



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DISEÑO DE PROTOTIPO DE VISCOSÍMETRO Y VALIDACIÓN DE USO EN
FLUIDOS DE ALTA, MEDIA Y BAJA VISCOSIDAD

Autora

Carmen Elena Galán Nieto

Año
2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DISEÑO DE PROTOTIPO DE VISCOSÍMETRO Y VALIDACIÓN DE USO EN
FLUIDOS DE ALTA, MEDIA Y BAJA VISCOSIDAD

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniera Agroindustrial y de Alimentos.

Profesor Guía

M. Sc. Santiago Mauricio Olmedo Ron

Autora

Carmen Elena Galán Nieto

Año

2018

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GÚIA

“Declaro haber dirigido el trabajo, DISEÑO DE PROTOTIPO DE VISCOSÍMETRO Y VALIDACIÓN DE USO EN FLUIDOS DE ALTA, MEDIA Y BAJA VISCOSIDAD, a través de reuniones periódicas con el estudiante Carmen Elena Galán Nieto, en el semestre 2018-1, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Santiago Mauricio Olmedo Ron

Máster en Gestión de la Producción

CI: 1705972394

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, DISEÑO DE PROTOTIPO DE VISCOSÍMETRO Y VALIDACIÓN DE USO EN FLUIDOS DE ALTA, MEDIA Y BAJA VISCOSIDAD, del estudiante Carmen Elena Galán Nieto, en el semestre 2018-1, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Héctor Abel Palacios Cabrera

Ph. D. Tecnología de Alimentos

CI: 0912277480

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”

Carmen Elena Galán Nieto

CI: 1715954077

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por permitirme culminar mis estudios, a mis compañeros de trabajo por su apoyo y paciencia; y a los profesionales involucrados por permitir el desarrollo de esta investigación mediante sus aportaciones.

DEDICATORIA

A mis padres Ma. Eugenia y Luis, a mis hermanas Sara y Angela por su amor y dedicación; a mi novio Leonidas y a mi tutor Santiago Olmedo por su paciencia y apoyo incondicional durante este proyecto y a cada uno de mis amigos por los grandes momentos compartidos.

RESUMEN

La Ley de la viscosidad de Isaac Newton, en la cual afirmó que la fuerza y el esfuerzo cortante con la que se deforma un fluido. La viscosidad tiene la unidad de medida en Centipoise (Cp), en la industria alimentaria es de suma importancia conocer la viscosidad en el proceso de fabricación, para el dimensionamiento de los equipos y control del mismo; para lograr alcanzar la mejor calidad del producto y conocer sus características reológicas como: color, densidad, estabilidad, peso molecular y contenido de sólidos. Por lo que el diseño y construcción de un prototipo para la medición de la viscosidad en fluidos de alta, media y baja viscosidad tiene una alta trascendencia en el cambio de la matriz productiva del Ecuador, ya que se impulsa al producto nacional, motivo por el cual la creación de este prototipo tiene un valor agregado hacia la industrial. Los objetivos del estudio fueron: 1) Diseñar un prototipo de viscosímetro para validación de uso en fluidos de alta, media y baja viscosidad. 2) Diseñar prototipos de viscosímetros para tres tipos de fluidos. 3) Evaluar los factores de altura, diámetro, volumen, temperatura del fluido a analizar y tiempo apreciable en la medida del equipo. 4) Validar el diseño de los tres prototipos de viscosímetros con un viscosímetro comercial. El prototipo fue diseñado y construido en polimetilmetacrilato por sus propiedades de transparencia alrededor del 93%, para la base de la estructura y en vidrio para el equipo. Se utilizó un análisis estadístico de arreglo factorial para la selección del mejor prototipo para cada tipo de fluido para la miel el prototipo con mayor diámetro (2 cm), para la leche el viscosímetro con menor diámetro (0,7 cm) y la pulpa con el equipo de diámetro intermedio (1 cm). Logrando confirmar la hipótesis nula H1: La viscosidad de un fluido determina el dimensionamiento de los tres viscosímetros a construir. Finalmente se realizó la validación de cada uno de los prototipos con el viscosímetro comercial de Brookfield obteniendo un error experimental menor a 1%. Concluyendo que el equipo construido tiene una precisión de medición similar a un equipo comercial.

ABSTRACT

The law of the viscosity of Isaac Newton, in which we affirm that the force and the shearing force with which a fluid is deformed. The viscosity has the unit of measurement in Centipoise (Cp), in the food industry it is the most important in the viscosity in the manufacturing process, for the sizing of the equipment and its control; to achieve the best quality of the product and know its rheological characteristics such as: color, density, weight, molecular weight and solids content. Why design and construction of a prototype for the measurement of viscosity in fluids of high, medium and low density has a high importance in the change of the productive matrix of Ecuador, which is driven to the national product, which is why the creation of this prototype has an added value for the industry. The objectives of the study were: 1) Design a viscometer prototype for validation of use in high, medium and low density fluids. 2) Design viscometer prototypes for three types of fluids. 3) Evaluate the factors of height, diameter, volume, temperature of the fluid to analysis and appreciable time in the measurement of the equipment. 4) Validate the design of the three viscometer prototypes with a commercial viscometer. The prototype was designed and constructed in polymethyl methacrylate for its properties of transparency around 93%, for the base of the structure and in the glass for the equipment. A statistical analysis of factorial arrangement was made for the selection of the best prototype for each type of fluid for honey, the prototype with the largest diameter (2 cm), for the milk the viscometer with the smallest diameter (0.7 cm) and the pulp with the equipment of intermediate diameter (1 cm). Confirming the null hypothesis H1: The viscosity of a fluid determines the sizing of the three viscometers to be built. Finally, the validation of each of the prototypes was performed with the Brookfield commercial viscometer, obtaining an experimental error of less than 1%. Concluding that the built equipment has a measurement accuracy similar to a commercial equipment.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	4
1.1.1. Objetivo General.....	4
1.1.2. Objetivos Específicos.....	4
2. MARCO TEORICO.....	4
2.1. Viscosidad de los fluidos	4
2.1.1. Ley de Newton de la viscosidad	5
2.1.2. Viscosidad dinámica o absoluta.....	7
2.1.3. Viscosidad cinemática	7
2.1.4. Variación de la viscosidad con la temperatura	8
2.1.5. Efecto de la presión sobre la viscosidad.....	8
2.2. Factores que afectan la conducta reológica	9
2.2.1. Temperatura	9
2.2.2. Rango de corte o gradiente de velocidad	11
2.2.3. Tiempo.....	11
2.2.4. Condiciones de medida	12
2.3. Tipos de fluidos.....	12
2.3.1. Fluidos Newtonianos	13
2.3.2. Fluidos no newtonianos	14
2.3.3. Medición de la viscosidad.....	16
2.3.4. Viscosímetro	16
2.4. Tipos de Viscosímetros.....	16
2.4.1. Viscosímetro de tubo capilar	17
2.4.2. Viscosímetros rotatorios	19
2.4.3. Viscosímetros empíricos.....	20
2.4.4. Viscosímetro de Hopper	21
3. METODOLOGIA	22
3.1. Diseño y construcción del viscosímetro	22
3.2. Validación del viscosímetro.....	26

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
4.1. Diseño y Construcción del viscosímetro	27
4.2. Diseño Experimental.....	33
4.3. Validación del viscosímetro.....	41
4.4. Manual del Equipo.....	44
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
5.1. Conclusiones	54
5.2. Recomendaciones.....	55
REFERENCIAS	57
ANEXOS	66

1. INTRODUCCIÓN

La viscosidad inicia con el concepto de fluido ideal, donde Isaac Newton (1642-1727) decide clasificar los fluidos en ideales y no ideales (Swaan, 1999, p.9). Para alcanzar esta división propuso la Ley de la Viscosidad de Newton; la cual afirmó que la fuerza y el esfuerzo cortante con la que se deforma un fluido, es directamente proporcional a la viscosidad (Streeter, 2000, p.18) y (Erich, Piedra y Olmo, 2015, p.15). Según el principio de un fluido y bajo las cualidades que debe tener un flujo no ideal (fluidos no newtoniano) y un fluido ideal (fluido newtoniano) (Medina y Ovejero, 2010, p.3) y (Kaless, 2016, p.59).

Un fluido ideal es aquel que es incompresible y no tiene rozamiento, por lo que en la práctica, ningún fluido es ideal, ya que todos los fluidos poseen viscosidad. En el caso que el fluido tenga una viscosidad muy baja se lo puede considerar como un fluido newtoniano (Mott, 2006, p.30) y (Olmo, Piedra, Rojas, Madrigal, y Erich, 2015, p.2). Para medir este parámetro se utilizan los viscosímetros, los cuales son instrumentos utilizados para la medición de la viscosidad dinámica o cinemática de un fluido real (Creus, 2010, p.333) y (Caputo et. al., 2015, p.81). La viscosidad es una propiedad fisicoquímica propia de los fluidos la cual representa la resistencia de los fluidos al movimiento (Cengel, 2015, p.112).

El viscosímetro más antiguo fue desarrollado por el químico alemán Wilhelm Ostwald (1853-1932), llamado viscosímetro de Ostwald en su honor, lo creó para la medida de viscosidades relativas en fluidos newtonianos (Valenzuela, 1994, p.287) y (Riaño, 2015, p.65). La viscosidad permanece constante, aunque cambie la fuerza ejercida, este instrumento utiliza como fuerza impulsora la gravedad y se fundamenta en la Ley de Poiseuille (Findlay, 1979, p.100) y (Luengo, Minazzoli, Angelo, Cachile y Freytes, 2017, p.92).

En la industria es de suma importancia conocer las propiedades fisicoquímicas de las sustancias con las que se trabaja, para poder obtener mejores

resultados en cuanto al rendimiento y productividad del proceso; en especial la viscosidad (Fennema, 2010, p.8) y (Calsamigial, Castillejos, Astiz y Baucells, 2015, p.96). La viscosidad es un indicador cuantitativo en la industria petroquímica, textil, farmacéutica, de pinturas, de aceites y de alimentos (Badui, 2006, p.202) y (Bruus, 2015, p.28). A nivel industrial existen diferentes equipos para la medición de la viscosidad, con diseños, modelos y marcas variadas (Creus, A., 2010, p.335) y (Caputo et. al., 2015, p.81). Los resultados pueden variar ya que cada equipo los reporta en diferentes unidades, sin embargo, al transformarlos se podrá comprobar que todos se rigen a las mismas leyes de física (Findlay, 1979, p.107) y (Luengo, Minazzoli, Angelo, Cachile y Freytes, 2017, p.85).

Para la industria alimentaria es de suma importancia conocer la viscosidad de un producto, ya que ayuda a mantener un control durante la manufactura y tomar decisiones sobre la calidad del producto final (Martín, 1993, p.66) y (Domínguez y Parzanese, 2016, p.4). Para llevar un control de calidad en las características fisicoquímicas del producto, desde el inicio de la transformación, producto en proceso y producto final (Martín, 1993, p.64) y (Domínguez y Parzanese, 2016, p.2). El conocimiento de la viscosidad ayuda a detectar cambios en los aspectos físicos del producto como color, estabilidad, densidad y sólidos totales alterando la vida útil del producto (Sierra, Pérez, Gómez, y Morante, 2010, p.178) y (Herrero, 2016, p.95). En definitiva, la viscosidad es un parámetro vital de control en la calidad de los productos en la industria de alimentos líquidos o semilíquidos.

Existen varios factores que influyen en la viscosidad: El primero es la temperatura, ya que en un líquido la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura (Mott, 2006, p.33) y (Olmo, Piedra, Rojas, Madrigal, y Erich, 2015, p.2). El segundo factor es la estructura molecular debido a que los fluidos poseen moléculas más grandes con formas irregulares, este efecto generará una mayor viscosidad (Sobrino, 2012, p.20) y (Mariño, 2015, p.20). El tercer factor es la fuerza de cohesión y presión de las moléculas, donde el aumento

de una presión mecánica sobre el fluido aumenta la viscosidad. Este fenómeno obedece a un aumento en la resistencia de las moléculas al movimiento de disminuir la distancia entre ellas (Ramírez, 2006, p.33) y (Mariño, 2015, p.22).

En la construcción de un viscosímetro se debe considerar cuatro variables: altura, diámetro, volumen del fluido a analizar y tiempo apreciable en la medida del equipo (Coba, 2013, p.388). Las dimensiones del equipo dependen de la viscosidad del fluido, como es la altura de la estructura la cual será más larga o corta. Mientras que el diámetro del equipo por el cual pasará el fluido será más ancho o delgado, para permitir el movimiento del fluido a través del equipo (Solé, 2010, p.377). Debe considerarse también el volumen del fluido ya que el equipo tendrá una capacidad específica, y todos estos factores deberán estar en función al tiempo apreciable en la medida de la rapidez del paso del fluido por el equipo (Mott, 2006, p.35) y (Olmo, Piedra, Rojas, Madrigal, y Erich, 2015, p.2).

Se han realizado varias investigaciones para el diseño y construcción de viscosímetros. Se explican que para realizar el cálculo de la viscosidad se debe registrar el tiempo que tarda en caer el cuerpo; para posteriormente relacionar el tiempo total de caída con la viscosidad a través de una ecuación (Sobrino y Segovia, 2012, p.442). El funcionamiento es relativamente sencillo, ya que el fluido del que se requiere medir la viscosidad pasa a través del tubo del equipo y se calcula el tiempo de caída (Sobrino, 2012, p.19) y (Mariño, 2015, p.20). Se debe considerar que la viscosidad varía en función de las condiciones de presión y temperatura (Sohel y Estellé, 2017, p.1146). Los viscosímetros de tubos son instrumentos diseñados para medir las pérdidas por fricción que experimenta un fluido al pasar por un cilindro cuyas dimensiones son conocidas (Díaz y Ávila, 1998, p.63) y (Gómez, 2014, p.66).

Todo equipo utilizado en la industria debe ser validado antes de su uso, mediante un proceso de revisión que verifica que el equipo cumpla con las especificaciones requeridas y logre su propósito con la exactitud y precisión

necesaria (Soledad, 2011, p.11). Para la validación de un viscosímetro es necesario realizar medidas patrón con respecto a un viscosímetro comercial como método de referencia y comparar con el método alternativo. Al tener una repetibilidad menor al 1% y una reproducibilidad menor o igual al 2%, se considera que los resultados obtenidos en el método alternativo son efectivos, confiables y consistentes con los esperados (Llamosa, Meza y Botero, 2007, p.456) y (Durán, Gutiérrez y Prendes, 2016, p.39).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

- Diseñar un prototipo de viscosímetro para validación de uso en fluidos de alta, media y baja viscosidad.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Diseñar prototipos de viscosímetros para tres tipos de fluidos.
- Evaluar los factores de altura, diámetro, volumen, temperatura del fluido a analizar y tiempo apreciable en la medida del equipo.
- Validar el diseño de los tres prototipos de viscosímetros con un viscosímetro comercial.

2. MARCO TEORICO

2.1. Viscosidad de los fluidos

Un fluido es un cuerpo que tiene la propiedad de fluir, y carece de elasticidad y rigidez. En los líquidos las fuerzas intermoleculares permiten el libre movimiento de las partículas. Gracias, a esta propiedad al verter un líquido en

un recipiente este ocupará el volumen igual o parcial que su contenedor anterior (Duarte y Niño, 2004, p.7) y (Bautista, 2017, p.25).

Los líquidos a diferencia de los sólidos, tiene la capacidad del movimiento, es decir, cuando un líquido fluye por dos superficies planas esté se moverá en una sólo masa para permanecer atómica unido, por esta virtud se les atribuye la propiedad de la viscosidad (Findlay, 1979, p.101) y (Luengo, Minazzoli, Angelo, Cachile y Freytes, 2017, p.90). La viscosidad es la oposición que tienen las moléculas que conforman un líquido a separarse, es la resistencia de un líquido a deformarse, esto se debe a la fuerza de adherencia que tienen entre las moléculas de un mismo líquido por su estructura molecular (Mott, 2006, p.27) y (Olmo, Piedra, Rojas, Madrigal, y Erich, 2015, p.2).

Un fluido al tener moléculas más grandes tendrá mayor resistencia al desplazamiento porque presenta fuerzas intermoleculares fuertes, mientras que al tener moléculas más pequeñas tendrá menor fuerza de oposición al movimiento por presentar fuerzas intermoleculares débiles (Atkins y Paula, 2006, p. 161) y (Fernández y González, 2016, p.56). Un líquido con mayor resistencia a la deformación significa que es más viscoso.

La viscosidad es una característica presente en líquidos en movimiento, ya que al estar un fluido estático las moléculas no requieren interactuar entre ellas por lo que la viscosidad es nula (Pérez, 2012, p.13).

2.1.1. Ley de Newton de la viscosidad

La ley de Newton establece que existe un esfuerzo cortante en dirección tangencial a ciertos fluidos, lo cual es proporcional al cambio de la velocidad en relación a la distancia (Atkins y Paula, 2006, p.759) y (Fernández y González, 2016, p.60), la expresión matemática para la Ley de Newton de la viscosidad es:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Para lo cual, Newton supuso que un fluido que se encuentra entre dos placas, una fija y otra móvil con una velocidad moderada “v” el fluido se desplaza en un régimen laminar, con una velocidad en relación a la capa del fluido (Atkins y Paula, 2006, p.759) y (Fernández y González, 2016, p.80). Para lo cual se transfiere cierta cantidad de movimiento a la capa del fluido vecinal y esta a su vez lo arrastra al siguiente y así sucesivamente.

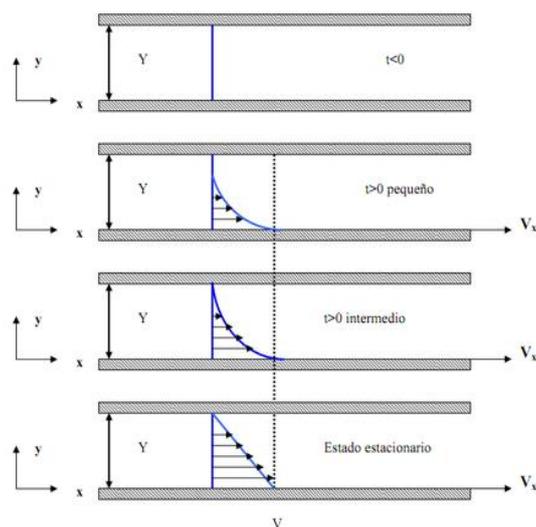


Figura 1. Esfuerzo Cortante de un fluido entre placas paralelas.

Tomado de (Ramírez, 2006, p.18).

Por acción de la fricción la velocidad de la capa irá disminuyendo con el roce de su capa vecina (Ramírez, 2006, p.18) y (Villacís, 2016, p.107). Como se muestra en la figura 1.

Experimentalmente la fuerza de fricción que ejerce una capa de un fluido es proporcional al área de contacto y gradiente de velocidad (Bertrán y Núñez, 2002, p.820) y (Casimiro, Rodríguez y Rojas, 2017, p.152).

Esta ley de Newton es aplicable para fluidos con régimen laminar, y se la conoce como una ley de transporte ya que la fuerza ejercida es la cantidad de movimiento transportado por una unidad de tiempo (Atkins y Paula, 2006, p.760) y (Fernández y González, 2016, p.65).

2.1.2. Viscosidad dinámica o absoluta

La viscosidad absoluta o dinámica, es designada como μ o η y en unidades del Sistema Internacional se utiliza el pascal-segundo Pa. s, o $\frac{Ns}{m^2}$, o $\frac{kg}{ms}$, o en el Sistema Cegesimal se utiliza el Poise (P) $1 \text{ poise} = 1 [P] = 10^{-1} [\text{Pa. s}] = [10^{-1} \frac{kg}{ms}]$ (Galán, 1987, p.62) y (Lizard, Terres, Vaca, Flores y Chávez, 2015, p.32).

Para un fluido Newtoniano se refiere al cociente del esfuerzo cortante y gradiente de velocidad al cual es sometido:

$$\mu = \tau \frac{dv}{dy} \quad (\text{Ecuación 2})$$

τ = Esfuerzo Cortante

μ = Viscosidad absoluta.

$\frac{dv}{dy}$ = Gradiente de Velocidad

O a su vez, la aplicación de la siguiente fórmula para aquellos fluidos cuya densidad es conocida:

$$\mu = \mu_{H2O} \frac{\rho t}{\rho_{H2O}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

μ = Viscosidad cinemática.

ρ = Densidad

t = Tiempo

2.1.3. Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática, designada como ν y según el Sistema Internacional se mide en metros cuadrados sobre segundo ($\frac{m^2}{s}$) o en el Sistema Cegesimal se utiliza el stokes (St) (Mott, 1996, p.25) y (Vargas, et.al., 2016. p. 321).

Se la denomina así, porque la fuerza ejercida no está involucrada en las dimensionan, teniendo únicamente la longitud y el tiempo. Por eso la manera convencional que define la viscosidad cinemática es:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{Ecuación 4})$$

v = viscosidad cinemática

μ = viscosidad dinámica

ρ = densidad

2.1.4. Variación de la viscosidad con la temperatura

La viscosidad tiene una alta dependencia de la temperatura a la cual se encuentre el fluido. La mayoría de líquidos reduce su viscosidad al aumentar la temperatura, ya que el calor dilata los espacios intermoleculares y esto genera un menor gradiente de movimiento (Páez, Alvis y Arrázola, 2017, p.186). Al tener una resistencia al movimiento, sabemos que la velocidad y la temperatura son directamente proporcionales.

Los materiales disminuyen su viscosidad de manera exponencial, con variaciones de hasta un 10% por cada °C modificado (Ramírez, 2006, p.23) y (Villacís, 2016, p.108). Por ejemplo, la sensibilidad a la temperatura del agua es de 3% por cada grado centígrado de temperatura ambiente, por lo que para tener una precisión del 1% se requiere regular la temperatura en un 0.3°C (Ramírez, 2006, p.23) y (Villacís, 2016, p.108). Mientras más viscoso sea el líquido, se debe tomar mayores controles en la temperatura al momento de medir la viscosidad del fluido (Monsalvo, Miranda, Romero y Muñoz, 2014, p.79).

2.1.5. Efecto de la presión sobre la viscosidad

La presión de un fluido, es la cantidad de fuerza que se ejerce sobre una sustancia y esta se calcula bajo la fórmula:

$$p = \frac{F}{A} \quad (\text{Ecuación 5})$$

p = presión

F = fuerza

A = área

Al aumentar la presión en un fluido la viscosidad aumenta exponencialmente con este, el agua por debajo de los 30°C es la única excepción, ya que disminuye al primer instante hasta alcanzar un comportamiento normal (Ramírez, 2006, p.22) y (Villacís, 2016, p.110). En caso que la presión difiera en 1 bar de la presión atmosférica, los cambios en la viscosidad es mínima (Ramírez, 2006, p.22) y (Villacís, 2016, p.110). Por esta razón el uso de este factor apenas se considera, sin embargo en industrias de fluidos muy viscosos donde se toman medidas a elevadas presiones estas cambiaran con el paso del proceso. Para presiones bajas la viscosidad, solo depende de la temperatura (McCabe y Smith, 1973, p.52) y (Villaseca, 2014, p.200)

2.2. Factores que afectan la conducta reológica

La viscosidad es una de las propiedades que se miden más fácil de algunos materiales, por lo que con el uso de esta herramienta se puede caracterizar un material con los siguientes factores (Parisienne, 1987, p.44) y (Villaseca, 2014, p. 200):

2.2.1. Temperatura

A medida que la temperatura disminuye en un fluido, la fuerza de cohesión que es la responsable de la resistencia al movimiento se aumenta, o viceversa ya que la temperatura es directamente proporcional a la viscosidad, por lo que podemos concluir que al aumentar la temperatura, la viscosidad de un líquido disminuye (Michaelides, 2014, p.152).

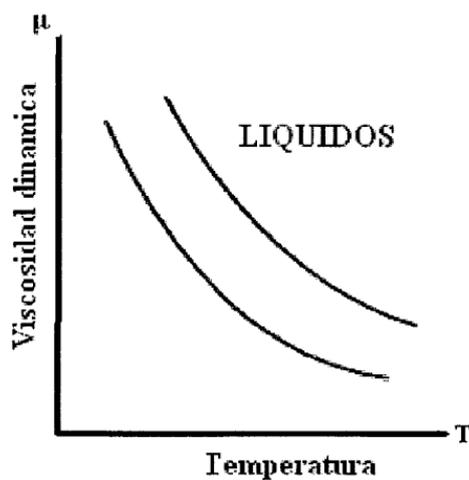


Figura 2. Comportamiento de la viscosidad de líquidos.

Tomado de (Mott, 1996, p.35).

Los gases tienen un comportamiento diferente a los líquidos, porque en estos la viscosidad aumenta al aumentar la temperatura, por lo que no son directamente proporcional, como son los líquidos; en la figura 2 se puede observar el comportamiento de los gases en relación a la temperatura (Fox y Donald, 1989, p. 46) y (Soriano y Díaz, 2015, p.108).

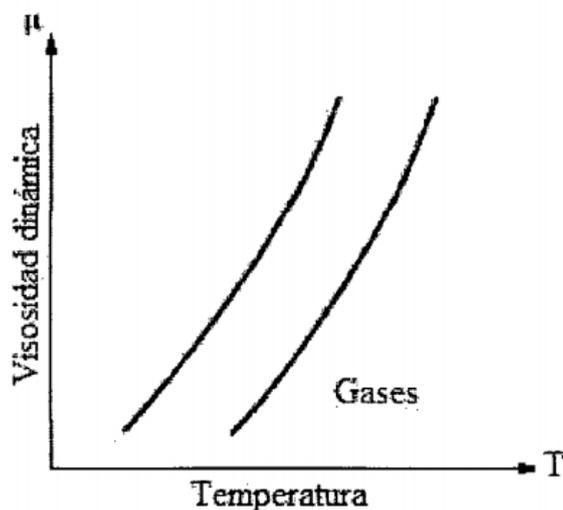


Figura 3. Comportamiento de la viscosidad de gases.

Tomado de (Mott, 1996, p.35).

2.2.2. Rango de corte o gradiente de velocidad

Los fluidos no newtonianos son la excepción, para la apreciación del gradiente de velocidad como una aplicación a los datos geológicos. Cuando un material es sometido a una variedad de rangos de corte durante su procesamiento, es necesario conocer su viscosidad para saber la proyección del rango de corte (Salvador, 2012, p.43) y (Soriano y Díaz, 2015, p.108).

Para producir un gradiente de velocidad de un fluido, es necesario el movimiento del fluido por un objeto con pendiente, siendo constante la capacidad de deslizamiento del fluido (Díaz, 2006, p.128) y (Soriano y Díaz, 2015, p.112). Como ejemplos sometidos a grandes variaciones de gradiente son: cosméticos, pinturas, sangre del sistema dilatorio humanos y los revestimientos.

2.2.3. Tiempo

El tiempo de movimiento de un fluido se ve afectado, por la apreciación para ser medido, esto depende del tipo de algunos materiales, sin embargo pueden pasar cambios en la viscosidad por el tiempo aunque el material no sea una superficie porosa o esté cortada (Fox y Donald, 1989, p. 48) y (Soriano y Díaz, 2015, p.108).

La viscosidad real de un material se ve afectada significativamente por factores como: temperatura, presión, conducta reológica, rango de corte o gradiente de velocidad y el tiempo, siendo la temperatura el factor más interesante desde el punto de vista reológico.

La reología desde la física es la relación que influye el comportamiento de un material entre el esfuerzo y la deformación del mismo (Avallone, 1992, p.83) y (Talens, Cortés y Fuentes, 2017, p.32).

2.2.4. Condiciones de medida

Las condiciones de medida, incluyen todas las circunstancias que pueden afectar la medida de la viscosidad y alterar los resultados. Por lo que es importante conocer y controlar la mayor cantidad de factores como el medio ambiente de la muestra que se va a ensayar (Creus, 2010, p.334) y (Caputo et. al., 2015, p.80).

Las técnicas para medir la viscosidad deben de estar heridas a variables como: modelo del equipo en que se realizará las mediciones (viscosímetros). Preparación de la muestra, tamaño, temperatura, densidad. Estas variables no sólo afectan a la precisión en la medición, sino la viscosidad inicial de la muestra antes de ser medido (Mott, 2006, p.34) y (Olmo, Piedra, Rojas, Madrigal, y Erich, 2015, p.2).

Otros factores obvios que pueden considerarse son: material de muestra puede ser sensible a las condiciones atmosféricas. Entonces se debe considerar la presión atmosférica como un factor favorable para el ensayo. Otro factor que puede variar la precisión es la homogeneidad de la muestra, lo ideal es tener muestras homogéneas para obtener resultados más resistentes (Páez, Alvis y Arrázola, 2017, p.187).

2.3. Tipos de fluidos

Se conoce como fluidos a aquellas sustancias que se deforman al aplicar una presión o tensión superficial, cada fluido tiene un comportamiento diferente al

recibir fuerzas externas, esto se debe a la viscosidad presente en los fluidos y estos se clasifican en (Ramírez, 2006, p.35) y (Villacís, 2016, p.112):

2.3.1. Fluidos Newtonianos

Los fluidos newtonianos son aquellos cuya viscosidad se mantiene constante, por lo que el esfuerzo cortante es directamente proporcional al gradiente de velocidad. En la figura 4 (A) se representa el comportamiento de un fluido newtoniano en relación la tensión de corte (τ) y gradiente de velocidad (γ). Se observa que la viscosidad dinámica del fluido es constante, mientras el gradiente de velocidad varía (Mott, 1996, p.26) y (Moreno y Cervera, 2015, p.128). En la figura 4 (B) se representa la relación entre la viscosidad dinámica (μ) y el gradiente de velocidad (γ).

Los fluidos newtonianos respetan la Ley de Newton, por lo que la viscosidad sólo depende de la temperatura (Mott, 1996, p.26) y (Moreno y Cervera, 2015, p.128).

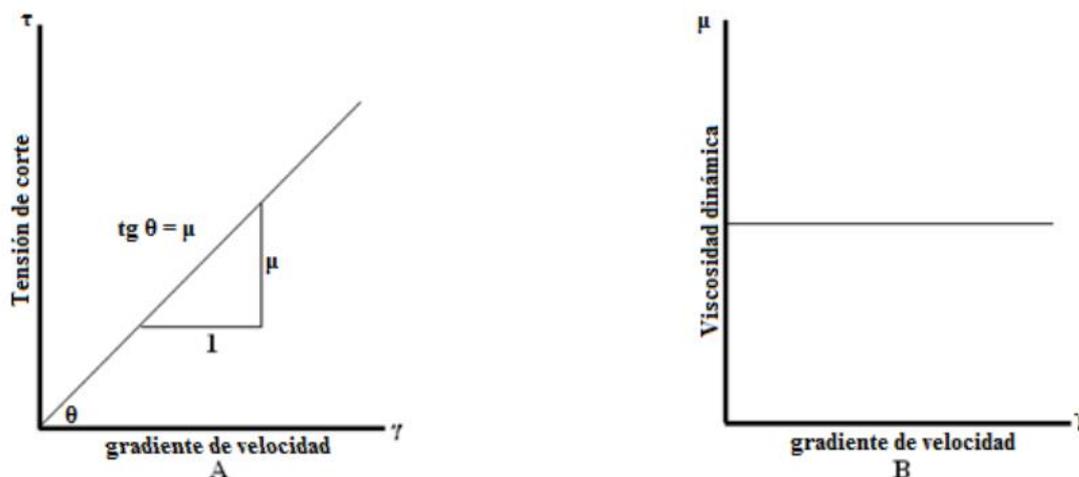


Figura 4. Curvas características de un fluido newtoniano.

Tomado de (Mott, 1996, p.36).

2.3.2. Fluidos no newtonianos

Los fluidos no newtonianos son aquellos que no cumplen la Ley de Newton de la viscosidad, por lo que la relación entre la tensión de corte (τ) y gradiente de velocidad (γ) no son lineales. Varios científicos en el pasar del tiempo han desarrollado diferentes ecuaciones empíricas para comprender la relación entre (τ) y ($\gamma = \frac{dv}{dy}$); a continuación en la tabla 1 se detallan estos modelos matemáticos (Santillán, 2001, p.87) y (Moreno y Cervera, 2015, p.130).

Tabla 1.

Ecuaciones empíricas para fluidos no newtonianos

Modelo	Ecuación	Parámetros
Brigham	$\tau = \tau_0 + (\mu_p * \gamma)$	τ_0, μ_p
Ostwald – Waele	$\tau = k * (\gamma)^n$	n, k
Herschel - Bulkley	$\tau = \tau_0 + k * \gamma^n$	τ_0, k

Tomado de (Irving, 1995, p.25).

Nota: τ = tensión de corte, τ_0 = límite de esfuerzo, k = factor de consistencia, γ = gradiente de velocidad, n = índice de flujo, μ = viscosidad dinámica.

2.3.2.1. Clasificación de fluidos no newtonianos

Los fluidos no newtonianos se pueden clasificar en dos grandes grupos:

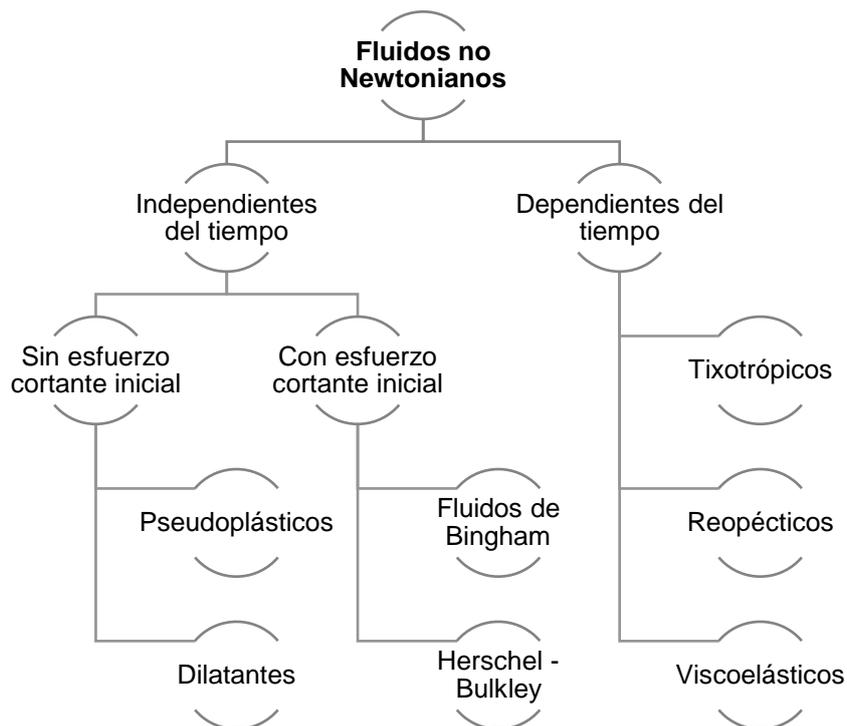


Figura 5. Clasificación de fluidos no newtonianos.

Tomado de (Mott, 1996, p.38).

2.3.2.1.1. Fluidos independientes del tiempo

Se ha propuesto un gran número de ecuaciones empíricas para modelar la relación entre la tensión de corte (τ) y gradiente de velocidad ($\dot{\gamma}$) para fluidos independientes del tiempo, para muchas aplicaciones de ingeniería se utiliza un modelo de la Ley de Potencia la cual convierte al flujo unidimensional en un fluido pseudoplástico, dilatante, Bingham o Herschel - Bulkley (Levenspiel, 1998, p.90) y (Moreno y Cervera, 2015, p.132).

2.3.2.1.2. Fluidos dependientes del tiempo

Los fluidos no newtonianos dependientes del tiempo fue objeto de estudio posteriormente, ya que la variación de la viscosidad en el tiempo aparentemente es posible (Moran y Shapiro, 1995, p.281) y (Carrasco,

Castañeda y Altamirano, 2015, p.23). Estos se clasifican en tres grupos diferentes fluidos tixotrópicos, reopécticos o viscoelásticos.

2.3.3. Medición de la viscosidad

Existen numerosos equipos y procedimientos para la medición de la viscosidad. Algunos utilizan los principios fundamentales de la mecánica de fluidos, otros indican únicamente valores relativos de la viscosidad para ser comparados con otros fluidos (Streeter, 2000, p.19) y (Erich, Piedra y Olmo, 2015, p.15). Sin embargo, la mayoría de métodos para obtener resultados precisos se basan en el funcionamiento de un equipo bajo la Ley de Newton de la viscosidad o la Ley de Poiseuille (Warren y Julian, 1973, p. 50) y (Carrasco, Castañeda y Altamirano, 2015, p.20).

2.3.4. Viscosímetro

Un viscosímetro es un instrumento para medir la viscosidad y otros parámetros de un fluido dependiendo de la tecnología o fundamento bajo el cual funcione el equipo (Sobrino, 2012, p.21) y (Mariño, 2015, p.20). Fue Isaac Newton el primero en sugerir una fórmula para medir la viscosidad de los fluidos quien postuló que la fuerza de la viscosidad correspondía a la fuerza que ejercía el producto sobre una superficie por el gradiente de velocidad, además de ser producto de un coeficiente de viscosidad (Salvador, 2012, p. 80). Sin embargo, en 1884 Poiseuille fue quien mejoró la técnica estudiando el movimiento de líquidos en el paso por capilares de diferentes dimensiones (Tomos, 2015, p.140).

2.4. Tipos de Viscosímetros

Los tipos de viscosímetros más comunes se detallan a continuación en figura 6:

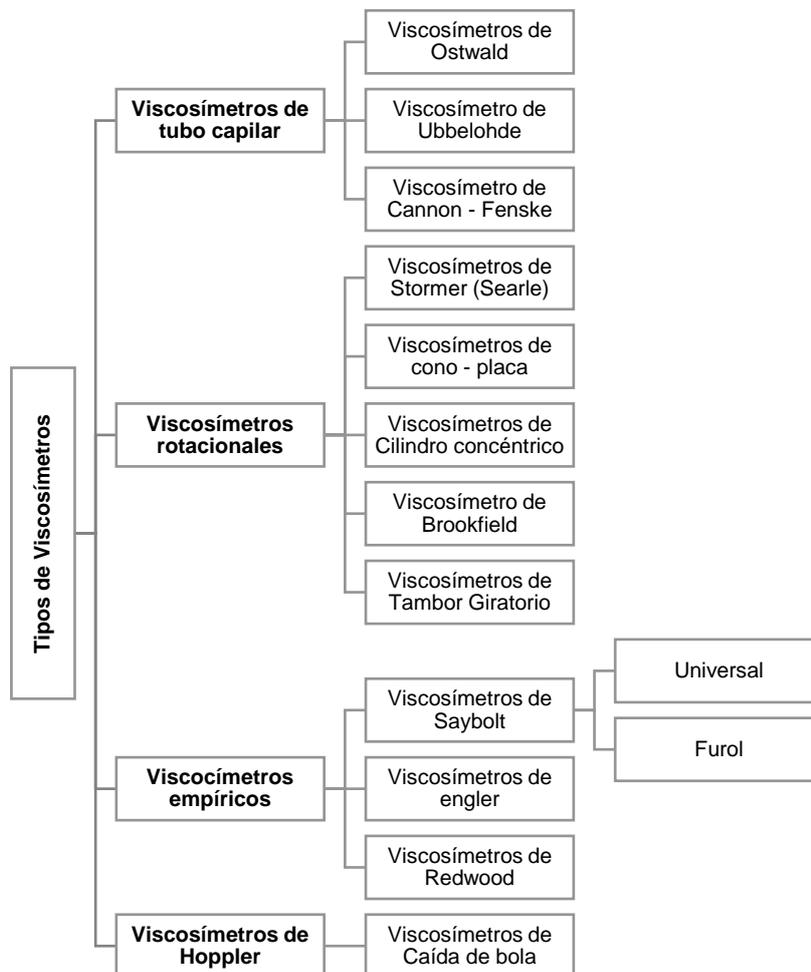


Figura 6. *Clasificación de viscosímetros.*

Tomado de (Mott, 1996, p.35).

2.4.1. Viscosímetro de tubo capilar

En 1839, Hagen realizó el primer experimento científico que se utilizó un tubo o un capilar para medir la viscosidad, seguido por los estudios de Poiseuille quién realizó experimentos en capilar para entender la circulación sanguínea a través de los vasos capilares humanos (Reymond, Serway y Faughn, 2001, p.287) y (Stechina, et.al., 2017, p.169). Así se descubrió la relación entre la velocidad de flujo y la caída de presión de un flujo por un capilar, conocida como la ley de Hagen – Poiseuille.

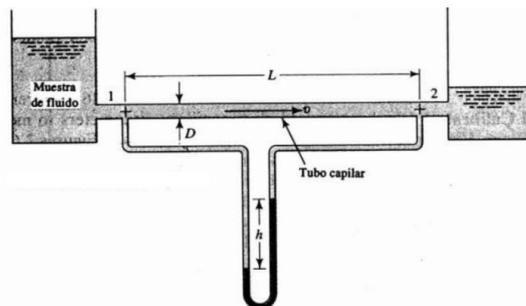


Figura 7. Viscosímetros de Tubo Capilar.

Tomado de (Mott, 1996, p. 36).

En la figura 7, se puede observar 2 vasos con muestra de un fluido, conectado por un tubo capilar que es un tubo largo de un diámetro pequeño. El fluido fluye a una velocidad constante a través del tubo, ocasionando una caída de la presión con el pasar del tiempo (Chang, 2000, p.884). Para el cálculo de la viscosidad en función del flujo que transita por una área transversal, $2\pi r dr$, por segundo, simplemente es $(2\pi r dr)v$, y el volumen total Q del líquido que pasa por un segundo es:

$$Q = \frac{V}{t} = \int_0^R v(2\pi r dr) = \frac{2\pi P}{4\mu L} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr = \frac{\pi P R^4}{8\mu L} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde V es el volumen total y t es el tiempo de flujo. La ecuación 6 expresada anteriormente se llama la ecuación de Poiseuille y es aplicable para gases y líquidos. Esta ecuación puede reordenarse como:

$$\mu = \frac{\pi \Delta p R^4 t}{8VL} \quad (\text{Ecuación 7})$$

μ = viscosidad del fluido (kg/ms)

Δp = caída de presión a lo largo del capilar (kg/ms²)

R = radio del capilar (m)

L = longitud del capilar (m)

V = volumen de fluido que ha circulado en un tiempo t (m/s)

t = tiempo de recorrido (s)

2.4.2. Viscosímetros rotatorios

Los viscosímetros rotatorios utilizan un eje giratorio para medir la resistencia del fluido al flujo. Este tipo de viscosímetros se componen de un cilindro que gira dentro de un vaso de medición donde le fluido se encuentra en su exterior como lo muestra la figura 8. El movimiento del rotor es accionado por un motor de corriente continua con velocidad programada o fija (Mott, 1996, p.36) y (Stechina, et.al., 2017, p.169).

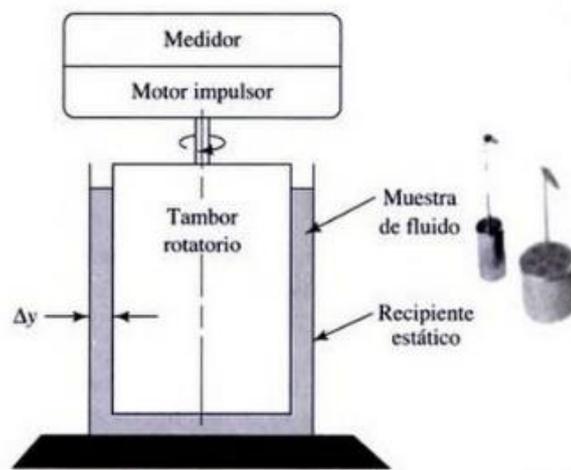


Figura 8. Viscosímetro de tambor giratorio.

Tomado de (Mott, 1996, p.40)

Este equipo posee un taco generador que regula la rotación del motor, dónde al detectar la mínima desviación la corrige. La resistencia de la muestra al fluir en el vaso provoca una torsión en el resorte de medición de la viscosidad ubicado en el motor, este movimiento es recogido mediante un traductor electrónico que transmite el número de revoluciones para su procesamiento (Tomos, 2015, p.161).

Así el resultado del equipo produce tres magnitudes: el gradiente de velocidad, proporcionado por la velocidad del cilindro giratorio, el esfuerzo de cizalla

medido por la torsión y la temperatura la cual es proporcional a la viscosidad de la sustancia (Costa, et. al. 2004, p.290) y (Laffarga, 2016, p.45).

2.4.3. Viscosímetros empíricos

Estos viscosímetros se basan en el tiempo que requiere un determinado volumen de líquido en pasar a través de un orificio normalizado, como lo muestra la figura 9.

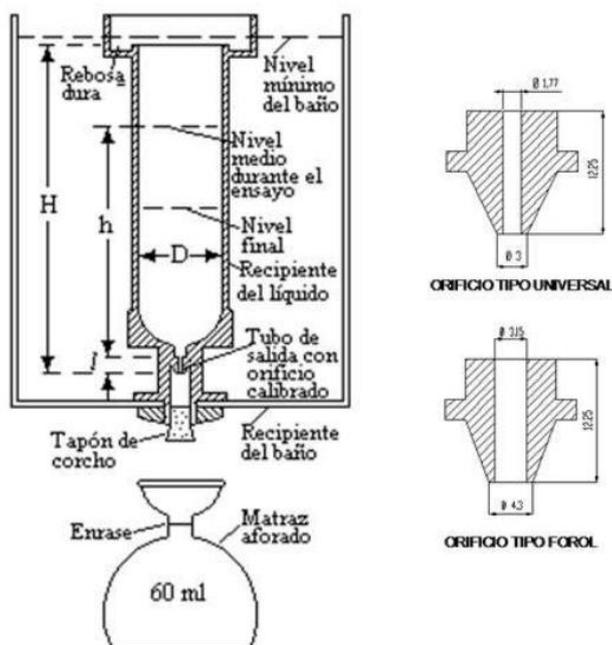


Figura 9. Viscosímetro Saybolt con dos tipos de orificios.

Tomado de (Mott, 1996, p.40)

Estos equipos poseen un recipiente final destinado a contener el fluido cuya viscosidad es desconocida, en su parte inferior dispone de un orificio de diámetro conocido por las medidas del equipo, este recipiente a su vez que encuentre dentro de otro que tiene la función de un baño termostato para mantener la temperatura constante, ya que posee un sistema de calentamiento integrado (Sobrino y Segovia, 2012, p.442.). Con este equipo se

puede obtener la viscosidad del fluido a diferentes temperatura y poder comprobar que la temperatura es directamente proporcional a la viscosidad (Mott, 1996, p.41) y (Laffarga, 2016, p.48).

2.4.4. Viscosímetro de Hopper

El viscosímetro de Hopper viscosímetro de caída de bola, utiliza una bola esférica de peso y diámetro conocido la cual cae libremente a través del fluido y se mide el tiempo requerido para que la esfera recorra una distancia conocida, cómo se puede observar en la figura 10 (Perry y Chilton, 1990, p. 143) y (Alves, 2014, p.35).

Cuando un cuerpo cae en un fluido bajo la influencia de la gravedad, este se acelera por la fuerza que lo jala hacia abajo (su propio peso) y queda balanceado por la fuerza de flotación y de arrastre de la viscosidad. La velocidad que adquiere la bola se la conoce como velocidad terminal (Perry y Chilton, 1990, p. 143) y (Alves, 2014, p.40).

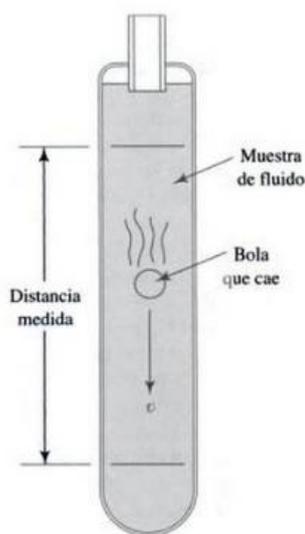


Figura 10. Viscosímetro de bola que cae.

Tomado de (Mott, 1996, p.40)

Este viscosímetro se utiliza principalmente para sustancias de baja viscosidad, entre 0.6 y 100.000 mPa.s (Schaum, 1994, p. 74) y (Rojas, Torres y Hoffmann, 2016, p.55), como:

- Industria alimentaria (miel, cerveza, leche, gelatina, jugo de frutas).
- Industria petrolera (crudo, aceite para máquinas).
- Industrias de aceites minerales (hidrocarburos líquido y aceites)
- Industria química (soluciones de polímero, soluciones de resina, dispersiones de látex, pinturas y barnices)
- Industria Cosmética / Farmacéutica (glicerinas, emulsiones, soluciones).

3. METODOLOGIA

El proyecto se llevó a cabo en tres etapas. La fase de diseño, fase de construcción y fase de validación. En la fase de diseño se utilizó el método de análisis y síntesis para desarrollar conceptualmente el viscosímetro y de esta manera tener la suficiente información para su construcción.

Se procedió a aplicar un modelo matemático - teórico para el análisis de la dependencia de las variables. Luego de esta fase se inició con la construcción.

Esta fase se llevó a cabo en los laboratorios de la universidad, seguido de la construcción los lineamientos generados en la anterior fase. Finalmente se realizó la validación del equipo en comparación al viscosímetro de Brookfield modelo RVDV3, número de serie E8401185 presente en los laboratorios de la Universidad.

3.1. Diseño y construcción del viscosímetro

La metodología que se utilizó en el presente proyecto de titulación es experimental, ya que fue necesario considerar las variables de altura, diámetro,

volumen del fluido a analizar y tiempo apreciable en el diseño, construcción y validación del viscosímetro para fluidos de alta, media y baja viscosidad.

Para el desarrollo de este proyecto se planteó dos hipótesis: alternativa y nula. La evaluación de los factores como la altura, diámetro, volumen del fluido a analizar y tiempo apreciable influyen en el diseño de un viscosímetro para fluidos de alta, media y baja viscosidad.

H₁: La viscosidad de un fluido determina el dimensionamiento de los tres viscosímetros a construir.

H₀: La viscosidad de un fluido no determina el dimensionamiento de los tres viscosímetros a construir.

Se seleccionó fluidos newtonianos de alta, media y baja viscosidad como muestras: miel de abeja, pulpa de fruta de mora con 14°Brix y leche descremada de vaca, respectivamente, de las cuales se conocía su densidad y viscosidad.

Para la construcción del viscosímetro se utilizó material de vidrio pyrex, ya que este tipo de material no sufre deformaciones con el pasar del tiempo y es uno de los materiales con menor porosidad, siendo ideal para la construcción del equipo (López, 2012, p.24). Además de ser un material transparente que facilita la visibilidad del flujo del líquido por el equipo.

Para poder determinar las dimensiones del prototipo como: la altura y diámetro del vástago y el volumen del fluido a analizar para la capacidad del embudo. Se tomó tres diferentes medidas para cada parámetro considerado, según el tipo de fluido que transite por el equipo, apreciando las diferentes propiedades físicas de las muestras seleccionadas.

Después de establecer las dimensiones del prototipo con revisión bibliográfica, se procedió con el diseño en Autocad del prototipo con las medidas deseadas.

Con el diseño creado en Autocad, se procedió con la construcción del prototipo. El material que se utilizó para la construcción de cada viscosímetro fue un

embudo, un tapón de caucho ubicado en la parte inferior que permita o detenga el flujo de líquido a través del vástago del embudo. Un tubo de vidrio para el flujo del líquido entre el embudo y el vaso de precipitación ubicado en la base del equipo para la recolección de la muestra, además de un soporte para armar el equipo construido en acrílico.

Después de construir el equipo, se inició con una validación de las medidas con agua, que es un líquido referente del cual se conoce la viscosidad.

Para poder calcular la viscosidad en cada uno de los equipos diseñados se utilizó la ecuación básica para el cálculo de la viscosidad de Hagen-Poiseuille, donde:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 \mu L} \quad (\text{Ecuación 8})$$

μ = viscosidad del fluido

Δp = caída de presión a lo largo del capilar

R = radio del capilar

L = longitud del capilar

V = volumen de fluido que ha circulado en un tiempo

t = tiempo de recorrido

Despejando la viscosidad (μ) tenemos:

$$\mu = \frac{\pi \Delta p R^4 t}{8 L V} \quad (\text{Ecuación 9})$$

En nuestro sistema, la longitud (L) y el radio (R) se refieren a las dimensiones del capilar del viscosímetro y el volumen que circula por el capilar (V). Es decir, L , R y V son parámetros propios del viscosímetro. Consideramos:

$$k = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 L V} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Una constante k , teniendo $\mu = k \times t$

El valor de la constante (k) depende de la geometría de cada viscosímetro en concreto, por lo que se realizó medidas con agua a 20°C en los tres diferentes prototipos para poder obtener una constante por cada equipo.

Después se realizó un diseño experimental del modelo del viscosímetro, para el cual se estableció un diseño factorial.

Tabla 2.

Diseño Factorial para análisis de varianza

Fluidos	Viscosímetros	I	II	III	IV
f1 = Fluido de alta viscosidad (miel de abeja)	v1 = viscosímetro 1				
	v2 = viscosímetro 2				
	v3 = viscosímetro 3				
	v4 = viscosímetro testigo (Oswald)				
f2 = Fluido de media viscosidad (pulpa de fruta)	v1 = viscosímetro 1				
	v2 = viscosímetro 2				
	v3 = viscosímetro 3				
	v4 = viscosímetro testigo (Oswald)				
f3 = Fluido de baja viscosidad (leche de vaca)	v1 = viscosímetro 1				
	v2 = viscosímetro 2				
	v3 = viscosímetro 3				
	v4 = viscosímetro testigo (Oswald)				

Variable: la viscosidad

Tratamiento: los tres diferentes viscosímetros diseñados

Factores: tres tipos de fluidos (miel de abeja, pulpa de fruta de mora con 14°Brix y leche descremada de vaca) y cuatro viscosímetros: tres diseñados y un testigo (viscosímetro de Oswald).

3.2. Validación del viscosímetro

Se validó los tres prototipos de viscosímetros construidos con un viscosímetro comercial, comparando los valores obtenidos, en base al indicador: Si existe una desviación del 5%, la confiabilidad del equipo es alta.

Según los resultados obtenidos del diseño experimental se seleccionó el mejor diseño para cada tipo de fluido, a los cuales se los validó comparando los resultados de viscosidad generados por el prototipo y el viscosímetro de Brookfield. La evaluación de la desviación estándar del equipo, se utilizó los parámetros tabulados y los experimentales con una estadística descriptiva, para poder evaluar el error porcentual se utilizó la siguiente ecuación:

$$\%E = \left| \frac{(V_e - V_t)}{V_t} \right| \times 100 \quad (\text{Ecuación 11})$$

%E = Valor Experimental

Ve = Valor experimental

Vt = Valor tabulado

Después, se elaboró el Manual de operación que consta de una descripción del equipo de manera gráfica, la estructura, principio de funcionamiento y las instrucciones de operación paso a paso.

Finalmente, se diseñó la caja para un correcto transporte, almacenamiento y uso del equipo en madera de MDF de 4mm con esponja gris de 3cm.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Diseño y Construcción del viscosímetro

Para la creación del equipo se realizó una revisión bibliográfica dónde para la definición de las dimensiones se basó en el concepto teórico del viscosímetro de Oswald, el cual es el viscosímetro de capilar de vidrio más antiguo que permite un cálculo rápido aunque no de máxima precisión de la viscosidad.

Midiendo los tiempos de paso de un volumen por un vástago de dimensiones conocidas. Teniendo en cuenta esta explicación se definieron medidas para el diámetro y largo de los vástagos de los embudos siendo estos:

Tabla 3.

Dimensiones de los embudos para la viscosidad

	Diámetro	Largo	Volumen
Alta Viscosidad	2 cm	7 cm	100 ml
Media Viscosidad	1 cm	12 cm	100 ml
Baja Viscosidad	0.7 cm	22 cm	100 ml

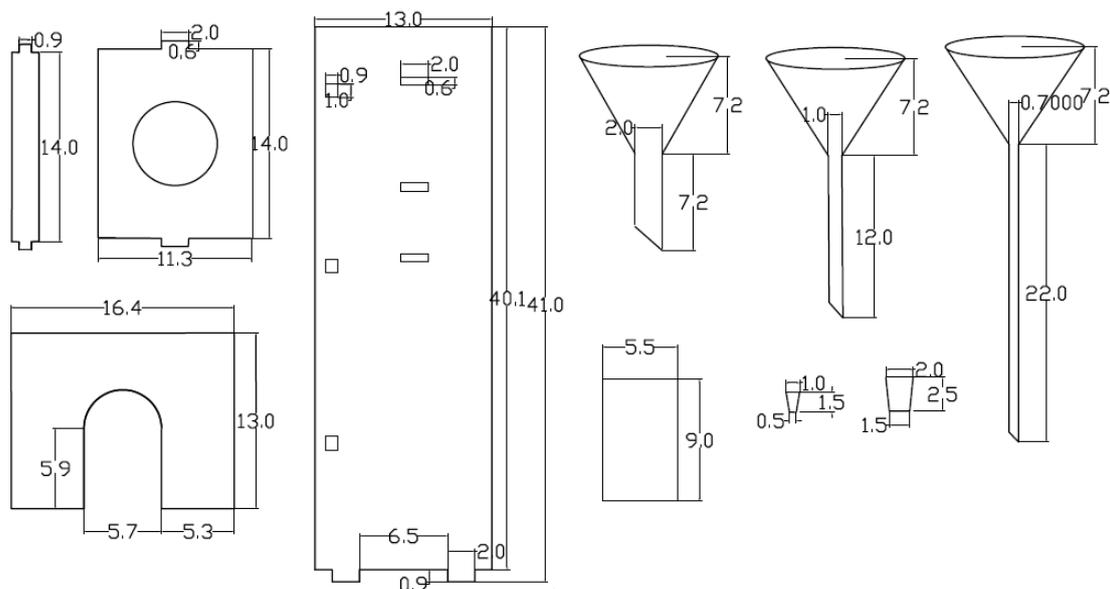


Figura 11. Medidas y diseño del equipo en centímetros.

Con las medidas encontradas para el equipo con el cual se medirá la viscosidad, se realizó el diseño en AutoCad de los mismos y del soporte para el equipo, para poder dimensionarlo correctamente como se muestra en la figura 11, 12, 13 y 14.

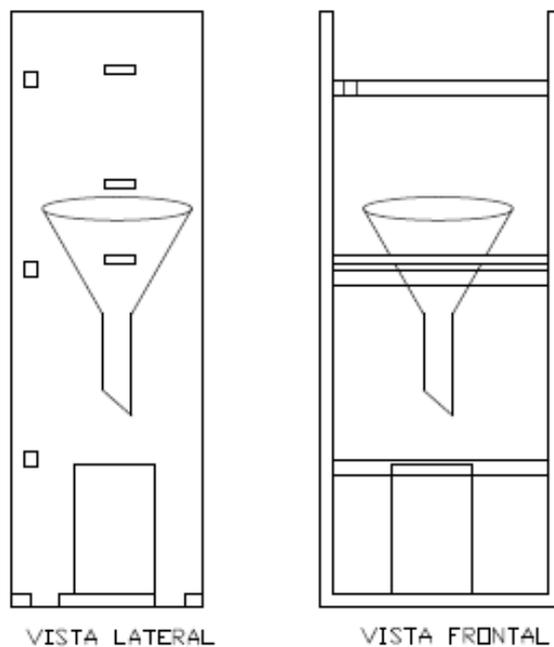


Figura 12. Vista lateral y frontal del viscosímetro para fluidos de alta viscosidad.

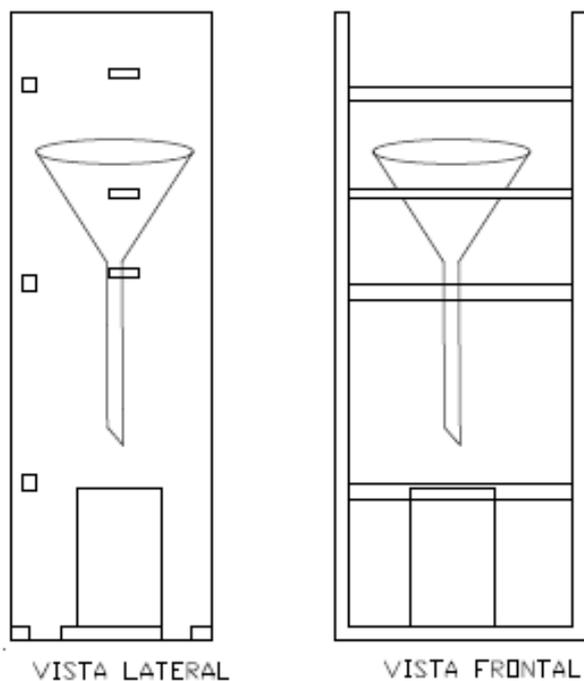


Figura 13. Vista lateral y frontal del viscosímetro para fluidos de media viscosidad.

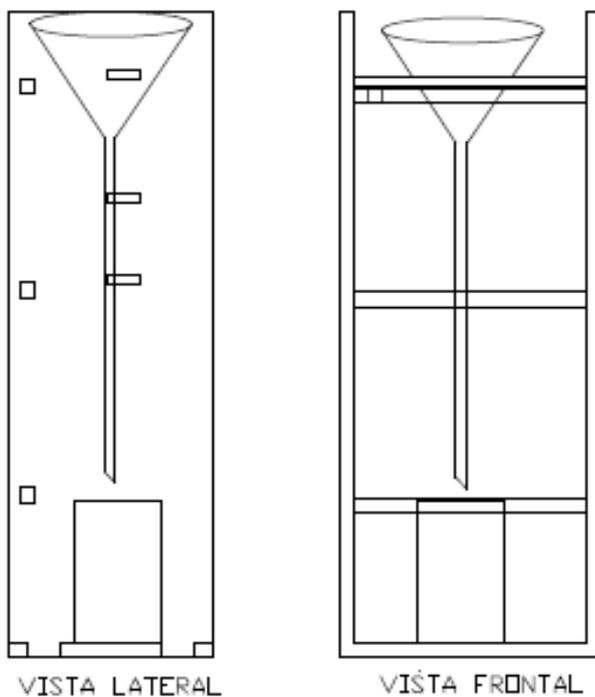


Figura 14. Vista lateral y frontal del viscosímetro para fluidos de baja viscosidad.

Después se definieron los materiales para la construcción del soporte del equipo y se seleccionó el polimetilmetacrilato o acrílico por sus propiedades de transparencia alrededor del 93%, siendo uno de los plásticos más transparentes, además tiene una alta resistencia al impacto de veinte a diez veces más que el vidrio y no presenta un envejecimiento apreciable en diez años (Schwarcz, 2012, p.226).



Figura 15. Diseño 3D del equipo de baja, media y alta viscosidad.

Para los embudos se determinó el vidrio por su baja porosidad y dificultad a la deformación. Teniendo de esta manera el equipo como se muestra en la figura 15.

Después de tener el equipo construido se procedió a la validación del mismo con agua para demostrar la precisión de las dimensiones encontradas donde se obtuvieron las constantes para la medición de la viscosidad. Para la validación del diseño realizado se utilizó agua a 20°C, y se tomaron 5 diferentes mediciones con cada uno de los prototipos, y de los cuales finalmente se obtuvo un promedio y es el tiempo que se demoró en transitar el fluido por el capilar del equipo. Como lo muestra la tabla 4.

Tabla 4.

Medición del tiempo recorrido por agua a 20°C en los diferentes capilares

	Alta viscosidad	Media viscosidad	Baja viscosidad
	(s)	(s)	(s)
	0,52	1,80	5,87
	0,55	1,66	5,48
	0,62	1,86	5,59
	0,54	1,66	5,86
	0,55	1,60	5,73
(x)	0,56	1,72	5,7

Luego, se aplicó la ecuación de Poiseuille:

$$\mu = \frac{\pi P r^4 t}{8 V L}$$

Dónde; P = Presión, r = radio del capilar, t = tiempo recorrido, V = volumen analizado, L = Longitud del capilar. Dónde consideramos las dimensiones de cada uno de los prototipos para las constantes de volumen y longitud (V, L), como lo muestra la Tabla 3. Obteniendo así los siguientes resultados para:

Baja Viscosidad

$$\pi = 3,1416$$

$$P = 71993,88 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$$

$$r = 0,0035 \text{ m}$$

$$t = 5,7 \text{ s}$$

$$V = 0,0001 \text{ m}^3$$

$$L = 0,22 \text{ m}$$

$$\mu = \frac{\pi \left(71993,88 \frac{\text{kg}}{\text{ms}} \right) * 0,0035^4 * 5,7}{8 * 0,001 * 0,22} = 0,00109921 \text{ Pa.s} \approx 0,00109921 \text{ Cp}$$

Con este resultado observamos una validación correcta, ya que según Chang (2000, p.867) la viscosidad del agua a 20°C es 0,0101 Pa.s = 0,00101 Cp.

Sabiendo que la presión, radio, volumen y longitud son constantes obtenemos la siguiente ecuación para el primer prototipo (baja viscosidad):

$$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} (t)}{0,000176}$$

Media Viscosidad

$$\pi = 3,1416$$

$$P = 71993,88 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$$

$$r = 0,005 \text{ m}$$

$$t = 1,72 \text{ s}$$

$$V = 0,0001 \text{ m}^3$$

$$L = 0,12 \text{ m}$$

$$\mu = \frac{\pi \left(71993,88 \frac{\text{kg}}{\text{ms}} \right) * 0,005^4 * 1,72}{8 * 0,001 * 0,12} = 2,5326997 \text{ Pa.s} \approx 0,0025327 \text{ Cp}$$

Sabiendo que la presión, radio, volumen y longitud son constantes obtenemos la siguiente ecuación para el segundo prototipo (media viscosidad):

$$\mu = \frac{0,00014136 * (t)}{0,000096}$$

Alta Viscosidad

$$\pi = 3,1416$$

$$P = 71993,88 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$$

$$r = 0,01 \text{ m}$$

$$t = 0,56 \text{ s}$$

$$V = 0,0001 \text{ m}^3$$

$$L = 0,07 \text{ m}$$

$$\mu = \frac{\pi \left(71993,88 \frac{\text{kg}}{\text{ms}} \right) * 0,01^4 * 0,56}{8 * 0,001 * 0,07} = 22,6175973 \text{ Pa.s} \approx 0,0226176 \text{ Cp}$$

Sabiendo que la presión, radio, volumen y longitud son constantes obtenemos la siguiente ecuación para el tercer prototipo (alta viscosidad):

$$\mu = \frac{0,00226176 \text{ (t)}}{0,000056}$$

Tabla 5.

Ecuaciones para determinación de viscosidad de alta, media y baja viscosidad.

Baja Viscosidad	Media Viscosidad	Alta Viscosidad
$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} \text{ (t)}}{0,000176}$	$\mu = \frac{0,00014136 * \text{ (t)}}{0,000096}$	$\mu = \frac{0,00226176 \text{ (t)}}{0,000056}$

4.2. Diseño Experimental

Con el diseño del equipo validado correctamente con agua, después se realizó las mediciones del tiempo en segundos del paso de cada uno de los fluidos a analizar: leche descremada, miel y pulpa a una temperatura de 20°C. Para la medición del tiempo en el viscosímetro de Oswald (testigo), se realizó el siguiente procedimiento:

1. Introducir 2ml del fluido a analizar a 20°C en el tubo más ancho.
2. La primera medida se realiza con un tiempo de espera de 5s aproximadamente. El líquido es aspirado hasta la marca anular superior de medida M1.
3. Finalmente se mide el tiempo de paso del líquido entre ambas marcas anulares de medida M1 y M2.
4. Para el cálculo de la viscosidad se procede a utilizar la ecuación de Hagen-Poiseuille para la viscosidad.

Obteniendo de esa manera los resultados expresados en la tabla 5.

Tabla 6.

Arreglo factorial para toma de medidas en los diferentes prototipos. A: Alta viscosidad, M: Media viscosidad, B: Baja viscosidad, T: Testigo (Oswald) y s: segundos

		I (s)	II (s)	III (s)	IV (s)
LECHE DESCREMADA	A	0,41	0,38	0,45	0,41
	M	1,8	1,8	1,67	1,73
	B	5,85	6,08	5,94	5,94
	T	5,8	5,6	6	5,8
MIEL	A	13,54	15,74	13,85	11,61
	M	190	182	185	193
	B	5400	5450	5420	4390
	T	13,62	13,62	13,7	13,5
PULPA	A	0,55	0,68	0,7	0,58
	M	2,08	2,12	2,13	2,22
	B	14,49	14,61	14,42	14,56
	T	2,2	2,3	2,2	2,1

Después se procedió al análisis de varianza con análisis de Turkey al 5% dónde se obtuvieron los resultados expresados en la tabla 6.

Tabla 7.

Análisis de varianza con Turkey al 5%

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	97486937,98	29	3361618,55	151,31	< 0,0001
Viscosidad	26134357,35	3	8711452,45	392,14	< 0,0001
Producto	19175207,5	2	9587603,75	431,58	< 0,0001

Visc*Prod	51775061,91	6	8629176,99	388,44	< 0,0001
Error	399870,57	18	22215,03		
TOTAL	97886808,55	37			

En la tabla 6 se observa la interacción de los 2 tratamientos en combinación con la variable medible: el tiempo, con una interacción de viscosidad con producto con un valor menor a 0,0001. Por lo que se procedió al análisis de cada uno de los tratamiento por separado como se observa en la tabla 7 para la viscosidad.

Tabla 8.

Análisis de varianza para los viscosímetros con Test de Turkey al 5%

Visc.	Medias	n	E.E	
3	1728,49	12	43,03	A
2	63,80	12	43,03	B
4	7,2	12	43,03	B
1	4,91	12	43,03	B

Nota: 1 alta, 2 media, 3 baja, 4 testigo (Oswald). Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

En la tabla 7 observamos que el viscosímetro 3, baja viscosidad tiene una mayor separación entre sus medias ya que, en este se realizó el análisis de la miel y fue aquel con más tiempo en promedio de 5165 segundos equivalente 1h45, por este motivo no es considerado el viscosímetro de baja viscosidad para el análisis de fluidos de alta viscosidad como la miel, por la variable de tiempo apreciable.

Después de procedió al análisis del tratamiento producto para poder seleccionar correctamente el mejor tratamiento según el tiempo.

Tabla 9.

Análisis de varianza para los productos con Test de Turkey al 5%

Prod.	Medias	n	E.E	
2	1344,95	16	37,26	A
3	4,87	16	37,26	B
1	3,48	16	37,26	B

Nota: 1 leche, 2 miel, 3 pulpa. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la tabla 8 se observan los datos obtenidos para cada uno de los productos, dónde la miel es cuya media tiene valores más altos porque al ser un fluido de alta viscosidad al ser transitado por el viscosímetro más delgado (baja viscosidad) tiene un mayor tiempo no apreciable para las mediciones.

Además podemos observar que la pulpa es un producto con media de 4,87 que es mayor a la media de la leche de 3,48, ya que la pulpa tiene una mayor viscosidad que la leche.

Finalmente se realizó el análisis de varianza con interacción de los dos tratamientos, como podemos observar en la tabla 9.

Tabla 10

Análisis de varianza para la relación viscosidad-producto con Test de Turkey al 5%

Visc.	Prod.	Medias	n	E.E	
3	2	5165,00	4	74,52	A
2	2	187,5	4	74,52	B

3	3	14,52	4	74,52	B
1	2	13,69	4	74,52	B
4	2	13,61	4	74,52	B
3	1	5,95	4	74,52	B
4	1	5,80	4	74,52	B
4	3	2,20	4	74,52	B
2	3	2,14	4	74,52	B
2	1	1,75	4	74,52	B
1	3	0,63	4	74,52	B
1	1	0,41	4	74,52	B

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

En la tabla 9, podemos observar la relación entre cada uno de los viscosímetros, dónde podemos seleccionar el mejor tratamiento para cada uno de las variables basándose en el tiempo apreciable. Tenemos la relación entre el viscosímetro 1 (alta viscosidad) y producto 2 (miel) obteniendo una media de 13,69 segundos por lo que el tiempo es apreciable para la medida y la más baja para el producto analizado. Para el otro prototipo se tiene la relación 2 (media viscosidad) y 3 (pulpa) con una media de 2,14 segundos siendo la media más apreciable para medir el tiempo.

Finalmente para el último prototipo se tiene la relación 3 (baja viscosidad) y 1 (leche) obteniendo una media de 5,95 segundos siendo el seleccionado para productos de baja viscosidad.

En la figura 16 a continuación se puede observar la relación de tiempo con el tratamiento 3:2, ya que este fue el producto que se demoró mayor tiempo en el paso por el capilar, lo cual mantiene el sentido de las leyes de físicas al ser un producto altamente viscoso como es la miel por un capilar de un diámetro pequeño.

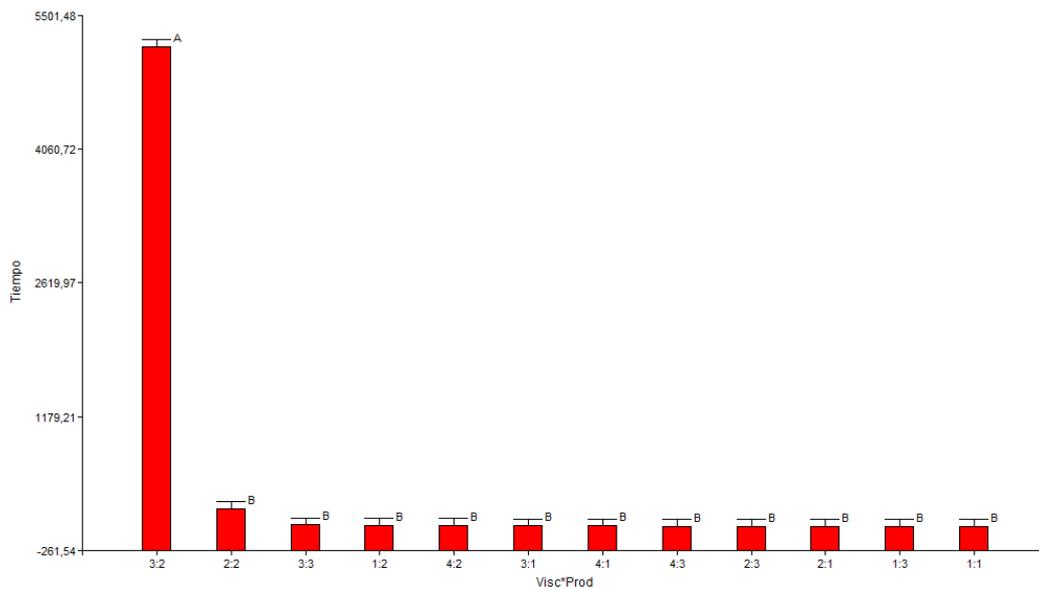


Figura 16. Relación del análisis del tiempo apreciable vs. Viscosímetros y productos

Después de obtener el tiempo se aplicó la ecuación de Hagen-Poiseilli, para determinar la viscosidad en Centipoise de los fluidos en los diferentes prototipos para cada uno de los tratamientos y repeticiones. Utilizando la ecuación en constante obtenida anteriormente en la validación con agua, como lo muestra la siguiente tabla 5.

Tabla 11. Cálculo de viscosidad con ecuación de Hagen-Poiseilli.

	I	II	III	IV
LECHE DESCREMADA	A	$\mu = \frac{0,00226176 (0.41)}{0,000056}$	$\mu = \frac{0,00226176 (0.38)}{0,000056}$	$\mu = \frac{0,00226176 (0.41)}{0,000056}$
	M	$\mu = \frac{0,00014136 (1.8)}{0,000096}$	$\mu = \frac{0,00014136 (1.8)}{0,000096}$	$\mu = \frac{0,00014136 (1.73)}{0,000096}$
	B	$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} (5.85)}{0,000176}$	$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} (6.08)}{0,000176}$	$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} (5.94)}{0,000176}$
	T	$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} (5.8)}{0,000176}$	$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} (5.6)}{0,000176}$	$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} (5.8)}{0,000176}$
MIEL	A	$\mu = \frac{0,00226176 (13.54)}{0,000056}$	$\mu = \frac{0,00226176 (15.74)}{0,000056}$	$\mu = \frac{0,00226176 (11.61)}{0,000056}$
	M	$\mu = \frac{0,00014136 (190)}{0,000096}$	$\mu = \frac{0,00014136 (182)}{0,000096}$	$\mu = \frac{0,00014136 (193)}{0,000096}$
	B	$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} (5400)}{0,000176}$	$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} (5450)}{0,000176}$	$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} (5420)}{0,000176}$
	T	$\mu = \frac{0,00226176 (13.62)}{0,000056}$	$\mu = \frac{0,00226176 (13.62)}{0,000056}$	$\mu = \frac{0,00226176 (13.5)}{0,000056}$
PULPA	A	$\mu = \frac{0,00226176 (0.55)}{0,000056}$	$\mu = \frac{0,00226176 (0.68)}{0,000056}$	$\mu = \frac{0,00226176 (0.58)}{0,000056}$
	M	$\mu = \frac{0,00014136 (2.08)}{0,000096}$	$\mu = \frac{0,00014136 (2.12)}{0,000096}$	$\mu = \frac{0,00014136 (2.13)}{0,000096}$
	B	$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} (14.19)}{0,000176}$	$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} (14.61)}{0,000176}$	$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} (14.42)}{0,000176}$
	T	$\mu = \frac{0,00014136 (2.2)}{0,000096}$	$\mu = \frac{0,00014136 (2.3)}{0,000096}$	$\mu = \frac{0,00014136 (2.2)}{0,000096}$

Después de realizar el cálculo de las fórmulas en la tabla 11. Se obtienen los resultados expresados en Centipoise (Cp) en la tabla 12.

Tabla 12

Arreglo factorial para los diferentes prototipos. A: Alta viscosidad, M: Media viscosidad, B: Baja viscosidad, T: Testigo (Oswald) y Cp: Centipoise

		I (Cp)	II (Cp)	III (Cp)	IV (Cp)
LECHE DESCREMADA	A	16,6	15,3	18,2	16,6
	M	2,7	2,7	2,5	2,5
	B	1,1	1,2	1,1	1,1
	T	1,2	1,0	1,4	1,2
MIEL	A	557,4	635,7	559,4	468,9
	M	279,8	268,0	272,4	284,2
	B	1041,4	1051,0	1045,2	846,6
	T	550,0	550,0	555,0	545,0
PULPA	A	22,2	27,5	28,3	23,4
	M	3,1	3,1	3,1	3,4
	B	2,8	2,8	2,8	2,8
	T	3,2	3,4	3,2	3

Finalmente se determinó que para la leche descremada el mejor prototipo es el de baja viscosidad con un promedio de 1,13Cp, para la miel el prototipo de alta densidad con un de 555,35Cp y finalmente para la pulpa con 14°Brix (ver anexo 2) con el prototipo de media viscosidad se obtiene 3,18Cp.

Para concluir con el enunciado anterior para la selección del mejor tratamiento podemos observar en la figura 16 la relación entre cada uno de los tratamientos. Seleccionando de esa manera para la miel el prototipo con mayor diámetro (2cm), para la leche el viscosímetro con menor diámetro (0,7cm) y la pulpa con el equipo de diámetro intermedio (1cm). Donde podemos confirmar la hipótesis nula H_1 : La viscosidad de un fluido determina el dimensionamiento de los tres viscosímetros a construir.

4.3. Validación del viscosímetro

Para poder obtener un el valor tabulado, se procedió al cálculo de la viscosidad en el viscosímetro de Brookfield modelo RVDV3, número de serie E8401185 con cada uno de los fluidos. Siguiendo el procedimiento detallado a continuación:

1. Montar el equipo, colocando el husillo (rosca izquierda) al vástago inferior del viscosímetro levantando el tornillo de acoplamiento.
2. Bajar y centrar el husillo en el vaso de precipitación con el fluido a analizar a 20°C.
3. Encender el equipo, esperar a que se establezca la lectura. El tiempo dependerá de la velocidad a la que se esté ejecutando y características del fluido.
4. Para realizar la medición de la viscosidad, la lectura debe ser multiplicada por el factor apropiado, como lo muestra la figura 17.
5. Apague el equipo y retire la muestra la su limpieza.

RV Series Viscometer													
1		2		3		4		5		6		7	
.5	200	.5	800	.5	2K	.5	4K	.5	8K	.5	20K	.5	80K
1	100	1	400	1	1K	1	2K	1	4K	1	10K	1	40K
2	50	2	200	2	500	2	1K	2	2K	2	5K	2	20K
2.5	40	2.5	160	2.5	400	2.5	800	2.5	1.6K	2.5	4K	2.5	16K
4	25	4	100	4	250	4	500	4	1K	4	2.5K	4	10K
5	20	5	80	5	200	5	400	5	800	5	2K	5	8K
10	10	10	40	10	100	10	200	10	400	10	1K	10	4K
20	5	20	20	20	50	20	100	20	200	20	500	20	2K
50	2	50	8	50	20	50	40	50	80	50	200	50	800
100	1	100	4	100	10	100	20	100	40	100	100	100	400

= Spindle
 = Spindle Speed
 = Factor
 K = 1000

Figura 17. Tabla de conversión de factores con viscosímetro de Brookfield.

Tomado de (Brookfield, s.f.).

Obteniendo de esta manera los siguientes resultados, para cada uno de las viscosidades.

$$\mu = x * F$$

(Ecuación 12)

μ = Viscosidad

x = Valor anotado

F = Factor conversión

Tabla 13.

Medición de la viscosidad con las medidas en viscosímetro de Brookfield

Baja Viscosidad	Media Viscosidad	Alta Viscosidad
$\mu = 0.006 * 200$	$\mu = 0.04 * 80$	$\mu = 11 * 50$
$\mu = 1.2 \text{ Cp}$	$\mu = 3.2 \text{ Cp}$	$\mu = 1.2 \text{ Cp}$
Spindle = 4	Spindle = 5	Spindle = 3
Spindle Speed = 10	Spindle Speed = 50	Spindle Speed = 20

Después de haber realizado el cálculo de la viscosidad en el viscosímetro de Brookfield se seleccionó el prototipo ideal para cada uno de los fluidos y se procedió a aplicar la ecuación de error experimental. Para poder determinar el porcentaje de error que poseen cada uno de los equipos para determinar su exactitud en la repetitividad y reproducibilidad utilizamos la ecuación 10.

$$\%E = \left| \frac{(V_e - V_t)}{V_t} \right| \times 100$$

%E = Valor Experimental

Ve = Valor experimental

Vt = Valor tabulado

Tabla 14

Medición del Error experimental de cada uno de los equipos.

Baja Viscosidad	Media Viscosidad	Alta Viscosidad
$\%E = \left \frac{(1,13 - 1,2)}{1,2} \right \times 100$	$\%E = \left \frac{(3,18 - 3,2)}{3,2} \right \times 100$	$\%E = \left \frac{(555,35 - 550)}{550} \right \times 100$
%E. E = 0,7%	%E. E = 0,62%	%E. E = 0,97%

De esta manera podemos observar un error experimental en comparación con el testigo menor a 1% por lo que el equipo diseñado y construido tiene una exactitud del mayor al 99%. Podemos concluir que el equipo de alta viscosidad tiene mayor precisión ya que al ser un fluido de alta viscosidad es más fácil la contabilización del tiempo a manera exacta.

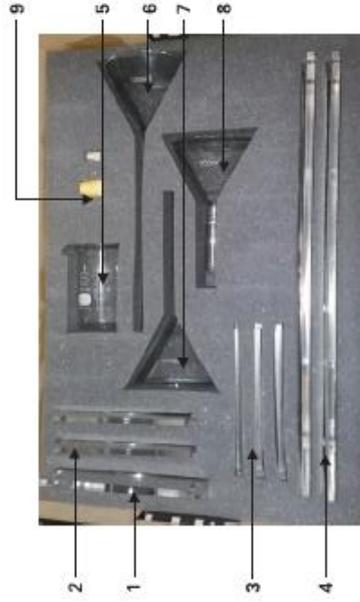
Para obtener datos confiables de exactitud en el valor tabulado del viscosímetro de Brookfield se solicitó un mantenimiento preventivo a la empresa Electromed el 20.06.2017, como lo muestra el certificado en el anexo 1.

4.4. Manual del Equipo

Finalmente, se procedió a realizar el manual del equipo, que se detalla a continuación.



CONTENIDO

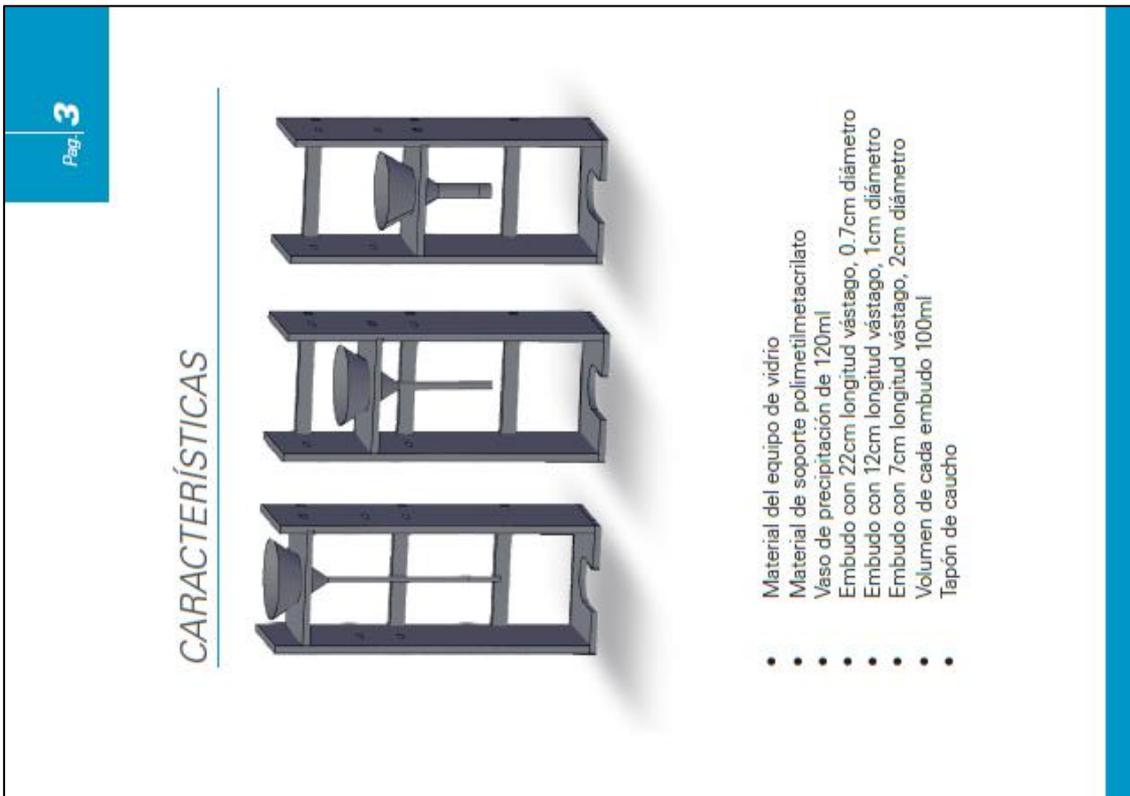
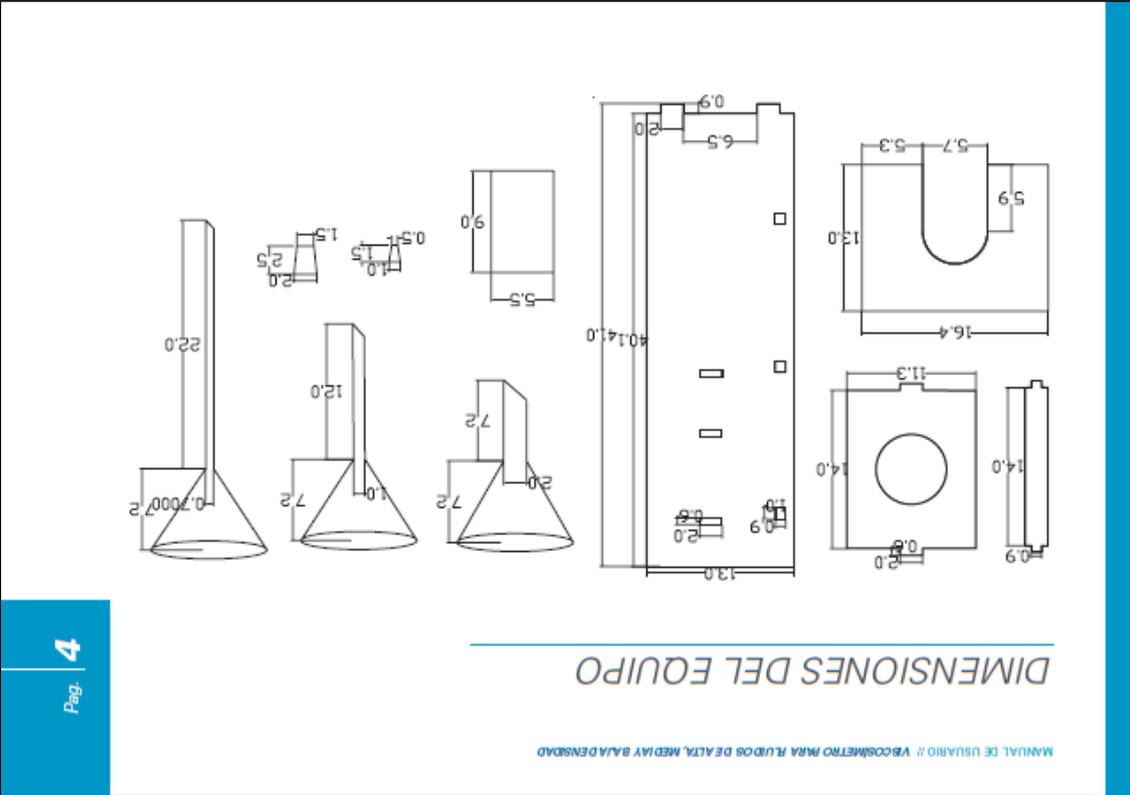


1. Base de estructura
2. Soporte intermedio del equipo
3. Soporte posteriores del equipo
4. Paredes de estructura
5. Vaso de precipitación del 120ml
6. Embudo para baja densidad
7. Embudo para media densidad
8. Embudo para alta densidad
9. Tapones

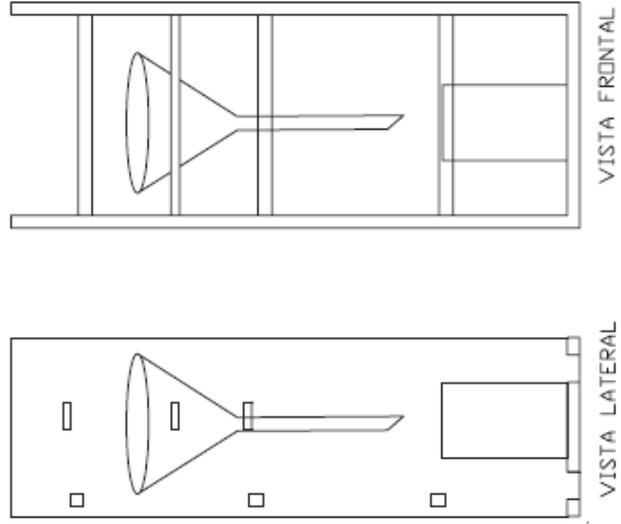
MANUAL DE USUARIO // VISCOSIMETRO PARA FLUIDOS DE ALTA, MEDIA Y BAJA DENSIDAD

TABLA DE CONTENIDO

Pag. 2	CONTENIDO	Pag. 3	CARACTERÍSTICAS	Pag. 4	DIMENSIONES DEL EQUIPO
Pag. 8	USO DEL EQUIPO	Pag. 11	VISCOSIDAD	Pag. 13	VALIDACIÓN DEL EQUIPO

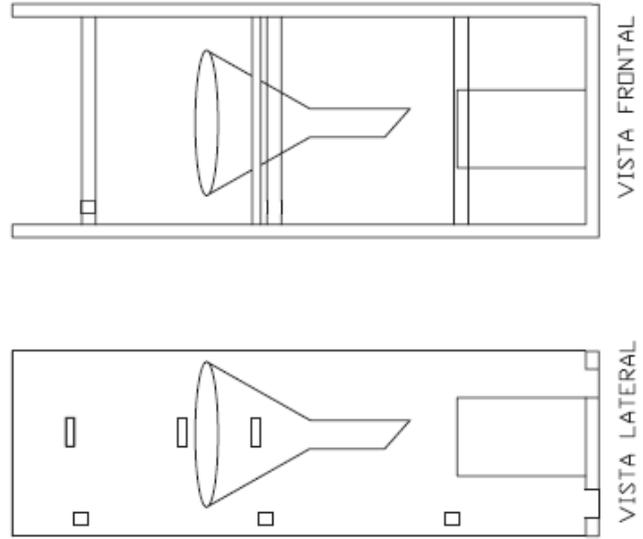


EQUIPO PARA MEDIA
VISCOSIDAD

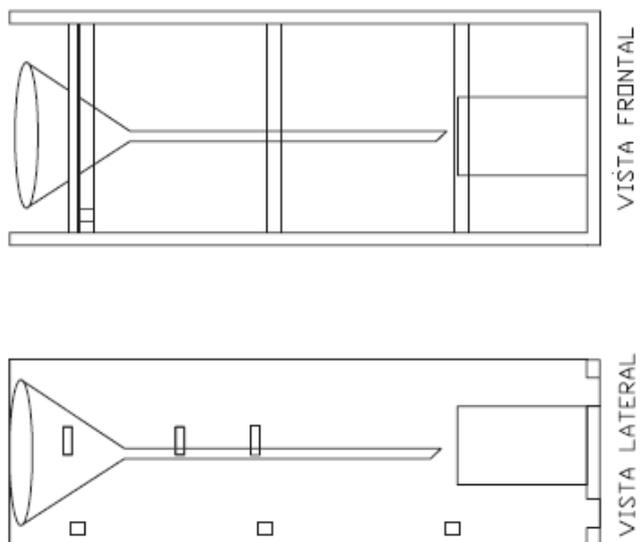


MANUAL DE USUARIO // VISOSMETRO PARA FLUIDOS DE ALTA, MEDIA Y BAJA DENSIDAD

EQUIPO PARA ALTA
VISCOSIDAD

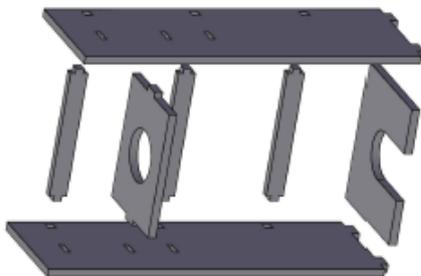


EQUIPO PARA BAJA VISCOSIDAD



USO DEL EQUIPO

Amar el equipo de acuerdo a la siguiente imagen; colocando el soporte intermedio del equipo en el indicado según la medición de viscosidad alta, media o baja a realizarse.



Coloco el embudo en su posición y el vaso de precipitación en la parte inferior cómo muestra la imagen a continuación.

Aplice la fórmula de Hagen- Poiseuille para cada uno de los viscosímetros, reemplazando el valor del tiempo en la siguiente fórmula:

ALTA VISCOSIDAD

$$\mu = \frac{0,00226176 (t)}{0,000056}$$

MEDIA VISCOSIDAD

$$\mu = \frac{0,00014136 * (t)}{0,000096}$$

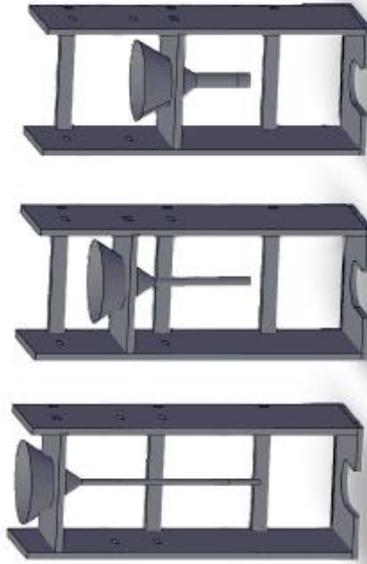
BAJA VISCOSIDAD

$$\mu = \frac{3,39405 * 10^{-5} (t)}{0,000176}$$

Retire con cuidado el embudo y vaso de precipitación para enjuagarlo con agua caliente, déjelo secar al ambiente para evitar rupturas en el equipo.

Desarme el equipo y coloque las piezas en la caja.

Se recomienda realizar varias mediciones entre 3 a 5 y sacar un promedio para obtener un valor más exacto.



Coloque el tapón en el centro del equipo según el embudo para el fluido de fluidos con alta viscosidad se aplica el tapón más grande y para los otros embudos se utiliza el tapón más pequeño.

Aparte, caliente la muestra hasta alcanzar los 20°C.

Coloque la muestra en el embudo taponado con la piola hacia la parte exterior para poder retirarlo.

Retire el tapón y al mismo tiempo tome el tiempo en transcurrir el fluido por el capilar, este debe ser una medición exacta.

VISCOSIDAD

Un fluido es un cuerpo que tiene la propiedad de fluir, y carece de elasticidad y rigidez. En los líquidos las fuerzas intermoleculares permiten el libre movimiento de las partículas. Gracias, a esta propiedad al verter un líquido en un recipiente este ocupará el volumen igual o parcial que su contenedor anterior.

En 1839, Hagen realizó el primer experimento científico que se utilizó un tubo o un capilar para medir la viscosidad, seguido por los estudios de Poiseuille quien realizó experimentos en capilar para entender la circulación sanguínea a través de los vasos capilares humanos. Así se descubrió la relación entre la velocidad de flujo y la caída de presión de un flujo por un capilar, conocida como la ley de Hagen - Poiseuille.

Para el cálculo de la viscosidad en función del flujo que transita por un área transversal, $2\pi r dr$ por segundo, simplemente es, $(2\pi r dr)v$ y el volumen total Q del líquido que pasa por un segundo es

$$Q = \frac{V}{t} = \int_0^R v(2\pi r dr) = \frac{2\pi P}{4\mu L} \int_0^R (R^2 - r^2)r dr$$

$$= \frac{\pi P R^4}{8\mu L}$$

Donde V es el volumen total y t es el tiempo de flujo. La ecuación 5 expresada anteriormente se llama la ecuación de Hagen-Poiseuille y es aplicable para gases y líquidos. Esta ecuación puede reordenarse como:

$$\mu = \frac{\pi \Delta p R^4 t}{8VL}$$

μ = viscosidad del fluido (kg/ms)

Δp = caída de presión a lo largo del capilar (kg/ms²)

R = radio del capilar (m)

L = longitud del capilar (m)

V = volumen de fluido que ha circulado en un tiempo t (m³/s)

t = tiempo de recorrido (s)

VALIDACIÓN DEL EQUIPO

El equipo cuenta con una validación de exactitud para su uso. En relación a un viscosímetro comercial marca Brookfield modelo RVDV3, número de serie E8401185, el cual cuenta con mantenimiento preventivo realizado el 20.06.2017, por lo que los valores tiene una mayor exactitud.

$$\%E = \frac{|(Ve - Vt)|}{Vt} \times 100$$

$\%E =$ Valor Experimental
 $Ve =$ Valor experimental
 $Vt =$ Valor tabulado

Obteniendo de esa manera, para el equipo de baja viscosidad una exactitud del 99,03%, media viscosidad de 99,38% y finalmente el equipo de alta viscosidad con una exactitud de 99,03%.

ALTA DENSIDAD

$$\%E.E = \frac{|(555,35 - 550)|}{550} \times 100$$

$\%E.E = 0,97\%$

MEDIA DENSIDAD

$$\%E.E = \frac{|(3,18 - 3,2)|}{3,2} \times 100$$

$\%E.E = 0,62\%$

BAJA DENSIDAD

$$\%E.E = \frac{|(1,13 - 1,2)|}{1,2} \times 100$$

$\%E.E = 0,7\%$

De esta manera se presenta un equipo con un error experimental en comparación con un equipo comercial menor a 1% por lo que el equipo tiene una exactitud mayor al 99%.

Autor: Carmen Galán
Tutor: Santiago Olmedo
Ingeniería Agroindustrial y de Alimentos
Universidad de las Américas

Figura 18. Manual de Usuario para Viscosímetro

El manual fue impreso en papel couche y la pasta laminada en formato A5.

Finalmente, el entregable de este proyecto de titulación es un equipo para la medición de la viscosidad en fluidos de alta, media y baja viscosidad, con una exactitud del 99% con su manual de uso el cual será donado a la carrera de Ingeniería Agroindustrial y de Alimentos de la Universidad de las Américas, cómo la muestra la figura 18, 19 y 20.

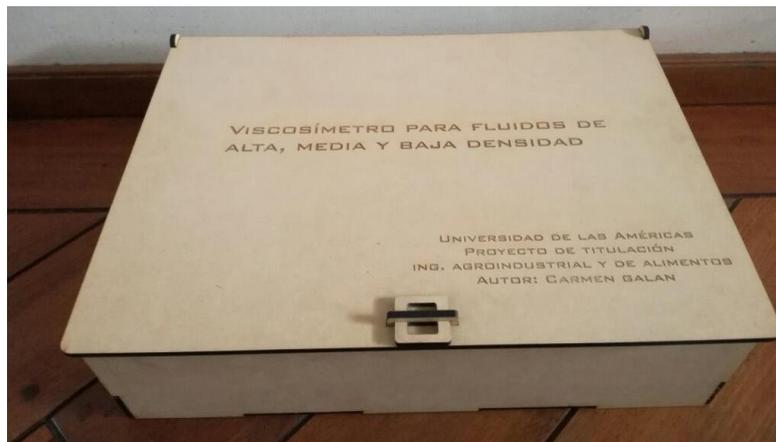


Figura 19. Entrega final de viscosímetro para fluidos de alta media y baja viscosidad.



Figura 20. Vista frontal del equipo con su respectivo manual.



Figura 21. Vista interna del equipo.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se logró diseñar un prototipo de viscosímetro para fluidos de alta media y baja viscosidad, en vidrio y su estructura de polimetilmetacrilato para poder garantizar su exactitud en la toma de datos, obteniendo datos reales para la viscosidad de las muestras.

Se logró determinar las dimensiones de altura, diámetro y volumen del equipo en base a bibliografía para poder evaluar cada uno de los facturas obteniendo de esa manera un primer viscosímetro con dimensiones de 7cm, 2cm; un segundo con 12cm, 1cm y finalmente 22cm y 0,7cm siendo largo del capilar y diámetro del mismo respectivamente en cada uno, con un volumen de 100ml en cada equipo.

Se logró analizar el tiempo apreciable de cada uno de los fluidos, como mayor input para lograr obtener un criterio de deserción de cada uno de los diferentes tratamientos.

Se observó que la temperatura es directamente proporcional a la viscosidad, ya que al aumentar la temperatura la viscosidad disminuye o viceversa, por lo que se realizaron las pruebas a una temperatura de 20°C.

Se determinó el mejor prototipo para un fluido de baja viscosidad como la leche descremada, para el cual se seleccionó el equipo con menor diámetro y mayor largo 0,7cm y 22cm, respectivamente, con un promedio en la viscosidad de 1,13Cp.

Se determinó el viscosímetro con medidas de diámetro en vástago de 1cm y largo de 12cm para fluidos de media viscosidad como es la pulpa de mora con 14°Brix, con un promedio de viscosidad de 3,18Cp.

Se seleccionó el prototipo de mayor diámetro y mejor longitud de vástago 2cm y 7cm, respectivamente para los fluidos de alta viscosidad como la miel obteniendo una viscosidad promedio de 555,35Cp.

Al validar el dimensionamiento de los viscosímetros con agua a 20°C se encontró que la viscosidad en el prototipo seleccionado para fluidos de baja viscosidad es exacta a la viscosidad con el agua $0,0101 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 0,00101 \text{ Cp}$, ya que con las medidas seleccionadas es más factible la obtención de datos precisos.

Se logró validar los prototipos creados con un viscosímetro de Brookfield, obteniendo una exactitud del 99%, por lo que se concluye que el equipo es efectivo y la viscosidad de un fluido determina el dimensionamiento de los tres viscosímetros que se construyeron.

5.2.Recomendaciones

Se recomienda realizar varias mediciones entre 3 a 5 repeticiones y realizar un promedio para poder obtener datos exactos en el tiempo de movimiento del fluido por el capilar.

Se recomienda realizar la limpieza del equipo con agua caliente para poder remover todas las impurezas del fluido analizado, y dejarlo secar al ambiente para evitar rupturas o desprendimientos de material en los vástagos de los embudos.

Se recomienda verificar las unidades de los datos a analizar para poder evitar confusiones en los cálculos, recordando que la medida de la viscosidad es en Pa.s o Cp. Es preferible utilizar la fórmula dada para cada uno de los equipos con las constantes para poder multiplicar el tiempo en segundos.

Para la manipulación del equipo se recomienda realizar con cuidado ya que el vidrio es un material frágil y podría dañarse en equipo, en caso de sufrir algún accidente contactarse con la empresa SAIGON del Ecuador.

Para el almacenamiento del equipo se recomienda ubicarlo en una altura no mayor de 1,20m, por seguridad para evitar que el equipo se caiga y generar algún accidente.

Se recomienda realizar futuras investigaciones a fin de poder obtener un equipo más robusto, con cambio del material vidrio a otro menos frágil con las mismas características de baja rugosidad, porosidad y transparencia.

Se recomienda sistematizar el uso del equipo para poder mejorar su facilidad en el manejo y toma de datos, a fin de poderlo realizar una sola persona.

Por su alta exactitud en los resultados obtenidos en comparación al viscosímetro comercial de Brookfield, se recomienda realizar un análisis detallado del costo de producción del mismo, ya que se lo podría comercializar como producto ecuatoriano a universidades, escuelas, colegios o pequeños productos y aumenten sus ganancias con un corrector control de calidad en sus productos.

Se recomienda realizar un estudio de desempeño del equipo para cada uno de los diferentes fluidos más utilizados en la industria de alimentos, textil, farmacéutica e industrial; para poder tener un rango más amplio de exactitud en el desempeño del mismo.

REFERENCIAS

- Alves, C. (2014). *Desenvolvimento tecnológico de um gel de pilocarpina e avaliação do seu efeito na atrofia do epitélio vaginal de ratas*. Recuperado el 12 de enero del 2018 de http://leg.ufpi.br/subsiteFiles/ppgcf/arquivos/files/dissertacaoCristina_compressed.pdf
- Atkins, P. y Paula, J. (2006). *Principios de Química*. (Tercera Edición). España: Editorial Técnica Médica Panamericana.
- Atkins, P y Paula, J. (2006). *Química Física*. (Octava Edición). España: Editorial Médica Panamericana
- Avallone E, (1992). *Manual del Ingeniero Mecánico*. (Novena Edición). México: McGraw Hill.
- Badui, S. (2006). *Proteínas. Química de los alimentos*. (Cuarta Edición). México: Pearson Education.
- Bautista, J. (2017). *Diseño de un equipo de volumen constante para caracterizar procesos físicos de la inyección de combustibles líquidos en un medio inerte*. Recuperado el 12 de septiembre del 2017 de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/8647>
- Bertrán, J. y Núñez, J. (2002). *Química Física*. España: Editorial Ariel S.A. p. 820 Brookfield, (s.f.). *Brookfield Dial Viscometer – Operating Instructions Manual* No. M/85-150-P700. Recuperado el 18 de diciembre del 2017 de <http://www.brookfieldengineering.com/-/media/ametekbrookfield/manuals/obsolete%20manuals/dial%20m85-150-p700.pdf?la=en>
- Bruus, H. (2015). *Microscale Acoustofluidics*. The Royal Society of Chemistry. DOI: <http://pubs.rsc.org/en/content/ebook/978-1-84973-671-8>
- Calsamigial, S., Castillejos, L., Astiz, S. y Baucells, Q. (2015). *Desarrollo de un simulador de explotaciones lecheras para valorar el efecto de diferentes estrategias productivas sobre el rendimiento técnico y económico*. 16 (1). Recuperado el 15 de agosto del 2017 de

- https://citarea.cita-aragon.es/citarea/bitstream/10532/3408/1/2015_SGEG_26.pdf
- Caputo, D., Berberi, R., Ferré, N., Puricelli, A., Fonteriz, V., Ferreyra, R., Aguirre, R., Calvo, E. y Bruno, J. (2015). Caracterización del fluido de trabajo para motores de Ciclo Otto a cuatro tiempos y su utilización en el ciclo previsto. 2 (1). Recuperado el 10 de octubre del 2017 de <http://revistas.unne.edu.ar/index.php/eitt/article/view/283>
- Carrasco, L., Castañeda, L. y Altamirano, K. (2015). Determinación de los parámetros reológicos de un champú con el modelo de Carreau-Yasuda. Recuperado el 3 de noviembre del 2017 de <http://www.repositorioacademico.usmp.edu.pe/bitstream/usmp/2160/1/21-37.pdf>
- Casimiro, C., Rodríguez, B. y Rojas, G. (2017). *Magnetic Viscosity: Determination of Electrical Resistivity*. 34 (2). Recuperado el 23 de octubre del 2017 de http://www.revistacubanadefisica.org/RCFextradata/OldFiles/2017/34_2/RCF%20No2%202017%20152.pdf
- Cengel, Y. (2015). Propiedades de las sustancias puras. Termodinámica. (Octava Edición) México: McGraw Hill.
- Chang, R. (2000). Físicoquímica. (Tercera Edición). México: Editorial McGraw-Hill Interamericana.
- Coba, M., Ramírez, R. y Ahumada, C. (2013). Diseño y construcción de un viscosímetro Saybolt y su implementación como instrumento didáctico. Scientia et Technica. Universidad del Atlántico 18 (2). Recuperado el 18 de agosto del 2017 de http://www.academia.edu/6813139/Dise%C3%B1o_y_construcci%C3%B3n_de_un_viscos%C3%ADmetro_Saybolt_y_su_implementaci%C3%B3n_como_instrumento_did%C3%A1ctico_Design_and_construction_of_a_Saybolt_viscometer_and_its_implementation_like_a_didactic_instrument
- Costa, E. (1985). Ingeniería Química: Flujo de fluidos. (Tercera Edición). Madrid: Editorial Alhambra.
- Costa, J., Cervera, S., Cunill, F., Esplugas, S., Mans, C. y Mata, J. (2004).

- Curso de ingeniería química: Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y fenómenos de transporte. España: Editorial Reverté.
- Creus, A. (2010). Viscosidad y consistencia. Instrumentación Industrial. (Octava Edición). México: Alfaomega Grupo Editor.
- Díaz, A. y Ávila, I. (1998). Viscosímetros de tubo para mieles finales de la industria azucarera. Tecnología Química. 18 (3). Recuperado el 8 de diciembre del 2017 de <http://web.a.ebscohost.com/bibliotecavirtual.udla.edu.ec/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=34ed8dd1-8815-4f06-9c2d-eb0306a274ee%40sessionmgr4008&vid=2&hid=4112>
- Díaz, J. (2006). Mecánica de los fluidos y hidráulica. Colombia: Editorial Universidad del Valle.
- Domínguez, L. y Parzanese, M. (2016). Tecnologías para la Industria Alimentaria. Recuperado el 17 de diciembre del 2017 de http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_01_Fluidos.pdf
- Duarte, C. y Niño, J. (2004). Introducción a la Mecánica de Fluidos. (Tercera Edición). Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Durán, M., Gutiérrez, I. y Prendes, M. (2016). *Certification of the ICT Competency of University Professors: Design and Validation of an Evaluation Instrument*. 21 (69). Recuperado el 18 de enero del 2018 de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-66662016000200527
- Erich, M., Piedra, M. y Olmo, A. (2015). Empleo de emulsiones con soluciones de tensoactivo para el transporte de sustancias de elevada viscosidad. 6 (1). DOI: 10.1234/rci.v6i1.365
- Fennema, O. (2010). Introducción a la química de los alimentos. Química de los alimentos. (Tercera Edición) España: Acribia Editorial.
- Fernández, F y González, C. (2016). *Medida de la viscosidad de un líquido*. Recuperado el 10 de agosto del 2017 de <http://hdl.handle.net/10251/65079>

- Findlay, A. (1979). *Propiedades los líquidos*. Química Física práctica de Findlay. España: Reverté.
- Fox, R. y Donald, A. (1989). *Introducción a la Mecánica de fluidos*. (Segunda Edición). México: McGraw Hill Interamericana SA.
- Galán, J. (1987). *Sistema de unidades físicas*. España: Editorial Reverte. p.62
- Gómez, A. (2014). *Propiedades reológicas de soluciones de asfaltenos y su relación con el envejecimiento por uso de los asfaltos*. 11 (2). Recuperado el 23 de diciembre del 2017 de file:///C:/Users/ECGalánCa1/Downloads/481-2176-1-PB.pdf
- Gutierrez, C. (1995). *Introducción a la metodología experimental*. (Segunda Edición). México: Editorial Limusa.
- Hemphill, T., Campos, W. y Pilehvari, A., (1993). *Yield - Power Law Model More Accurately Predicts Mud Rheology*. *Oil & Gas Journal*. 91 (34). Recuperado el 10 de enero del 2018 de <http://ia2.ignited.academy/?page=document/322375069/1-s2-0-S0920410512001179-main>.
- Herrero, A. (2016). *Innovaciones en el procesado de alimentos: Tecnologías no térmicas*. 4 (1). Recuperado el 23 de enero del 2018 de <https://www.unav.edu/publicaciones/revistas/index.php/revista-de-medicina/article/view/7633>
- Irving, S. (1995). *Mecánica de fluidos*. (Tercera Edición). México: Editorial McGraw-Hill.
- Kaless, G. (2016). *Una nueva aproximación para la evaluación del golpe de ariete incluyendo la condición inicial de presurización de la instalación y del fluido*. *Ingeniería del Agua*. 20(2). DOI:10.4995/ia.2016.3692
- Kane, J. y Sternheim, M. (2007). *Física*. (Segunda Edición). España: Editorial Reverte.
- Labdin. (2017). *Nuestros productos*. Laboratorios Distribuidora Internacional. Recuperado el 18 de febrero del 2018 de <http://www.labdin.com.ec/>
- Laffarga, J. (2016). *Reología de pasta cruda*. 7 (83). Recuperado el

- 18 de diciembre del 2017 de <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/2077/2586>
- Levenspiel, O. (1998). Flujo de fluidos e intercambio de calor. España: Editorial Reverté.
- Lizard, A., Terres, H., Vaca, M., Flores, J. y Chávez, S. (2015). Efecto de la relación de esbeltez en la cinemática del flujo rotatorio con fronteras rígidas. 28 (1). Recuperado el 18 de agosto del 2017 de <http://www.revistasnicaragua.net.ni/index.php/nexo/article/view/2203>
- Llamosa, L., Meza, L. y Botero, M. (2007). Estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método de promedios y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la Norma Técnica 17025. Scientia et Technica. 35. Recuperado el 16 de septiembre del 2017 de <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/viewFile/5479/2817>
- López, M. (2012). Operaciones básicas de laboratorio. España: Ediciones Parainfo.
- Luengo, C., Minazzoli, M., Angelo, D., Cachile, M. y Freytes, V. (2017). *Study of wettability and characterization of the PDMS - glass system in microfluidic devices*. 28 (1). Recuperado el 18 de enero del 2018 de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-11682017000100003
- Mariño, F. (2015). *Influence of the molecular structure on thermophysical properties of ionic liquids as lubricants*. Recuperado el 20 de agosto del 2017 de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=122588>
- Martin, I., Salcedo, R. y Font, R. (2011). Mecánica de fluidos. México: McGraw Hill.
- Martin, P. (1993). El laboratorio de control de los alimentos. Manuales de Control de Calidad de los alimentos. Italia: FAO.
- McCabe, W. y Smith, J. (1973). Operaciones básicas de Ingeniería química. España: Editorial Reverte.

- Mcweeny, D. y Day, J. (1996). Manuales para el Control de la Calidad de los Alimentos. La Garantía de la Calidad en el Laboratorio Químico de Control de los Alimentos. Italia. FAO.
- Medina, A. y Ovejero, J. (2010). Leyes de Newton y sus aplicaciones. Físico I. España: Universidad de Salamanca.
- Michaelides, E. (2014). *Viscosity In: Nanofluidics*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-05621-0_4
- Monsalvo, R., Miranda, M., Romero, M. y Muñoz, G. (2014). Balance de Materia y Energía: Procesos Industriales. México: Grupo Editorial Patria.
- Morán, M. y Shapiro, H. (1995). Fundamentos de Termodinámica Técnica. México: Editorial Reverté.
- Moreno, E. y Cervera, M. (2015). *Stabilized finite elements for Bingham and Herschel-Bulkley confined flows. Part I: Formulation*. Recuperado el 12 de septiembre del 2017 de https://www.scipedia.com/public/Moreno_Cervera_2015
- Mott, R. (1996). Mecánica de fluidos. (Tercera Edición). México: Pearson Education.
- Mott, R. (2006). Viscosidad de los fluidos. Mecánica de fluido. (Sexta Edición). México: Pearson Educación.
- Olmo, A., Piedra, M., Rojas, L., Madrigal, M. y Erich, M. (2015). *Study and modelation for low Reynolds value of two phases flow liquid-gas*. 18 (1). Recuperado el 16 de agosto del 2017 de <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/502/881>
- Páez, M., Alvis, A. y Arrázola, G. (2017). Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de soluciones acuosas diluidas de Cloruro de 1-butil-3-metil. Información Tecnológica. 25 (3). DOI: 10.4067/S0718-07642014000300021
- Parisienne, C. (1987). Vapor de Agua, Teoría y Aplicaciones. México: Limusa.
- Parrales, V. y Tamayo, J. (2012). Diseño de un modelo de gestión estratégico

para el mejoramiento de la productividad y calidad aplicado a una planta procesadora de alimentos balanceados. (Tesis de maestría). Escuela Superior Politécnica del litoral.

- Pérez, E. (2012). Viscosidad, consistencia y textura en los alimentos. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ciencias. Escuela de Biología. Departamento de Tecnología de Alimentos. Recuperado el 18 de diciembre del 2017 de <http://www.ciens.ucv.ve:8080/generador/site/mmedina/archivos/Practica4.pdf>
- Perry, R. y Chilton, C. (1990). Biblioteca del Ingeniero Químico. (Quinta Edición). México: Mc Graw Hill.
- Ramírez, J. (2006). Introducción a la Reología. Introducción a la Reología de los alimentos. Colombia: Editorial Reciteia.
- Reymond, A., Serway, J. y Faughn, S. (2001). Física. México: Pearson Education.
- Riaño, F. (2015). *The Birth of Experimental Hydraulics*. 36 (2). p. 65. Recuperado el 15 de diciembre del 2017 de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382015000300004
- Rojas, M., Torres, A. y Hoffmann, W. (2016). Determinación de propiedades fisicoquímicas de propóleos provenientes de cinco especies de abejas sin aguijón de norte de Santander-Colombia. 14 (1). DOI: <https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n1.2016.1928>
- Salvador, J. (2012). Mecánica de fluidos en ingeniería. España: UPCGRA.
- Santillán, R. (2001). Termodinámica Básica. Riobamba: ESPOCH,
- Schaum, R. (1994). Mecánica de Fluidos e Hidráulica. (Tercera Edición). España: McGraw Hill Interamericana.
- Schwarcz, J. (2012). *The Right Chemistry: 108 Enlightening, Nutritious, Health-Conscious and Occasionally Bizarre Inquiries into the Science of Daily Life*. Canadá: Editorial: Doubleday.
- Sierra, I., Pérez, D., Gómez, S. y Morante, S. (2010). Calentamiento de

- Joule. Análisis instrumental. España: Netbiblo.
- Sobrinó, M. y Segovia, J. (2012). Desarrollo de un viscosímetro de caída de cuerpo para caracterizar biocombustibles a alta presión. *Termodinámica*. 2213 (11). DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5025>
- Sobrinó, M. (2012). Un viscosímetro automático mide en altas presiones para caracterizar biocombustibles. *Noticia*. 87(1). Recuperado el 05 de enero del 2018 de <http://web.a.ebscohost.com/bibliotecavirtual.udla.edu.ec/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=9d3bc0e8-2dbd-4b49-95b6-9c966ee49106%40sessionmgr4010&vid=2&hid=4112>
- Sohel, M. y Estellé, P. (2017). *A state of the art review on viscosity of nanofluids*. Elsevier. (76). DOI: <https://doi.org.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/10.1016/j.rser.2017.03.113>
- Soledad, B. (2011). Métodos de validación. La validación en la industria. España: Edición.
- Soriano, R. y Díaz, A. (2015). Estudio técnico de la adquisición y transmisión de datos en tiempo real de temperatura, presión, flujo de agua y flujo de vapor geotérmico, mediante puerto de enlace wireless y representación de los datos en SCADA-WEB, de pozos de producción de una central geotérmica. DOI: <http://ri.ues.edu.sv/8904/>
- Stechina, D., Pauletti, M., Cives, H., Maffioliv, R., Lesa, C., Bogdanoff, L. Kulczycki, C., Sosa, A. e Iribarren, O. (2017). Estudios de aprovechamiento integral de cascara de naranja. 7 (7). Recuperado el 17 de octubre del 2017 de <http://pcient.uner.edu.ar/index.php/Scdyt/article/view/393>
- Streeter, V. (2000). Propiedades de los fluidos y definiciones. *Mecánica de fluidos* (Novena Edición). Colombia: McGraw-Hill.
- Swaan, B. (1999). Isaac Newton, El inglés de la manzana (Segunda Edición). Chile: Andrés Bello.
- Talens, O., Cortés, V. y Fuentes, A. (2017). Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de un alimento fluido. DOI: <http://hdl.handle.net/10251/83406>

- Tomos, B. (2015). Diagnóstico de motores diésel en el análisis del aceite usado. España: Editorial Reverté.
- Valenzuela, C. (1994). Sistemas homogéneos de un componente. Química General. España: Salamanca.
- Vargas, L., Arroyo, G., Herrera, C., Pérez, A., García, M. y Rodríguez, J. (2016). *Physical properties of mucilage prickly pear*. 26 (1). DOI: <https://doi.org/10.15174/au.2016.839>
- Villaseca, O. (2014). *Molecular modeling of interfacial properties of industrial relevant fluids*. 4 (1). DOI: <https://ddd.uab.cat/record/116397>
- Villacís, G. (2016). Análisis de la predicción científica en Isaac Newton. 4 (1). Recuperado el 12 de septiembre del 2017 de <file:///C:/Users/ECGalanCa1/Downloads/244-822-1-PB.pdf>
- Warren, L. y Julian, C. (1973). Operaciones básicas de Ingeniería Química. España: Editorial Reverte.

ANEXOS

Anexo 1. Certificado de Mantenimiento del Viscosímetro de Brookfield



INFORME TÉCNICO

Informe N°: UIO-17-CPV-000234

Cliente: Universidad de las Américas – Sede Queni
Ciudad: Quito
Atención: Ing. Francisco Ramírez
Fecha: 20/06/2017

Equipo: Viscosímetro
Marca: Brookfield
Modelo: RV DV E
Serie: E8401185
Código Interno: 1394
Ubicación: Intermedio 2

Problema Reportado:

Mantenimiento Preventivo por Servicio.

Trabajo realizado:

- Limpieza interna y externa.
- Limpieza de tarjetas electrónicas.
- Limpieza de partes ópticas.
- Lubricación de partes móviles.

Diagnóstico:

El equipo es sometido a mantenimiento preventivo de rutina.

Conclusiones:

Estado actual del equipo: OPERATIVO.

Saludos;

Ing. Cristian Paz V.
Asesor Técnico
Electromed

ELECTRO MED. CIA. LTDA.
R.U.C.: 019037872001
Dirección: Calle Vieja 10-73 y Elba Lait
Fax: (593-7) 2846155 P.O. Box 01.01.304
Teléfono: (593-7) PBD: 2822538 – 2863390 Ext. 118 / 130
Email: juan.alvarez@electromed.com
Cuenca - Ecuador

Anexo 2. Medición de Grados Brix de Pulpa de mora



Figura 22. Grados Brix de la Pulpa de mora

Anexo 3. Medición de viscosidad en viscosímetro de Brookfield de miel, pulpa de mora y leche descremada.



Figura 23. Medición de la viscosidad de leche descremada en viscosímetro de Brookfield.



Figura 24. Medición de la viscosidad de pulpa de mora en viscosímetro de Brookfield.



Figura 25. Medición de la viscosidad de miel en viscosímetro de Brookfield.

Anexo 4. Pruebas en viscosímetros de baja, media y alta viscosidad para la leche, pulpa de mora y miel



Figura 26. Muestras y equipo para realizar mediciones del tiempo

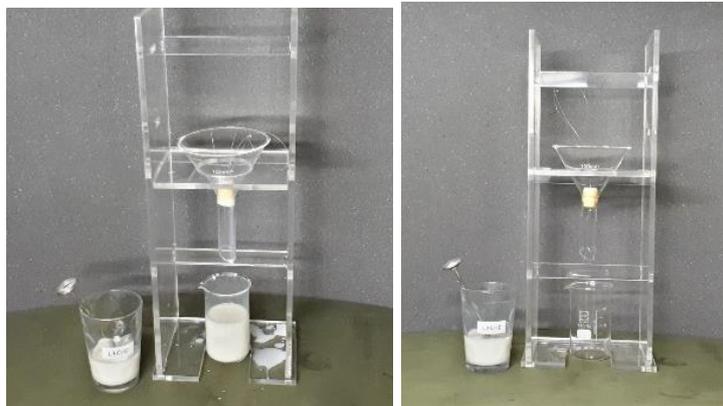


Figura 27. Toma de tiempo en viscosímetro para alta viscosidad con leche



Figura 28. Toma de tiempo en viscosímetro para media viscosidad con leche

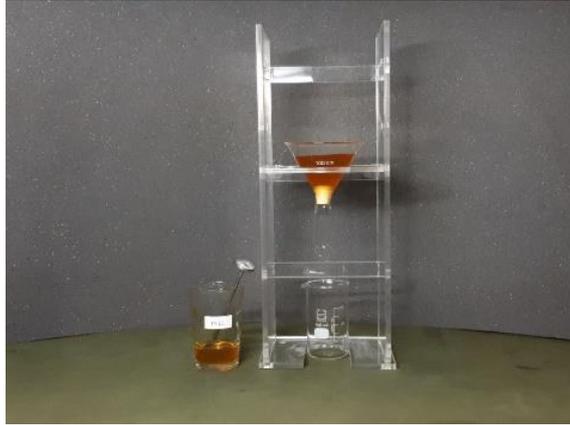


Figura 29. Toma de tiempo en viscosímetro para alta viscosidad con miel



Figura 30. Toma de tiempo en viscosímetro para media viscosidad con miel



Figura 31. Toma de tiempo en viscosímetro para baja viscosidad con miel



Figura 32. Toma de tiempo en viscosímetro para baja viscosidad con pulpa de mora



Figura 33. Toma de tiempo en viscosímetro para alta viscosidad con pulpa de mora

