



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Mediciones de viscosidad de  
petróleo en laboratorio de  
alta presión y temperatura.**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Petrolero**

**P R E S E N T A**

Ernesto Bernal Amador

**ASESOR DE INFORME**

Dr. José Luis Bashbush Bauza



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017**



**Dedicatoria:**

*A mi Lupita †, por todo tu amor, por haberme dado lo mejor de tu vida, por tu confianza, por tu apoyo incondicional en todo momento y no permitirme caer.*

*¡Gracias mamá!*

*A mi familia por todo su apoyo Chabe, Cilli, Ana, Juan, Bruno, abue Jose, Pépe, Jovie, Magda y Carmen.*

*A Jasruby Ortega por todo tu cariño y apoyo.*

*A mis amigos que al final de cuentas son como hermanos Clonosaurio, Compaye, Pericola, Pulpomo, Juanga, Pelo, Paty, Xanat, Potrillo, Teniente Dan, Morrita, Kawa, María Marlen Guadalupe, TT, Kike, July, Lucas, Dillis, Mari, Serch, Valebria, Jatziri, Borre, Aurora, Giu, Mo y Hugo.*

*A la Dra. Sara por haber creído en mí y darme ese empujón que necesitaba.*

**Agradecimientos:**

Al Dr. Sergio Quiñones por su apoyo durante todo este proceso y por haberme dado la oportunidad de pertenecer al LFTP.

A mi director el Dr. José Luis Bashbush por el apoyo en la realización de este trabajo y el tiempo dedicado.

A mis sinodales por sus valiosos comentarios sobre mi informe Dra. Sara Ríos, Dr. Enrique Geffroy, Ing. Erick Gallardo e Ing. Israel Castro.

A la Facultad de Ingeniería.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

# Índice

Introducción y objetivo. ....	8
1 Descripción del lugar de trabajo. ....	9
1.1 Descripción del puesto de trabajo. ....	11
2 Actividades realizadas en el laboratorio ....	12
2.1 Control de presión.....	12
2.2 Procedimiento para cargar fluido en la bomba manual ....	16
2.3 Control de temperatura ....	17
2.4 Acondicionamiento de las muestras ....	20
2.5 Limpieza del equipo de medición.....	21
2.6 Mediciones ....	24
3 Antecedentes. ....	25
3.1 Fluidos ....	25
3.2 Aceites en la industria petrolera ....	27
3.3 Aceites pesados en México ....	28
3.4 Viscosidad.....	29
3.4.1 Ley de la viscosidad de Newton ....	29
4 Instrumentos para la medición de la viscosidad ....	30
4.1 Viscosímetro de caída de cuerpo ....	30
4.1.1 Descripción del viscosímetro de caída de cuerpo ....	32
4.2 Viscosímetro Capilar.....	35
5 Resultados. ....	36
5.1 Petróleo ....	37
5.2 Mezcla de petróleos.....	40
5.3 Segunda mezcla.....	43
5.4 Análisis de resultados.....	45
6 Metas alcanzadas ....	46
6.1 Laboratorio de mediciones equipado ....	46
6.1.1 Laboratorio de baja presión ....	46
6.1.2 Determinación del peso molecular ....	47
6.1.3 Microscopía ....	47
6.1.4 Laboratorio de alta presión.....	47
6.1.5 Cromatografía ....	48

7 Evaluaciones Internacionales .....	49
8 Conclusiones.....	49
9 Referencias .....	50
10 Anexos .....	51

## Índice de imágenes

Figura 1 Bomba manual de alta presión ADT936.....	12
Figura 2 Componentes de la bomba manual de alta presión.....	13
Figura 3 Ventanas de Espinela fracturadas.....	15
Figura 4 Baño regulador de temperatura conectado al viscosímetro .....	17
Figura 5 Panel de control del baño regulador de temperatura.....	18
Figura 6 Muestras de petróleo almacenadas en el laboratorio.....	20
Figura 7 Equipo de seguridad para el personal del laboratorio .....	21
Figura 8 Piezas del viscosímetro en proceso de limpieza.....	22
Figura 9 Sensor de presión conectado en la forma normal.....	23
Figura 10 Sensor de presión con posición modificada .....	23
Figura 11 Representación gráfica del esfuerzo de corte contra el gradiente de velocidad .....	26
Figura 12 Gráfica de producción de petróleo por día, fuente, pemex.com .....	28
Figura 13 Viscosímetro de caída de cuerpo .....	30
Figura 14 Representación de la caída de un cuerpo dentro de un cilindro .....	32
Figura 15 Diagrama general del viscosímetro.....	33
Figura 16 Flujo de fluido en el interior de un tubo .....	35
Figura 17 Gráfica de Petróleo.....	37
Figura 18 Gráfica logarítmica de Petróleo .....	38
Figura 19 Gráfica de viscosidad del petróleo medido .....	39
Figura 20 Grafica de la primera mezcla de petróleos.....	40
Figura 21 Gráfica logarítmica de la primera mezcla de petróleos .....	41
Figura 22 Gráfica de viscosidad de la mezcla 1 .....	42
Figura 23 Gráfica de la segunda mezcla de petróleos .....	43
Figura 24 Gráfica logarítmica de la segunda mezcla de petróleos .....	44
Figura 25 Gráfica de viscosidad de la mezcla 2 .....	45
Figura 26 Gráfica del fluido de calibración AV 10 000.....	51
Figura 27 Grafica logarítmica del fluido de calibración AV 10 000 .....	52
Figura 28 Diagrama completo del sistema de medición .....	53

## Índice de tablas

Tabla 1 comparativa de costos de Ventanas de cristal .....	14
Tabla 2 Mediciones realizadas por fluido .....	24
Tabla 3 Clasificación del petróleo según su densidad .....	27
Tabla 4 Características del viscosímetro utilizado para las mediciones .....	31
Tabla 5 Total de mediciones realizadas con el viscosímetro .....	36



## Introducción y objetivo.

En este informe explico mi participación como especialista técnico, en el **Proyecto SENER-CONACYT HIDROCARBUROS 160015**, en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM en el Laboratorio de Investigación en Flujo y Tecnología del Petróleo (LIFTP).

Este escrito se enfoca al área de mediciones de viscosidad de petróleos mexicanos mediante el uso de un viscosímetro de caída de cuerpo, fabricado por la compañía Vinci Technologies. Las actividades reportadas se realizaron en un laboratorio con equipamiento suficiente para realizar mediciones a fluidos de densidad, reología, cromatografía y viscosidad, entre otras; y que contaba además con excelentes técnicos y profesionistas para afrontar el proyecto previamente indicado y que nunca antes había sido desarrollado en México.

El Proyecto al entregarse a PEMEX le dará una herramienta nunca antes desarrollada en México para cálculos en mezclas de petróleos crudos para exportación. Estos cálculos permitirían a PEMEX entregar al comprador de crudo, mezclas con la calidad requerida en los contratos. Los porcentajes de crudos usados para obtener la mezcla objetivo serán los necesarios para obtener la densidad API requerida y así evitar pérdidas de valor debido a la entrega de mezclas de crudo de mayor calidad de lo contratado.

Al terminar de leer este trabajo el lector tendrá una idea del alcance que puede tener un proyecto desarrollado en la UNAM integrado por un grupo interdisciplinario donde hubo ingenieros, químicos, matemáticos y físicos. De manera más puntual, se podrá ver la forma en que se utilizan habilidades de un ingeniero petrolero en un laboratorio de fluidos a alta presión y temperatura.

## 1 Descripción del lugar de trabajo.

El **Instituto de Investigaciones en Materiales** de la UNAM es una de las principales instituciones en el país dedicadas a la investigación de materiales y colabora con la industria y con otras instituciones académicas nacionales e internacionales mediante un gran número de proyectos (IIM-UNAM, 2017).

Se trata, en su mayoría, de proyectos conjuntos en investigación de frontera en las áreas de cerámicos, polímeros metálicos, materiales superconductores y semiconductores. A través de estas actividades, el IIM-UNAM ofrece un excelente ambiente a los estudiantes para realizar sus trabajos de tesis de licenciatura, maestría y doctorado en las áreas relacionadas con las especialidades del Instituto y, en particular, dentro de los programas de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería de Materiales de la UNAM, cuya coordinación reside en el Instituto (IIM-UNAM, 2017).

Los orígenes del Instituto se remontan a 1967, cuando el 1° de febrero se crea el Centro de Materiales y se instala en el 11° piso de la antigua Torre de Ciencias. En 1969 se ampliaron sus áreas de investigación, cambia su nombre a Centro de Investigaciones en Materiales y se traslada a sus actuales instalaciones, en el circuito exterior. Los avances logrados por su personal académico hacen que el 21 de noviembre de 1979 se convierta en el actual Instituto de Investigaciones en Materiales, IIM, organizado académicamente en 4 departamentos: Materiales Metálicos y Cerámicos, Polímeros, Física de Materiales a Bajas Temperaturas y Energía Solar. Posteriormente, en 1985 el departamento de Energía Solar, se transforma en Laboratorio de Energía Solar y se traslada a Temixco, Morelos. A partir del 13 de noviembre de 1996, por acuerdo del H. Consejo Universitario, el Laboratorio de Energía Solar se transformó en el Centro de Investigación en Energía, con lo que el Instituto de Investigaciones en Materiales quedó organizado académicamente en tres departamentos: Metálicos y Cerámicos, Polímeros y Estado Sólido y Criogenia.

En 2000, el Instituto contaba con tres departamentos académicos: Estado Sólido y Criogenia, Materiales Metálicos y Cerámicos, y Polímeros y en el año 2001, se formó el Departamento de Reología.

A partir del 6 de diciembre de 2002, con la aprobación del nuevo reglamento interno por el Consejo Técnico de la Investigación Científica, el IIM reorganizó sus departamentos y se actualizaron sus nombres:

- ***Materia Condensada y Criogenia.***
- ***Materiales Metálicos y Cerámicos.***
- ***Polímeros.***
- ***Reología y Mecánica de Materiales.***

Actualmente, el IIM coordina el Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales y contribuye al impulso de esta disciplina en otras entidades de la UNAM, dentro y fuera de Ciudad Universitaria como las Facultades de Ciencias, Ingeniería y Química el Centro de Nanociencias y Nanotecnología, el Instituto de Física, el Centro de Investigación en Energía, el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada y el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, todas ellas son, formalmente, entidades académicas participantes del Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales.

En el departamento de reología se investigan las propiedades reológicas y mecánicas de materiales complejos tal como polímeros, compuestos, nanocompuestos, emulsiones, petróleo, materiales granulados, entre otros. Estos estudios básicos se enfocan a desarrollos tecnológicos entre los que se incluyen sistemas de fluidos de varias fases, fluidos biológicos, medios granulados, los cuales resultan útiles en diversos campos de aplicación.

La formación de recursos humanos ha sido siempre una de las prioridades del IIM. Es relevante el número de investigadores que iniciaron su carrera como estudiantes asociados al IIM y que ahora forman parte de plantillas académicas de distintas dependencias dentro y fuera de la UNAM.

En el 2011 CONACYT aprobó el proyecto con número 160015 de título "*Estudio reológico y caracterización físico química para el desarrollo de correlaciones aplicables a crudos pesados*" y fue de este proyecto que nació el Laboratorio de Investigación en Flujo y Tecnología del Petróleo (LIFTP).

En el plan de desarrollo 2012 - 2016 del IIM se contempló la creación del Laboratorio de Investigación en Flujo y Tecnología del Petróleo, debido a que los proyectos sobre reología del petróleo estaban tomando más relevancia y a la necesidad creciente de PEMEX para la explotación de campos maduros.

El 3 de octubre de 2013 el Consejo Técnico de la Investigación Científica aprueba la creación de la Unidad Morelia y posteriormente el 27 de febrero de 2014 la incluye en el nuevo reglamento interno como parte del Instituto.

La misión del Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM-UNAM) es realizar investigación científica y tecnológica sobre estructura, propiedades, procesos de transformación y desempeño de los materiales.

**Fuente: IIM-UNAM**

## 1.1 Descripción del puesto de trabajo.

### **Especialista técnico**

En este puesto yo era el responsable técnico del viscosímetro de caída de cuerpo de la marca *Vinci Technologies*, así como de las mediciones de viscosidad de mezclas de petróleos realizadas con el mismo. Las funciones principales realizadas en el laboratorio consistían en revisar el correcto funcionamiento del viscosímetro y de una bomba manual de alta presión en cada medición, buscar, conseguir y realizar compras de insumos especiales del equipo tales como cristales de zafiro o empaques, conseguir refacciones y de no haber mandadas a manufacturar y apoyar, en caso de ser requerido, a los compañeros de trabajo. Se realizaron mediciones de viscosidad a fluidos de referencia AV 1000 y AV 10000, de viscosidad conocida, para asegurar el correcto funcionamiento del viscosímetro; también se midieron 2 muestras de petróleo puro y 17 mezclas de petróleo mexicano.

El Laboratorio de Investigación en Flujo y Tecnología del Petróleo (LIFTP), que pertenece al departamento de Reología y Mecánica de Materiales del IIM, contaba con un excelente equipo de trabajo, multidisciplinario, donde todos teníamos actividades designadas y siempre cumplimos con las metas que nos asignaban semanalmente. En caso de necesitar apoyo de otro miembro del laboratorio, el ingeniero que se encontrase en ese momento me ayudaba sin problemas; el trabajo siempre se entregó a tiempo.

## 2 Actividades realizadas en el laboratorio

### 2.1 Control de presión

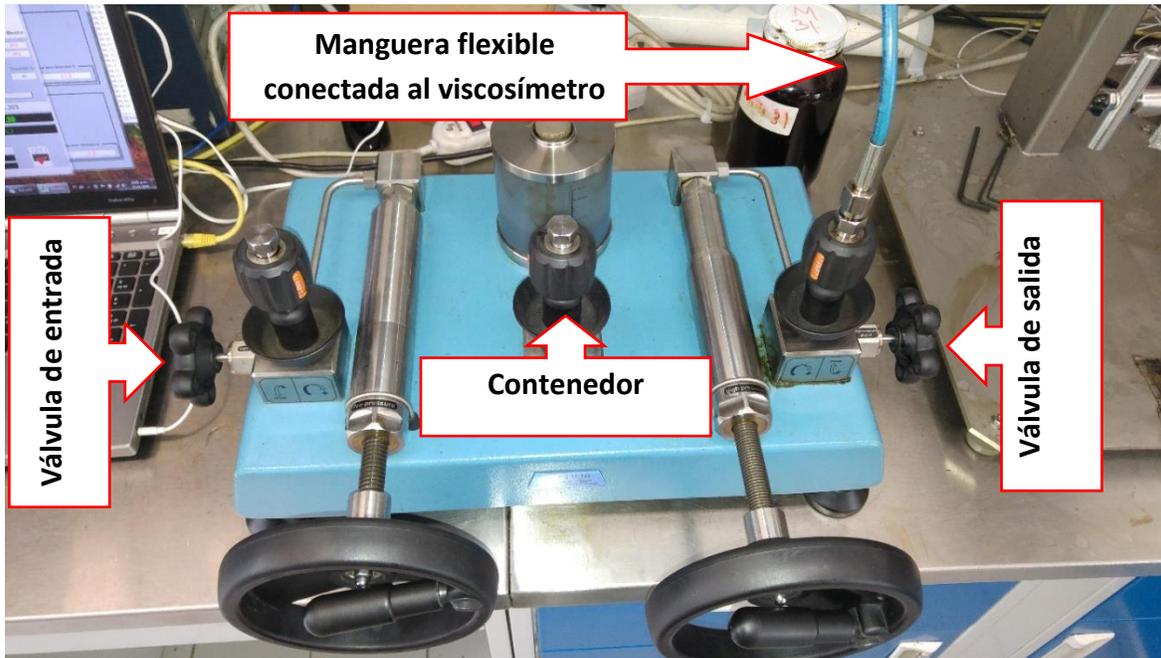
El control de la presión en el viscosímetro se llevó a cabo utilizando una bomba manual como se muestra en la figura 1, la cual tiene un rango de medición de 1 a 1000 atm. Se realizaron mediciones a 100, 200, 400 y 600 atm. A cada presión medida le corresponden diferentes temperaturas.



Figura 1 Bomba manual de alta presión ADT936

La bomba consta de dos cilindros (cada uno con una manija para el ajuste de presión), los cuales se llenan con el fluido a medir, cada cilindro tiene una capacidad específica, el cilindro izquierdo puede almacenar un volumen de 30cc y se utiliza para realizar el primer incremento de presión, que se utiliza para acercarse a la presión requerida. El cilindro de la derecha tiene una capacidad de 2cc y se utiliza para realizar incrementos finos y precisos de presión. En esta segunda etapa es donde se llega a la presión requerida.

En el centro de la bomba se encuentra un contenedor con capacidad máxima de 250 cc. La válvula de entrada regula la admisión de fluidos a los cilindros. La válvula de salida permite liberar los fluidos y aplicar presión al líquido dentro del viscosímetro por medio de una manguera flexible conecta la bomba manual con el viscosímetro. Una vez que los cilindros están llenos de fluido se debe cerrar la válvula de entrada; después, se abre la válvula de salida y se llena el viscosímetro con fluido. Una vez lleno se procede a calibrar los láseres.



*Figura 2 Componentes de la bomba manual de alta presión*

El manejo de la bomba manual no requiere mayor esfuerzo pero se debe ser cuidadoso ya que los incrementos y decrementos de presión se deben realizar lentamente para evitar quebrar las ventanas, que pueden ser de Zafiro o de Espinela. Estas piezas son sumamente difíciles de conseguir y costosas.

En México conseguir zafiro de las dimensiones que se necesitan para manufacturar las ventanas del viscosímetro es casi imposible. Las ventanas que se utilizaron para las mediciones se mandaron a hacer en México, pero de un cristal llamado Espinela. El Zafiro tiene una dureza en la escala de Mohs de 9 y la Espinela tiene una dureza de 8, lo cual permitió realizar todas las mediciones restantes. La Espinela al tener menor dureza se vuelve un tanto frágil a las presiones y temperaturas a las que se sometió.

Para tener una idea de los costos que implicaría conseguir las ventanas de Zafiro y las ventajas de haber conseguido la Espinela para la fabricación de las ventanas, se realizó la tabla 1 que detalla los costos por lotes de 4 piezas y donde se ve reflejado el ahorro en tiempo y costo.

Precio del Euro en Mayo del 2015 = 17.048 Fuente *Banxico.com*

Como se observa en la tabla 1, las ventanas se obtuvieron en la mitad del tiempo y el ahorro en pesos mexicanos por juego de 4 ventanas, fue de por lo menos \$6000. no contando que después de adquirir el cristal con el proveedor extranjero, se tenía que pagar el tallado de los cristales, incrementando aún más el costo.

*Tabla 1 comparativa de costos de Ventanas de cristal*

	Espinela	Zafiro
<b>Dureza en escala de Mohs</b>	8	9
<b>Tiempo de entrega</b>	15 días	30 días
<b>Precio Unitario aprox.</b>	\$2250.00	\$3750.00
<b>Mano de obra</b>	Incluido	No incluido
<b>No. De Piezas</b>	4	4
<b>Envío aprox.</b>	No aplica	\$4000.
<b>Total en pesos mexicanos</b>	\$9000.00	\$15000.00

En la figura 3 se observa el resultado de realizar incrementos o decrementos de presión, de manera abrupta, a las ventanas de cristal. Las imágenes corresponden a una ventana de Espinela fracturada debido a un cambio de presión abrupto y esta al no poseer una dureza como la del Zafiro es más susceptible a fracturarse. Es por esta razón que se recomienda realizar los incrementos o decrementos de presión de manera paulatina.



*Figura 3 Ventanas de Espinela fracturadas*

## 2.2 Procedimiento para cargar fluido en la bomba manual

Se vierte fluido en el tanque de almacenamiento, se recomienda llenar hasta llegar a los 150 ml., esto porque se tiene que llenar la manguera flexible, conectada al viscosímetro, y el espacio interior del viscosímetro en donde viaja el cuerpo libre.

### **Pasos para cargar la bomba manual:**

1. Tener las manijas totalmente cerradas.
2. Llenar el contenedor con el fluido a medir.
3. Abrir válvula de entrada.
4. Empezar a cargar el cilindro izquierdo (el de mayor capacidad).
5. Cerrar válvula de entrada.
6. Abrir válvula de salida.
7. Cerrar manija de alta capacidad (izquierda) hasta llenar de fluido el viscosímetro.
8. Cerrar válvula de salida.

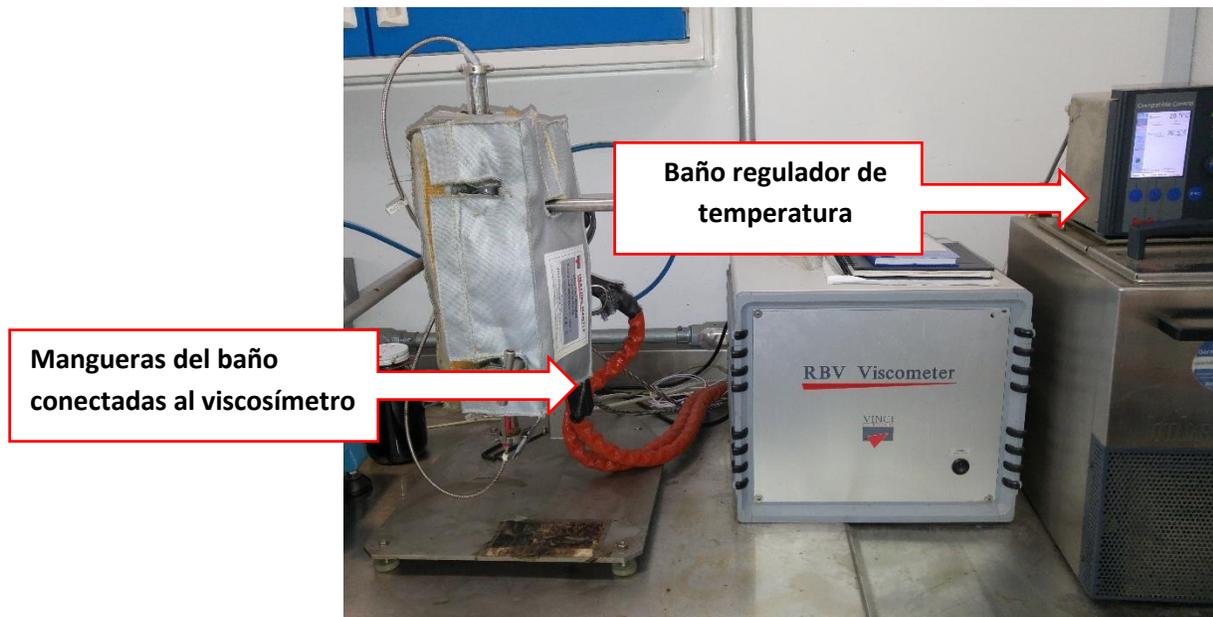
Se puede realizar una recarga de líquido durante una medición a causa de que la bomba ya no tenga fluido, pero es de suma importancia bajar la presión hasta 1 bar antes de realizar la recarga, de lo contrario se corre el riesgo de un choque de presión y se pueden dañar las ventanas de Zafiro o Espinela del viscosímetro.

### **Procedimiento para realizar una recarga de fluido:**

1. Asegurarse de que la presión es 1 bar.
2. Tener las manijas totalmente cerradas.
3. Llenar el contenedor con el fluido a medir.
4. Abrir válvula de entrada.
5. Empezar a cargar el cilindro izquierdo (el de mayor capacidad).
6. Cerrar válvula de entrada.
7. Abrir válvula de salida.
8. Cerrar manija de alta capacidad (izquierda) hasta llenar de fluido el viscosímetro.
9. Cerrar válvula de salida.

### 2.3 Control de temperatura

Para realizar las mediciones simulando las condiciones del yacimiento, presión y temperatura, es necesario mantener controladas estas dos variables, para la presión se utiliza una bomba manual de alta presión como se describió anteriormente y para la temperatura se utilizó un baño regulador de temperatura marca HUBER.



*Figura 4 Baño regulador de temperatura conectado al viscosímetro*

El baño regulador de temperatura se conecta al viscosímetro con unas mangueras que soportan temperaturas de -25 a +200 C, que son las temperaturas que se pueden alcanzar con el baño. El líquido que usa el baño es anticongelante para automóvil, mismo que es bombeado desde el baño hasta el viscosímetro circulando a través del mismo, elevando o disminuyendo la temperatura según se requiera.



*Figura 5 Panel de control del baño regulador de temperatura.*

El manejo de este equipo no implica muchas complicaciones, se introduce la temperatura deseada usando los botones azules que se muestran en la imagen y después se tiene que esperar aproximadamente 1 hora hasta que la temperatura del viscosímetro se estabilice. Una vez estabilizada la temperatura a la cual se requieren las mediciones se inician las pruebas.

Este baño regulador de temperatura se puede utilizar de dos formas, una es utilizando software, el cual se encargará de alcanzar la temperatura requerida pero este método toma mucho tiempo ya que el programa hace unos incrementos drásticos en la temperatura y después tiene que enfriar el líquido, estas fluctuaciones de temperatura pueden demorar más de dos horas en estabilizarse.

El segundo método es manual, uno ingresa la temperatura deseada en el panel de control del baño regulador de temperatura y ahí uno puede ir variando incrementos o decrementos pequeños de temperatura hasta llegar al valor deseado, con este método se puede alcanzar la temperatura requerida en un máximo de una hora con 30 minutos, dependiendo de la temperatura ambiente y de que en el laboratorio no haya corrientes de aire que alteren la temperatura del viscosímetro.

La precisión a la que se puede controlar la temperatura es bastante buena pues el baño regulador permite manejarla con incrementos o decrementos de 0.1 C, las mediciones que se realizaron con el viscosímetro se hicieron generalmente con un rango de  $\pm 0.2$  C pues la temperatura del mismo variaba debido a agentes externos como corrientes de aire o cambios en la temperatura ambiente.

Se realizaron mediciones experimentales con  $\pm 2$  C de diferencia a la temperatura requerida y los resultados no variaron con respecto a mediciones con  $\pm 0.1$  C a  $\pm 0.4$  C de variación, por lo que se puede decir que los resultados de las mediciones son de calidad y el baño regulador permite una buena precisión para las mediciones.

## 2.4 Acondicionamiento de las muestras

Las muestras de petróleo utilizadas en el LIFTP fueron almacenadas en el laboratorio para su posterior uso en mediciones de viscosidad, densidad, reología, cromatografía, entre otras. Estas muestras al estar en reposo, después de un tiempo, comienzan a asentarse por lo que es necesario acondicionarlas antes de realizar las mediciones.



*Figura 6 Muestras de petróleo almacenadas en el laboratorio.*

Con ayuda de una parrilla de calentamiento y agitación se calentó agua en un vaso de precipitados, el frasco que contiene la muestra se puso a calentar en “baño María”, la muestra se debe revisar constantemente, pues en el caso de los aceites pesados estos al calentarse se expanden considerablemente y pueden reventar la botella o derramarse. Después de observar que la muestra ya está menos espesa se procede a la agitación del fluido, con ayuda de una pequeña espátula se agita el petróleo por un tiempo de aproximadamente 5 minutos e inmediatamente después de la agitación se procede a cargar el líquido en la bomba manual y el viscosímetro. Esto se hace para aprovechar que el fluido viscoso calentado pueda fluir fácilmente y para tener una muestra homogénea durante las mediciones.

## 2.5 Limpieza del equipo de medición

Para la limpieza de todo el equipo de medición, viscosímetro y bomba manual de alta presión, se utiliza tolueno ya que diluye fácilmente el petróleo y hace que la limpieza de los aparatos sea más rápida y efectiva.

El tolueno es un líquido incoloro con un olor característico semejante al thinner. Es menos denso que el agua, inmiscible en ella y sus vapores son más densos que el aire. Se utiliza en combustibles para automóviles y aviones; como disolvente de pinturas, barnices, hules, gomas, poliestireno, polialcohol vinílico, ceras, aceites y resinas, reemplazando al benceno.

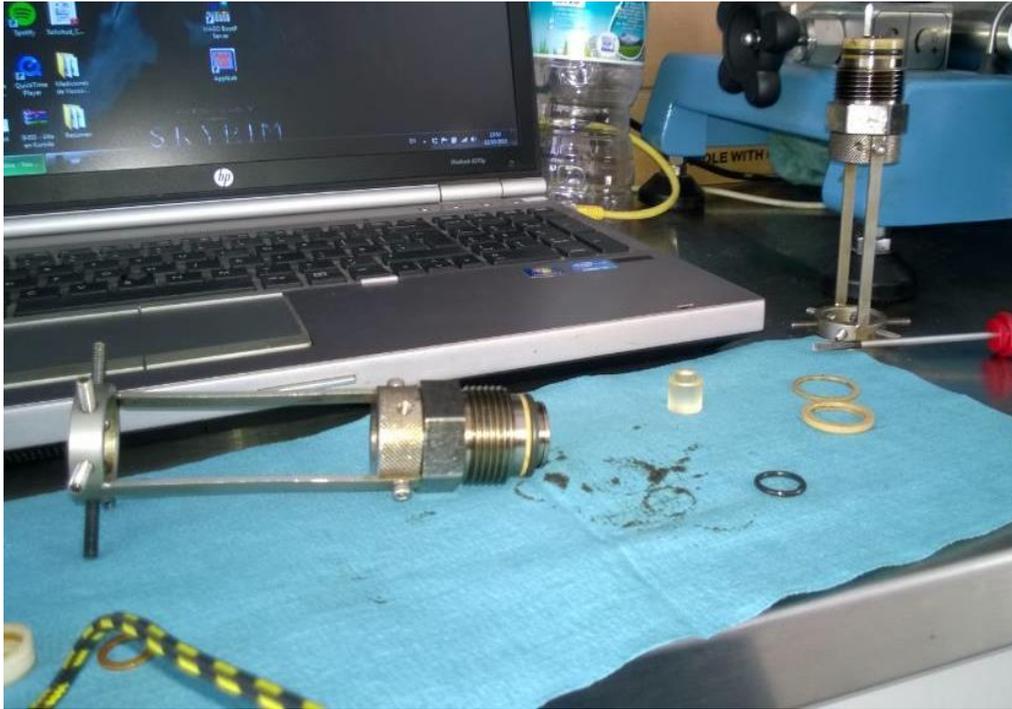
También se utiliza como materia prima en la elaboración de una gran variedad de productos como benceno, ácido benzoico, fenol, benzaldehido, explosivos (TNT), colorantes, productos farmacéuticos (por ejemplo, aspirina), adhesivos, detergentes, monómeros para fibras sintéticas, sacarinas, saborizantes y perfumes (*Hoja de seguridad, Facultad de Química, UNAM 2008*).

Dado que el tolueno es un hidrocarburo tóxico, durante su manejo se utilizaron las medidas de seguridad necesarias, tales como el uso de guantes, de mascarilla y bata de laboratorio. El laboratorio, a la hora de la limpieza de los equipos, se mantenía ventilado con extractores en las paredes de lugar.



Figura 7 Equipo de seguridad para el personal del laboratorio

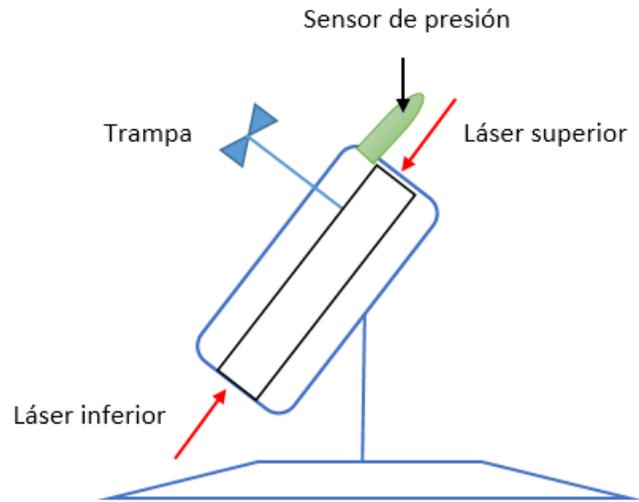
Se desmontó cada parte del viscosímetro, limpiando pieza por pieza para evitar alteraciones en las mediciones debido a residuos, se verificó en cada ocasión el estado de todos los empaques que se utilizan en el viscosímetro y queda a criterio del técnico si se reemplazan o se utilizan en una nueva medición. No se recomienda utilizar empaques con grietas o carcomidos.



*Figura 8 Piezas del viscosímetro en proceso de limpieza.*

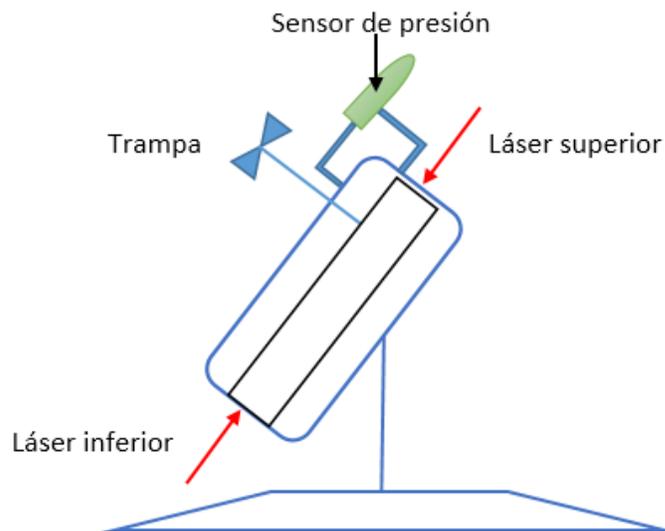
El manejo de este equipo no requiere mayor esfuerzo pero sí de mucha paciencia pues el láser que detecta los pistones dentro del viscosímetro puede descalibrarse con el movimiento normal que se debe aplicar, cada que se descalibra un láser se debe detener la medición y calibrar nuevamente, esto ocurrió en muchas ocasiones hasta que se realizó una modificación en la cual se cambió de lugar el sensor de presión y las descalibraciones se redujeron en un 90 %.

En la figura 9 se observa el sensor de presión conectado, al viscosímetro, en la posición normal.



*Figura 9 Sensor de presión conectado en la forma normal*

La modificación en la posición del sensor de presión quedó como lo muestra la figura 10.



*Figura 10 Sensor de presión con posición modificada*

## 2.6 Mediciones

Para cada fluido se realizaron mediciones a diferentes presiones y temperaturas, la tabla 2 nos muestra el número de mediciones realizadas a una muestra de aceite, el resultado es de 145 mediciones por aceite en caso de no presentarse contratiempos como descalibraciones en los láseres o variaciones en la presión o temperatura, en cada medición. Generalmente se tomaban mediciones adicionales para corroborar que el resultado fuese el correcto.

*Tabla 2 Mediciones realizadas por fluido*

Temperatura	Presión		TOTAL								
C	Bar	Mediciones									
<b>20</b>	1	5	100	5	200	5	400	5	600	5	25
<b>30</b>	1	5	100		200		400		600		5
<b>40</b>	1	5	100	5	200	5	400	5	600	5	25
<b>50</b>	1	5	100		200		400		600		5
<b>60</b>	1	5	100	5	200	5	400	5	600	5	25
<b>70</b>	1	5	100		200		400		600		5
<b>80</b>	1	5	100	5	200	5	400	5	600	5	25
<b>90</b>	1	5	100		200		400		600		5
<b>100</b>	1	5	100	5	200	5	400	5	600	5	25
<b>TOTAL</b>		45		25		25		25		25	<b>145</b>

## 3 Antecedentes.

### 3.1 Fluidos

La reología estudia la manera en que se deforma y fluye la materia, esta clasifica los fluidos en Newtonianos, No Newtonianos y Viscoplasticos.

Los fluidos newtonianos son aquellos donde la de relación esfuerzo de corte contra el gradiente de deformación es lineal y su viscosidad es constante. La viscosidad de un fluido newtoniano está determinada únicamente por la temperatura y composición. Algunos ejemplos de este tipo de fluido son el agua, aceite, combustible, lubricantes, etc.

El esfuerzo de corte es una fuerza por unidad de área aplicada de forma tangencial al flujo en contraste a la presión que se aplica de forma normal.

Los fluidos no-newtonianos son aquellos en que, a una temperatura y densidad constante, su viscosidad varía también en función del esfuerzo de corte o del gradiente de deformación.

Los fluidos adelgazantes al corte o pseudo-plásticos son aquellos en los que la viscosidad disminuye, cuando el gradiente de deformación aumenta; manteniendo temperatura y densidad constantes.

Los fluidos espesantes al corte o dilatantes son aquellos en los que la viscosidad aumenta cuando el gradiente de deformación aumenta; manteniendo temperatura y densidad constantes. Como por ejemplo el almidón de maíz en agua.

Los fluidos no-newtonianos se clasifican en tixotrópicos o reopéticos.

Los fluidos tixotrópicos son aquellos que, a una temperatura y gradiente de deformación constante, presentan una disminución del esfuerzo de corte y viscosidad.

Los fluidos reopéticos son aquellos que a una temperatura y gradiente de deformación constante presentan un aumento en el esfuerzo de corte y en la viscosidad.

Los fluidos plásticos de Bingham son aquellos en donde la relación del esfuerzo de corte y del gradiente de deformación es lineal, pero para esfuerzos de corte pequeños se comportan como sólidos. La figura 11 nos muestra las curvas de esfuerzo cortante contra rapidez de deformación.

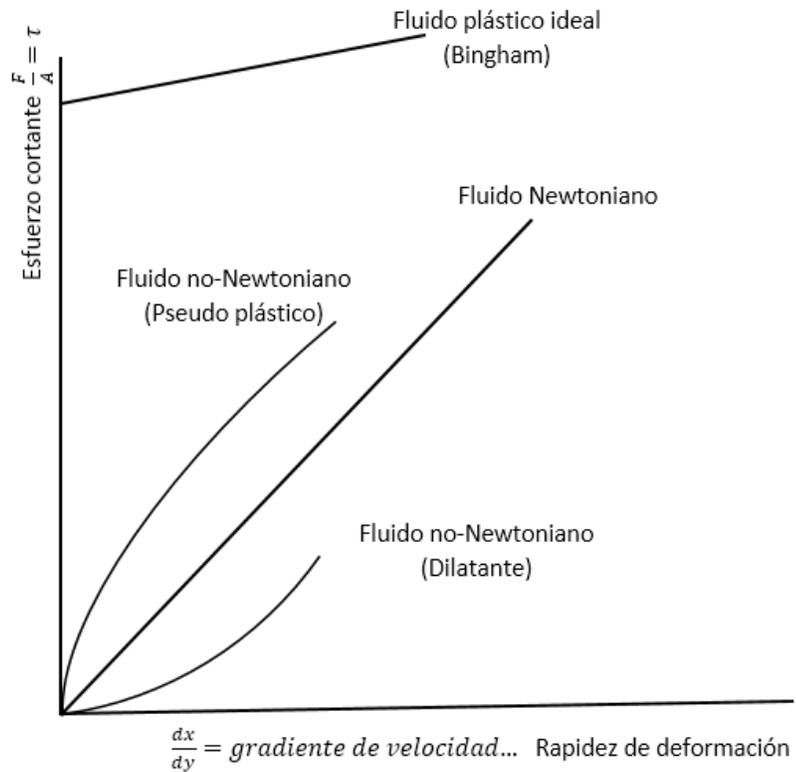


Figura 11 Representación gráfica del esfuerzo de corte contra el gradiente de velocidad

### 3.2 Aceites en la industria petrolera

En la industria petrolera se supone mayormente que el petróleo se genera en el subsuelo producto de la descomposición de materia orgánica, depositada y atrapada, sometida a altas presiones y temperaturas. El petróleo normalmente se encuentra originalmente a alta presión y al ser extraído sus principales componentes ligeros se separan dando origen al Gas Natural y al aceite estabilizado, o petróleo crudo. De estos dos tipos de fluidos (aceite y gas) el aceite se divide a su vez en otros fluidos que se clasifican según su densidad como se muestra en la tabla 3.

**Comúnmente, la industria petrolera mundial clasifica el petróleo de acuerdo a su densidad API, que es un parámetro internacional para medir la densidad del crudo, IMP 2015.**

*Tabla 3 Clasificación del petróleo según su densidad*

Aceite crudo	Densidad ( g/ cm <sup>3</sup> )	Densidad (Grados API)
<b>Extrapesado</b>	> 1.0	<= 10.0
<b>Pesado</b>	1.0 - 0.92	10.0 - 22.3
<b>Mediano</b>	0.92 - 0.87	22.3 - 31.1
<b>Ligero</b>	0.87 - 0.83	31.1 - 39
<b>Superligero</b>	< 0.83	>= 39

### 3.3 Aceites pesados en México

México es un país productor de hidrocarburos y cuenta con grandes reservas de petróleo. Pero la mayoría de estas reservas son de crudos pesados y ese es uno de los principales retos que enfrenta la industria petrolera mexicana, pues al ser estos aceites densos y viscosos, su explotación y manejo son más complejos.

Al 1 de enero de 2016 las reservas probadas de crudo se situaban en 9.881 millones de barriles (MMb), de los que 50% equivalen a crudo pesado, 37.1% a crudo ligero y 12.9% a crudo súper-ligero. (PEMEX, 2016)

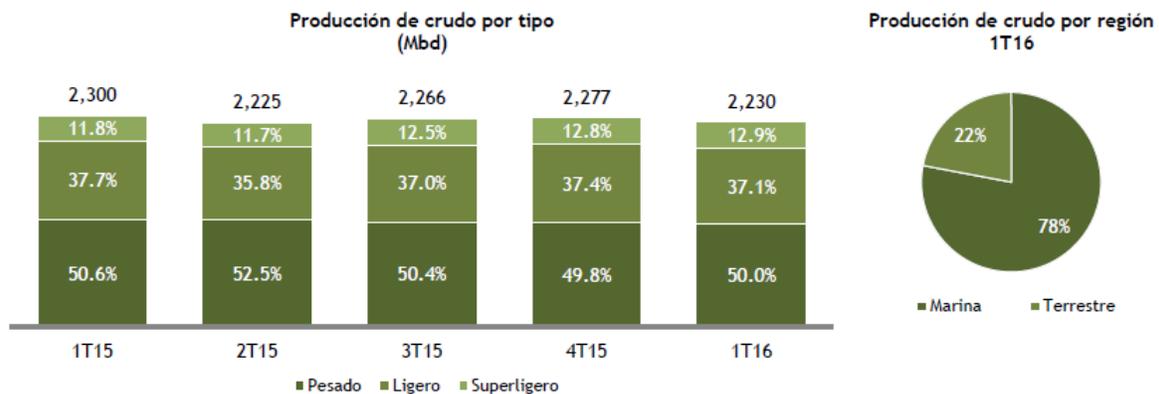


Figura 12 Gráfica de producción de petróleo por día, fuente, pemex.com

Para exportación, en México se preparan tres variedades de mezclas de petróleo crudo:

**Istmo:** Ligero con densidad de 33.6 grados API y 1.3% de azufre en peso.

**Maya:** Pesado con densidad de 22 grados API y 3.3% de azufre en peso.

**Olmecca:** Súper ligero con densidad de 39.3 grados API y 0.8% de azufre en peso.

### 3.4 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad de los fluidos que indica su resistencia al flujo, y puede definirse como la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. La viscosidad resulta de las interacciones intermoleculares o estructurales del fluido y su respuesta a los esfuerzos a los que está sometido el mismo fluido; la combinación de esos dos factores determina la rapidez con la que un fluido se deforma y fluye.

Poise es la unidad de la viscosidad, equivalente a:

$$\mu = \left[ \frac{\text{dina*s}}{\text{cm}^2} \right] = \text{Poise} = \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm*s}} \right] = 0.1 \text{ Pa * s} , \dots\dots\dots(1)$$

como un poise representa una viscosidad alta se utiliza 1/100 poise, o un centipoise (cp), para las mediciones de petróleo crudo. Un centipoise equivale a un milipascal-segundo (mPs).

#### 3.4.1 Ley de la viscosidad de Newton

Cualquier fluido que está sometido a cierto esfuerzo cortante exhibe una rapidez de deformación característica, esta rapidez de deformación depende de los esfuerzos a los que está sometido el fluido, resultado de la interacción que existe entre las partículas que constituyen al fluido.

La ley de viscosidad de Newton establece que la rapidez de deformación tangencial que exhibe un fluido es directamente proporcional al esfuerzo cortante que se le aplica.

$\tau$ = Esfuerzo de corte ..... (N/m<sup>2</sup>)

$\mu$ = Viscosidad ..... (poise)

$dV/dy$ = Rapidez de deformación ..... (m/s)

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \dots\dots\dots(2)$$

## 4 Instrumentos para la medición de la viscosidad

Los instrumentos más ampliamente usados en la medida de viscosidades son los viscosímetros capilares y de caída de cuerpo. La elección del tipo de viscosímetro esta en una función de las necesidades, de la prontitud requerida y del presupuesto disponible.

### 4.1 Viscosímetro de caída de cuerpo

El viscosímetro de caída de cuerpo es una herramienta diseñada para medir la viscosidad de muestras de petróleo a condiciones de yacimiento y a condiciones de superficie, las mediciones pueden llevarse a cabo a altas temperaturas y presiones. Utiliza el principio de la caída de cuerpo para calcular la viscosidad.

La viscosidad se calcula correlacionando los datos obtenidos con curvas de viscosidades conocidas de otros fluidos.

El viscosímetro que se utilizó para las mediciones, consiste en un cilindro de metal con láseres detectores de proximidad en los extremos y tiene una llave externa que sirve para liberar un pistón. El láser superior al detectar que el pistón se ha alejado activa el contador de tiempo y al llegar al fondo el láser inferior detiene el contador, con esto se obtiene la primera lectura de tiempo de caída.

El viscosímetro cuenta con un sistema de recirculación que va conectado a un baño regulador de temperatura. El baño circula anticongelante a determinada temperatura a través del cilindro de metal, elevando o reduciendo la temperatura del viscosímetro; para evitar pérdidas de calor el viscosímetro cuenta con una chaqueta térmica.

Este equipo puede proporcionar mediciones muy precisas pero, en el caso de fluidos pesados, las mismas pueden tomar mucho tiempo.



Figura 13 Viscosímetro de caída de cuerpo

*Tabla 4 Características del viscosímetro utilizado para las mediciones*

CARACTERÍSTICAS	BENEFICIOS
<b>Rango de presión: 1 atm – 1000 atm</b>	Fácil de usar
<b>Rango de temperatura: T. Ambiente – 190 C</b>	Medidas precisas para crudos pesados
<b>Rango de viscosidad: 0.2 a 10 000cP</b>	Condiciones de Presión y Temperatura del yacimiento
<b>Ángulos de rotación: 45°, 65° y 90°</b>	Amplio rango de viscosidad
<b>Volumen de la celda: 11 ml</b>	Mantenimiento sencillo
<b>Tiempo de calentamiento: 1 hora para 190°C</b>	
<b>Alimentación: 220 VAC, 50/60 Hz</b>	

#### 4.1.1 Descripción del viscosímetro de caída de cuerpo

Como su nombre lo indica este tipo de viscosímetros funciona liberando un cuerpo sólido (cilindro) a través de él, el espacio en el interior del viscosímetro se debe encontrar lleno del líquido del cual se desea saber su viscosidad. El cuerpo sólido dentro del viscosímetro se encuentra atrapado en el lado superior y con una válvula se libera para comenzar la medición. La velocidad a la que cae el cuerpo sólido y la distancia se utilizan para estimar la viscosidad del fluido. Las variables que deben tomar en cuenta durante el proceso son:

- $\rho_1$  Densidad del cuerpo sólido
- $\rho_2$  Densidad del fluido
- L -- Longitud que recorre el cuerpo sólido
- V -- Velocidad que alcanza el cuerpo sólido
- D – Diámetro del cuerpo
- t – Tiempo de caída

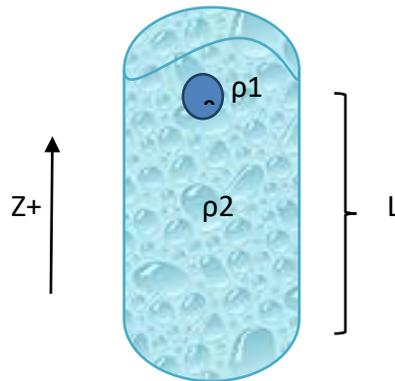


Figura 14 Representación de la caída de un cuerpo dentro de un cilindro

#### De la 2da Ley de Newton $\sum F_z = m \cdot a_z$

- P: peso de la esfera
- +E: empuje hidrostático
- +F $\mu$ : fuerzas viscosas

Cuando se alcanza velocidad límite:  $- P + E + F\mu = m \cdot a_z = 0$  ..... (3)

$$P = \left[ \frac{1}{6} \pi D^3 \right] \rho_s g \text{ ..... (4)}$$

$$E = \left[ \frac{1}{6} \pi D^3 \right] \rho_L g \text{ ..... (5)}$$

$$F\mu = 3 \pi \mu v_o D \text{ ..... (6)}$$

$$\mu = \frac{D^2 g (\rho_s - \rho_L)}{18 L/t} \text{ ..... (7)}$$

Las estimaciones serán más precisas entre más alta sea la viscosidad, es por eso que en mediciones de hidrocarburos con viscosidad alta se obtienen buenos resultados.

Hablando específicamente del viscosímetro de caída de cuerpo *Rolling Ball* de la marca *Vinci Technologies*, que se utilizó para las mediciones de viscosidad de aceites pesados de México, esta máquina tiene dos láseres, uno en cada extremo, que funcionan como sensores de proximidad, al liberar al cuerpo sólido dentro del viscosímetro, el láser detecta que el cuerpo sólido se ha alejado y a determinada distancia se inicia un conteo del tiempo que tarda el cuerpo sólido en llegar al otro extremo. Al llegar al extremo del viscosímetro el láser inferior detecta que el cuerpo ha llegado al final y automáticamente detiene la medición.

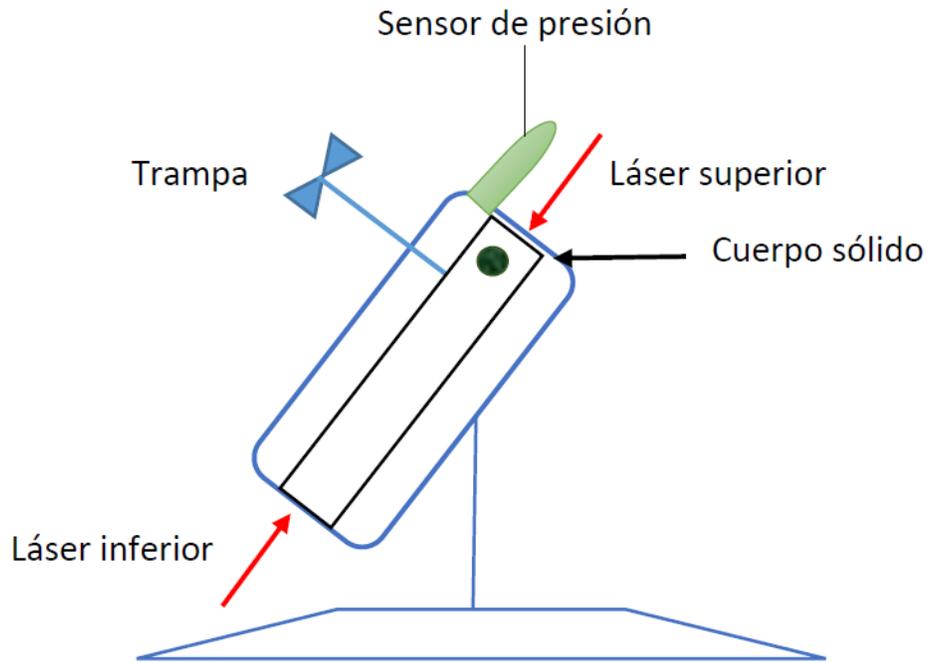


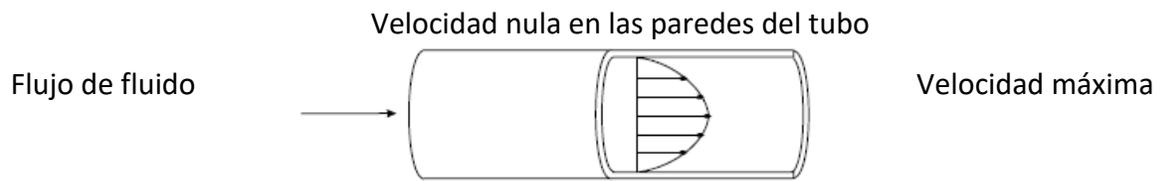
Figura 15 Diagrama general del viscosímetro

Este tipo de viscosímetros es comúnmente utilizado en los siguientes sectores:

- ❖ Industria petrolera (Hidrocarburos, lodos de perforación)
- ❖ Industria alimentaria (soluciones de azúcar, miel, cerveza, leche, gelatina)
- ❖ Industria química (soluciones de polímeros, disolventes, soluciones de resinas, dispersiones de látex, soluciones adhesivas)
- ❖ Industria Cosmética/Farmacéutica (materias primas, glicerina, emulsiones, suspensiones, soluciones)
- ❖ Industria papelera (emulsiones, dispersiones de pigmentos, aditivos del papel)
- ❖ Pinturas y barnices (tintas para impresión, barnices, aquarelas, tintas)
- ❖ Detergentes

## 4.2 Viscosímetro Capilar

El viscosímetro capilar es de los instrumentos para la determinación de viscosidad más utilizados, y también el más antiguo. En estos aparatos un fluido se empuja a través de un tubo diámetro pequeño, durante el flujo de fluido se observa una distribución de velocidad en la tubería de tipo parabólico, para fluidos Newtonianos, de forma que el fluido que está en contacto con las paredes del tubo tiene una velocidad nula y el fluido que se encuentra en el centro del tubo tiene una velocidad máxima como lo muestra la siguiente imagen.



*Figura 16 Flujo de fluido en el interior de un tubo*

## 5 Resultados.

Para la primera junta de consorcio, donde se realizaron evaluaciones y comentarios sobre el avance del proyecto, ya había medido dos fluidos de calibración y dos petróleos puros. Después de la reunión de consorcio se planteó la meta de realizar mediciones de viscosidad, densidad y reología a 50 mezclas de petróleo de las cuales 17 fueron medidas con el viscosímetro de caída de cuerpo.

De las mediciones que se realizaron se obtuvieron gráficas de tiempo de caída del pistón contra temperatura, como las siguientes, las cuales fueron utilizadas por el Dr. Sergio E. Quiñones Cisneros para realizar los cálculos necesarios para la entrega del proyecto.

Para la entrega de la parte técnica del proyecto ya se había terminado el trabajo con un aproximado de 3045 mediciones, la siguiente tabla nos muestra los fluidos y el total de mediciones realizadas.

*Tabla 5 Total de mediciones realizadas con el viscosímetro*

Muestras	Cantidad	Mediciones
<b>Fluido de calibración</b>	2	290
<b>Petróleo</b>	2	290
<b>Mezclas de petróleo</b>	17	2465
<b>TOTAL</b>	21	3045

A continuación se muestran tres resultados de fluidos, medidos con el viscosímetro, con sus respectivas gráficas de tiempo de caída y viscosidad. Dos mediciones corresponden a mezclas de petróleo y una a petróleo crudo.

## 5.1 Petróleo

Para la medición de un aceite puro, es decir que no es una mezcla de hidrocarburos, se utilizó un pistón con los siguientes datos.

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas con el viscosímetro de caída de cuerpo de la marca Vinci Technologies, la tendencia exponencial de cada medición muestra que a mayor presión a la que esté sometido el pistón mayor el tiempo de caída y por lo tanto es mayor la viscosidad del aceite a esas condiciones de presión y temperatura

### Settings (ángulo-pistón)

Pistón No.	Diámetro (mm)	Largo (mm)	Peso (g)	Densidad (g/cc)	Ángulo de medición	Mediciones para las que se utilizó
1	8.5	20	8.9856	7.9175	90	Todas

En este caso bastó con sólo un pistón para realizar todas las mediciones, como se muestra en la figura 17.

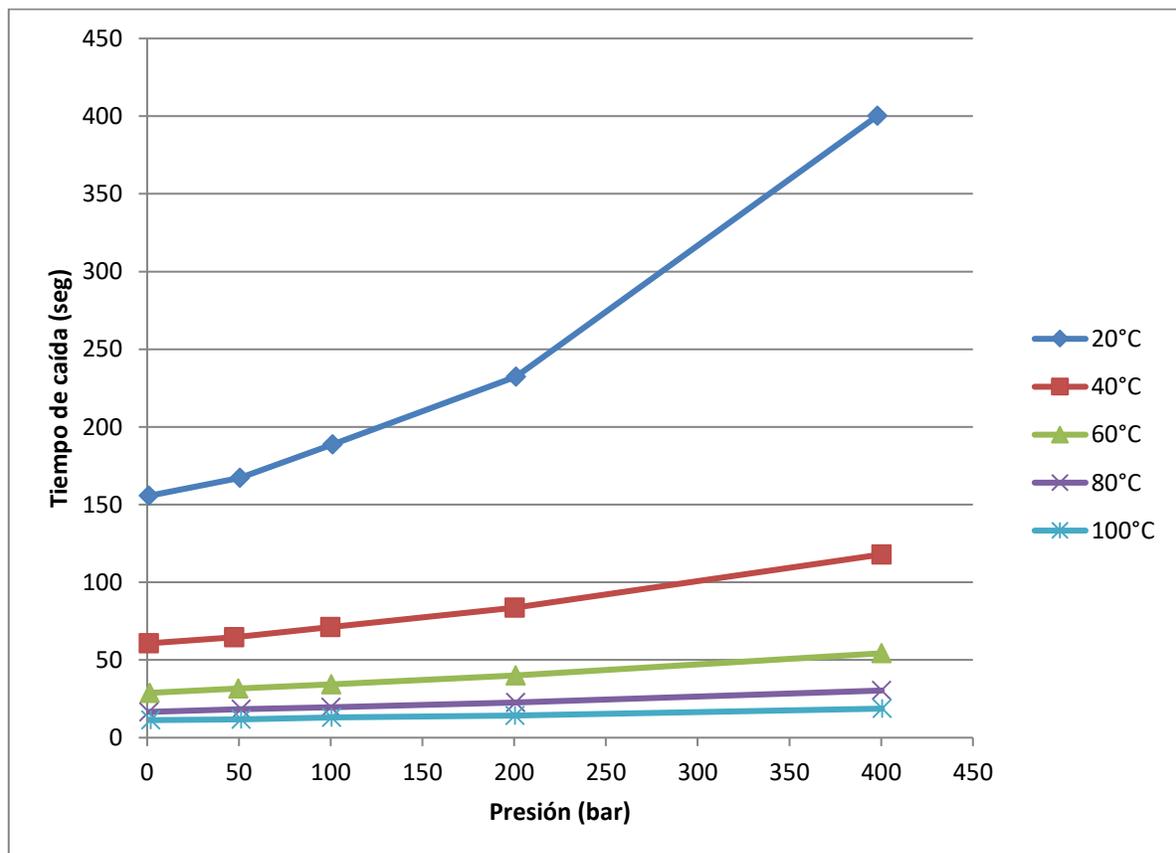


Figura 17 Gráfica de Petróleo

Aquí la figura 18 muestra una tendencia uniforme con lo cual se observa que la medición se hizo de manera correcta y que el aceite no tiene comportamientos anormales a diferentes presiones y temperaturas.

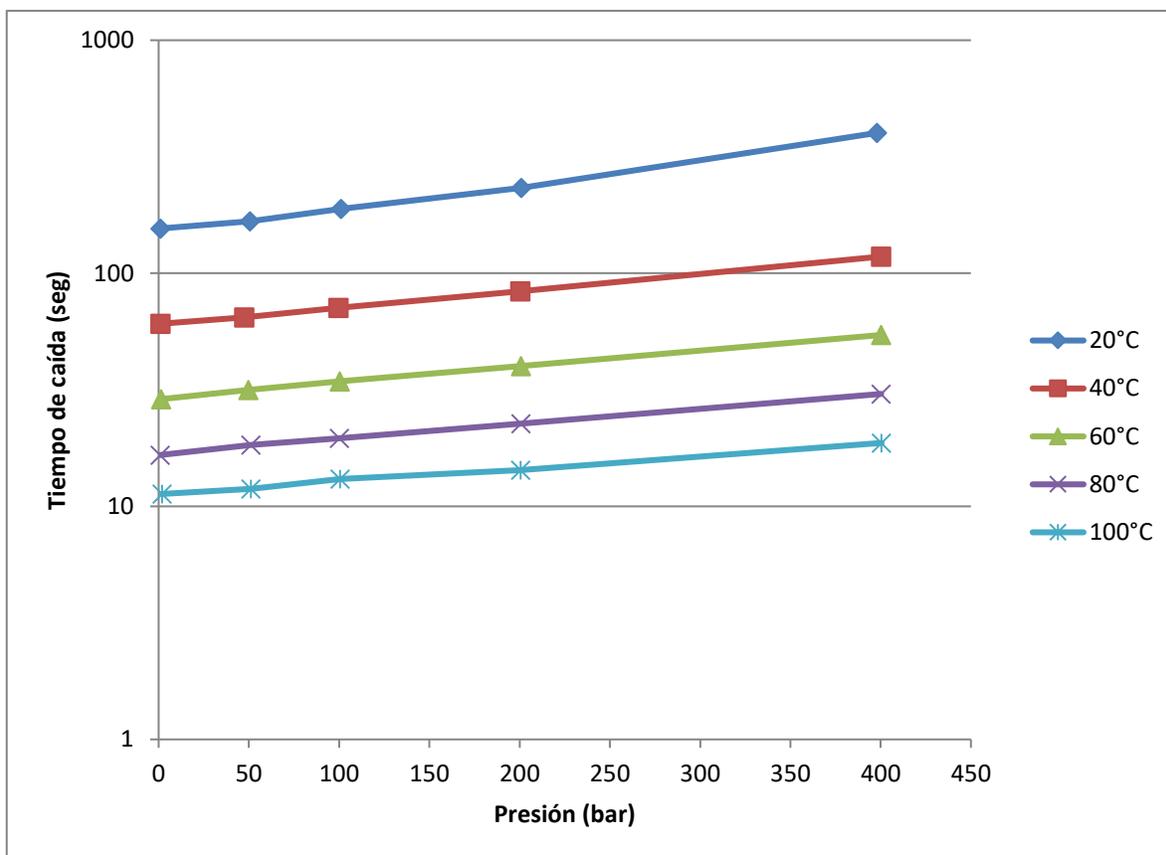
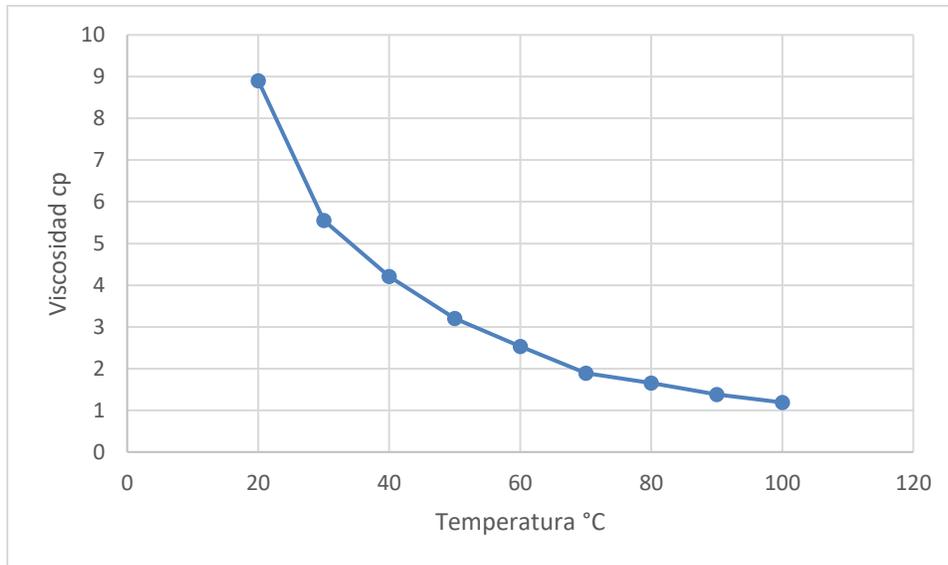


Figura 18 Gráfica logarítmica de Petróleo

Con los datos, de los tiempos de caída obtenidos con el viscosímetro y al aplicar la fórmula (4) que se mostró en el capítulo 3 para la obtención de viscosidad, se obtiene la siguiente gráfica (figura 19).



*Figura 19 Gráfica de viscosidad del petróleo medido*

La gráfica anterior corresponde a la viscosidad de una muestra de petróleo medida a la presión atmosférica (1 Bar) para las temperaturas de 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 C. Como se puede observar, la viscosidad a mayor temperatura disminuye. El comportamiento de la viscosidad en las presiones 1, 100, 200, 400 y 600 bar variaron sólo en el tiempo de caída del pistón pero la tendencia de la viscosidad es la misma, decreciente a mayor temperatura.

## 5.2 Mezcla de petróleos

Para la primera mezcla se utilizó un pistón con las siguientes características.

<b>Settings (ángulo-pistón)</b>						
Pistón No.	Diámetro (mm)	Largo (mm)	Peso (g)	Densidad (g/cc)	Ángulo de medición	Mediciones para las que se utilizó
1	8.5	20	5.0034	4.4086	65°	20, 40,60, 80 y 100 C

La gráfica de presión vs tiempo de caída quedó de la siguiente forma (figura 20).

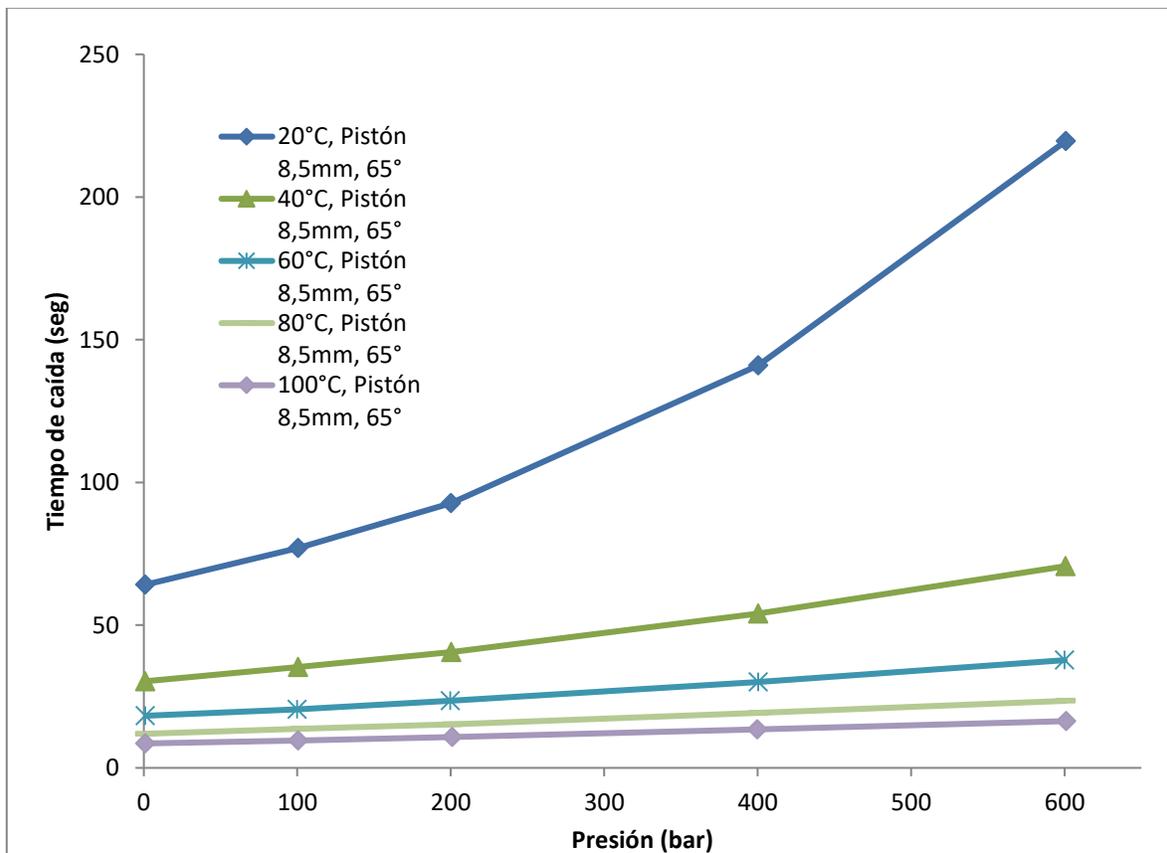


Figura 20 Gráfica de la primera mezcla de petróleos

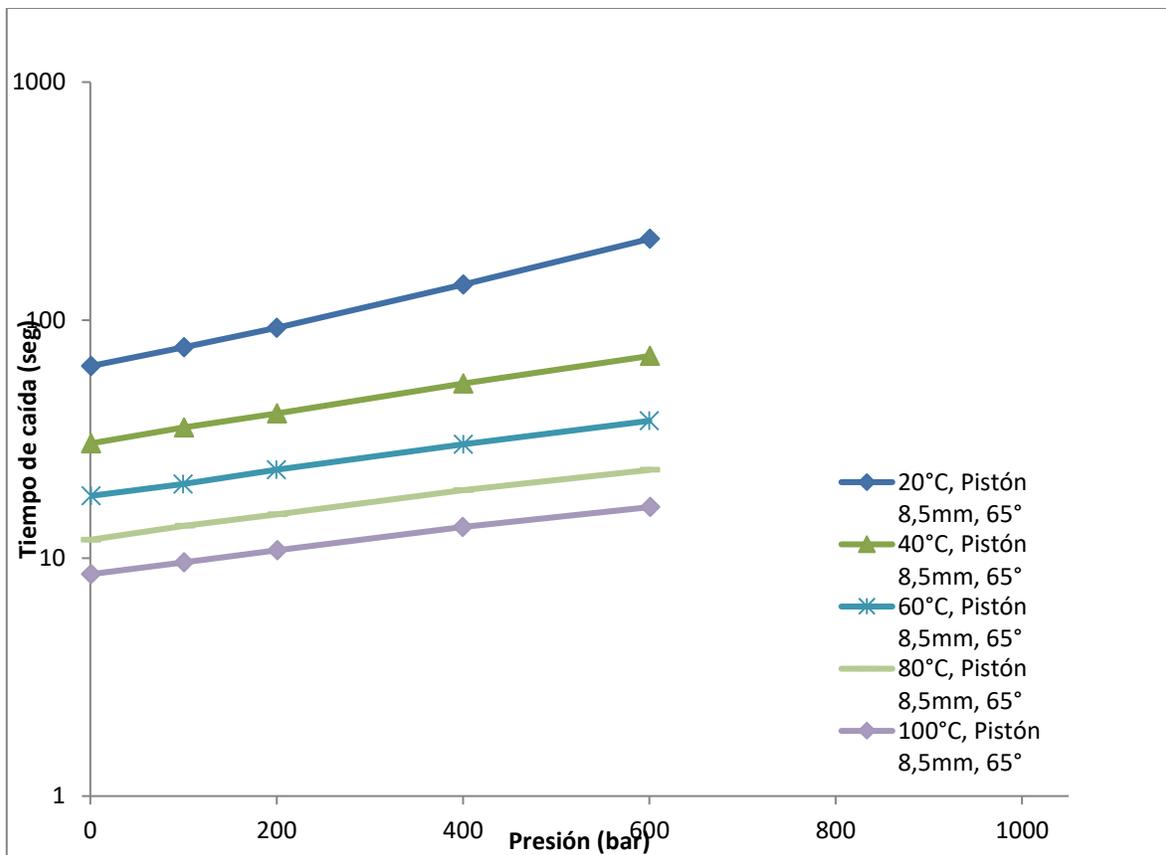
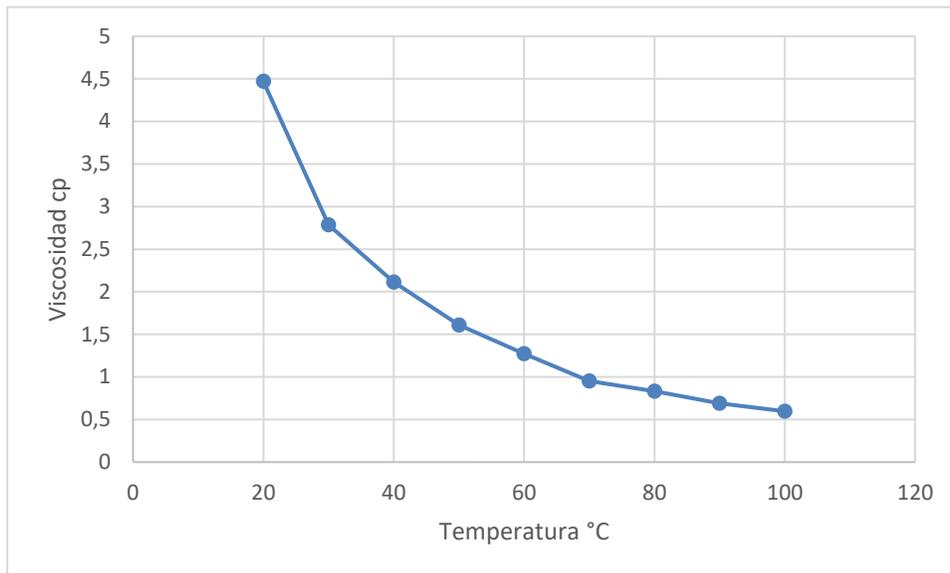


Figura 21 Gráfica logarítmica de la primera mezcla de petróleos

Para la primera mezcla de petróleo se obtuvo la siguiente grafica de viscosidad (figura 22).



*Figura 22 Gráfica de viscosidad de la mezcla 1*

En la gráfica de viscosidad de la mezcla 1 se observa una tendencia similar a la del petróleo, a mayor temperatura la viscosidad tiende a disminuir.

### 5.3 Segunda mezcla

Para la segunda mezcla se utilizó un pistón con las siguientes características.

#### **Settings (ángulo-pistón)**

Pistón No.	Diámetro (mm)	Largo (mm)	Peso (g)	Densidad (g/cc)	Ángulo de medición	Mediciones para las que se utilizó
1	8.5	20	4.989	4.3783	45°	20, 40, 60, 80 y 100°C

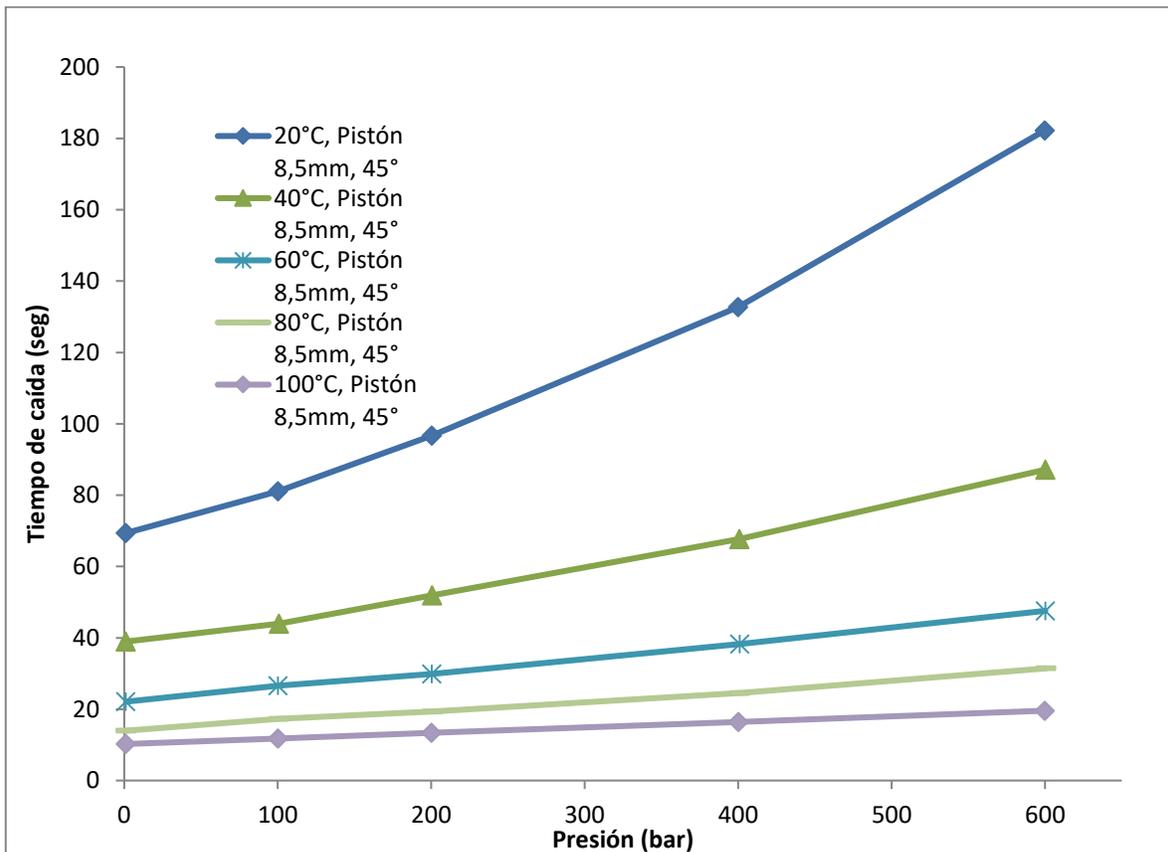


Figura 23 Gráfica de la segunda mezcla de petróleos

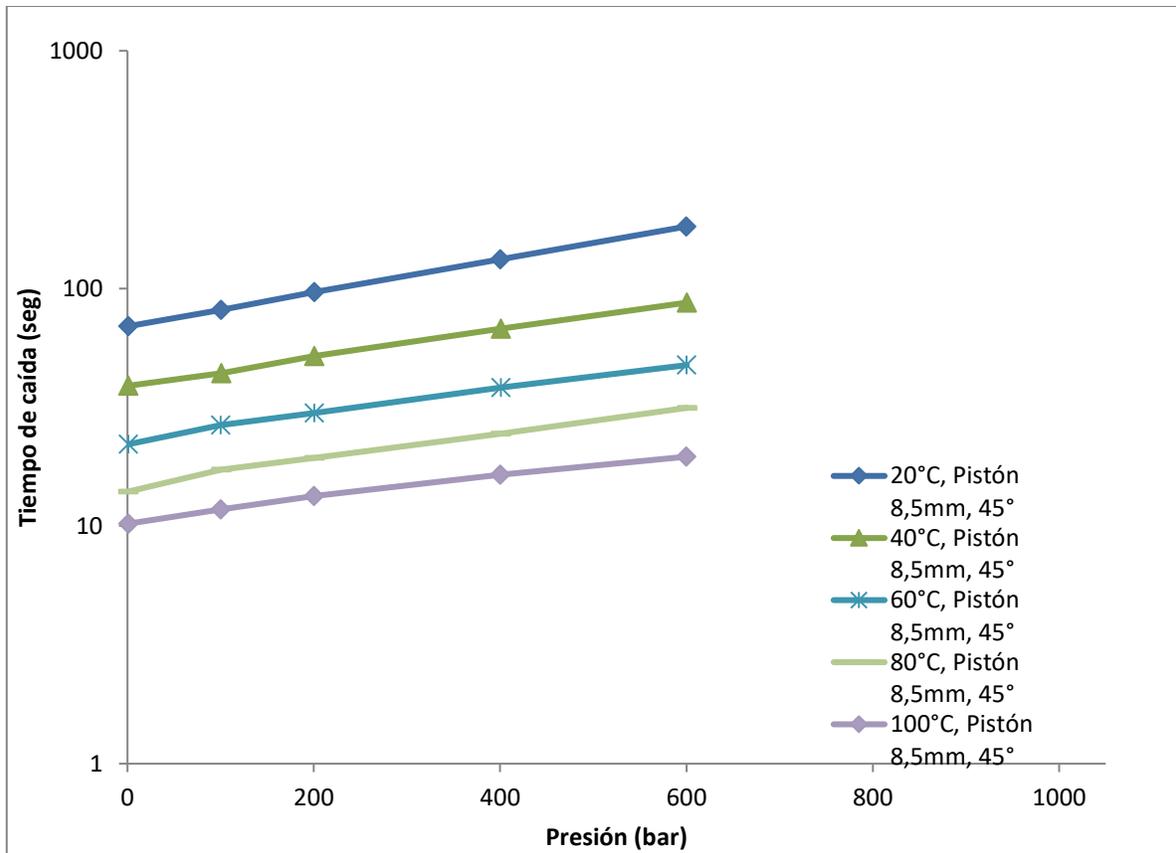


Figura 24 Gráfica logarítmica de la segunda mezcla de petróleos

La gráfica de viscosidad de la mezcla 2 muestra la misma tendencia que se observa en las dos gráficas de viscosidad anteriores (figura 25).

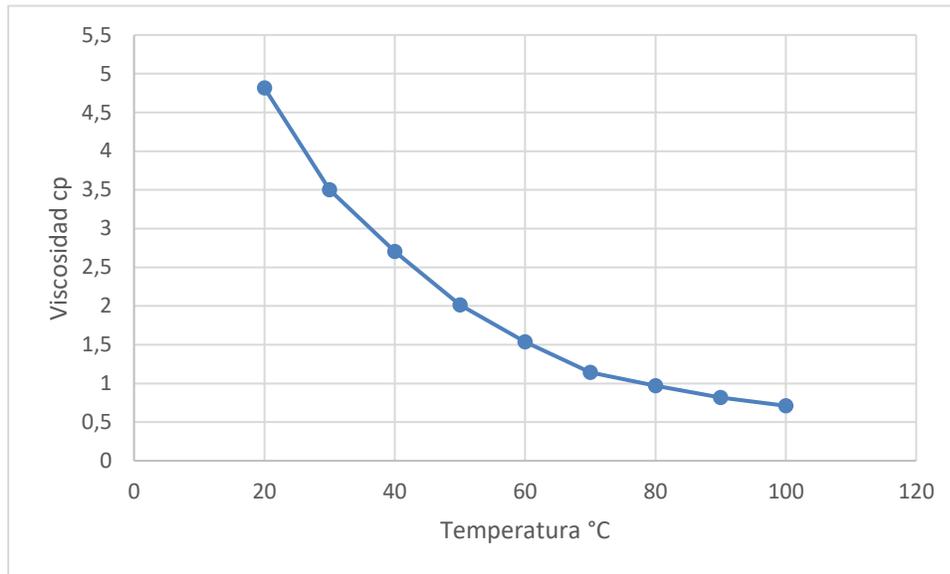


Figura 25 Gráfica de viscosidad de la mezcla 2

#### 5.4 Análisis de resultados

Al terminar cada medición se aplicó una prueba de linealidad de viscosidad, tomada con otro viscosímetro, contra el tiempo de caída medido con el viscosímetro de caída de cuerpo, con la cual se obtuvieron gráficas con gran similitud a las generadas con los datos del viscosímetro de caída de cuerpo; con esto se validó el correcto funcionamiento del viscosímetro y la calidad de los datos obtenidos. Las gráficas logarítmicas, de presión contra tiempo de caída, permitieron ver de manera más precisa los cambios durante cada medición y al observar tendencias anormales se repetía la medición para mejorar la calidad de los datos. En las gráficas de viscosidad de todas las muestras se observa una tendencia similar, a mayor temperatura la viscosidad disminuye, esto es porque la velocidad de las moléculas se incrementa; ocasionando una disminución en la fuerza de cohesión entre las mismas dando como resultado una reducción en la resistencia al movimiento. Al ser validados todos los datos de tiempo de caída, con la viscosidad obtenida con otro viscosímetro, se dieron por terminadas todas las mediciones.

## 6 Metas alcanzadas

Se planteó una fecha límite para terminar y entregar las mediciones de viscosidad de las 50 mezclas de petróleo, de las cuales 17 se midieron con el viscosímetro de caída de cuerpo, se hizo un gran esfuerzo en conseguir insumos requeridos por el equipo y por concluir con todas las mediciones que me fueron asignadas, al final se concluyó con éxito todo el trabajo técnico.

Al ser las mediciones totalmente manuales éstas tomaban diferente tiempo para realizarlas. Se logró mediante una modificación en la posición del sensor de presión del viscosímetro, eficientar las mediciones reduciendo las descalibraciones de los láseres en un 90% y con ello agilizar las mediciones pasando de un tiempo promedio de medición de 10 a 15 días en aceites pesados a 7 o 9 días de medición. Para aceites medianos y ligeros se logró disminuir los tiempos de 7 días de medición a 5 sólo días.

Con el tiempo encima y con muchas mediciones aún por realizar fue fundamental la coordinación y trabajo en equipo para lograr entregar a tiempo los resultados. La meta se alcanzó, en parte, gracias a un excelente trabajo en equipo.

### 6.1 Laboratorio de mediciones equipado

Gracias al esfuerzo y compromiso de todo el equipo de trabajo del LIFTP la parte técnica del proyecto se entregó al final de la estancia del autor en el laboratorio, contándose además con todas las refacciones que el viscosímetro requiere para seguir operando.

En general, todo el laboratorio quedó equipado con excelentes equipos de medición como lo son:

#### 6.1.1 Laboratorio de baja presión

##### **Viscosímetro Stabinger SVM 3000 marca Anton Paar**

Mide con alta precisión la viscosidad dinámica (desde 0.2 hasta 20,000mPa.s) y densidad (desde 0.65 hasta 3 g/cm<sup>3</sup>) de acuerdo con la norma ASTM D7042. El intervalo de temperatura de operación es de 15 a 105 C. Además ayuda a determinar la gravedad API (o grados API), la cual es útil en la caracterización de aceites crudos.

##### **Reómetro ARES-G2 de TA Instruments**

Permite hacer la caracterización reológica de diferentes fluidos en un intervalo de operación de velocidad de corte desde  $1 \times 10^{-5}$  hasta 3000 s<sup>-1</sup> y en lo que respecta a la temperatura puede operar en un intervalo de -10 a 150 C. Para este equipo se cuenta con una amplia gama de geometrías que permiten determinar de forma precisa la viscosidad desde cerca de 1mPa s hasta más de 1000 Pa s.

### **Reómetro Discovery HR-3 de TA Instruments**

Para este equipo también se cuenta con una variedad de geometrías, pero en especial tiene una celda que permite la caracterización reológica de fluidos a alta presión (hasta 2000 psi).

## 6.1.2 Determinación del peso molecular

### **Crioscopio Cryette A**

Se usa para determinar pesos moleculares, concentración de solución y punto de congelamiento. Precisión de 0.001 C en punto de congelamiento y 1% en concentración y peso molecular.

### **Osmómetro K-7000 marca KNAUER**

Se usa para determinar pesos moleculares por osmolalidad.

Este equipo se recomienda para la determinación de masas moleculares de fluidos extra pesados – arriba de 300 g/mol.

## 6.1.3 Microscopía

### **Microscopio Axio Scope. A1 marca ZEISS**

Este equipo se utiliza para la captura de imágenes de emulsiones a fin de realizar su determinación morfológica.

## 6.1.4 Laboratorio de alta presión

### **Densímetro DMA HPM marca Anton Paar**

Permite medir con alta precisión la densidad en un rango de 0.1 a 3 g/cm<sup>3</sup> , temperatura de -10 a 200 C y presión de hasta 1,400bar.

### **Viscosímetro RVB 1000 marca Vinci**

Viscosímetro de caída de cuerpo que permite medir viscosidades con buena precisión en un rango de 1 a 50,000cP, temperatura ambiente a 195 C y presión hasta 1,000bar.

### **Celda PVT Fluid-EVAL**

Utilizada en la medición de comportamiento de fase PVT y propiedades termodinámicas de petróleo desde gas condensado hasta pesados.

### **Viscosímetro capilar LIFTP**

Aditamento a la celda Fluid-EVAL de Vinci Technologies de diseño propio del LIFTP.

### **Tensiómetro Interfacial IFT 700 marca Vinci**

El aparato permite la determinación a condiciones de yacimiento de:

- 1) la tensión interfacial entre interfaces de gas-líquido y líquido-líquido, por el método de gota pendiente y
- 2) el ángulo de contacto entre interfaces líquidas y sólidas utilizando método de la gota sésil. Su rango de operación es hasta 700 bar y 180 C.

## 6.1.5 Cromatografía

### **Cromatógrafo de gases de Thermo Scientific modelo TRACE 1310**

Mediante el uso de diferentes columnas y válvulas para re- direccionamiento de flujos puede reconfigurarse el equipo para destilación simulada permitiendo determinar hasta la fracción C<sub>90</sub> o análisis como los descritos en las normas ASTM-D3710, D5307, D6352 y D7169. El cromatógrafo está equipado con la base de datos para reconocimiento de compuestos "Carburant", lo que permite una caracterización detallada de fracciones de petróleo hasta la C<sub>20</sub> y precisión global hasta la C<sub>30</sub>. Esta es una de las metodologías más avanzadas en caracterización composicional de fracciones de petróleo pesado, lo que es de extrema importancia para fluidos mexicanos.

### **Fuente: LIFTP**

Por otra parte, el laboratorio, también se quedó equipado en cuanto a seguridad del personal, mascarillas, batas, gafas, guantes, etc. Todos los ingenieros que laboraron en el LIFTP utilizaron y dejaron equipos funcionales y con refacciones necesarias para seguir con mediciones o realizar experimentos.

## 7 Evaluaciones Internacionales

El trabajo realizado por el equipo de especialistas, liderado por el Dr. Sergio Quiñones Cisneros, del LIFTP fue evaluado por un grupo de expertos internacionales a los cuales se les presentó un avance del proyecto, terminado en un 98%, estos dieron opiniones, recomendaciones y felicitaciones por el gran trabajo realizado, poniendo énfasis en la importancia del proyecto para México.

## 8 Conclusiones

El trabajar en el Instituto de Investigaciones en Materiales en el Laboratorio de Investigación en Flujo y Tecnología del Petróleo me permitió:

- Obtener experiencia técnica en cuanto a la medición de propiedades de los hidrocarburos mediante el uso de un viscosímetro de caída de cuerpo.
- Participar en un proyecto nunca antes visto en México y, de manera satisfactoria, cumplir con las metas que me fueron asignadas.
- Poner a prueba mi formación ingenieril resolviendo cualquier tipo de problema que se me presentara.
- Ayudar a mi equipo de trabajo aportando ideas para la solución de problemas.
- Trabajar en un entorno profesional y científico en un grupo donde todos apoyaban y aportaban soluciones a todo tipo de problemas, desde los más comunes hasta problemas que significaban entregar o no a tiempo el proyecto.
- Trabajar en un excelente equipo multidisciplinario donde pude ver el gran potencial que tienen los investigadores y egresados de la UNAM para la investigación y desarrollo de nuevas técnicas para el estudio del comportamiento de fluidos.

En la opinión del autor de este escrito, el LIFTP tiene un gran futuro y si se le da la importancia que merece a un laboratorio de fluidos petroleros que da resultados, en un país petrolero, creo que a largo plazo se seguirán generando grandes beneficios a favor del país tanto económicos como científicos y profesionales.

Y si se desarrollan más laboratorios como el LIFTP, la UNAM generaría egresados con experiencia profesional, criterio científico, el gusto de haber trabajado en la Universidad Nacional Autónoma de México y la gran satisfacción de retribuir un poco de lo mucho que México nos ha dado.

## 9 Referencias

- Evaluación de las Reservas de Hidrocarburos*, 2016. México, CDMX: PEMEX
- Torres Papaqui J.P. (2010). *Definición de los fluidos*. México, Guanajuato.: División de ciencias naturales y exactas, campus Guanajuato.
- Roberto A. Castro (1985). *Apuntes de Mecánica de Fluidos*. México, D.F.: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Hoja de seguridad XVII, TOLUENO*. 2008. México, CDMX: Facultad de Química, UNAM
- Herramientas y equipos PVT*, Vinci Technologies. 2012. Recuperado de <http://www.vinci-technologies.com>
- Términos usados en la industria petrolera*, 2009, Base de datos institucional, PEMEX, México, CDMX. Recuperado de <http://www.ri.pemex.com/files/>
- Méndez L. (2014). *Ley de Newton de la viscosidad*.
- Pasinato Hugo D. (2008). *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. Buenos Aires. Argentina: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional.
- Castillo Christian., (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* (Tesis de pregrado). UNAM, México, CDMX.
- García Quesada J., (2008). *Técnicas reométricas*. Recuperado de <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/3626>
- Instituto de Investigaciones en Materiales. (2017). Recuperado de <http://www.iim.unam.mx/index.php/acerca-del-iim/>
- Oilfield Glossary, 2017. Recuperado de: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es.aspx>

## 10 Anexos

### Fluido de calibración AV 10000

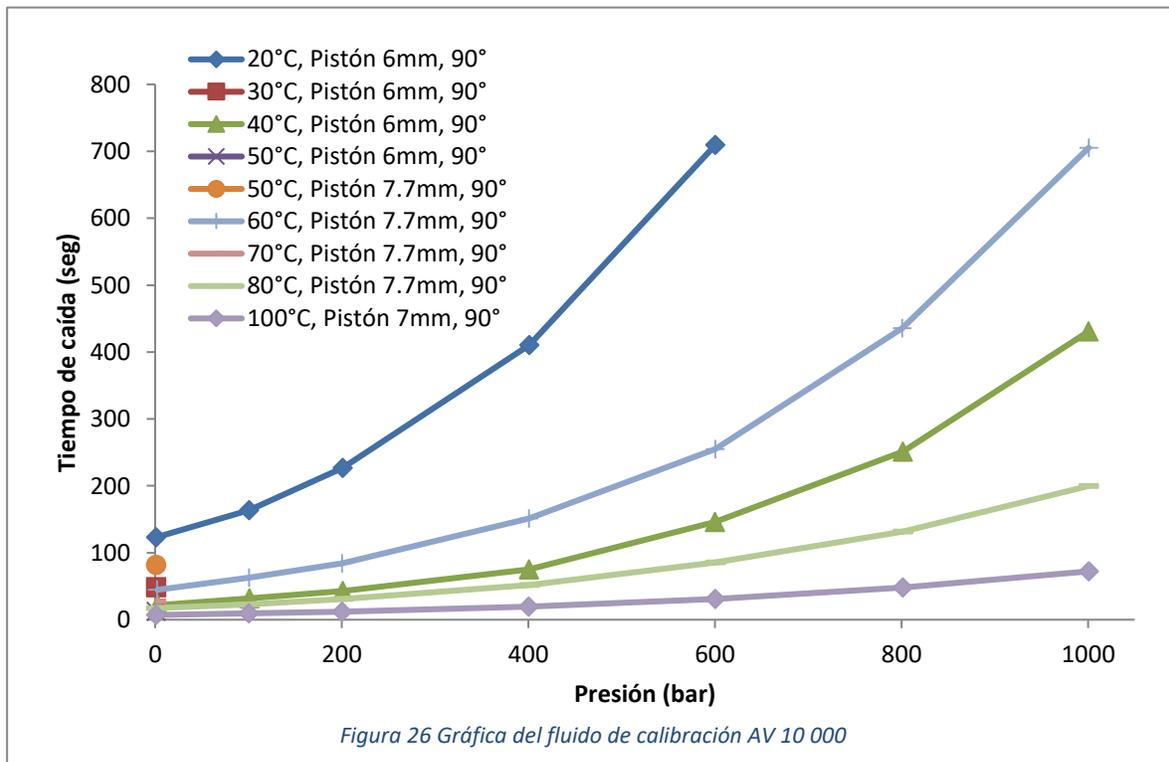
Los datos de la siguiente tabla son valores de los pistones usados en la medición del fluido de calibración.

#### Condiciones (ángulo-pistón)

Pistón No.	Diámetro (mm)	Largo (mm)	Peso (g)	Densidad (g/cc)	Ángulo de medición	Mediciones para las que se utilizó
1	6	20	4.951	8.7552	90°	20, 30, 40, 50 y 60 C
2	7.7	20	7.404	7.9499	90°	50, 60, 70, 80, 90 y 100 C

En caso de requerir un cambio de pistón para concluir con las mediciones, se deberán anotar los datos de todos los pistones utilizados en la medición como se muestra en la tabla anterior.

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas con el viscosímetro de caída de cuerpo de la marca Vinci Technologies, la tendencia exponencial de cada medición muestra que a mayor presión a la que esté sometido el pistón mayor el tiempo de caída y por lo tanto mayor la viscosidad del aceite a esas condiciones de presión y temperatura



En la gráfica siguiente (figura 27) se observan las rectas de las mediciones, aunque hubo un cambio de pistón a los 50 C, la tendencia es la misma.

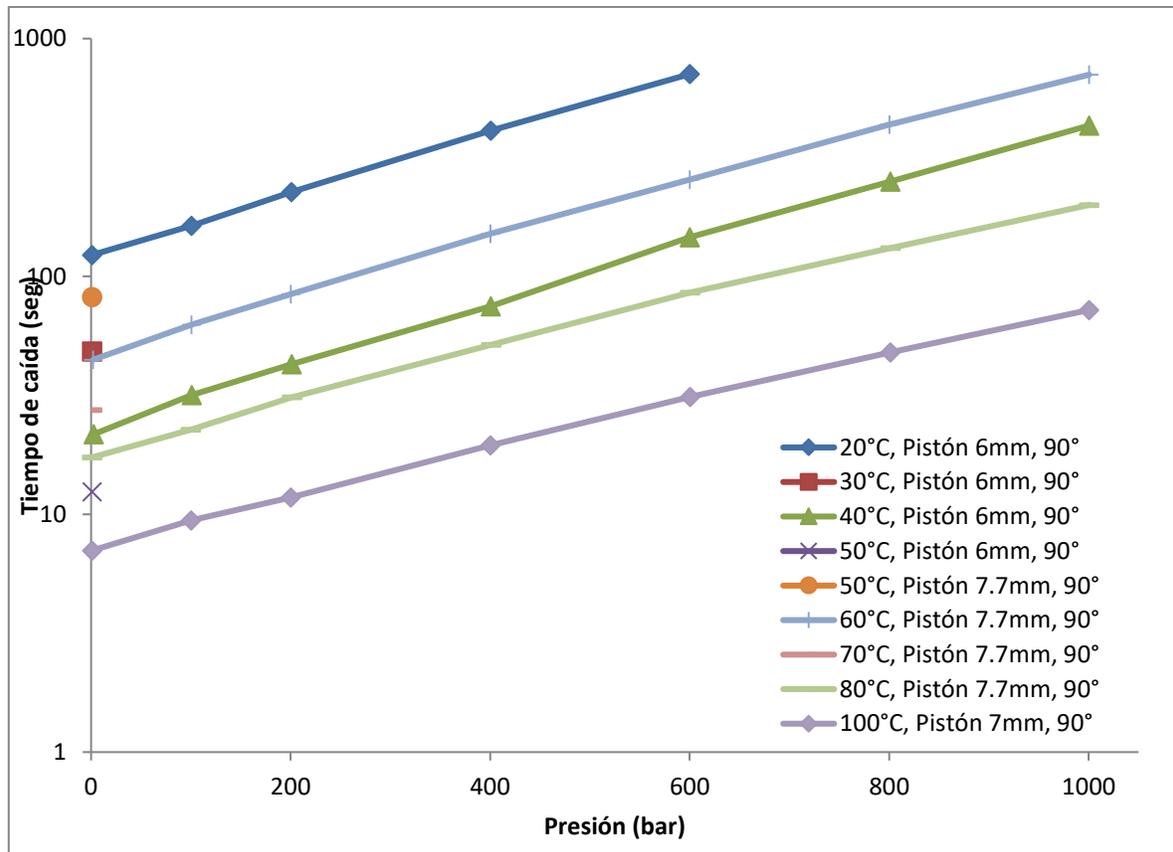


Figura 27 Gráfica logarítmica del fluido de calibración AV 10 000

Cuando, por alguna razón, se cambia un pistón durante una medición, para que los resultados sean útiles, se deben medir por lo menos 4 temperaturas con un mismo pistón antes de ser cambiado, pues, los resultados se comparan con las mediciones de viscosidad del mismo fluido medido con otro viscosímetro.

En este caso, se usó un pistón de 6mm de 20 C hasta 50 C. Para mediciones a partir de 50 hasta 100 C, se cambió a un pistón de 7.7 mm, volviendo a medir de 50 C.

Los cambios de pistón se hacen cuando el pistón es muy pesado y cae demasiado rápido, (tiempo de caída menor a 4 ó 5 segundos por medición), o cuando el pistón es muy ligero y tarda demasiado en caer, (tiempo de caída de más de 20 minutos por medición).

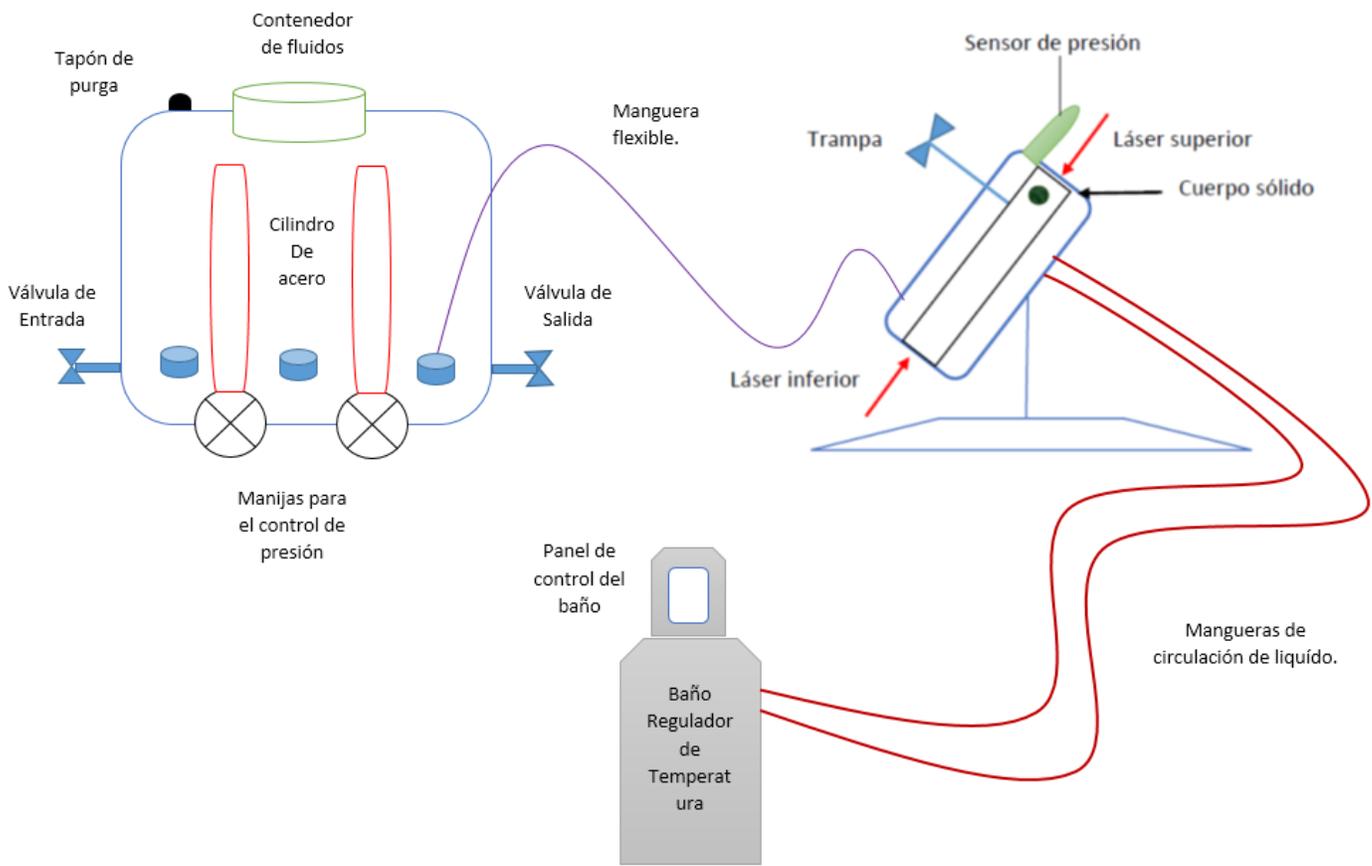


Figura 28 Diagrama completo del sistema de medición