

Estudio de validación de viscosidad de un gas natural colombiano empleando un viscosímetro electromagnético de alta presión.

Juan Gabriel Otero Arteaga

Monografía presentada como requisito para optar el título de Especialista en Ingeniería del Gas

Director

Wilson Antonio Cañas Marín

Magíster en Ingeniería Química

Codirector

Germán González Silva

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Especialización en Ingeniería del Gas

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A mí Amada Esposa, por apoyarme incondicionalmente y estar ahí con su gran amor para animarme, y a mis hijos por enseñarme el valor de vivir.

Agradecimientos

Al Ing. Wilson Antonio Cañas Marín, por su gran y significativo ejemplo y por darme la oportunidad de crecer íntegramente en el Laboratorio de Análisis PVT-ICP.

Al Ing. German González por su aporte profesional en el desarrollo de este trabajo.

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivos General	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Referente.....	14
2.1 Marco Teórico.....	14
2.2 Estado del Arte.....	19
2.2.1 Correlaciones	19
2.2.2 Pruebas de laboratorio.....	22
2.3 Equipos usados en la medición de la viscosidad	23
2.3.1 Viscosímetro Capilar	23
2.3.2 Viscosímetro de Rotación	24
2.3.3 Viscosímetro Electromagnético	26
2.4 Método	26
2.4.1 Procedimiento del Equipo.....	26
2.4.2 Tratamiento de Fluidos	28
2.4.3 Equipo	28

2.5 Marco Experimental.....	30
2.5.1 Preparación de los Fluidos	30
2.5.2 Operación del Equipo	30
2.5.3 Armado del equipo.....	31
2.5.4 Ajuste de la temperatura	33
2.5.5 Transferencia de fluido para el desarrollo del ensayo	34
2.5.6 Operación del equipo para mediciones a presiones mayores a la atmosférica	36
2.5.7 Lavado del equipo.....	38
2.5.8 Medición	40
2.6 Resultados	42
2.6.1 Calibración.....	43
2.6.2 Medición de Viscosidad en Gas Natural.....	43
3. Conclusiones	49
4. Recomendaciones	49
Referencias.....	51
Apéndices.....	53

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Explicación grafica la Ley de la Viscosidad de Newton.</i>	15
Figura 2. <i>Relación entre el Esfuerzo cortante y la Tasa de deformación para varios fluidos.</i>	17
Figura 3. <i>Viscosímetro de rotación por cilindros concéntricos.</i>	25
Figura 4. <i>Esquema del Viscosímetro Electromagnético</i>	29
Figura 5. <i>Esquema del viscosímetro electromagnético.</i>	31
Figura 6. <i>Resumen. Ajuste del Pentano a 150°F</i>	46
Figura 7. <i>Resumen. Ajuste del Pentano a 200°F</i>	46
Figura 8. <i>Resumen. Ajuste del Pentano a 220°F</i>	47
Figura 9. <i>Resumen Ajuste del Helio a 150°F</i>	47
Figura 10. <i>Resumen Ajuste del Helio a 200°F</i>	48
Figura 11. <i>Resumen Ajuste del Helio a 220°F</i>	48

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Comparación entre los diferentes equipos para la medición de la viscosidad</i>	26
Tabla 2. <i>Parámetros a ser usados para la medición de la viscosidad del Pentano (Límite superior)</i>	41
Tabla 3. <i>Parámetros a ser usados para la medición de la viscosidad del Helio (Límite Inferior)</i>	42
Tabla 4. <i>Especificaciones técnicas del viscosímetro 1.</i>	43
Tabla 5. <i>Resultados experimentales obtenidos para el Pentano</i>	44
Tabla 6. <i>Resultados Experimentales para el Helio</i>	45

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Propiedades del Pentano	53
Apéndice B. Propiedades del Helio	55
Apéndice C. Resultados Experimentales	57

Resumen

Título: Estudio de validación de viscosidad de un gas natural colombiano empleando un viscosímetro electromagnético de alta presión.*

Autor: Juan Gabriel Otero Arteaga**

Palabras claves:

Descripción

El incremento en los precios de gas natural nos brinda un incentivo para medir este recurso de manera más precisa (Gawish & Al-Homadhi, 2005). Mejorar la precisión en la medición de las propiedades del gas natural requiere del uso de parámetros como la viscosidad (Johansen, 2009) el cual regula la fluidez del hidrocarburo tanto en yacimiento como en superficie; Diferentes métodos de calcular la viscosidad de gases naturales pueden producir valores con diferencias de hasta el 50% (Johansen, 2009) lo cual es totalmente indeseable si se requieren hacer pronósticos, evaluaciones financieras y toma de decisiones basados en esta información.

Este trabajo tiene como objetivo el validar una metodología para la medición de la viscosidad del gas usando un viscosímetro electromagnético, con variaciones en la temperatura y la presión. Esto con el fin de que la metodología pueda ser escalada y utilizada para posteriores estudios, investigaciones y validaciones a realizar sobre los gases naturales provenientes de los diferentes yacimientos de hidrocarburos comerciales del país.

Se puede comprobar que los errores experimentales de este trabajo son inferiores a 5% en todos los rangos de presión y temperatura para los dos fluidos analizados, con lo cual se puede determinar que el viscosímetro electromagnético es un método muy preciso en la determinación de la viscosidad de gases.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Ingeniería del Gas. Director: Wilson Antonio Cañas Marín, Magíster en Ingeniería Química. Codirector: Germán González Silva, Doctor en Ingeniería Química

Abstract

Title: Viscosity validation study of a Colombian natural gas using a high pressure electromagnetic viscometer.*

Author: Juan Gabriel Otero Arteaga**

Keywords:**Description**

The increase in natural gas prices gives us an incentive to measure this resource more accurately (Gawish & Al-Homadh, 2005). Improving the accuracy in measuring natural gas properties requires the use of parameters such as viscosity (Johansen, 2009) which regulates the fluidity of hydrocarbon both in reservoirs and surface; different methods of calculating the viscosity of natural gases can produce values with differences of up to 50% (Johansen, 2009) which is totally undesirable if the data is supposed to be used for forecasting, financial assessments and decision-making.

This work aims to validate a methodology for measuring gas viscosity using an electromagnetic viscometer, with variations in temperature and pressure. These variations are made in order that the methodology can be scaled up and used for further studies, research and validations to be carried out on natural gases from the different commercial hydrocarbon reservoirs in the country.

Experimental errors in this work can be found to be less than 5% in all pressure and temperature ranges for the two fluids analyzed, therefore it can be determined that the electromagnetic viscometer is a very accurate method in determining the viscosity of gases.

* Degree work

** Faculty of Physicochemical Engineering. Petroleum Engineering School. Specialization in Gas Engineering. Director: Wilson Antonio Cañas Marín, Master in Chemical Engineering. Co-director: Germán González Silva, Doctor in Chemical Engineering

Introducción

Durante el periodo de desarrollo de un campo petrolero, el tratamiento del gas natural en cualquiera de sus etapas (producción, transporte y alistamiento preventa) genera una serie de retos que deben ser controlados. Los parámetros físicos, químicos y termodinámicos del hidrocarburo y los constantes cambios en temperatura y presión que ocurren a lo largo de la cadena productiva de los hidrocarburos pueden determinar cambios críticos e irreversibles en su composición. Por tal motivo generar metodologías para identificar estos comportamientos se hace importante en la industria.

Se requiere proponer metodologías para realizar análisis de diversas propiedades de gases, permitiendo variaciones en el parámetro de temperatura y poder identificar valores que orienten a establecer comportamientos típicos de fluidos gaseosos colombianos.

El incremento en los precios de gas natural nos brinda un incentivo para medir este recurso de manera más precisa (Gawish & Al-Homadhi, 2005), pero mejorar la precisión en la medición de las propiedades del gas natural requiere del uso de parámetros como la viscosidad (Johansen, 2009) el cual regula la fluidez del hidrocarburo tanto en yacimiento como en superficie; Diferentes métodos de calcular la viscosidad de gases naturales pueden producir valores con diferencias de hasta el 50% (Johansen, 2009) lo cual es totalmente indeseable si requiere de hacer pronósticos, evaluaciones financieras y toma de decisiones basados en esta información.

Se requiere proponer metodologías para realizar análisis de diversas propiedades de gases, permitiendo variaciones en el parámetro de temperatura y poder identificar valores que orienten a establecer comportamientos típicos de fluidos gaseosos colombianos.

Este trabajo tiene como objetivo el validar una metodología para la medición de la viscosidad del gas usando un viscosímetro electromagnético, con variaciones en la temperatura y la presión. Esto con el fin de que la metodología pueda ser escalada y utilizada para posteriores estudios, investigaciones y validaciones a realizar sobre los gases naturales provenientes de los diferentes yacimientos de hidrocarburos comerciales del país.

Este documento presentará los pasos a seguir para la validación de esta metodología, empezando con la definición de la viscosidad, un breve estudio de los métodos usados en la estimación y determinación experimental de la viscosidad en gases; un breve repaso del método de determinación de la viscosidad usando el viscosímetro electromagnético y finalmente la presentación de los resultados de la medición de viscosidad para dos fluidos diferentes usando como referencia sus valores de viscosidad a diferentes presiones y temperaturas. Se puede comprobar que los errores experimentales son inferiores a 5% en todos los rangos de presión y temperatura para los dos fluidos analizados, con lo cual se puede determinar que el viscosímetro electromagnético es un método muy preciso en la determinación de la viscosidad de gases.

1. Objetivos

1.1 Objetivos General

Proponer un procedimiento para validar la metodología de medición de viscosidad de un gas natural colombiano, mediante un viscosímetro electromagnético.

1.2 Objetivos Específicos

Describir la técnica de medición de viscosidad por medio de tecnología de pistón oscilante.

Explicar el principio de funcionamiento del viscosímetro electromagnético o de pistón oscilante

Plantear un procedimiento de validación en la metodología de medición de viscosidad utilizando la técnica de viscosímetro electromagnético.

2. Marco Referente

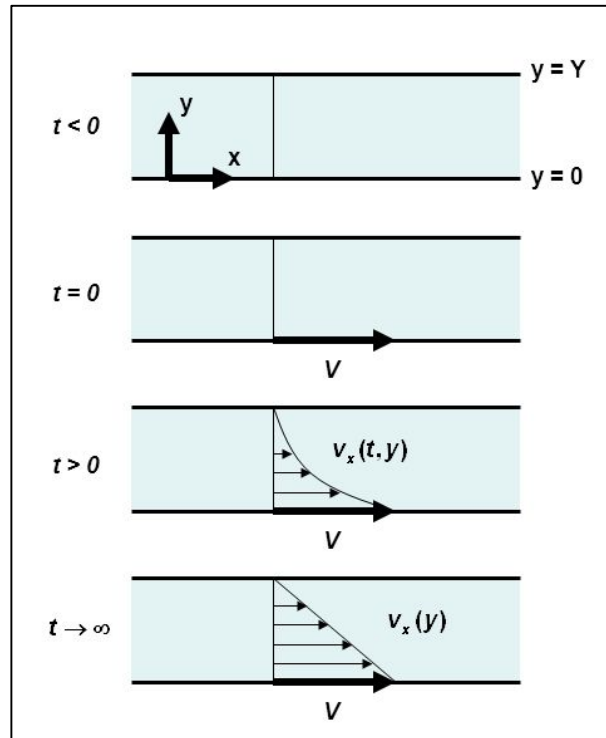
2.1 Marco Teórico

La viscosidad es una propiedad de los fluidos que representa la resistencia interna de un fluido al movimiento o la fluidez. La fuerza de arrastre, que es la fuerza que ejerce un fluido fluyente sobre un objeto depende en parte de la viscosidad (Çengel & Cimbala, 2012) De hecho, esta fuerza de arrastre es la que usa para plantear teóricamente la viscosidad y establecer su magnitud. Para explicar un poco el planteamiento se explicará a continuación la Ley de la viscosidad de Newton.

Se considera una capa de fluido entre dos placas paralelas muy grandes, separadas por una distancia Y . Se aplica una fuerza F a la placa inferior, mientras la placa superior se mantiene fija. La fuerza aplicada en la placa inferior genera un movimiento con velocidad V (misma de la placa) en el fluido que está en contacto directo con la placa, y estas moléculas de fluido a su vez con las moléculas que están en contacto con ellas. Esto crea un perfil de velocidad que se extiende por el espacio entre las placas, Y , a medida que pasa el tiempo y en el que la velocidad va disminuyendo a medida que las moléculas se acercan a la placa superior. (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2006)

Figura 1.

Explicación gráfica la Ley de la Viscosidad de Newton.



Nota: Adaptado de Bird, R.B.; Stewart, W.E.; Lightfoot, E.N. (2006). Fenómenos de Transporte.

Mexico, D.F. Editorial Limusa, S. A. de C. V. Grupo Noriega Editores. 1 - 1045

A partir de lo explicado pueden obtenerse varias conclusiones, una de ellas es que se puede establecer la siguiente relación matemática:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V}{Y}$$

Donde,

F = es la fuerza aplicada sobre la placa inferior

A = es el área de las placas

μ = Viscosidad del fluido

V = Velocidad con la que se mueve la placa inferior

Y = es la distancia entre placas

La relación $\frac{F}{A}$ es también conocida como esfuerzo cortante, o τ , y la relación $\frac{V}{Y}$ puede ser expresada en forma diferencial así: $\frac{dv}{dy}$. Con lo cual la ecuación descrita anteriormente podría reescribirse como:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

Durante el intervalo diferencial de tiempo dt las moléculas del fluido giran o se deforman describiendo un ángulo diferencial $d\beta$. Si se reordena la ecuación y se agrega el término de deformación se obtiene que:

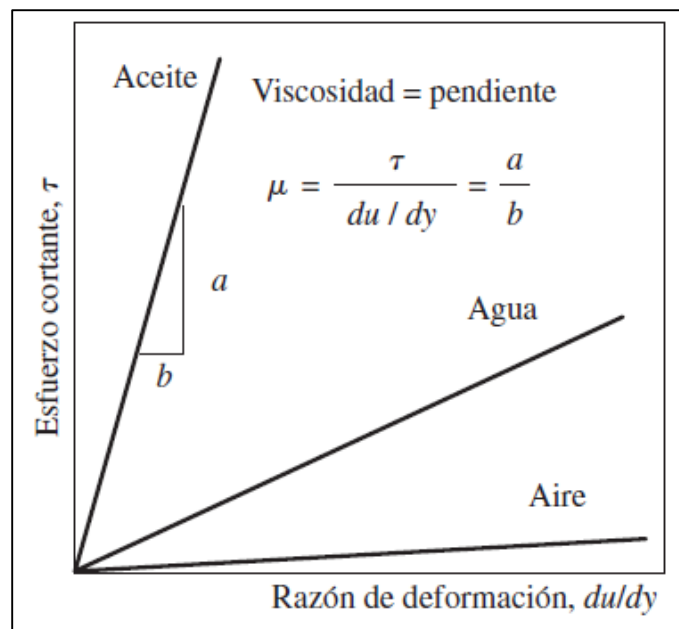
$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{dv}{dy}$$

Con lo que puede concluirse que el esfuerzo cortante es proporcional la deformación angular que sufran las moléculas del fluido, multiplicada por la viscosidad, una propiedad del fluido que expresa su resistencia a fluir.

Con base en la relación anterior se pueden hacer aún más inferencias como el hecho de que si se grafica el esfuerzo cortante vs la Tasa de deformación $\left(\frac{d\beta}{dt}\right)$ la pendiente de la línea producida será la viscosidad del fluido y que si dicha pendiente es un valor constante el fluido es Newtoniano como puede observarse en la figura 2 (Çengel & Cimbala, 2012). También se puede concluir que la viscosidad se debe a la fuerza de fricción interna que se desarrolla entre las diferentes capas de los fluidos a medida que se obligan a moverse una con relación a las otras y que esta propiedad es una medida de la resistencia a la deformación del fluido.

Figura 2.

Relación entre el Esfuerzo cortante y la Tasa de deformación para varios fluidos.



Nota: Adaptado de Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2012). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. (2a. ed.--). México D.F.: McGraw Hill. Obtenido de <http://www.bibvirtual.ucb.edu.bo:8000/opac/Record/100001230>

En los líquidos, la viscosidad se origina por las fuerzas de cohesión entre las moléculas mientras que, en los gases por las colisiones moleculares, además de que ésta varía mucho con la temperatura.

En los líquidos la viscosidad se origina porque las moléculas están unidas por fuerzas de cohesión, que pueden ser reducidas con el aumento de la temperatura; cabe mencionar que un aumento en las fuerzas de cohesión entre las moléculas provoca un aumento en la viscosidad ya que unas moléculas más unidas entre sí soportan mejor la deformación.

En los gases no existen las fuerzas de cohesión (son casi nulas), pero existen movimiento aleatorios de las moléculas, por lo que la viscosidad en un gas está afectada por la cantidad de colisiones que se presenten entre las moléculas, por esto a medida que aumenta la temperatura de un gas aumenta también su viscosidad, debido a que las colisiones aleatorias aumentan y más difícil mover o deformar el fluido.

La viscosidad de los gases se puede expresar como función de la temperatura por la correlación de Sutherland (de The U. S. Standard Atmosphere) como:

$$\mu_g = \frac{aT^{1/2}}{1 + b/T}$$

Donde,

μ_g = Viscosidad del Gas

a = Constante determinada experimentalmente

b = Constante determinada experimentalmente

T = Temperatura del Gas

Aunque con la correlación se obtengan buenos resultados siempre debe tenerse en cuenta el resultado experimental para el gas particular y sus condiciones de presión y temperatura, para lo cual existen recursos con el NIST Chemistry WebBook, que es un compendio de propiedades para fluidos de transferencia de calor, componentes del aire y componentes de los gases naturales; o la Base de datos Standard de referencia de la NIST en la cual se pueden encontrar algunos gases usados en procesos con semiconductores NIST (2014).

2.2 Estado del Arte

En este apartado se describirán algunos métodos para la estimación y obtención de la viscosidad en gases.

2.2.1 Correlaciones

Las siguientes correlaciones fueron desarrolladas por algunos investigadores alrededor del mundo (Gawish & Al-Homadhi, 2005).

- Herning y Zipperer (1936). Para ellos el análisis de la mezcla gaseosa es conocido, así como las viscosidades de los componentes en la mezcla a la presión y temperatura de interés.

$$\mu_g = \frac{\sum(\mu_{gi}y_i\sqrt{M_i})}{\sum(y_i\sqrt{M_i})}$$

- Método Dean y Stiel (1958). Propusieron el siguiente método para calcular la viscosidad de los gases naturales a condiciones de yacimiento, donde se calcula primero el efecto de la temperatura y luego se utiliza este resultado para hallar el efecto de la presión.

$$\mu_1 = 34(10^{-5}) \frac{(T_r)^8}{\xi_m} \text{ para } T_r < 1,5$$

$$\mu_1 = \frac{166.8(10^{-5})(0,1338T_r - 0.0932)^5}{\xi_m} \text{ para } T_r > 1,5$$

$$\xi_m = 5.4402 \frac{(T_c)^{\frac{1}{6}}}{(MW_a)^{\frac{1}{2}}(P_c)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\mu_g = \mu_1 + \frac{10.8(10^{-5}) [e^{1.439\rho_r} - e^{-1.111\rho_r^{1.888}}]}{\xi_m}$$

Donde,

$$\rho_r = \frac{0,27P_r}{ZT_r}$$

- Método Lee-González Eakin (1996). Presentaron una relación semiempírica para calcular la viscosidad de los gases naturales con una desviación estándar de entre 2.7% y 8,99% en rangos de presión de entre 10 a 8000 psia, rango de temperatura entre 100 y 340 °F y contenido de CO₂ de entre 0,9 y 3,2% mol.

$$\mu_g = 10^{-4} K * e \left[X \left(\frac{\rho_g}{62.4} \right)^Y \right]$$

Donde,

$$K = \frac{(9.4 + 0.02M_a)T^{1.5}}{209 + 19M_a + T}$$

$$X = 3.5 + \frac{986}{T} 0.01M_a$$

$$Y = 2.4 - 0.02X$$

- Bicker y Katz (1943). Presentaron un gráfico de la viscosidad de gases parafínicos a 1 atmosfera de presión en función de su peso molecular. Esta viscosidad debía ser corregida por la presencia de gases no hidrocarburos.

- Carr, Kobayashi y Burrows. Extendieron la correlación de Comings et al (1940) a un rango más grande de presiones y a mezclas más complejas de gases.

- Standing (1977). Propuso una expresión matemática para el cálculo de la viscosidad de gases naturales a presión atmosférica y la temperatura de yacimiento. También presentó en su ecuación el efecto de los gases no hidrocarburos.

$$\mu_1 = (\mu_1)_{unc} + (\Delta\mu)_{CO_2} + (\Delta\mu)_{H_2S} + (\Delta\mu)_{N_2}$$

$$(\mu_1)_{unc} = (1,709 * 10^{-5} - 2,062 * 10^{-6}\gamma_g) * (T - 460) + 8,188 * 10^{-5} - 6,15 * 10^{-3}\log(\gamma_g)$$

$$(\Delta\mu)_{CO_2} = y_{CO_2} 10^{-3} [9,08 * \log(\gamma_g) + 6,24]$$

$$(\Delta\mu)_{H_2S} = y_{H_2S} 10^{-3} [8,49 * \log(\gamma_g) + 3,73]$$

$$(\Delta\mu)_{N_2} = y_{N_2} 10^{-3} [8,48 * \log(\gamma_g) + 9,59]$$

- Dempsey (1965). Presentó la relación de viscosidad usando la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \ln \left[T_r \left(\frac{\mu_g}{\mu_1} \right) \right] = & a_0 + a_1 P_r + a_2 P_r^2 + T_r (a_4 + a_5 P_r + a_6 P_r^2 + a_7 P_r^3) + T_r^2 (a_8 + a_9 P_r + a_{10} P_r^2 + a_{11} P_r^3) \\ & + T_r^3 (a_{12} + a_{13} P_r + a_{14} P_r^2 + a_{15} P_r^3) \end{aligned}$$

2.2.2 Pruebas de laboratorio

De acuerdo con NIST (National Institute for Standards and Technology) (2014) estas son algunas de las investigaciones experimentales más recientes en torno a la viscosidad de gases.

- Cencek et al., (2012), calcularon la viscosidad (y la conductividad térmica) del helio a densidad cero en el rango de temperatura entre 1 y 10000 K. Su trabajo ha sido parte fundamental de la física, la mecánica cuántica y la mecánica estadística. Sus resultados tienen una incertidumbre de 10^{-5} cerca a la temperatura ambiente, las cuales son las incertidumbres más bajas para cualquier viscosidad de gas reportada hasta el momento.

- Berg y Moldover (2012), revisaron y publicaron las mediciones de viscosidad para 11 gases diluidos cerca a los 25°C . Los datos de 18 instrumentos arrojaron relaciones de viscosidad con incertidumbres entre $2,7 \cdot 10^{-4}$ y $3,6 \cdot 10^{-4}$. Usaron el valor teórico del helio como referencia.

- May et al., 2007 y May et al., 2006. Desarrollaron un viscosímetro capilar para medir la relación entre la viscosidad calcula del helio diluido y de los gases de prueba en el intervalo de temperatura entre 200 y 400 K. Su investigación fue utilizada para calibrar otros instrumentos y para probar los valores calculados de viscosidad del Hidrogeno y el Argón. Tuvieron incertidumbres en el rango de $2 \cdot 10^{-4}$ y $8 \cdot 10^{-4}$.

- Gillis et al., (2003), desarrollaron un viscosímetro acústico para medir las viscosidad de gases a presiones de hasta 3MPa.este viscosímetro fue calibrado con Helio y Argón para determinar las viscosidades de gases semiconductores, refrigerantes alternativos, etc. Sus incertidumbres de medición fueron de aproximadamente 0,5%.

2.3 Equipos usados en la medición de la viscosidad

En esta sección se revisarán algunas de las características principales de los medidores de viscosidad de gas más utilizados.

2.3.1 Viscosímetro Capilar

Según Castillo (2014, pág. 21) “el viscosímetro capilar está diseñado para la determinación de la viscosidad de una sola fase de fluidos a condiciones de yacimiento, ya sean líquidos o gases”. Estos viscosímetros están basados en la ley de Pousielle, según la cual la viscosidad de un fluido es una función de la caída de presión del fluido cuando pasa a través de un capilar con un flujo laminar.

Generalmente estos viscosímetros incluyen dos columnas capilares que sirven para cubrir un rango de viscosidades que van desde 0.3 cP hasta 10000 cP. Los valores de presión que se emplean para estos viscosímetros incluyen desde presión atmosférica hasta 10,000 psi.

Para la medición lo que se realiza es tomar el tiempo que tarda el fluido en atravesar el tubo capilar, ya que “el tiempo que le toma al fluido pasar por el tubo capilar es inversamente proporcional a la densidad del fluido, y directamente proporcional a la viscosidad dinámica”. (Castillo, 2014)

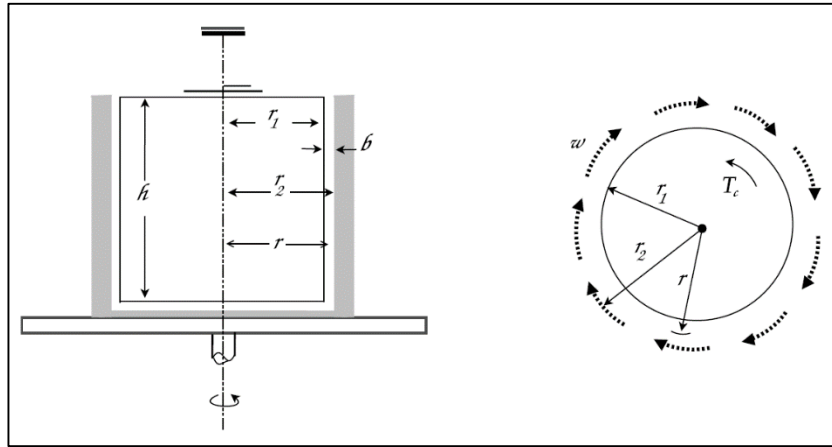
Las características más sobresalientes de este tipo de viscosímetros son su precisión, que se pueden hacer mediciones en condiciones de yacimiento, el gran rango de viscosidad que abarcan, su tiempo de medición y la facilidad de limpieza.

2.3.2 Viscosímetro de Rotación

Según Juárez, (2016, pág. 4) “El viscosímetro de rotación determina la viscosidad por medio de la ley de Newton”, en este método se mide el gradiente de velocidad y el esfuerzo cortante que como sabemos se relacionan por medio de la Ley de Viscosidad de Newton con la viscosidad. La técnica utiliza un cilindro que gira con una velocidad conocida con respecto a otro cilindro interno el cual está en reposo. Los cilindros se encuentran en un arreglo concéntrico como se observa en la siguiente figura:

Figura 3.

Viscosímetro de rotación por cilindros concéntricos.



Nota: Adaptado de Juárez, C. (2016). Estudio de la metodología para la calibración de un viscosímetro de pistón alternante en la medición de viscosidad en fase gas a alta presión. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Nacional de Ingeniería Química e Industrias Extractiva

Para calcular la viscosidad se debe considerar: la velocidad de rotación N la cual esta expresada en rpm, el radio del cilindro externo como r_2 el cambio de velocidad del fluido en la superficie externo y el espacio entre los cilindros (b).

Para calcular el esfuerzo cortante se mide el torque en el cilindro interno con el hilo de torsión que se encuentra suspendido dentro del viscosímetro y se considera la superficie del cilindro interno.

Una de las restricciones del viscosímetro rotacional es que b siempre debe ser menor que el radio r_1 del cilindro interno.

2.3.3 Viscosímetro Electromagnético

Dos bobinas mueven al pistón de arriba hacia abajo dentro de un espacio anular en el cual está contenida la muestra a analizar y el pistón elegido (existen varios pistones dependiendo del rango de viscosidad a analizar en la prueba, estos pistones varían entre 0,02 y 20000 cP). El movimiento del pistón es controlado y el tiempo que tarda el pistón en recorrer la distancia completa de trayectoria es medido para determinar la viscosidad del fluido. Si la viscosidad incrementa el tiempo de recorrido también incrementa. En estas celdas se incluye un detector de temperatura, por lo cual esta variable es conocida durante todo el proceso.

Los viscosímetros electromagnéticos pueden actuar bajo el efecto de temperaturas de hasta 150°C y presiones de hasta 20000 psig (Castillo, 2014). Su rango de medición de viscosidad es de entre 0,02 y 20000 cP.

Tabla 1.

Comparación entre los diferentes equipos para la medición de la viscosidad

Parámetro\Equipo	Capilar	Rotación	Electromagnético
Principio Físico	Ley de Pousielle	Ley de Newton	
Rangos de Viscosidad	0,3 – 10000 cP	-	0,02 – 20000 cP
Rangos de Presión	14,7 – 10000 psig	-	14,7 – 20000 psig

2.4 Método

2.4.1 Procedimiento del Equipo

El principio de medición, bajo el cual opera el viscosímetro electromagnético, puede ser descrito de la siguiente manera (Pimentel, 2009):

Un pistón (conteniendo partes ferro magnéticas) es inducido a un movimiento alterno controlado dentro de una cámara que contiene la muestra de fluido.

La medición del tiempo recorrido del pistón, en ambos sentidos, entre dos posiciones definidas en la cámara (arriba - abajo o derecha - izquierda), se relaciona directamente con la viscosidad del fluido en estudio a las condiciones de Presión y Temperatura a las cuales se encuentre.

El movimiento del pistón se efectúa por medio de dos bobinas, montadas en diferentes lugares alrededor de la cámara de medición (dependiendo la dirección del movimiento del pistón), de manera que el pistón vaya de la primera bobina hasta la segunda.

El circuito electrónico está diseñado para alimentar una corriente alterna a una de las bobinas, de manera que se cree un campo magnético, que impulsa al pistón e índice una fuerza electromotriz sobre la segunda bobina.

El movimiento del pistón causa un cambio en la inductancia mutua entre las bobinas, lo resulta en un cambio en la amplitud de la fuerza electromotriz observada en la segunda bobina. De acuerdo con esto, es posible determinar cuando el pistón se ha movido hacia una posición predeterminada con referencia a la primera bobina.

Cuando este punto es alcanzado, se corta la corriente alterna que se alimentaba a la primera bobina y se alimenta a la segunda bobina, creando un nuevo campo magnético (ahora en la segunda bobina), el cual hace que el pistón se mueva de regreso hasta una posición de referencia respecto a la segunda bobina, entonces la secuencia es repetida.

El instrumento determina la viscosidad del fluido contenido dentro de la cámara de medición por medio de algoritmos usando un software especializado.

2.4.2 Tratamiento de Fluidos

Los fluidos a ingresar en la cámara deben ser seleccionados, presurizados y purgados dentro de la cámara para asegurar la representatividad de la muestra.

2.4.3 Equipo

Los viscosímetros electromagnéticos marca Cambridge son un sistema que permite realizar análisis de viscosidad a altas presiones y temperaturas. Su principio de funcionamiento es electromagnético; consta de una consola de control para ingresar datos de condición del análisis, un transductor de presión y su respectivo display. Cada viscosímetro cuenta con un baño de calentamiento para regular la temperatura. En el caso del viscosímetro 2 lo asiste un baño auxiliar, normalmente seteado a temperatura ambiente, que en conjunto crean un sistema cerrado de control de temperatura. Para realizar análisis a altas presiones la cantidad de muestra necesaria es mínimo 10 c.c. Para análisis con fluidos a presión atmosférica solo es necesario el total de llenado de la cámara de medición, es decir 4cc. El operario de los viscosímetros electromagnéticos debe tener siempre presente que está manipulando un equipo de alta tecnología, que implica tener conocimientos técnicos básicos y entrenamiento en manipulación de válvulas y transferencias de fluidos a alta presión y temperatura; esto, en conjunto con prácticas seguras, garantiza no poner en riesgo su salud y la de sus compañeros, asegurando la confiabilidad en su trabajo y el coherente resultado de los análisis.

- a) Display de presión y panel de control para cada equipo
- b) Baño de calentamiento viscosímetro 1
- c) Baños de calentamiento viscosímetro 2.

- d) Panel de control de temperatura viscosímetro 2
- e) Cámara de medición viscosímetro 1
- f) Cámara de medición viscosímetro 2
- g) Pistones viscosímetro 1 pistones viscosímetro 1

Figura 4.

Esquema del Viscosímetro Electromagnético



Nota: Adaptado de Sica. (2020). Viscosímetro electromagnético. Obtenido de <https://www.sicamedicion.com.mx/producto/sensor-viscosidad/>

2.5 Marco Experimental

2.5.1 Preparación de los Fluidos

Los fluidos de medición son trasladados a cilindros porta muestras Proserv de altas presiones, lo cuales cuentan con capacidad de hasta 700 cm^3 y pueden resistir condiciones de presión de hasta 15000 psig.

Luego el cilindro Proserv con la muestra es conectado al viscosímetro electromagnético usando líneas de 1/8". Para asegurar que la presión de la muestra sea la adecuada se utiliza una bomba de desplazamiento positivo con agua como fluido presurizante hasta llegar a la presión deseada.

Para asegurar la representatividad de la muestra dentro de la cámara se dejan circular alrededor de 20 cm^3 del fluido de prueba a través de la cámara antes de cerrarla para hacer la medición.

El control de la temperatura se hace directamente en la cámara de medición, donde por medio de bobinas eléctricas el fluido es calentado a la temperatura de prueba. El software del equipo registra el diferencial de temperatura entre la temperatura de prueba (ingresada al software) y la temperatura del fluido al interior de la cámara para realizar el control.

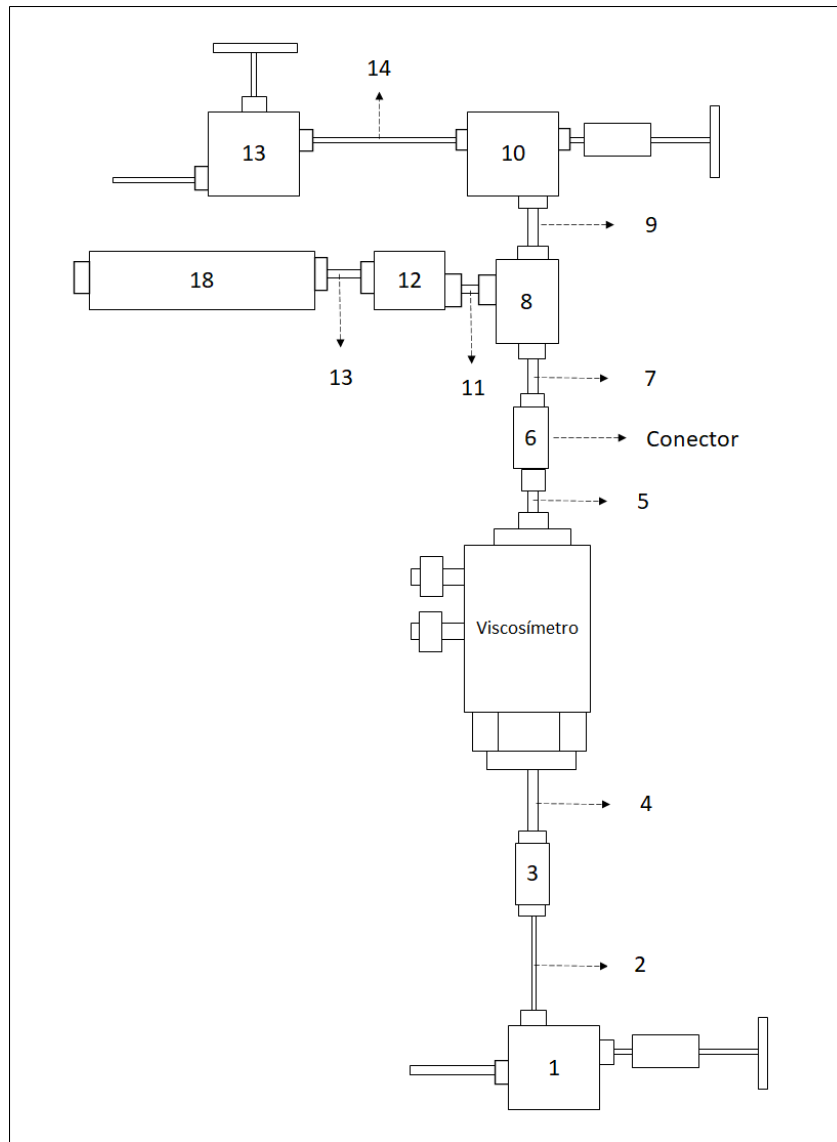
2.5.2 Operación del Equipo

Para el uso y operación del equipo electromagnético de medición de la viscosidad de gases se deben seguir los siguientes pasos, para asegurar una buena medición, la seguridad del persona y la integridad del equipo.

El siguiente es un esquema del viscosímetro Cambridge:

Figura 5.

Esquema del viscosímetro electromagnético.



2.5.3 Armado del equipo

a) Acoplar las líneas y conectores del punto 1 al punto 4 -conexiones inferiores- a la cámara del viscosímetro

b) Insertar dentro de la cámara de medición el pistón previamente seleccionado, dependiendo de las características del fluido y condiciones de análisis para la prueba.

c) Realizar las conexiones superiores teniendo en cuenta que la línea identificada con el número 8 (y que va al conector número 7), será la última que se ajuste, esto para evitar ruptura debido al punto crítico de conexión.

d) Posicionar la cámara del viscosímetro en el soporte y conectar las líneas del baño de calentamiento.

e) En el panel de control: Oprimir la tecla “Enter”, en la opción “Operate” desplazarse con la flecha inferior hasta la opción “Remove sensor”, esto mantendrá el pistón sin movimiento durante toda la operación.

f) Realizar prueba neumática para fugas a presiones que oscilen entre 1000 psig y 2000 psig durante 30 minutos, la temperatura debe mantenerse constante. La prueba se realiza inyectando nitrógeno por la válvula 1 (válvula de inyección) manteniendo la válvula 10 abierta y la válvula 15 (válvula de purga) siempre cerrada. Deben tomarse previamente las medidas para control de riesgos durante esta operación, tales como verificación de líneas, conectores y demás instrumentos que puedan generar posibles fallas; además verificar trabajos paralelos en el área del viscosímetro para no incurrir en fallas de control.

g) Instalar la chaqueta que da el aislamiento térmico al equipo.

RECOMENDACIÓN TÉCNICA: No se debe permitir que el cable de datos que conecta la cámara de medición con el panel de control para adjudicación de parámetros sufra el más mínimo movimiento de flexión, esto debido a que se puede generar desgaste y posterior ruptura

en el punto de empalme “cable de datos–cámara de medición”, poniendo en alto riesgo la integridad del viscosímetro.

2.5.4 Ajuste de la temperatura

El ajuste de la temperatura de ensayo es electrónico y se hace en el equipo periférico JULABO F12, este comando se encuentra en la parte superior del mismo equipo. Antes de encender el equipo debemos chequear que el nivel de aceite este en limite apto para la operación, para lo cual, el flotador interno en el reservorio de aceite debe estar totalmente sumergido en éste fluido. También se debe verificar la correcta conexión eléctrica y por último el buen ajuste de las mangueras de recirculación de aceite en la camisa del viscosímetro electromagnético. Una vez realizada esta inspección y aprobada procedemos a:

a) Encender el switch ubicado en la parte superior derecha de la consola de control del baño.

b) Encender el switch del tanque de almacenamiento de aceite, ubicado en la parte frontal superior derecha, en la pantalla aparecerá la señal OFF.

c) Encender el control con la tecla verde ubicada en la parte superior derecha del teclado.

d) Oprimir la tecla T, ubicada en la parte opuesta a la tecla OFF, de inmediato estará intermitente el último valor de set point al cual fue ajustado el equipo.

e) Con las teclas ubicadas en la parte central del control y que indican flecha a la derecha y flecha a la izquierda, ubicarse en el dígito a ajustar; posteriormente con las teclas que indican flecha hacia arriba y flecha hacia abajo, aumentar o disminuir el valor del set point.

f) Una vez ajustado el valor requerido, oprimir la tecla ubicada en la parte frontal inferior derecha del control (actúa como ENTER).

2.5.5 Transferencia de fluido para el desarrollo del ensayo

a) Restaurar la muestra mediante calentamiento y agitación.

b) Establecer un control en el área del viscosímetro si paralelamente se están ejecutando otras operaciones o análisis que generen un riesgo durante la inyección del fluido al viscosímetro; tales como compresión de gases o densidades a alta presión.

c) Verificar que el cilindro inyector esté debidamente asegurado, controlando riesgo de caída o fuga. No se recomienda montar el cilindro en una chaqueta de tela sobre una mesa metálica como buena práctica, debe hacerse en una chaqueta de calentamiento metálica o transportar al área del viscosímetro el rocking portador de la muestra.

d) Ubicar la cámara del viscosímetro en el soporte en posición vertical.

e) Conectar la línea de transferencia entre el viscosímetro y el cilindro que contiene la muestra a analizar (verificar que la válvula del cilindro se encuentre cerrada). Procurar que la línea de transferencia sea lo más corta posible, esto para minimizar el volumen muerto.

f) Instalar cinta de calentamiento, si la muestra lo requiere, asegurando esta operación con previa inspección del estado de esta y monitoreando el calentamiento mientras se ajusta la temperatura.

g) Abrir la válvula 1 del viscosímetro y realizar prueba neumática de fugas. El pistón debe estar detenido (remove pistón).

h) Calentar el manifold de conexión a la temperatura de realización de la prueba y hacer vacío. i. Cerrar la válvula 1 (válvula de inyección).

i) Conectar la bomba de desplazamiento positivo al cilindro (por el lado del agua). Previamente verificar compresibilidad y estabilización de la bomba.

j) Abrir el cilindro (por el lado del agua) y ajustar la presión a la condición a la cual se va a hacer la transferencia.

k) l. Tomar la lectura inicial de volumen y registrarlo en la bitácora de la prueba.

l) Abrir el cilindro (por el lado de la muestra) manteniendo la presión con la bomba; una vez se haya estabilizado la presión a la condición de la prueba, tomar la lectura final de volumen y registrar el dato. Asegurarse que la conexión esté libre de fugaz.

m) Abrir lentamente la válvula de inyección, verificando que se registre aumento de presión en el display del equipo. Esperar que la presión del equipo se iguale a la presión de transferencia.

n) Realizar purgas del sensor, realizando los siguientes pasos en el panel de control: Oprimir la tecla “Enter”, en la opción “Operate” desplazarse con la flecha inferior hasta la opción “Purge sensor”, realizar esta operación no menos de tres (3) veces.

o) Abrir lentamente la válvula 15, controlando que el equipo no pierda más de 1000 psig durante el proceso, mantener la presión del sistema con la bomba de desplazamiento positivo.

p) Desplazar aproximadamente 4 cc de fluido, con el fin de garantizar un barrido total de la muestra inyectada.

q) Cerrar la válvula 15.

r) Realizar verificación del funcionamiento del pistón elegido haciendo medición de la viscosidad de la muestra presente en el equipo, para lo cual se requieren los siguientes pasos: Oprimir en el panel de control, la tecla “Enter”, en la opción “Operate” desplazarse con la flecha

inferior hasta la opción “Measure viscosity”. Si el pistón elegido no es apto para la medición, el panel de control se pondrá intermitente y aparecerá la leyenda “sensor time out”.

s) Si en el paso anterior se verifica que el sensor no es el apropiado, se debe interrumpir la transferencia, proceder a seleccionar otro pistón y preparar el equipo nuevamente. Si en el paso “s” se verifica que el sensor es apropiado, detener el pistón.

t) Repetir dos veces más los pasos m, n y o, el volumen de fluido total removido del viscosímetro no debe ser menor de 7 c.c.

u) Repetir el paso l.

v) Cerrar la válvula 10.

w) Cerrar la válvula 1.

x) Desconectar la línea de transferencia.

2.5.6 Operación del equipo para mediciones a presiones mayores a la atmosférica

a) Posicionar la cámara del viscosímetro a 45°, esta posición siempre se debe mantener durante todas las mediciones.

b) Ajustar la temperatura del equipo a la temperatura definida para la prueba, acorde con el numeral 4.1.3 del presente documento, verificar estabilización. Solo después de que la temperatura este estabilizada, se podrán manipular válvulas para efectos de ajuste de presión, de lo contrario no es recomendado, debido a que la variación en temperatura incide en este sistema confinado.

c) Ubicar la cámara del viscosímetro en posición vertical, esta posición se debe conservar mientras el equipo este en modo “purgue sensor” o si está detenido “remove”.

d) Abrir la válvula 15 con el fin de drenar el fluido remanente en la línea 14 (verificar que la válvula 10 esté completamente cerrada).

e) Abrir lentamente la válvula 10 para ajustar la presión del fluido a la primera condición de presión definida para la prueba, la presión del equipo debe disminuir lentamente. Esta operación se debe realizar con mucha concentración, manipulando la válvula de modo muy lento y seguro, y manteniendo el control de caída de presión en el display del transductor.

f) Cerrar la válvula 10, inspeccionar que efectivamente con el bloqueo total de esta válvula cesa la caída de presión, de lo contrario el sistema podría estar descompensándose por deficiente ajuste en la misma.

g) Realizar purgas del sensor, realizando los siguientes pasos en el panel de control: Oprimir la tecla “Enter”, en la opción “Operate” desplazarse con la flecha inferior hasta la opción “Purge sensor”, realizar esta operación no menos de dos (2) veces.

h) Posicionar la cámara del viscosímetro a 45°, esta posición siempre se debe mantener durante todas las mediciones.

i) Repetir los pasos c, d, e, f, g y h para los demás puntos de presión. Si durante el ensayo se observan desajustes de la temperatura, llevar el equipo nuevamente a la condición requerida. Para algunos puntos de presión es posible que se requiera hacer purgas de fluido en más de una ocasión, si ese es el caso, siempre es necesario llevar a cabo los pasos c, d, e, f, g y h. Durante todo el análisis deben tenerse muy en cuenta las recomendaciones de seguridad y buena práctica del equipo, pues si no se realiza de este modo, se podría incurrir en fallas en manipulación del equipo y lograr caídas súbitas de presión, que para análisis a alta presión son extremadamente críticos e implican el aborto del análisis.

2.5.7 Lavado del equipo

a) Se recomienda conservar el orden en el área de los viscosímetros durante el alistamiento para lavado, esto como buena práctica para mantener la secuencia de la actividad y conservar la integridad de los componentes del mismo.

b) Despresurizar el sistema abriendo primero la válvula 10 seguida de la válvula 15. Esta operación es recomendable hacerla con un recipiente de plástico para almacenar los residuos de muestras que quedan en el equipo y que estarán a la presión final del análisis.

c) Desmontar el equipo, teniendo en cuenta desconectar primero la línea identificada en el plano con el número 8 y que va al conector número 7.

d) Depositar las líneas y conectores del equipo en un recipiente con varsol por un tiempo no inferior a una hora, esto con el fin de facilitar la remoción del crudo con aire presurizado. Este recipiente debe mantenerse en el área de residuos e identificarlo con el fin de evitar posibles confusiones.

e) Realizar lavado final de las líneas con diclorometano, alternando con aire comprimido para lograr la eliminación total de la contaminación.

f) Verificar la limpieza óptima de cada conector y la línea del equipo, circulando aire presurizado para descartar taponamientos. Si se presenta taponamiento en la línea, se recomienda aplicar temperatura, para esto se puede envolver la línea en papel de limpieza y mantenerlo dentro de un horno verificando con aire presurizado la liberación del taponamiento.

g) Extraer el pistón de la cámara de medición del viscosímetro con el extractor magnético, y asegurarlo en un papel limpio y libre de impurezas que lo puedan rayar. Se recomienda lavar sólo con diclorometano y de inmediato guardarlo en la caja porta-pistones, esto para protegerlo de

ralladuras y contaminación con partículas. Cabe resaltar que la buena manipulación de los pistones y la conservación de la integridad de la cámara del viscosímetro, son garantía para su buen funcionamiento.

h) Posicionar el viscosímetro y el transductor de presión de forma invertida en un papel, para drenar por gravedad la mayor cantidad de fluido, esto aprovechando aún la temperatura de prueba.

i) Lavar el viscosímetro sólo con diclorometano y aire presurizado, y remover impurezas con palillos de madera y punta de algodón. Bajo ninguna circunstancia se deben introducir elementos metálicos en la cámara del viscosímetro.

j) Verificar la limpieza de la cámara visualmente; se puede realizar también con copos de algodón sutilmente, esto para cerciorarse que esté libre de cualquier impureza.

k) Eliminar la humedad con nitrógeno o helio presurizado, esto se puede realizar con disparos intermitentes. No se recomienda introducir la línea de flujo de aire a la cámara, se debe verificar la buena conexión al cilindro de gas y la manipulación del viscosímetro.

l) Verificar visualmente que la cámara de medición del equipo donde se aloja el pistón esté libre de humedad.

m). Repetir los pasos h, m, i para el transductor de presión.

n) Verificar el buen funcionamiento del transductor de presión conectándolo directamente a una bomba de desplazamiento positivo y ajustando presiones; comparar con el transductor de presión de la bomba y el display de presión del viscosímetro. Previamente debemos verificar las condiciones de la bomba, tales como compresibilidad y líneas en buen estado; la conexión al transductor debe hacerse con una purga antes de asegurar totalmente los conectores, esto para

evitar posible entrada de aire y por ende datos inestables de presión. o. Repetir el paso j para el transductor de presión.

o) Verificar visualmente que el transductor de presión esté libre de humedad. Se recomienda realizar disparos intermitentes de aire presurizado, esto en un sitio adecuado y con la protección auditiva recomendada.

p) Proteger el viscosímetro, el transductor de presión, las líneas y los conectores con papel plástico, para protegerlos de polvo y contaminación; esto si no se va a iniciar un nuevo análisis.

q) El cuidado extremo del viscosímetro¹ nos garantiza su buen funcionamiento y por ende datos confiables, es por esto por lo que se insiste tanto en esta buena práctica.

2.5.8 Medición

La medición se realiza siguiendo los pasos descritos en la sección **0 2.5.2 Operación del Equipo**, sobre el Helio para realizar la calibración del equipo en su límite inferior y sobre el Pentano para realizar la calibración del equipo en el límite superior.

Los parámetros usados para cada una de las mediciones son los descritos a continuación, se tomarán como referente los valores de viscosidad provistos por la NIST (National Institute for Standards and Technology) para cada valor de presión y temperatura de los fluidos de prueba.

Cabe mencionar que el pistón a ser usado en este trabajo es el de 0,02 a 0,2 cP y que se usarán como fluidos de calibración el Helio para el límite inferior (0,02 cP) y el Pentano para el límite superior (0,2 cP).

¹ No se debe permitir que el cable de datos que conecta la cámara de medición con el panel de control para adjudicación de parámetros sufra el más mínimo movimiento de flexión, esto debido a que se puede generar desgaste y posterior ruptura en el punto de empalme “cable de datos–cámara de medición”, poniendo en alto riesgo la integridad del viscosímetro.

Tabla 2.

Parámetros a ser usados para la medición de la viscosidad del Pentano (Límite superior)

Parámetros a ser usados para la medición de la viscosidad del Pentano (Límite Superior)	
Temperatura (°F)	Presión (psia)
	2570
	2040
150	1509
	1045
	4892.3
	4013.4
200	3001.8
	2006.8
	5821
	5008
220	4013
	3001

Tabla 3.

Parámetros a ser usados para la medición de la viscosidad del Helio (Límite Inferior)

Parámetros a ser usados en la medición de la viscosidad del Helio (límite inferior)	
Temperatura (°F)	Presión (psia)
150	6010
	5012
	4015
	3001
200	6010
	5012
	4015
	3001
220	6020
	5025
	4030
	3035

2.6 Resultados

En esta sección se verán plasmados los resultados y los análisis correspondientes a los experimentos realizados para la calibración del equipo electromagnético de medición de viscosidad de gases.

2.6.1 Calibración

En este trabajo se decidió realizar la calibración del pistón cuyo rango de viscosidad está entre 0,02 y 0,2 cP correspondiente al viscosímetro 1 del equipo Cambridge cuyas especificaciones técnicas son las siguientes:

Tabla 4.

Especificaciones técnicas del viscosímetro 1.

Parámetro	Valor	Unidad
Modelo	SPL 440	
Temperatura de Operación	-10 a 190	°C
Presión de Operación	0 a 20000	Psig
Rango de Viscosidad	0,02 a 20000	cP
Consola de Control Cambridge Viscosity	Modelo VISCO pro2000	
Baño de Calentamiento	Modelo JULABO F12	
Transductor de presión OMEGADYNE inc.	Modelo PXO ISI-30KGI	
Display de presión OMEGA	Modelo 9702	

Nota: Adaptado de Sica. (2020). Viscosímetro electromagnético. Obtenido de <https://www.sicamedicacion.com.mx/producto/sensor-viscosidad/>

2.6.2 Medición de Viscosidad en Gas Natural

Para la calibración del viscosímetro en el límite superior (0,2 cP) se utilizó como fluido de calibración el Pentano, cuyas propiedades principales se encuentran resumidas en el Apéndice A de la presente monografía.

Los resultados obtenidos se encuentran a continuación:

Tabla 5.

Resultados experimentales obtenidos para el Pentano

Temperatura (°F)	Presión (psia)	Valor referencia (cP)	Valor experimental (cP)	Δ Temperatura (°C)	Desviación Estándar (%)	Tiempo de ciclo actual (s)	Error <5%
150	2570	0.19992	0.19980	0.003	0.132	20.548	0.06%
	2040	0.19144	0.18901	0.004	0.089	20.061	1.27%
	1509	0.18274	0.18586	0.003	0.079	19.689	1.71%
	1045	0.1749	0.17537	0.003	0.159	19.542	0.27%
200	4892.3	0.19995	0.19900	0.003	0.115	18.673	0.48%
	4013.4	0.18807	0.18800	0.004	0.088	17.735	0.04%
	3001.8	0.17384	0.17282	0.006	0.251	17.038	0.59%
	2006.8	0.15902	0.16024	0.005	0.227	16.055	0.77%
220	5821	0.19997	0.19319	0.004	0.073	16.026	3.39%
	5008	0.1897	0.19103	0.006	0.206	15.859	0.70%
	4013	0.17668	0.17713	0.004	0.054	15.543	0.25%
	3001	0.16278	0.16255	0.004	0.244	15.000	0.14%

Para la calibración del viscosímetro en el límite superior (0,02 cP) se utilizó como fluido de calibración el Helio, cuyas propiedades principales se encuentran resumidas en el Apéndice B de la presente monografía-

Tabla 6.

Resultados Experimentales para el Helio

Temperatura (°F)	Presión (psia)	Valor referencia (cP)	Valor experimental (cP)	Δ Temperatura (°C)	Desviación Estándar (%)	Tiempo de ciclo actual (s)	Error <5%
150	6010	0.02271	0.02256	0.034	0.868	2.523	0.6605%
	5012	0.02256	0.02288	0.032	0.894	2.511	1.4184%
	4015	0.02240	0.022300	0.029	0.723	2.538	0.4464%
	3001	0.02223	0.02302	0.024	0.384	2.616	3.5538%
200	6010	0.02390	0.02350	0.032	0.183	2.439	1.6736%
	5012	0.02370	0.02410	0.035	0.898	2.381	1.6878%
	4015	0.02360	0.02390	0.023	0.753	2.475	1.2712%
	3001	0.02340	0.02350	0.033	0.841	2.567	0.4274%
220	6020	0.02431	0.02437	0.040	0.374	2.251	0.2468%
	5025	0.02417	0.02490	0.025	0.207	2.275	3.0203%
	4030	0.02402	0.02402	0.047	0.568	2.380	0.0000%
	3035	0.02387	0.02465	0.024	0.653	2.451	3.2677%

A continuación, se presentará un resumen gráfico de los análisis realizados sobre el Pentano y el Helio a diferentes condiciones de presión y temperatura.

Figura 6.

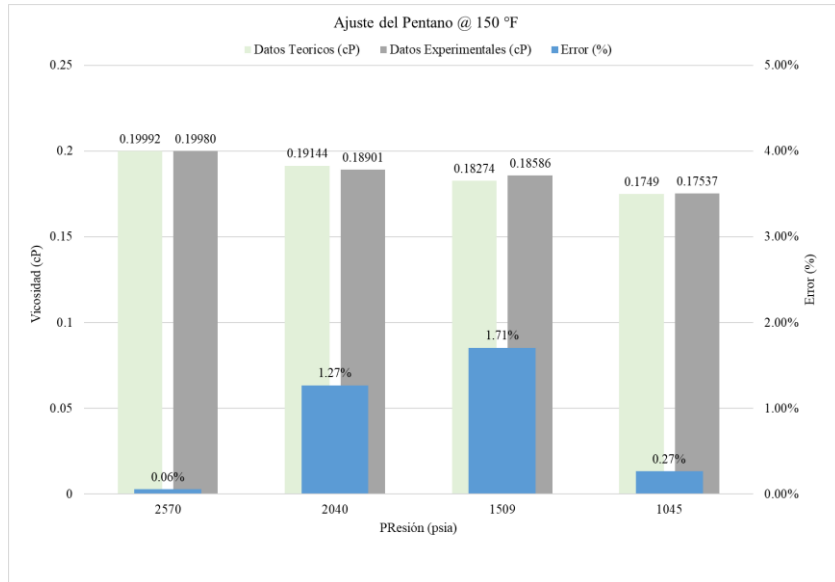
Resumen. Ajuste del Pentano a 150°F

Figura 7.

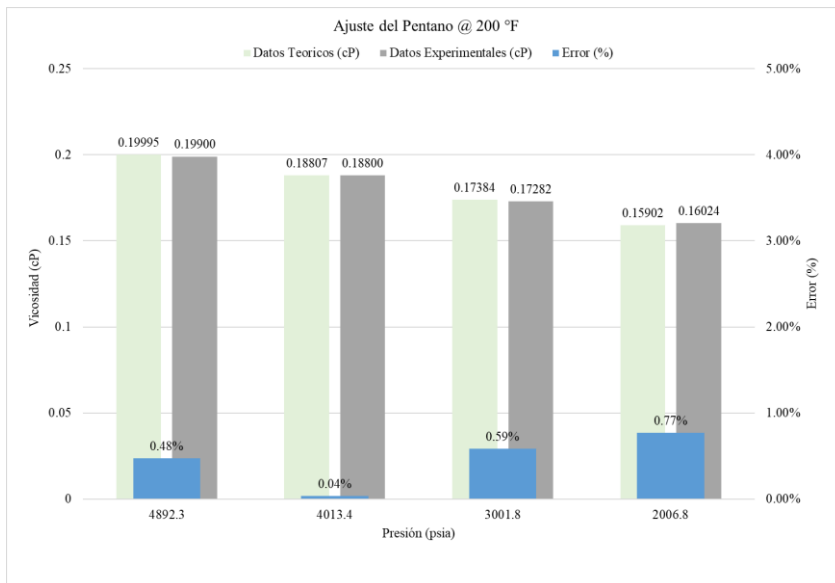
Resumen. Ajuste del Pentano a 200°F

Figura 8.

Resumen. Ajuste del Pentano a 220°F

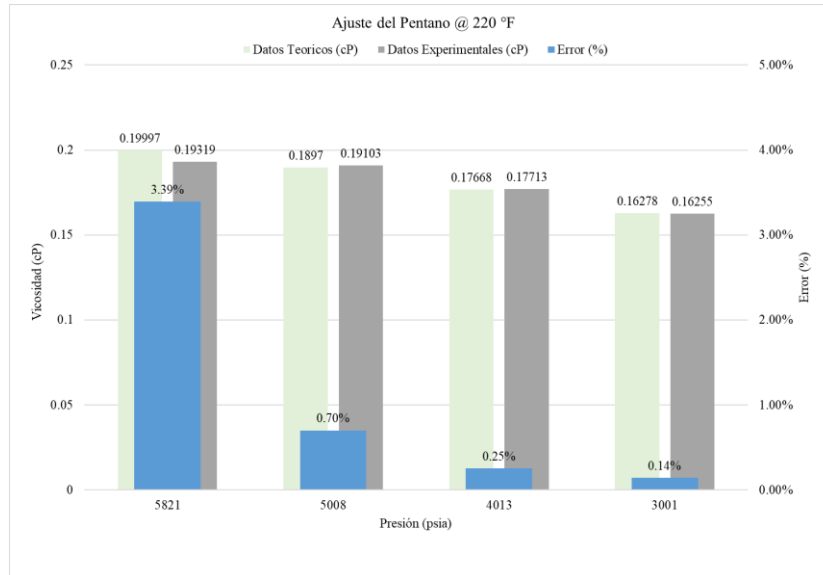


Figura 9.

Resumen Ajuste del Helio a 150°F

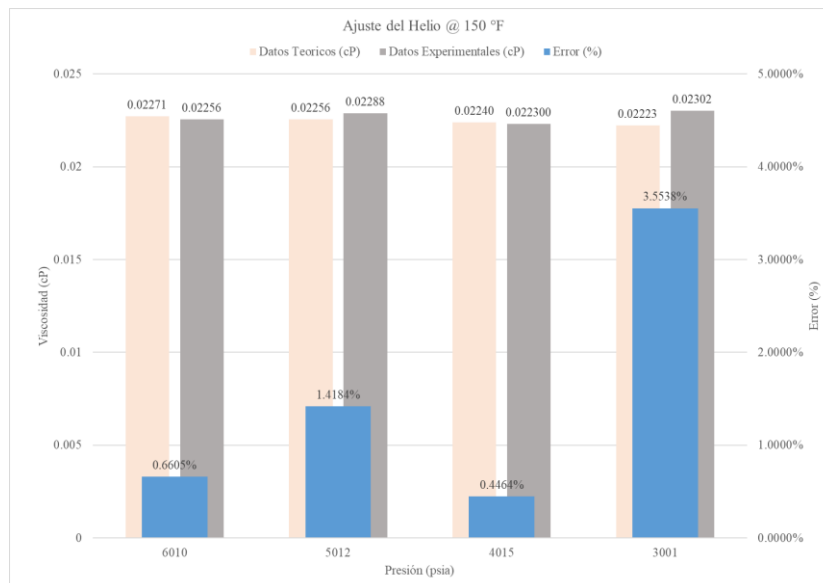


Figura 10.

Resumen Ajuste del Helio a 200°F

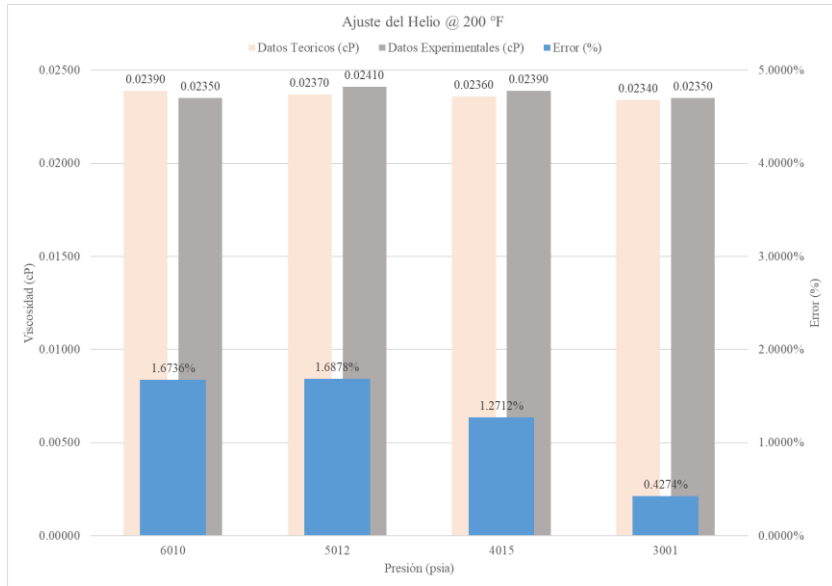
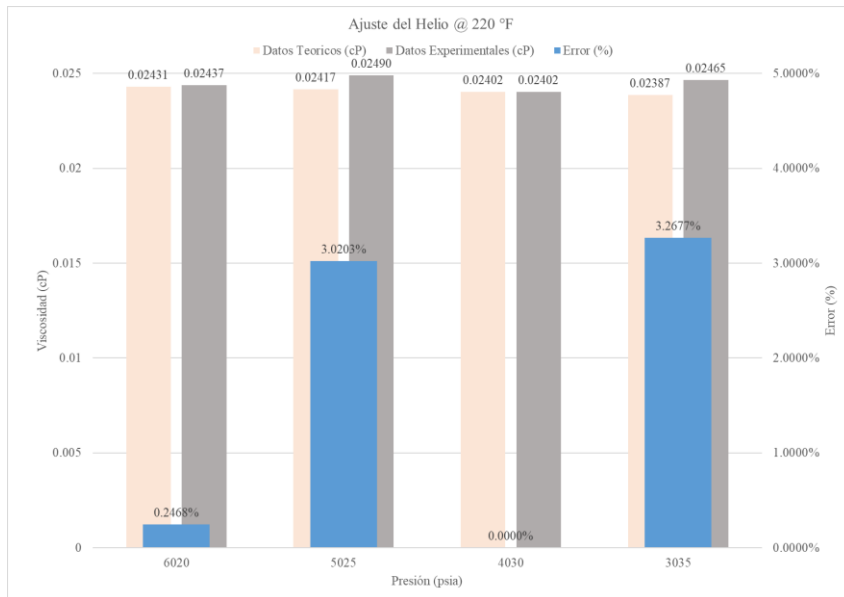


Figura 11.

Resumen Ajuste del Helio a 220°F



3. Conclusiones

Se describió concretamente la técnica de medición de viscosidad de gas por medio la tecnología del pistón oscilantes, sus principales variables, sus rangos de presión y temperatura, entre otras variables.

Se propuso una metodología para la determinación de la viscosidad de gases naturales usando un viscosímetro electromagnético.

Se realizó la calibración del viscosímetro electromagnético usando la metodología propuesta con dos fluidos: Pentano y Helio para los límites inferior y superior (correspondientemente) del pistón de 0,02 – 0,2 cP del viscosímetro electromagnético; con lo cual se comprobó la validez de la metodología para la realización de este tipo de pruebas.

La validación del pistón de gas amplía el nivel de acción del viscosímetro Cambridge, incrementando su capacidad de análisis.

4. Recomendaciones

Se recomienda utilizar la metodología para las posteriores mediciones de viscosidad de gas natural que se realicen a nivel investigativo, especialmente en la mezcla de gases hidrocarburos y no hidrocarburos como el CO₂, gas que en contacto miscible con los hidrocarburos del yacimiento podría reducir su viscosidad.

Además, se hace interesante e importante realizar este tipo de estudios teniendo en cuenta la madurez de yacimientos colombianos y la factibilidad que estos presentan a métodos de recobro mejorado, en los cuales los datos de laboratorio juegan un papel fundamental en la estimación de los efectos que dichas técnicas pueden tener sobre el yacimiento.

Referencias

- Arp, V., McCarty, R., & Friend, D. (1998). *Thermophysical Properties of Helium-4 from 0.8 to 1500 K with Pressures to 2000 MPa, Technical Note 1334*. National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, 0.
- Bird, R., Stewart, W., & Lightfoot, E. (2006). *Fenómenos de Transporte*. . Mexico, D.F.: Editorial Limusa, S. A. de C. V. Grupo Noriega Editores. 1 - 1045.
- Castillo, C. (2014). *Diseño, validación e implementación de un sistema experimental de alta presión y temperatura para medición de viscosidad de aceites crudos con precisión de referencia*. . México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2012). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. (2a. ed.--.). México D.F.: McGraw Hill. *Obtenido de* <http://www.bibvirtual.ucb.edu.bo:8000/opac/Record/100001230>
- Gawish, A., & Al-Homadhi, E. (2005). *State of the art-Natural gases viscosity under reservoir conditions*. . Saudi Arabia: SPE Technical Symposium of Saudi Arabia Section held in Dhahran.
- Hands, B., & Arp, V. (1981). *A Correlation of Thermal Conductivity Data for Helium, Cryogenics*, 21, 12, 697-703.
- Johansen, W. (14 de Agosto de 2009). *El problema de la estimación de la viscosidad*. Obtenido de <https://www.nist.gov/publications/calculation-natural-gas-viscosity>

- Juárez, C. (2016). *Estudio de la metodología para la calibración de un viscosímetro de pistón alternante en la medición de viscosidad en fase gas a alta presión.* . Instituto Politécnico Nacional. Escuela Nacional de Ingeniería Química e Industrias Extractiva.
- McCarty, R., & Arp, V. (1990). *A New Wide Range Equation of State for Helium.*, . Adv. Cryo. Eng., 35, 1465-1475.
- NIST. (7 de Marzo de 2014). *Estado del arte en medición de viscosidad de gases.* Obtenido de <https://www.nist.gov/programs-projects/gas-properties-flow-metering>
- Pimentel, A. (2009). *Determinación experimental del comportamiento P, n, T de la mezcla CO2 + etanol por viscosimetría electromagnética a fuerza constante.* . Instituto Politécnico Nacional. Escuela Nacional de Ingeniería Química e Industrias Extractivas.
- Sica. (2020). *Viscosímetro electromagnético.* Obtenido de <https://www.sicamedicion.com.mx/producto/sensor-viscosidad/>
- Span, R. (2000). *Multiparameter Equations of State - An Accurate Source of Thermodynamic Property Data, Springer, 367.* Berlin
- Wright H. (1986). *US4627272. United States Patent.* 1 – 12.
- Wright H. (1989). *US4864849. United States Patent.* 1 – 14.
- Wright H. (1989). *WO 89/12221. World Intellectual Property Organization.* 1 - 45

Apéndices

Apéndice A. Propiedades del Pentano

Tabla A.1.

Propiedades del Pentano. Adaptado de Span (2000)

Temperature (°F)	Pressure (psia)	Density (g/ml)	Volume (ml/g)	Internal Energy (kJ/mol)	Enthalpy (kJ/mol)	Entropy (J/mol*K)	Cv (J/mol*K)	Cp (J/mol*K)	Sound Spd. (m/s)	Joule-Thomson (F/psia)	Viscosity (cP)	Therm. Cond. (W/m*K)	Phase
150	2570.7	0.6061	1.6499	4.0361	6.1459	12.518	136.49	175.34	998.43	-0.0043404	0.19992	0.10779	liquid
150	2040	0.60121	1.6633	4.2379	5.9259	13.159	136.35	176.27	966.31	-0.0041456	0.19144	0.10575	liquid
150	1509.3	0.59594	1.678	4.4558	5.7157	13.841	136.22	177.38	931.9	-0.0039113	0.18274	0.1036	liquid
150	1045	0.59095	1.6922	4.662	5.5417	14.476	136.11	178.55	899.53	-0.0036632	0.1749	0.10161	liquid
200	4892.3	0.6032	1.6578	8.062	12.097	23.979	144.89	180.73	1032.8	-0.0044234	0.19995	0.10889	liquid
200	4013.4	0.59576	1.6785	8.3641	11.715	24.928	144.67	181.79	985.93	-0.0041857	0.18807	0.10584	liquid
200	3001.8	0.58612	1.7061	8.7559	11.304	26.128	144.42	183.4	926.24	-0.0038203	0.17384	0.10202	liquid
200	2006.8	0.57512	1.7388	9.2029	10.939	27.458	144.2	185.64	859.32	-0.0033055	0.15902	0.097859	liquid
220	5821	0.60232	1.6602	9.7263	14.534	28.47	148.28	183.07	1046.9	-0.0044433	0.19997	0.10953	liquid
220	5008.4	0.59574	1.6786	9.9912	14.173	29.302	148.08	183.88	1006	-0.0042544	0.1897	0.10683	liquid
220	4013.4	0.58681	1.7041	10.352	13.754	30.408	147.83	185.17	951.42	-0.0039559	0.17668	0.10329	liquid
220	3001.8	0.57644	1.7348	10.771	13.361	31.659	147.6	186.95	889.18	-0.0035365	0.16278	0.099351	liquid

Tabla A.2.

Propiedades del Pentano. Adaptado de Span (2000)

Property	Value	Unit
Critical temperature (Tc)	385.8	°F
Critical pressure (Pc)	488.78	psia
Critical density (Dc)	0.23200	g/ml
Acentric factor	0.251	
Normal boiling point	96.91	°F
Dipole moment	0.37	Debye

Volver a **2.6.2 Medición de Viscosidad en Gas Natural**

Apéndice B. Propiedades del Helio

Tabla B.1.

Propiedades del Helio. (Arp, McCarty, & Friend, 1998); (Hands & Arp, 1981); (McCarty & Arp, 1990)

Temperature (°F)	Pressure (psia)	Density (g/ml)	Volume (ml/g)	Internal Energy (kJ/mol)	Enthalpy (kJ/mol)	Entropy (J/mol*K)	Cv (J/mol*K)	Cp (J/mol*K)	Sound Spd. (m/s)	Joule-Thomson (F/psia)	Viscosity (cP)	Therm. Cond. (W/m*K)	Phase
150	6010	0.050463	19.817	4.3004	7.5872	64.76	12.684	20.728	1250.8	-0.007449	0.022713	0.19023	supercritical
150	5012.5	0.043109	23.197	4.2924	7.5012	66.246	12.653	20.727	1223.2	-0.0075142	0.022563	0.18715	supercritical
150	4015	0.035393	28.254	4.284	7.4146	68.066	12.621	20.729	1195.2	-0.0075718	0.022404	0.18404	supercritical
150	3001.7	0.027151	36.83	4.275	7.3259	70.457	12.586	20.736	1166.7	-0.0076192	0.022233	0.18083	supercritical
200	6010	0.047199	21.187	4.6487	8.1627	66.393	12.663	20.711	1286.7	-0.0074575	0.023855	0.19867	supercritical
200	5012.5	0.040253	24.843	4.6403	8.0768	67.879	12.635	20.714	1260.1	-0.0075128	0.023712	0.19578	supercritical
200	4015	0.03299	30.313	4.6316	7.9902	69.7	12.606	20.72	1233.4	-0.0075596	0.023562	0.19287	supercritical
200	3001.7	0.025259	39.591	4.6223	7.9018	72.091	12.574	20.73	1206.1	-0.0075954	0.023402	0.18987	supercritical
220	6020	0.046075	21.704	4.788	8.3936	66.998	12.656	20.706	1301	-0.0074574	0.024308	0.20205	supercritical
220	5025	0.039301	25.444	4.7795	8.308	68.478	12.629	20.71	1275	-0.0075089	0.024169	0.19924	supercritical
220	4030	0.032226	31.031	4.7707	8.2218	70.288	12.601	20.717	1248.7	-0.0075518	0.024023	0.19642	supercritical
220	3035	0.024827	40.279	4.7614	8.1351	72.619	12.571	20.728	1222.4	-0.007583	0.023869	0.19355	supercritical

Tabla B.2.

Propiedades del Helio. (Arp, McCarty, & Friend, 1998); (Hands & Arp, 1981); (McCarty & Arp, 1990)

Property	Value	Units
Enthalpy(at the normal boiling point for saturated liquid)	H = 0	
Entropy(at the normal boiling point for saturated liquid)	S = 0	
Critical temperature (Tc)	-450.3185	°F
Critical pressure (Pc)	32.990	psia
Critical density (Dc)	0.069642	g/ml
Acentric factor	-0.382	
Normal boiling point	-452.056	F
Dipole moment	0.0	Debye

Notas adicionales:

Las incertidumbres de la ecuación de estado varían entre 1% a bajas temperaturas (<20 K) hasta 0,1% a temperaturas entre los 200 y los 400 K.

LA incertidumbre de las capacidades caloríficas es de aproximadamente 5%.

La incertidumbre en la conductividad térmica es 5%, excepto a bajas temperaturas donde se incrementa a 10%.

Volver a Medición de Viscosidad en Gas Natural.

Apéndice C. Resultados Experimentales

Figura C.1. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

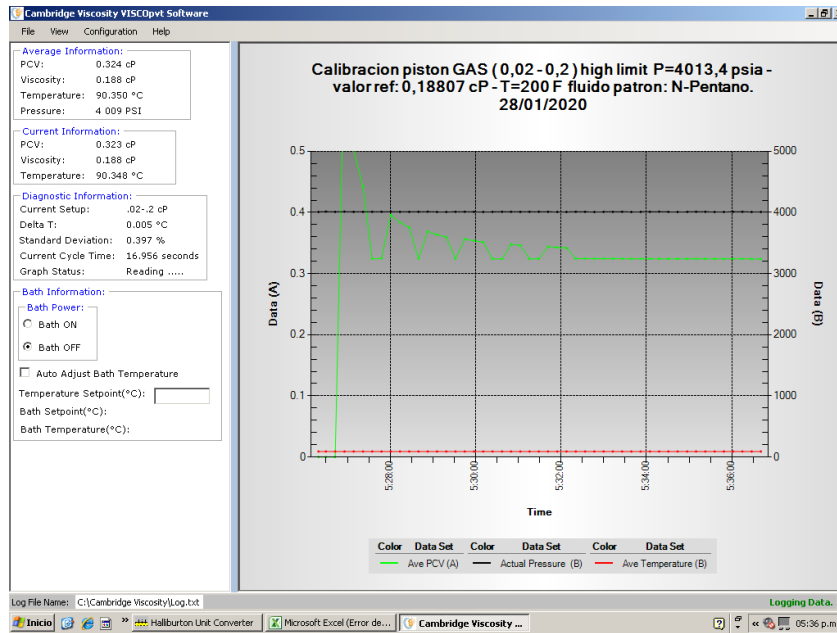


Figura C.2. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

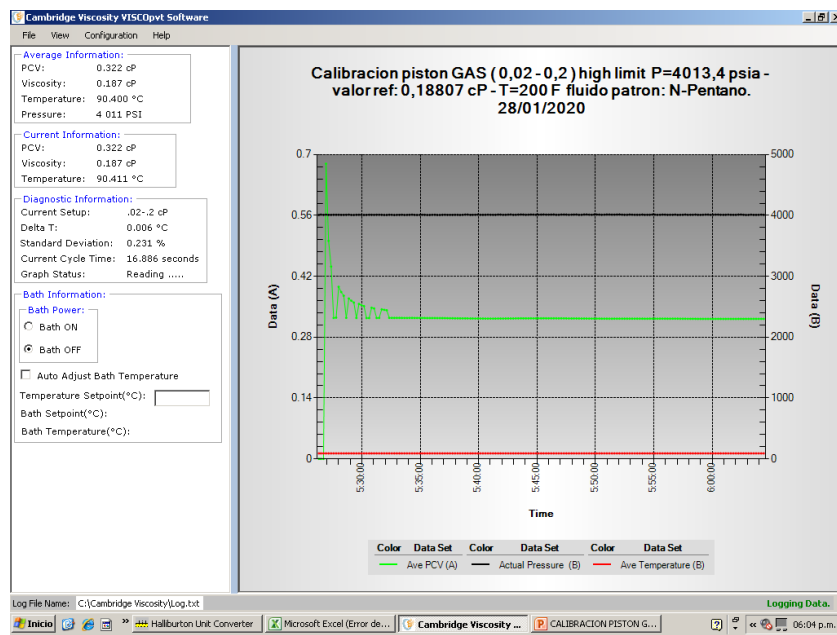


Figura C.3. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

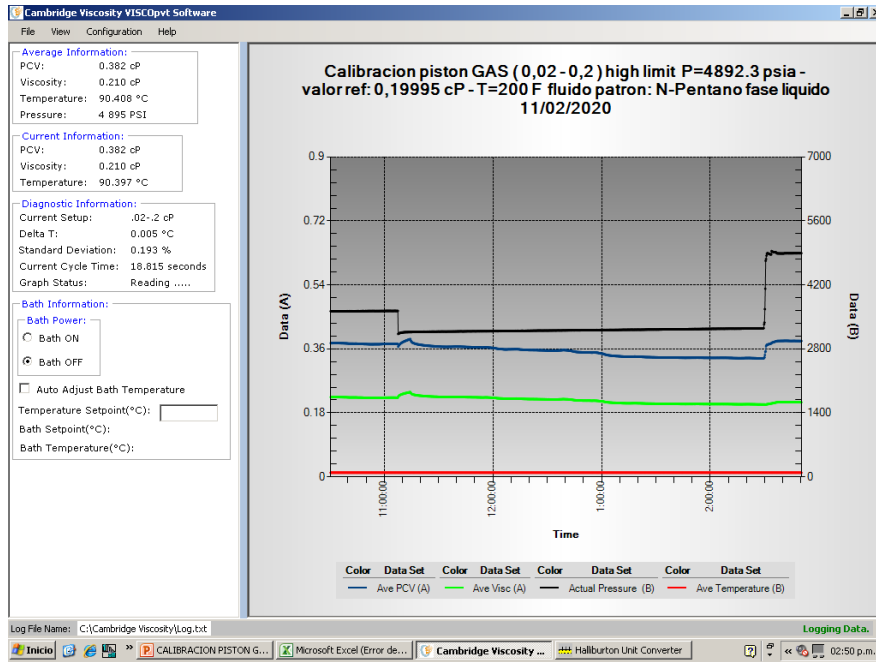


Figura C.4. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

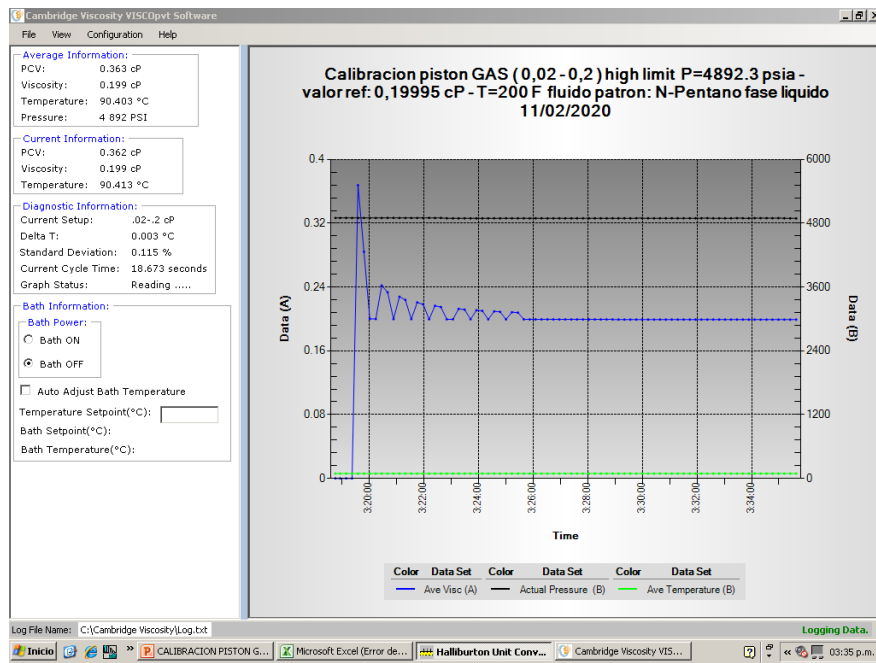


Figura C.5. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

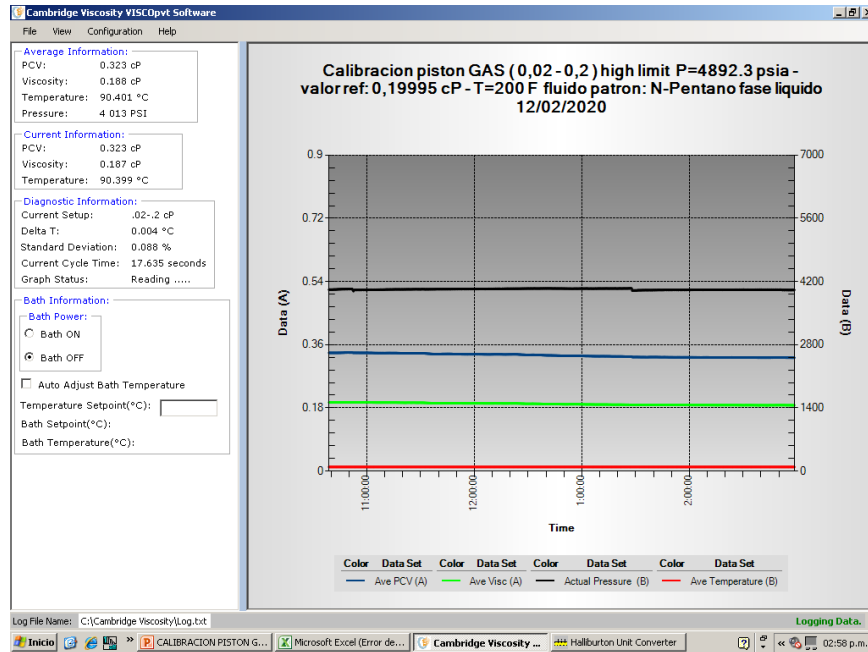


Figura C.6. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

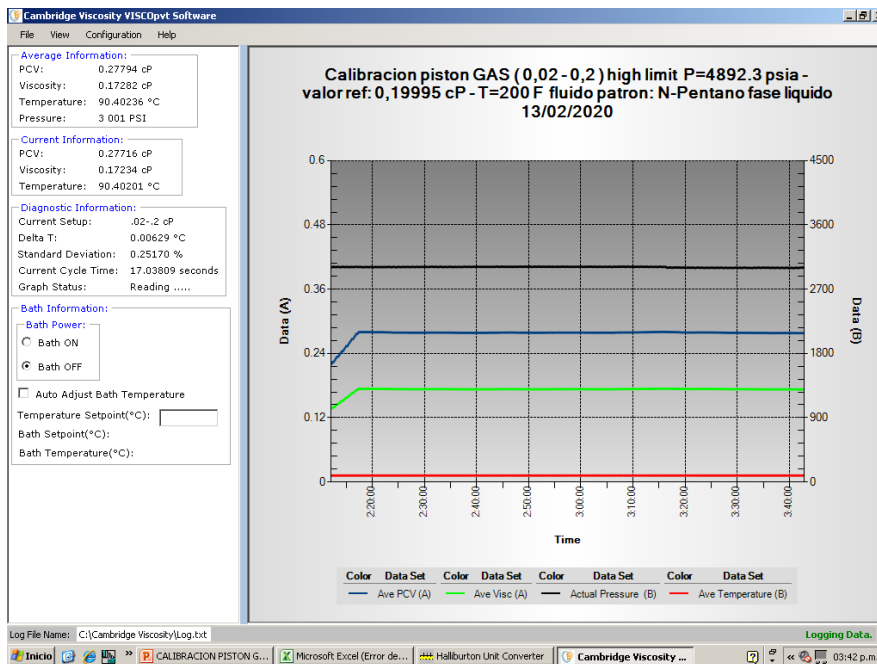


Figura C.7. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

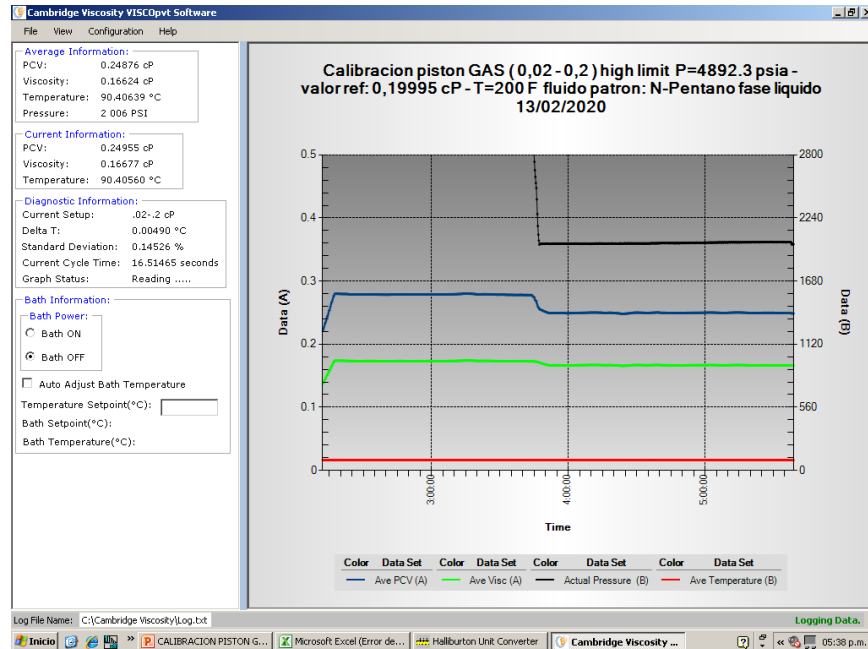


Figura C.8. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

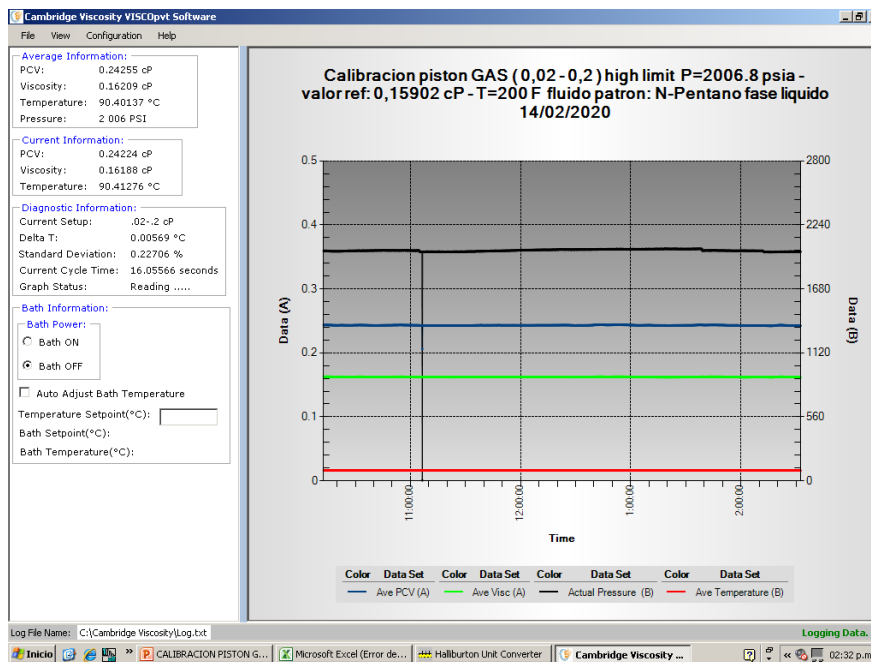


Figura C.9. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

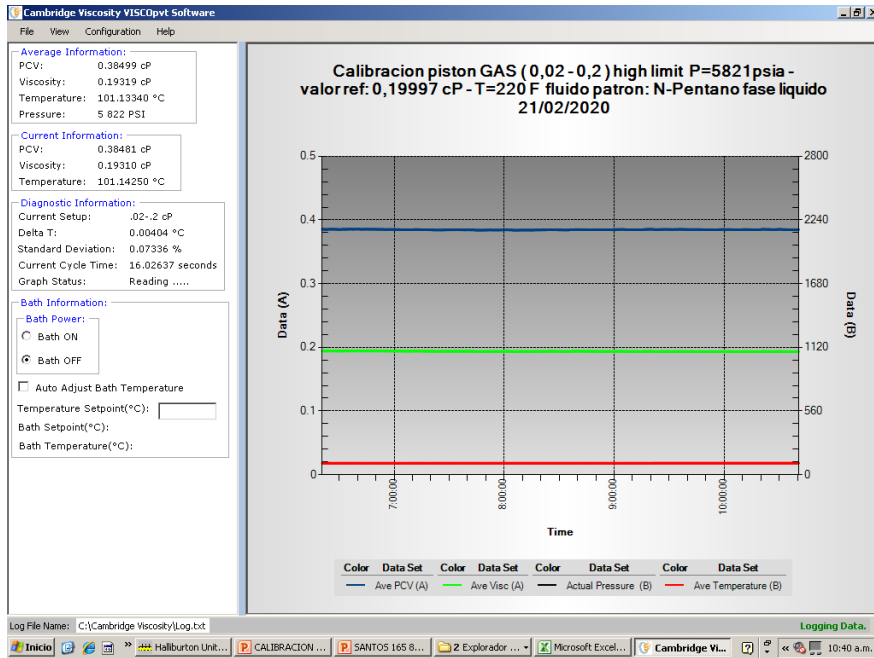


Figura C.10. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

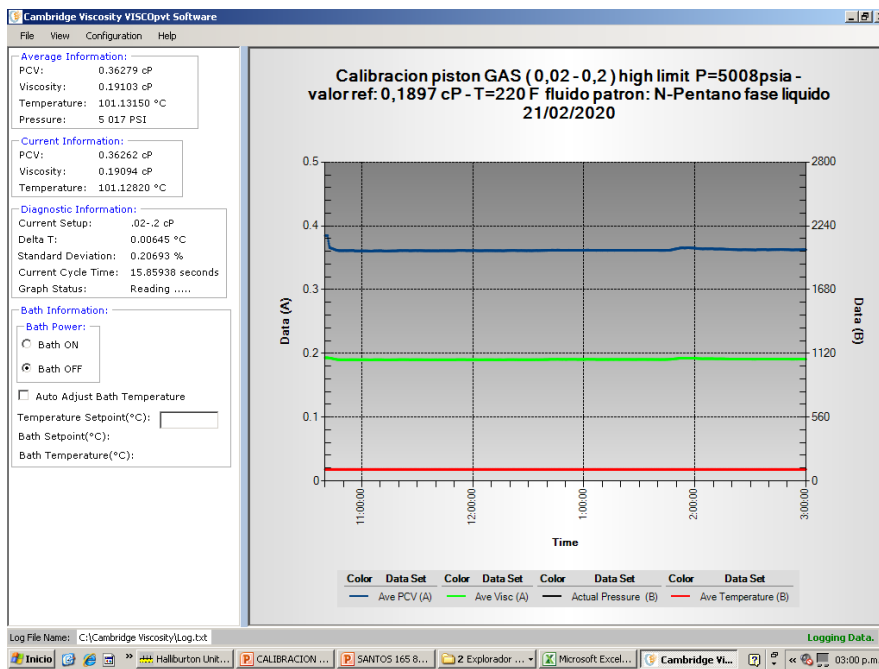


Figura C.11. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

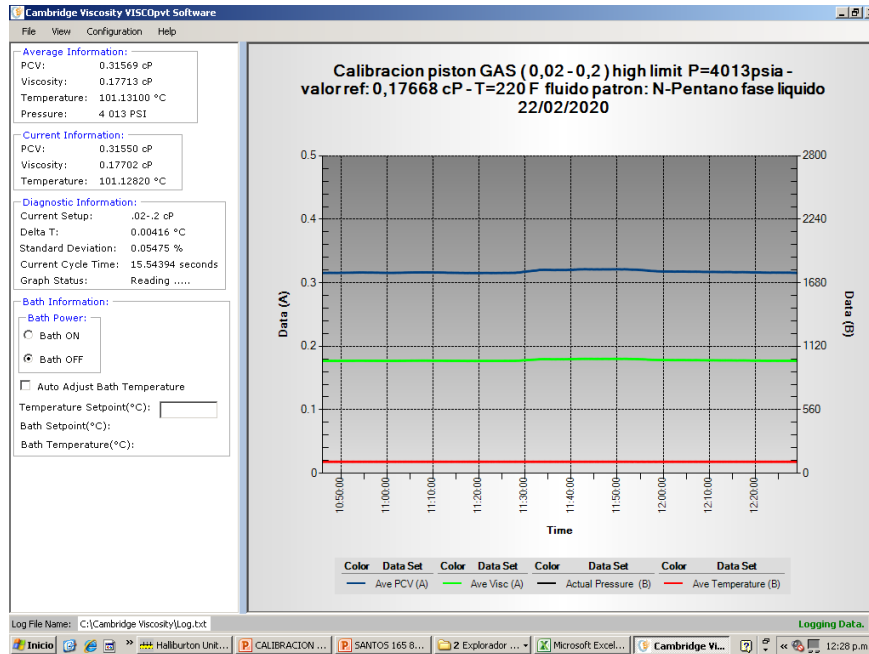


Figura C.12. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

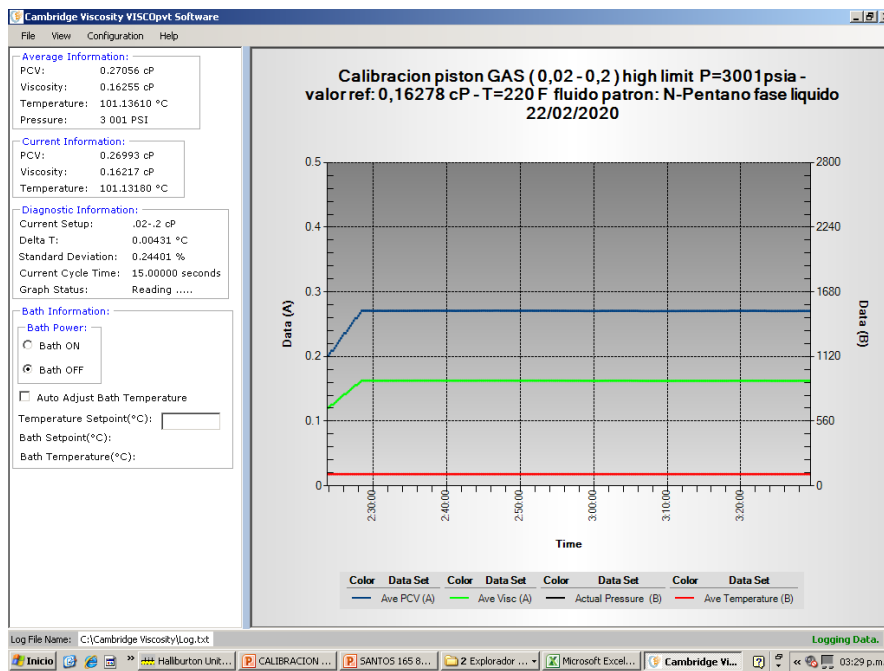


Figura C.13. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

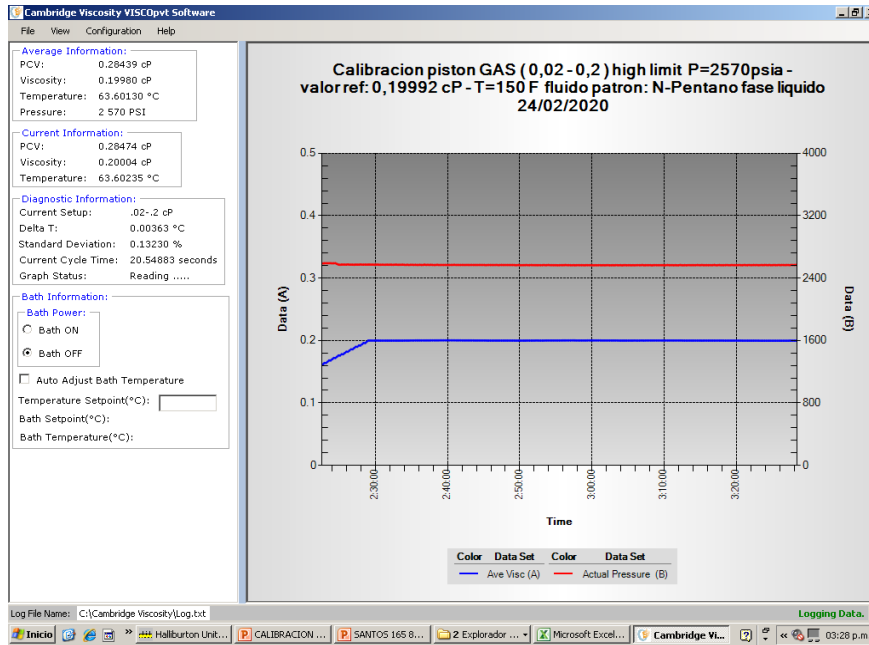


Figura C.14. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

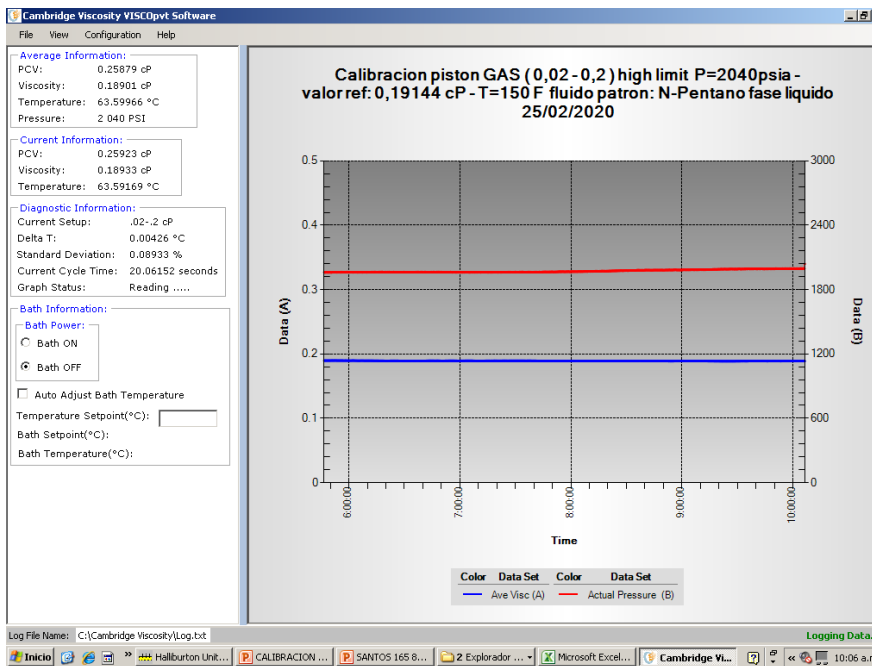


Figura C.15. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

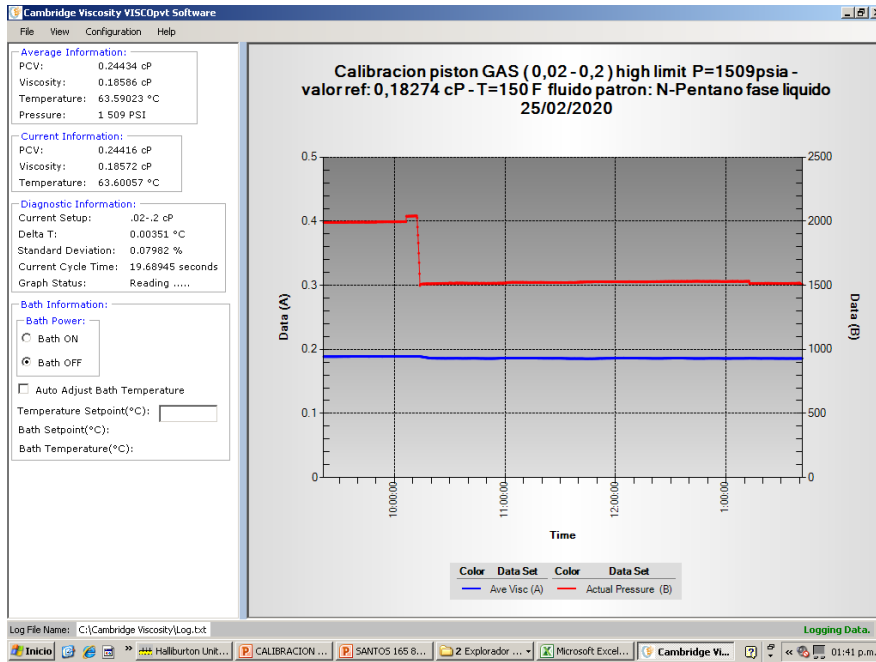


Figura C.16. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

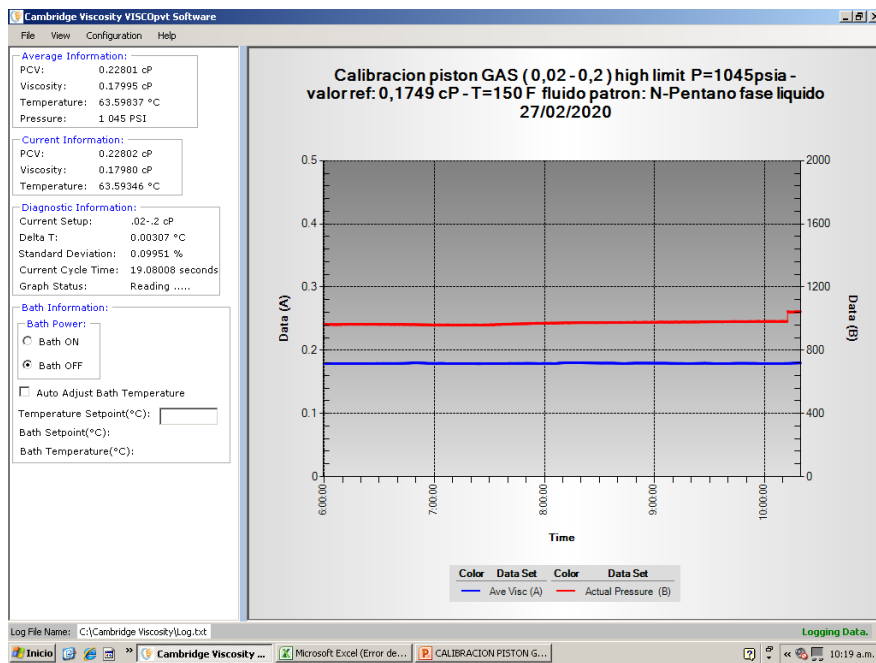


Figura C.17. Resultados de la medición de la viscosidad para el High Limit

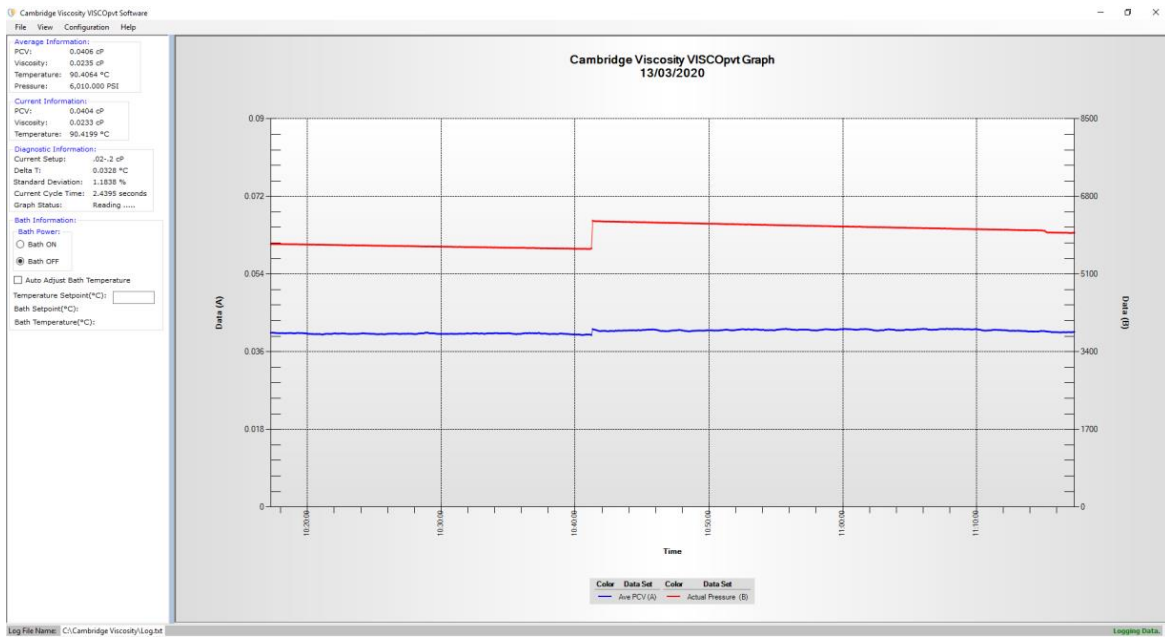
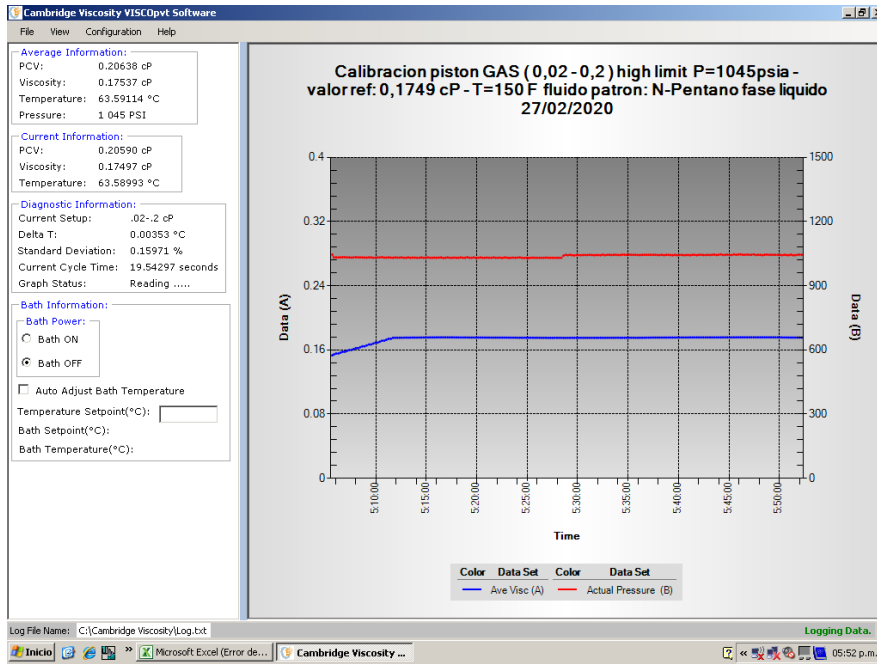


Figura C.19. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

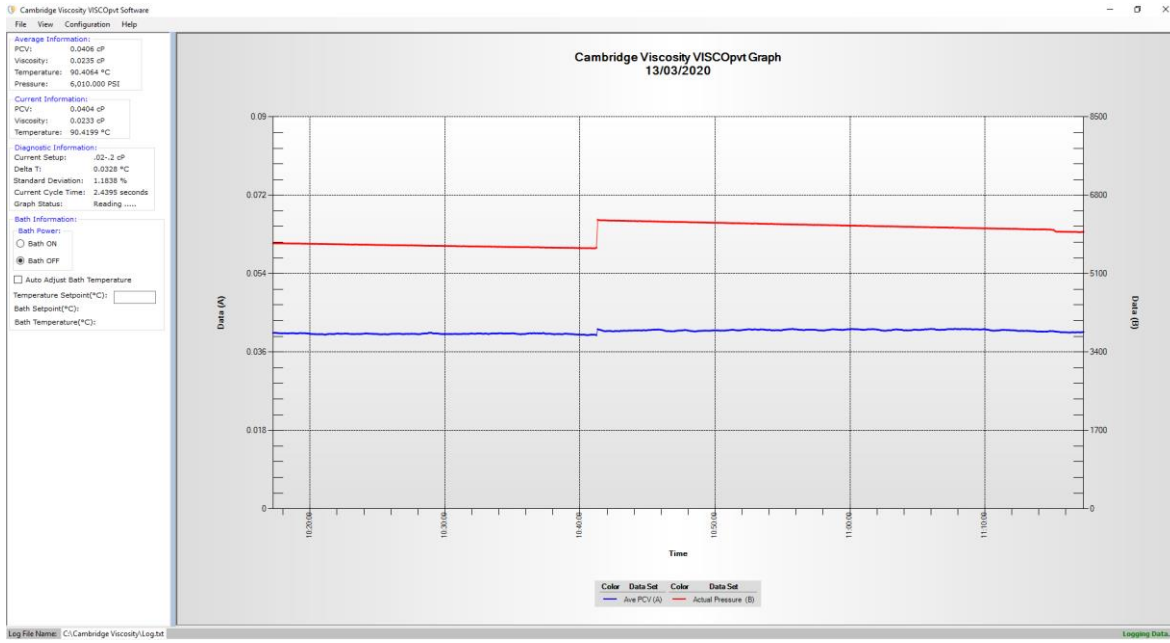


Figura C.20. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

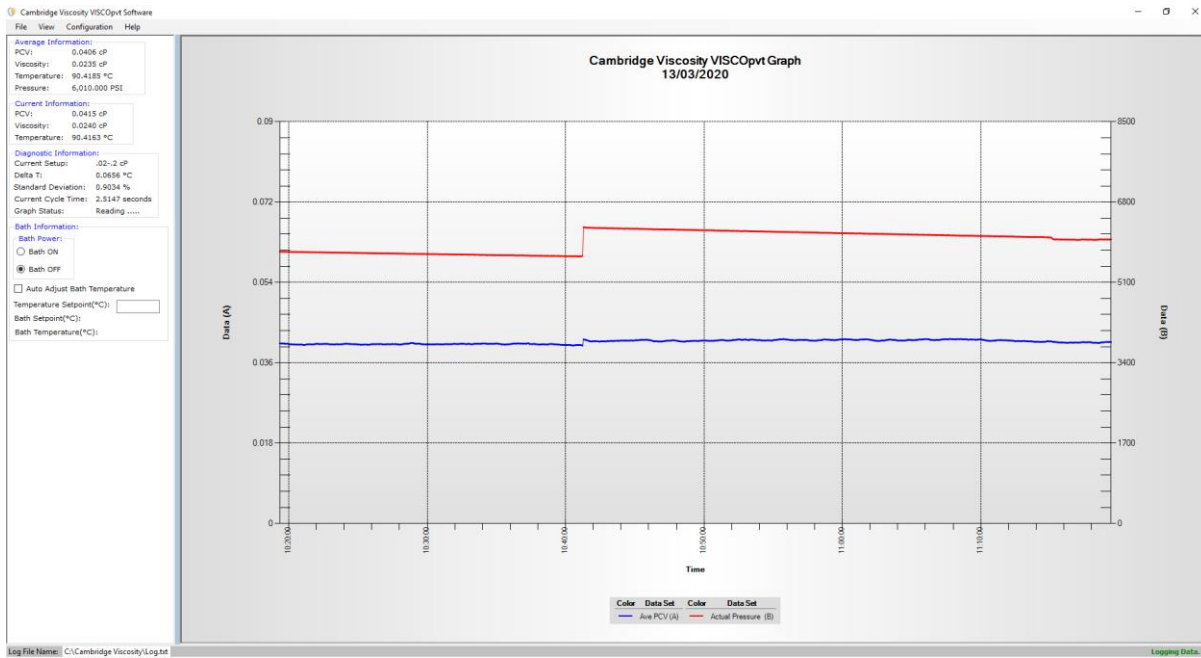


Figura C.21. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

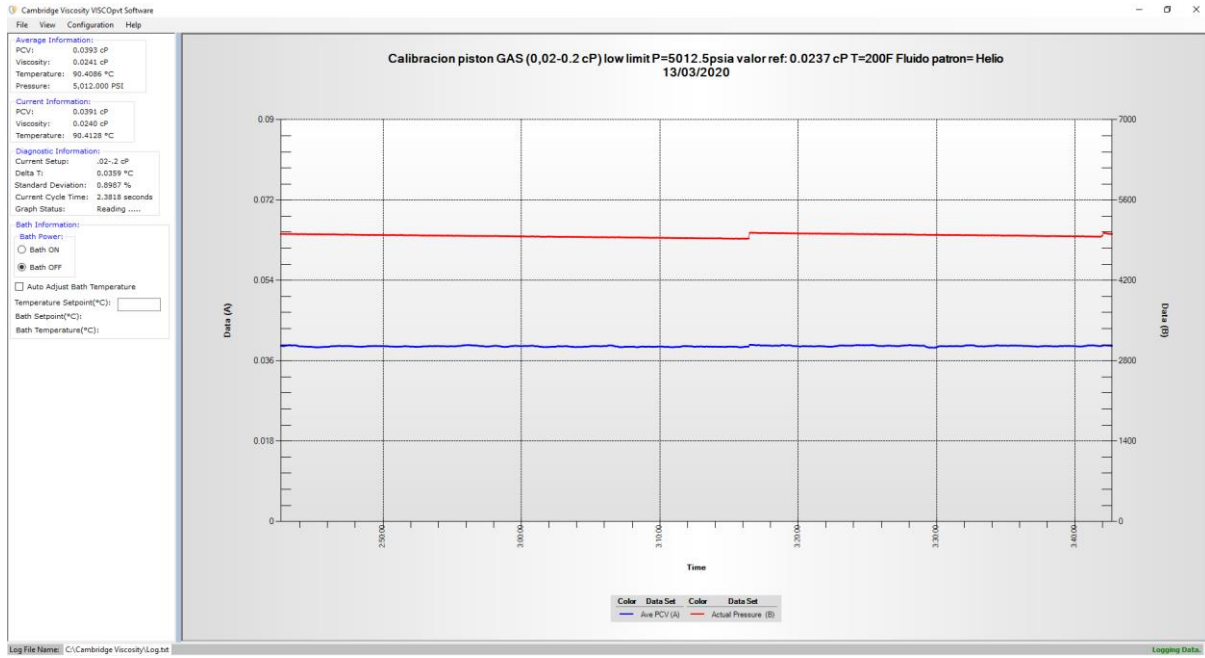


Figura C.22. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

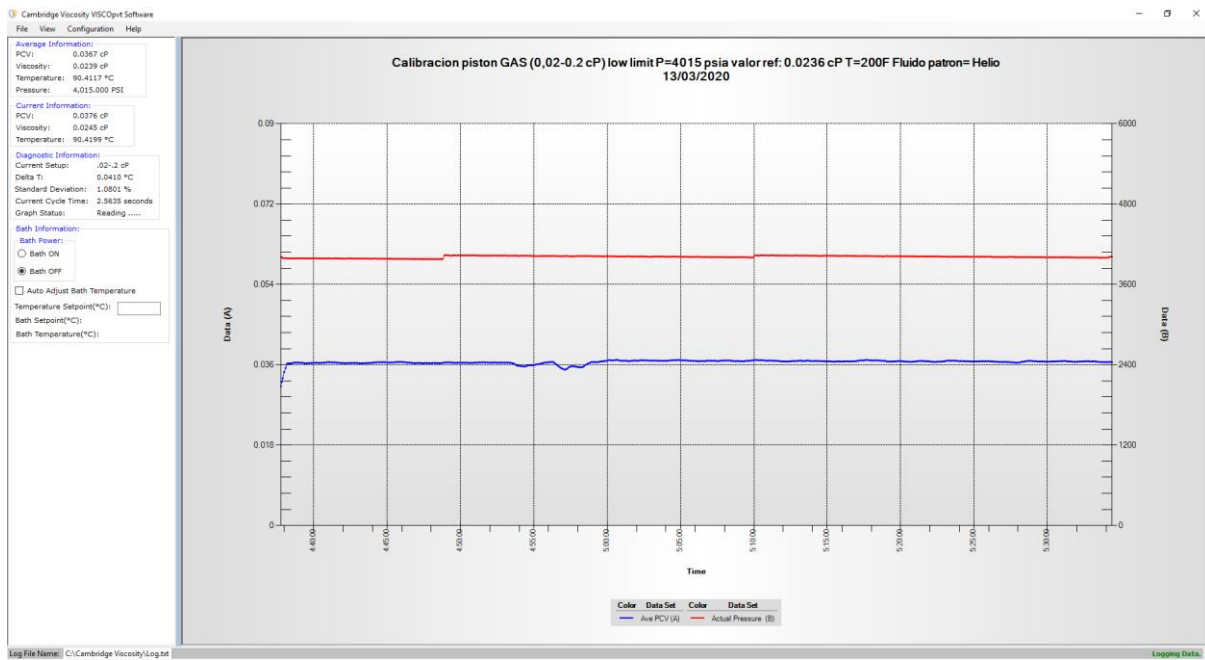


Figura C.23. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

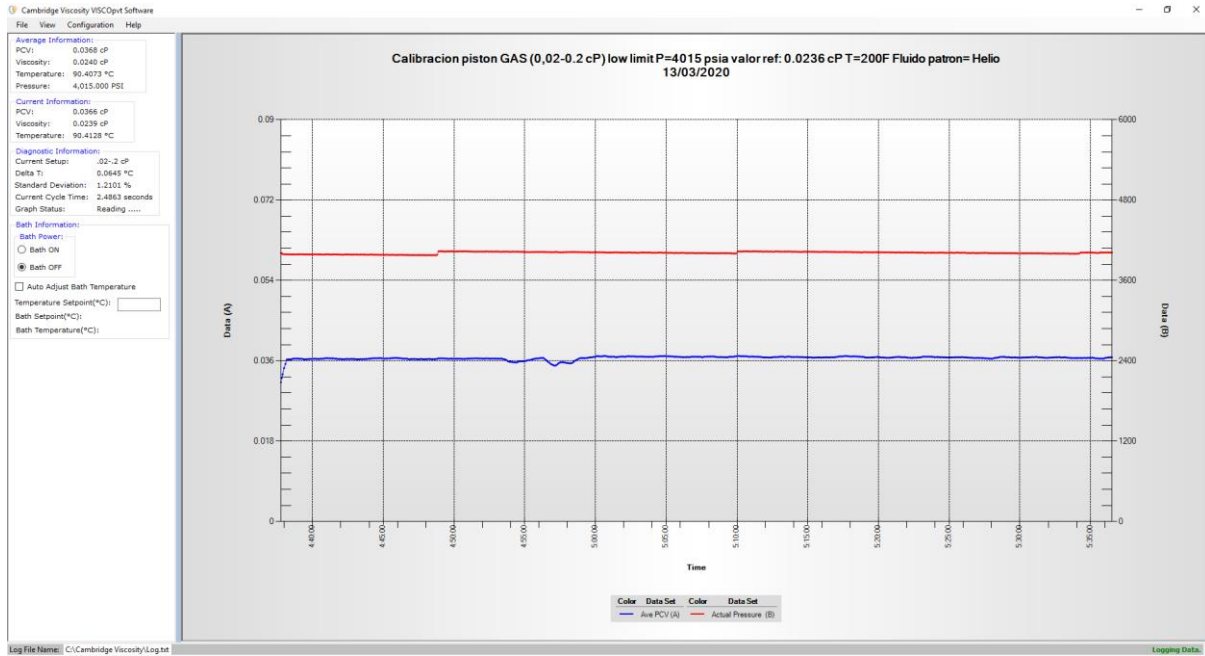


Figura C.24. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

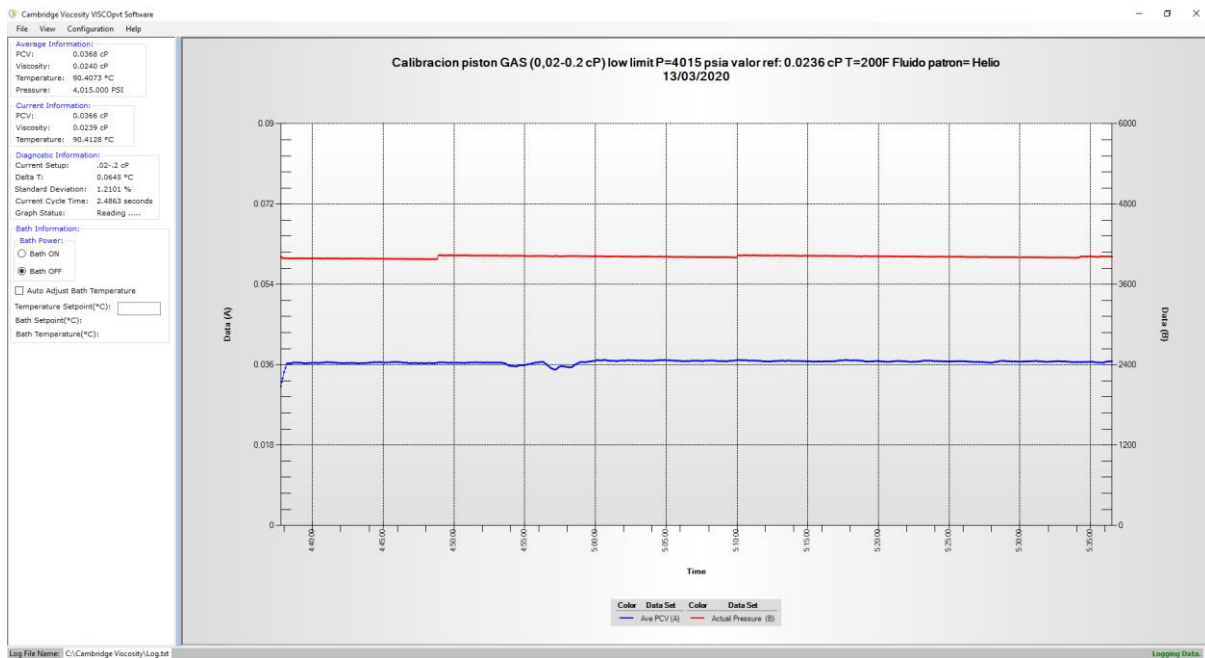


Figura C.25. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

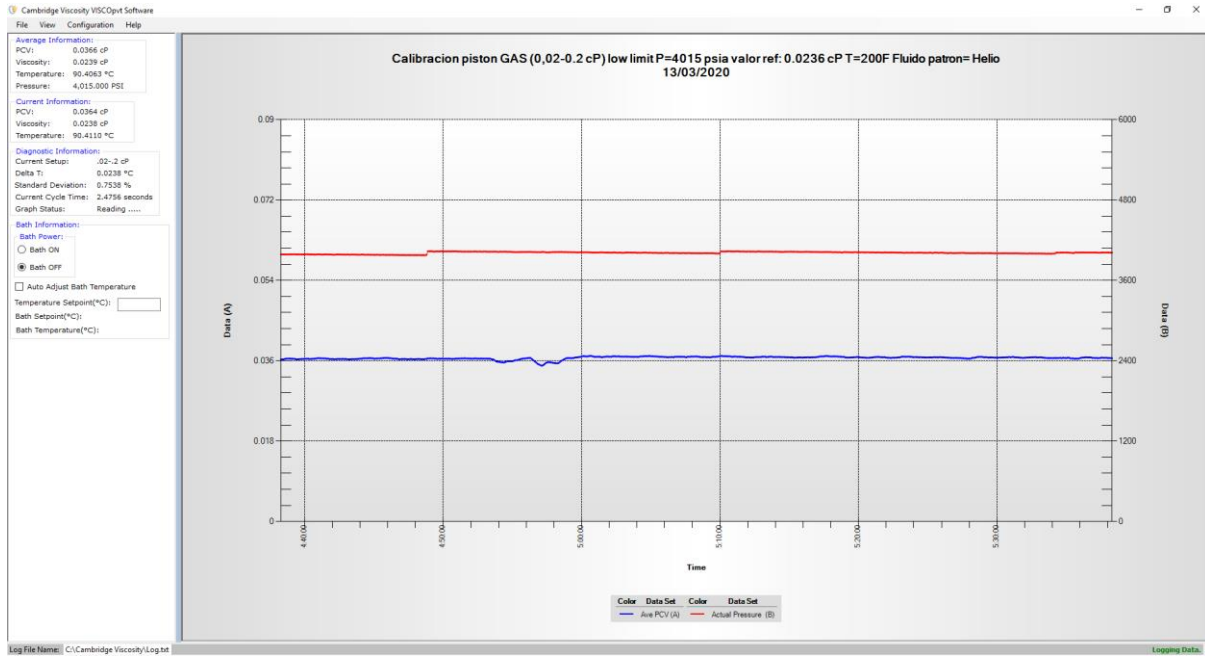


Figura C.26. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

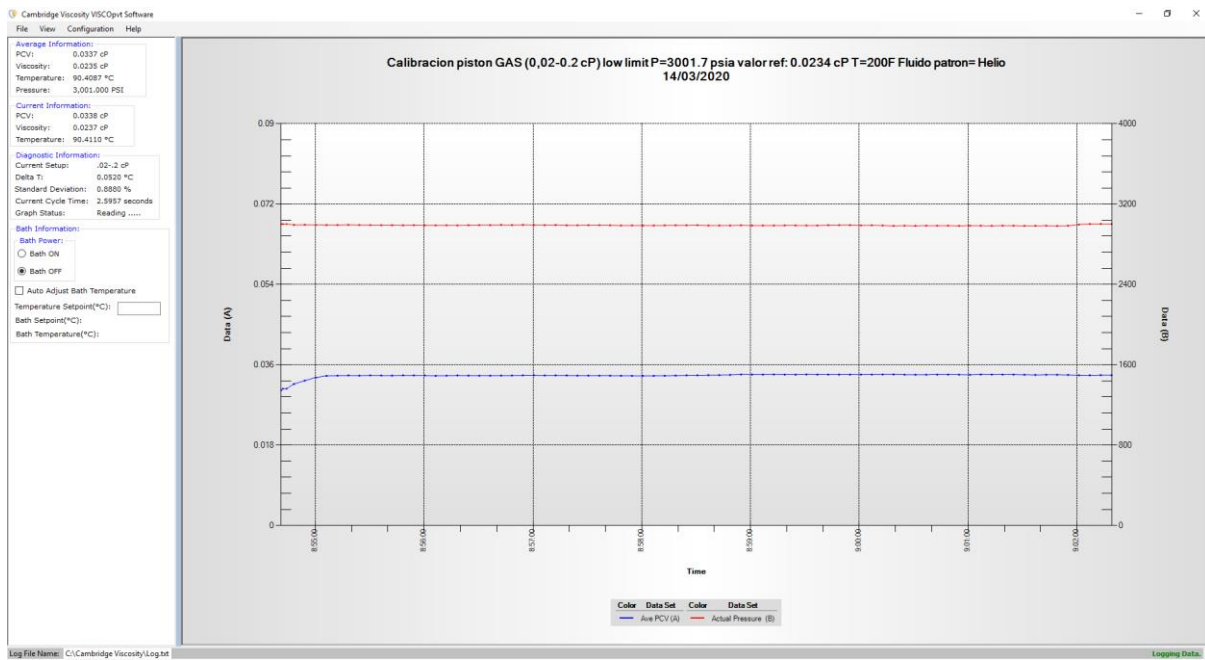


Figura C.27. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

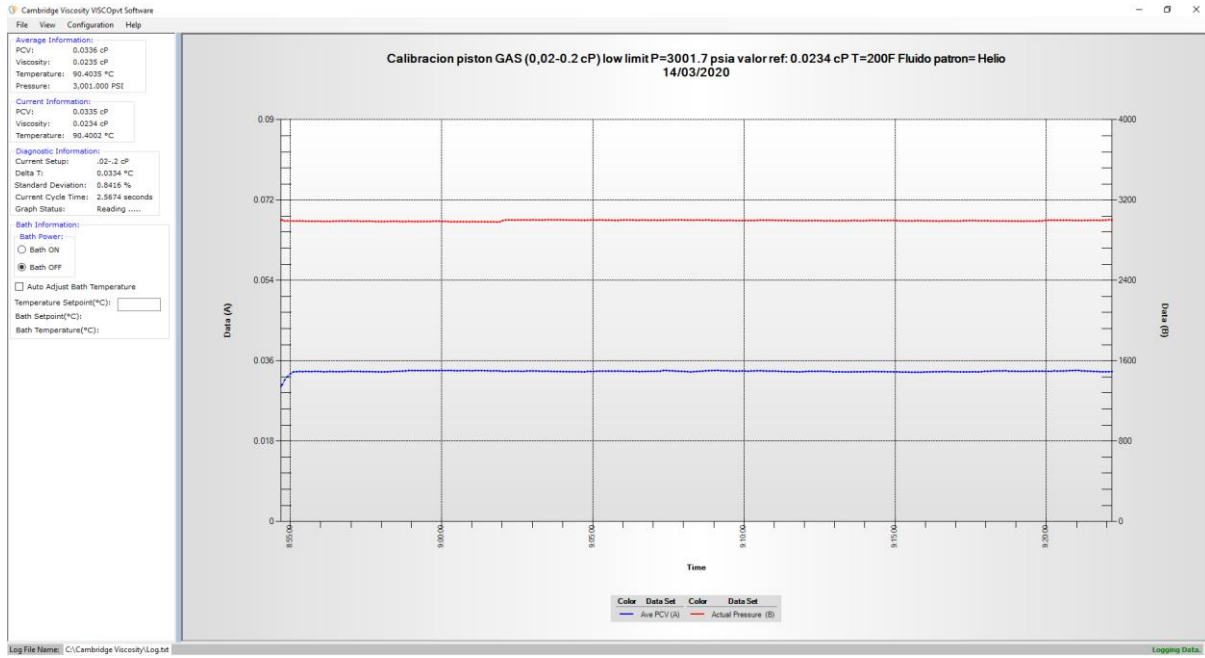


Figura C.28. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

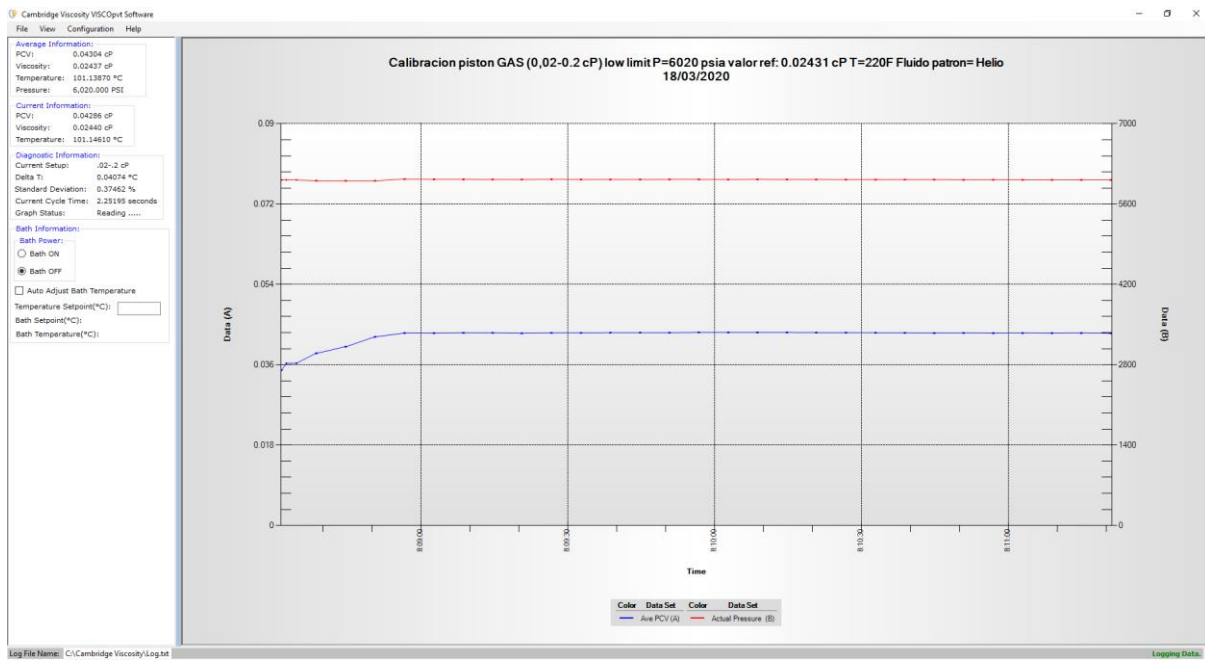


Figura C.29. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

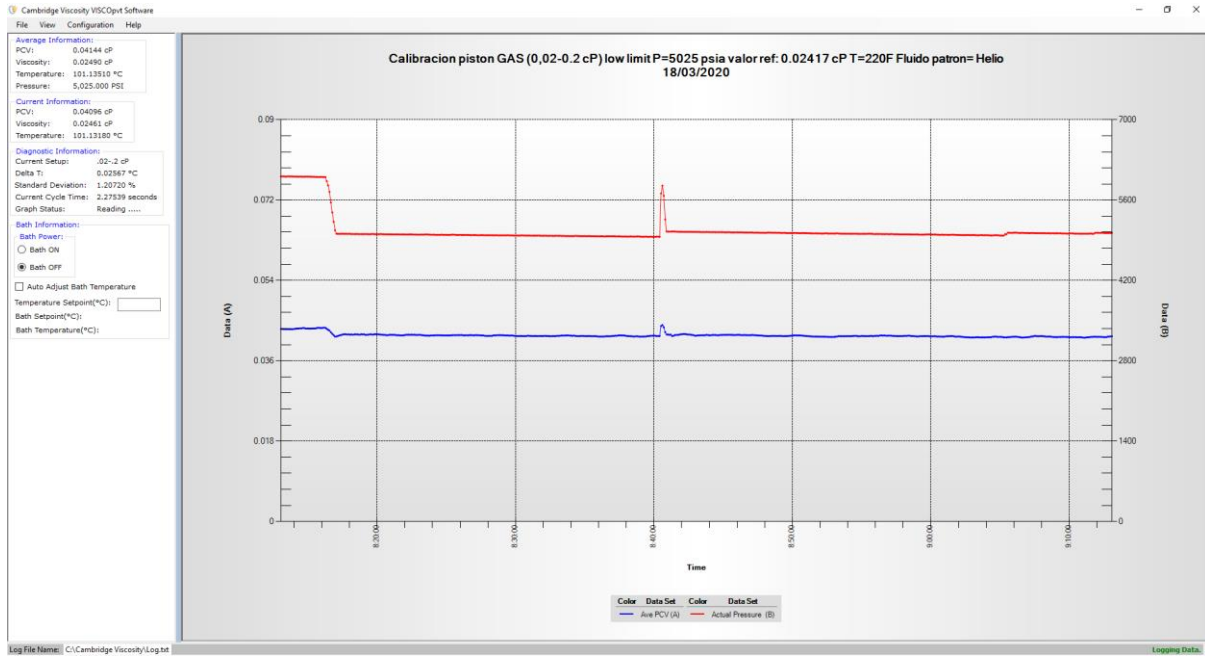


Figura C.30. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

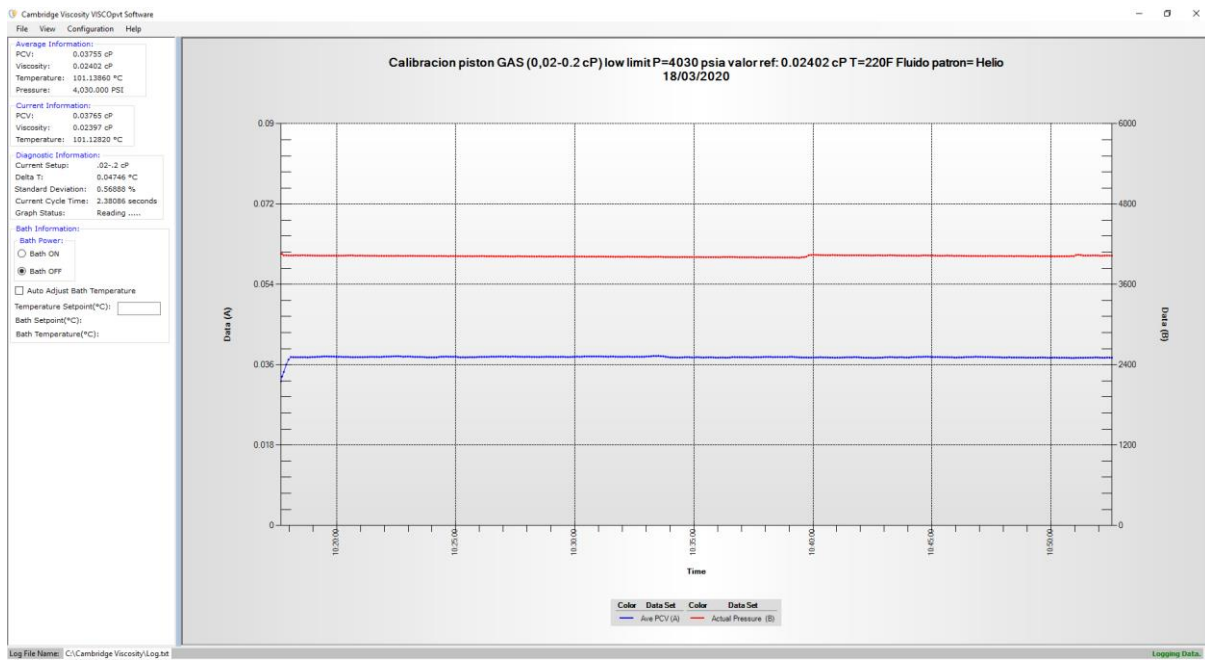


Figura C.31. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

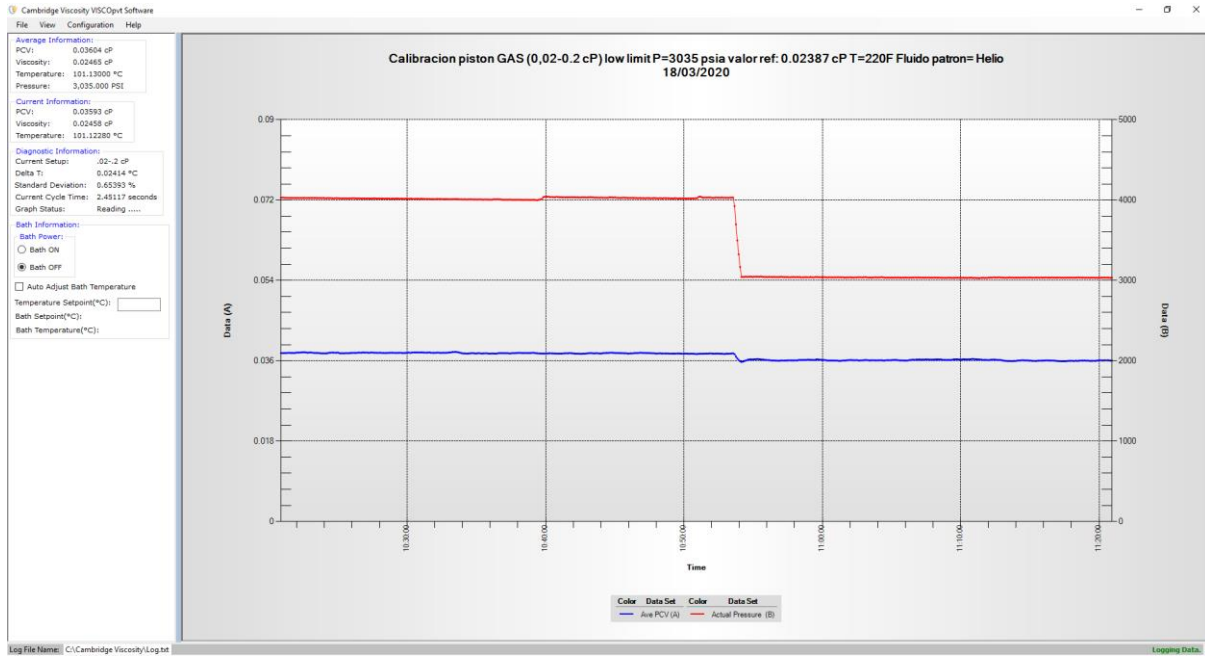


Figura C.32. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

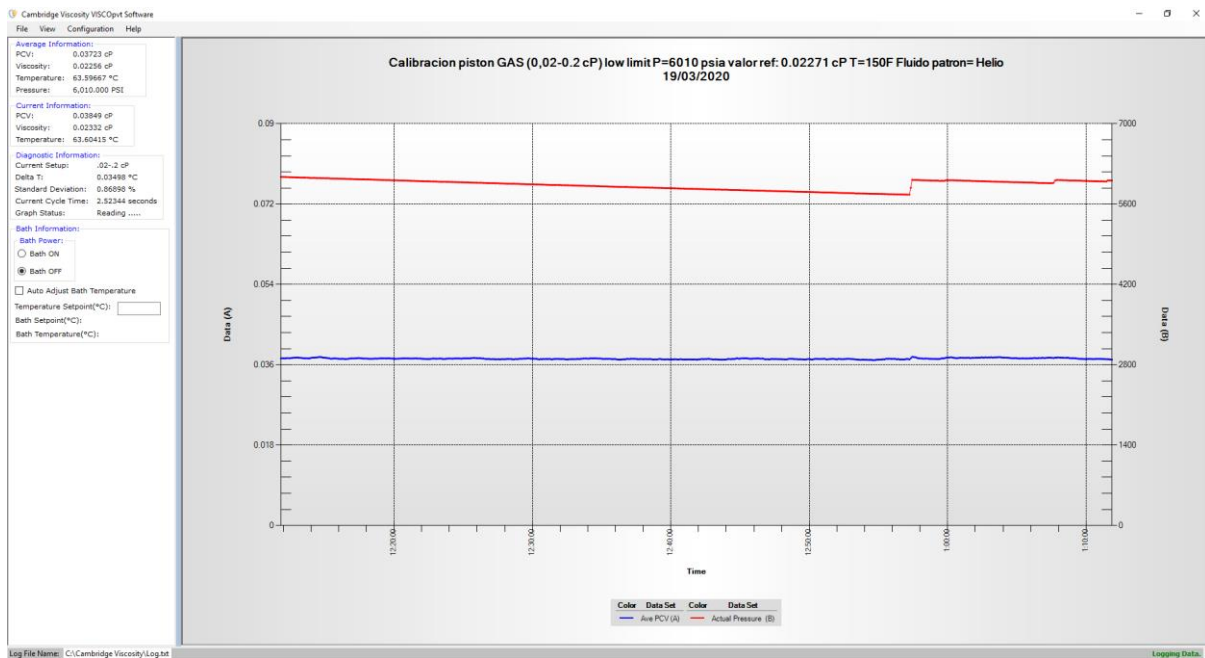


Figura C.33. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

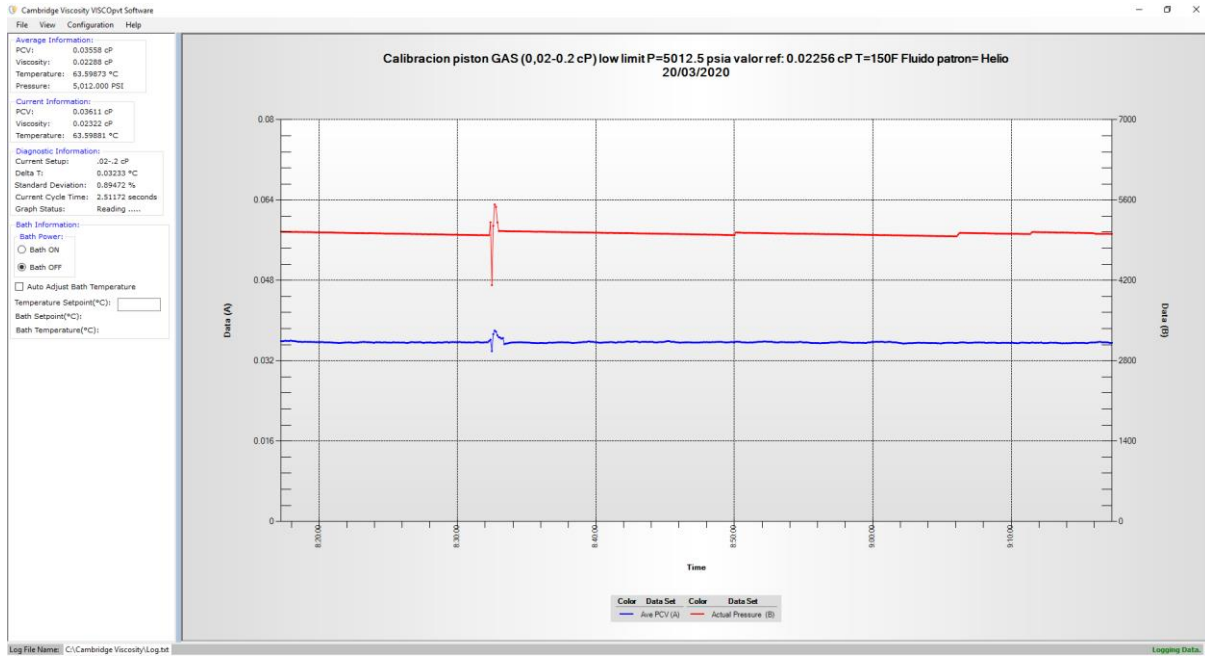


Figura C.34. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

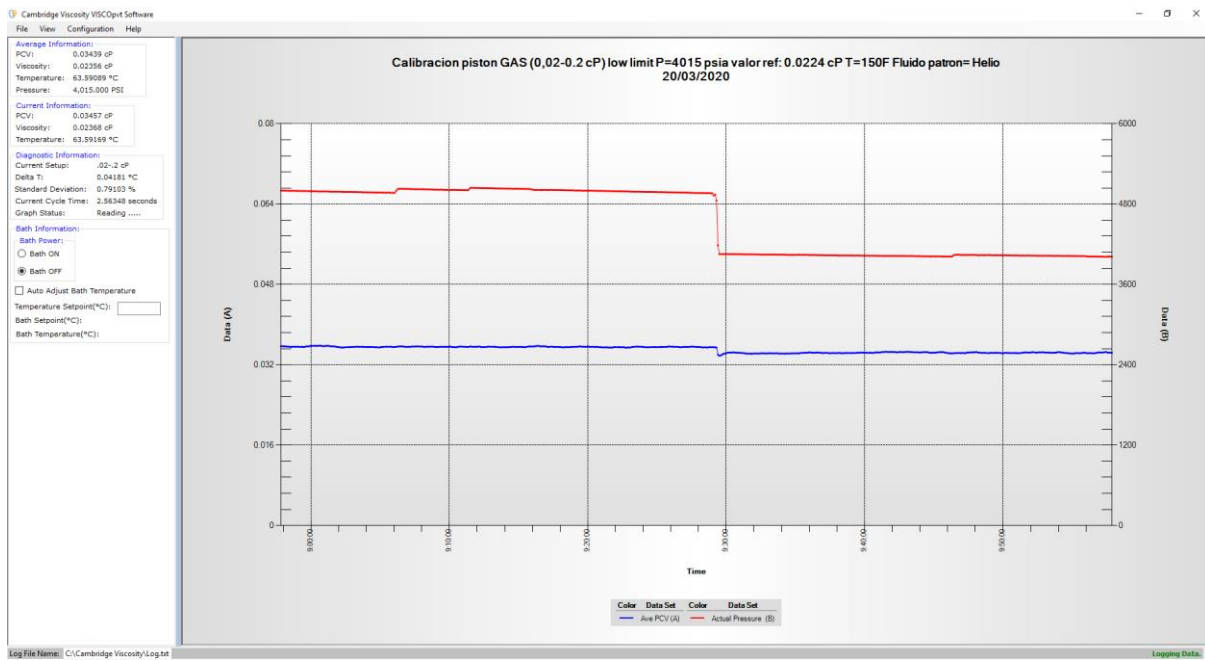


Figura C.35. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

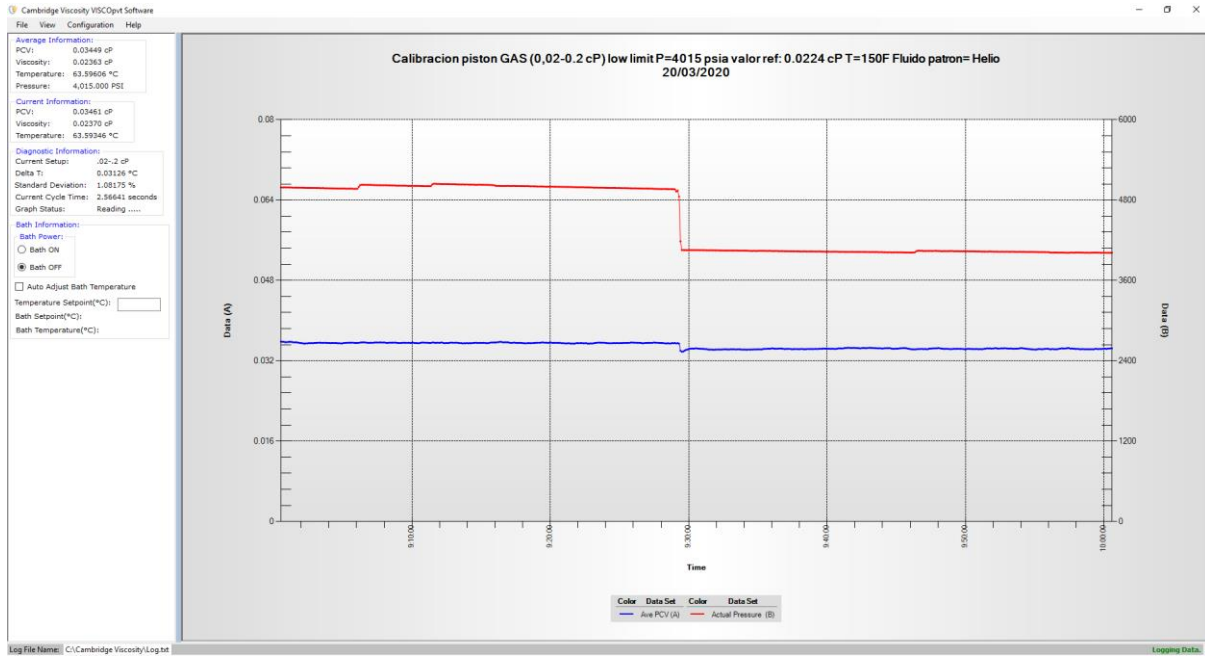


Figura C.35. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

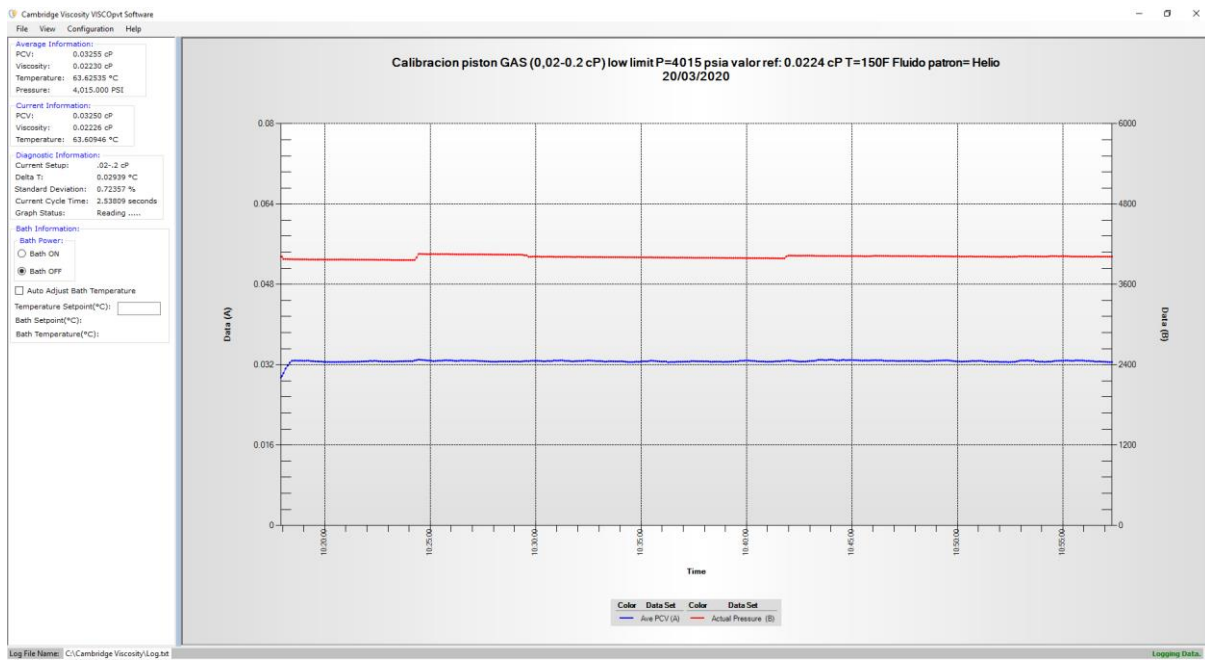


Figura C.37. Resultados de la medición de la viscosidad para el Low Limit

