



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE UN VISCOSÍMETRO FABRICADO CON TECNOLOGÍA
DISPONIBLE EN GUATEMALA**

Manuel Antonio Tay Pac

Asesorado por el Ing. José Manuel Tay Oroxom y
coasesorado por el Ing. William Eduardo Fagiani Cruz

Guatemala, octubre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN VISCOSÍMETRO FABRICADO CON TECNOLOGÍA
DISPONIBLE EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MANUEL ANTONIO TAY PAC

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ MANUEL TAY OROXOM Y
COASESORADO POR EL ING. WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Alfredo Beber Aceituno (a. i.)
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordóñez
EXAMINADOR	Ing. Mario José Mérida Meré
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN VISCOSÍMETRO FABRICADO CON TECNOLOGÍA DISPONIBLE EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 28 de noviembre de 2013.

Manuel Antonio Tay Pac

Guatemala 23 de agosto de 2017

Ing. Carlos Salvador Won Davi

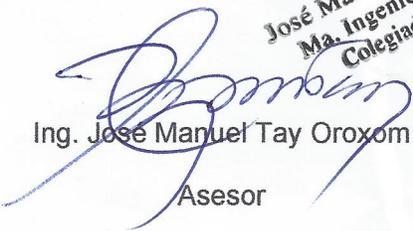
Director

Escuela de Ingeniería Química

Estimado Ingeniero Won

Por medio de la presente me dirijo a usted, para informarle que he revisado el informe final de graduación del estudiante Manuel Antonio Tay Pac, que se identifica con carné número 200815313 y DPI No. 1643108860101. Lleva el título "Diseño de un viscosímetro fabricado con tecnología disponible en Guatemala", y que encontrado satisfactorio

Agradeciendo su atención



Ing. José Manuel Tay Oroxom

Asesor

José Manuel Tay Oroxom
Ma. Ingeniero Químico
Colegiado No. 121



Guatemala, 01 de septiembre de 2017.
Ref. EIQ.TG-IF.038.2017.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **177-2013** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Manuel Antonio Tay Pac**.
Identificado con número de carné: **2008-15313**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**DISEÑO DE UN VISCOSÍMETRO FABRICADO CON TECNOLOGÍA
DISPONIBLE EN GUATEMALA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **José Manuel Tay Oroxom**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Víctor Herbert De León Morales
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.052.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **MANUEL ANTONIO TAY PAC** titulado: **"DISEÑO DE UN VISCOSÍMETRO FABRICADO CON TECNOLOGÍA DISPONIBLE EN GUATEMALA"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Dav
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre 2017

Cc: Archivo
CSWD/ale



Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.499-2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN VISCOSÍMETRO FABRICADO CON TECNOLOGÍA DISPONIBLE EN GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Manuel Antonio Tay Pac**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, octubre de 2017

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios, brindándome la oportunidad de llegar a ser un profesional.

Facultad de Ingeniería

Por proporcionarme los conocimientos necesarios en toda mi formación académica.

Mi Familia

A mis padres y hermano mayor, por tener siempre su apoyo en este camino de aprendizaje.

**Compañeros de
la Facultad**

Con quienes viví una gran experiencia, llena de horas de estudio, pero también en donde pudimos compartir muchas aventuras y buenos momentos.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios, brindándome la oportunidad de llegar a ser un profesional.

Mis padres

Por los consejos, apoyo y paciencia que han tenido conmigo en todo este camino de aprendizaje y a lo largo de mi vida.

Facultad de Ingeniería

Por proporcionarme los conocimientos necesarios en toda mi formación académica y permitirme utilizar las instalaciones para la elaboración de este trabajo.

Facultad de Farmacia

Por permitirme utilizar sus instalaciones y equipos para realizar este trabajo de tesis.

Asesores y revisores

El apoyo y la colaboración para poder realizar este trabajo de tesis.

**Compañeros
la Facultad**

Con quienes viví una gran experiencia, llena de horas de estudio, pero también en donde pudimos compartir muchas aventuras y buenos momentos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVI
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Fluido.....	3
2.1.1. Líquido.....	3
2.1.2. Gases	4
2.1.3. Temperatura	4
2.2. Propiedades de los fluidos.....	5
2.2.1. Densidad de los fluidos.....	5
2.3. Tipos de fluidos	5
2.3.1. Fluido newtoniano.....	6
2.3.2. Fluido no newtoniano.....	6
2.4. Viscosidad	7
2.4.1. Factores que afectan a la viscosidad.....	8
2.5. Dispositivos para medir viscosidad.....	8
2.5.1. Diseño propuesto del viscosímetro de agujas	11

3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	15
3.1.	Variables	15
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	16
3.2.1.	Área de aplicación.....	16
3.3.	Recursos humanos disponibles	16
3.3.1.	Investigador.....	16
3.3.2.	Asesor y Coasesor	17
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	17
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	18
3.5.1.	Técnica cualitativa.....	18
3.5.2.	Técnica cuantitativa.....	19
3.5.3.	Calibración de las agujas	19
3.5.4.	Diagrama de viscosímetro.....	21
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	21
3.6.1.	Recolección de datos para calibración.....	21
3.6.2.	Recolección de datos para mediciones del viscosímetro	22
3.7.	Tabulación, ordenamiento y tratamiento de la información	23
3.8.	Análisis estadístico.....	23
4.	RESULTADOS.....	29
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	41
	CONCLUSIONES.....	47
	RECOMENDACIONES	49
	BIBLIOGRAFÍA.....	51
	APÉNDICES.....	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Correlación con estándar ASTM. Aguja 1	29
2.	Correlación con estándar ASTM. Aguja 1	30
3.	Correlación con estándar ASTM. Aguja 2	31
4.	Correlación con estándar ASTM. Aguja 2	32
5.	Correlación con estándar ASTM. Aguja 3	33
6.	Correlación con estándar ASTM. Aguja 3	34
7.	Correlación con estándar ASTM. Aguja 4	35
8.	Correlación con estándar ASTM. Aguja 4	36
9.	Comparación de desviaciones estándar en todas las agujas. Intervalo de 20 a 80 grados Celsius	37

TABLAS

I.	Factores que influyen en la viscosidad.....	8
II.	Equivalencia de la aguja A1 de tiempo de caída a viscosidad cinemática según el estándar ASTM S2000	12
III.	Rango efectivo de medición de viscosidad cinemática para cada aguja según el estándar ASTM S2000.....	13
IV.	Modelo de cada aguja donde presenta su mejor desempeño.....	14
V.	Variables	15
VI.	Variables a manipular.....	15
VII.	Técnica cuantitativa.....	19
VIII.	Puntos establecidos por el aceite estándar ASTM S200.....	20

IX.	Diseño del viscosímetro junto a la aguja A1	21
X.	Recolección de datos.....	22
XI.	Datos de la viscosidad	22
XII.	Nomenclatura de análisis de varianza	25
XIII.	Análisis de varianza de dos factores con repetición	28
XIV.	Prueba de jabón 1 (aguja 1). Viscosímetro Brookfield RVDV-E	38
XV.	Prueba de jabón 2 (aguja 3). Viscosímetro Brookfield RVDV-E	38
XVI.	Prueba de jabón 3 (aguja 3). Viscosímetro Brookfield RVDV-E	38
XVII.	Prueba de jabón 4 (aguja 4). Viscosímetro Brookfield RVDV-E	38
XVIII.	Prueba de miel comercial (aguja 3). Viscosímetro Brookfield RVDV-E	39
XIX.	Prueba de jabón 1 en viscosímetro Brookfield LVDV-E (aguja 2).....	39
XX.	Prueba de jabón 2 en viscosímetro Brookfield LVDV-E (aguja 3).....	39
XXI.	Prueba de jabón 3 en viscosímetro Brookfield LVDV-E (aguja 3).....	39
XXII.	Prueba de jabón 4 en viscosímetro Brookfield LVDV-E (aguja 4).....	40
XXIII.	Prueba de miel comercial en viscosímetro Brookfield LVDV-E (aguja 4).....	40
XXIV.	Prueba de jabón 5 en viscosímetro Brookfield LVDV-E (aguja 4).....	40
XXV.	Resumen de confiabilidad de las agujas.....	40
XXVI.	Comparación de mediciones de viscosidad entre los viscosímetros de agujas y Brookfield RVDV-E	44
XXVII.	Comparación de mediciones de viscosidad entre los viscosímetros de agujas y Brookfield LVDV-E.....	45

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cPs	<i>Centipoise</i>
cSt	<i>Centistokes</i>
r	Coeficiente de correlación de Pearson
R²	Coeficiente de determinación
R	Constante de los gases ideales
ρ	Densidad
dy	Derivada parcial de la viscosidad
°C	Grados Celsius
%	Porcentaje
s	Segundos
T	Temperatura
v	Viscosidad cinemática
μ	Viscosidad dinámica

GLOSARIO

ASTM	Organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas.
Cinemático	Referente a la cinemática, esta rama de la física describe el movimiento de los objetos sin considerar las fuerzas, solo la trayectoria en función del tiempo.
Coefficiente de determinación (R^2)	Representa la relación entre las variables “X” y “Y”, como se ve afectado el resultado en Y por X el máximo es “1”.
Correlación	Estadístico que se emplea para medir la intensidad de la asociación entre dos variables.
cSt	Unidad de medición de viscosidad cinemática (mm^2/s).
cPs	Unidad de medición de viscosidad dinámica ($\text{mPa}\cdot\text{s}$).
Dinámico	Proviene de dinámica, esta describe los cambios de estado físico o estado de movimiento.
Eje	Elemento que está diseñado para guiar un movimiento de rotación o una pieza como engranaje.

Esmerilar	Pulir una superficie.
Estándar	Patrón o modelo que sirve de referencia para medir o valorar cosas del mismo ámbito.
Fluido	Todo cuerpo que tiene la propiedad de fluir carece de rigidez y elasticidad. Entre sus moléculas hay una atracción débil.
Fluido ideal	Fluido que no tiene rozamiento y es incompresible. No debe confundirse con un gas perfecto.
Par de torsión	Sistema formado por dos fuerzas de la misma intensidad con dirección opuesta que produce un torque.
Propiedad intensiva	Son propiedades que no dependen de la cantidad de sustancia presente.
Regresión	Técnica estadística utilizada para desarrollar un modelo matemático y aproximaciones de una relación entre variables cuantitativas.
Sistema CGS	Sistema cuyas unidades básicas son centímetro, gramo y segundo.
Tecnología apropiada	Conjunto de conocimientos técnicos, científicamente ordenados, que permiten diseñar y crear bienes y

servicios adaptados y ajustados a un medio social, económico y tecnológico.

Torque

Fuerza aplicada en una palanca que permite rotar. Esta se aplica en el extremo de un brazo de palanca.

Tubo capilar

Tubo donde la capilaridad permite y causa el movimiento de un líquido.

RESUMEN

El siguiente informe describe de forma ordenada el procedimiento desarrollado para el diseño, construcción y evaluación de un viscosímetro construido con recursos disponibles en Guatemala. La razón del trabajo es proponer y ejecutar el diseño de la fabricación, y evaluar el comportamiento de un viscosímetro, capaz de proporcionar información de confiabilidad y trazabilidad. La idea fundamental fue la utilización de tecnología, equipo y materiales disponibles de forma local.

El material seleccionado fue el aluminio, metal que por sus propiedades proporcionó las cualidades ideales, como su bajo peso. Siguiendo el principio de un viscosímetro cinemático, y considerando que la viscosidad es dependiente de la temperatura, era necesaria la incorporación de un segundo equipo, que serviría para la manipulación de la temperatura y para llevar el viscosímetro a las diferentes condiciones de trabajo necesarias. Se trabajó en diferentes rangos de temperatura, comprendidos entre 20 a 80 grados Celsius, por lo que el medio seleccionado para manipular la temperatura fue aceite mineral, que posee una capacidad calorífica adecuada para la manipulación de este parámetro.

Es relevante mencionar que para el viscosímetro propuesto se diseñaron cuatro agujas, las cuales son los dispositivos con los que se realizará la medición de la viscosidad por separado. Para eso, en el proceso de diseño se realizaron pruebas relacionadas con la geometría de las agujas indicadas. Este diseño conlleva la reducción de la turbulencia que el fluido a medir, con su viscosidad, pueda generar, por lo que se consideró que el diseño de las agujas

permita que se mantengan estables durante el recorrido de determinado fluido, para la medición de la viscosidad. Estas agujas están conformadas por una cola que funciona como aleta para regular el movimiento dentro del fluido. El diseño de las agujas es torneado como pieza única, descartando el error que podría provocar si hubiera uniones con soldadura dentro de la aguja.

Durante el desarrollo del trabajo fue necesario utilizar un parámetro de viscosidad certificado para el estudio del comportamiento del equipo propuesto. Para esto se obtuvo el aceite estándar ASTM S2000 de viscosidad certificada. Este es un aceite que se encuentra calibrado para modificar su viscosidad a diferentes temperaturas determinadas, lo que permite obtener una regresión y correlación a partir de este.

La medición de la viscosidad en el equipo propuesto se realizará de la siguiente manera: la aguja A1 (ver apéndice 3) determinará el rango de viscosidad del fluido, por medio de la medición del tiempo de caída de la aguja, en los segundos que esta necesite para recorrer la distancia establecida en el viscosímetro. Se estableció una equivalencia entre los tiempos de caída de la aguja 1 (A1) y las viscosidades cinemáticas proporcionadas por el aceite estándar ASTM S2000, presentadas a continuación:

- Rango 1 (s): 1,86-8,02, equivalente a 166,6-890,6 cSt
- Rango 2 (s): 8,02-15,52, equivalente a 890,6-1561cSt
- Rango 3 (s): 22,94-53,29, equivalente a 2 137-6 162cSt
- Rango 4 (s): 53,29-76,36, equivalente a 6162-9772 cSt

Cada uno de los tiempos de caída se encuentra relacionado con las magnitudes de viscosidad cinemática de la siguiente manera: un tiempo de caída de 1,86 segundos en la aguja A1 corresponde a una viscosidad de 166,6

cSt. Según esta relación se establecieron los rangos, dando como resultado que si la aguja A1 presenta un tiempo de caída entre 1,86 a 8,02 segundos, la viscosidad del fluido se encuentra entre 166,6 a 890,6 cSt. De igual manera se presentan los rangos 2, 3 y 4.

EL tiempo de caída de la aguja 1 será comparado con la equivalencia presentada anteriormente. Luego se escogerá qué aguja presenta el mejor desempeño en el rango de viscosidad establecido por la aguja A1. Para determinar la viscosidad del fluido se mide el tiempo de caída de la segunda aguja, escogida tres veces para luego obtener un promedio. Este se evalúa en el modelo que se ajuste al intervalo de menor variación.

Se comparó el equipo con un viscosímetro que se encuentra en el mercado, denominado viscosímetro Brookfield modelo LVDV-E y RVDV-E, cuya diferencia radica en el protector de la aguja para la medición. Estos dos modelos se encuentran en el Laboratorio de Fisicoquímica de la Facultad de Ingeniería y en el Departamento de Farmacia Industrial de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Puesto que era necesario modificar las condiciones de trabajo y mantenerlas de acuerdo al parámetro de temperatura deseada, se armó otro dispositivo, al cual se le conoce como marmita, que permitió la modificación de la temperatura de 20 a 100 °C. Además era necesario que la presencia de este no dificultara la toma de tiempos de caída. El trabajo demostró así la factibilidad de un viscosímetro con tecnología apropiada para Guatemala, al que se le pudo encontrar un modelo matemático para medir la viscosidad de líquidos, menos y más que el agua.

OBJETIVOS

General

Desarrollar un modelo matemático para el diseño de un viscosímetro fabricado en Guatemala.

Específicos

1. Seleccionar materiales y equipo disponibles en Guatemala para el diseño. Armar el viscosímetro siguiendo los parámetros establecidos para este, dejando constancia de las medidas y materiales utilizados.
2. Medir la viscosidad de diferentes líquidos con parámetros de menor y mayor densidad que el agua.
3. Verificar cuáles rangos de viscosidad pueden ser analizados de forma adecuada con el viscosímetro.
4. Desarrollar un modelo matemático para el viscosímetro.

Hipótesis

Hipótesis científica: es posible diseñar, fabricar y evaluar un viscosímetro cinemático confiable y funcional con recursos disponibles en Guatemala, haciendo uso de conocimientos obtenidos en la Facultad de Ingeniería, para sustituir equipos importados.

Hipótesis estadística

Hipótesis nula (H_0): no existe diferencia significativa entre las mediciones de viscosidad de las 4 agujas diseñadas del viscosímetro, por lo que pueden usarse para medir en los diferentes puntos de la correlación.

Hipótesis alternativa (H_1): existe diferencia significativa entre las mediciones de viscosidad de las 4 agujas diseñadas del viscosímetro, por lo que pueden usarse para medir en los diferentes puntos de la correlación.

INTRODUCCIÓN

El presente planteamiento de investigación se realizó con la finalidad de diseñar y desarrollar equipos de manera local para la industria. Es un problema que en la actualidad Guatemala no tenga la capacidad de poder construir equipos que ayuden a la industria, situación que no solo genera problemas en la producción de objetos sino que incrementa las inversiones que las empresas deben realizar para poder superar la falta de estos. El siguiente trabajo se enfoca en diseñar un viscosímetro que tenga la capacidad de poder medir viscosidades a diferentes temperaturas y tipos de fluidos que se necesiten medir.

La falta de estos equipos en una industria que maneja fluidos en los que el parámetro de viscosidad sea un control necesario genera problemas en sus procesos. La obtención de estos equipos requiere de una inversión considerable, porque se importan del mercado internacional a un precio alto y con un costo de mantenimiento también elevado. Por lo general solo empresas con grandes ingresos son capaces de poder obtenerlos y, aun en estas instituciones, es difícil la aceptación de estos presupuestos. Otro aspecto es el cuidado de estos equipos, que necesitan condiciones de trabajo rigurosas y difíciles de controlar, por lo que en la actualidad se han realizado intentos, incluyendo este trabajo.

El diseño de este equipo es una idea que se formalizó para medir la viscosidad en forma práctica, con un instrumento confiable y de fácil acceso. Este equipo se debe fabricar con materiales disponibles en Guatemala. Las piezas que hacen posible las mediciones están hechas de aluminio, torneadas

en una empresa nacional de acuerdo a un prototipo previamente ensayado y sometido a pruebas, para determinar su comportamiento en los fluidos de pruebas. Al finalizar estas pruebas se obtuvieron cuatro tipos de figuras, cada una ajustada para diferentes valores de viscosidad. Se les llamó agujas y tienen puntas diferentes que permiten un desplazamiento adecuado según la naturaleza del fluido a estudiar.

Fue necesaria la obtención de un estándar certificado, un aceite ASTM S2000, para poder realizar las diferentes regresiones y correlaciones que se presentan en este trabajo. Este estándar abarcaba un rango de 20 a 100 °C y viscosidades en los rangos de 72,80 a 9772 cSt. Durante los ensayos fue necesario descartar dos puntos, ya que generaban mucha incertidumbre y el tiempo de caída era imposible de determinarse.

La temperatura afecta el comportamiento de la viscosidad, por lo que cualquier variación de esta modifica las condiciones y los resultados. Dado esto, se hizo necesario construir otro equipo que permitiera mantener las condiciones de trabajo necesarias y constantes.

Para probar el desempeño que el equipo podía alcanzar se realizaron pruebas con 5 líquidos: miel y cuatro jabones que abarcaron un rango de menor a mayor densidad que la del agua; los cuatro jabones fueron ordenados por viscosidad ascendente. Estas muestras fueron evaluadas en viscosímetros Brookfield, modelos RVDV-E y LVDV-E, mediciones que sirvieron para comparación con las obtenidas del viscosímetro de agujas propuesto por este trabajo.

1. ANTECEDENTES

La construcción de los viscosímetros ha sido el resultado de la necesidad de poder medir la viscosidad. Diversos intentos se han realizado para poder realizar la construcción de estos instrumentos. Centrándose en la región centroamericana y en México, existen otros trabajos correspondientes al diseño de viscosímetros.

En México existen varios estudios sobre el diseño de viscosímetros, adaptaciones que se realizan según las necesidades del investigador o del entorno en donde se encuentre. En septiembre de 2008 se publica el trabajo de la ingeniera mecánica eléctrica Blanca Estela Sánchez, del Instituto Politécnico Nacional, cuyo diseño se basa en el viscosímetro de bola. Su diseño tiene como objetivo procesar la información obtenida y generar un registro permanente de los resultados obtenidos. Para el autor es importante reducir la intervención del usuario en cada prueba, por lo que automatiza el viscosímetro de bola por medio de un electroimán, el cual, al momento de dejar caer “la bola”, se desconecta para así medir el tiempo de caída para calcular su respectiva viscosidad cinemática.

Otro estudio sobre el diseño de viscosímetros es un trabajo publicado en 1978, por el ingeniero químico Jesús Eduardo Montañez, de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Este trabajo plantea realizar un viscosímetro cinemático electrónico y para ello presenta un diseño completo que tiene control de temperatura para cambiar condiciones de trabajo y en el que la medición de la viscosidad se realiza por medio de un osciloscopio. Realizó mediciones cambiando la temperatura y también tomando en cuenta cambios en la

naturaleza del fluido, como su peso molecular (cambio de concentración presentada en molaridad). Por su diseño fue capaz de medir viscosidades menores de 500 cPs, logrando calcular la viscosidad dinámica con un viscosímetro cinemático.

Se han realizado diversos intentos por parte de estudiantes. Uno de los documentados fue realizado en el XX Concurso Universitario Feria de las Ciencias, realizado por la Universidad Nacional Autónoma de México, cuyo objetivo era medir la viscosidad por medio de cilindros concéntricos. El trabajo logra armar un dispositivo capaz de medir la viscosidad dinámica de diferentes productos. Este equipo se fabricó con un cilindro de aluminio torneado al cual se le coloca un motor reductor. Por medio de la medición del amperaje se calcula la viscosidad del fluido.

Por otro lado, en Suramérica, en 2006, se publicó un artículo científico acerca del diseño, construcción y validación de un viscosímetro. Este trabajo es realizado por dos estudiantes de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, los autores son Diana Fernanda Abril Valencia y Edgar Mauricio Vargas Solano. El diseño es el de un viscosímetro de bola cuyo fin era también validarlo para medir líquidos alimenticios. Los autores realizaron varias pruebas para obtener datos confiables de viscosidad dinámica.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fluido

Se denomina fluido a un tipo de medio continuo formado por alguna sustancia entre cuyas moléculas hay fuerzas de cohesión débiles o que toman la forma del recipiente que los contiene. Los fluidos se caracterizan por cambiar de forma sin que existan fuerzas restitutivas tendentes a recuperar su forma original. En el cambio de forma de un fluido la posición que toman sus moléculas varía ante una fuerza aplicada sobre ellos, pues pueden ser deformados indefinidamente. Según Robert Mott, los fluidos están conformados por ambos líquidos y gases, siendo los segundos mucho menos viscosos. Los líquidos toman la forma del recipiente que los aloja y mantienen su propio volumen, mientras que los gases carecen de volumen como de forma propia. Las moléculas no cohesionadas se deslizan en los líquidos y se mueven con gran libertad en los gases¹.

2.1.1. Líquido

Estado de agregación de la materia en forma de fluido incompresible. Es el único estado de la materia con un volumen definido, sin embargo, no es rígido y puede deformarse infinitamente. Un líquido está formado por pequeñas partículas vibrantes como los átomos y las moléculas, unidas por enlaces intermoleculares. Un líquido es capaz de fluir y tomar la forma del recipiente que lo contiene. La diferencia con los gases es que un líquido no se dispersa para llenar cada espacio de un contenedor, según lo define Mott, y mantiene una

¹ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 126.

densidad bastante constante². Una característica distintiva del estado líquido es la tensión superficial, generada en parte por las fuerzas intermoleculares. Los líquidos presentan tensión superficial y capilaridad, se dilatan cuando se incrementa su temperatura y se contraen cuando se enfrían, aunque sometidos a compresión su volumen casi no varía, a diferencia de lo que sucede con los gases. Los objetos inmersos en algún líquido están sujetos a un fenómeno conocido como flotabilidad.

2.1.2. Gases

Los gases son fluidos altamente compresibles, que experimentan grandes cambios de densidad con la presión y la temperatura, adoptando la forma y el volumen del recipiente que los contiene y tendiendo a separarse. Las moléculas que constituyen un gas casi no son atraídas unas por otras, por lo que se mueven en el vacío a gran velocidad y muy separadas unas de otras.

2.1.3. Temperatura

Es una propiedad intensiva que no depende del tamaño del sistema, sino que es una propiedad que le es inherente y no depende ni de la cantidad de sustancia ni del material del que esté compuesto. Multitud de propiedades fisicoquímicas de los materiales o las sustancias son afectadas por la temperatura a la que se encuentren, entre estas su estado, volumen, la solubilidad, la presión de vapor, su color o la conductividad eléctrica.

La temperatura se mide con termómetros, los cuales pueden ser calibrados de acuerdo a escalas que dan lugar a unidades de medición de la

² MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 126.

temperatura. En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de temperatura es el Kelvin.

2.2. Propiedades de los fluidos

Las propiedades de un fluido son las que definen el comportamiento y características del mismo, tanto en reposo como en movimiento.

2.2.1. Densidad de los fluidos

Es una magnitud referida a la cantidad de masa contenida en un volumen de una sustancia. La densidad media es la razón entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

2.3. Tipos de fluidos

Keith Laidler plantea que, a medida que aumenta la temperatura de un fluido líquido, disminuye su viscosidad³. Esto quiere decir que la viscosidad es inversamente proporcional al aumento de la temperatura. La ecuación de Arrhenius predice de manera aproximada la viscosidad mediante la siguiente ecuación. En esta tendencia se separan los tipos de fluidos newtoniano y no newtoniano:

$$\mu(T) = \mu_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right)$$

³ LAIDLER, Keith J.; MEISER, John H. *Fisicoquímica*. p. 75.

Donde:

$\mu(T)$ = viscosidad a un punto final

$\mu(0)$ = viscosidad a un punto inicial

E = energía de activación para el flujo

R = constante de los gases

T = temperatura absoluta (Kelvin)

2.3.1. Fluido newtoniano

Un fluido newtoniano es un fluido cuya viscosidad puede considerarse constante en el tiempo. Los fluidos newtonianos son uno de los fluidos más sencillos de describir. La curva que muestra la relación entre el esfuerzo contra su velocidad de deformación presenta un comportamiento lineal. El mejor ejemplo de este tipo de fluidos es el agua, en contraposición al pegamento, la miel o los geles y la sangre, que son ejemplos de fluido no newtoniano planteados por Robert Mott.⁴ Un buen número de fluidos comunes se comportan como fluidos newtonianos bajo condiciones normales de presión y temperatura: aire, agua, gasolina, vino y algunos aceites minerales.

2.3.2. Fluido no newtoniano

Un fluido no newtoniano es aquel fluido cuya viscosidad varía con la temperatura y la tensión cortante que se le aplica. Como resultado, un fluido no newtoniano no tiene un valor de viscosidad definido y constante.

Aunque el concepto de viscosidad se usa habitualmente para caracterizar un material, resulta inadecuado para describir el comportamiento mecánico de

⁴ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 126.

algunas sustancias, específicamente, los fluidos no newtonianos. Estos fluidos se pueden caracterizar mejor mediante otras propiedades, mismas que tienen que ver con la relación entre el esfuerzo y las tensiones de corte bajo diferentes condiciones de flujo.

2.4. Viscosidad

La viscosidad es el rozamiento interno entre las capas de fluido. A causa de esta, es necesario ejercer una fuerza para obligar a una capa de fluido a deslizarse sobre otra. Es una resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes y tensiones de tracción. A esta propiedad se le compara con la fricción en los sólidos.

La viscosidad es una propiedad física característica de todos los fluidos que emergen de las colisiones entre las partículas del fluido que se mueven a diferentes velocidades. Un fluido que no tiene viscosidad se llama fluido ideal. La viscosidad nula, planteada por Alexis Zamir, solamente aparece en superfluidos a temperaturas muy bajas⁵. El resto de fluidos conocidos presentan viscosidad por muy pequeña que esta sea. Sin embargo, el modelo de viscosidad nula es una aproximación bastante buena para ciertas aplicaciones.

Existen dos tipos de viscosidad, según se ha establecido: viscosidad dinámica y cinemática. La primera mide la magnitud de la fuerza que tiene un líquido para permanecer en un lugar fijo y no fluir, es decir, la resistencia del flujo, según Robert Mott.⁶ La segunda mide la distancia que recorre un líquido, basada en la ley de Stokes, y no toma en cuenta las fuerzas que generan el movimiento.

⁵ ZAMIR, Alexis. *Viscosímetros para fluidos derivados del petróleo*. <https://es.slideshare.net/>. Consulta: 27 de diciembre de 2016..

⁶ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 126.

2.4.1. Factores que afectan a la viscosidad

La viscosidad es una propiedad de los fluidos que se ve influenciada por situaciones externas que pueden modificar su comportamiento. Los factores se ven representados en la siguiente tabla:

Tabla I. Factores que influyen en la viscosidad

Factor	Influencia
Temperatura	Aumenta el movimiento de las partículas, reduciendo las fuerzas de resistencia que estas tienen al movimiento (llamadas fuerzas de cohesión) ⁷ .
Estructura molecular	Esto afecta en que las moléculas grandes y de formas irregulares tienden a ser más viscosas que los fluidos con moléculas pequeñas, por la gran estructura que presentan a nivel molecular.
Presión	Aumenta la viscosidad, esto se debe a que se disminuye las distancias entre las moléculas, dando como consecuencia un aumento de las fuerzas de cohesión e incrementando la resistencia del fluido al movimiento.

Fuente: elaboración propia.

2.5. Dispositivos para medir viscosidad

El estudio de la viscosidad llevó a crear dos metodologías: dinámica y cinemática. Según la historia que cuenta William Hughes⁸, con base en los estudios previos de Isaac Newton y en honor al fisiólogo francés Jean Léonard Marie Poiseuille, se nombra a la unidad *centipoise*, unidad que pertenece al sistema CGS que determina una fuerza de 1 dina por 1 cm² y que fue creada por una diferencia de velocidad de 1cm por segundo en un espacio de 1cm que equivale a un milipascal segundo (mPa*s). La segunda metodología se basa en

⁷ Wikipedia. *Fluido*. <https://es.wikipedia.org/wiki/Fluido>. Consulta: 27 de febrero de 2016.

⁸ HUGHES F., William; BRIGHTON, John A. *Dinámica de fluidos*. p. 77.

el método *stoke*, llamado así por su creador George Gabriel Stokes, que trata sobre el movimiento de partículas esféricas moviéndose a velocidades bajas. Consiste en su inicio en tres probetas llenas con aceites estándar en que se deja caer una esfera de diámetro y masa conocida, midiendo el tiempo que tarda en recorrer la esfera en 10 intervalos de 30 cm. La unidad que se estipuló para la medición es *centistoke* (cSt), unidad que pertenece al sistema CGS, equivalente al m^2/s en sistema internacional.

Con la creación de las dos metodologías se inicia el desarrollo de equipos para la medición de este parámetro en ambos métodos. Uno de los primeros equipos es el establecido por el mismo George Stokes, que luego sería llamado “viscosímetro de bola”. Este sigue el método de *stoke* en dejar caer una esfera de radio y peso conocido en un determinado tiempo. Luego de este diseño vendría el diseño planteado por Wilhelm Ostwald. Este plantea un tubo capilar de vidrio por el cual se deja pasar un fluido de un punto de inicio a uno final, midiéndose el tiempo en el cual este tarda en pasar. En general el principio de los viscosímetros cinemáticos se ha mantenido, por lo que los actuales siguen el mismo principio de tomar un punto inicial y punto final en determinado tiempo. Los diseños han variado según las necesidades que se han planteado y la naturaleza de los fluidos con los que se ha tratado, por ejemplo el caso del viscosímetro Saybolt-Furol, que fue ideado principalmente para los fluidos con viscosidades altas, en especial para los derivados del petróleo.

En el caso de la viscosidad dinámica, estos equipos están diseñados para cuantificar fuerza. Los más comerciales son los rotacionales, que emplean el principio de viscosimetría rotacional, que se basa en captar el par de torsión necesario para hacer girar a velocidad constante un objeto inmerso en la muestra de fluido a estudiar. Entre estos se tiene el comercialmente conocido viscosímetro Brookfield, que emplea un sistema de agujas y mide el torque

necesario para hacer girar la aguja en la muestra. Otro ejemplo es el Stormer que, a diferencia del Brookfield, utiliza un sistema de pesos y poleas que genera un torque constante haciendo girar un cilindro en el interior de un recipiente. Se considera que los viscosímetros dinámicos son más certeros en sus medidas, ya que los cinemáticos pueden verse afectados por incertidumbres en la medición del tiempo.

Los viscosímetros han avanzado conjuntamente con la tecnología, estos equipos se han ido especializando cada vez más, mejorando sus capacidad de medición y reduciendo sus errores. En la actualidad se ha desarrollado otro tipo de equipo llamado viscosímetro de vibración, que pertenecen al grupo de equipos que cuantifican fuerza. A diferencia de los rotacionales, estos son espacialmente diseñados para medir viscosidad en las condiciones de proceso. Su principio se fundamenta en la frecuencia de resonancia generada por corriente eléctrica. Su rango de medición es muy amplio y, ya que es un instrumento de campo, el efecto de la temperatura es a condiciones ambiente. Debido a la ausencia de partes en movimiento, el desgaste es menor reduciendo su mantenimiento.

Al mismo tiempo que los viscosímetros dinámicos han ido avanzando, también los cinemáticos actualmente se están desarrollando para tener más amplitud para estudios de campo. Este es el caso del consistómetro de Bostwick, que se encuentra en desarrollo y también pertenece a los equipos de proceso, ya que puede manejarse de una manera fácil y no se encuentra limitado a mantenimientos rigurosos.

En relación a lo anterior se cuenta entonces con dispositivos para medir viscosidad en dos grandes grupos dinámicos: cinemáticos y vibratoriales, que se encuentran en desarrollo. En referencia a la información de los viscosímetros

que se encuentran disponibles en el mercado, el presente estudio propone un diseño de viscosímetro cinemático que funciona por medio de agujas diseñadas específicamente para este equipo, por lo que se le denomina viscosímetro de agujas.

2.5.1. Diseño propuesto del viscosímetro de agujas

El diseño del viscosímetro de agujas que se propone en este estudio funciona con cuatro agujas diseñadas para la medición de viscosidad cinemática. Se aplica la medición con cada aguja de forma individual. Cada aguja está conformada por una cola que funciona como aleta para regular el movimiento dentro del fluido, por lo que cada una de estas agujas fue fabricada de una sola pieza, con la finalidad de disminuir el error de medición que podría provocar si hubiera soldadura en la pieza de la aguja. La metodología para el uso de este equipo se basa en un punto de referencia seleccionado con base en el tiempo de caída de la aguja 1 (A1) dentro del viscosímetro. El procedimiento para medir la viscosidad es:

- Se llena de muestra el recipiente del viscosímetro, hasta el aforo.
- Después se introduce la aguja mencionada hasta que el fluido llegue a la cola estabilizadora (ver apéndice 4) sujeta del vástago por una pinza.
- Abrir la pinza para que la aguja A1 se desplace hacia abajo desde la marca de referencia de inicio de la medición de la viscosidad, hasta el fondo; esta distancia de desplazamiento es la distancia que se establece para medir el tiempo de desplazamiento de la aguja (ver figura del viscosímetro de agujas, sección 3.5.3). Esta medida de referencia se compara con la calibración de la aguja 1 (ver gráfica 14). (Ver calibración de agujas, sección 3.5.3).

Se presenta la calibración de la aguja 1 (A1), donde se relaciona el tiempo de caída con la viscosidad cinemática. A continuación se presentan cada uno de los rangos de tiempo de desplazamiento de la aguja 1, por lo que se hizo una calibración con el rango centistoke, conforme lo establece el uso del aceite estándar ASTM S2000, en que se indica, por ejemplo, que a la temperatura 80 °C la viscosidad a medir de determinado fluido estará en el rango de 166,6 a 890,6 cSt, cuando el tiempo de caída del objeto para observar la viscosidad, en este caso la aguja A1, sea 1,86 a 8,02 s. Se tomó como referencia la aguja 1 para las mediciones del viscosímetro de agujas, debido a que esta, en su caída, provocó muy poca turbulencia. A continuación se muestra la tabla II, donde se presentan los rangos de equivalencia de la aguja A1 según indica la guía del estándar ASTM S2000.

Tabla II. **Equivalencia de la aguja A1 de tiempo de caída a viscosidad cinemática según el estándar ASTM S2000**

Equivalencia	Tiempo de caída en segundos (s)	Viscosidad en centistokes (cSt)	Límites de temperatura °C
1	1,86-8,02	166,6-890,6	80-50
2	8,02-15,52	890,6-1805	50-40
3	22,94-53,29	2137-6162	37,8-25
4	53,29-76,36	6162-9772	25-20

Fuente: elaboración propia.

Las demás agujas en el diseño del viscosímetro de agujas manifiestan mayor turbulencia que la aguja A1, siendo estas las agujas A2, A3 y A4. El rango de aceptación de medición de viscosidad con dichas agujas está en función de la caída de la aguja con menor turbulencia en determinado intervalo de viscosidad, según lo manifestado en la tabla III. Este permite escoger determinada aguja como la opción adecuada para determinado fluido. Cada una de las agujas tiene un rango de viscosidad en el que su desplazamiento

produce poca turbulencia, reduciendo la variación en la toma de tiempos de caída.

Por medio de la equivalencia presentada anteriormente, al obtener el tiempo de caída de la aguja A1 se compara con los intervalos de tiempo y se determina qué rango de viscosidad presenta el fluido medido. Luego se escogerá cuál aguja presenta la mejor opción para dicha medición de tiempo. A continuación, se presentan los rangos de viscosidad en que las agujas presentan su mejor desempeño:

Tabla III. Rango efectivo de medición de viscosidad cinemática para cada aguja según el estándar ASTM S2000

Aguja	Rango de viscosidad cinemática cSt
Aguja 1 (A1)	166,6-890,6
Aguja 2 (A2)	890,6-1805
Aguja 3 (A3)	2137-6162
Aguja 4 (A4)	6162-9772

Fuente: elaboración propia.

Los rangos efectivos de cada una de las agujas se obtuvieron durante la calibración con el aceite estándar ASTM S2000, bajo el requerimiento de que la aguja presentara la menor turbulencia. Las 4 agujas fueron evaluadas en todos los puntos que el patrón certificado establece (ver apéndice 7). Por lo anterior, para las mediciones de la viscosidad de diferentes fluidos se escogerá la aguja que mejor se desempeñe según lo establecido en la tabla III.

Se realizan tres corridas (tres tiempos de caída) con la aguja seleccionada y se obtiene el promedio de estas, luego se evalúa en los modelos matemáticos que cubran el rango deseado donde la aguja funciona adecuadamente.

Tabla IV. **Modelo de cada aguja donde presenta su mejor desempeño**

Modelo matemático	Aguja	Rango de viscosidad (cSt)	Temperatura (°C)
$120,01x-62,037$	A1	166,6 -890	40 a 80
$2,9738x^2+110,1x-30,365$	A2	890,6-1805	40 a 80
$126,1x-44,809$	A3	2137-6162	20 a 37,8
$-0,411x^2 + 176,08x-1156,3$	A4	6162-9772	20 a 37,8

Fuente: elaboración propia.

Las agujas pueden utilizarse en todos los puntos de la calibración presentados por el aceite estándar de calibración S2000, sin embargo, el problema radica en la dificultad que estas presentan en la toma de los tiempos de caída. La turbulencia que se genera cuando una aguja no se utiliza en el intervalo correcto es evidente y la variación de los resultados genera más errores. Con excepción de la aguja 1 (A1), que presenta menor turbulencia cuando no es utilizada en su rango efectivo, en comparación de A2, A3 y A4. Por esta razón se utiliza como parámetro de referencia.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables a manipular se muestran en la siguiente tabla:

Tabla V. **Variables**

Núm.	Variable	Dimensional	Factor potencial de estudio		Factor perturbador	
			Independiente	Dependiente	Controlable	No controlable
Tipos de variables						
1	Temperatura	°C	X		X	
2	Diámetro del orificio	M	X		X	
3	Densidad	kg/m ²		X	X	
4	Viscosidad cinemática	mm ² /s (cSt)		X		X
5	Viscosidad dinámica	mPa*s (cPs)		X		X
6	Tiempo	S	X			X

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Variables a manipular**

Núm.	Variable	Dimensional	Rango de variación
1	Temperatura	°C	20<T<80
2	Tiempo	s	Sin rango definido
3	Densidad	Kg/m ³	0,80<p<superiores a 1

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El campo de estudio se limitó a la medición de la viscosidad de los líquidos, aplicando los conocimientos de la carrera de Ingeniería Química sobre Diseño de equipo y Fisicoquímica, mostrando los pasos necesarios para la calibración de dicho equipo.

3.2.1. Área de aplicación

El área de aplicación se limitó al desarrollo de equipos necesarios para laboratorio, los cuales pueden ser fabricados en Guatemala, aplicando un buen diseño y una correcta calibración de estos y mostrando sus rangos específicos de viscosidad para que puedan ser analizados.

3.3. Recursos humanos disponibles

Los recursos humanos son esenciales para el desarrollo de una investigación, por ser los principales actores dentro del trabajo y los que hacen posible su desarrollo. Estos son:

- Investigador
- Asesor
- Coasesor

3.3.1. Investigador

Manuel Antonio Tay Pac, encargado de desarrollar el trabajo de investigación de: análisis de datos, diseño del modelo del equipo, diseño del

modelo matemático y responsable de la información obtenida para el trabajo de investigación a desarrollar.

3.3.2. Asesor y coasesor

El asesor fue el ingeniero químico José Manuel Tay Oroxom y el coasesor el ingeniero químico William Eduardo Fagiani Cruz, quienes supervisaron el trabajo de investigación por medio de revisión y aportación de ideas para la realización de este.

3.4. Recursos materiales disponibles

La realización del proyecto incluye parte teórica y práctica, por lo que los materiales disponibles a utilizar son:

- Libros de dinámica de fluidos
- Libros de flujo de fluidos
- Libros de manejo de datos
- Libros de fisicoquímica
- Programas de cómputo para analizar datos y gráficos
- Artículos disponibles en Internet sobre viscosímetros y tipos de fluidos
- Cristalería y equipo de laboratorio
- Industria de metalmecánica
- Estándares certificados ASTM (aceite estándar S2000)
- Laboratorio de Fisicoquímica de la Facultad de Ingeniería
- Viscosímetro Brookfield RVDV-E (Facultad de Ingeniería)
- Viscosímetro Brookfield LVDV-E (Facultad de Farmacia)

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

El trabajo se divide en tres partes: diseño del viscosímetro con posibles materiales a utilizar, fabricación del viscosímetro usando materiales adecuados y accesibles a obtener localmente, y comparación del equipo para encontrar los rangos posibles en que puede ser utilizado, encontrando su correlación adecuada.

3.5.1. Técnica cualitativa

Para el trabajo de investigación se contó con variables de diseño como la altura, los tipos de materiales y el tipo de diseño con el que se va a trabajar para armar el viscosímetro. La geometría de las piezas es un punto importante en el desarrollo del viscosímetro. Por medio de observación, prueba y error se logra obtener cuatro diferentes diseños de agujas para el viscosímetro de agujas. La determinación del rango mínimo es un aspecto importante en el desarrollo de este equipo, para esto se utilizó:

- Agua
- Vaselina
- Glicerina

Estos tres fluidos presentan una viscosidad por debajo de los 100 cSt. Esto determina si el equipo puede determinar viscosidades menores de ese rango. Por ser un viscosímetro cinemático su medida se basa en la toma del tiempo de caída, por lo que habrá un mínimo de reacción para el experimentador y fuera de ese rango no será posible obtener una medida adecuada.

3.5.2. Técnica cuantitativa

Se utiliza para la obtención de la calibración de las agujas, las mediciones de viscosidad y de los parámetros que se necesitan para evaluar el desempeño del viscosímetro. Se realiza una comparación del equipo para evaluar sus resultados.

Tabla VII. Técnica cuantitativa

Recurso	Código	Función
Estándar ASTM (lote: 13102).	S 2000 calibrado según la ASTM D2162.	Parámetro para establecer curva de calibración, que abarca temperatura de 20, 25, 37.80, 40, 50 y 80 °C.
Viscosímetro Brookfield RVDV-E.	Serie: E6530400.	Parámetro de comparación de la muestra a tratar.
Viscosímetro Brookfield LVDV-E.	Serie: 74329.	Parámetro de comparación de la muestra a tratar.
5 muestras para la comparación de medidas realizadas con el equipo.	4 jabones ordenados por viscosidad ascendente. Miel comercial.	Realizar la comparación del equipo hecho por el trabajo con otros.
Coefficiente de correlación de Pearson.	$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}$	Determinar el coeficiente de correlación de Pearson.
Coefficiente de determinación.	$R^2 = r^2$	El cuadrado del coeficiente de Pearson es el coeficiente de determinación.

Fuente: elaboración propia.

3.5.3. Calibración de las agujas

Para la calibración de las agujas del viscosímetro se utilizó un estándar ASTM, específicamente el S2000, con número de lote 13102, marca Cannon, el cual se basa en la ASTM D2162 y tiene un rango de temperatura de 20 a 100 °C. A continuación, se presentan los puntos que el estándar tiene certificados:

Tabla VIII. **Puntos establecidos por el aceite estándar ASTM S200**

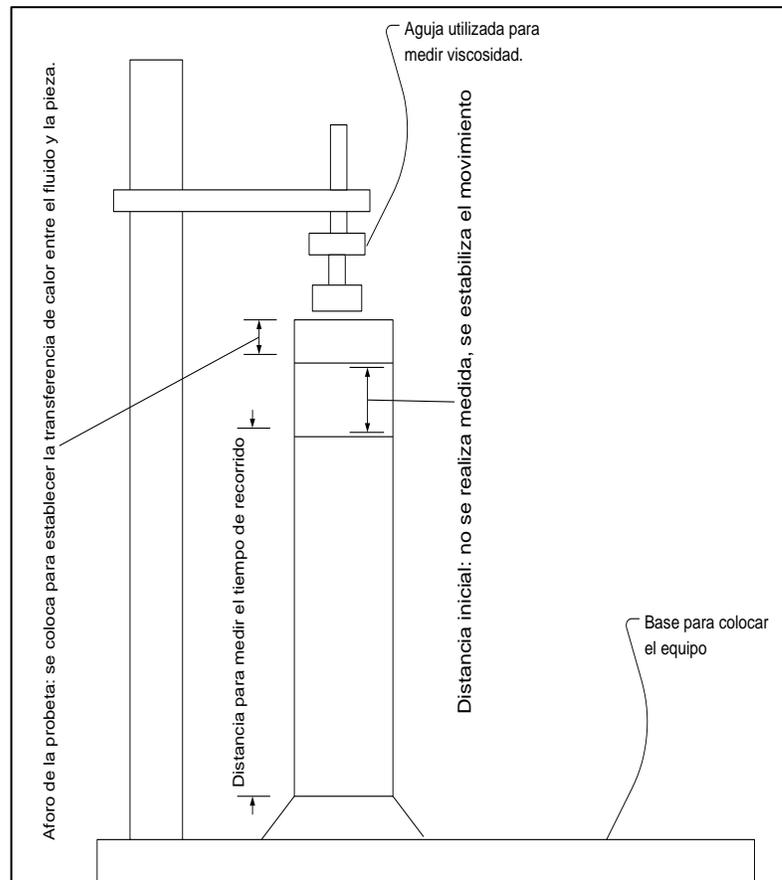
Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática (cSt)
20	9772
25	6162
37,78	2137
40	1805
50	890,6
80	166,6
98,89	75,87
100	72,80

Fuente: elaboración propia.

El diseño de las agujas (ver apéndice 4) no permitía la evaluación de líquidos menores de 100 cSt, dado que durante la caída de la aguja se presentaba mucha turbulencia y la medición del tiempo de caída se dificultaba, situación que aumentaba los errores en la medición. Por esta razón se descartan los dos puntos con viscosidades menores de 100 cSt, dejando el rango de estudio de 20 a 80 °C, equivalente de 166,6 a 9772 cSt. La calibración de las agujas se realizó utilizando el viscosímetro de agujas, con el aceite estándar ASTM S2000, a las diferentes temperaturas que indica el certificado de calibración del aceite estándar. Se obtuvieron tres tiempos de caída por cada aguja para cada intervalo de temperatura y viscosidad establecida por el estándar, y se hizo un promedio de los tres tiempos de caída para cada aguja por temperatura. Con los promedios mencionados se realizó una regresión, lineal y/o cuadrática, con su correlación según el comportamiento de la aguja evaluada. Sin embargo, existió un intervalo en que ningún tipo de regresión logró relacionar los puntos, específicamente entre 37,8 y 40 °C. Por lo tanto, se decidió separar la gráfica en dos rangos de temperatura, de 20 a 37,8 y de 40 a 80 °C para todas las agujas del viscosímetro.

3.5.4. Diagrama viscosímetro

Tabla IX. Diseño del viscosímetro junto a la aguja A1



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2003.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

3.6.1. Recolección de datos para calibración

Se analizaron los datos técnicos del aire desde una temperatura de 20 °C a 80 °C. A continuación, se muestra la tabla de recolección de datos para

diferentes temperaturas y agujas, para la calibración de dichas agujas con el aceite estándar ASTM S2000.

Tabla X. **Recolección de datos**

Temperatura °C				
Corrida	Aguja 1 (s)	Aguja 2 (s)	Aguja 3 (s)	Aguja 4 (s)
1				
2				
3				
Promedio				
Desviación estándar				

Fuente: elaboración propia.

3.6.2. **Recolección de datos para mediciones del viscosímetro**

Se obtuvo los datos de las viscosidades de las 5 muestras a trabajar para la comparación con otros equipos (ver sección 3.5.2).

Tabla XI. **Datos de la viscosidad**

Numero de aguja		
Densidad fluido (g/ml)		
Viscosímetro Brookfield	Muestra	Prueba de informe
Viscosidad	Tiempo (s)	viscosidad Cinemática (cSt)
cPs	1)	
cSt	2)	
	3)	
Temperatura °C	Promedio	
	Error %	

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y tratamiento de la información

El primer paso en el manejo de los datos fue medir los tiempos de caída de cada una de las agujas diseñadas, con un líquido patrón: el aceite estándar ASTM S2000, a diferentes temperaturas establecidas por el certificado que este estándar presenta (ver apéndice 7). La tabla II se generó a partir de estas mediciones a temperaturas conocidas (ver sección 3.5.3).

Luego de obtener los datos, a estos se les realizó una regresión, lineal y/o cuadrática, con su respectiva prueba de correlación. Finalmente se midió la viscosidad de líquidos más y menos densos que el agua, para verificar qué tipo de fluidos pueden ser tratados con el dispositivo que se fabricó.

3.8. Análisis estadístico

- Dato promedio estadístico

El promedio (\bar{a}) permite obtener un dato representativo para cada variable en cada medición, de esta forma se tomaron en cuenta las posibles variaciones aleatorias junto con la desviación estándar:

$$\bar{a} = \frac{\sum_i^n a_i}{n} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$$

Donde:

\bar{a} : valor promedio

a_i : valor i

n : número de datos

- Desviación estándar

La desviación estándar (S_a) permite cuantificar la dispersión de los valores para una misma medición respecto al valor promedio, lo cual representa el error aleatorio causado por diversos factores:

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_i^n |\bar{a} - a_i|}{n-1}}$$

Donde:

\bar{a} : valor promedio

a_i : valor i

n : número de datos

S_a : desviación estándar de la variable a

- Incertidumbre absoluta

El error por incertidumbre permite determinar la utilidad del resultado final, para evaluar la confianza que se puede tener en una decisión basada en el resultado y comparar resultados de mediciones. Para cualquier variable:

$$a_x = f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$$

Donde:

a_n es la n -ésima variable independiente, su incertidumbre está dada por la siguiente ecuación:

$$\delta a_x = \delta f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial(f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n))}{\partial a_i} \right| \times \delta a_i$$

Donde:

a_i es la i -ésima y Δa_i es la i -ésima incertidumbre de la n -ésima variable de la función a_x .

- Análisis de varianza

El análisis de varianza realizado permite determinar si el error sistemático en los datos de cada variable puede atribuirse a factores reales y comprobables, o puede considerarse un error aleatorio al relacionar los factores entre sí. Debido al número de relaciones entre variables (factores), el análisis fue desarrollado como un sistema de dos factores con repetición, tratado por secciones. A cada una de las combinaciones anteriores debía adicionarse el efecto estadístico de las repeticiones, tratado con la siguiente metodología:

Tabla XII. **Nomenclatura de análisis de varianza**

		FACTOR 2 (k)				TOTAL
		1	2	...	b	
FACTOR 1 (j)	1	x_{111}, \dots, x_{11l}	x_{121}, \dots, x_{12l}	...	x_{1b}	$\hat{x}_{1\#}$
	2	x_{211}, \dots, x_{21l}	x_{221}, \dots, x_{22l}	...	x_{2b}	$\hat{x}_{2\#}$
	:	:	:	...	:	:
	:	:	:	...	:	:
	a	x_{a11}, \dots, x_{a1l}	x_{a21}, \dots, x_{a2l}	...	x_{ab}	$\hat{x}_{a\#}$
TOTAL		$\hat{x}_{\#1\#}$	$\hat{x}_{\#2\#}$...	$\hat{x}_{\#b\#}$	\hat{x}

Fuente: SPIEGEL, Murray R. *Teoría y problemas de probabilidad y estadística*. p. 316.

La corrida l de la combinación de la entrada j del factor 1 y la entrada k del factor 2, se denotó como x_{jkl} donde $j = 1, \dots, a$, $k = 1, \dots, b$ y $l = 1, \dots, c$.

Cálculo de valores medios:

$$\hat{x}_{j\#\#} = \frac{1}{bc} \sum_{k,l} x_{jkl} \quad \hat{x}_{\#k\#} = \frac{1}{ac} \sum_{j,l} x_{jkl} \quad \hat{x}_{\#\#l} = \frac{1}{ab} \sum_{j,k} x_{jkl} \quad \hat{x} = \frac{1}{abc} \sum_{j,k,l} x_{jkl}$$

Donde:

- $\hat{x}_{j\#\#}$: media de la entrada j del bloque 1
- $\hat{x}_{\#k\#}$: media de la entrada k del bloque 2
- $\hat{x}_{\#\#l}$: media de las repeticiones de la entrada j, k
- \hat{x} : media de medias

Determinación de variaciones:

$$\begin{aligned} \hat{v}_E &= \sum_{j,k,l} (x_{jkl} - \hat{x})^2 \\ \hat{v}_{B1} &= bc \sum_{j=1}^a (\hat{x}_{j\#\#} - \hat{x})^2 \\ \hat{v}_{B2} &= ac \sum_{k=1}^b (\hat{x}_{\#k\#} - \hat{x})^2 \\ \hat{v}_i &= c \sum_{j,k} (\hat{x}_{jk\#} - \hat{x}_{j\#\#} - \hat{x}_{\#k\#} + \hat{x})^2 \\ \hat{v} &= \hat{v}_E + \hat{v}_{B1} + \hat{v}_{B2} + \hat{v}_i \end{aligned}$$

Donde:

\hat{v}_E : variación debida al error o variación aleatoria

\hat{v}_{B1} : variación entre datos del factor 1

\hat{v}_{B2} : variación entre datos del factor 2

\hat{v}_i : variación debido a la interacción

\hat{v} : variación total

- Hipótesis nula:

Las hipótesis nulas que se establecen en el análisis son las siguientes:

$H_0^{(1)}$: todas las mediciones del factor 1 son iguales (el factor 1 no contribuye en la variabilidad).

$H_0^{(2)}$: todas las mediciones del factor 2 son iguales (el factor 2 no contribuye en la variabilidad).

$H_0^{(3)}$: no hay interacción entre los factores (el factor 1 y el factor 2 no poseen una relación que afecte).

Al aceptar estas hipótesis se afirma que el factor, o la relación entre factores (en el caso de la tercera), no producen ningún efecto significativo sobre la variabilidad de los resultados.

Al determinar la F de Fisher, esta debe ser comparada con un valor crítico que permitirá evaluar las hipótesis. Dicho valor crítico se determina a partir de una tabla de percentiles para la distribución F, como se detalla a continuación.

- Cuadro de resultados

Tabla XIII. **Análisis de varianza de dos factores con repetición**

Factor	Variación	Grados de libertad	Media de cuadrados	F
Entre filas (factor 1)	$\hat{v}_{B1} = b \sum_{j=1}^a (\bar{x}_{j\#} - \bar{x})^2$	$a - 1$	$\hat{s}_{B1}^2 = \frac{\hat{v}_{B1}}{a - 1}$	$\frac{\hat{s}_{B1}^2}{\hat{s}_E^2}$
Entre columnas (factor 2)	$\hat{v}_{B2} = a \sum_{k=1}^b (\bar{x}_{\#k} - \bar{x})^2$	$b - 1$	$\hat{s}_{B2}^2 = \frac{\hat{v}_{B2}}{b - 1}$	$\frac{\hat{s}_{B2}^2}{\hat{s}_E^2}$
Interacción	$\hat{v}_i = c \sum_{j,k} (\hat{x}_{jk\#} - \hat{x}_{j\#\#} - \hat{x}_{\#k\#} + \hat{x})^2$	$ab(c - 1)$	$\hat{s}_i^2 = \frac{\hat{v}_i}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{\hat{s}_i^2}{\hat{s}_E^2}$
Aleatoria	$\hat{v}_E = \sum_{j,k,l} (x_{jkl} - \bar{x})^2$	$(a - 1)(b - 1)$	$\hat{s}_E^2 = \frac{\hat{v}_E}{ab(c - 1)}$	
Total	$\hat{v} = \hat{v}_E + \hat{v}_{B1} + \hat{v}_{B2}$	$abc - 1$		

Fuente: SPIEGEL, Murray R. *Teoría y problemas de probabilidad y estadística*. p. 318.

- Prueba de Fisher

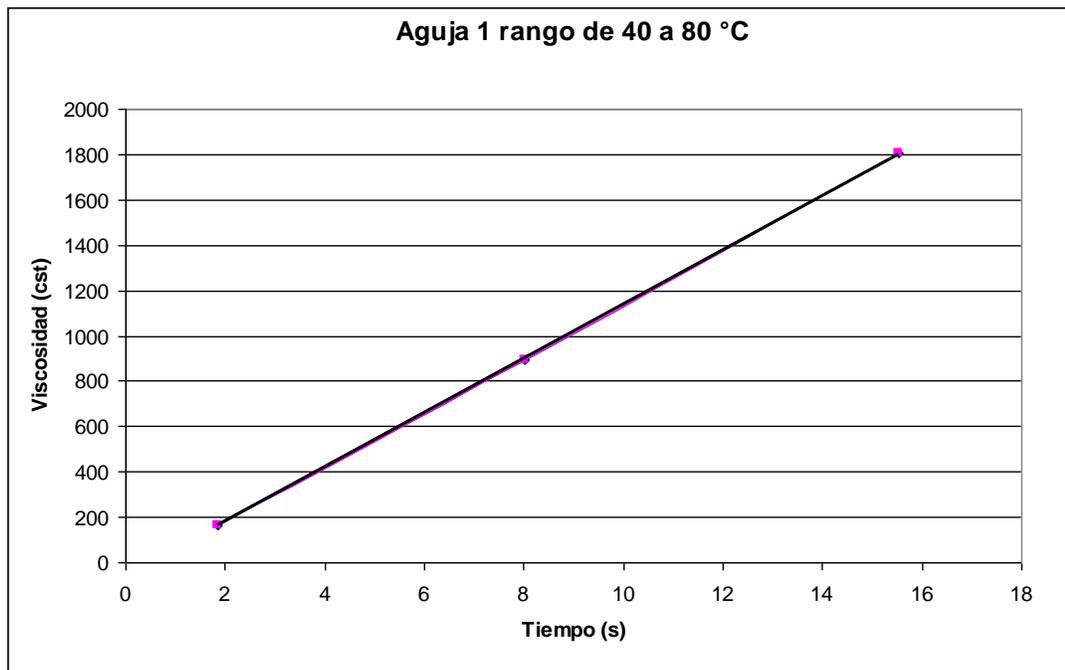
De este modo la hipótesis nula es aceptada si el valor de F experimental es menor al valor crítico (zona gris), con lo cual se concluye un efecto nulo sobre la variación de los resultados, atribuyéndoselo al error aleatorio

- Regresión y correlación

Estos análisis estadísticos se realizaron con el programa Excel para obtener la regresión adecuada. El factor R^2 se obtendrá con el mismo programa y determina si la regresión representa adecuadamente al comportamiento de los datos.

4. RESULTADOS

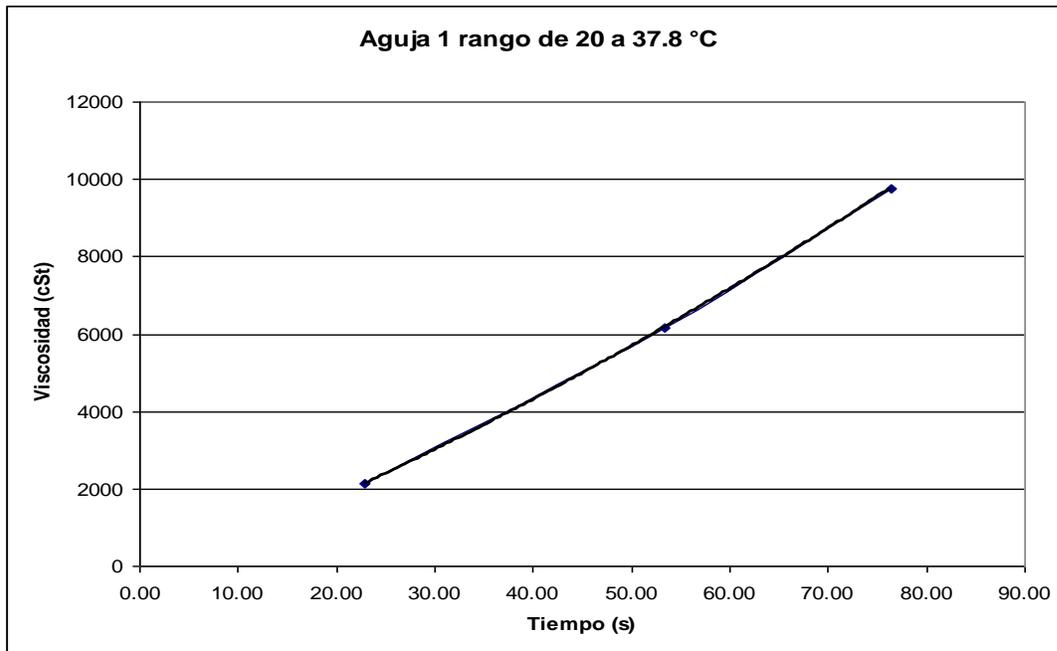
Figura 1. Correlación con estándar ASTM. Aguja 1



Modelo matemático	R ² (coeficiente de determinación)	Intervalo de validez	
		40 °C	80 °C
120,01x-62,037	0,999	1 805 cSt	166,6 cSt

Fuente: elaboración propia.

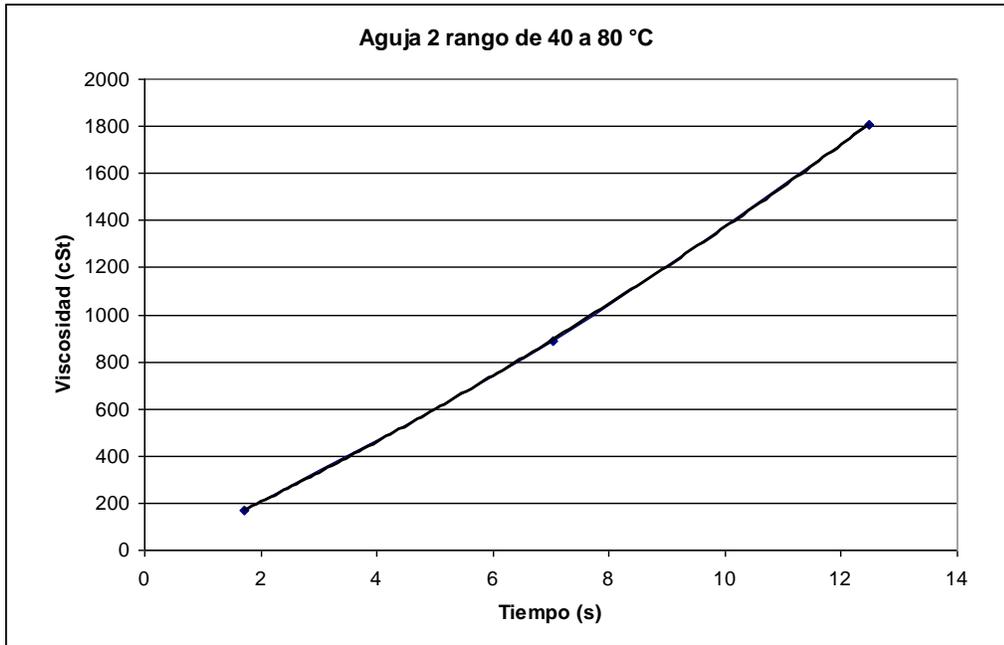
Figura 2. **Correlación con estándar ASTM. Aguja 1**



Modelo matemático	R ² (coeficiente de determinación)	Intervalo de validez	
0,4467x ² +98,57x-359,25	1	20 °C	37.8 °C
		9 772 cSt	2 137 cSt

Fuente: elaboración propia.

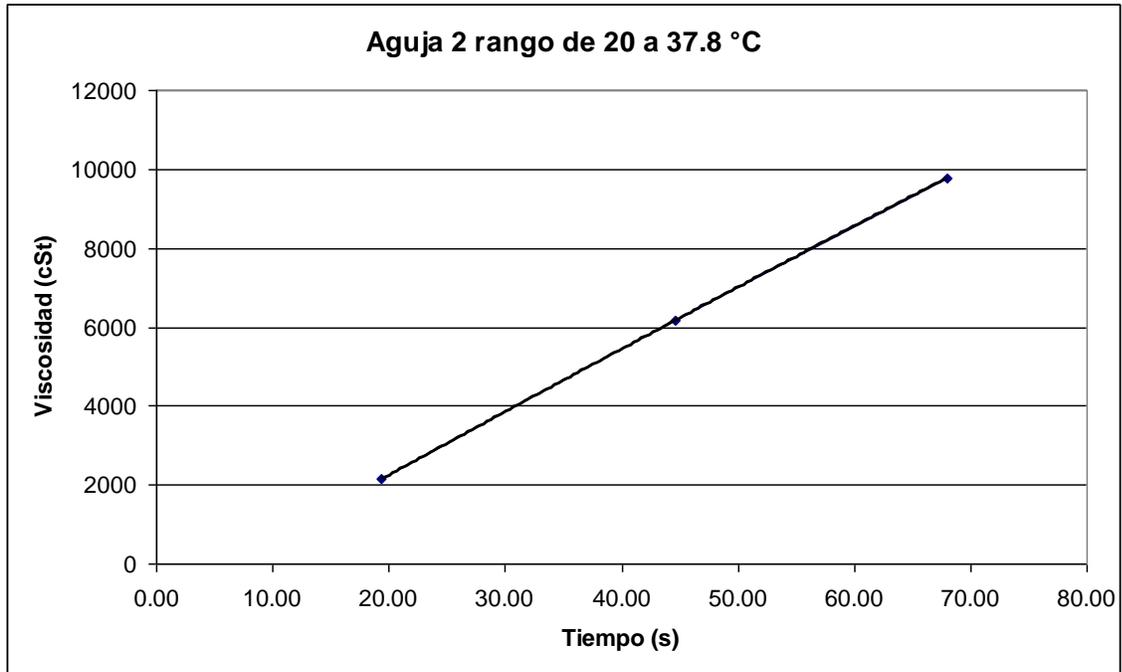
Figura 3. **Correlación con estándar ASTM. Aguja 2**



Modelo matemático	R ² (coeficiente de determinación)	Intervalo de validez	
		40 °C	80 °C
2,9738x ² +110,1x-30,365	1	1 805 cSt	166,6 cSt

Fuente: elaboración propia.

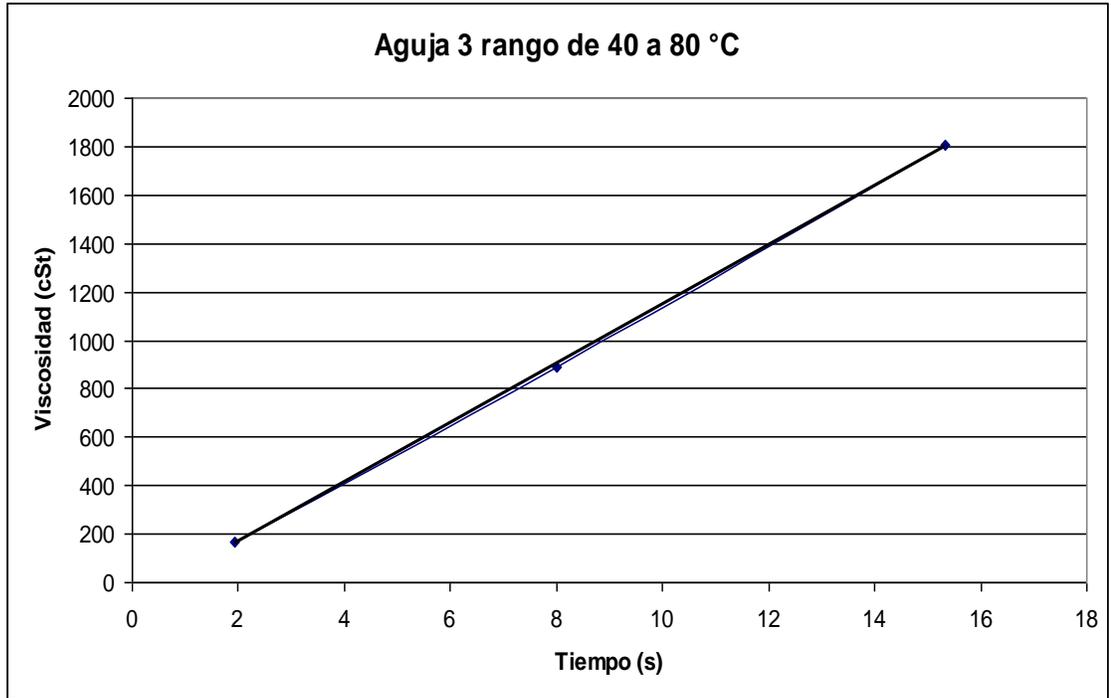
Figura 4. **Correlación con estándar ASTM. Aguja 2**



Modelo matemático	R ² (coeficiente de determinación)	Intervalo de validez	
		20 °C	37,8 °C
-0,0984x ² +165,64x-1037,8	1	9 772 cSt	2 137 cSt

Fuente: elaboración propia.

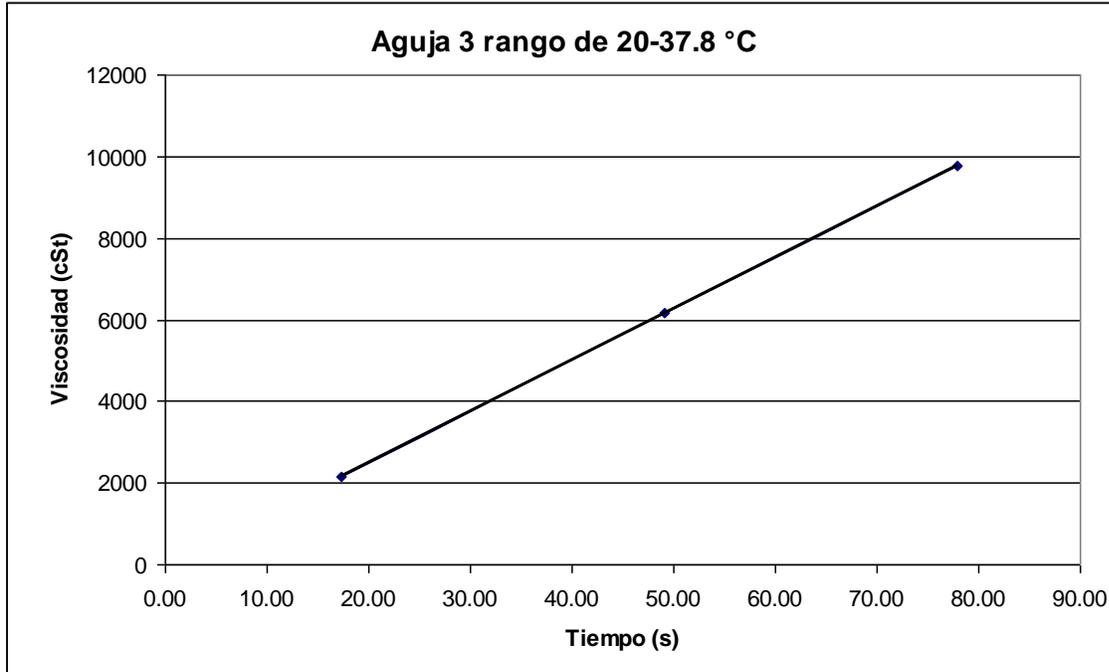
Figura 5. **Correlación con estándar ASTM. Aguja 3**



Modelo matemático	R ² (coeficiente de determinación)	Intervalo de validez	
122,7x-74,617	0,9998	40 °C	80 °C
		1 805 cSt	166,6 cSt

Fuente: elaboración propia.

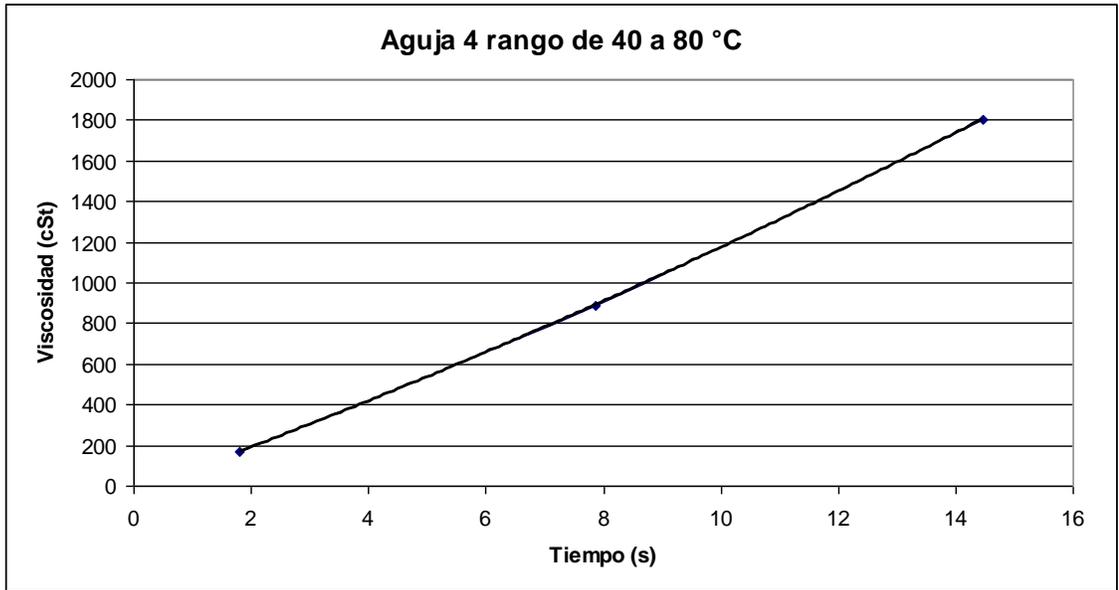
Figura 6. **Correlación con estándar ASTM. Aguja 3**



Modelo matemático	R ² (coeficiente de determinación)	Intervalo de validez	
		20 °C	37,8 °C
126,1x-44,809	1	9 772 cSt	2 137 cSt

Fuente: elaboración propia.

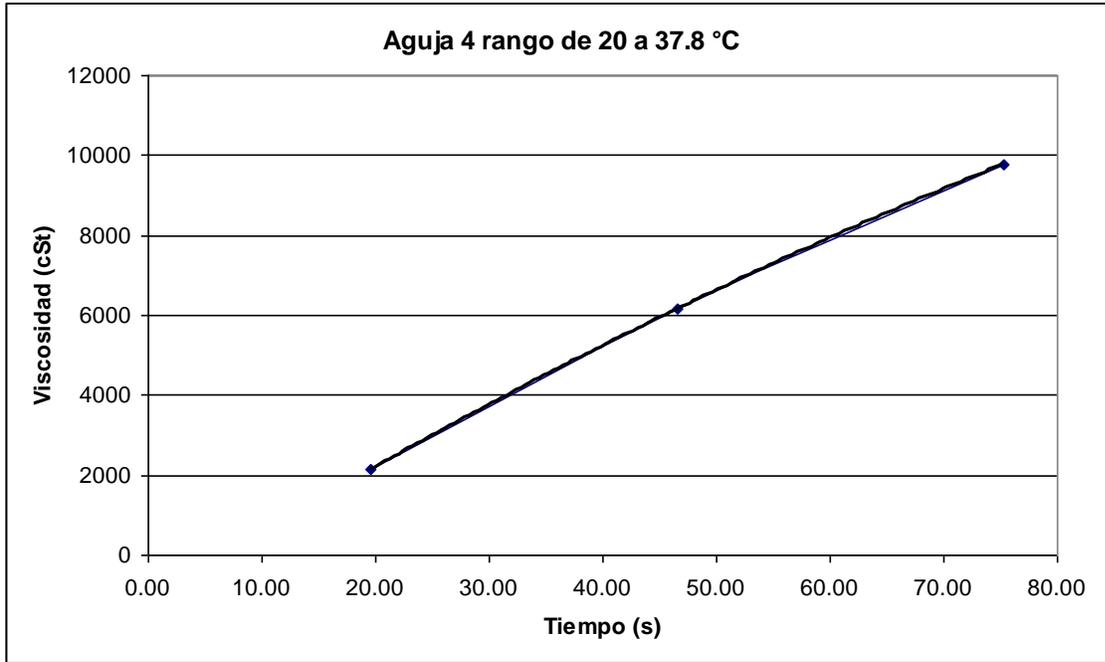
Figura 7. **Correlación con estándar ASTM. Aguja 4**



Modelo matemático	R ² (coeficiente de determinación)	Intervalo de validez	
$1,5032x^2 + 104,77x - 25,753$	1	40 °C	80 °C
		1 805 cSt	166,6 cSt

Fuente: elaboración propia.

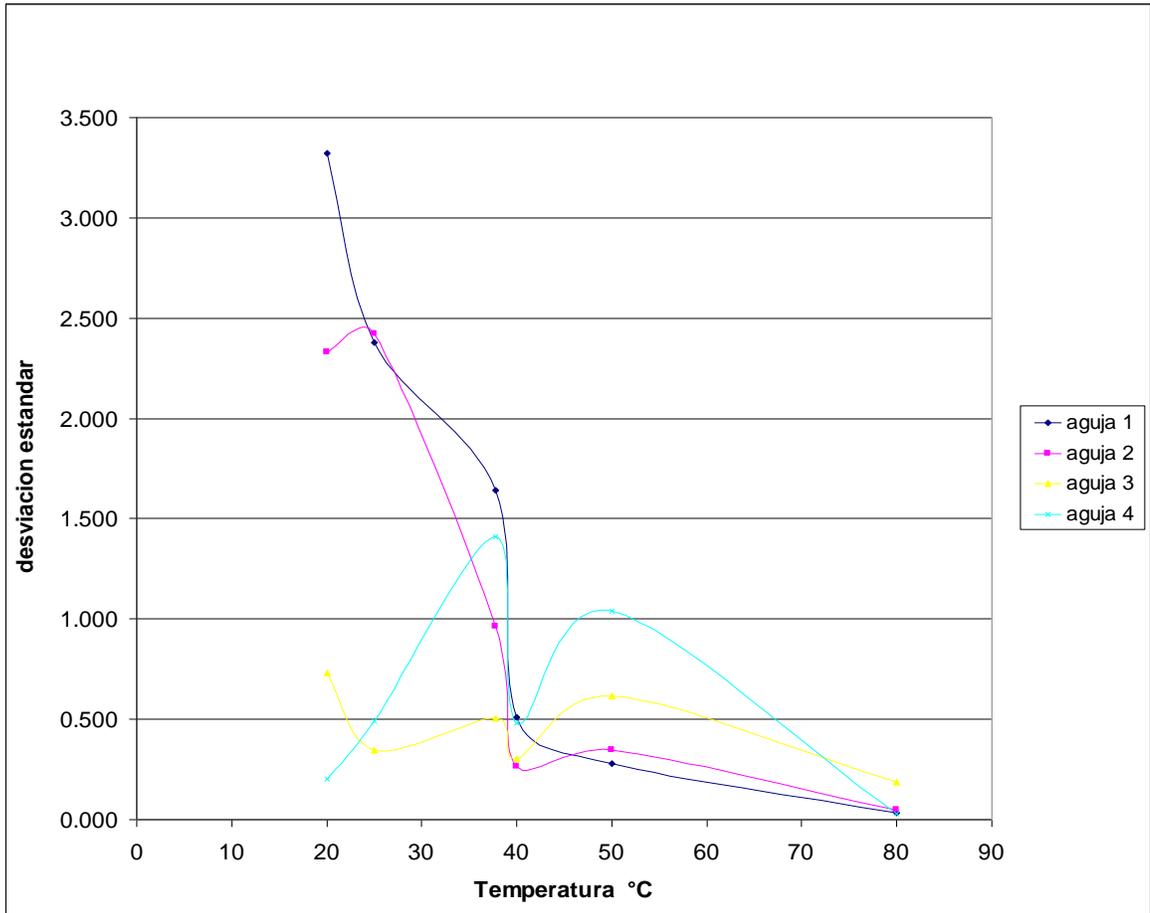
Figura 8. **Correlación con estándar ASTM. Aguja 4**



Modelo matemático	R ² (coeficiente de determinación)	Intervalo de validez	
-0,411x ² + 176,08x - 1156,3	1	20 °C	37,8 °C
		9 772 cSt	2 137 cSt

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Comparación de desviaciones estándar en todas las agujas.
Intervalo de 20 a 80 grados Celsius**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Prueba de jabón 1 (aguja 1). Viscosímetro Brookfield RVDV-E**

Parámetro Brookfield (cSt)	771,57
Promedio con equipo experimental (cSt)	749,28
Error %	4,8

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Prueba de jabón 2 (aguja 3). Viscosímetro Brookfield RVDV-E**

Parámetro Brookfield (cSt)	1921,57
Promedio con equipo experimental (cSt)	2253,81
Error %	15,0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Prueba de jabón 3 (aguja 3). Viscosímetro Brookfield RVDV-E**

Parámetro Brookfield (cSt)	2914,05
Promedio con equipo experimental (cSt)	4438,05
Error %	49,4

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Prueba de jabón 4 (aguja4). Viscosímetro Brookfield RVDV-E**

Parámetro Brookfield (cSt)	12099,71
Promedio con equipo experimental (cSt)	13037,17
Error %	1,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Prueba de miel comercial (aguja 3). Viscosímetro Brookfield RVDV-E

Parámetro Brookfield (cSt)	3292,94
Promedio con equipo experimental (cSt)	6745,05
Error %	104,8
Presencia de lluvia	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. Prueba de jabón 1 en viscosímetro Brookfield LVDV-E (aguja 2)

Parámetro Brookfield (cSt)	1000,00
promedio con equipo experimental (cSt)	961,11
error %	3,9

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Prueba de jabón 2 en viscosímetro Brookfield LVDV-E (aguja 3)

Parámetro Brookefield (cSt)	2980,39
Promedio con equipo experimental (cSt)	3584,77
error %	20,3

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Prueba de jabón 3 en viscosímetro Brookfield LVDV-E (aguja 3)

Parámetro Brookfield (cSt)	3392,16
Promedio con equipo experimental (cSt)	4117,75
Error %	21,4

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Prueba de jabón 4 en viscosímetro Brookfield LVDV-E (aguja 4)**

Parámetro Brookfield (cSt)	9207,92
Promedio con equipo experimental (cSt)	12147,52
Error %	31,9

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Prueba de miel comercial en viscosímetro Brookfield LVDV-E (aguja 4)**

Parámetro Brookfield (cSt)	4285,71
Promedio con equipo experimental (cSt)	5409,019
Error %	20,76

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Prueba de jabón 5 en viscosímetro Brookfield LVDV-E (aguja 4)**

Parámetro Brookfield (cSt)	19191,92
Promedio con equipo experimental (cSt)	17175,31703
Error %	10,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Resumen de confiabilidad de las agujas**

Temperatura °C	Aguja 1	Aguja 2	Aguja 3	Aguja 4
20	0,097	0,030	0,008	0,901
25	0,098	0,017	0,018	0,404
37.8	0,063	0,010	0,012	0,043
40	0,012	0,805	0,020	0,429
50	0,022	0,532	0,010	0,127
80	0,187	0,774	0,033	0,741

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para la elaboración del viscosímetro se tomaron en cuenta varios parámetros: tipo de materiales, condiciones de trabajo, fluidos a estudiar y comparación con equipos ya establecidos en el mercado. Estos parámetros dejaron evidencia en los datos obtenidos y cálculos realizados a partir de ellos. Los diseños de las agujas fueron basados en ensayos de piezas de diversa geometría, que se fueron aproximando hasta que mostraron un buen comportamiento al moverse dentro de los fluidos. Se agregó a la pieza una cola que la estabiliza y reduce la turbulencia que puede causar errores en las mediciones. El material escogido fue el aluminio, y el material del recipiente que contiene al fluido fue una probeta de 250 ml de borosilicato.

El primer paso para la elaboración de este equipo fue la correlación con el aceite estándar ASTM S2000. El comportamiento de dicho aceite con la temperatura puede observarse en la gráfica 10 del apéndice 1. Estas correlaciones presentan un punto de inflexión en el que el estándar no puede determinar su valor, y dado que la correlación no puede incluir estos puntos, ninguna tendencia logra incluir este punto de inflexión, por lo que se decidió separar las gráficas en dos intervalos, de 20 a 37,8 °C y de 40 a 80 °C, para poder realizar una adecuada correlación que incluyera todos los puntos posibles de medición que determina el aceite estándar ASTM S2000 (ver técnica cuantitativa). Los cuatro modelos de agujas mostraron tendencias similares en sus gráficas de temperatura y tiempo, por lo que la separación de estos intervalos se realizó para todos los diseños. Estos comportamientos pueden observarse por separado en las gráficas 13, 14, 15 y 16 del apéndice 1. Los modelos matemáticos obtenidos se pueden observar en la sección de

resultados. Para estas correlaciones se establecieron modelos lineales y cuadráticos para lograr la mejor relación posible de tiempo de caída y viscosidad.

Se consideró importante determinar los rangos en que estas agujas podían desempeñar una mejor medición, por lo que, antes de realizar la correlación, fue necesario hacer algunas pruebas con diferentes fluidos, siendo estos glicerina, vaselina líquida y agua. Se escogieron estos líquidos para poder determinar el tiempo de caída (ver técnica cuantitativa) de cada aguja en cada líquido. De acuerdo a lo observado, no fue posible obtener una medida del tiempo de caída en estos tres fluidos, por la baja viscosidad que tienen, por lo que se decidió tomar como base los datos del aceite estándar ASTM S2000.

El mínimo en el que estas agujas pueden trabajar se determinó en 166,6 cSt, de acuerdo con el estándar ASTM, valores por debajo de este parámetro dan mucha incertidumbre en su medición, por ser un viscosímetro cinemático, y es casi imposible registrar el tiempo de caída de las agujas. A partir de este límite inferior se realizaron las medidas y se determinó, por medio de la desviación estándar y la turbulencia generada durante el recorrido de la caída libre, cuál sería el orden de las agujas y en qué intervalo podrían trabajar cada una de ellas, según su configuración (ver apéndice 3). Esta desviación fue ocasionada a la turbulencia que las agujas tenían en el recorrido del viscosímetro, cada una de la agujas presentó más turbulencia en algunos rangos de viscosidad que en otros.

De acuerdo con la turbulencia y desviación estándar, observada durante las mediciones de cada aguja con el aceite ASTM S2000, se presentó un comportamiento específico en cada intervalo de temperatura presentado por el estándar. Se determinó que la aguja 1 abarcaría de 166,6 a 890,6 cSt, la aguja 2 funciona entre 890,6 a 1805 cSt, la aguja 3 funciona en el rango de 2 137 a 6

162 cSt, y, finalmente, la aguja 4 funciona de 6 162 a 9 772 cSt. Estos comportamientos son el resultado de los diferentes diseños de las cuatro agujas propuestas.

Durante las mediciones de caída de tiempo con el aceite estándar ASTM S2000, se observó el comportamiento de cada aguja y se determinó en qué rango de viscosidad cada una presentaba menos turbulencia y, como resultado, menos variación en sus tiempos de caída. Se estableció que la aguja 1 abarcaría de 166,6 a 890,6 cSt, la aguja 2 entre 890,6 a 1 805 cSt, la aguja 3 en el rango de 2 137 a 6 162 cSt y, finalmente, la aguja 4 de 6 162 a 9 772 cSt. Estos comportamientos son el resultado de los diferentes diseños propuestos para cada aguja.

Se estableció una comparación de las mediciones de las agujas propuestas con equipos ya establecidos, para medir viscosidad. Para estas pruebas se utilizó el viscosímetro dinámico Brookefield, tanto en modelo RVDV-E como LVDV-E (ver técnica cuantitativa) como referencia. Las muestras utilizadas fueron:

- Cuatro jabones: estos son enumerados de 1 a 4. Aspecto importante: son ordenados por viscosidad ascendente.
- Miel.

Dado que no se conocían los valores de viscosidad de la muestras, se utilizaron los viscosímetros Brookefield RVDV-E y LVDV-E para evaluar las muestras y determinar la viscosidad. Este valor correspondía a la viscosidad dinámica, por lo tanto, se debe transformar a viscosidad cinemática por medio de la densidad. Usando estas mediciones de viscosidad mencionadas como referencia, se escogió una aguja cuyo rango de funcionamiento se ajustara al valor de dicha medición.

- Comparación de mediciones de los viscosímetros Brookfield y de agujas

Cada una de las 5 muestras, cuatro jabones y miel, se evaluaron con el viscosímetro de agujas y con los Brookfield RVDV-E y LVDV-E. Cada uno de los Brookfield se comparó con el de agujas a las mismas condiciones ambientales, en el caso del modelo RVDV-E a las condiciones proporcionadas por el Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ingeniería, y el modelo LVDV-E en la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Los resultados de las comparaciones del viscosímetro de agujas con el Brookfield modelo RVDV-E se presentan a continuación:

Tabla XXVI. **Comparación de mediciones de viscosidad entre los viscosímetros de agujas y Brookfield RVDV-E**

Viscosímetros de agujas y Brookfield RVDV-E			
Muestra	Resultado Brookfield (cSt)	Resultado agujas (cSt)	Porcentaje de error
Jabón 1	771,57	749,28 (aguja 1)	4,8
Jabón 2	1921,57	2253,81 (aguja 3)	15
Jabón 3	2914,05	4438,05 (aguja 3)	49,4
Jabón 4	12099,71	13037,17 (aguja 4)	1,5
Miel	3292,94	6745,05 (aguja 3)	104,8

Fuente: elaboración propia.

Haciendo referencia a los resultados de las comparaciones entre los viscosímetros RVDV-E y de agujas en la tabla 16, la prueba del primer jabón dio como resultado un 4,8 % de error utilizando la aguja 1 (ver tabla 4, resultados), el segundo jabón utilizando la aguja no. 3 dio como resultado un 15 % de error (ver tabla 5, resultados), el tercer jabón usando la aguja 3 dio como resultado un 49,4 % de error (ver 6, resultados), y el cuarto jabón dio un resultado con la aguja 4 de 1,5 % de error (ver tabla 7, resultados); finalmente, la miel comercial dio un resultado de 104,8 % de error (ver tabla 8, resultados). Sin embargo, el

error en la medición de la miel fue causado por un cambio repentino en las condiciones de trabajo, ya que al momento de realizarse la medición con el viscosímetro Brookfield, los parámetros ambientales del laboratorio cambiaron súbitamente al haber presencia de lluvia, descendiendo la temperatura del laboratorio y generando una gran desviación de la medición de viscosidad obtenida. Esto se debió a que el viscosímetro dinámico no tiene un medio que mantenga las condiciones de trabajo.

Tabla XXVII. **Comparación de mediciones de viscosidad entre los viscosímetros de agujas y Brookfield LVDV-E**

Viscosímetros de agujas y Brookfield LVDV-E			
Muestra	Resultado Brookfield (cSt)	Resultado agujas (cSt)	Porcentaje de error
Jabón 1	1000,00	961,11 (aguja 2)	3,9
Jabón 2	2980,39	3584,77 (aguja 3)	20,3
Jabón 3	3392,16	4117,75 (aguja 3)	21,4
Jabón 4	9270,92	12147,52 (aguja 4)	31,9
Miel	4285,71	5409,10 (aguja 3)	20,76

Fuente: elaboración propia.

El siguiente equipo fue el modelo LVDV-E. Se presentan las comparaciones de las medidas en la tabla 17. Para este equipo fueron utilizados las mismas muestras, a modo de mantener el patrón a estudiar. Los resultados se presentaron de la siguiente manera (ver tablas 9-14): la muestra 1 utilizando la aguja 2 presentó un 3,9 % de error, el jabón 2 utilizando la aguja 3 dio como resultado un error del 20,3 %, el jabón 3 usando la misma aguja dio un error del 21,4 %, el jabón 4 usando la aguja 4 mostró un error del 31,9 %, y la miel comercial mostró un error del 20,76 % usando la aguja 3

Como parte de los resultados se hizo un estudio de confiabilidad sobre las medidas de las agujas utilizadas en la calibración (ver tabla 15), tomando como

referencia el valor del aceite estándar ASTM S2000 certificado. La confianza se basó en las tres corridas que se realizaron durante cada temperatura por cada aguja. En el intervalo de 20 °C la aguja 4 mostró un 90,1 % de confianza, mientras que la aguja 3 mostró el más bajo de 0,8 %. En 25 °C nuevamente la aguja 4 mostró la mayor, siendo el 40,4 %, por otro lado la aguja 2 mostró un 0,17 %. En 37,8 °C la mejor fue la aguja no. 1 con 0,63 %, y la más baja fue la núm. 2 con 0,10 %; en 40 °C la que mejor resultado obtuvo fue la número 2 con un 80,5 %, y las más baja la núm.1 con un 0,12 %. En 50 °C el mejor resultado lo obtuvo la núm. 2 con 53,2 %, y el más bajo la núm. 3 con 0,10 %; en 80 °C el mayor valor fue la aguja 4 con 74,1 % y el más bajo, con 0,33 %, la aguja núm. 3. Las confianzas están basadas y determinadas por el número de repeticiones, por lo que no se puede descartar al equipo inmediatamente, se requiere de un mayor estudio para la mejora de las confianzas. Ahora que los intervalos de trabajo se han establecido pueden estudiarse de mejor manera, con un mayor número de repeticiones de acuerdo a su intervalo establecido.

El análisis ANOVA (apéndice 1), determinó que las medias en cada intervalo de cada aguja no demostraron una variación significativa entre los tratamientos, por lo que las agujas pueden ser usadas en los diferentes intervalos de temperatura, sin embargo, es importante tener en cuenta que el movimiento y la medición de las agujas dependerán no solo del fluido a estudiar, sino del diseño de cada aguja, ya que cada uno está diseñado para reducir la turbulencia y no funciona de la misma manera en todos los rangos de viscosidad. Cada diseño en cada intervalo de temperatura facilitará o complicará el trabajo del experimentador cuando se cuantifiquen los tiempos de caída.

CONCLUSIONES

1. Es factible diseñar y armar un viscosímetro cinemático funcional, y competente fabricarlo con materiales disponibles en Guatemala, considerando que hay acceso a recursos técnicos y materiales locales para el diseño del viscosímetro de agujas planteado en este trabajo.
2. El viscosímetro de agujas tiene la capacidad de medir la viscosidad de líquidos menos y más densos que el agua, intercambiando con cuatro agujas donde cada aguja responde a diferente rango de viscosidad (ver tabla). Se midieron cuatro jabones con menor densidad que el agua y miel de abeja superior a dicha densidad. Observando el comportamiento del viscosímetro de agujas, se determinó que la caída de cada aguja tiene como resistencia la consistencia del fluido al que se le está midiendo la viscosidad.
3. El viscosímetro de agujas diseñado cubre el rango total de viscosidad de 166,6 – 9772 cSt, entre las temperaturas 20 a 100 °C. No puede concluirse haber conseguido mediciones estables de viscosidad para intervalos inferiores y superiores al rango indicado. Entre los factores que se pueden considerar que influyen en la estabilidad de mediciones está el tipo de materiales del viscosímetro de agujas, que son borosilicato y aluminio. En el caso del borosilicato por tener la capacidad de soportar temperaturas altas, y el aluminio al ser material resistente de bajo peso.
4. Con base en el comportamiento del aceite estándar ASTM S2000, se hicieron las comparaciones del tiempo de caída de cada aguja con la

tabla17(ver apéndice 7). Replicando las condiciones de la tabla 17 se obtuvo la medición de la viscosidad en determinada temperatura para cada aguja. Con estos datos se desarrolló una correlación lineal y cuadrática.

Correlación con mejor ajuste a cada una de las agujas

Correlación	Aguja	Rango de viscosidad (cSt)	Temperatura (°C)
Lineal	A1	166.6 -890	40 a 80
Cuadrática	A2	890.6-1805	40 a 80
Lineal	A3	2137-6162	20 a 37.8
Cuadrática	A4	6162-9772	20 a 37.8

Fuente: elaboración propia.

Según se presenta en la tabla anterior, se ajustan de mejor manera a una correlación lineal correspondiente al rango de temperaturas:

- A1 temperaturas entre 40 y 80 °C
- A3 temperaturas entre 20 a 37,8 °C

Las otras dos agujas se ajustan a una correlación cuadrática:

- A2 temperaturas entre 40 y 80 °C
- A4 temperaturas entre 20 a 37,8 °C

Con lo anterior se evidencia que cada aguja se comporta con mayor estabilidad en determinado intervalo de cSt y temperatura, al generar mínima turbulencia en la caída dentro del viscosímetro de agujas.

RECOMENDACIONES

1. Guatemala tiene una capacidad limitada en cuanto a la obtención de recursos, tecnología y equipo que se necesitan para desarrollar un viscosímetro. Para desarrollar una mejora en el viscosímetro de agujas debe hacerse hincapié en la dinámica del movimiento de estas, para que tengan una caída libre en un intervalo más amplio de mediciones. La ventaja del viscosímetro de agujas es su fácil manejo, ya que no necesita de cuidados rigurosos, sin embargo, se considera pertinente utilizar las agujas en los rangos establecidos para obtener mediciones estables.
2. Para ampliar la gama de líquidos que el viscosímetro de agujas puede medir, es necesario realizar más pruebas con diferentes muestras a las escogidas, para viscosidades menores y mayores que el agua. El aspecto más relevante es que las muestras sean semitraslúcidas, ya que los muestreados fueron traslúcidos. Queda pendiente una adaptación del viscosímetro de agujas para medir líquidos opacos.
3. Según lo observado en el viscosímetro de agujas, no se deben utilizar las agujas fuera del intervalo establecido en este trabajo, dado que la turbulencia que se genera cuando están fuera de este aumenta el error en la medición. Con excepción de la aguja A1, que puede ser utilizada fuera de su rango efectivo, pero solo como medio de referencia, no como una medida definitiva de viscosidad. Para realizar medidas de tiempo de caída por debajo de 166,6 y mayores a 9 772 cSt, se debe realizar otro estudio de materiales y realizar comparaciones con un aceite estándar

que se ajuste a esos rangos de viscosidad, así como otra variedad de líquidos.

4. El diseño del viscosímetro de agujas abarca la fabricación, calibración con el aceite estándar ASTM S2000 y mediciones con jabones con densidad menor a la del agua y miel para densidad mayor del agua. A estos líquidos se les midió la viscosidad con otros equipos, obteniendo resultados de mediciones de viscosidad cercanas a las del viscosímetro de agujas. También se les aplicó los modelos matemáticos lineal y cuadrático, observando comportamiento similar en la tabla 16. A partir de esto se considera conveniente continuar con el proceso de pruebas para llegar a formalizar la total validación del viscosímetro de agujas.

BIBLIOGRAFÍA

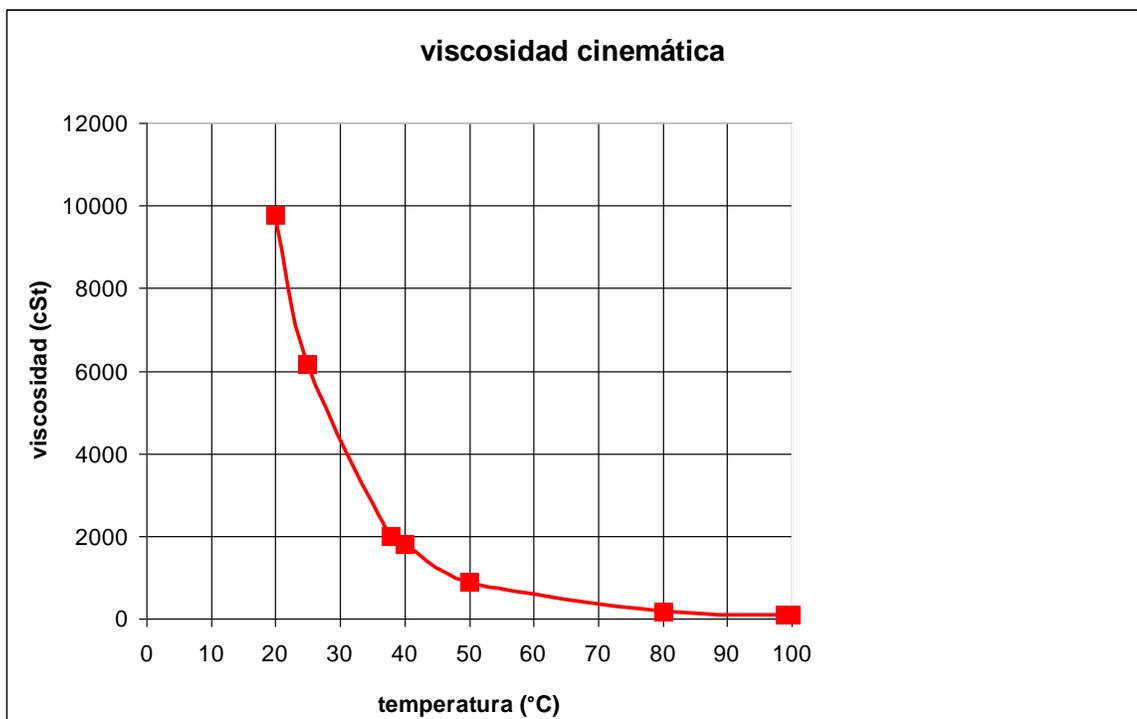
1. ABRIL VALENCIA, Diana; VARGAS SOLANA, Edgar. *Diseño, construcción y validación de un viscosímetro de caída de bola para medir viscosidades dinámicas de productos líquidos alimenticios*. Bogotá, Colombia: Universidad Jorge Tadeo Lozano, 2016. 125 p.
2. ASKELAND, Donald R. *La ciencia e ingeniería de los materiales*. México: Iberoamérica, 1985. 187 p.
3. Gordis Team. *Viscosímetro. XX concurso universitario feria de las ciencias*. [en línea]. <http://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria20/feria180_01_viscosimetro.pdf>. [Consulta: 30 de mayo 2017].
4. HUGHES F., William; BRIGHTON, John A. *Dinámica de fluidos*. México: McGraw-Hill. 1982. 315 p.
5. LAIDLER, Keith J.; MEISER, Jonh H. *Fisicoquímica*. 4a ed. México: Continental, 2003. 328 p.
6. *Métodos de ensayo. Determinación de la viscosidad-método de Brookfield*. [en línea]. <http://www.matematicasypoesia.es/metodos/melweb08_Brookfield.htm/>. [Consulta: 27 de diciembre de 2016].

7. MONTAÑEZ NAVA, Jesús. *Construcción y prueba de un viscosímetro de esfera descendente con registro osciloscopio*. México: Universidad Autónoma de Nuevo León, 1978. 214 p.
8. MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. 6a ed. México: Pearson, 2006. 189 p.
9. PCE. *Consistómetro Bostwick*. [en línea]. <<http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-medida-laboratorio/consistometro-bostwick-zxcon.htm>>. [Consulta: 27 de diciembre de 2016].
10. SÁNCHEZ HERNÁNDEZ, Blanca. *Viscosímetro de bola*. México: Instituto Politécnico Nacional, 2008. 196 p.
11. SPIEGEL, Murray R. *Teoría y problemas de probabilidad y estadística*. México: McGraw-Hill, 1961. 316 p.
12. SOFRASER. *Viscosímetros tipo vibrante*. [en línea]. <<http://www.viscosimetro-de-proceso.es/tag/viscosimetros-vibrantes/>>. [Consulta: 27 de febrero de 2016].
13. VERGARA, Laura. *Fluidos newtonianos y no-newtonianos*. [en línea]. <https://prezi.com/jrugcxjeyi_r/fluidos-newtonianosynonewtonianos/>. [Consulta: 27 de diciembre de 2016].
14. Wikipedia. *Fluido*. [en línea]. <<https://es.wikipedia.org/wiki/Fluido>>. [Consulta: 27 de febrero de 2016].

15. _____. *Ley de Stokes*. [en línea]. <https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Stokes>. [Consulta: 27 de febrero de 2016].
16. _____. *Temperatura*. [en línea]. <<https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura>>. [Consulta: 27 de febrero de 2016].
17. YUNUS, Adrián; ZENGEL, John M. *Cimbala, mecánica de fluidos*. 2a ed. México: McGraw-Hill. 2010. 269 p.
18. ZAMIR, Alexis. *Viscosímetros para fluidos derivados del petróleo*. [en línea]. <<https://es.slideshare.net/>>. [Consulta: 27 de diciembre de 2016].

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos calculados. Comportamiento del estándar ASTM certificado



- Referencia de la calibración del aceite estándar ASTM S2000 certificado

Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática (cSt)
20	9772
25	6162
37.8	2000
40	1805
50	890.6
80	166.6

Continuación del apéndice 1.

- Puntos de correlación de las agujas con el estándar ASTM certificado a 20 °C

56Temp. 20 °C				
Núm. corrida	aguja 1 (s)	aguja 2 (s)	aguja 3 (s)	aguja 4 (s)
1	72,76	66,82	78,5	75,48
2	77,01	66,51	77,08	75,34
3	79,31	70,69	78,09	75,08
Promedio	76,36	68,01	77,89	75,30
Desviación estándar	3,32	2,33	0,73	0,20

- Puntos de correlación de las agujas con el estándar ASTM certificado a 25 °C

Temp25 °C				
Núm. corrida	aguja 1 (s)	aguja 2 (s)	aguja 3 (s)	aguja 4 (s)
1	50,77	47,31	48,81	46,12
2	55,5	42,57	49,5	47,1
3	53,6	44,07	49,1	46,7
Promedio	53,29	44,65	49,14	46,64
Desviación estándar	2,38	2,42	0,35	0,49

- Puntos de correlación de las agujas con el estándar ASTM certificado a 37,8 °C

Temp37.8 °C				
corrida	aguja 1 (s)	aguja 2 (s)	aguja 3 (s)	aguja 4 (s)
1	21,63	18,34	16,92	20,7
2	24,78	20,23	17,2	18,01
3	22,4	19,6	17,9	20,1
Promedio	22,94	19,39	17,34	19,60
Desviación estándar	1,64	0,96	0,50	1,41

Continuación del apéndice 1.

- Puntos de correlación de las agujas con el estándar ASTM certificado a 40 °C

Temp40 °C				
corrida	aguja 1 (s)	aguja 2 (s)	aguja 3 (s)	aguja 4 (s)
1	15,15	12,58	15,64	15
2	16,1	12,17	15,03	14,36
3	15,31	12,67	15,36	14,06
Promedio	15,52	12,47	15,34	14,47
Desviación estándar	0,51	0,27	0,31	0,48

- Puntos de correlación de las agujas con el estándar ASTM certificado a 50 °C

Temp50 °C				
corrida	aguja 1 (s)	aguja 2 (s)	aguja 3 (s)	aguja 4 (s)
1	7,7	6,89	8,11	8,89
2	8,17	7,42	7,34	7,89
3	8,2	6,77	8,56	6,81
Promedio	8,02	7,03	8,00	7,86
Desviación estándar	0,28	0,35	0,62	1,04

- Puntos de correlación de las agujas con el estándar ASTM certificado a 80 °C

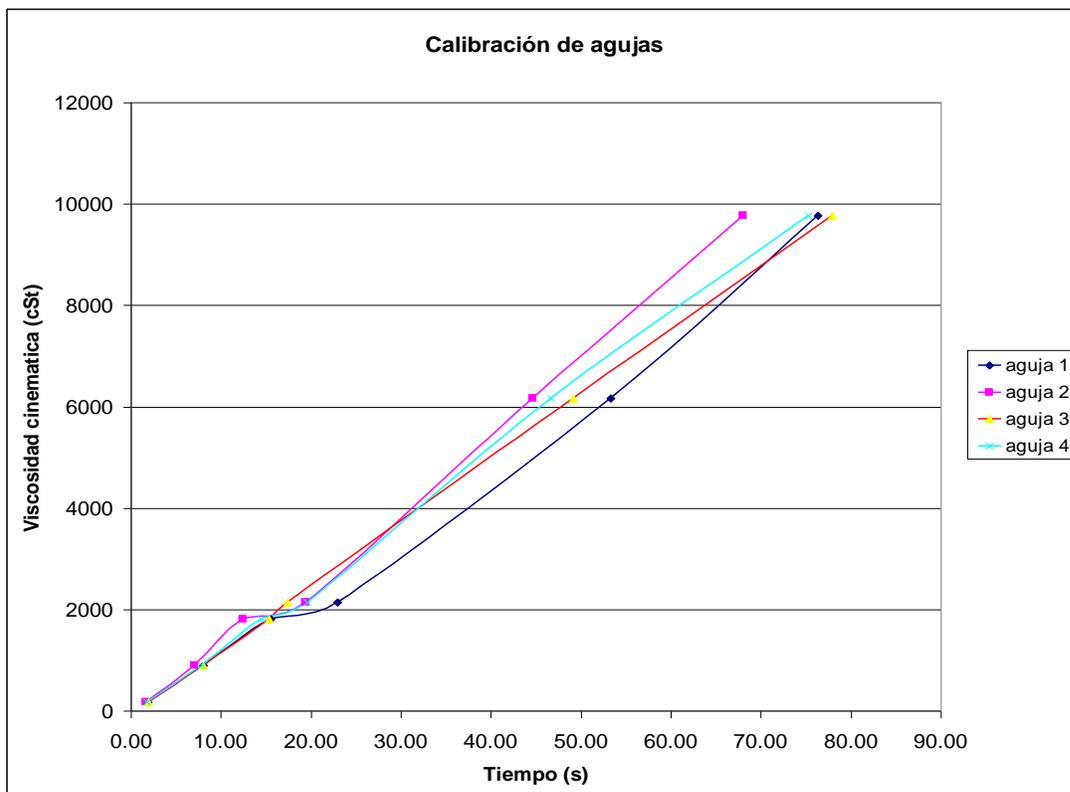
Temp80 °C				
corrida	aguja 1 (s)	aguja 2 (s)	aguja 3 (s)	aguja 4 (s)
1	1,87	1,76	2,09	1,82
2	1,88	1,7	1,96	1,76
3	1,82	1,67	1,72	1,8
Promedio	1,86	1,71	1,92	1,79
Desviación estándar	0,032	0,046	0,188	0,031

Continuación del apéndice 1.

- Puntos de correlación de las agujas con el estándar ASTM certificado de 20 °C a 80 °C

Dato referencia cSt (temperatura)	9772 (20°C)	6162 (25°C)	2 137 (37,8 °C)	1805 (40 °C)	890,6 (50°C)	166,6 (80° C)
Núm. aguja	puntos1 (s)	punto 2 (s)	punto 3 (s)	punto 4 (s)	punto 5 (s)	punto 6 (s)
1	76,36	53,29	22,94	15,52	8,02	1,86
2	68,01	44,65	19,39	12,47	7,03	1,71
3	77,89	49,14	17,34	15,34	8	1,92
4	75,30	46,64	19,6	14,47	7,86	1,79

- Puntos de correlación de las agujas con el estándar ASTM certificado de 20 °C a 80 °C

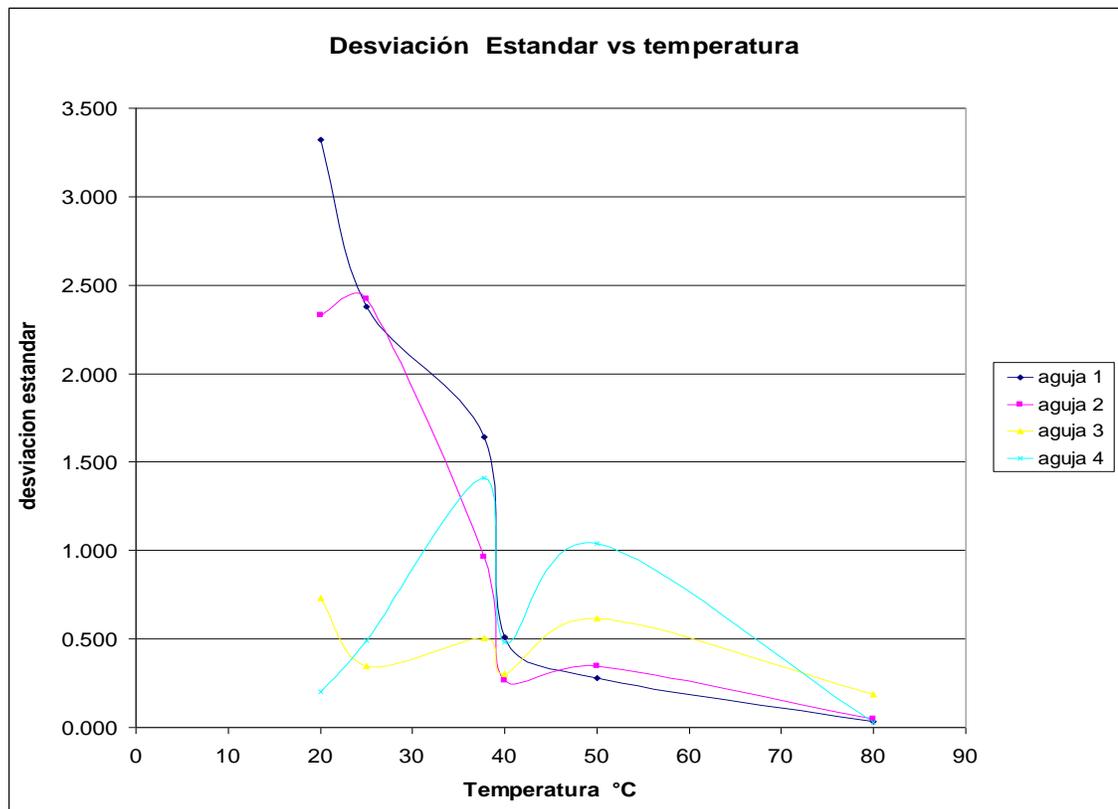


Continuación del apéndice 1.

- Desviaciones estándar de las agujas de acuerdo a la temperatura y viscosidad correspondientes del estándar ASTM

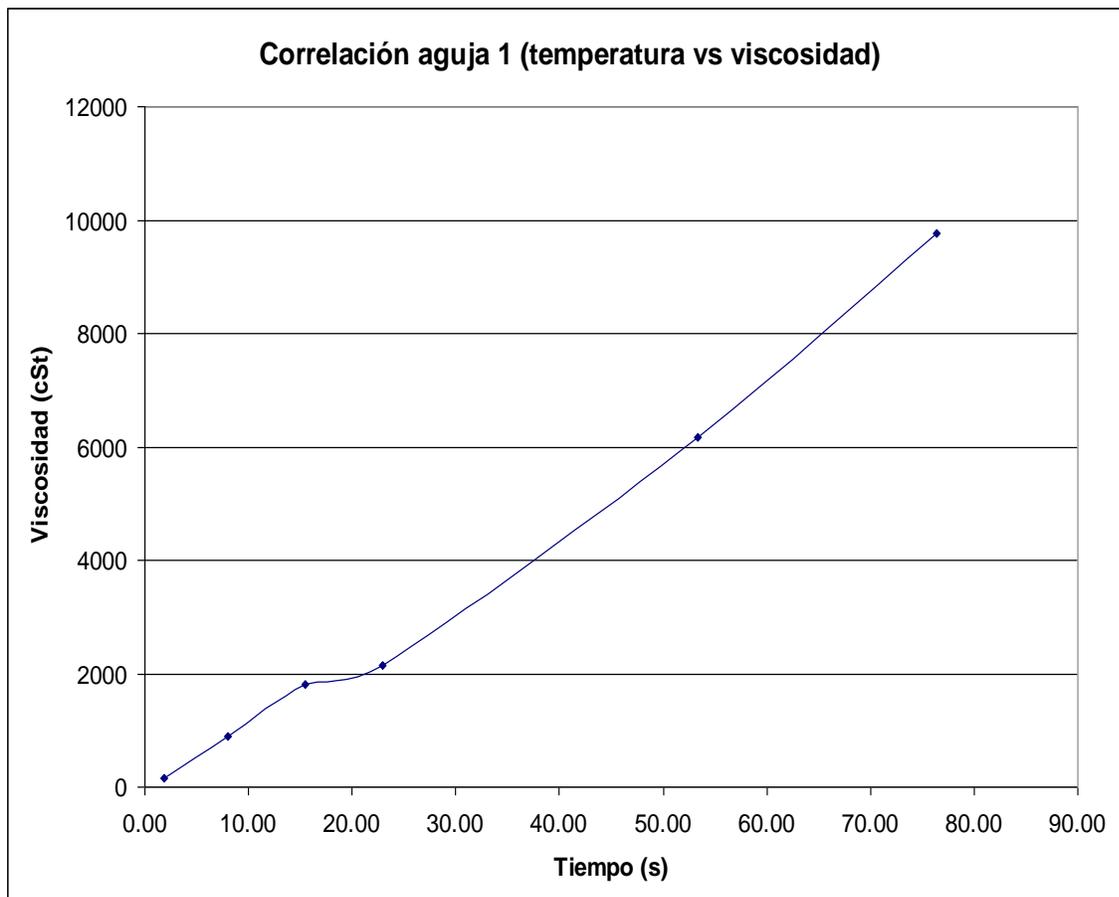
Desviaciones estándar					
Viscosidad (cSt)	Temp (°C)	aguja 1	aguja 2	aguja 3	aguja 4
166.6	80	0,032	0,046	0,188	0,031
890.6	50	0,28	0,35	0,62	1,04
1805	40	0,51	0,27	0,31	0,48
2137	37.8	1,64	0,96	0,50	1,41
6162	25	2,38	2,42	0,35	0,49
9772	20	3,32	2,33	0,73	0,20

- Desviaciones estándar de las agujas de acuerdo a la temperatura y viscosidad correspondientes del estándar ASTM



Continuación del apéndice 1.

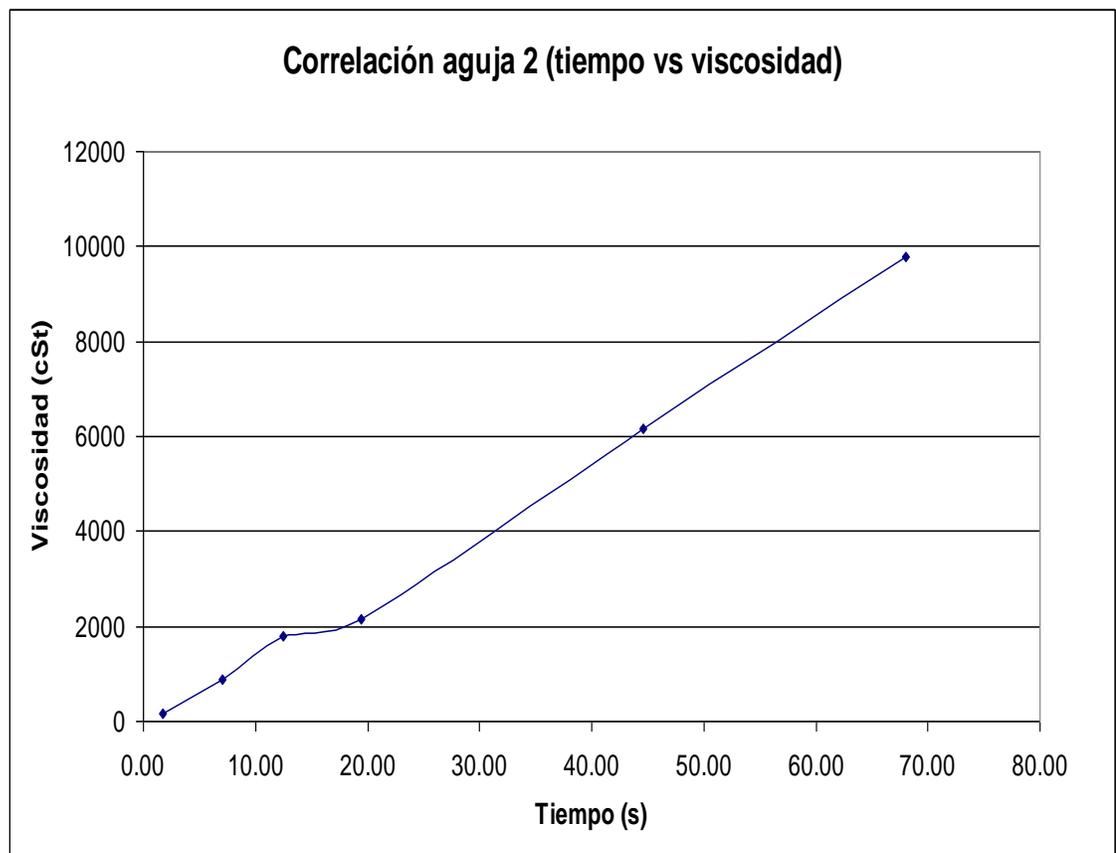
- Correlación de la aguja 1 con el estándar ASTM certificado con rango de temperatura 20 a 80 °C



Temperatura (°C)	20	25	37,8	40	50	80
Viscosidad (cSt)	9772	6162	2137	1805	890,6	166,6
Tiempo (s)	76,36	53,29	22,94	15,52	8,02	1,86

Continuación del apéndice 1.

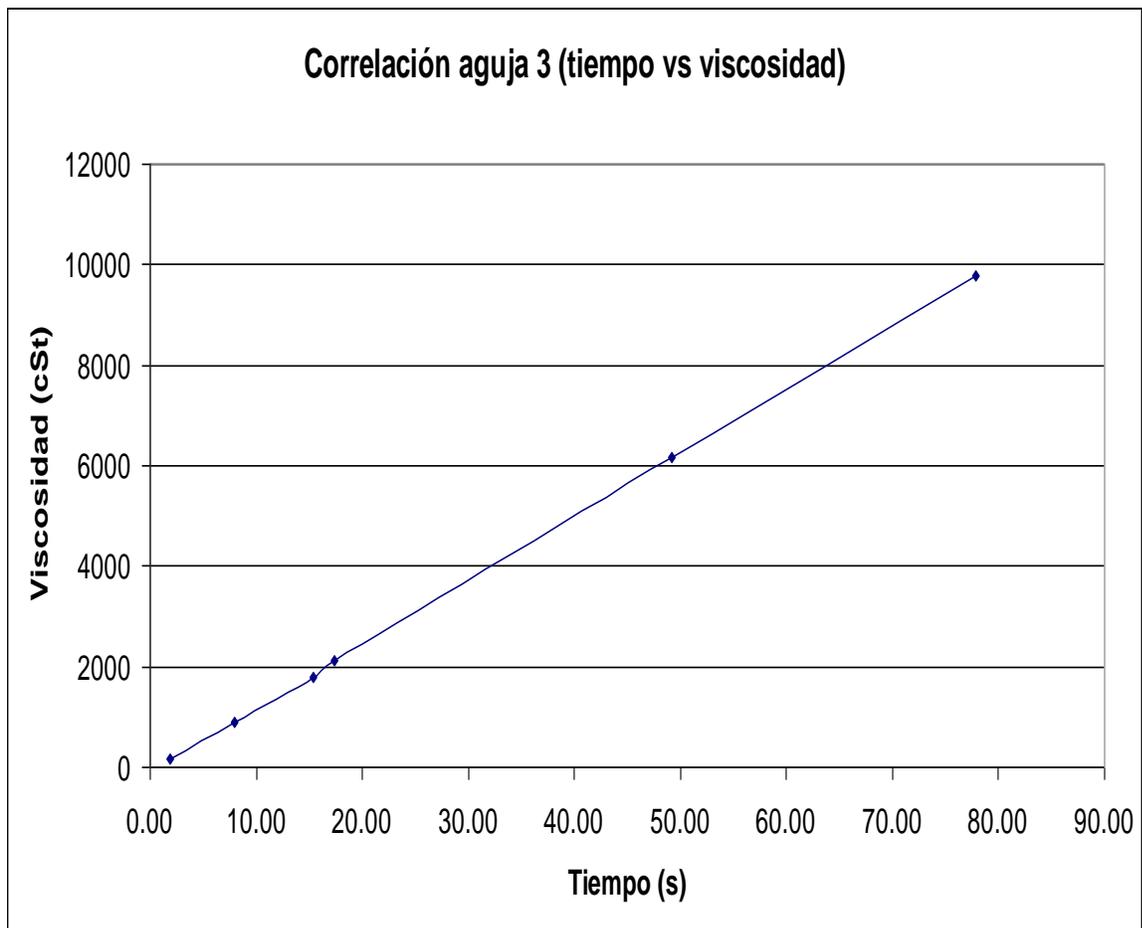
- Correlación de la aguja 2 con el estándar ASTM certificado con rango de temperatura 20 a 80 °C



Temperatura (°C)	20	25	37,8	40	50	80
Viscosidad (cSt)	9772	6162	2137	1805	890,6	166,6
Tiempo (s)	68,01	44,65	19,39	12,47	7,03	1,71

Continuación del apéndice 1.

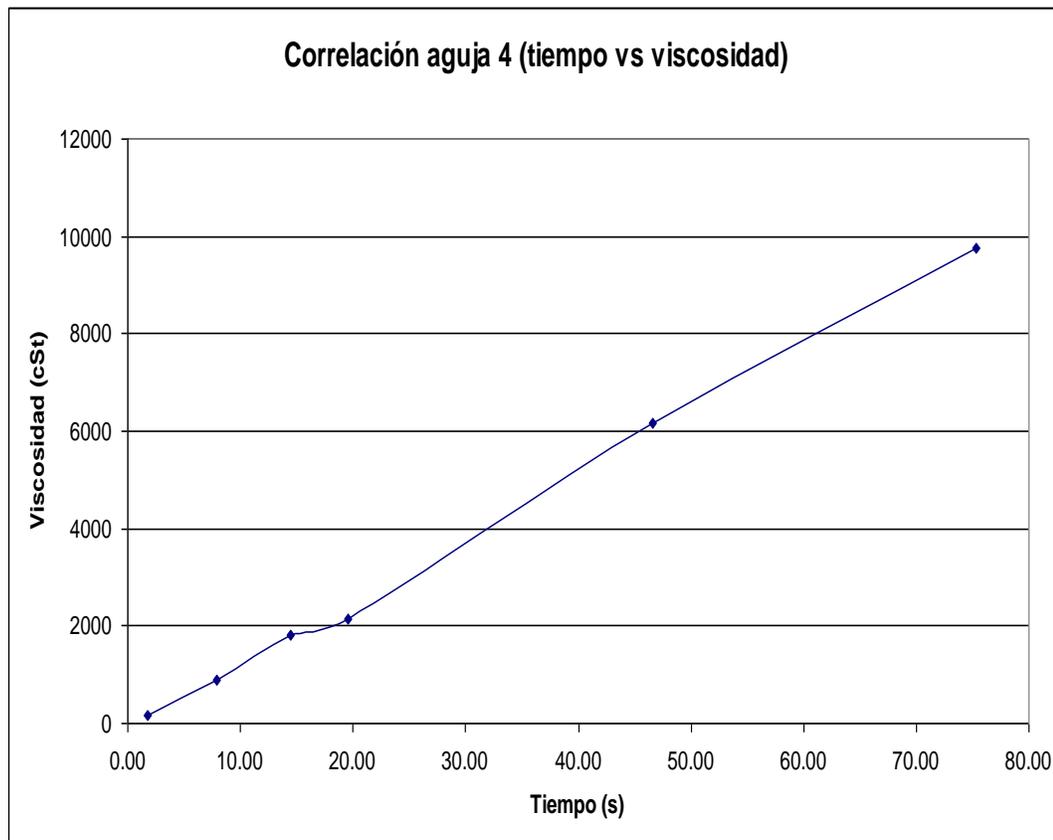
- Correlación de la aguja 3 con el estándar ASTM certificado con rango de temperatura 20 a 80 °C



Temperatura (°C)	20	25	37,8	40	50	80
Viscosidad (cSt)	9772	6162	2137	1805	890,6	166,6
Tiempo (s)	77,89	49,14	17,34	15,34	8	1,92

Continuación del apéndice 1.

- Correlación de la aguja 4 con el estándar ASTM certificado con rango de temperatura 20 a 80 °C



Temperatura (°C)	20	25	37,8	40	50	80
Viscosidad (cSt)	9772	6162	2137	1805	890,6	166,6
Tiempo (s)	75,30	46,64	19,6	14,47	7,86	1,79

Continuación del apéndice 1.

- Prueba 1. Comparación de mediciones con viscosímetro Brookfield RVDV-E

Aguja 1			
Densidad de fluido (g/ml)		1,02	
Viscosímetro Brookfield		Jabón 1	Prueba de informe
Viscosidad		Tiempo (s)	Viscosidad cinemática (cSt)
cPs	787	5,76	742,03
cSt	771,57	6,7	755,51
T Temperatura de 26 °C		5,74	750,3
		promedio	749,28
		error %	4,8

- Prueba 2. Comparación de mediciones con viscosímetro Brookfield RVDV-E

Aguja 3			
Densidad de fluido (g/ml)		1,02	
Viscosímetro Brookfield		Jabón 2	Prueba de informe
Viscosidad		Tiempo (s)	Viscosidad cinemática (cSt)
cPs	1960	18,5	2288,00
cSt	1921,568627	17,8	2197,99
Temperatura de 26 °C		18,4	2275,43
		Promedio	2253,81
		Error %	15,0

- Prueba 3. Comparación de mediciones con viscosímetro Brookfield RVDV-E

aguja 3			
Densidad de fluido (g/ml)		1,02	
Viscosímetro Brookfield		Jabón 3	Prueba de informe
Viscosidad		Tiempo (s)	Viscosidad cinemática (cSt)
cPs	2970	33,70	4204,76
cSt	2914,050235	37,40	4671,33
Temperatura 26 °C		promedio	4438,05
		Error %	49,4

Continuación del apéndice 1.

- Prueba 4. Comparación de mediciones con viscosímetro Brookefield RVDV-E

Aguja 4		
Densidad de fluido (g/ml)		1,01
Viscosímetro Brookfield	Jabón 4	Prueba de informe
Viscosidad		viscosidad cinemática (cSt)
cPs	12280	107,25
cSt	12099,71	108,46
Temperatura de 26 °C		107,3
		Promedio
		Error %
		13000,00
		13106,50
		13005,00
		13037,17
		1,5

- Prueba 5. Comparación de mediciones con viscosímetro Brookefield RVDV-E

Aguja 3		
Densidad de fluido (g/ml)		1,40
Viscosímetro Brookfield	miel	Prueba de informe
Viscosidad		Viscosidad cinemática (cSt)
cPs	4620	54,88
cSt	3292,94	52,81
Presencia de lluvia		Promedio
		Error %
		6875,56
		6614,53
		6745,05
		104,8

- Prueba 1. Comparación de mediciones con viscosímetro Brookefield LVDV-E

Jabón 1		
Aguja 2		
Equipo local		Equipo experimental
Viscosidad dinámica	1020	Tiempo (s)
Densidad (g/ml)	1,02	7,5
Viscosidad cinemática (cSt)	1000	7,41
Viscosidad experimental (cSt)	961,11	7,56
Condiciones de trabajo 23 °C		Promedio
		% Error
		7,49
		3,89

Continuación del apéndice 1.

- Prueba 2. Comparación de mediciones con viscosímetro Brookefield LV DV-E

Jabón 2		
Aguja 3		
Equipo local		Equipo experimental
Viscosidad dinámica	3040	Tiempo (s)
Densidad (g/ml)	1,02	28,75
Viscosidad cinemática (cSt)	2980,39	28,7
Viscosidad experimental (cSt)	3584,77	28,9
Condiciones de trabajo 23 °C	Promedio	28,783
	% Error	20,28

- Prueba 3. Comparación de mediciones con viscosímetro Brookefield LV DV-E

Jabón 3		
Aguja 3		
Equipo local		Equipo experimental
Viscosidad dinámica	3460	Tiempo (s)
Densidad (g/ml)	1.02	32.64
Viscosidad cinemática (cSt)	3392.16	33.27
Viscosidad experimental (cSt)	4117.75	33.12
Condiciones de trabajo 23 °C	Promedio	33.01
	%Error	21.39

- Prueba 4. Comparación de mediciones con viscosímetro Brookefield LV DV-E

Jabón 4		
Aguja 4		
Equipo local		Equipo experimental
Viscosidad dinámica	9300	Tiempo (s)
Densidad (g/ml)	1,01	97,47
Viscosidad cinemática (cSt)	9207,92	98,43
Viscosidad experimental (cSt)	12147,52	-----
Condiciones de trabajo 23 °C	Promedio	97,95
	%Error	31,92

Continuación del apéndice 1.

- Prueba 5. Comparación de mediciones con viscosímetro Brookfield LVDV-E

Miel		
Aguja 3		
Equipo local		Equipo experimental
Viscosidad dinámica	6000	Tiempo (s)
Densidad (g/ml)	1,400	45,56
Viscosidad cinemática (cSt)	4285,71	40,9
Viscosidad experimental (cSt)	5409,019	-----
Condiciones de trabajo 23 °C	Promedio	43,25
	%Error	20,76

- Prueba 6. Comparación de mediciones con viscosímetro Brookfield LVDV-E

Jabón 5		
Aguja 4		
Equipo local		Equipo experimental
Viscosidad dinámica	19000	tiempo (s)
Densidad (g/ml)	0,99	250,03
Viscosidad cinemática (cSt)	19191,9192	-----
Viscosidad experimental (cSt)	17175,317	-----
Condiciones de trabajo 23 °C	%Error	10,508

- Análisis ANOVA del viscosímetro a 20 °C

Tabla ANOVA Temperatura 20 °C			
Fuente de variación	SC	gl	CM
Factor	354,997	3	118,332
Error	881387,870	8	110173,484
Total	881742,867	11	-----
F(3,8,0.05)	4,07		-----
F*	0,001074055		Tomado de tabla Fisher

Continuación del apéndice 1.

- Análisis ANOVA del viscosímetro a 25 °C

Tabla ANOVA Temperatura 25 °C			
Fuente de variación	SC	gl	CM
Factor	543,418	3	181,139
Error	543411,000	8	67926,375
Total	543954,419	11	-----
F(3,8,0.05)	4,07	-----	
F*	0,0027	Tomado de tabla Fisher	

- Análisis ANOVA del viscosímetro a 37.8 °C

Tabla ANOVA Temperatura 37.8 °C			
Fuente de variación	SC	gl	CM
Factor	51,491	3	17,164
Error	236052,669	8	29506,584
Total	236104,160	11	-----
F(3,8,0.05)	4,07	-----	
F*	0,000581695	Tomado de tabla Fisher	

- Análisis ANOVA del viscosímetro a 40 °C

Tabla ANOVA Temperatura de 40 °C			
Fuente de variación	SC	gl	CM
Factor	93,106	3	31,035
Error	25209,700	8	3151,213
Total	25302,807	11	-----
F(3,8,0.05)	4,07	-----	
F*	0,009848744	Tomado de tabla Fisher	

Continuación del apéndice 1.

- Análisis ANOVA del viscosímetro a 50 °C

Tabla ANOVA Temperatura 50 °C			
Fuente de variación	SC	gl	CM
Factor	360,661	3	120,2203
Error	54840,353	8	6855,0442
Total	55201,014	11	-----
F(3,8,0.05)	4,07	-----	
F*	0,0175375	Tomado de tabla Fisher	

- Análisis ANOVA del viscosímetro a 80 °C

Tabla ANOVA Temperatura 80 °C			
Fuente de variación	SC	gl	CM
Factor	116.49	3	38.83
Error	1164.96	8	145.62
Total	1281.45	11	-----
F(3,8,0.05)	4.07	-----	
F*	0.266648002	Tomado de tabla Fisher	

- Análisis de confiabilidad del viscosímetro a 20 °C

Confiabilidad a temperatura de 20 °C							
dy	44,187804	Dy	8,787	dy	0,631	dy	39,283
Parámetro T	0,138327	Parámetro T	0,043	Parámetro T	0,012	Parámetro T	2,935
α	0,902652	α	0,970	α	0,992	α	0,099
Nivel de confianza	0,097348	Nivel de confianza	0,030	Nivel de confianza	0,008	Nivel de confianza	0,901

- Análisis de confiabilidad del viscosímetro a 25 °C

Confiabilidad a temperatura de 25 °C							
dy	28,048	Dy	5,235	dy	0,631	dy	24,446
Parámetro T	0,140	Parámetro T	0,024	Parámetro T	0,025	Parámetro T	0,624
α	0,902	α	0,983	α	0,982	α	0,596
Nivel de confianza	0,098	Nivel de confianza	0,017	Nivel de confianza	0,018	Nivel de confianza	0,404

Continuación del apéndice 1.

- Análisis de confiabilidad del viscosímetro a 37.8 °C

Confiabilidad a temperatura de 37.8 °C							
Dy	10,049	Dy	1,275	dy	0,631	dy	7,905
Parámetro T	0,089	Parámetro T	0,014	Parámetro T	0,017	Parámetro T	0,061
α	0,937	α	0,990	α	0,988	α	0,957
Nivel de confianza	0,063	Nivel de confianza	0,010	Nivel de confianza	0,012	Nivel de confianza	0,043

- Análisis de confiabilidad del viscosímetro a 40 °C

Confiabilidad a temperatura de 40 °C							
dy	0,600	Dy	54,246	dy	0,611	dy	27,664
Parámetro T	0,017	Parámetro T	1,917	Parámetro T	0,028	Parámetro T	0,672
α	0,988	α	0,195	α	0,980	α	0,571
Nivel de confianza	0,012	Nivel de confianza	0,805	Nivel de confianza	0,020	Nivel de confianza	0,429

- Análisis de confiabilidad del viscosímetro a 50 °C

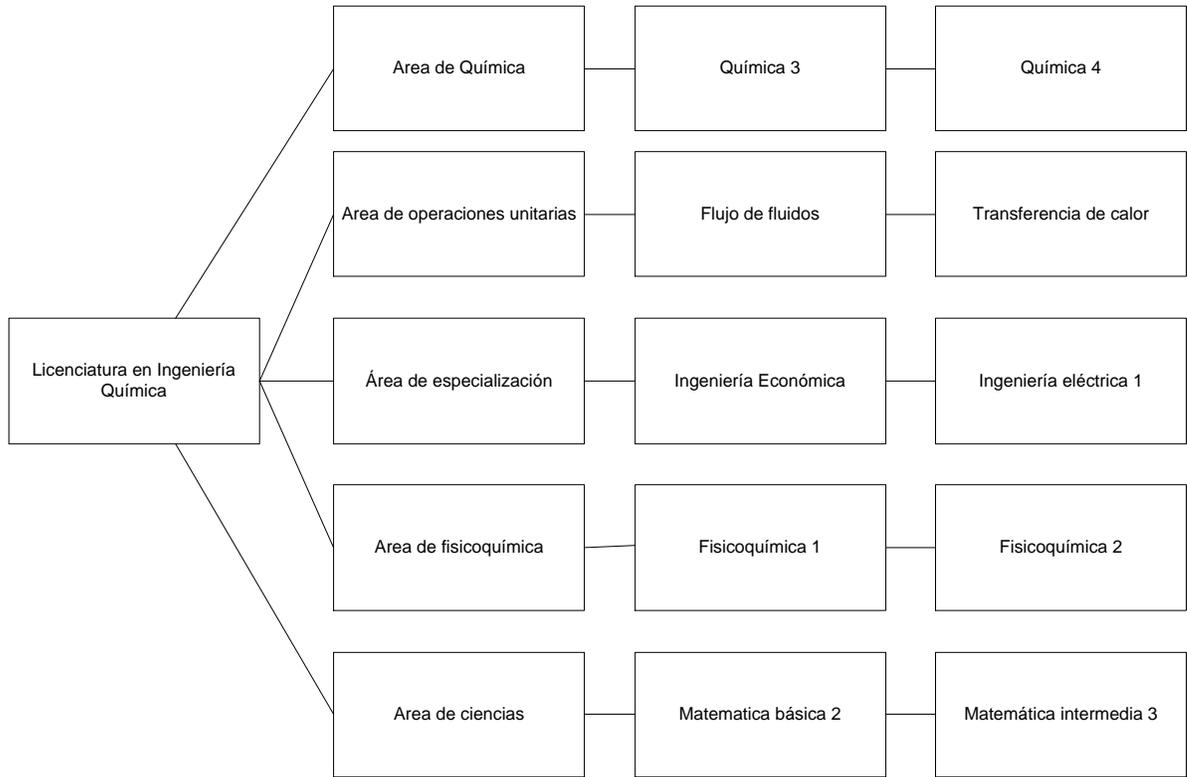
Confiabilidad a temperatura de 50 °C							
Dy	0,6	dy	27,02	Dy	0,611	dy	13,917578
Parámetro T	0,03088	Parámetro T	0,888	Parámetro T	0,014	Parámetro T	0,180541
α	0,97817	α	0,46831051	α	0,99007233	α	0,873366
Nivel de confianza	0,02183	Nivel de confianza	0,53168949	Nivel de confianza	0,00992767	Nivel de confianza	0,126634

- Análisis de confiabilidad del viscosímetro a 80 °C

Confiabilidad a temperatura de 80 °C							
dy	0,6	dy	5,50	Dy	0,611	dy	3,03342637
Parámetro T	0,2693855	Parámetro T	1,729	Parámetro T	0,046	Parámetro T	1,561
α	0,81288019	α	0,22588328	α	0,96738523	α	0,25883197
Nivel de confianza	0,18711981	Nivel de confianza	0,77411672	Nivel de confianza	0,03261477	Nivel de confianza	0,74116803

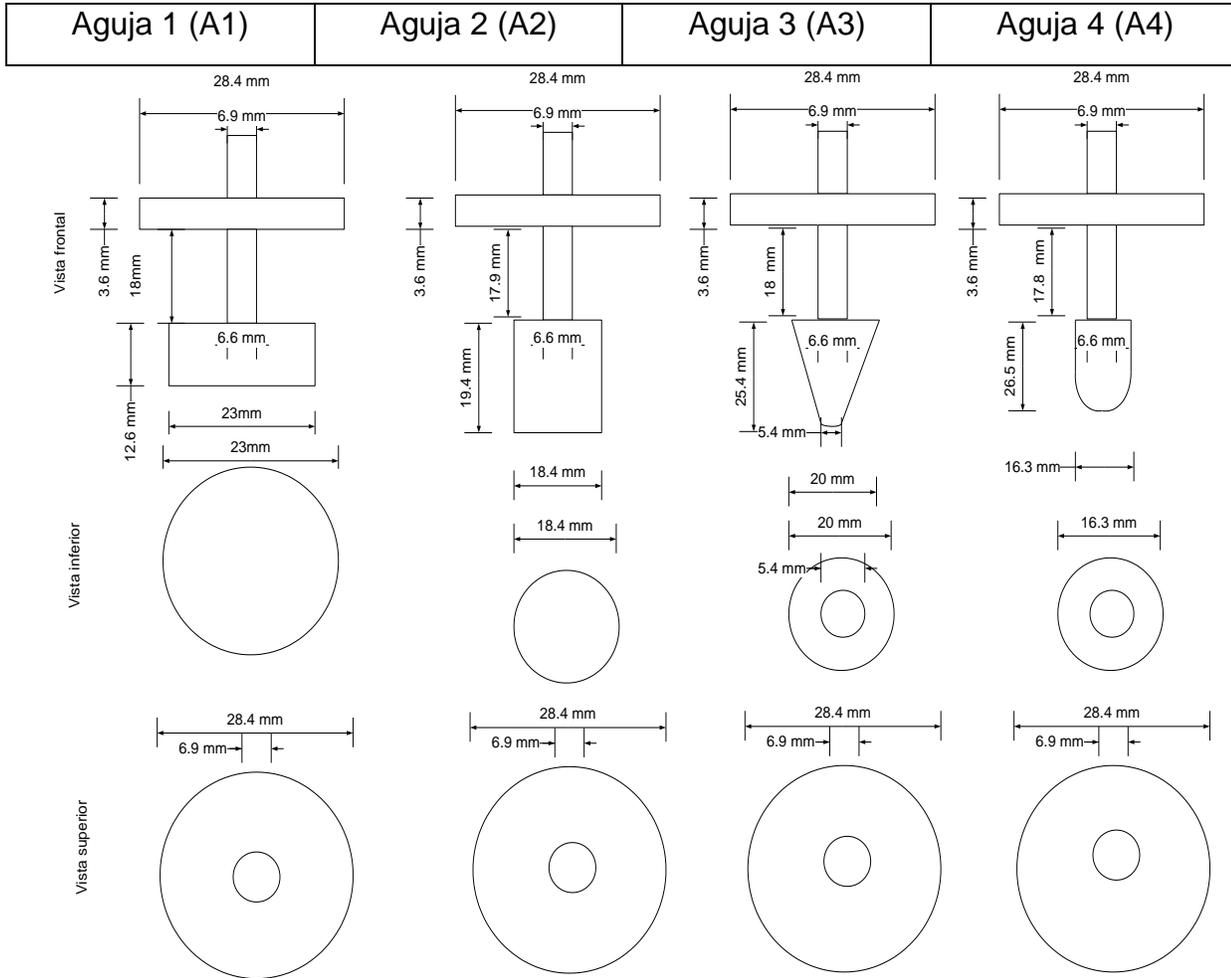
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

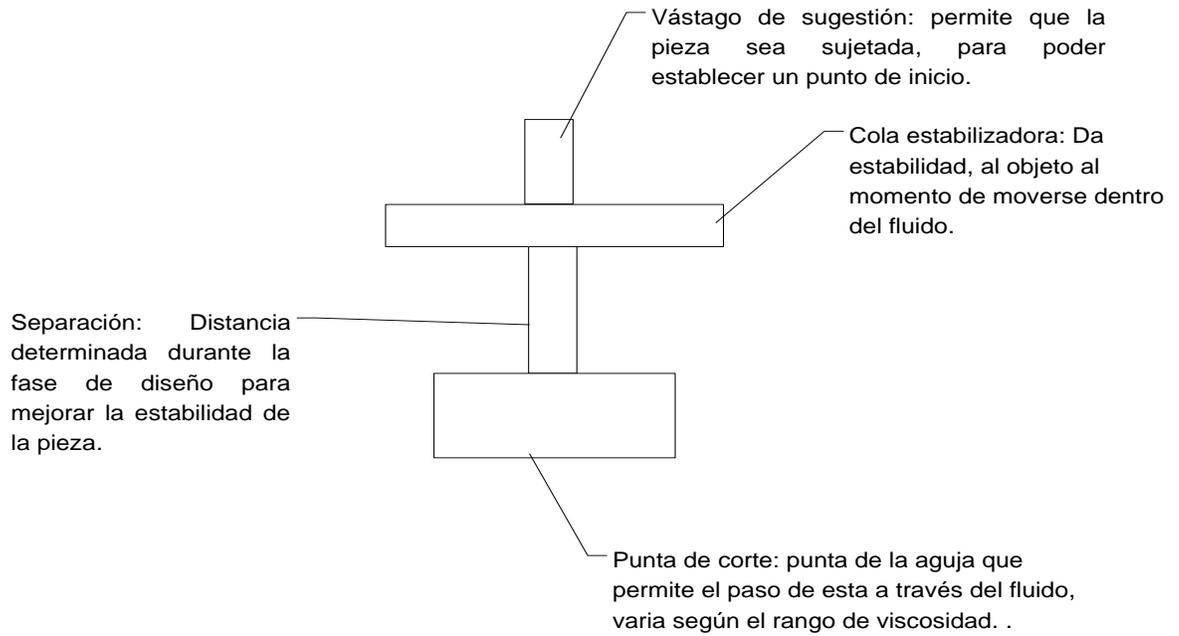
Apéndice 3. Diagrama de agujas



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2003.

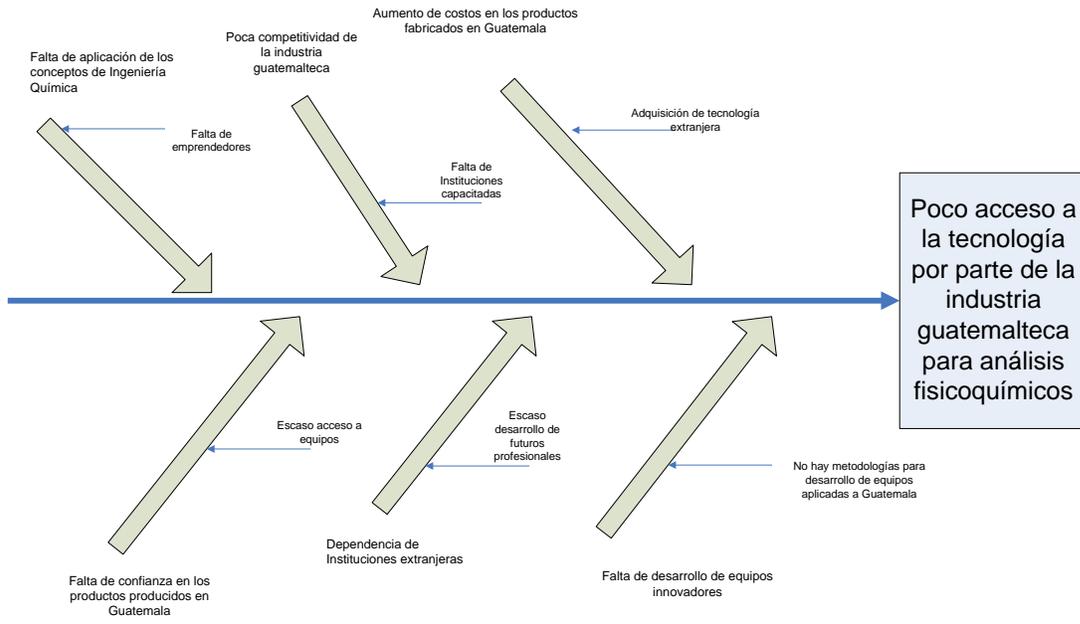
Apéndice 4.

Diagrama general de las agujas del viscosímetro



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Fotografías**



Continuación del apéndice 6.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Parámetros establecidos del aceite estándar ASTM S2000**



Continuación del apéndice 7.

Temperature		Kinematic Viscosity	Dynamic Viscosity	Density	Saybolt Viscosity
°C	°F	mm ² /s (cSt)	mPa·s (cP)	g/ml	seconds
20.00	68.00	9772	8564	0.8763	
25.00	77.00	6162	5382	0.8734	
37.78	100.00	2137	1851	0.8661	
40.00	104.00	1805	1561	0.8649	
50.00	122.00	890.6	765.1	0.8591	
80.00	176.00	166.6	140.3	0.8421	
98.89	210.00	75.87	63.08	0.8314	354 SUS
100.00	212.00	72.80	60.48	0.8308	

Use Before date indicates reference material shelf life, and not a calibration interval.

CAS No.: 9003-29-6 FORMULATION: Poly-Butene (100%)

CHEMICAL HAZZARD: Applicable

HEALTH HAZARD: Contact may irritate skin, eyes and mucous membranes.

Inhalation of vapor may cause irritation of respiratory passages.

FIRST AID PROCEDURES: Skin: Wash with soap and water.

Eyes: Flush with water/ Inhalation: Remove to fresh air.

Ingestion: Get medical assistance. Do not induce vomiting.

Fuente: elaboración propia.

