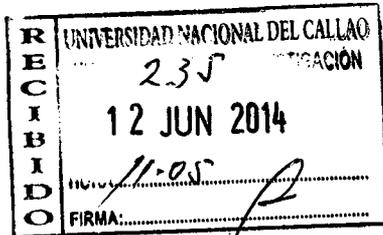


**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
VICERRECTORADO DE INVESTIGACION**



**FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA  
INSTITUTO DE INVESTIGACION DE INGENIERIA QUIMICA**

**JUL 2014**



**INFORME FINAL DE INVESTIGACION**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN VISCOSIMETRO DE  
ESCURRIMIENTO, PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES  
UNITARIAS DE LA FIQ-UNAC**

**AUTOR: ING. JORGE AMADOR LOPEZ HERRERA**

**PERIODO DE EJECUCION: 12 MESES**

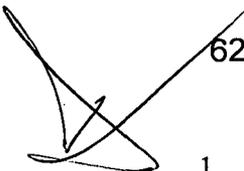
**DEL 01 DE ABRIL DEL 2013 AL 31 DE MARZO DEL 2014**

**RESOLUCION RECTORAL Nº 374-2013-R**

**CALLAO, ABRIL DEL 2014**

## INDICE

RESUMEN	06
I. INTRODUCCIÓN	07
II. MARCO TEÓRICO	09
2.1 Antecedentes del problema de investigación	10
2.2 Bases teóricas	10
2.2.1 Viscosidad de los Fluidos	10
2.2.2 Variación de la Viscosidad con la temperatura	11
2.2.3 Efecto de la presión sobre la viscosidad.	13
2.2.4 Ley de Newton de la viscosidad	14
2.2.5 Viscosidad dinámica o absoluta ( $\mu$ ).	15
2.2.6 Viscosidad cinemática ( $\nu$ ).	16
2.2.7 Factores que afectan la conducta reológica	17
2.2.8 Fluidos Newtonianos.	20
2.2.9 Fluidos No Newtonianos.	21
2.3 Tipos de Viscosímetros	23
2.4 Aceites Lubricantes.	47
2.5 Marco Conceptual	50
III. MATERIALES Y METODOS	54
3.1 Lugar de ejecución	54
3.2 Materiales Equipos y Reactivos	54
3.2.1 Materiales	54
3.2.2 Equipos	55
3.4.3 Reactivos	55
3.3 Descripción de equipos y materiales	55
3.4 Método	57
IV. RESULTADOS.	
4.1 Selección del viscosímetro más adecuado para su diseño y construcción	61
4.2 Construcción del Viscosímetro	62

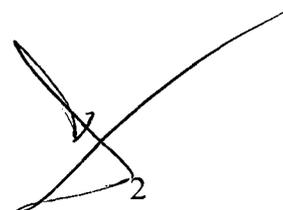


1

4.3 Demostración del funcionamiento del equipo 65

Construido

V.	DISCUSIÓN	70
VI.	REFERENCIALES	72
VII.	APENDICE	75
	ANEXOS	81

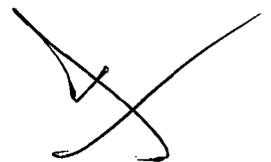
A handwritten mark consisting of a large, stylized 'X' or checkmark shape, with a small number '2' written at the bottom right end of the lower stroke.

## Índice de Figuras

Figura 01: Comportamiento de la viscosidad de líquidos	12
Figura 02: Influencia de la temperatura sobre la viscosidad en los gases	12
Figura 03: Variación de la viscosidad dinámica con la Temperatura del aire y agua	13
Figura 4. Planos paralelos de un fluido.	14
Figura 5. Curvas características de un fluido newtoniano.	21
Figura 6: Viscosímetro de Tubo Capilar	24
Figura 7: Viscosímetro de Ostwald.	26
Figura 8. Viscosímetro Ubbelohde	29
Figura 9. Viscosímetros Rotacionales.	30
Figura 10. Viscosímetro de Stormer.	31
Figura 11. Viscosímetro de cono y placa.	33
Figura 12. Viscosímetro de cilindros concéntricos.	35
Figura 13. Variación de la velocidad.	36
Figura 14. Viscosímetro Saybolt con los dos tipos de orificios.	39
Figura 15. Viscosímetro Engler.	43
Figura 16: Viscosímetro de caída de bola	46
Figura 17. Viscosidad dinámica de diferentes aceites SAE a diferentes temperaturas. Aceites multigrados.	53
Figuro 18: Medidas del recipiente	53
Figura 19: Soldadura tig	55
Figura 20: Rladora de laminas	56
Figura 21: Plancha de acero inoxidable	56
Figura 22: Ensamblaje de recipiente concéntrico	62
Figura 23: Instalación de resistencia eléctrica de 500 watts	63
Figura 24: Instalación de aislamiento térmico de lana mineral	63
Figura 25: Instalación de sistema eléctrico	64
Figura 26: Equipo construido	69

## Índice de Tablas

Tabla N° 01: Unidades de Viscosidad Dinámica	15
Tabla N° 02: Unidades de Viscosidad Cinemática. Temperatura siendo independientes del tiempo.	16
Tabla N° 03: Ecuaciones Empíricas para Fluidos No Newtonianos	18
Tabla N° 04: Constantes A y B.	41
Tabla N° 05. Grado de viscosidad SAE de aceites para motor.	61
Tabla N° 06: Relacion entre grado Engler y SAE	65
Tabla N° 07: Tiempo de Escurrimiento	67
Tabla N° 08: determinacion de °E	67
Tabla N° 09: determinacion de viscosidad cinematica	68
Tabla N° 10: Viscosidad absoluta	68



## ABSTRACT

This paper aims to design and build a drainage viscometer that is suitable for experimentation at laboratory and allow the practice of viscosity with a comfortable and versatile equipment easy to handle . The study of selection took place in the laboratory unit Operations of the FIQ - UNAC chose the material is stainless steel 304 -2B , which allows the cleaning thereof including strong acids or alkalis , the heating system had to be increased to 5 cm from the allowing existing liquid in a uniform heating study .

After construction Engler viscometer , was proceeded to the evaluation of the same , realizing practical lubricating oil viscosity and temperature changes obtained with viscosities between 0.47 to 0.17 cp to 55 to 85 ° C corresponding to the computer constructed .

The objective of building the Engler viscometer which will be of use in the laboratory Operations and Processes Unitarian FIQ - UNAC was achieved

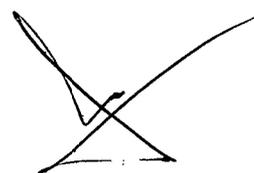


## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo **diseñar** y **construir** un viscosímetro de escurrimiento que sea el adecuado para la experimentación a nivel de laboratorio y permita la práctica de **viscosidad** en el LOPU .El estudio de la selección tuvo lugar en el laboratorio de operaciones unitarias de la FIQ-UNAC, El material que se eligió es de acero inoxidable 304-2B, lo cual permite la limpieza del mismo incluyendo con ácidos o álcalis fuertes, el sistema de calentamiento se tuvo que incrementar a 5 cm respecto a los ya existentes lo cual permite un calentamiento uniforme al líquido en estudio.

Luego de la **construcción** del viscosímetro de Engler, se procedió a la **evaluación** del mismo, realizando prácticas de viscosidad para aceite lubricante y con cambios de temperatura obteniéndose viscosidades entre 0,47 a 0,17 cp para 55 a 85 °C que corresponde al equipo construido.

Se logró el objetivo de la construcción del viscosímetro Engler el cual será de uso en el laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la FIQ-UNAC



## I. INTRODUCCIÓN

Como formador de futuros profesionales en el campo de la ingeniería y deseoso de contribuir que la práctica refuerce la teoría impartida he realizado el presente trabajo pues estoy convencido que la teoría debe ir en paralelo con la práctica es por ello que he diseñado que nuestros alumnos de la FIQ-UNAC tengan mayor acceso a equipos propios, desarrollo esta investigación para diseñar y construir un equipo utilizado para conocer las propiedades de los fluidos en este caso la viscosidad.

El laboratorio de operaciones unitarias de la facultad de ingeniería química la universidad del callao presenta un requerimiento de un equipo que permita la realización de investigación y practica en cualquier momento, pero solo tiene acceso a un préstamo de otra facultad, el presente trabajo de investigación permite desarrollar el diseño y construcción de un viscosímetro que pueda utilizarse en nuestra facultad, pues la importancia del comportamiento de los líquidos desde punto de vista de la viscosidad ,influye tanto en la presentación y caracterización de un producto que se expende al mercado.

Concluyo que el propósito de este trabajo es poner en práctica los conocimientos de diseño, creatividad , conocimiento de materiales y desarrollo de la construcción de un equipo útil para el estudio de una propiedad física como la determinación de la viscosidad de los líquidos.

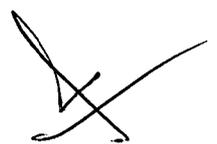


7

Recomiendo que el viscosímetro seleccionado fue el de Engler pues reúne las condiciones, tanto para realizar prácticas de laboratorio como en el aspecto de diseño y construcción.

Como nuestra facultad no cuenta con este equipo propio, se tiene la necesidad de construir un equipo que permita la realización de prácticas e investigaciones que sirvan como soporte a la teoría impartida en los cursos regulares, en el laboratorio de Operaciones Unitarias de nuestra Facultad se viene impartiendo prácticas de laboratorio de Ingeniería Química I y laboratorio de Ingeniería Química II, en donde encontramos en el primer curso mencionado el estudio de los fluidos y sus propiedades, una de estas prácticas es la Viscosidad, que nos permite conocer mejor el comportamiento de los fluidos en especial de los líquidos.

El desarrollo de la mencionada práctica se viene realizando con un viscosímetro que se encuentra en otra facultad (Ingeniería Eléctrica), el cual es prestado por periodos cortos en cada ciclo, no permitiendo la estancia en nuestra facultad y de esa manera el uso continuo para posibles estudios de investigación.



## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes del problema de investigación

Ferrer, Urbina (2012), diseñaron y ensamblaron un sistema experimental Engler, para realizar mediciones de la viscosidad en función de la temperatura de aceites lubricantes, las temperaturas deben de estar en el rango de 10 a 170 °C y la viscosidad estará expresada en grados Engler (°E). Con estos datos se obtienen las viscosidades de lubricantes expresadas en Stokes(st).

Los temas sobre los que versan este trabajo están dispuestos de tal manera que en el primer capítulo se presenta un estudio de una de las propiedades mas importantes de los aceites como la viscosidad dentro de la cual encontramos la viscosidad dinámica y cinemática, y la manera de medir en los diferentes aparatos llamados viscosímetros , tales como : viscosímetros capilares, viscosímetros de caída de bolas, viscosímetros rotacionales, etc., cada uno con sus características propias de medición de viscosidad.

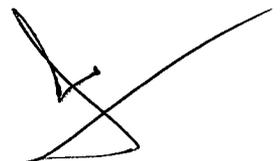
Además se presenta el principio y funcionamiento del equipo para la medición de la viscosidad de fluidos mediante el principio de variación de temperatura, que es la facilidad con que un fluido fluye a través de un orificio de diámetro pequeño, En el capítulo dos se presenta el diseño mecánico e hidráulico del equipo para la medición de la viscosidad mediante el principio de variación de temperatura de acuerdo a la norma ASTM D 1665 (American Society for Testing and Material) , para lo cual el equipo consta de dos

recipientes, entre los que se vierte agua o glicerina que constituirá el baño de calentamiento, y en el recipiente interior el líquido cuya viscosidad se desea medir; al fondo del recipiente interior encaja tubo de salida de líquido de prueba con orificio calibrado y un obturador de acero inoxidable para impedir la caída del líquido hasta que no se obtengan las condiciones del ensayo; un matraz aforado para 200 cm<sup>3</sup>. El equipo se completa con el termómetro utilizado para verificar que el sensor de temperatura este midiendo correctamente; el sistema de agitación para mantener homogéneo el fluido dentro del recipiente interior; el sistema de calentamiento para calentar el fluido; el sensor de temperatura para medir la temperatura; el sistema de control electrónico que controla todo el equipo a través de una tarjeta electrónica, y el sistema de abastecimiento para llenar la taza con el fluido de prueba. (Benavides & Rigoberto, 2008)

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Viscosidad de los Fluidos**

La viscosidad es una propiedad físico-química de los fluidos y representa la resistencia que presentan los fluidos al fluir. Los fluidos reales muestran una amplia diversificación de resistencia a los esfuerzos cortantes. (Hannibal Brito: texto básico de fenómeno de transporte i, 18)



La viscosidad es una de las propiedades más importante de un lubricante. De hecho buena parte de los sistemas de clasificación de los aceites están basados en ésta propiedad por lo tanto la viscosidad es una especificación de primer orden en los aceites lubricantes, ya que condiciona las cualidades requeridas para la lubricación. (Avallone Eugene & Baumeister Theodore: manual del ingeniero mecánico, 3-40.)

La viscosidad es una de las principales características de los combustibles líquidos que determina el método de las operaciones de llenado y vaciado, las condiciones de transporte y bombeo, la resistencia hidráulica durante el transporte por tuberías y el trabajo efectivo de los quemadores. (Zabala Gilberto: apuntes de combustión pag 19)

### **2.2.2 Variación de la Viscosidad con la temperatura.**

El aceite para un motor, por lo general es bastante difícil de vaciar cuando está frío, lo cual indica que tiene una viscosidad alta. Conforme la temperatura del aceite va aumentando, su viscosidad disminuye notablemente, como se ilustra en la figura 1. Todos los **líquidos** exhiben este comportamiento en algún grado. (<http://ich1102-2sem2007-g5.blogspot.com/>)

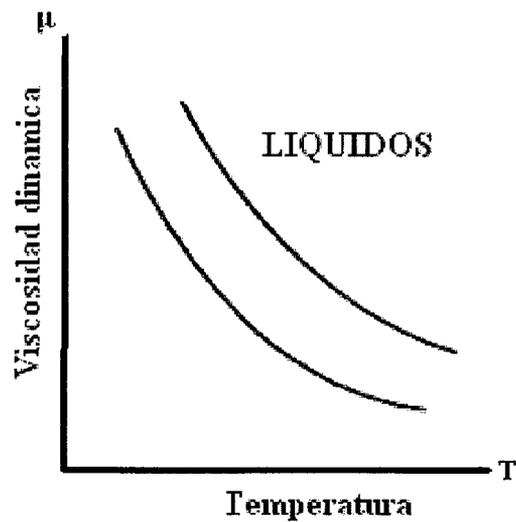


Figura 01: Comportamiento de la viscosidad de líquidos

Fuente: Mecánica de Fluidos, Mott Robert (1996).

En los **gases** se comportan de manera diferente a los líquidos, en el hecho de que la viscosidad aumenta al tiempo que aumenta la temperatura, como se observa en la figura 2.

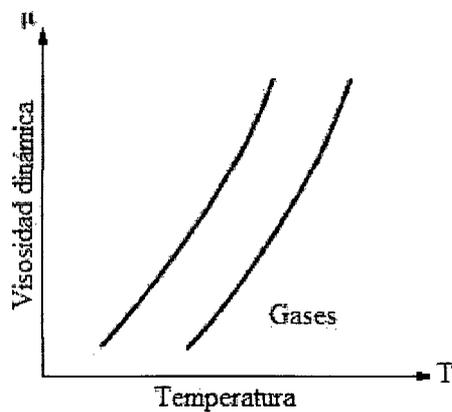


Figura 02: Influencia de la temperatura

Sobre la viscosidad en los gases

Fuente: Mecánica de Fluidos, Mott Robert (1996).

En la figura 3, se tiene la curva del agua y del aire, la cual varía su viscosidad dinámica dependiendo de la temperatura

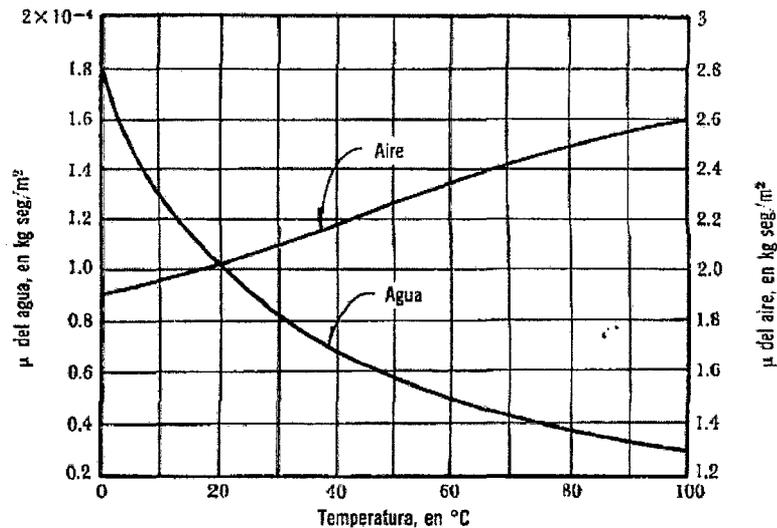


Figura 03: Variación de la viscosidad dinámica con la Temperatura del aire y agua  
Fuente: Mecánica de Fluidos, Mott Robert (1996).

### 2.2.3 Efecto de la presión sobre la viscosidad.

**Líquidos:** La viscosidad de la mayor parte de los líquidos no se ve afectada por presiones moderadas, pero a presiones altas se ha encontrado que la viscosidad crece sensiblemente. Tal es el caso, por ejemplo, de la viscosidad del agua a 10 000 atm, que es el doble del valor correspondiente a 1 atm.

**Gases:** La viscosidad de los gases es esencialmente independiente de la presión cuando está toma valores entre unos cuantos centésimos de una atmósfera y unas cuantas atmósferas (Fox Ronald & Donald Alan: Introducción a la Mecánica De Fluidos, Apéndice A, 1989)

## 2.2.4 Ley de Newton de la viscosidad

Isaac Newton definió a la viscosidad considerando el modelo representado en la figura 4. Dos placas paralelas separadas por una distancia “y”, y con el espacio entre ellas lleno de fluido, una de ellas fija y la otra móvil. La placa fija sin movimiento se encuentra en contacto con el fluido, por lo tanto tienen una velocidad igual, en cambio la placa superior se mueve a una velocidad constante “V” al actuar sobre ella una fuerza “F” también constante.

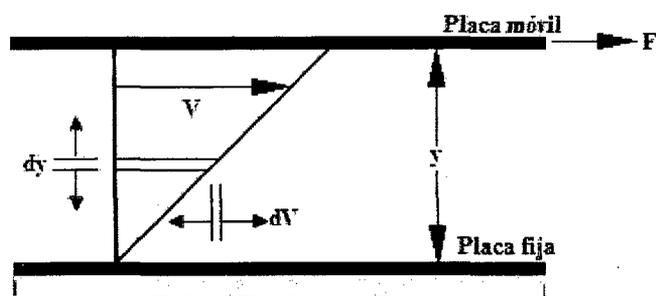


Figura 4. Planos paralelos de un fluido.

Fuente: Mecánica de Fluidos, Mott Robert (1996).

Newton asumió que la fuerza requerida para mantener está diferencia en velocidad era proporcional a la diferencia en velocidad a través del líquido, o el “gradiente de velocidad”. Para expresar esto, Newton escribió.

$$\tau = \frac{dV}{dy}$$
$$\frac{dV}{y} = \lambda$$

Se reemplaza la ecuación 2.2 en la ecuación 2.1, se obtiene la denominada ley de Newton de la viscosidad:

$$\tau = \mu * \gamma$$

Donde:

$\tau$ : Tensión o esfuerzo cortante, [Pa]

$\mu$ : Viscosidad dinámica o absoluta, [Pa.s]

$\gamma$ : Deformación del fluido o gradiente de velocidad, [s<sup>-1</sup>]

### 2.2.5 Viscosidad dinámica o absoluta ( $\mu$ ).

La viscosidad dinámica suele denotarse a través de la letra griega  $\mu$ . En la ley de Newton enunciada anteriormente (ecuación 2.3),  $\mu$  es la viscosidad absoluta o coeficiente de viscosidad dinámica, despejando este valor de dicha ecuación se tiene:

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma}$$

La viscosidad absoluta es una propiedad de los fluidos que indica la mayor o menor resistencia que éstos ofrecen al movimiento de sus partículas cuando son sometidos a un esfuerzo cortante. Algunas unidades a través de las cuales se expresa ésta propiedad se observa en la Tabla 01. Es importante resaltar que ésta propiedad depende de manera muy importante de la temperatura, disminuyendo al aumentar la misma. (Hannibal Brito: Texto Básico De Fenómeno De Transporte I, 28 – 29)

Tabla N° 1: Unidades de Viscosidad Dinámica

Sistema de Unidades	Unidades de Viscosidad dinámica
Sistema Internacional (SI)	$N.s/m, Pa.s, o Kg/(m.s)$
Sistema Británico de Unidades	$(lb.s)/pie^2 o slug/(pie.s)$
Sistema c.g.s	$poise = dina.s/cm^2 = g/(cm.s) = 0.1 Pa.s$ Centipoise= poise/100

Fuente: Mecánica de Fluidos, Mott Robert (1996).

Uno de los equipos diseñados para determinar ésta propiedad es el Viscosímetro

Stormer que se lo describe más adelante. En el Anexos B, Tabla B-1 se presentan algunas equivalencias de unidades (factores de conversión) de este tipo de viscosidad.

### 2.2.6 Viscosidad cinemática (v).

Es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido, ésta suele denotarse como v.

$$v = \frac{\text{viscosidad dinámica } \mu}{\text{densidad del fluido } \rho} = \frac{\mu}{\rho}$$

En la Tabla 02 se presentan las unidades de viscosidad cinemática en los tres sistemas utilizados con frecuencia.

Tabla N° 2: Unidades de Viscosidad Cinemática.

Sistema de unidades	Unidades de viscosidad cinemática
Sistema Internacional (SI)	m <sup>2</sup> /s
Sistema Británico de unidades	Pie <sup>2</sup> /s
Sistema c.g.s.	stoke = cm <sup>2</sup> /s = 1 X 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s Centistoke = stoke /100 = 1 X 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s

Fuente: (Mecánica de Fluidos Robert Mott).

Para evaluar numéricamente la viscosidad de un aceite, cualquiera de las muchas pruebas estándar puede ser utilizada. Aunque estas pruebas difieren una de otras en mayor o menor grado, utilizan básicamente el mismo principio. Todas ellas miden el tiempo requerido para que una cantidad específica de

aceite, a una temperatura dada, fluya por acción de la gravedad a través de un orificio normalizado. Entre más espeso sea el aceite, mayor será el tiempo para que pase.

(Avallone Eugene & Baumeister Theodore: Manual Del Ingeniero Mecánico, 3-40.)

Es importante tener un control estricto de la temperatura. La viscosidad de cualquier aceite aumenta cuando es enfriado y disminuye cuando es calentado. Por esta misma razón, el valor de la viscosidad de un aceite debe ir siempre acompañado por la temperatura a la cual fue determinado.

### **2.2.7 Factores que afectan la conducta reológica**

Los datos de la viscosidad a menudo funcionan como una “ventana” a través de la cual otras características de un material pueden ser observadas. La viscosidad es más fácilmente medible que alguna de las propiedades que la afectan, haciéndola una herramienta valuable para la caracterización del material. Se puede entonces mencionar.

(Urrutia Urrutia Fernando & Veloz Haro Neil: Tesis De Grado, 8-12.)

#### **2.2.7.1 Temperatura.**

Uno de los factores más obvios que puede tener efecto en la conducta reológica de un material es la temperatura. Algunos materiales son bastantes sensitivos a la temperatura, y relativamente una pequeña variación dará como resultado un cambio significativo en la viscosidad.

La consideración del efecto de la temperatura en la viscosidad es esencial en la evaluación de materiales que serán sometidos a variación de temperatura para su uso o procesamiento, tales como aceites de motor, grasas y lubricantes.

#### **2.2.7.2 Rango de corte o gradiente de velocidad.**

Los fluidos no newtonianos tienden a ser la regla más que la excepción en el mundo real, haciendo una apreciación de los efectos del gradiente de velocidad como una necesidad que compromete la aplicación práctica de los datos reológicos.

Sería desastroso, por ejemplo, tratar de bombear un fluido dilatante a través de un sistema en el que solo debe ir sólido dentro de la bomba, llevando al proceso a una brusca parada. Mientras éste es un ejemplo extremo, la importancia de los rangos de corte o gradiente de velocidad no deben ser desestimados.

Cuando un material es sometido a una variedad de rangos de corte en el procesamiento o en el uso, es esencial saber su viscosidad a los rangos de corte proyectados.

Como ejemplos de materiales que son sometidos y afectados por variaciones amplias en el rango de corte durante el proceso y uso son: pinturas, cosméticos, revestimientos y la sangre en el sistema circulatorio humano.

### **2.2.7.3 Tiempo.**

El tiempo transcurrido bajo condiciones de corte obviamente afecta a algunos tipos de materiales que son dependientes del tiempo. Pero pueden ocurrir cambios en la viscosidad sobre el tiempo aunque el material no esté siendo cortado.

### **2.2.7.4 Condiciones de medida.**

Las condiciones de medida de un material durante la medida de su viscosidad puede tener un efecto en los resultados de tal medida. Es por lo tanto importante conocer y controlar como sea posible, el medio ambiente de alguna muestra que se vaya a ensayar.

PRIMERO: Las técnicas de la medida de la viscosidad deben estar adheridas a variables tales como: el modelo del aparato que va a efectuar tal medición (viscosímetro). Tamaño del recipiente de la muestra, técnica de preparación de la muestra. Todas éstas, afectan no solo en la precisión de las medidas, sino la viscosidad actual del material que se está midiendo.

SEGUNDO: Otros factores menos obvios que pueden afectar la viscosidad deben ser considerados. Por ejemplo el material de muestra puede ser sensitivo a la atmósfera ambiental, como es el caso de los materiales de impresión dental, el alto horno, la sangre, otros.

Entonces se puede expresar que una atmósfera controlada favorable a los objetivos del ensayo, debe ser proveída.

Otro factor que puede afectar la medida de la viscosidad es la homogeneidad de la muestra. Usualmente es deseable tener una muestra homogénea de modo que los resultados obtenidos sean más resistentes.

#### **2.2.7.5 Composición y aditivos.**

La composición de un material es determinante en su viscosidad. Cuando esta composición es alterada, sino por el cambio en las proporciones de las sustancias del componente, o por la adición de otros materiales, un cambio en la viscosidad es bastante aparente. Por ejemplo, la adición de solvente a la tinta de imprenta reduce la viscosidad de la tinta; y además muchos aditivos son utilizados para controlar las propiedades reológicas de pinturas.

#### **2.2.8 Fluidos Newtonianos.**

Los fluidos newtonianos son aquellos cuya viscosidad es constante, o dicho de otra forma, son aquellos cuyo esfuerzo cortante es directamente proporcional al gradiente de velocidad. Un fluido newtoniano se representa en la figura 5. En la figura 5A se demuestra la relación entre el esfuerzo de corte ( $\tau$ ) y el gradiente de velocidad ( $\gamma$ ) es una línea recta. La figura 5B demuestra que la viscosidad dinámica del fluido permanece constante mientras que el gradiente de velocidad ( $\gamma = dV/dy$ ) varía. Los fluidos newtonianos siguen la ley de Newton, la viscosidad sólo depende de la temperatura siendo independientes del tiempo.

([http://www.tesisenxarxa.net/TESIS\\_UPC/AVAILABLE/TDX-0725105-155028//06Mtbp06de29.pdf](http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0725105-155028//06Mtbp06de29.pdf))

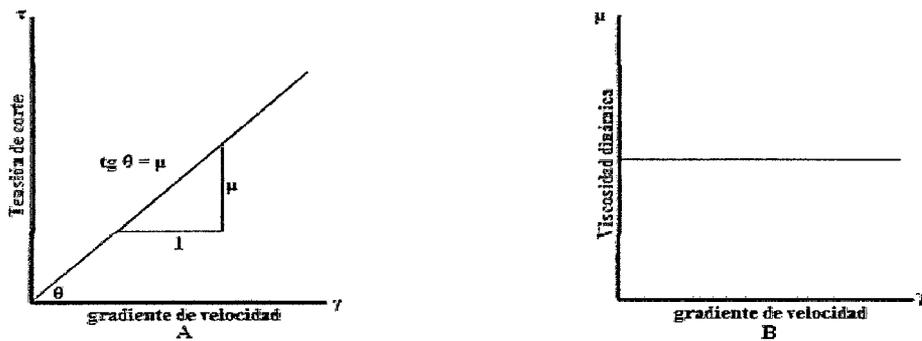


Figura 5 Curvas características de un fluido newtoniano.  
Fuente: Mecánica de Fluidos, Mott Robert (1996).

### 2.2.9 Fluidos No Newtonianos.

Son aquellos fluidos que no cumplen la ley de Newton de la viscosidad, por lo tanto, la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación deja de ser lineal.

Un gran número de ecuaciones empíricas se han propuestos para modelar las relaciones observadas entre  $\tau$  y  $dV/dy$  ( $\gamma$ ) para fluidos no newtonianos. Pueden representarse de manera adecuada para muchas aplicaciones de ingeniería mediante un modelo (ecuaciones empíricas); a continuación en la Tabla III se detallan estos modelos.

(Shames Irving: Mecánica De Fluidos, 15-16)

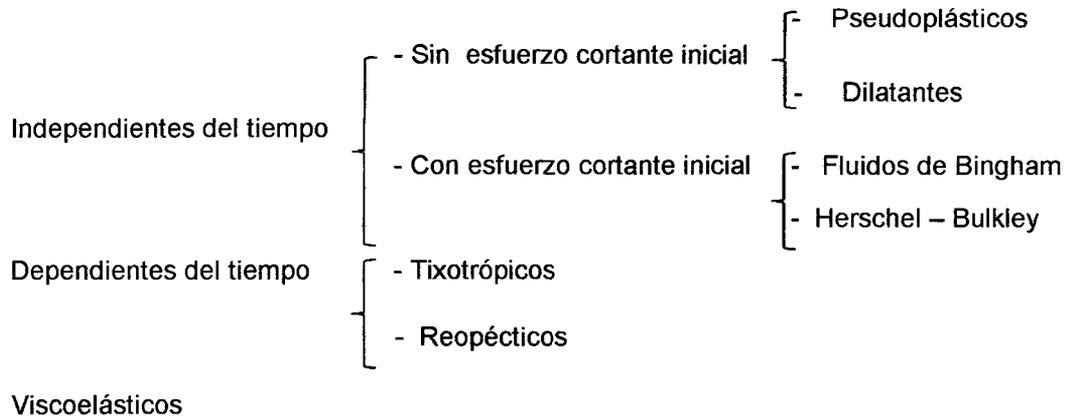
Tabla N° 3: Ecuaciones Empíricas para Fluidos No Newtonianos

Modelo	Ecuación	Parámetros
Bingham	$\tau = \tau_0 + (\mu_p \cdot \gamma)$	$\tau_0, \mu_p$
Ostwal – Waele	$\tau = k \cdot (\gamma)^n$	$n, k$
Herschel – Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \cdot \gamma^n$	$\tau_0, k$

Fuente: Mecánica de Fluidos, Mott Robert (1996).

### 2.1.9.1 Clasificación de los Fluidos No Newtonianos.

Los fluidos no newtonianos se pueden clasificar en tres grandes grupos, aunque se debe aclarar que los límites de la clasificación no son muy claros:



Fuente: Mecánica de Fluidos, Mott Robert (1996).

### 2.2.10 Medición de la viscosidad.

Los procedimientos y el equipo para medir la viscosidad son numerosos. Algunos emplean los principios fundamentales de la mecánica de fluidos, para tener la viscosidad en sus unidades básicas. Otros indican exclusivamente valores relativos de la viscosidad que se pueden utilizar para comparar diferentes fluidos.

### 2.2.11 Viscósímetro.

Un viscosímetro (denominado también viscosímetro) es un instrumento para medir la viscosidad y algunos otros parámetros de un fluido. Fue Isaac Newton el primero en sugerir una fórmula para medir la viscosidad de los fluidos. En 1884 Poiseuille mejoró la técnica estudiando el movimiento de líquidos en tuberías (<http://es.wikipedia.org/wiki/Viscos%CADmetro>)

### 2.3 Tipos de Viscosímetros

Los Tipos de viscosímetros más comunes se detallan en el siguiente cuadro:

<b>Viscosímetro de Tubo Capilar</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Viscosímetro de Ostwald</li><li>- Viscosímetro Ubbelohde</li><li>- Viscosímetro de Cannon – Fenske</li></ul>
<b>Viscosímetro Rotacionales</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Viscosímetro de Stormer (Searle)</li><li>- Viscosímetro de Cono – placa</li><li>- Viscosímetro de Cilindro Concéntrico</li><li>- Viscosímetro Brookfield</li><li>- Viscosímetro de Tambor Giratorio</li></ul>
<b>Viscosímetro Rotacionales</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Viscosímetro Saybolt <ul style="list-style-type: none"><li>- Universal</li><li>- Furol</li></ul></li><li>- Viscosímetro Engler</li><li>- Viscosímetro Redwood</li></ul>
<b>Viscosímetro de Hoppler</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Viscosímetro de Caída de Bola</li></ul>

## 2.3.1 Características Generales

### 2.3.1.1 Viscosímetro de Tubo Capilar.

Probablemente el primer experimento científico en el que se utilizó un capilar o tubo para medir el flujo fue realizado en 1839 por Hagen, seguido de cerca por el trabajo de Poiseuille. Poiseuille estudió problemas de flujo capilar para entender mejor la circulación de la sangre a través de los vasos capilares en el cuerpo humano. Descubrió la relación (conocida como la ley de Hagen-Poiseuille) entre la velocidad de flujo y la caída de presión para un flujo capilar.

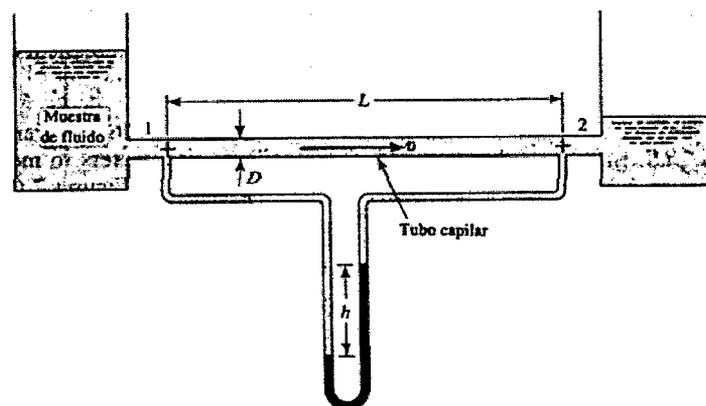


Figura 6: Viscosímetro de Tubo Capilar.

Fuente: Mecánica de Fluidos, Mott Robert (1996).

En la figura 6, se muestran dos recipientes conectados por un tubo largo de diámetro pequeño, conocido como **tubo capilar**. Conforme el fluido fluye a través del tubo con una velocidad constante, el sistema pierde algo de energía, ocasionando una caída de presión que puede

ser medida utilizando un manómetro. La magnitud de la caída de presión está relacionada con la viscosidad del fluido mediante la siguiente ecuación.

$$\Delta p = \frac{32 * \mu * v * L}{D^2}$$

**Dónde:**

$\Delta p$ : Pérdida de presión entre los puntos 1 y 2,  
[Kg/m<sup>2</sup>]

$\mu$ : Viscosidad dinámica, [Pa \* s]

L: Longitud del tubo entre los puntos 1 y 2 [m]

v: Velocidad del fluido, [m/s]

D: Diámetro interior del tubo, [m]

Los tipos de viscosímetros capilares más comunes, y sus modos de operación son: Viscosímetro de Ostwald, Ubbelohde, Viscosímetro de rutina Cannon-Fenske que se detallan a continuación.

### 2.3.1.2 Viscosímetro de Ostwald

En esencial, el Viscosímetro Ostwald es un tubo "U" una de sus ramas es un tubo capilar fino conectado a un deposito superior. El tubo se mantiene en posición vertical y se coloca una cantidad conocida del fluido al depósito para que luego fluya por gravedad a través de un capilar. Los procedimientos exactos para llevar a cabo estas pruebas estándar dado en los estándar de la American Society For Testing and Material (ASTM).



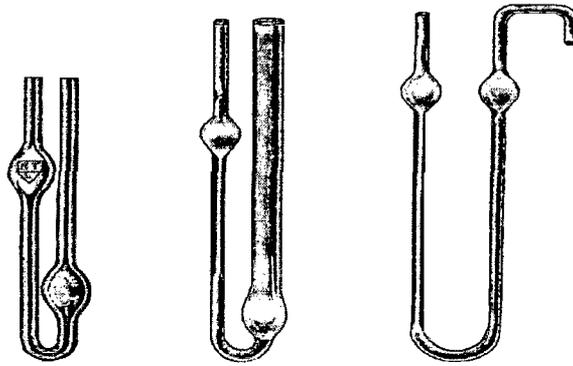


Figura 7:Viscosímetro de Ostwald.

Fuente:([www.ugr.es](http://www.ugr.es))

El viscosímetro debe estar completamente seco, de ahí se procede a colocar la muestra a estudiar aproximadamente 7 ml, después se procede a colocar el viscosímetro en un baño maría. Con ayuda de una pipeta se succiona la muestra líquida hasta un punto **a**; desde ahí se mide el tiempo hasta que baje al punto **b**. En este método se hace una medición del tiempo necesario para que cierta cantidad de fluido (aceite) pase por un tubo capilar (o de calibre pequeño) de longitud y diámetros conocidos, bajo una diferencia medida y constante de presiones. Están gobernados por la ecuación de Hagen – Poiseuille,

$$\mu = \frac{\pi * \Delta p * r^4 * t}{8 * V * L}$$

Si el líquido fluye únicamente por acción de la gravedad en un tubo situado verticalmente,  $\rho = gh$ ; reemplazando este valor en la ecuación de Hagen-

Poiseuille; siendo  $\rho$ : densidad del fluido y  $h$  la altura de la columna.

$$\mu = \frac{\pi * \rho g h * r^4 * t}{8 * V * L}$$

Todas las constantes de la ecuación se pueden combinar en la constante  $K$  del viscosímetro:

$$k = \frac{\pi * r^4 * g * h}{8 * V * L}$$

Dónde:  $V$  es el volumen del líquido que fluye a través de un capilar  $[m^3]$  de radio  $r$   $[m]$  bajo la influencia de la gravedad  $g$ . La altura promedio de la columna del líquido en el viscosímetro durante la medición se denota como  $h$ , y  $L$  es la longitud del tubo capilar  $[m]$ .

Reemplazando el valor de  $K$  en la ecuación:

$$\mu = K * \rho * t [Pa * s]$$

**Dónde:**

$K$ : Constante del Viscosímetro o constante viscosimétrica.  $[m^2/s^2]$

$t$ : Tiempo en que el fluido cae de la marca superior a la inferior (de  $a$  hasta  $b$ ).  $[s]$

Esto permite determinar experimentalmente la viscosidad cinemática de un líquido para los viscosímetros de tubo capilar. El valor de  $K$  (constante del viscosímetro), depende por lo tanto de la geometría de cada viscosímetro en concreto y suele darlo el constructor. También puede determinarse utilizando un líquido de viscosidad

conocida.

Normalmente se determinan las viscosidades relativas referidas al agua.

### **2.3.1.3 Viscosímetro de Ubbelohde.**

Éste viscosímetro se utiliza para determinar viscosidades cinemáticas de líquidos Newtonianos transparentes y de lubricante hidráulicos.

Llamado también el viscosímetro de nivel suspendido, el cual elimina el efecto de tensión superficial a la salida del tubo capilar. Además, éste instrumento, con previa calibración puede utilizarse para medir en forma directa y precisa la viscosidad de líquidos mediante la medición del tiempo de emanación del líquido en el viscosímetro, es decir, el tiempo en que un volumen dado del líquido fluye a través del capilar. Es importante hacer énfasis en que éste tipo de viscosímetro no es adecuado para efectuar estudios reológicos detallados de fluidos no – newtonianos ya que la velocidad de corte de la cual la viscosidad depende, es limitada y no uniforme.  
(<http://www.cenam.mx/memsimp06/Trabajos%20Aceptados%20para%20CD/Posters/P-17.pdf>)

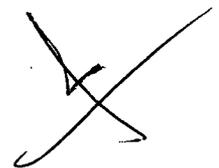




Figura 8. Viscosímetro Ubbelohde

Fuente:([www.bimarloga.com.ar](http://www.bimarloga.com.ar))

Éstos tipos de viscosímetros obedecen la ley de Hagen-Poiseuille como se dijo anteriormente el funcionamiento es similar al viscosímetro de Ostwald, la ecuación que permite calcular la viscosidad cinemática es

$$\pi = K * \rho * t$$

$$v = Kt$$

Dónde:

$v$ : Viscosidad cinemática [ $m^2/s^2$ ]

$K$ : Constante del viscosímetro

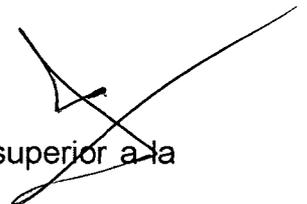
$t$ : Tiempo en que el fluido cae de la marca superior a la inferior (de a hasta b), [s]

Dónde:

$v$ : Viscosidad cinemática [ $m^2/s^2$ ]

$K$ : Constante del viscosímetro

$t$ : Tiempo en que el fluido cae de la marca superior a la inferior (de a hasta b), [s]



#### 2.3.1.4 Viscosímetros Rotatorios

Usan el torque de un eje rotatorio para medir la resistencia al flujo del fluido. Un viscosímetro de rotación se compone usualmente de un cilindro que gira dentro de un vaso de medición que contiene la muestra (figura 9). El rotor es accionado por un motor de corriente continua con velocidad fija o programada.

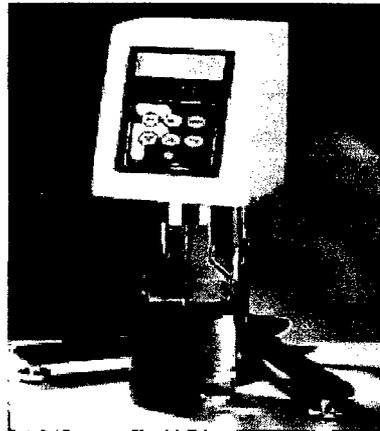


Figura 9. Viscosímetros Rotacionales.

Fuente :([www.ictsl.net](http://www.ictsl.net))

Un taco generador regula el motor de manera exacta, detecta la mínima desviación y la corrige. La resistencia de la muestra a fluir provoca una pequeña torsión en el resorte de medición que se encuentra entre el motor y el árbol de accionamiento. Este movimiento se recoge mediante un traductor electrónico. Se transmiten a la unidad de control señales eléctricas proporcionadas a la torsión (momento angular) y al número de revoluciones para su procesamiento.

El resultado del ensayo produce tres magnitudes

El gradiente de velocidad ( $dV/dy$ ) seleccionado, proporcional a la velocidad.

El esfuerzo de cizalla medido proporcional al par de torsión. La temperatura  $T$ , medida con preferencia directamente en la sustancia.

### 2.3.1.5 Viscosímetro de Stormer

En este equipo se determinan viscosidades de muestras a temperatura ambiente, ya que carecen de baño calefactor. Éste viscosímetro consta de dos cilindros concéntricos siendo el interior móvil y el exterior fijo (figura 10), colocándose el fluido cuya viscosidad se quiere determinar en el espacio comprendido entre estos.



Figura 10. Viscosímetro de Stormer.

Fuente:([www.de.dicthy.info](http://www.de.dicthy.info))

El cilindro interior se puede hacer girar por medio de un hilo enrollado en la polea superior y en cuyo extremo lleva un peso. Se puede deducir que,

para éste equipo, la viscosidad se expresa en función del par necesario para hacer girar el cilindro interior a  $\mu$ , rps (revoluciones por segundo) a partir de la siguiente fórmula:

$$\mu = \frac{P_n}{4\Omega_0 L \pi} \left[ \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \right] [Pa * s]$$

Dónde:

$P_n$ : Par necesario [N \* m]

$L$ : Longitud del cilindro interior, [m]

$\Omega_0$ : Velocidad angular, [rpm]

$r_1$ : Radio del cilindro interior, [m]

$r_2$ : Radio del cilindro exterior [m]

El par necesario se puede calcular conociendo el peso que se colocó en el extremo del hilo y el radio de la polea. Se utiliza con frecuencia para las medidas relativas de líquidos muy viscosos, de suspensiones, de pinturas, de productos alimenticios, etc.

El **funcionamiento** es el siguiente: primero se debe llenar con la muestra el espacio comprendido entre los dos cilindros, hasta sobre pasar ligeramente el borde superior del cilindro interior, luego se arrolla el hilo en la polea y se sujeta una pesa de más de 30 gramos al mismo. Se coloca el viscosímetro en un lugar elevado y se deja caer el peso, luego de algunas vueltas del cilindro interior se controla el tiempo que necesitó la pesa para caer una cierta distancia.

A partir de la longitud recorrida ( $L_r$ ), el diámetro del cilindro interno ( $D_i$ ) y el tiempo medido ( $t$ ) se calcula el número de revoluciones por segundo. (<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mv?xid=194&tip=7>)

$$\Omega_0 = \frac{L_r}{\pi * D_i^* t} [1/s]$$

### 2.3.1.6 Viscosímetro de cono -placa.

El viscosímetro de cono-placa no presenta una distribución compleja de fatiga de cizalla y velocidad de deformación en cizalla tal como la tienen el viscosímetro de cilindros coaxiales.

A una velocidad angular dada, la velocidad tangencial del componente matriz aumenta linealmente con el radio, y esto depende del espacio que hay entre el cono y la placa. La velocidad de deformación en cizalla y la fatiga de cizalla son uniformes en todo el fluido para ángulos pequeñas que sean menores de 32 y no sería necesario hacer correcciones para los fluidos no – newtonianos.

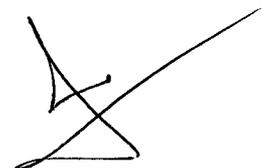
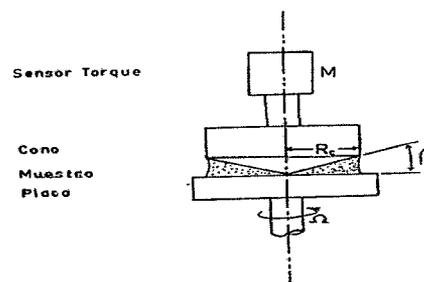


Figura 11. Viscosímetro de cono y placa.

Fuente:([www.mazinger.sisb.uclile.cl](http://www.mazinger.sisb.uclile.cl))

Las relaciones que permiten el cálculo de las características reológicas son:

**Donde:**

$$t = \frac{3M}{2\pi(R_c)^3} [N/m^2]$$

$M$ : Torque [ $N * m$ ]

$R_c$ : Radio del cono [ $m$ ]

$$\gamma = \frac{\Omega}{\beta} [s^{-1}]$$

**Donde:**

$\Omega$ : Velocidad angular o de rotación, [rps]

$\beta$ : Ángulo entre el cono y la placa [ $^\circ$ ]

Por lo tanto calcular la viscosidad absoluta experimentalmente es:

$$\mu = \frac{3}{2} * \frac{M * \beta}{\pi * \Omega * R_c^3}$$

El sistema presenta problemas con material de muy alta viscosidad debido a que el material tiende a abandonar el hueco entre el cono y la placa como por ejemplo los polímeros.

([http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias\\_quimicas\\_y\\_farmaceuticas/castroe11/vconplaca.htm](http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_quimicas_y_farmaceuticas/castroe11/vconplaca.htm))

### 2.3.1.7 Viscosímetro de cilindros concéntricos o de Coutte.

Este equipo se emplea para medir viscosidades absolutas. Consiste en dos cilindros concéntricos, un cilindro interior y otro exterior, el cilindro exterior es hueco y el interior macizo; el interior permanece fijo mientras que el exterior se lo hace girar a velocidad angular ( $\omega$ ) constante. Entre los dos cilindros existe un espacio en el cual se coloca el material del cual se quiere medir su viscosidad. El cilindro interior se suspende de un resorte o hilo, calibrados a torsión.

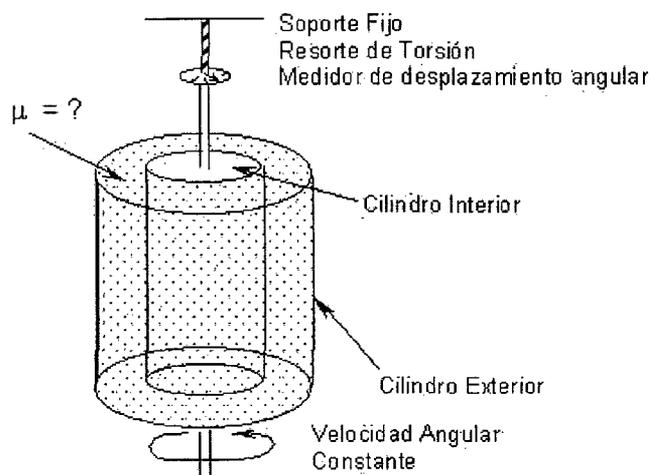
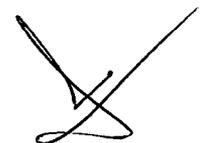


Figura 12. Viscosímetro de cilindros concéntricos.

Fuente: ([www.fluidos.eia.edu.com](http://www.fluidos.eia.edu.com))

La fuerza de corte unitario se obtiene dividiendo cada momento de torsión por el radio y el área exterior del cilindro interior:

$$t = \frac{Mt/r}{2\pi * L} * \frac{M_t}{2\pi * r^2 * L}$$



**Donde:**

$M_t$ : Momento de torsión,  $[N/m^2]$

$M_t$ : Momento de torsión,  $[N/m^2]$

$r$ : Radio del cilindro interno,  $(d = 2r)$ ,  $[m]$

$L$ : Altura de inmersión del cilindro que se desliza en el medio líquido,  $m$

El gradiente de velocidad (figura 12) se obtiene de la velocidad dada a la superficie interior del cilindro exterior

$$\omega = \frac{2\pi\Omega}{60}$$

$$y = \frac{\Delta V}{\Delta r} = \omega * (r + \Delta r) * \frac{1}{\Delta r}$$

$$r + \Delta r = R,$$

$$\Delta r = R - r$$

$$y = \frac{\pi\Omega * R}{30(R - r)}$$

Donde:

$\Omega$ : Número de revoluciones por segundo (r.p.m.).

$R$ : Radio del cilindro exterior ( $D = 2R$ );  $[m]$

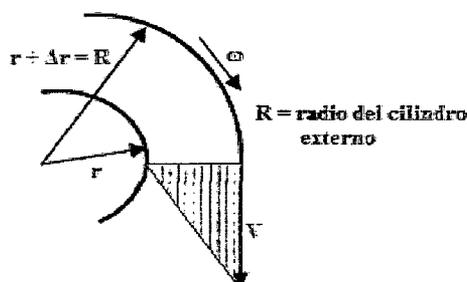


Figura 13. Variación de la velocidad.

Fuente: Mecánica de Fluidos, Mott Robert (1996).

Para calcular la viscosidad en forma experimental, se reemplaza en la ecuación de Newton:

$$\mu = \frac{15M_t * (R - r)}{\pi^2 r^2 \Omega L R}$$

Fuente Hannibal Brito: Texto Básico De Fenómeno De Transporte I, 31 – 33 (2002)

### 2.3.1.8 Viscosímetro Brookfield.

Fue diseñado como un instrumento económico para uso fácil y de estimaciones reproducibles de viscosidad bajo ciertas condiciones de operación. Se usa principalmente para determinar la viscosidad a baja temperatura de aceites para engranajes, transmisiones automáticas, convertidores de torque y aceites hidráulicos para tractores, automóviles e industriales. La temperatura del ensayo se mantiene constante en el rango de -5 a -40°C.

El Viscosímetro Brookfield es de ejes simple, es más comercial, ampliamente utilizada en la industria alimenticia. Normalmente opera a ocho velocidades diferentes, y es cuestión de ensayar cuáles son el eje y la velocidad angular adecuados para un fluido particular. La técnica de ensayo Brookfield mide la viscosidad Brookfield de una muestra a medida que es enfriada a velocidad constante de 1 °C por hora, este método intenta correlacionar las características de bombeo de un aceite a baja temperatura. El ensayo informa el punto de gelificación, definido como la

temperatura a la cual la muestra llega a 30.000 cP. El índice de gelificación se define como la relación entre la mayor velocidad de cambio en el incremento de la viscosidad desde -5 °C y la temperatura más baja del ensayo. Este método encuentra aplicación en aceites de motores, y es requerido por la ILSAC GF-2.

### **2.3.2 Viscosímetros empíricos.**

Estos viscosímetros se basan en el tiempo que requiere un determinado volumen de fluido en pasar libremente a través de un orificio normalizado. Se clasifican en

#### **2.3.2.1 Viscosímetro Saybolt.**

Se utiliza ampliamente con fines industriales comparativos sobre todo para los lubricantes y los productos petroleros.

El viscosímetro Saybolt, es uno de los aparatos más utilizados, para obtener la viscosidad de un fluido (aceite), la cual se obtiene midiendo el tiempo en segundos que tarda en escurrir, a través de un orificio calibrado, 60 cm<sup>3</sup> del mismo, a una temperatura determinada, que por lo general está entre 100°F (37,8°C) y 210°F (98,9°C). El equipo se completa con la resistencia de calentamiento, los termómetros y el agitador. (<http://www.construsur.com.ar/News-sid-128-file-article-pageid-3.html>)

Existen dos tipos de puntas (diámetro de orificios calibrados de escurrimiento) para el Viscosímetro Saybolt:

Punta Universal (SSU), líquidos livianos. Los valores de viscosidad se dan en segundos Saybolt Universal, abreviado SSU, a temperaturas especificadas que oscilan entre 21 y 99°C (70 y 210°F)

Punta Furol (SSF), líquidos pesados donde los tiempos de caída sean superiores 250 segundos Saybolt Universal. Los valores de viscosidad se dan en segundos Saybolt

Furol, abreviado SSF, a temperaturas especificadas, que están entre 120 y 240°C (248 y 464°F).

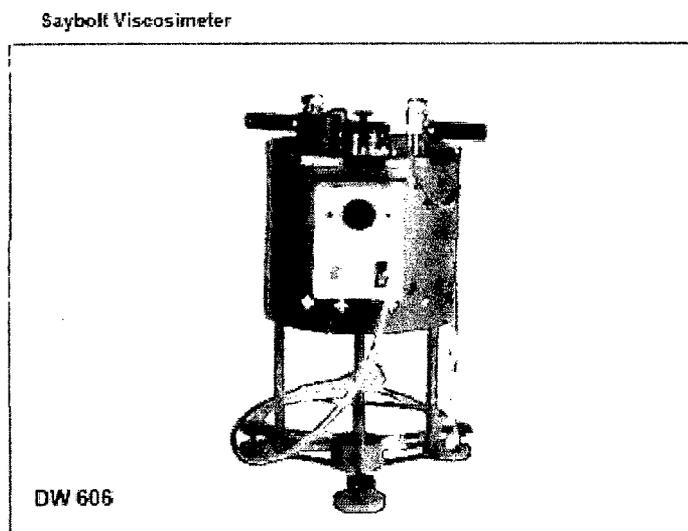


Figura 14. Viscosímetro Saybolt con los dos tipos de orificios.

Fuente: ([www. spanish.alibaba.com](http://www.spanish.alibaba.com))

Los equipos utilizados para ambos casos, difieren únicamente en los diámetros de los orificios calibrados de escurrimiento, siendo para Saybolt Universal  $\varnothing = 1.77\text{mm} \pm 0,015\text{mm}$  y para Saybolt Furol  $\varnothing = 3.15\text{mm} \pm 0,020\text{mm}$ .

El ensayo se realiza, previa colocación del tapón de corcho para impedir que caiga el líquido, introduciendo éste último en el recipiente del líquido, hasta que rebose el mismo. Se calienta el baño a la temperatura de medición y retirando el tapón, se lo deja caer en el matraz aforado (copa Saybolt), tomándose el tiempo con un cronómetro, hasta que el líquido llegue al nivel que indica la figura 14 (enrase). El tiempo así obtenido es la viscosidad en segundos Saybolt del líquido ensayado. Herschel ha demostrado que la expresión que permite calcular la viscosidad cinemática experimentalmente es

$$v = At - \frac{B}{t}$$

Donde A y B son constantes obtenidas experimentalmente y t el tiempo en segundos. Las constantes A y B para las viscosidades Saybolt, Redwood y Engler, se dan en la siguiente tabla:

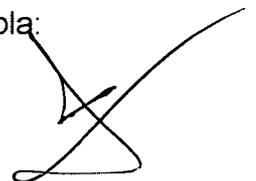


Tabla N°4: Constantes A y B.

Viscosidad	A	B
Saybolt	0.22	180
Redwood	0.26	171
Engler	0.147	374

Fuente: Manual del Ing. Químico: Perry, (1986)

Por lo tanto la relación aproximada entre la viscosidad y los segundos Saybolt se obtiene mediante:

$$v = 0.22t - \frac{180}{t}$$

**Donde:**

u: Viscosidad cinemática, [cSt ]

t: Tiempo de escurrimiento, [s]

### 2.3.2.2 Viscosímetro Redwood.

En Inglaterra se utiliza la viscosidad Redwood, que se obtiene de la misma manera que la Saybolt, difiriendo en el volumen que escurre, el cual es de 50 cm<sup>3</sup>, diferenciándose también dos tipos, según el diámetro del orificio de escurrimiento, el Redwood N°1, con orificio de salida de Ø = 1,62 mm y Redwood N°2, con orificio de salida de Ø = 3,80 mm, obteniéndose la viscosidad en segundos Redwood.

### 2.3.2.3 Viscosímetro Engler.

La viscosidad Engler se utiliza en el continente europeo, y consiste en el cociente entre el tiempo en segundos que tarda en derramarse  $200 \text{ cm}^3$  del líquido cuya viscosidad se desea conocer, y el tiempo en segundos que tarda en derramarse  $200 \text{ cm}^3$  de agua, todo, por lo general, a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura, pudiendo en los casos de líquidos muy viscosos utilizar temperaturas de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  y hasta  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . El equipo, consta, según muestra la figura (Fig.15), de dos recipientes, entre los que se vierte el aceite o el agua que constituirá el baño de calentamiento, y en el recipiente interior el líquido cuya viscosidad se desea medir; un tubo de salida de longitud  $l$  de  $20 \text{ mm}$  con orificios calibrados a la entrada de  $\varnothing = 2,4 \text{ mm}$  y a la salida de  $\varnothing = 2,8 \text{ mm}$ , y un tapón de madera para impedir la caída del líquido hasta que no se obtengan las condiciones del ensayo; un matraz aforado para  $200 \text{ cm}^3$ . El equipo se completa con los termómetros, agitador y sistema de calentamiento. Una vez obtenidas las condiciones de ensayo, se retira el tapón y se toma con un cronómetro el tiempo de caída del líquido, dividiéndose por el tiempo de caída del agua, cuyo valor constituye la constante del

aparato, variando entre 51 y 52 segundos a 20 °C, obteniéndose un número que da la viscosidad en grados Engler (°E).

(<http://www.construsur.com.ar/News-sid-128-file-article-pageid-3.html>)

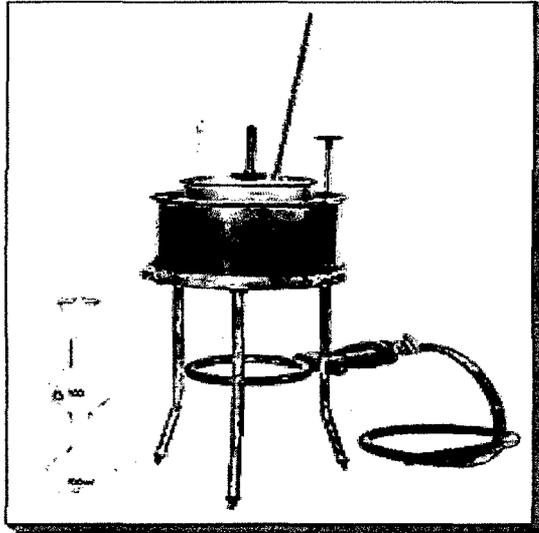


Figura 15. Viscosímetro Engler.

Fuente: ([www.geocities.ws](http://www.geocities.ws))

### 2.3.3 Viscosímetro de Hoppler.

Cuando un cuerpo cae en un fluido bajo la sola influencia de la gravedad, se acelera hasta que la fuerza que lo jala hacia abajo (su peso) queda balanceada por la fuerza de flotación y la fuerza de arrastre viscoso que actúan hacia arriba. La velocidad que adquiere en ese momento se conoce como velocidad terminal. Éste viscosímetro utiliza el principio de que una bola esférica caiga libremente a través del fluido y midiendo el tiempo requerido para que ésta recorra una distancia conocida.

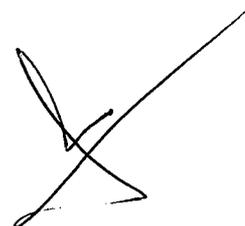
### 2.3.3.1 Viscosímetro de caída de bola.

Éste equipo se utiliza para determinar las viscosidades de fluidos Newtonianos y gases (con una bola especial para gases), entre sus aplicaciones figuran la investigación, el control de procesos y el control de calidad. Consta de un simple tubo de vidrio (figura 17), de diámetro pequeño con un ángulo de 180°, que se rellena con el líquido problema y por él se introduce una esfera sólida de diámetro menor para calcular la viscosidad del fluido. Éste viscosímetro determina la viscosidad de líquidos midiendo el tiempo de caída de una esfera sólida necesita para recorrer una distancia entre dos puntos de referencia dentro del tubo de vidrio inclinado con muestra. El **funcionamiento** es el siguiente: primeramente se llena la sustancia que va a ser estudiada en el tubo de caída del viscosímetro, en el cual la bola debe caer una distancia calibrada de 100 mm. A partir del tiempo de caída **t** respectivamente se obtiene la viscosidad dinámica (**μ**) del líquido según la ecuación de Stokes (<http://www.quantotec.com/sp/Visco-bola.htm>)

$$\mu = \frac{2}{9} r^2 \frac{g(\rho_s - \rho_L)}{V} [\text{Pa} * \text{s}]$$

Donde:

$\rho_s$ : Densidad de la esfera,  $[\text{Kg}/\text{m}^3]$



$\rho_L$ : Densidad del líquido,  $[Kg/m^3]$

$r$ : Radio de la esfera,  $[m]$

$V$ : Velocidad límite alcanzada por la esfera,  $[m/s]$

Esta ecuación es válida siempre y cuando la esfera caiga en régimen laminar y el diámetro de ésta sea pequeño comparado con el diámetro del tubo. Se considera que el régimen es laminar cuando el número de Reynolds definido por:  $Re = \rho$

$L v 1 d / \mu$  sea menor a 0,1.

Faxen modifica el resultado obtenido mediante la expresión anterior para tener en cuenta los efectos perturbadores que pueda tener la pared del tubo de la siguiente manera

$$\mu_F = F * \mu_s$$

**Donde:**

$\mu_s$ : Viscosidad según Stokes

$\mu_F$ : Viscosidad corregida según Faxen

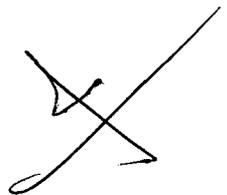
El factor de Faxen (F) está dado por:

$$F = 1 - 2.104 \frac{d}{D} + 2.09 \left(\frac{d}{D}\right)^3 - 0,905 \left(\frac{d}{D}\right)^5$$

Donde:

$d$ : Diámetro de la esfera.

$D$ : Diámetro del tubo capilar.



- Este viscosímetro se utiliza principalmente para sustancias de baja viscosidad, entre 0.6 y 100.000 mPa.s, como:
- Industrias de aceites minerales (aceites, líquidos hidrocarburos).
- Industria alimentaria (soluciones de azúcar, miel, cerveza, leche, gelatina, zumo de) frutas.
- Industria química (soluciones de polímero, disolventes, soluciones de resina, dispersiones de látex, soluciones adhesivas)
- Industria Cosmética/Farmacéutica (glicerinas, emulsiones, suspensiones, soluciones, extractos).
- Industria petrolera (crudo, aceite para máquinas).
- Industria papelera (emulsiones, dispersiones de pigmentos, aditivos del papel). Pinturas y barnices (tintas para impresión, acuarelas).

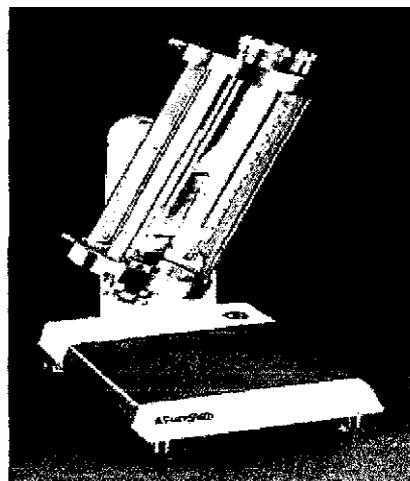


Figura 16: Viscosímetro de caída de bola  
Fuente: ([www. instrumentalcuyo.com.ar](http://www.instrumentalcuyo.com.ar))

## 2.4 Aceites Lubricantes.

Se llama lubricante a toda sustancia sólida, semisólida o líquida de origen animal, mineral o sintético que, puesto entre dos piezas con movimiento entre ellas, reduce el rozamiento y facilita el movimiento.

Además, los lubricantes, según sus características, pueden cumplir otras misiones: Sellar el espacio entre piezas, dado que las superficies metálicas son irregulares a nivel microscópico, el lubricante llena los huecos. En los motores de explosión este sellado evita fuga de combustibles y gases de escape y permiten un mejor aprovechamiento de la energía.

### 2.4.1 Funciones de los lubricantes.

Los lubricantes deben reducir al máximo los rozamientos de los órganos móviles facilitando el movimiento, mejorando el rendimiento del motor y disminuyendo el consumo de carburante.

- Soportar grandes presiones. Actuar como fluido hidráulico.
- Mantener la viscosidad poco variable ante los cambios de temperatura.
- Actuar como refrigerante; es decir evacuar de manera eficaz el calor, enfriando el motor para evitar la deformación de las piezas.
- Proteger los órganos mecánicos contra el desgaste y la corrosión para garantizar la eficacia del motor.

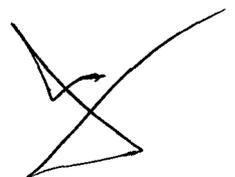
En general dar un buen servicio y protección a las partes mecánicas, en todas las temperaturas y por un largo período de tiempo. (Ing. Cuadrado Samaniego Edwin: Mantenimiento Industrial, 65 – 66)

#### **2.4.2 Propiedades físicas de los lubricantes.**

Los aceites lubricantes se distinguen entre sí según sus propiedades o según su comportamiento en las máquinas. Debemos de conocer las propiedades de los aceites lubricantes, para poder determinar cuál utilizaremos según la misión que deba desempeñar.

Un buen aceite lubricante, a lo largo del tiempo de su utilización, no debe formar excesivos depósitos de carbón ni tener tendencia a la formación de lodos ni ácidos; tampoco debe congelarse a bajas temperaturas. Los aceites lubricantes, se seleccionan de acuerdo a las siguientes propiedades físicas:

- 1) Viscosidad.
- 2) Punto de inflamación.
- 3) Punto de fuego.
- 4) Punto de fluidez.
- 5) Residuos de carbón.
- 6) Color.
- 7) Índice de viscosidad.
- 8) Gravedad API.



#### **2.4.2.1 Viscosidad.**

Probablemente la viscosidad es la propiedad individual más importante del lubricante y por la que se lo clasifica, la cual nos indica su fricción interna. Si un aceite no tuviera nada de viscosidad (fricción interna), éste se escurriría por entre las partes metálicas, dejando a las mismas sin lubricación. Pero, no todo es perfecto, la viscosidad también produce fricción, siendo gastada aproximadamente un 15% de la potencia producida por un motor de combustión en vencer esta fricción.

#### **2.4.2.2 Punto de inflamación.**

Es la temperatura a la cual el aceite emana vapores en cantidades suficientes como para ser encendidos en presencia de llama abierta. El método estándar ASTM D92 se utiliza en los aceites lubricantes para probar los puntos de inflamación y de fuego o ignición por medio del ensayador de copa abierta.

#### **2.4.2.3 Punto de fuego o ignición.**

Es la temperatura a la cual el aceite permanece encendido. Esta temperatura generalmente es de 20°F más elevada que el punto de chispa de desprendimiento de gases, y se toma en el instante que en el interior de la copa se forma una llama que persiste durante 5 segundos.

#### **2.4.2.4 Punto de fluidez.**

Un indicador de la habilidad de un aceite fluir a bajas temperaturas de operación. Es la más baja temperatura a la cual el lubricante fluirá cuando es enfriado bajo condiciones prescritas (ASTM D97).

#### **2.4.2.5 Residuos de carbón.**

Material remanente después de calentar un aceite en condiciones especificadas, a temperatura elevada, es útil como un medio de control de calidad con la refinación de aceites viscosos. Esto no tiene correlación con las tendencias a formar carbón de los aceites en los motores de combustión interna. La determinación se hace con mayor frecuencia por el procedimiento de Conradson (ASTM D189).

#### **2.4.2.6 Color**

El color de un aceite indica la uniformidad de un grado o marca particular y no su calidad. La prueba ASTM D1500 se usa para la determinación visual del color de los aceites lubricantes.

#### **2.4.2.7 Índice de viscosidad (IV).**

Número empírico que indica el grado de cambio de la viscosidad cinemática de un lubricante con la temperatura, o mejor dicho el grado que el aceite resiste al adelgazamiento con un aumento de la

temperatura. Un aceite de motor multigrado resiste el adelgazamiento mejor que un aceite monogrado de motor, cuando la temperatura se incrementa. (Vademecum De Lubricación: Tribology Tech – Lube, 164.)

#### **2.4.2.8 Gravedad API (Instituto Americano del Petróleo).**

Los aceites de baja viscosidad tienen gravedad API más alta que los aceites de viscosidad mayor. Los aceites parafínicos tienen las gravedades API más altas, los nafténicos son intermedios y los aceites animales y vegetales son los más pesados o más bajo de gravedad API.

### **2.4.3 Características de un lubricante.**

#### **2.4.3.1 Grado de viscosidad SAE (Society of Automobile Engineers).**

Los aceites lubricantes para vehículos son frecuentemente clasificados de acuerdo a una serie de números llamados SAE, organización constituida en los Estados Unidos, una de cuyas finalidades era introducir una nomenclatura STANDARD mundial para clasificación de aceites de motor. La Sociedad de Ingenieros Automotores de EE.UU. (SAE) clasificó a los aceites según su viscosidad adoptando como temperatura de referencia 100 grado centígrado y

manteniendo la viscosidad en Centistoke (cSt). Los lubricantes entran básicamente en dos categorías como se ilustra en la Tabla V: los monogrados y los multigrados.

Tabla N° 05. Grado de viscosidad SAE de aceites para motor.

Grado SAE	Viscosidad cinemática a 100°C	
	Valor Mínimo	Valor Máximo
<b>Aceites</b>		
0W	3,8	-----
5W	3,8	-----
10W	4,1	-----
15W	5,6	-----
20W	5,6	-----
25W	9,3	-----
<b>Aceites</b>		
20	5,6	< 9,3
30	9,3	< 12,5
40	12,5	< 16,3
50	16,3	< 21,9
60	21,9	< 26,1

Fuente: NTP(2008)

Esta clasificación no tuvo en cuenta que un aceite SAE 20 en condiciones de baja temperatura aumentaba considerablemente su viscosidad no siendo apto para una operación correcta en climas fríos. Surgen así los aceites tipo W (Winter: invierno) que cubrirían esta deficiencia. Se amplió entonces la clasificación incorporando los grados SAE 5W, SAE 10W, SAE 20W a los ya existentes. En la figura 17 se tiene valores de viscosidades de un aceite de grado SAE a diferentes

temperaturas

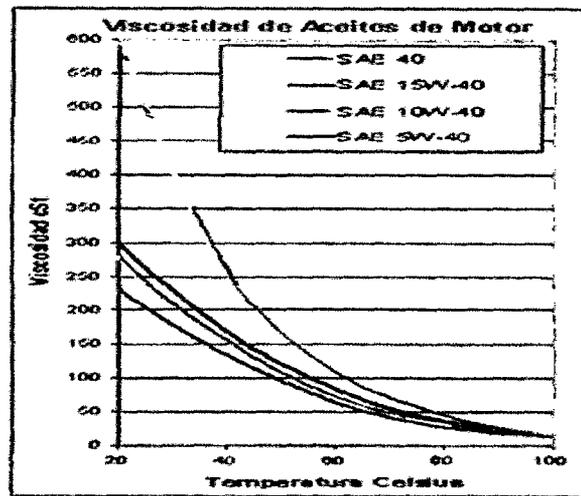


Figura 17. Viscosidad dinámica de diferentes aceites SAE a diferencias temperaturas. Aceites multigrados.

Fuente : (www. maquinasdebarcos.wordpress.com)

## 2.5 Marco Conceptual

**Viscosímetro:** Aparato empleado para medir la viscosidad de los fluidos y, en especial, la de los aceites lubricantes. La medición se efectúa haciendo pasar el líquido por orificios calibrados, con diferentes modalidades en función del aparato medidor.

**Viscosímetro de escurrimiento:** equipo que permite medir la viscosidad cinemática de fluidos a través de relaciones empíricas con el tiempo de escurrimiento de un determinado volumen de fluido.

**Fluidos viscosos:** fluido que presenta más resistencia a la fluidez debido al rozamiento entre sus partículas.

**Aceites lubricantes:** líquidos que mantienen una resistencia de película alta sobre la superficie de los metales, tiene que tener además un punto de congelación bajo y alta viscosidad estable a temperaturas elevadas.

### III. MATERIALES Y METODOS

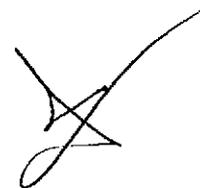
#### 3.1 Lugar de Ejecución

El diseño y Construcción del viscosímetro de escurrimiento se realizó en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao y en los talleres ubicados en Jr. Dansey 874 – Lima Cercado.

#### 3.2 Materiales Equipos y Reactivos

##### 3.2.1 Materiales

- Plancha de acero inoxidable
- Soldadura
- Enchufe
- Cable vulcanizado
- Interruptor con piloto
- Caja de paso plastica
- Termometro
- Cronometro
- Desarmador
- Alicata
- Cinta aislante
- Resistencia electrica
- Aistente termico
- Aceite lubricante
- Glicerina



- Agua destilada
- Vaso de precipitado de 250ml
- Probeta graduada de 250 ml
- cintillos de seguridad

### 3.2.2 Equipos

- Soldador TIG
- Moladora
- Roladora
- Taladro
- Torno

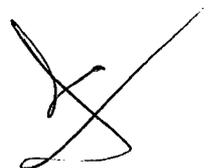
### 3.3 Descripción de equipos y materiales

**Soldador tig:** Une las piezas metálicas por soldadura limpia en acero



Figura 19: Soldadura tig

Fuente : (imagen tomada por el Autor)



➤ **Moladora;** Realiza cortes y rectifica superficies lisa

**Roladora:** Permite doblar planchas en circulos

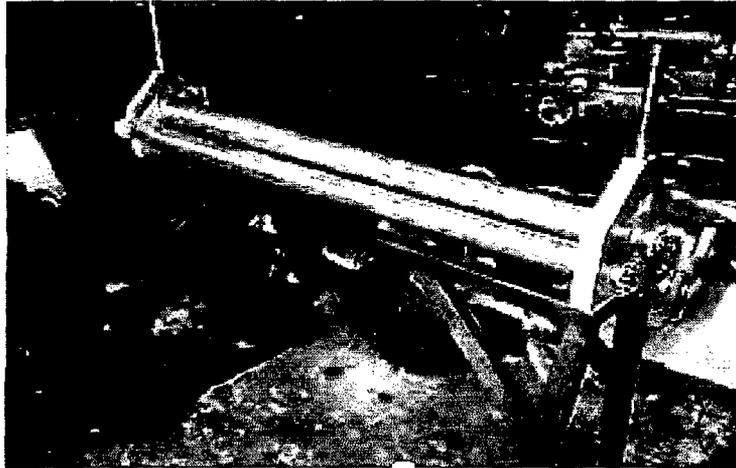


Figura 20: Roladora de laminas

Fuente : (imagen tomada por el Autor)

• **Taladro:** Realiza perforaciones en diversas posiciones

• **Torno:** Rectifica piezas a medidas especificas.

• **Plancha de acero inoxidable:** Usado como material de las tapas y del cuerpo del equipo

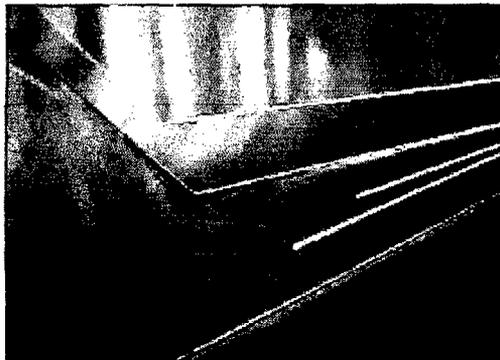


Figura 21: Plancha de acero inoxidable

Fuente : (imagen tomadapor el Autor.

### 3.4.- Método

Para el diseño se tomó como base de cálculo el volumen que se tendrá que analizar, el cual será desde 200 ml a 500 ml, como máximo.

La forma del recipiente es cilíndrico con fondo esférico y una tapa que presenta aislante para evitar pérdidas de calor.

#### 3.4.1.- Diseño de recipiente interno:

- Para el cilindro:

$$V = \pi r^2 \cdot H = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H$$

Haciendo que  $D = H$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot D = \frac{\pi D^3}{4}$$

- Para la base esférica:

$$V_{base} = \frac{V_{esfera}}{4}$$

$$V_{esfera} = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi \frac{D^3}{8} = \frac{\pi D^3}{6}$$

$$V_{base} = \frac{\pi D^3}{6 \times 4} = \frac{\pi D^3}{24}$$

Luego, tenemos:

$$V_{recipiente} = V_{cilindros} + V_{base} = \frac{\pi D^3}{6} + \frac{\pi D^3}{24} = D^3 \left( \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{24} \right)$$

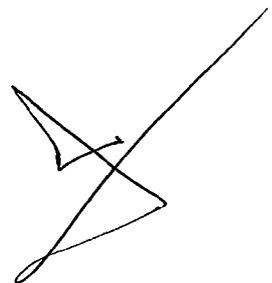
Considerando un volumen total de 1200 ml

Donde:

$$V_{muestra} = 500ml(\text{max})$$

$$V_{tapa} = 300ml$$

$$V_{vacío} = 400ml(\text{para agitación})$$



Tenemos:

$$V_{\text{recipiente}} = D^3 \left( \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{24} \right) \rightarrow D = 11 \text{ cm}$$

Luego, las medidas serían:

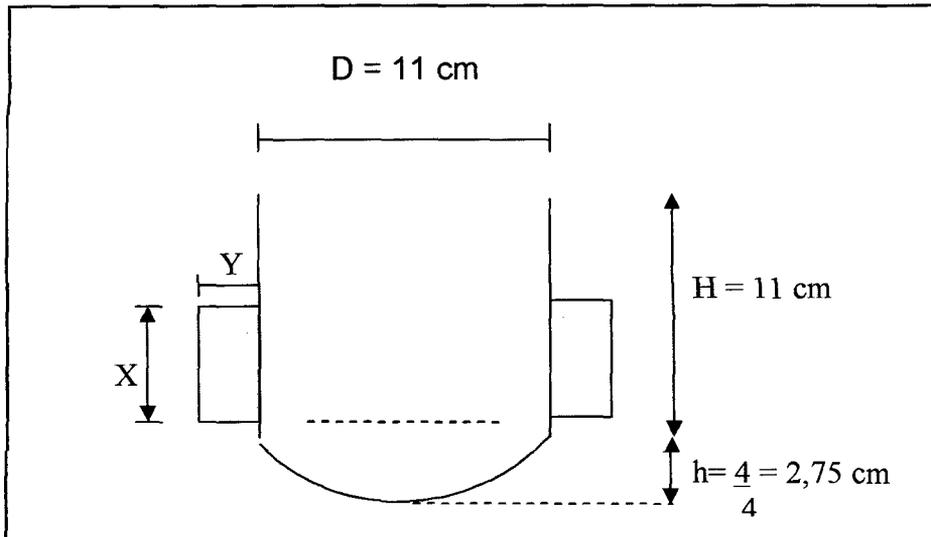


Figura: 22 medidas del recipiente

Fuente: elaboración propia, por el autor.

Para la chaqueta se consideró un ancho "x", un espesor "y".

$$x = \frac{H}{2} = 5,5 \text{ cm}$$

$$y = \frac{H}{4} = 2,75 \text{ cm}$$

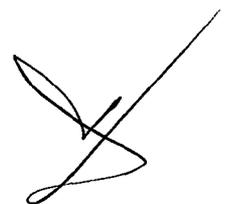
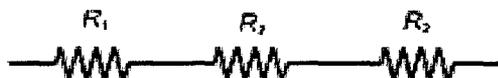
### 3.4.2.- Diseño del sistema de calentamiento

- Cálculo del calor intercambiado en el proceso de calentamiento

$$T_{\text{inicial del agua}} = 20^\circ\text{C} = T_o$$

$$T_{\text{final del aceite}} = 60^\circ\text{C} = T_i$$

Se tiene 3 resistencias a la transferencia de calor



$$R_1 = \text{resistencia de convección interna del aceite} = \frac{1}{h_i \cdot A_i}$$

$$h_i = \text{coeficiente convectivo del aceite} = 14 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$A_i = \text{área interna de intercambio} = 2\pi rL = \pi DL = \pi(11)(5,5) = 190 \text{cm}^2 = 0,019 \text{m}^2$$

$$L = \text{altura de intercambio} \quad L = \frac{H}{2} = 5,5 \text{cm}$$

$$R_2 = \text{resistencia de conducción del acero} = \frac{e}{K \cdot AML}$$

$$E = \text{espesor de acero} = 1,2 \text{mm} = 0,0012 \text{m}$$

$$K = 45 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$AML = \text{Area media logarítmica} = \frac{2\pi L(r_2 - r_1)}{\ln(r_2 / r_1)}$$

$$r_1 = \text{radio interno} = 5,5 \text{cm}$$

$$r_2 = \text{radio externo} = r_1 + e = 5,62 \text{cm}$$

$$L = 2\pi r = \pi D = 34,56 \text{cm}$$

$$AML = \frac{2\pi(34,56)(0,12)}{\ln\left(\frac{5,62}{5,5}\right)} = 1207,3 \text{cm}^2 = 0,1207 \text{m}^2$$

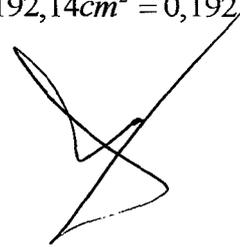
$$R_3 = \text{resistencia de convección interna del aceite} = \frac{1}{h_o \cdot A_o}$$

$$h_o = \text{coeficiente convectivo del aceite} = 9 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$A_o = \text{área interna de intercambio} = 2\pi r_o L = \pi D_o L = \pi(11,12)5,5 = 192,14 \text{cm}^2 = 0,019214 \text{m}^2$$

Luego tenemos:

$$q = \frac{T_i - T_o}{\sum R}$$



$$q = \frac{(T_i - T_o)}{\frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{e}{K \cdot AML} + \frac{1}{h_o \cdot A_o}} = \frac{(60 - 20)}{\frac{1}{14 \times 0,019} + \frac{0,0012}{45 \times 0,1209} + \frac{1}{9 \times 0,19214}} = 9,22 \text{ Watts}$$

Asumiendo unas pérdidas de calor del 80%

Tenemos:

$$q_{\text{real}} = 1,6 (9,22) = 16,596 \text{ Watt}$$

Luego, compramos la resistencia mínima que existe en el mercado de 150 Watt, de cinta de 1 cm de espesor.

Como aislante se utilizará lana mineral cuya  $T_{\text{máx}} = 1200^\circ\text{C}$  para evitar pérdidas de calor al exterior.

### 3.4.3.- Diseño del soporte y altura del equipo

Como soporte utilizaremos tubo cuadrado de acero inoxidable de  $\frac{3}{4}$  de pulgada de espesor.

Para la altura a la cual debe elevarse el equipo debe estar en función al recipiente de recepción, el cual como máximo será un matraz de 500 ml. Este recipiente presenta una altura estándar de 12 cm y teniendo un espacio de caída de 10 cm. Se consideró una altura de 22 cm con respecto al piso.

### 3.4.4.- Diseño del orificio de salida del líquido

Se usa un orificio de 2,6mm y con una altura de 1cm (diseño que se presenta según normas del equipo existente en la Facultad de Ingeniería Eléctrica UNAC, y en el diseño de la empresa Linetronic-Technologie. Ver anexo 03.

Para la construcción de este Viscosímetro de Engler se utilizaron las instalaciones de un taller de metalmecánica especializado en maquinaria en acero inoxidable en Jr. Dansey 874, Lima Cercado.

Los materiales fueron adquiridos en las tiendas que se encuentran en Jr. Cárcamo con Jr. Dansey, también en Cercado de Lima. El sistema de Rolado y Bombeado se realizó en un taller de la Av. Argentina 338, Int. 3, Lima Cercado.

## IV.RESULTADOS

### 4.1 SELECCIÓN DEL VISCOSÍMETRO MÁS ADECUADO

El equipo a seleccionar y construir debe tener aspectos de diseño, construcción y operatividad sencilla, se toma las siguientes ponderaciones para la selección.

Malo	=	1
Regular	=	2
Bueno	=	3
Muy bueno	=	4

Dentro de los viscosímetros de escurrimiento a seleccionar tenemos Saybolt, Redwood, Engler, Hoppler y Caída de Bola, los cuales fueron descritos anteriormente y teniendo los criterios a evaluar son: materiales, construcción, operatividad, mantenimiento y costo.

Teniendo el siguiente cuadro:

Tabla N° 5 : Selección de Viscosímetro

	Saybolt	Redwood	Engler	Hoppler	Caída de bola
Materiales	2	2	3	2	3
Facilidad de construcción	2	3	4	2	2
Operatividad	3	2	3	3	3
Mantenimiento	2	3	3	3	3
Costo	3	2	3	3	2
Total	12	12	16	13	13

Fuente: Elaboración propia, por el autor.

Según el cuadro anterior, se selecciona al Viscosímetro de Engler. En todos los casos el calentamiento es por resistencia eléctrica y su control de temperatura es manual.

Este viscosímetro de Engler reúne las características de diseño y construcción que son apropiados para el LOPU.

#### 4.2 Construcción del Viscosímetro

Se tuvo en cuenta un volumen de operación de 200 ml para la muestra donde se usaron las siguientes dimensiones (ver pag. 54)

##### 4.2.1 Soldadura de recipientes

Ensamblaje de los recipientes concéntricos

Luego del rolado de las planchas, se procede a soldar los recipientes de modo que queden concéntricos y sin porosidades

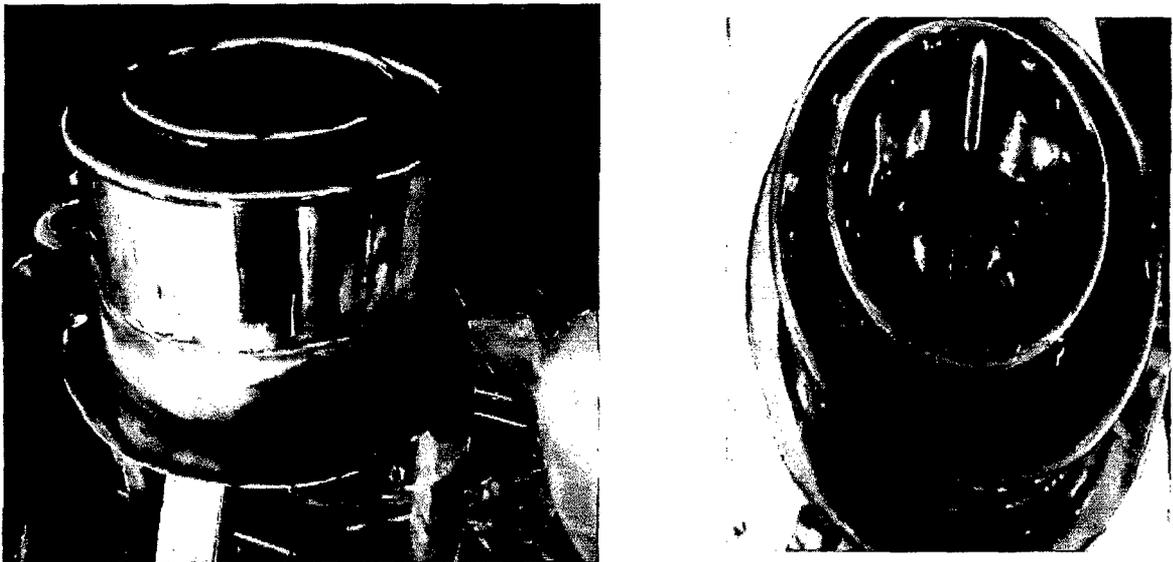
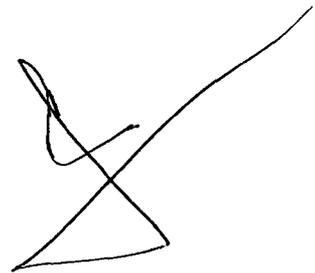


Figura 22: Ensamblaje de recipiente concéntrico

Fuente :(imagen tomada por el Autor)



#### 4.2.2 Instalación de resistencia eléctrica de 500 watts

La resistencia tipo abrazadera se ubica por la parte externa del cilindro exterior



Figura 23: Instalación de resistencia eléctrica de 150 watts

Fuente :(imagen tomadapor el Autor)

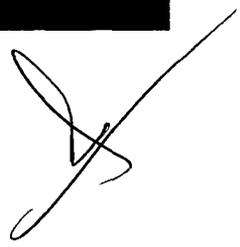
#### 4.2.3 Instalación del aislante térmico de lana mineral (T<sub>máx</sub>, 1200°C)

Se corta el aislante de mineral para ubicarlo por encima de la resistencia.



Figura 24: Instalación de aislamiento térmico de lana mineral

Fuente :(imagen tomada por el Autor)



#### 4.2.4 Instalación del sistema eléctrico

Se reúne los dispositivos de encendido en una caja de paso y se procede a instalarlo, fijándolo en uno de los soportes.

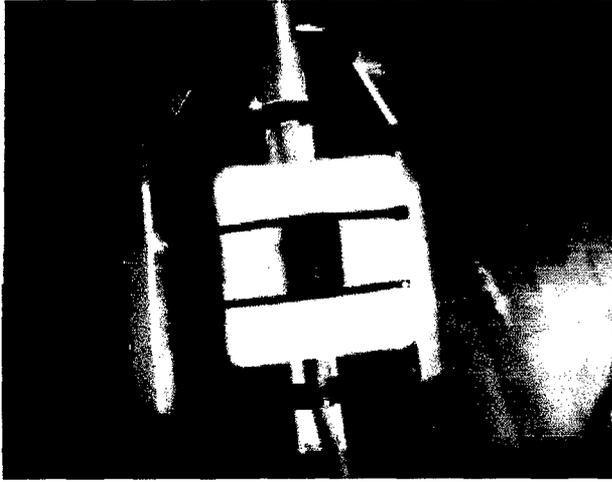


Figura 25: Instalación de sistema eléctrico

Fuente :(imagen tomada por el Autor)

#### 4.2.4 Equipo finalmente construido

Las Dimensiones del equipo construido se encuentran en el Apéndice de este trabajo.



Figura 26: Equipo construido

Fuente :(imagen tomada por el Autor)

A large, stylized handwritten signature or mark in black ink, located in the bottom right corner of the page. It consists of several overlapping loops and lines.

### 4.3 Demostración del funcionamiento del equipo construido

El viscosímetro Engler construido es un dispositivo que se emplea para medir la viscosidad cinemática aproximada de aceites hasta un grado SAE 60 con buena eficiencia. Está conformado por un recipiente metálico central con tapa, revestida de aislante, en cuyo fondo tiene un agujero central de 2.40 mm de diámetro por donde fluirá el aceite. Este agujero se mantiene cerrado mediante un pin obturador de metal o madera, que puede ser levantado sin necesidad de levantar la tapa. Un recipiente para agua circunda el recipiente anular exterior y sirve para calentar el agua (baño maría) que mantendrá al aceite a una temperatura uniforme en utilizando el agitador externo al equipo.

Determinación de los Grados Engler (°E)

$$^{\circ}E = \frac{\text{tiempo descarga fluido problema}}{\text{tiempo descarga agua a } 20^{\circ}C}$$

Tabla N°6: Relacion entre grado Engler y SAE

Relación entre la viscosidad SAE y el grado Engler de viscosidad						
VISCOSIDAD (a 50°C)						
SAE	10	20	30	40	50	60
°E	3-5	5-7	7-9	9-12	12-19	19-27

Fuente: Normas ASTM, 2002

#### 4.3.1 Relación de los °E con la viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática tiene las dimensiones  $[L]^2 [T]^{-1}$  y el °E es adimensional, se trata pues de una unidad empírica. Los °E no pueden utilizarse directamente, sino que hay que transformarlo a un sistema de unidades mediante la siguiente fórmula propuesta por Ubbelohde.

$$\nu = \left( 0.0731^{\circ E} - \frac{0.0631}{^{\circ E}} \right) \text{cm}^2/\text{s}$$

#### Experimentación:

1. Instalar el viscosímetro en un lugar estático y buscar que permanezca en equilibrio.
2. Deposita 200mL de agua destilada dentro del recipiente cilíndrico, el cual esta enchaquetado mediante otro cilindro que servirá para depositar agua potable que permitirá establecer el equilibrio térmico.
3. Medir el tiempo de vaciado de los 200ml de agua pura.
4. Cerrar el orificio de salida del recipiente interno, seca con franela y coloca el obturador, y depositar los 200ml de la muestra a analizar (aceite lubricante)
5. Medir el tiempo de vaciado de la muestra a diferentes temperaturas.

Para el agua, el tiempo que toma en fluir 200ml a 20°C ya ha sido tomado y es un valor establecido, que es de  $t = 52\text{seg}$ .

Tomando los siguientes datos obtenidos del experimento para el aceite SAE 40:

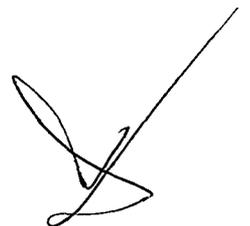


Tabla N°7: Tiempo de Escurrimiento

Temperatura (°C)	Tiempo (seg)
55	389.28
65	287.96
75	204.00
85	159.00



Fuente: Elaboración propia, por el Autor

Con estos datos calculamos los grados Engler (°E):



$$^{\circ}E = \frac{\text{tiempo de fluido de 200cc de la muestra}}{\text{tiempo de fluido de 200cc de agua a } 20^{\circ}C}$$

Tabla N°8: determinacion de°E

Temperatura (°C)	°E
55	7.486
65	5.538
75	3.778
85	3.058

Fuente: Elaboración propia, por el Autor

Luego calculamos las viscosidades cinemáticas, en cm<sup>2</sup>/seg:

$$\nu = \left( 0.0731^{\circ E} - \frac{0.0631}{^{\circ E}} \right) \text{cm}^2/\text{s}$$

Tabla N°9: determinación de viscosidad cinemática

Temperatura (°C)	$\nu$ (cm <sup>2</sup> /s)
55	0.5388
65	0.3934
75	0.2595
85	0.2029

Fuente: Elaboración propia, JALH

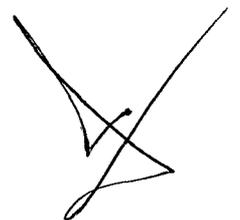
De Tablas obtenemos las densidades del aceite respecto de la temperatura y calculamos la viscosidad absoluta:

Tabla N°10: Viscosidad absoluta

T (°C)	$\nu$ (cm <sup>2</sup> /s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (cp)
55	0.5388	0.888	0.4784
65	0.3934	0.883	0.3474
75	0.2595	0.879	0.2281
85	0.2029	0.873	0.1771

Fuente: Elaboración propia, JALH

Realizamos la gráfica  $\mu$  (cp) vs T (°C) y observamos la relación:



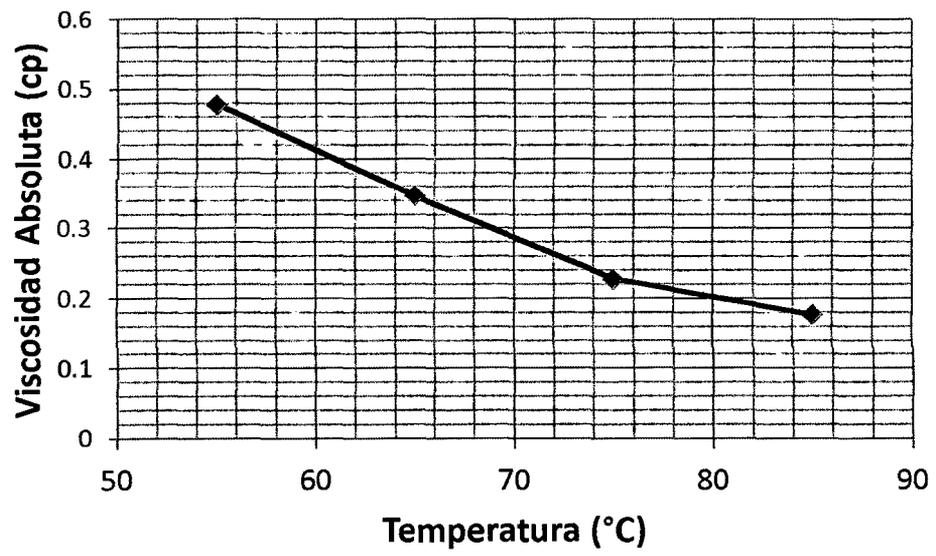


Figura 26: Viscosidad Vs la temperatura

Fuente : (Elaboración propia, por el Autor))

## V. DISCUSION

Luego de la construcción del mismo se procedió a la evaluación del mismo, realizando prácticas de viscosidad para aceite lubricante obteniéndose los siguientes resultados:

De la Tabla N°7: Tiempo de Escurrimiento

Temperatura (°C)	°E
55	7.486
65	5.538
75	3.778
85	3.058

Fuente: Elaboración propia, por el Autor

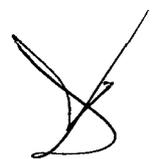
Obtenido en la evaluación de equipo y según la tabla siguiente de viscosidad

Relación entre la viscosidad SAE y el grado Engler de viscosidad						
<u>VISCOSIDAD (a 50°C)</u>						
SAE	10	20	30	40	50	60
°E	3-5	5-7	7-9	9-12	12-19	19-27

Fuente: Normas ASTM, 2002

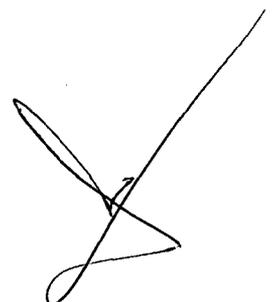
Donde el aceite lubricante analizado era de viscosidad SAE 30, indica que la viscosidad encontrada se encuentra dentro del rango establecido a la temperatura de 50°C indicada por el fabricante el cual valida el equipo construido.

El equipo construido permite un desarrollo de práctica para los alumnos de manera real, donde el diseño elegido (viscosímetro de ENGLER) es el adecuado por su fácil funcionamiento e ideal para medir líquidos viscosos como aceites lubricantes, el material usado (acero 304-2B) fue el adecuado pues permite la construcción en nuestro medio.



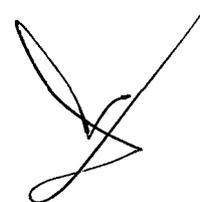
## VI. REFERENCIALES

1. Avallone E, Manual Del Ingeniero Mecánico, 9na.ed. : Mc Graw Hill ,1992
2. Benavides & Rigoberto. Diseño y construcción de un equipo para la medición de la viscosidad de fluidos mediante el principio de variación de temperatura. 2008
3. CUADRADO S, Mantenimiento Industrial, 1998
4. Ferrer, M & Urbina, C Sistema experimental para medir la viscosidad en función de la temperatura de aceites lubricantes, 2012.
5. FOX, Robert & Donald, Alan. Introducción a la Mecánica de fluidos. 2da.ed. México: Mc Graw Hill Interamericana SA, 1989.
6. HANNIBAL B. Texto Básico De Fenómeno De Transporte I, 2002
7. MOTT, Robert. Mecánica de Fluidos Aplicada. 4ta.ed. México DF: Prentice Hall. Hispanoamericana, S.A., 1996.
8. Norma Técnica Peruana para Aceites y Lubricantes ,2008
9. PERRY, Robert & Chilton, Cecil. Biblioteca del Ingeniero Químico. 5ta.ed. México DF: Mc Graw Hill, 1986.
10. VADEMECUM de Lubricación: Tribology Tech – LUBE, 2002.
11. SHAMES I: Mecánica De Fluidos,3ra Ed. Mc Graw Hill 1998
12. URRUTIA Fernando & VELOZ HARO NEIL: Tesis de grado, 2000.
13. ZABALA, Gilberto. Apuntes de Combustión. 3ra.ed. Riobamba: Espoch, 2003.

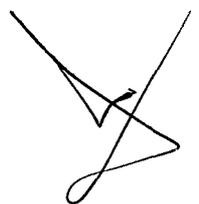


## Páginas web

- [http://www.tesisexarxa.net/TESIS\\_UPC/AVAILABLE/TDX-0725105-155028//06Mtbp06de29.pdf](http://www.tesisexarxa.net/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0725105-155028//06Mtbp06de29.pdf)
- NTP 900.050 (2008). Gestión Ambiental. Manejo de aceites usados.
- <http://www.construsur.com.ar/News-sid-128-file-article-pageid-3.html>
- <http://www.cenam.mx/memsimp06/Trabajos%20Aceptados%20para%20CD/Posters/P-17.pdf>
- <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mv?xid=194&tip=7>
- <http://ich1102-2sem2007-g5.blogspot.com/>
- [http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias\\_quimicas\\_y\\_farmaceuticas/castroe11/vconplaca.htm](http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_quimicas_y_farmaceuticas/castroe11/vconplaca.htm)
- <http://www.construsur.com.ar/News-sid-128-file-article-pageid-3.html>
- <http://www.quantotec.com/sp/Visco-bola.htm>
- <http://ich1102-2sem2007-g5.blogspot.com/>
- [http://www.tesisexarxa.net/TESIS\\_UPC/AVAILABLE/TDX-0725105-155028//06Mtbp06de29.pdf](http://www.tesisexarxa.net/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0725105-155028//06Mtbp06de29.pdf)
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Viscos%C3%ADmetro>
- <http://www.cenam.mx/memsimp06/Trabajos%20Aceptados%20para%20CD/Posters/P-17.pdf>
- [www.bimarloga.com.ar](http://www.bimarloga.com.ar)
- [www.de.dicly.info](http://www.de.dicly.info)



- <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mv?xid=194&tip=7>
- [http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias\\_quimicas\\_y\\_farmac\\_euticas/castroe11/vconplaca.htm](http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_quimicas_y_farmac_euticas/castroe11/vconplaca.htm)
- [www.fluidos.eia.edu.com](http://www.fluidos.eia.edu.com)
- <http://www.construsur.com.ar/News-sid-128-file-article-pageid-3.html>
- [www.spanish.alibaba.com](http://www.spanish.alibaba.com)
- <http://www.construsur.com.ar/News-sid-128-file-article-pageid-3.html>
- [www.instrumentalcuyo.com.ar](http://www.instrumentalcuyo.com.ar)
- [www.maquinasdebarcos.wordpress.com](http://www.maquinasdebarcos.wordpress.com)



## VII. APENDICE

### TABLAS DE RESULTADOS

Tabla N° 5 : Selección de Viscosímetro

	Saybolt	Redwood	Engler	Hoppler	Caida De Bola
<b>Materiales</b>	2	2	3	2	3
<b>Facilidad de construcción</b>	2	3	4	2	2
<b>Operatividad</b>	3	2	3	3	3
<b>Mantenimiento</b>	2	3	3	3	3
<b>Costo</b>	3	2	3	3	2
<b>Total</b>	12	12	16	13	13

Fuente: Elaboración propia, por el autor.

Tabla N°7: Tiempo de Esgurrimento

Temperatura (°C)	Tiempo (seg)
55	389.28
65	287.96
75	204.00
85	159.00

Fuente: Elaboración propia, por el Autor

Tabla N°8: determinacion de°E

Temperatura (°C)	°E
55	7.486
65	5.538
75	3.778
85	3.058

Fuente: Elaboración propia, por el Autor

Tabla N°9: determinacion de°E

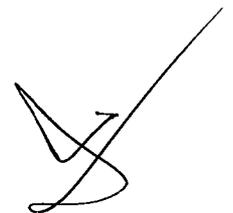
Temperatura (°C)	v (cm <sup>2</sup> /s)
55	0.5388
65	0.3934
75	0.2595
85	0.2029

Fuente: Elaboración propia, por el Autor

Tabla N°10: Viscosidad absoluta

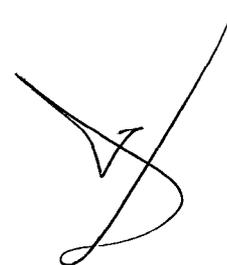
T (°C)	v (cm <sup>2</sup> /s)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	μ (cp)
55	0.5388	0.888	0.4784
65	0.3934	0.883	0.3474
75	0.2595	0.879	0.2281
85	0.2029	0.873	0.1771

Fuente: Elaboración propia, por el Autor

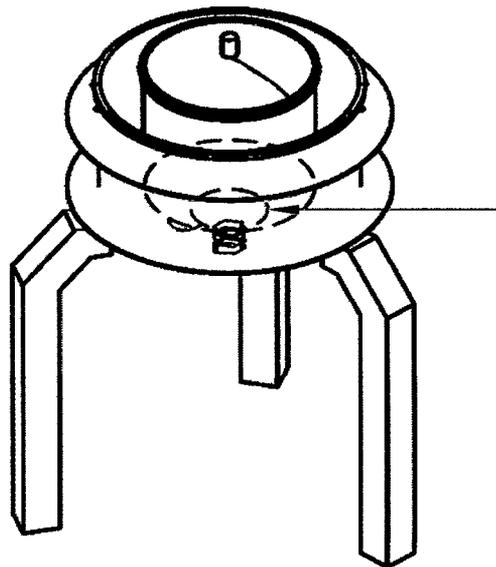
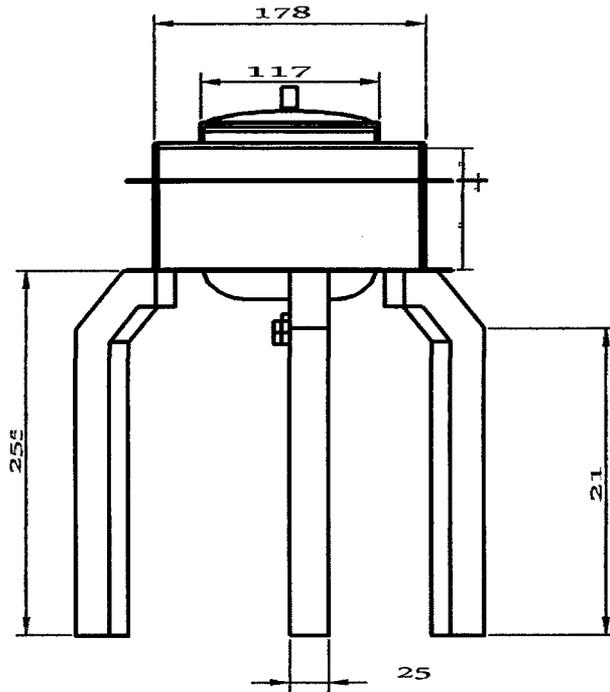


## MANUAL DE FUNCIONAMIENTO

- Verificar que el equipo este completamente limpio, caso contrario limpiarlo con soda caustica para eliminar todo tipo de desecho grasoso.
- Ubicar el equipo en zona horizontal verificando que no exista inclinaciones y si es posible con la ayuda de un nivel.
- Adicionar agua en la zona anular del equipo para su posterior calentamiento que servirá como baño térmico (baño maria) para calentar la muestra.
- Encender el interruptor verificando que la luz se encuentre encendida para dar inicio al calentamiento.
- Colocar la guía del obturador (tapón de salida del líquido) antes de adicionar el líquido en el estudio.
- Luego de colocar el líquido en el estudio poner la tapa y posteriormente el termómetro que indicara la temperatura de la muestra.
- Luego de haber realizado la práctica correspondiente verificar que todo el líquido que todo el líquido haya sido evacuado.
- Evacuar el líquido del baño maria teniendo en cuenta que se encuentra caliente para las precauciones del caso.
- Limpiar el recipiente interno donde se encuentra la muestra con papel tisú o una esponja evitando que quede muestra o residuo.
- Guardar el quipo en un lugar fresco y seco igual que el termómetro y el tubo rotulador debidamente protegidos.

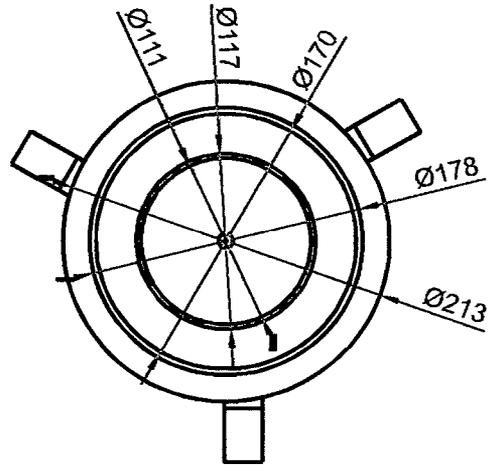
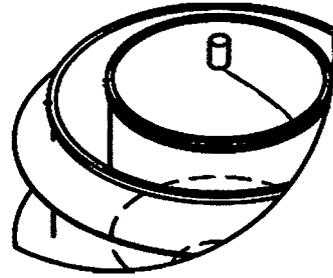
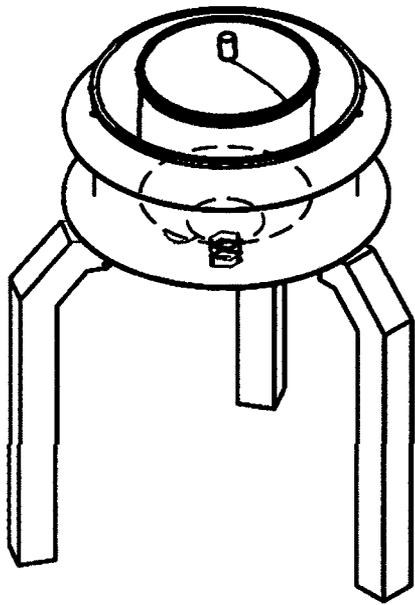


PLANOS DEL EQUIPO CONSTRUIDO



$\text{Ø } 2.4 \text{ mm}$

	DIBUJÓ	REVISÓ	APROBÓ	FORMATO	UNI.DIM.	ESCALA	
FECHA	01-04-14	01-04-14	01-04-14	A-4	mm	1:1	
NOMBRE	R.Portales	J.López	J. López				
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO			VISCOSIMETRO				
							N° 3 - 1
			HOJA	1	4		
1/1	2	5					
	3	6					



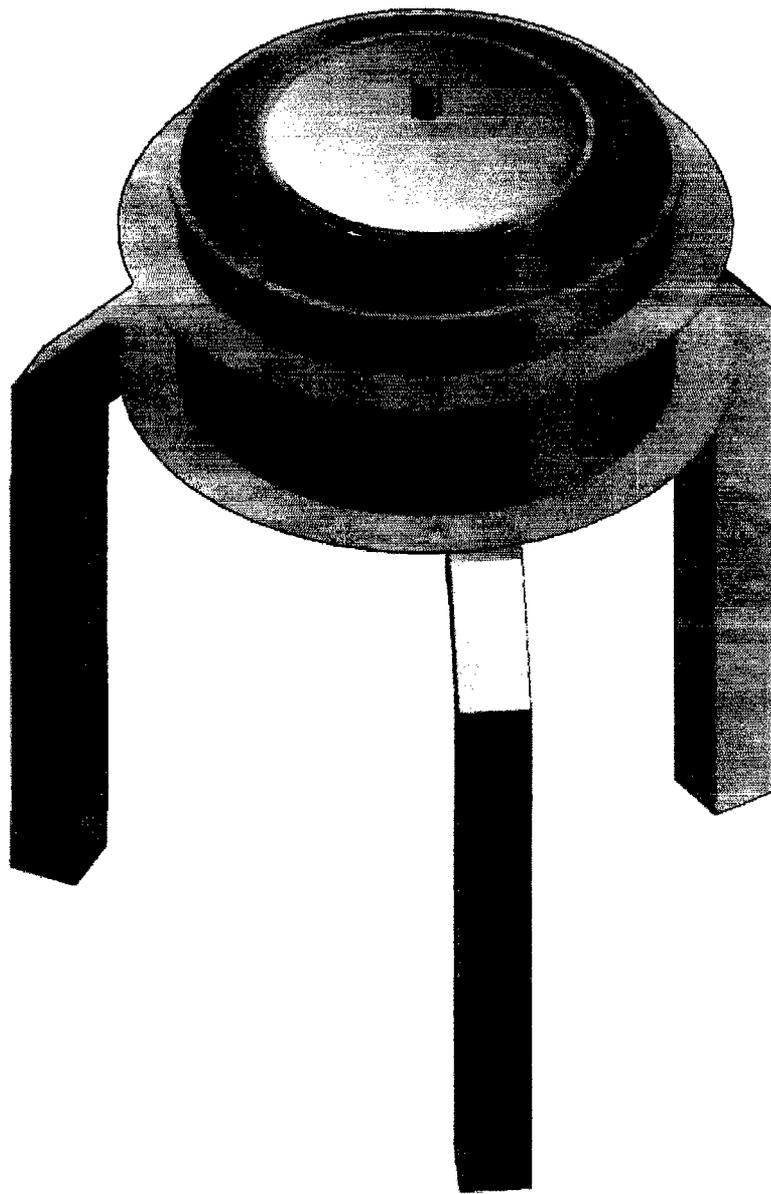
	DIBUJÓ	REVISÓ	APROBÓ	FORMATO	UNI.DIM.	ESCALA
FECHA	01-04-14	01-04-14	01-04-14	A-4	mm	1:1
NOMBRE	R.Portales	J.López	J. López			

UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DEL CALLAO

~~VISCOSIMETRO~~

N° 3 - 2

N° HOJA	IND.MOD.	
	1	4
1/1	2	5
	3	6



	DIBUJÓ	REVISÓ	APROBÓ	FORMATO	UNI.DIM.	ESCALA			
FECHA	01-04-14	01-04-14	01-04-14	A-4	mm	1:1			
NOMBRE	R.Portales	J.López	J. López						
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO			VISCOSIMETRO				N°	IND.MOD.	
							HOJA	1	4
N°3 - 3			80		2	5			
					1/1	3	6		

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 01

Tabla N° 1: Unidades de Viscosidad Dinámica

Sistema de Unidades	Unidades de Viscosidad dinámica
Sistema Internacional (SI)	$N.s / m, Pa.s, \text{ o } Kg / (m.s)$
Sistema Británico de Unidades	$(lb.s) / pie^2 \text{ o } slug / (pie.s)$
Sistema c.g.s	$poise = dina.s / cm^2 = g / (cm.s) = 0.1 Pa.s$ Centipoise= poise/100

Fuente: Mecánica de Fluidos, Mott Robert (1996).

Tabla N° 2: Unidades de Viscosidad Cinemática.

Sistema de unidades	Unidades de viscosidad cinemática
Sistema Internacional (SI)	$m^2/s$
Sistema Británico de unidades	$pie^2/s$
Sistema c.g.s.	$stoke = cm^2/s = 1 \times 10^{-4} m^2/s$

Fuente: Mecánica de Fluidos, Mott Robert (1996).

Tabla N° 3: Ecuaciones Empíricas para Fluidos No Newtonianos

Sistema de Unidades	Unidades de Viscosidad dinámica
Sistema Internacional (SI)	$N.s / m, Pa.s, \text{ o } Kg / (m.s)$
Sistema Británico de Unidades	$(lb.s) / pie^2 \text{ o } slug / (pie.s)$
Sistema c.g.s	$poise = dina.s / cm^2 = g / (cm.s) = 0.1 Pa.s$ Centipoise= poise/100

Fuente: Mecánica de Fluidos, Mott Robert (1996).

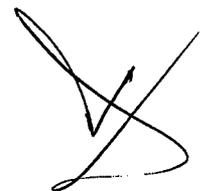


Tabla N°4: Constantes A y B.

Viscosidad	A	B
Saybolt	0.22	180
Redwood	0.26	171
Engler	0.147	374

Fuente: Perry, (1986)

Tabla N° 05. Grado de viscosidad SAE de aceites para motor.

Grado SAE	Viscosidad cinemática a 100°C	
	Valor Mínimo	Valor Máximo
<b>Aceites Multigrados</b>		
0W	3,8	-----
5W	3,8	-----
10W	4,1	-----
15W	5,6	-----
20W	5,6	-----
25W	9,3	-----
<b>Aceites Monogrados</b>		
20	5,6	< 9,3
30	9,3	< 12,5
40	12,5	< 16,3
50	16,3	< 21,9
60	21,9	< 26,1

Fuente:(NTP, 2008)

Tabla N°6: Relacion entre grado Engler y SAE

Relacion entre la viscosidad SAE y el grado Engler de viscosidad						
VISCOSIDAD (a 50°C)						
SAE	10	20	30	40	50	60
°E	3-5	5-7	7-9	9-12	12-19	19-27

Fuente: Normas ASTM, 2002

## ANEXO 02

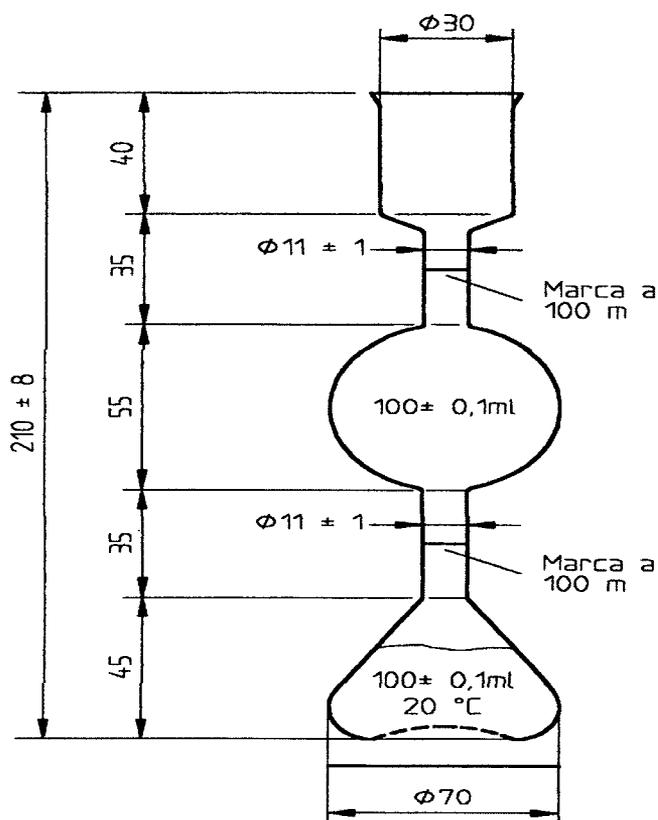
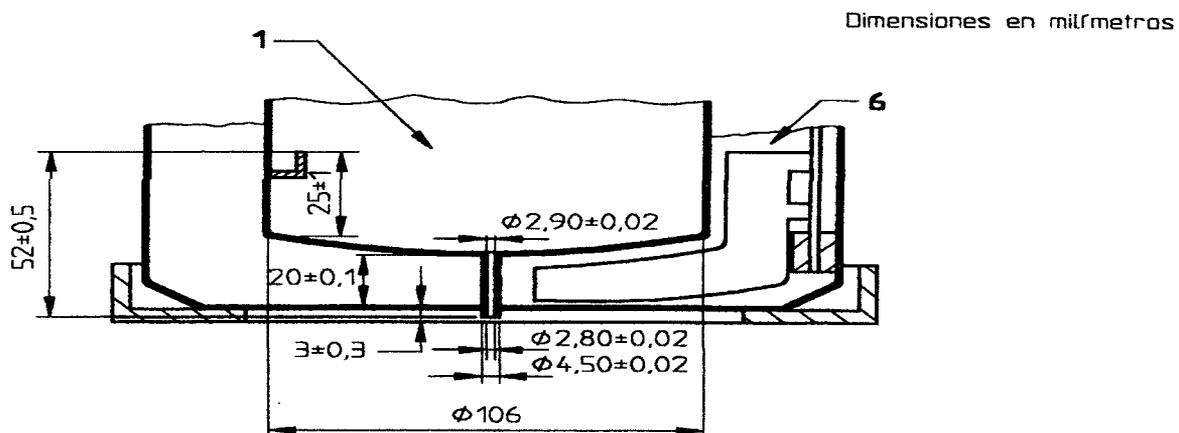
### CARTA DE CONVERSIÓN DE LA VISCOSIDAD A CUALQUIER TEMPERATURA

SEGUNDOS SEGUNDOS		GRADOS SEGUNDOS SEGUNDOS		SEGUNDOS SEGUNDOS	
SAYBOLT REDWOOD		ENGLER		SAYBOLT REDWOOD	
CINEMATICA UNIVERSAL No 1		FUROL No 2		CINEMATICA	
cSt	SSU	(standard)	°E	(admiralty)	cSt
2	32	SR No 1	1.15		2
2.5		33	1.20		2.5
3	35		1.25		3
3.5		35	1.30		3.5
4	40		1.35		4
4.5		40	1.40		4.5
5	45		1.50		5
6		45	1.60		6
7	50		1.70		7
8		50	1.80		8
9	55		1.90		9
10	60		2		10
	65				
	70				
15	80		2.5		15
20	90		3		20
25	100		3.5		25
30			4		30
35	150		4.5		35
40		150	5	SSF	40
45	200		6	25	45
50		200	7		50
60	250		8	30	60
70	300		9		70
80	350		10	35	80
90	400			40	90
100	450			45	100
	500		15	50	
	600			60	
150	700		20	70	150
	800			80	
200	900		25	90	200
	1000		30	100	
250		1000	35		250
300			40	150	300
350	1500		45		350
400		1500	50	150	400
450	2000		60	200	450
500		2000	70	250	500
600	2500		80	300	600
700	3000		90	350	700
800	3500		100	400	800
900	4000		110	450	900
1000	4500		130		1000

Fuente: ALBARRACIN, (1985)

## ANEXO 03

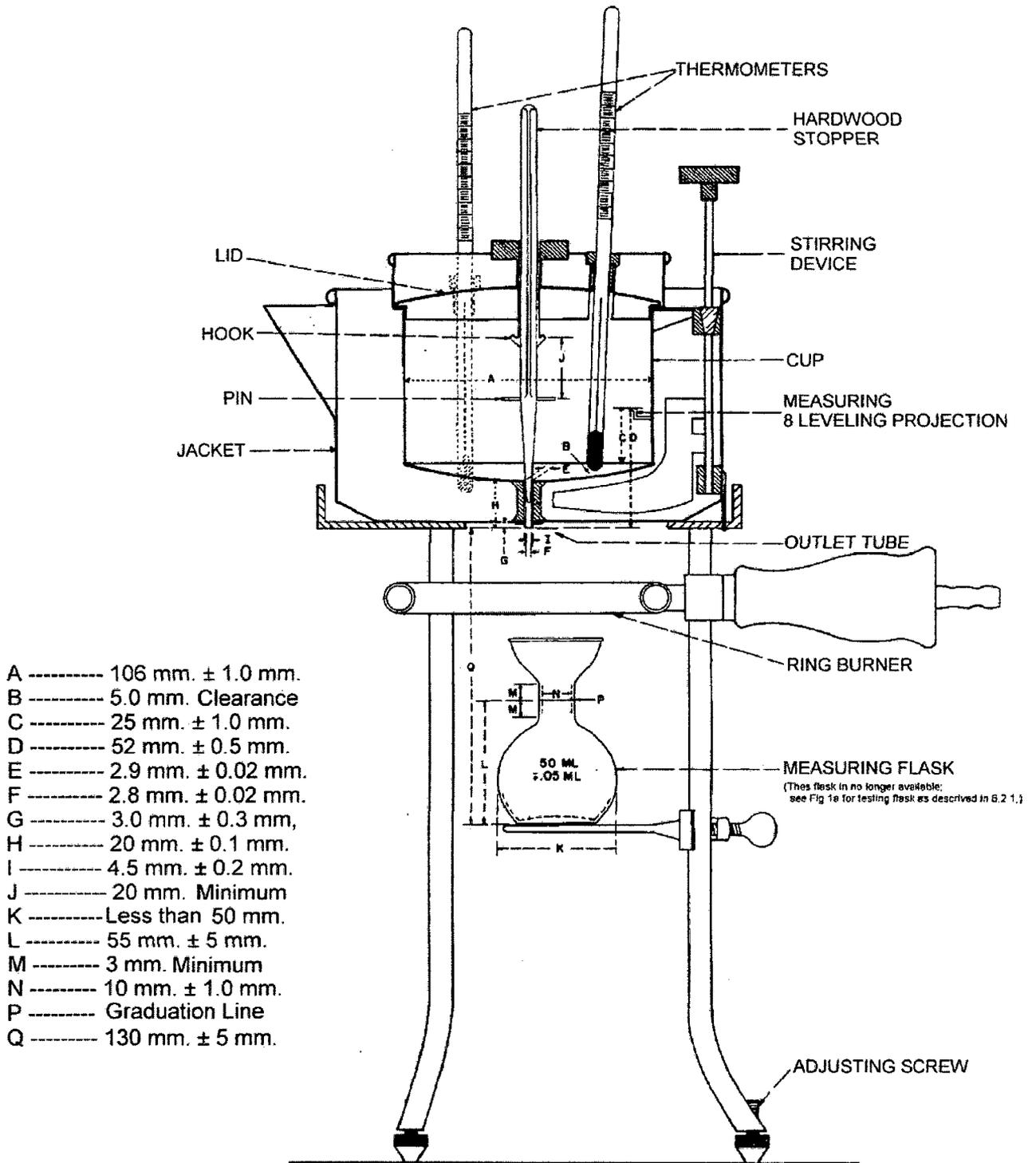
### MEDIDAS DE VISCOSIMETRO I



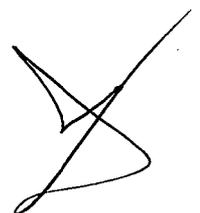
Fuente : Linetronic-technologie, (2003)

# ANEXO 04

## MEDIDAS DE VISCOSIMETRO I

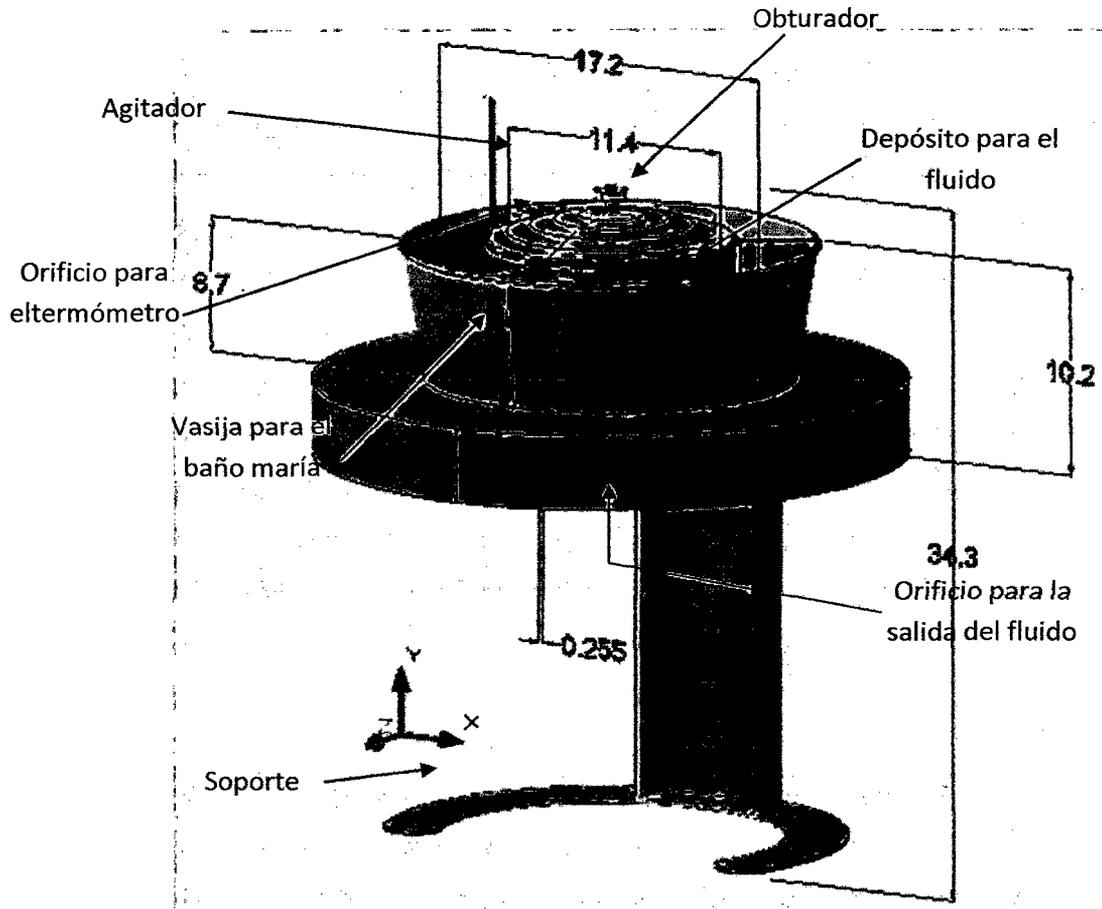


Fuente : Linetronic-technologie, (2003)



ANEXO 05

VISCOSIMETRO DE ENGLER FIE-UNAC



Fuente : elaboración propia ,por el autor