuente de alimentación de  $+15\text{ V}$  se conecta al pin 11 del AD594 [24], para entregar una salida proporcional que de voltaje que mide desde  $0\text{ }^\circ\text{C}$  a  $+750\text{ }^\circ\text{C}$ . En el pin 7 y 4 se conecta la señal de alimentación común y las entradas del termopar se conectan a los pines 1 (Hierro-Blanco- $IN+$ ) y 14 (Constantan-Rojo- $IN-$ ) directamente desde el punto de medición o a través de cable de termopar tipo J.

La red de realimentación precalibrada en el pin 8 se une a la salida del pin 9 para proporcionar la característica de transferencia nominal de temperatura de  $10\text{ mV}/^\circ\text{C}$ . Se recomiendan las conexiones de línea punteadas con una resistencia para compensar las tensiones de modo común inducidas en el bucle del termopar. La descripción funcional del AD594 se ilustra en la Fig. 14, en donde su principio de operación se fundamenta en dos amplificadores diferenciales. Las salidas se suman y se utilizan para controlar un amplificador de alta ganancia [25].

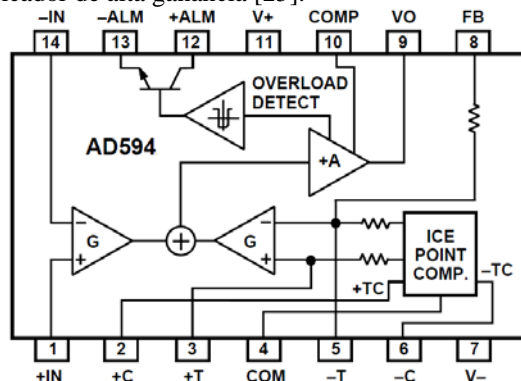


Fig. 14. Diagrama de Bloques del Acondicionador AD594.

La salida del amplificador principal  $+A$ , en el pin 9 ( $V_O$ ), está conectada a la red de realimentación en el pin 8 ( $FB$ ). Las señales del termopar son aplicadas a la etapa de entrada flotante en los pines 1 y 14 ( $IN-$ ,  $IN+$ ), son amplificadas por el amplificador diferencial  $G$  y luego se amplifican por el amplificador principal  $A$ . La salida del amplificador principal se realimenta a una segunda etapa diferencial en configuración inversora y se amplifica con ganancia  $G$  y se suma a la entrada del amplificador principal.

Debido a que los dos amplificadores diferenciales coinciden en la ganancia  $G$ , la señal de realimentación que se aplica al amplificador diferencial de la derecha coincide con la señal de entrada amplificada proveniente del termopar cuando la señal de diferencia se reduce a cero. La red de realimentación se ajusta de modo que la ganancia efectiva a la salida, en los pines 8 y 9, dando como resultado una tensión de  $10\text{ mV}/^\circ\text{C}$  de excitación de termopar.

La salida  $V_O$  del pin 9 del AD594 ingresa a la entrada análoga en modo diferencial de la Tarjeta de adquisición NI 6001 en las entradas  $AI1$  y  $AI5$  ( $AI+$ ,  $AI-$ ) para su monitoreo y al panel de control donde se usa como entrada de realimentación del Control PID de temperatura del horno.

## 2. Instrumentación Equipo Plastómetro

El equipo plastómetro dispone de un termopar tipo J y un encoder en cuadratura acoplado al agitador ubicado en el cabezal para medir las revoluciones o divisiones de dial [26].

1) Acondicionamiento Sensor de Temperatura Termopar J: El sistema de acondicionamiento de la termocupla tipo J del equipo plastómetro se implementó de forma similar al del equipo dilatómetro. La salida de señal de temperatura acondicionada unipolar que mide temperaturas desde  $0\text{ }^\circ\text{C}$  a

+750 °C son entregadas proporcionalmente en un formato de voltaje entre 0 a 7,5V. La salida de voltaje del circuito de acondicionamiento ingresa a la entrada análoga en modo diferencial de la Tarjeta de adquisición NI 6001 en las entradas AI2 y AI6 (AI+, AI-) para su monitoreo y también al panel de control donde se usa como entrada de realimentación del Control PID de temperatura del horno del plastómetro[27].

2) **Acondicionamiento Encoder Incremental del Plastómetro:** El encoder en cuadratura incremental es un codificador electromecánico que genera un tren de pulsos en respuesta al movimiento y dirección rotatoria del agitador del plastómetro, para medir la velocidad en revoluciones por división e indicar como la plasticidad de la muestra de carbón cambia con respecto a variaciones de temperatura. El encoder indica la posición, dirección y velocidad del movimiento del eje agitador con elevada resolución y buena precisión.

El codificador del plastómetro tiene una resolución de 1000 pulsos o segmentos por revolución (0,36 ° por revolución), esta acoplado al eje del motor con embrague del agitador y se polariza a 12 V. Tiene un disco giratorio con dos pistas codificadas con sectores de posición desfasadas 90° y un emisor receptor óptico que da lectura de la posición y dirección de rotación. Adicionalmente cuenta con 3 terminales que corresponden a los canales A, B y Z.

Los canales A y B se utilizan para indicar la posición del eje en cualquier momento dado y el canal Z o cero se utiliza para ser utilizado como referencia. Si se tiene lugar primero un pulso en el canal A y luego en el canal B la señal de salida en cuadratura indica que el motor gira en sentido horario, y si ocurre primero un pulso en el canal B y luego en el canal A entonces el disco está girando en sentido anti horario. Los pulsos de salida desfasados 90° se ilustran en la Fig. 13.

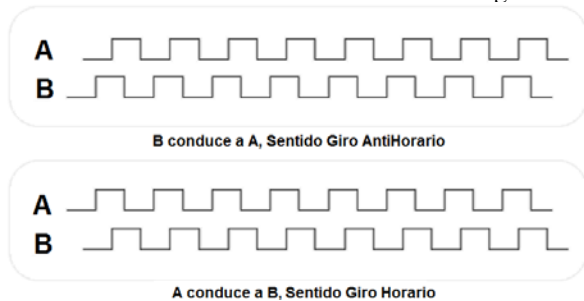


Fig. 13. Señales proporcionadas por el Encoder en Cuadratura Canales A y B.

El encoder trabaja como codificador incremental en cuadratura de un solo terminal debido a que las señales de los canales A y B están referenciadas a tierra, por lo que existe un solo hilo (o terminal) para cada señal. Con el encoder se mide sólo los cambios en la posición a partir de la cual se estima la velocidad de rotación. Las señales del encoder están adaptadas para satisfacer los requisitos de aplicación para ingresar a la Tarjeta de Adquisición generar un voltaje de salida de detección unipolar con rango dinámico desde +0.5V a +4.5V), capaz de suministrar 1 mA. Las señales de los canales A y B

se conectan a los terminales de conteo de la Tarjeta de Adquisición NI 6001 PF0 y PF1 respectivamente.

#### D. Sistema de Adquisición

Como plataforma de adquisición de señales provenientes de los sensores del dilatómetro y plastómetro se utilizó la Tarjeta de Adquisición NI 6001 de National Instruments™, la cual entre otras funcionalidades posee 8 canales de entrada análogos (AI0–AI7) para recibir la señales acondicionadas de los sensores de temperatura y desplazamiento lineal y dos canales (PF0 y PF1) para conteo de pulsos propicios para conectar el encoder en cuadratura [28, 29].

Los ocho canales de entradas análogos se pueden aparejar para trabajar en modo de operación diferencial para garantizar el rechazo de señal en modo común y posee un conversor análogo de 14 bits con una tasa de muestreo máxima de 20000 muestras por segundo configurable para recibir señales bipolares o unipolares entre -10V y +10V. Los terminales PF0 y PF1 pueden configurarse como generador de pulsos, pero para la aplicación se configuró para contar en forma incremental flancos ascendentes utilizando un contador de 32 bits a una frecuencia máxima de 5 MHz.

La Fig. 14 muestra el esquema de conectividad de la tarjeta de adquisición que concentra las señales acondicionadas de los sensores y las envía vía puerto USB hacia el computador central de monitoreo. En el computador la plataforma de software de LabVIEW™ de National Instruments™ reconoce la tarjeta de adquisición y permite diseñar el entorno HMI para el monitoreo y visualización de las variables de temperatura, dilatación y plasticidad que permiten analizar las propiedades plásticas de los carbones.

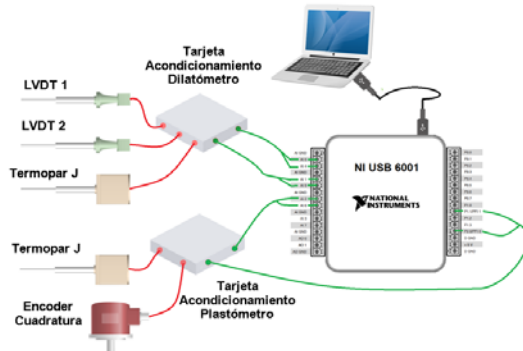


Fig. 14. Diagrama de Conectividad TAD con Elementos Sensores Dilatómetro y Plastómetro.

### III. INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL DEL EQUIPO DILATÓMETRO Y PLASTÓMETRO

Un computador actúa como unidad de monitoreo central para visualización, registro y generación de reportes para analizar las propiedades plásticas de las muestras de carbón utilizando una Interfaz Gráfica sobre LabVIEW™.

#### A. Diseño Instrumento Virtual VI

La Fig. 15 muestra el diagrama de flujo del algoritmo de software del instrumento virtual implementado en



LabVIEW™. La operación del algoritmo comienza esperando contraseña y permiso de acceso al VI por el usuario autorizado, en LabVIEW™ esto se logra utilizando un *cluster* de dos dimensiones con dos *String Controls* de usuario y contraseña. Esta función examina en el arreglo la posición en la que se encuentra el usuario ingresado para posteriormente buscar la contraseña correspondiente. Mediante una lógica combinacional, si se coincide con las claves preestablecidas se permite el acceso al VI, de lo contrario se vuelve a intentar.

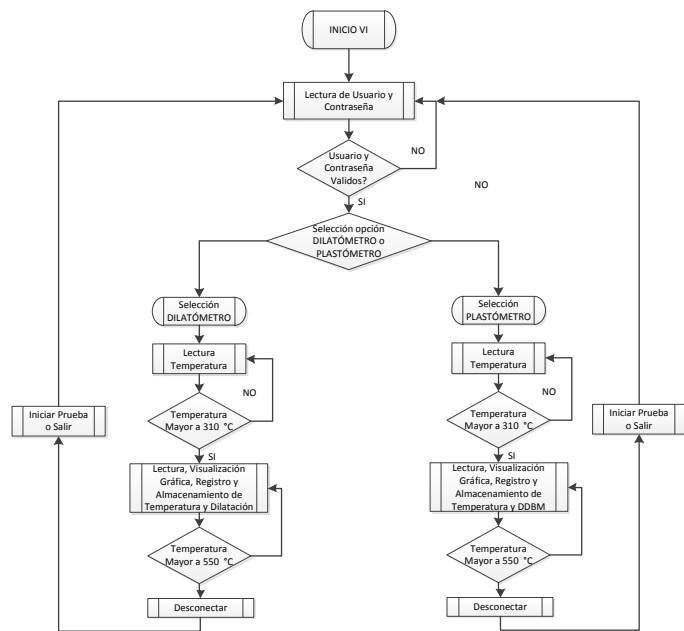


Fig. 15. Flujoograma Algoritmo del Instrumento Virtual para Monitoreo Dilatómetro y Plastómetro.

Una vez el acceso es autorizado se ejecuta el programa principal que está dentro de un bucle controlado correspondiente a una estructura de programación *while*. Después el usuario selecciona entre dos pestañas de trabajo en la parte superior del VI si se va a realizar ensayo con el *DILATÓMETRO* o con el *PLASTÓMETRO*, utilizando una estructura de programación tipo *case* en LabVIEW™.

Si se selecciona la opción de ensayo de dilatación de la función *case*, se reciben los datos de temperatura provenientes del Termopar tipo J que ingresa a la TAD, donde son escalizados, y cuando la temperatura se mantenga a valores cercanos a  $310\text{ }^{\circ}\text{C}$  se habilita la supervisión de la actividad de temperatura y desplazamiento lineal del Dilatómetro a una tasa de muestreo de 1 minuto por defecto (configurable por el usuario).

Cuando se hace la lectura de los datos se visualizan gráficamente y numéricamente en pantalla utilizando un bloque *Graph Indicator* y *Num Ind* respectivamente. Adicionalmente, los datos medidos se registran, almacenan y exportan con fecha y hora en un archivo de Microsoft Excel® mediante el uso de la herramienta *MS Office Report* del

Toolkit *Report Generator*. La lectura de los datos se realiza hasta cuando la temperatura alcance un valor de  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  como lo indica el ensayo de dilatación. En ese momento el programa abandona el bucle principal, envía una orden de desconexión y espera nuevas instrucciones de usuario.

Si se selecciona la opción de ensayo de plastometría de la función *case*, el procedimiento es equivalente al anterior como se ilustra en el flujoograma de la Fig. 15, la diferencia radica en que las variables a monitorear corresponden a la actividad de temperatura y divisiones por división del agitador del equipo plastómetro a una tasa de muestreo de 1 minuto por defecto.

La adquisición de las señales análogas provenientes de los LVDT y el termopar del equipo dilatómetro (Entradas análogas *AN0*, *AN4* y *AN1*, *AN5* respectivamente), así como las provenientes del termopar del equipo plastómetro (Entradas análogas *AN2*, *AN6*) previamente acondicionadas, ingresan a la tarjeta de adquisición y son reconocidas por LabVIEW™ mediante el bloque *DAQ Assistant*, configurados en modo de operación diferencial.

Para la lectura de pulsos por revolución del encoder del plastómetro se configuró un *DAQ Assistant* como entrada de medición de posición angular. En la sección *settings*, se definen los Pulsos por Revolución en cualquiera de los canales de entrada *A* o *B*. Se define un ángulo de inicio del codificador. Luego se selecciona el Tipo de Codificación *X4* para especificar cómo contar e interpretar los pulsos que el codificador genera en las señales *A* y *B*. La interfaz HMI se guarda en un ejecutable e incluye varias pestañas para ajustes de la adquisición de variables, exhibición en tiempo real, generación de reportes y visualización de curvas características de dilatación y plasticidad. En la parte de configuración del sistema el usuario puede alterar los parámetros necesarios y modificarlos, incluyendo el tiempo de muestreo, temperaturas de arranque y finalización de lectura, inicio y detención de adquisición de señal de los instrumentos, entre otros.

### B. Visualización y Registro de Datos

La Fig. 16 muestra el pantallazo del algoritmo del instrumento virtual para monitoreo del equipo plastómetro y dilatómetro realizado en diagrama de bloques de LabVIEW™ donde se aprecian los elementos previamente descritos en este caso para la selección del equipo *DILATOMETRO*.

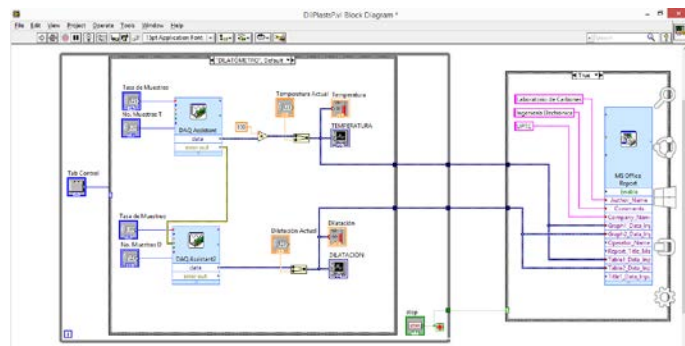


Fig. 16. Algoritmo Instrumento Virtual para Monitoreo del Dilatómetro.

Se observa a mano izquierda los bloques asistentes de la tarjeta de adquisición, su escalización y visualización y a mano derecha el asistente para exportación de reportes en Excel. Finalmente en la Fig. 17 se muestra el Panel Frontal del Instrumento Virtual para la selección de ensayo de Plastometría. En la parte izquierda de la pantalla se observan los paneles de configuración y a la derecha los elementos de visualización gráfica y numérica.



Fig. 17. Panel Frontal Instrumento Virtual para Monitoreo del Plastómetro.

#### IV. RESULTADOS ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE DILATOMETRÍA Y PLASTOMETRÍA.

Se verificó la operación del Equipo Plastómetro y Dilatómetro sobre la plataforma virtual mediante la realización de los ensayos de Dilatometría y Plastometría para 3 muestras de carbón conocidas con las cuales previamente se habían realizado pruebas. De esta manera se validó el funcionamiento de los equipos mediante la comparación y análisis de los resultados previos (sin instrumentación virtual) con los realizados con instrumentación virtual.

##### A. Ensayo Plastométrico

El ensayo plastométrico se realizó sobre el plastómetro de Gieseler del Laboratorio de Carbones de la UPTC siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D2639 y utilizando la plataforma HMI diseñada en LabVIEW™ diseñada, cuyo reporte de resultados en Microsoft Excel® se describen en la Fig. 18 y la Tabla I.

Se observa que las muestras de carbón #2 y #3 presentan una fluidez máxima con una diferencia de 300 ddpm, mientras que la muestra de carbón #1 una fluidez 110% superior con respecto a los otros dos tipos de carbón.

El rango plástico, definido como la diferencia entre las temperaturas de resolidificación y ablandamiento, varía para los tres carbones indicando que la zona plástica aumenta

conforme se reduce el rango, incrementa la materia volátil y la máxima fluidez.

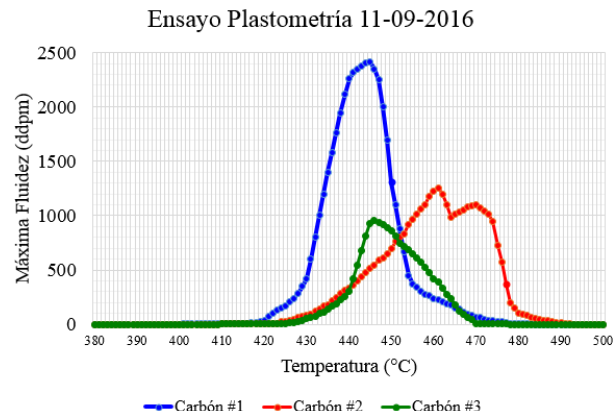


Fig. 17. Reporte Plastometría de Tres Muestras de Carbón #1, #2 y #3.

TABLA I  
ANÁLISIS PLASTOMÉTRICO DE LAS MUESTRAS DE CARBÓN FIG. 17.

CARBÓN	RP	MF	TA	TMF	TR
Carbón #1	80,0	2403,5	384,7	445,2	481,5
Carbón #2	52,0	1253,7	395,2	461,5	495,7
Carbón #3	69,0	960,1	397,8	446,7	473,8

Donde *RP* es el rango plástico en °C; *MF* la máxima fluidez en ddpm; *TA* la temperatura de ablandamiento en °C; *TMF* la temperatura de máxima fluidez en °C y *TR* la temperatura de resolidificación en °C.

De estos resultados se puede analizar que la temperatura de ablandamiento para el carbón #1 es menor en cerca del 10% con respecto a los otros dos carbones; mientras que el carbón #2 muestra las mayores temperaturas de máxima fluidez y de resolidificación. Estas diferencias de temperaturas de ablandamiento y resolidificación indican que la aglutinación de los granos de carbón se inicia más rápido en el carbón #1. El carbón #1 presenta la máxima fluidez y a su vez la menor reflectancia media aleatoria [29, 30].

##### B. Ensayo Dilatómetro

El ensayo dilatómetro se realizó en el dilatómetro Audibert – Arnu disponible en el laboratorio de carbones de la UPTC, Seccional Tunja, de acuerdo con la norma ASTM D5515 y utilizando la plataforma de hardware-software diseñada, donde los resultados del reporte en Microsoft Excel® se presentan en la Fig. 18.

Se observa que la muestra de carbón #2 a diferencia de los carbones #1 y #3 no presenta contracción, lo que indica que la masa plástica es más densa, evitando que los gases y vapores salgan rápidamente. Esto significa que la presión generada en el interior del carbón es mucho mayor, con la capacidad de soportar y superar la fuerza de gravedad y la ejección por el LVDT.

Así mismo el carbón #2 tarda más tiempo en presentar el ablandamiento de los granos de carbón, pero presenta una temperatura menor de dilatación.

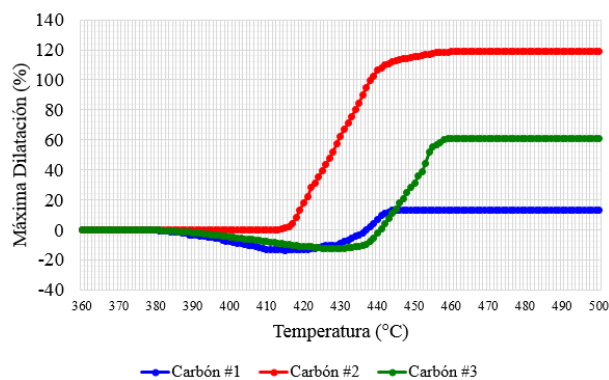


Fig. 18. Reporte Dilatometría de tres muestras de Carbón #1, #2 y #3.

La mayor contracción se presenta en el carbón #1 con un rango de dilatación menor, mayor fluidez y menor reflectancia media aleatoria. A partir de estas curvas se obtuvieron las temperaturas de ablandamiento, máxima contracción y máxima dilatación que se indican en la Tabla II.

TABLA II

ANÁLISIS DILATOMÉTRICO DE LAS MUESTRAS DE CARBÓN FIG. 18.

CARBÓN	TA	TMD	MD	TMC	MC	DT	G
Carbón #1	383,4	444,2	13	415	13,2	26,2	1,004
Carbón #2	415,3	461,4	119	NA	NA	119	1,057
Carbón #3	378,2	455,2	61	422	12,1	73,1	1,079

Donde  $TA$  es la temperatura de ablandamiento en  $^{\circ}C$ ;  $TMA$  la temperatura de máxima fluidez en  $^{\circ}C$ ;  $MD$  la máxima dilatación en %;  $TMC$  la temperatura de máxima contracción en  $^{\circ}C$ ;  $MC$  la máxima contracción en %;  $DT$  la dilatación total en %;  $NA$ : no aplica; y  $G$  el factor  $G$ .

La dilatación parece no presentar una relación con la máxima fluidez; sin embargo, las temperaturas de ablandamiento y resolidificación tomadas de la plastometría y las temperaturas de ablandamiento y máxima dilatación de la prueba dilatométrica responden a valores cercanos, a pesar que son pruebas en las que el tamaño de partícula es diferente lo que podría estar generando la exclusión de un porcentaje de determinados macerales.

El método desarrollado por Simonis [30, 31] permite obtener el factor  $G$  que define la capacidad de coquización de un carbón o mezcla de carbones. Para los carbones estudiados, el factor  $G$  aumenta con el rango del carbón y decrece a medida que aumenta la máxima fluidez. Puede decirse que los tres carbones seleccionados poseen buenas capacidades de coquización y se esperaría que los coques formados a partir de sus mezclas presenten buenas características para su utilización en la industria, dado que su valor se encuentra cerca del intervalo de  $1,05$  a  $1,10$  definido para los carbones coquizantes de buena calidad [32], aunque para el Carbón #1 su valor  $G$  es  $1,004$ , valor ligeramente por fuera del límite inferior. Se aprecia que el carbón #1 presenta una dilatación total de  $26,2\%$  que lo clasifica como un carbón medianamente aglomerante, aunque su índice de ensanchamiento libre es mayor a 4 [30, 31, 32].

A través de la medición y acondicionamiento de señales de temperatura, desplazamiento lineal y pulsos por revolución de los equipos plastómetro y dilatómetro se rehabilitaron estos equipos de laboratorio que estaban inutilizados para su aplicación en el análisis de propiedades plásticas de los carbones para establecer sus usos industriales.

El prototipo de instrumento de monitoreo, visualización y registro de variables del dilatómetro y plastómetro descrito en este artículo se basa en una arquitectura donde una tarjeta de adquisición de datos NI 6001 de National Instruments™ concentra las señales acondicionadas para ser transferidas a un computador que actúa como unidad procesamiento virtual responsable de la interfaz de usuario sobre la plataforma de LabVIEW™.

Gracias a la modularidad de la arquitectura del sistema de instrumentación, resulta práctico su uso para realizar estudios de dilatometría y plastometría de carbones bajo la misma plataforma de trabajo reduciendo costos y espacio así como modularidad y fácil adaptación a otras máquinas o procesos.

Se mejoró la operación de los equipos plastómetro y dilatómetro disponibles en el Laboratorio de Carbones de la Universidad Pedagógica Tecnológica de Colombia, utilizados para determinar la fluidez del carbón con un diseño completamente nuevo de instrumentación virtual que vincula a los dos equipos mediante una misma interfaz de adquisición con un computador comercial, manteniendo los ensambles mecánicos, hornos, sensores y paneles de control de temperatura originales.

La plataforma de software hardware de instrumentación presentó aportes significativos y prestaciones adicionales como seguridad, portabilidad, adaptabilidad y confiabilidad para estimar las propiedades reológicas de los carbones con el propósito de establecer su calidad y aplicación industrial.

Los resultados de los ensayos de plasticidad y dilatación realizadas sobre tres muestras de carbón utilizando el prototipo de instrumento virtual implementado cumplieron satisfactoriamente con las expectativas planteadas debido a que concordaron con resultados de pruebas previamente realizadas con los mismos tipos de carbón, proporcionando un medio eficaz de medición para la investigación de expansión y dilatación de carbones.

## REFERENCIAS

- [1] J. G., Speight, *The chemistry and technology of coal*. 2<sup>nd</sup> Ed. New York: Marcel Dekker Press, 1994.
- [2] ASTM, International, "Standard Test Method for Determination of the Swelling Properties of Bituminous Coal Using a Dilatometer," in Designation: D5515-97. Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, USA, 2004.
- [3] ASTM, International, "Standard Test Method for Plastic Properties of Coal by the Constant-Torque Gieseler Plastometer," in Designation: D2639-04, Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, USA, 2004.

- [4] L., Benedict, R., Thompson, and R. Wenger, *Relationship between coal petrographic composition and coke stability in Blast Furnace and steel Plant*,” pp. 276 – 288, 1968.
- [5] R. J., Gray, “A petrologic method of analysis of nonmaceral microstructures in coal,” in *Int. Journal of Coal Geology*, pp. 79-97, 1982.
- [6] R. J., Gray, and K. F., Devanney, “Coke carbon forms: Microscopic classification and industrial applications,” in *Int. Journal of Coal Geology*, pp. 277-297, 1986.
- [7] H., Rong, and C., Yongli, “Fragmentation and Diffusion model for Coal Pyrolysis,” in *Journal of Analytical and applied Pyrolysis*, pp. 72 – 79, 2011.
- [8] J., Wang, et al., “Study on the structure and pyrolysis characteristics of Chinese Western coals,” pp. 430 – 433, 2010.
- [9] T., Yoshida, and M., Lino, “Study on thermoplasticity of coals, by dynamic viscoelastic measurement: effect of coal rank and comparison with Gieseler fluidity,” *Fuel*, pp. 399-404, 2000.
- [10] V. Papic, R. Puche-Panadero, P. Todorov and Z. Djurovic, "A new approach for classification of calorific coal properties in boiler systems," in 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Valletta, pp. 415-419, 2010.
- [11] D. Gu, D., Cheng, J. Yin, S. Qiao, L. Liu and X. Zhang, "Rapid analysis of coal properties," in *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 8, no. 5, pp. 22-27, Dec. 2005.
- [12] D. Alarcon, *Efecto de los parámetros Reológicos y Petrográficos del Carbón en la Calidad del Coque Metalúrgico*, Tesis para optar al título de Magíster en Ciencias – Química, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Química, Bogotá, D. C., Colombia, 2011.
- [13] G. García, *Estudio del comportamiento térmico del coque de petróleo y de sus mezclas con carbones bituminosos colombianos*, Tesis para optar al título de Magíster en Ciencias – Química, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Química, Bogotá, D. C., Colombia, 2012.
- [14] G. Rocha, V. Correia, M. Martins and J. M. Cabral, "Dilatometer for characterization of thermal expansion of ceramic samples," 35th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics, Porto, pp. 1853-1858, 2009.
- [15] Analog Devices, Inc., *Practical Design Techniques For Sensor Signal Conditioning*. Printed in the United States of America, 1999.
- [16] Analog Devices, Inc., *LVDT Signal Conditioner AD598*, Norwood, U.S.A., 2016.
- [17] National Instruments, *Measuring Position and Displacement with LVDTs*, Publish Date: Sep 12, 2016
- [18] H. Hsu, *Señales y Sistemas*. 2<sup>da</sup> Ed. México: Mc Graw Hill. Serie Shaum. 2013.
- [19] G. M. Schmiedeshoff, A. W. Lounsbury, D. J. Luna, S. J. Tracy, and A. J. Schramm, “Versatile and compact capacitive dilatometer,” in *Rev. Sci. Instr.* 77, 123907, 2006.
- [20] H. Korkmaz and B. Can, “A Thermal Expansion Measurement System Using a High-Temperature Unguided Half-Bridge Displacement Transducer,” *IEEE Trans. Instr. Meas.*, VOL. 54, pp. 1984-1988, 2005.
- [21] H. Y., Ryu and H. S. Suh, “A Fiber Ring Laser Dilatomter for Measuring Thermal Expansion Coefficient of Ultralow Expansion Material,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 19, pp. 1943-1945, 2007.
- [22] C. G., Tseng and Y. S., Jiang, “Optical interference dilatometer,” *Meas. Sci. Technol.*, 16, pp. 2114–2120, 2005.
- [23] J. J. Neumeier, R. K. Bollinger, G. E. Timmins, C. R. Lane, R. D. Krogstad, and J. Macaluso, “Capacitive-based dilatometer cell constructed of fused quartz for measuring the thermal expansion of solids,” *Rev. Sci. Instr.* 79, 033903, 2008.
- [24] S. Ming, C. Kai and T. Shaowei, "Design and Implementation of Control System for High Temperature and Pressure Dilatomter," 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Shangshai, pp. 878-880, 2011.
- [25] Analog Devices, Inc. *A Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation AD594/AD595*, Norwood, U.S.A., 1999.
- [26] A. O., Adeleke, R. S., Makan, and S.A. Ibitoye, *Studies on the Gieseler Plastometry Parameters of the American Pittson Coal for Metallurgical Cokemaking at the Ajaokuta Steel Plant*, Nigeria, *Pacific Journal of Science and Technology*, Vol. 8, Number 2.. Nov. 2007.
- [27] T. G., Shchukina, and A. A. Kaufman, “Comparative Determination of the Plastometric Characteristics of Coal on Standard and Automated Equipment,” in *Journal Coke and Chemistry*, Vol. 51, No. 6, pp. 204–205, 2008.
- [28] National Instruments, *User Guide NI USB-6001/6002/6003 Low-Cost DAQ USB Device*, 2014.
- [29] National Instruments, *Specifications NI USB-6001 Low-Cost DAQ USB Device*, 2014.
- [30] Stach’s, *Stach’s textbook of coal petrology*. 1982.
- [31] ASTM, International, “Standard Test Method for Microscopical Determination of the Vitrinite Reflectance of Coal,” in Designation: D2798–11, Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, USA, 2011.
- [32] Coal Age, *China becomes net Coal Importer*. *Coal Age*, pp. 14 -16, 2007.
- [33] Coal Age, *World news australian’s coal output*. *Coal Age*, pp. 7-20, 2008.