

00362 6
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS
División de Estudios de Posgrado

Diseño, construcción y calibración de un
viscosímetro de bola rodante

T E S I S

Que para obtener el Grado Académico de
MAESTRO EN CIENCIAS (FISICA)

P r e s e n t a

RENE MOLNAR DE LA PARRA

Directores de Tesis: **DR. ARTURO TREJO RODRIGUEZ**
DR. RAMON PERALTA - FABI

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradezco a la UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA el haberme brindado tiempo y recursos para poder realizar este trabajo.

Agradezco al Fís. Gustavo Soto de la Vega su amabilidad al permitirme usar tiempo y recursos del departamento de Física para terminar esta tesis.

Agradezco al Fís. Enrique Sánchez y Aguilera su continuo apoyo y entusiasmo.

Agradezco a la Srta. Diana Mendoza Cruz su amabilidad y paciencia en la realización de este trabajo.

Agradezco a la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA unidad
Azcapotzalco el haberme brindado tiempo y recursos para poder
realizar este trabajo.

DEDICATORIAS.

A mi Madre
MARIA ANTONIETA DE LA PARRA VDA. DE MOLNAR
pues si mamá ... lo hicimos de nuevo.

A mi esposa
MARIA ELENA RIZO DE MOLNAR
por alentarme y ayudarme a lograr lo que me habia propuesto.

A mi hijo
RENE
por haberme regalado las horas que debían ser usadas en jugar
con él.
Bueno hijo aquí está la mia ... ¿cuando estará la tuya?

RESUMEN

En el presente trabajo se describe el diseño y la construcción de un viscosímetro usando la técnica de la bola rodante.

En el primer capítulo se propone una descripción breve de los viscosímetros mas usados: capilar, cilindros giratorios y desde luego el de esfera rodante, proponiendo en cada caso, la expresión que experimentalmente será útil para obtener la viscosidad.

En el segundo capítulo se estudia un modelo teórico que trata de ofrecer una interpretación de la constante de calibración del aparato, en términos de los parámetros que intervienen, tanto en el diseño del equipo, como en la realización del experimento.

El capítulo medular es el tercero y se procede a dar una descripción detallada del equipo electrónico que forma al viscosímetro. De acuerdo con las necesidades experimentales se desarrollan dos prototipos para condiciones experimentales diferentes, proponiéndose con esto que la instrumentación sea versátil en un amplio intervalo de condiciones experimentales de presión y temperatura; es importante hacer notar que el diseño electrónico es original.

En el capítulo cuatro se describe como se ha realizado la calibración del aparato empleando n-tetradecano y aceites estándar y se reportan las mediciones de la viscosidad de sustancias puras como: n-hexadecano, sulfolano y aceite estándar S10. Además se realiza la medición de la viscosidad de dos mezclas: sulfolano + monoetanolamina y sulfolano + dietanolamina a 303.15, 323.15 y 373.15 K y a cinco composiciones diferentes en el intervalo de 0.1 a 0.9 de fracción molar

Es conveniente hacer notar que los valores obtenidos para la viscosidad de las mezclas no están reportados en la literatura y fueron realizadas por interés del Instituto Mexicano del Petroleo. Para el caso de las sustancias puras los datos obtenidos completan a los ya existentes en la literatura.

CAPÍTULO I

VISCOSIMETRÍA

I.1 Introducción.

Antes del famoso experimento de caída libre que efectuara Galileo, se pensaba que una pluma caía más lento que una bola de metal, ya que la primera no pesaba tanto como la segunda. Es claro que esta forma de pensar no toma en cuenta el efecto que el aire tiene sobre la pluma y sobre la bola; ahora se sabe que la pluma cae más lentamente porque en comparación con sus pesos relativos, la resistencia que opone el aire al movimiento de la pluma es mucho mayor que para la bola de metal.

La existencia de este fenómeno fue evidenciada en el experimento del tubo de Newton en el cual se coloca una pieza de plomo y una pluma y se efectúa vacío en el interior del cilindro; al invertir éste, plomo y pluma caen al mismo tiempo. El hecho es que el aire resulta ser el culpable de que los objetos no caigan al mismo tiempo, pero... ya que estamos rodeados de aire (¡o algo parecido!), es conveniente estudiar que pasa con un objeto inmerso en él, o en forma más general en un fluido.

Cuando se estudian fluidos en movimiento se les suele separar en fluidos ideales y reales. Es claro que un fluido ideal es una abstracción. De todos los fluidos (líquidos y gases) reales, en mayor o menor grado, se tiene presente una propiedad llamada viscosidad o rozamiento interno; este efecto es el responsable del frenamiento de los cuerpos que se mueven en el fluido; la viscosidad se manifiesta en el hecho de que cuando hay movimiento en un fluido, después de desaparecer las causas que lo motivaron, éste se reduce gradualmente y desaparece. Esto sugiere que hay una disipación de energía.

Al ser más compleja la actividad productiva del ser humano, los fenómenos de transporte, en particular la transferencia de masa, cobran importancia, tanto en la ciencia como en la tecnología. Cuando hay que mover un líquido a través de una tubería o bien cuando un objeto se mueve en el interior de un líquido, los efectos de la viscosidad se hacen presentes e importantes.

El ingenio humano ha desarrollado la viscosimetría, la cual se encuentra formada de muchas ideas que permiten, usando la técnica apropiada, desarrollar una serie de aparatos para medir esta propiedad de los fluidos: la viscosidad.

El objeto de este trabajo es el análisis, diseño, construcción y evaluación de uno de estos aparatos, el cual es llamado VISCOSÍMETRO DE ESFERA RODANTE.

I.2 Tipos de viscosímetros.

En esta sección se hace una descripción somera de algunos viscosímetros utilizados para el estudio de líquidos, sus principios de funcionamiento, así como algunas de las ventajas y desventajas que éstos tienen.

Pipeta capilar.
Cilindros giratorios.
Esfera rodante.

I.2.1-Pipeta Capilar. Este tipo de viscosímetro es muy utilizado por su fácil manejo, el intervalo de medición de viscosidades va de 10^{-2} a 10^3 poises (Segarra, 1989). El proceso para obtener la viscosidad consiste en medir el gasto del flujo del líquido estudiado a través de un tubo capilar de longitud y diámetro conocidos y cuya relación longitud-diámetro sea mayor o igual a 14 (Cheng, 1981).

Para un flujo laminar y estacionario es posible utilizar la expresión analítica de la ley de Poiseuille (ver Fig.1.1) como una expresión aproximada, ya que el tubo capilar no es tan largo como para permitir que se forme el perfil parabólico en el cual la ec. 1.1 es correcta (Holman, 1984).

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 \eta l} , \quad (1.1)$$

donde

Q - es el flujo volumétrico del líquido [$L^3 T^{-1}$].

r - es el radio del tubo [L].

Δp - es la diferencia de presión [$ML^{-1}T^{-2}$]

l - es la longitud de recorrido del líquido [L]

η - es la viscosidad [$ML^{-1}T^{-1}$].

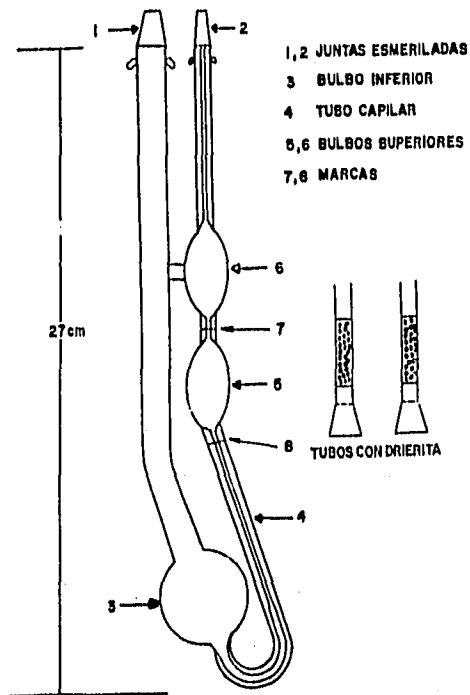


Fig.I.1 Vista general de un viscosímetro capilar

A continuación se describe el aparato y su funcionamiento.

- El líquido a estudiar se llena por la junta (1) y se deposita en el bulbo inferior (3) ver Fig 1.1. se efectúa vacío en el brazo derecho (2) y con esto se obliga al líquido a subir a los bulbos superiores (5,6).

- Realizado esto se permite que el aire entre por la junta (2) y el líquido se escurra por el tubo capilar, cuando el nivel del líquido que fluye pasa por la marca superior (7) se inicia la medición del tiempo de escurrimiento y cuando el mismo nivel pasa por la marca inferior (8) se finaliza la medición del tiempo.

En estos aparatos es necesario realizar la calibración, si es que el fabricante no la ha proporcionado empleando un líquido de viscosidad conocida para obtener el factor de calibración del aparato, para posteriormente realizar determinaciones de viscosidad para cualquier

otro líquido dentro del intervalo de medición del viscosímetro, la calibración se refiere comúnmente a algún líquido patrón el cual se elige según el intervalo de temperatura en el que se va a trabajar. Los tipos más comunes de viscosímetros de pipeta capilar son: Oswald-Fenske, Ubbelohde y Cannon.

En estos aparatos la viscosidad se obtiene por comparación con una viscosidad conocida y es posible utilizar la relación :

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\rho_1 t_1}{\rho_2 t_2} \quad (1.2)$$

donde ρ_1 y t_1 son la densidad y el tiempo de escurrimiento para el líquido muestra y ρ_2 y t_2 son la densidad y el tiempo de escurrimiento para el líquido de referencia esto es

$$\eta = K \rho t \quad (1.3)$$

donde el valor de la constante K, llamada la constante de calibración del aparato, es proporcionada por el fabricante del mismo o se puede obtener experimentalmente y ρ es la densidad del líquido .

Calibración.

- Se emplea un líquido de densidad y viscosidad conocidas a determinada temperatura, se llena el aparato por la junta (1) y se introduce el viscosímetro en el baño térmico el cual se ajusta a la temperatura a la cual se conocen la densidad y la viscosidad del líquido de calibración; después de algún tiempo se obtiene el equilibrio térmico.

- Se succiona el líquido hasta el bulbo superior (6) o un poco más arriba (ver Fig. I.1.) y se libera el líquido permitiendo que escurra.

- Se toma el tiempo de escurrimiento cuando el líquido pasa por la marca superior (7) y se detiene la medición cuando el nivel llega a la marca inferior (8). Este procedimiento se repite aproximadamente diez veces para poder calcular un tiempo promedio de escurrimiento.

- Como se conocen ρ y η , dadas por el proveedor del líquido de calibración y se ha medido el tiempo promedio de escurrimiento se puede obtener la constante del aparato despejándola de la ec. 1.3, esto es

$$K = \frac{\eta}{\rho t} \quad (1.4)$$

Es muy común encontrar en mecánica de fluidos el cociente η/ρ al cual se le llama viscosidad cinemática y se le designa con la letra ν , así que la constante de calibración se puede escribir también en función de esta cantidad,

$$K = \frac{\nu}{t} \quad (1.5)$$

Existe un fabricante importante de este tipo de aparatos llamado Cannon y tiene en existencia una gran variedad de diámetros de tubos capilares y por lo menos dos capacidades (volúmenes de 1 y 10 ml) (Segarra, 1989).

Ventajas.

Este aparato es de fácil manejo y no requiere de equipo sofisticado y caro, tiene un amplio intervalo de medición de viscosidad, para algunos de estos aparatos el fabricante ofrece la constante del aparato, lo cual facilita su uso, el intervalo de temperatura es de 15 a aproximadamente 100 grados centígrados.

Desventajas.

Para líquidos muy viscosos los tiempos de escurrimiento pueden ser muy grandes, otra desventaja que este aparato presenta es la de ser un sistema abierto a la atmósfera y la sustancia bajo estudio se pierde por evaporación.

I.2.2 Cilindro Giratorio. Este aparato representa una variedad de los viscosímetros del tipo rotativos. El intervalo de medición es de 10^5 a 10^{11} poises (Segarra, 1989). En ellos el cilindro interno se suspende de una barra de torsión, como un alambre de acero o un hilo elástico de constante de torsión conocida y se coloca dentro de un segundo cilindro el cual puede girar, llenándose con el líquido a estudiar el espacio entre los cilindros (Rabinovich, 1980).

Al rotar el cilindro externo se produce un arrastre del cilindro interno, el cual se mide por algún medio mecánico, una aguja indicando el ángulo de deflexión en un transportador o en forma óptica, fijando un pequeño espejo a la fibra que sostiene al cilindro interno e iluminando el espejo para medir la deflexión del rayo de luz, o por medios electromagnéticos.

Cuando se alcanza el estado estacionario, mediante el equilibrio de la torca de arrastre y de la barra de torsión se tiene un ángulo de deflexión ϕ que ha descrito el cilindro, el cual da el momento de rotación que el líquido aplica al cilindro interior (ver Figura I.2).

$$\tau = k\phi \quad (1.6)$$

donde k es la constante de torsión de la fibra (o alambre) la cual hay que obtener experimentalmente. Un método excelente es poner a oscilar el cilindro en el aire y medir el período de oscilación y conociendo el momento de inercia del cilindro, calcular la constante.

MEDICIÓN DEL MOMENTO
DE TORSIÓN, τ

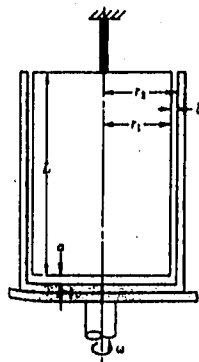


Fig.I.2 Esquema de un viscosímetro de cilindro giratorio

Una fórmula simplificada para expresar la viscosidad en estos aparatos es:

$$\eta = \frac{K \varphi}{L \omega} \quad (1.7)$$

donde K es una constante que depende del aparato y que incluye efectos difíciles de modelar matemáticamente. Por ejemplo, los efectos del borde del cilindro, el hecho de que los cilindros sean finitos, etc.

φ el ángulo de deflexión.

L la altura efectiva del líquido entre los cilindros.

ω la velocidad angular del cilindro externo.

En los viscosímetros comerciales se encuentra que $b = R_2 - R_1$ es la separación entre los cilindros, y es generalmente muy chica ($b \ll R_1$) y tiene la conveniencia de usar una cantidad pequeña del líquido a estudiar sin embargo éste no es el motivo principal.

Se sabe que entre dos placas paralelas en movimiento relativo y existiendo un líquido entre ellas, éste tiende a formar un perfil de velocidades lineal (ver Figura 1.3).



Fig.1.3 Perfil de velocidades lineal.

Para este caso, es sabido que (Holman,1984) η queda expresada como

$$\eta = \left(\frac{R_2 - R_1}{2\pi R_1^2 R_2 L} \right) k \frac{\varphi}{\omega} \quad (1.8)$$

Si además se considera el efecto de las torcas de la base y de la pared (Segarra,1989), se tiene que

$$\eta = \frac{k}{2\pi R_1^2 \left[\frac{R_2 L}{R_2 - R_1} + \frac{R_1^2}{4h} \right]} \cdot \frac{\varphi}{\omega} \quad (1.9)$$

Calibración.

Se llena el viscosímetro con un líquido de viscosidad conocida, por ejemplo aceites de silicon cuidando que no queden atrapadas burbujas en la base y las paredes. Se sumerge el viscosímetro en el baño térmico y se ajusta la temperatura a la cual se conoce la viscosidad del líquido de calibración.

Ya que se conoce la viscosidad del líquido patrón, y se puede obtener la torca τ y la velocidad angular ω experimentalmente, se puede

reducir la ec. 1.9 a la forma

$$\eta = C \frac{\tau}{\omega} , \quad (1.10)$$

y despejar de esta ecuación a C la constante de calibración del aparato.

Ventajas.

Es un aparato útil para un intervalo de viscosidades grande 10^5 a 10^{11} poises.

No requiere de instrumentación muy sofisticada.

Desventajas.

Es necesario realizar una buena estimación de la torca externa aplicada al cilindro interno.

Hay que cuidar que en el llenado del aparato no queden burbujas, principalmente con líquidos muy viscosos.

Este aparato no está cerrado a la atmósfera y tiene el riesgo de perder la sustancia a estudiar por evaporación.

El ajuste mecánico del arreglo debe ser cuidadoso.

I.2.3. Esfera rodante. En este trabajo se estudian algunos aspectos importantes del viscosímetro de bola rodante como son:

Conocer los principios que permiten interpretar su funcionamiento.

La instrumentación necesaria para construir el viscosímetro.

Algunos resultados obtenidos con el aparato.

Este tipo de viscosímetro tiene la gran ventaja de permitir medir la viscosidad de líquidos volátiles a altas temperaturas y presiones; de los viscosímetros anteriores éste es el único que tiene esta característica. Ya que se trata de un sistema cerrado, la sustancia o componentes de la mezcla no se pierden por evaporación. El intervalo de medición de viscosidad es de 10^{-1} a 10^5 poises (Segarra, 1989).

DESCRIPCIÓN . Para construir este aparato se requiere un tubo de vidrio o acero inoxidable de diámetro interno D y una esfera de fierro (o de algún metal, como aluminio, latón, cobre o acero inoxidable) de diámetro d (ver Fig. I.4).

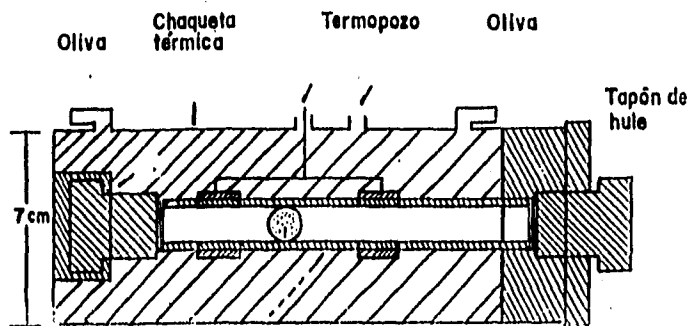


Fig. I.4 Vista esquemática del viscosímetro de bola rodante.

FUNCIONAMIENTO. El tubo se sella por uno de sus extremos y se introduce la esfera, se llena del líquido a estudiar y se tapa el otro extremo.

Se propone un ángulo de inclinación para el tubo y se mide el tiempo que la esfera tarda en recorrer una distancia prefijada cuando se ha alcanzado la velocidad terminal. Esta distancia se podrá proponer dependiendo de la densidad del líquido y la temperatura de trabajo.

Para condiciones dadas de presión y temperatura (P-T) del sistema a estudiar se obtendrá mas adelante una relación para la viscosidad del tipo

$$\eta = C t \quad (1.11)$$

con C una constante en la que participan entre otras la densidad del líquido y de la esfera, diámetros del tubo y de la esfera, propiedades dinámicas del sistema y algunos otros factores que se describen más adelante. A esta constante se le llama la constante del aparato y t es el tiempo que la esfera tarda en recorrer una distancia prefijada, la cual también se encuentra incluida en C. Es claro que el éxito del experimento radica en una buena, muy buena medición del tiempo, ya que una vez encontrada la constante C, usando como referencia la viscosidad de un líquido conocido (dadas desde luego las condiciones P-T para el líquido de referencia) sólo hay que multiplicar a la constante C por t para obtener la viscosidad.

Para la medición del tiempo se pueden usar por lo menos cuatro métodos de detección: MÉTODO VISUAL, MÉTODO ÓPTICO (OPTOELECTRONICO), MÉTODO ACÚSTICO Y MÉTODO MAGNÉTICO. Es conveniente comentar en forma breve los métodos mencionados.

MÉTODO VISUAL. Este método consiste en detectar visualmente el paso de la esfera por las marcas previamente establecidas, que definen la distancia a recorrer, y medir el tiempo de recorrido de la esfera la precisión en éstos aparatos es de ± 3 milímetros (Tily 1983).

En este método se tienen que cuidar los siguientes puntos restrictivos.

- El líquido tiene que ser transparente.
- La temperatura no debe diferir mucho de la del ambiente.
- La presión debe estar en la vecindad de la atmosférica.

MÉTODO ÓPTICO. Este método detecta el paso de la esfera a través de un líquido que se encuentra en un baño a alta temperatura y no es posible ver a la esfera a simple vista, porque la chaqueta del baño lo impide. En este caso, se emite un rayo de luz por una fibra óptica y se detecta por otra fibra la luz que pasó por el líquido; esta fibra se encuentra enfrente de la primera y ambas están colocadas en forma perpendicular al eje del tubo.

Electrónicamente se detecta el cruce de la esfera y esta señal se procesa para activar y desactivar un reloj electrónico, la precisión en la determinación de la distancia en estos aparatos es de ± 1 milímetro. Al usar este método se tienen que cuidar los siguientes puntos.

- El líquido tiene que ser transparente.
- El contenedor (tubo) del líquido debe soportar la presión de trabajo.
- La temperatura debe ser tal que no dañe las fibras ópticas.

MÉTODO ACÚSTICO. Este método es muy útil en el caso de líquidos poco viscosos y opacos consistiendo en poner a lo largo del tubo dos topes o muescas en los que la esfera pega mientras está recorriendo el tubo y estas señales son captadas por un micrófono de capacitancia, el cual traduce los impulsos sonoros en eléctricos y éstos se procesan para activar un cronómetro electrónico y obtener el tiempo de recorrido de la esfera, la precisión de éste aparato es de ± 1 milímetro.

En este método experimental destacan los siguientes puntos.

- Hay que tener un extremo del tubo en contacto con el micrófono
- Se tienen que poner muescas o topes a las distancias de inicio y final del recorrido de la esfera para que ésta choque con ellas y emita los pulsos de sonido necesarios para inicio y final del conteo de tiempo.
- Se requiere un laboratorio silencioso para que no se tengan disparos producidos por ruidos externos, ya que el circuito de captación del pulso de disparo-paro requiere de gran amplificación.
- Al golpear la esfera con la muesca, se tiene una pequeña perturbación en el movimiento de la esfera existiendo un compromiso en el diseño de sensibilidad del micrófono y perturbación del movimiento.
- Se puede usar cualquier tipo de esfera (vidrio, latón, fierro, cobre etc.) y cualquier contenedor como vidrio o acero inoxidable.

MÉTODO MAGNÉTICO. Este método de detección es el más general de todos y por esto requiere de una mayor cantidad de instrumentos y éstos son más complicados que los usados en los tres casos anteriores.

Esta técnica requiere de dos sensores electromagnéticos que detecten el paso de la esfera de acero en el tubo, ya sea éste de vidrio o de acero inoxidable, y procesar esta señal para activar un cronómetro electrónico que da la medición del tiempo en que la esfera recorre una distancia prefijada, la precisión de éste aparato es de ± 0.5 milímetro.

Para realizar estas mediciones no importa la presión a la que se encuentre el líquido a estudiar ya que los sensores electromagnéticos se encuentran fuera del tubo que contiene la substancia en estudio.

En este método se tienen que considerar los siguientes puntos:

- Los sensores se tienen que aislar del baño térmico.
- La esfera tiene que ser de acero y de tamaño detectable para los sensores.

I.3 Resumen.

- a) Se han comentado en forma breve tres viscosímetros que son usados frecuentemente en los laboratorios de investigación (más que en la industria)
- b) Se han mencionado sus características principales.
- c) En cada caso se han propuesto las relaciones que permiten calcular la viscosidad
- d) Se ha descrito el método de calibración, las ventajas y desventajas que cada aparato presenta, y la forma en que éstos funcionan.
- e) En el caso del viscosímetro de esfera rodante se mencionan cuatro métodos de detección y sus principios de funcionamiento.

I.4 Conclusiones.

El viscosímetro de bola rodante es, de los tres aparatos comentados, el único cerrado a la atmósfera.

De todos los viscosímetros estudiados el de bola rodante es el que ofrece más versatilidad de trabajo.

El intervalo de medición del viscosímetro de bola rodante es amplio (10^{-1} a 10^5 poises), comparado por ejemplo con el viscosímetro de tubo capilar, Cheng en 1981 encontró una diferencia del 1 % entre las mediciones de estos dos aparatos con aceites minerales pero el de bola rodante tiene la ventaja de ser cerrado y soportar altas presiones.

CAPÍTULO II

MODELO TEÓRICO

II.1 Introducción.

En este capítulo se ofrece un modelo teórico que trata de explicar el comportamiento del viscosímetro de bola rodante y comentar los modelos propuestos por algunos investigadores, en particular el de Hubbard y Brown realizado en 1943.

Como un antecedente, el viscosímetro de bola rodante fue sugerido por Flowers en 1914 como un aparato útil para determinar la viscosidad de líquidos en sistemas cerrados. Posteriormente Hersey en 1916 estudió este aparato usando análisis dimensional obteniendo una relación lineal de la viscosidad con el tiempo de movimiento de la bola.

En 1933 Sage propuso una expresión lineal del tipo

$$\eta = K (\rho_s - \rho) \Delta t, \quad 2.1$$

para la viscosidad en la cual:

η es la viscosidad.

ρ_s es la densidad de la esfera.

ρ es la densidad del líquido estudiado.

Δt es el tiempo en el que la bola recorre una distancia establecida con anterioridad.

K es una constante llamada de calibración del aparato.

Usando esta relación se calculó la viscosidad de algunos líquidos previa calibración y se obtuvieron viscosidades muy similares a las ya conocidas lo cual alentó a algunos investigadores a estudiar con más cuidado la teoría de este aparato.

Se tomó como referencia el trabajo de Hubbard y Brown ya que este trabajo es el más completo desde el punto de vista experimental aunque el modelo teórico no es muy convincente.

II.2 Modelo.

Se propone el siguiente problema: sea una esfera lisa de radio r (diámetro d) y densidad ρ_s la cual rueda a lo largo de un plano inclinado que forma un ángulo ϕ con la horizontal y este sistema se encuentra sumergido en un líquido de densidad ρ y viscosidad η , lo que se pretende es encontrar una expresión para la viscosidad del líquido.

En el siguiente diagrama se describen las fuerzas que actúan sobre la esfera, (Fig.II.1)

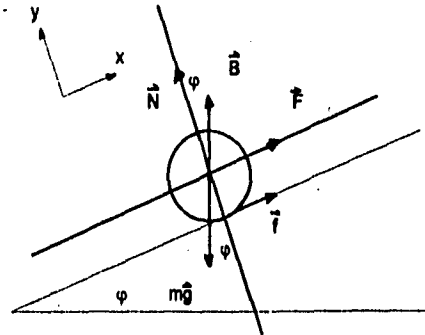


Fig. II.1 DIAGRAMA DE FUERZAS SOBRE LA ESFERA

donde:

B es la fuerza de flotación.

N es la fuerza normal.

f es la fuerza de fricción.

F es la fuerza viscosa.

mg es el peso de la esfera.

Se supondrá que la esfera ya ha alcanzado el estado estacionario en su movimiento, la velocidad con que se mueve es constante y se le llama velocidad terminal v.

En la dirección vertical (y) respecto al plano inclinado se obtiene la relación entre las fuerzas gravitacional, normal y de flotación:

$$\Sigma F_y = 0,$$

$$N + B \cos \phi - mg \cos \phi = 0. \quad 2.2$$

En la dirección paralela respecto al plano inclinado (x) se obtiene la relación entre las fuerzas gravitacional, flotación, fricción y viscosa:

$$\Sigma F_x = 0,$$

$$mg \sin \phi - B \sin \phi - F - f = 0, \quad 2.3$$

despejando a la fuerza de fricción f se tiene que,

$$f = (mg - B)\text{sen } \varphi - F . \quad 2.4$$

Calculando ahora los momentos de rotación con respecto al centro de masa se tiene que,

$$\begin{aligned} \Sigma \tau &= 0, \\ fr - M &= 0, \end{aligned} \quad 2.5$$

con r el radio de la esfera y M el momento viscoso que el líquido aplica sobre la esfera, el cual se opone a la rotación. Poniendo la ecuación (2.4) en la (2.5) se tiene que

$$F + M/r = (mg - B)\text{sen } \varphi, \quad 2.6$$

recordando que $m = \rho_0 V$, $B = \rho g V$ y $V = \frac{4}{3} \pi r^3$ la expresión de la fuerza viscosa toma la forma

$$F + M/r = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_0 - \rho) g \text{sen } \varphi. \quad 2.7$$

Para establecer la dependencia de la viscosidad con los demás parámetros del problema se propondrá una forma para la fuerza viscosa del tipo Stokes, i.e: que la fuerza sea proporcional a la velocidad de la esfera, esto es

$$F = K_1 \eta r v, \quad 2.8$$

con: v la velocidad terminal.

r el radio de la esfera.

η la viscosidad del líquido.

K_1 una constante que depende del aparato, para una esfera que cae en un líquido sin fronteras su valor es 6π .

y para el momento viscoso producido por el líquido sobre la esfera se propone (Sommerfeld, 1950 ; Landau y Lifshitz, 1959) que

$$M = K_2 \eta r^3 \omega, \quad 2.9$$

con ω la velocidad angular de la esfera, la cual se puede expresar en términos de v la velocidad de traslación como $v = r\omega$; la ecuación 2.7 se puede escribir como

$$K_1 \eta r v + K_2 \eta r v = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_0 - \rho) g \sin \varphi, \quad 2.10$$

esta expresión tiene explícita la dependencia de la velocidad terminal y la viscosidad; si se conoce la viscosidad se puede conocer la velocidad terminal y al revés.

Ya que se está proponiendo encontrar la viscosidad se puede medir la velocidad terminal la cual se ha supuesto constante; esto sugiere que $v = \Delta x / \Delta t$, de tal forma que la viscosidad se puede escribir como

$$\eta = \left(\frac{4\pi r^2 g \sin \varphi}{3(K_1 + K_2) \Delta x} \right) (\rho_0 - \rho) \Delta t. \quad 2.11$$

Como puede verse el término entre paréntesis cuadrados es la "constante del aparato" y K_1 y K_2 son constantes que dependen de varios parámetros adimensionales característicos del problema hidrodinámico, como son el cociente de diámetros del tubo y la esfera y el número de Reynolds. Esta expresión puede ser usada experimentalmente y, si se mantiene la misma esfera y el mismo ángulo de inclinación, la viscosidad se puede escribir como

$$\eta = C (\rho_0 - \rho) \Delta t. \quad 2.12$$

Es importante cuidar que al usar la aproximación de Stokes para conocer a C se utilice un líquido de densidad y viscosidad conocidas en el cual la esfera tarde un tiempo Δt relativamente grande en recorrer la distancia prefijada Δx , esto es, que su velocidad terminal sea muy baja, del orden de 10^{-2} m/s o menor, para que la aproximación en las ecuaciones 2.8 y 2.9 puedan ser razonables.

Es importante también el mencionar que la fuerza de Stokes es aplicable a los movimientos en los que el número de Reynolds es pequeño, respecto a uno.

En el trabajo de Hubbard y Brown se calcularon los números de Reynolds para distintas condiciones experimentales y se encontró que este número toma los valores de 0.1 a 35, que excede el límite teórico.

II.3 Otro Modelo

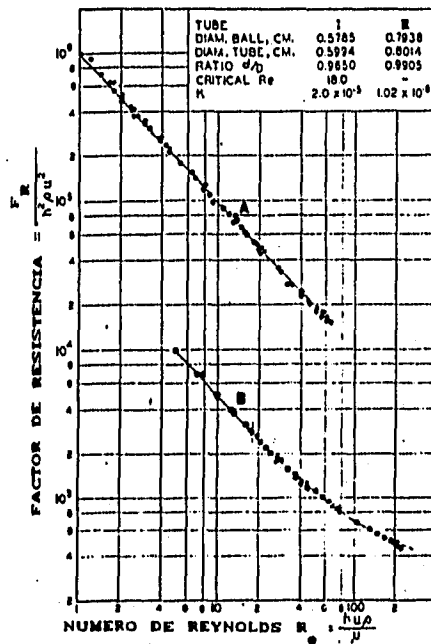
Usando los resultados de Bridgman(1922), los cuales se encuentran en su libro Dimensional Analysis, Hubbard y Brown proponen dos parámetros adimensionales, uno es el número de Reynolds y el otro es la cantidad llamada factor de resistencia $F / h^2 \rho v^2$ los cuales son elegidos entre otros parámetros adimensionales posibles ya que estos se

pueden obtener via experimental (White,1983).

Graficándose en papel logarítmico las dos cantidades mencionadas, se usó el número de Reynolds como abscisa y el factor de resistencia como ordenada.

Hubbard y Brown realizaron veintiun gráficas y todas resultaron similares a las muestras representativas de la Figura II.2. En la región de flujo laminar los datos experimentales caen muy bien a lo largo de una recta de pendiente menos uno; la región turbulenta está representada por la concavidad en la parte baja de las curvas.

Dentro de los límites del experimento todas las curvas tienen la misma forma; la localización de las curvas en el sistema de coordenadas depende sólo de la razón d/D, estas son las ordenadas de las gráficas propuestas.



Grafica II.1 Log. del factor de resistencia vs. log. del número de Reynolds.

Para flujo laminar la ecuación de las líneas rectas en las gráficas de datos pueden ser expresadas en general como

$$\eta = \left(\frac{\pi d^4 g \operatorname{sen} \varphi}{6 b (D - d)^2 \Delta x} \right) (\rho_0 - \rho) \Delta t. \quad 2.17$$

Si al término entre paréntesis cuadrados se le llama la constante del aparato, la ecuación (2.16) se puede escribir como

$$\eta = C (\rho_0 - \rho) \Delta t. \quad 2.18$$

Si se conoce la viscosidad y la densidad de algun líquido a alguna temperatura se puede calcular la constante del aparato, la cual será útil; si no se cambia la razón d/D , no se mueve el ángulo de inclinación ó no se cambia apreciablemente el número de Reynolds.

Lewis (1953) propuso una forma matemática de calcular la constante de calibración, que está relacionada con los diámetros del tubo y la esfera y obtiene que

$$K = \frac{7}{2\pi^2 I} \left(\frac{D - d}{D} \right)^{5/2}, \quad 2.19$$

con $I = \sqrt{2} = \sqrt{\frac{1}{5}} \left(\sqrt{10} + 2 \right) = 0.398$, y ambas forman la

constante de calibración del aparato C , la cual depende además de otros parámetros hidráulicos; como información se presenta la expresión teórica de la viscosidad

$$\eta = \frac{5\pi}{42} K \frac{d^2 \rho g \operatorname{sen} \varphi}{\Delta x} \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \frac{D + d}{d} \Delta t, \quad 2.20$$

la cual se reduce por conveniencia experimental a la forma

$$\eta = C (\rho_0 - \rho) \Delta t \quad 2.21$$

la cual tiene una estructura igual a la ecuación obtenida en el primer modelo.

Es posible que se tengan cambios en la densidad de la esfera ρ_0 debidos al aumento de la temperatura, pero estos no son de importancia ya que si se tienen variaciones en la temperatura de por ejemplo 80 grados centígrados,

$$\Delta T = 80^\circ$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T, \quad 2.22$$

y como β , el coeficiente de expansión volumétrica para el acero es de $3.6 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ el aumento de volumen por unidad de volumen será de

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 2.9 \times 10^{-3} = 0.003 ;$$

esto es, la esfera aumenta su volumen en aproximadamente tres milésimas de su volumen original a temperatura ambiente, lo cual representa una disminución de la densidad de la esfera de

$$\rho'_0 = 0.997\rho_0, \quad 2.23$$

con ρ'_0 la densidad de la esfera a 80 grados.

ρ_0 la densidad de la esfera a temperatura ambiente.

Esto es un cambio de sólo el 0.3% de la densidad inicial y que está dentro del error experimental.

II.4 Conclusiones.

Se puede ver que el modelo depende en forma importante del tipo de fuerza viscosa que se proponga y que los resultados experimentales sugieren que el movimiento se desarrolla en el régimen laminar, pero con números de Reynolds no mayores de 35.

Es también una conclusión importante que hay que realizar el experimento para evaluar la constante b ; en el mejor de los casos, la constante del aparato C. Al ser determinada experimentalmente, se puede usar el aparato para un amplio margen de temperaturas sin más problemas que el cambiar éstas, pues el líquido bajo estudio está contenido en el tubo sellado.

CAPÍTULO III

INSTRUMENTACIÓN

III.1 Introducción.

En este capítulo se describen los principios físicos en que está basado el aparato diseñado y se hace una descripción detallada desde el punto de vista de la instrumentación electrónica.

III.2 PRINCIPIOS EN LOS QUE EL APARATO ESTA BASADO.

El principio de operación del aparato se basa en el cambio de la inductancia en una bobina toroidal usada como sensor. Esta bobina, que se encuentra rodeando al tubo interior del viscosímetro cambia su núcleo en el momento en que pasa la esfera metálica por el interior del tubo.

Ya que la viscosidad de un líquido (usando este viscosímetro) se obtiene midiendo el tiempo que la esfera tarda en recorrer una distancia prefijada, se ha propuesto el diseño de un aparato capaz de detectar dicho paso en un tubo de vidrio o de acero inoxidable.

Para detectar el paso de la esfera en el tubo de vidrio (Prototipo I), se han construido bobinas como sensores. Las bobinas son recorridas por una corriente alterna, éstas tienen un núcleo de aire (formalmente el núcleo en ellas es de vidrio y el líquido a estudiar) y cuando pasa la esfera por éstas, el núcleo de la bobina cambia y desde luego, la magnitud del voltaje ya que ha cambiado la permeabilidad del núcleo (de líquido a fierro y nuevamente a líquido). Es este cambio de amplitud de voltaje el que se usa para detectar el paso de la esfera.

Para detectar el paso de la esfera en el tubo de acero (Prototipo II) se ha usado una propiedad bien conocida del electromagnetismo llamada inducción, la cual puede ser descrita por medio del enunciado siguiente: Si por una bobina circula una corriente eléctrica entonces en otra bobina cercana se induce una fuerza electromotriz (fem) y produce en ella una corriente eléctrica.

Esta fem inducida en la segunda bobina depende de:

- a) La corriente que circula en la primera bobina.
- b) La forma geométrica de éstas.
- c) La posición relativa entre estas bobinas.
- d) Las propiedades magnéticas de la sustancia que se encuentre entre ellas (permeabilidad magnética).

Este principio se usa para detectar el paso de la esfera en el tubo de acero produciendo un pulso inducido en la segunda bobina (secundario) el cual permite, procesando esta señal, accionar el reloj electrónico.

III.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.

El PROTOTIPO I fue diseñado y construido para presión atmosférica mientras que el PROTOTIPO II fue diseñado y construido para altas temperaturas y presiones.

Esto no pretende sugerir que el PROTOTIPO II no puede usarse a presión atmosférica, pero fue el PROTOTIPO I el que inicialmente se diseñó y construyó para dicha presión y con base en estas experiencias fue que se diseñó el PROTOTIPO II, el cual puede detectar el paso de una esfera de fierro en un tubo de acero inoxidable y evidentemente en vidrio como en el caso del PROTOTIPO I; pero este último no puede detectar el paso de una esfera en el tubo de acero.

III.4 Prototipo I

Las ideas generales del diseño son:

- a) Detectar el paso de la esfera en forma limpia (sin interferencia o ruido).
- b) Ofrecer lecturas de tiempo reproducibles a centésimas de segundo.
- c) Evitar interferencia entre un detector y otro.

Las bobinas están formadas por 750 vueltas de alambre de calibre 34 distribuidas en un toroide el cual está conectado a un circuito oscilador en puente, (llamado puente de Wien) el cual genera una señal senoidal de aproximadamente 15 kHz; cuando la esfera metálica pasa por la bobina, la amplitud de la oscilación es máxima y se amortigua rápidamente cuando la esfera sale de la bobina. Este cambio es detectado por un circuito especializado y el voltaje de salida es reforzado para que pueda controlar el funcionamiento del reloj electrónico.

El siguiente diagrama de bloques ilustra mejor estas ideas
Fig. III.1.

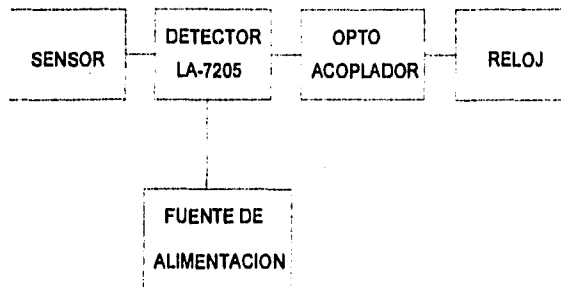


Fig. III.1 DIAGRAMA OPERATIVO DEL PROTOTIPO I

Después de algunas pruebas se eligió como circuito principal el circuito integrado LA 7205 de SONY. La elección fue tomada bajo los siguientes criterios (ver Fig.III.1):

- a) Es un circuito altamente especializado en esta función (detección de materiales ferromagnéticos).
- b) Proporciona una fácil sintonía y gran estabilidad en el tiempo.
- c) Es de muy bajo costo y fácil disponibilidad.
- d) Tiene un menor número de componentes periféricos que su competidor inmediato (BA 6360).

El circuito completo es el siguiente:

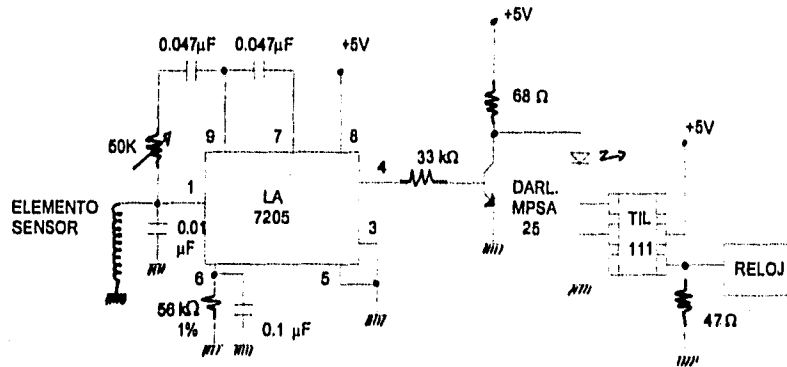


Fig. III.2 CIRCUITO ELÉCTRICO DEL PROTOTIPO I

Como funciona el circuito integrado LA 7205.

Este circuito consta de tres etapas (ver Fig. III.3):

- a) Circuito oscilador.
- b) Control automático de ganancia.
- c) Unidad lógica de procesamiento.

Explicación:

- a) Circuito oscilador:

Este circuito produce una oscilación de aproximadamente 15 kHz combinando resistencia, inductancia y capacitancia en un circuito tipo puente con un amplificador operacional. Se puede ajustar con un "trimpot" de 50 kΩ para que la amplitud de la oscilación sea máxima cuando la esfera esté en el interior de la bobina y para que al salir la esfera, la amplitud de la oscilación se reduzca (pero no se haga cero).

- b) Control automático de ganancia AGC.

El circuito de AGC detecta el cambio de amplitud de la oscilación, producida por la presencia de la esfera

metálica, de tal forma que cuando aumenta la amplitud de la señal de entrada, la respuesta del AGC es disminuir la señal de salida, la cual se interpreta como un nivel lógico bajo y si disminuye la amplitud de la señal de entrada, la respuesta del AGC es aumentar la señal de la salida, la cual se interpreta como un nivel lógico alto.

c) Unidad lógica de procesamiento.

Finalmente esta etapa, limpia de ruido y establece estados lógicos (uno o cero), los cuales se toman como salida del circuito hacia la etapa de control del reloj usando circuitos TTL.

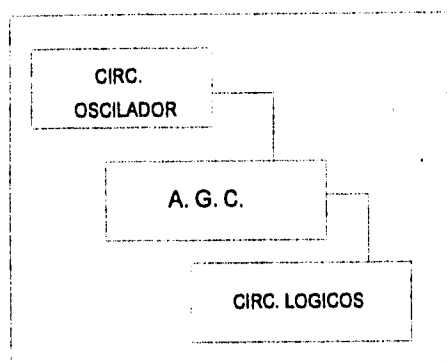


Fig. III.3 DIAGRAMA OPERATIVO DEL CIRCUITO LA-7205

La salida de los circuitos lógicos es "cero" o "uno" dependiendo de que la esfera esté o no dentro de la bobina, de cualquier manera esta señal debe de procesarse para ser útil, esto se hace con un transistor del tipo "Darlington", conectando la salida del circuito lógico a la base de este transistor y limitando la corriente con una resistencia de 33 k Ω . Como este transistor tiene una ganancia de por lo menos 10,000 ($\beta = 10,000$) se requerirá de muy poca corriente para tenerlo en estado de saturación, con lo que se asegura que esta conexión no carga al 7205.

Es conveniente explicar brevemente en que consiste un arreglo de transistor Darlington; esta configuración consta de la conexión de dos transistores de ganancias β_1 y β_2 conectados colector con colector, emisor con base, como base del arreglo la base del primer transistor y como emisor de la configuración el emisor del segundo transistor (ver Fig.III.4.)

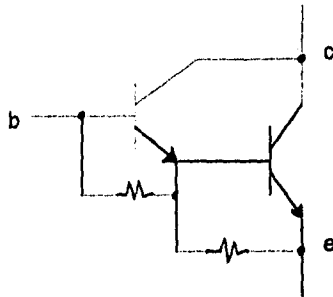


Fig. III.4 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN TRANSISTOR DARLINGTON

La ganancia de este arreglo es $\beta \approx \beta_1 \cdot \beta_2$ y generalmente las ganancias de los transistores están entre 100 ó 150, de tal forma que el producto de estas cantidades es por lo menos 10,000, entiéndase por ganancia de un transistor el cociente de la corriente de colector a la corriente de base, esto es:

$$\beta = \frac{i_c}{i_b} \quad (3.1)$$

Este Darlington está conectado como inversor de tal forma que:

- a) Cuando pasa corriente por la base (uno lógico en el 7205) el voltaje colector-emisor es muy pequeño y no hay forma de prender al LED indicador y tampoco al LED del optoacoplador (la resistencia de 68Ω limita la corriente que pasa por los LEDs) en este caso se dice que el transistor está saturado.
- b) Cuando no hay corriente en la base (cero lógico en el 7205) el voltaje colector-emisor es casi 5 volts (el voltaje de alimentación) y como los LEDs están en paralelo con el transistor éstos tienen el mismo voltaje y se iluminan (recuérdese que la resistencia de 68Ω limita la corriente que pase por ésta parte del circuito, en este caso el transistor está en un estado llamado de corte).

Opto-acoplamiento:

Esta etapa se diseñó usando un opto-acoplador TIL-111 (fototransistor) con el fin de no tener interacciones eléctricas, magnéticas o mecánicas entre el circuito 7205 y la etapa de control del cronómetro.

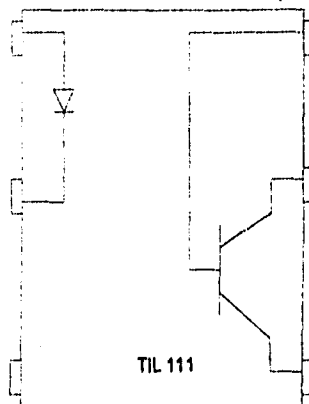


Fig. III.5 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL OPTO-ACOPLADOR

La ventaja de la interacción óptica es su rápida respuesta, a cambios de on a off en el LED que se encuentra en el interior del TIL 111 los cuales son del orden de microsegundos, y que no hay más efecto que el de la luz sobre un semiconductor (interacción fotónica en el infrarrojo) ver figura III.5.

Reloj:

Se diseñó y probó un cronómetro electrónico con circuitos TTL pero se obtuvieron resultados poco confiables pues la base de tiempo no tenía la estabilidad requerida (ser reproducible a centésimas de segundo) es por esa razón que se decidió usar un cronómetro electrónico comercial y diseñar una etapa de acoplo con el detector, esto obliga a complicar el circuito de paro - disparo pero resuelve el problema de estabilidad en la medición del tiempo.

Funcionamiento:

El detector emite un pulso cuadrado, el cual se detecta con el LED y pasa al opto-acoplador (otro LED) éste a su vez emite un rayo de luz en infrarrojo el cual pone en conducción al transistor del TIL 111 (esta secuencia se ilustra en el diagrama esquemático de la Fig. III.6).

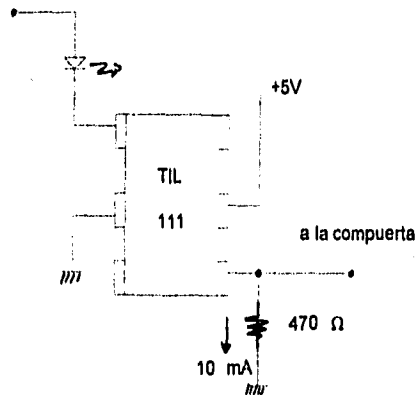


Fig. III.6 CONEXIÓN DEL OPTO-ACOPLADOR A LA COMPUERTA LÓGICA.

El cual se pone en estado de saturación y conduce a través de la resistencia de 470Ω (aproximadamente 10 mA) con un potencial de casi 4.5 volts, este voltaje se aplica a la entrada "A" de la compuerta (ver figura III.7) la cual lo entiende como un paso de "cero" a "uno" lógicos y a su vez emite un pulso, el cual hace que el reed-relay se conecte y desconecte justo la función del cronómetro para arranque.

Después de que la esfera (balín) recorre la distancia Δx pasa por la bobina de "paro" y la segunda etapa (igual a la descrita para la bobina de disparo) emite su correspondiente pulso, el cual entra a "B" de la compuerta vía el opto-acoplador y es aquí donde la compuerta resulta indispensable ya que ésta emite otro pulso sobre el mismo reed-relay, éste se conecta y desconecta produciendo el efecto de paro en el cronómetro.

Es importante mencionar que pasa cuando hay que regresar la esfera a la parte superior del viscosímetro;

* Al inclinar el tubo, la esfera pasa primero por la bobina de paro y el circuito emite un pulso, el cual la compuerta lo entiende como un cambio de bajo-alto-bajo y el cronómetro inicia la cuenta.

* Al pasar la esfera por la bobina de disparo el circuito detector emite otro pulso y la compuerta detiene la cuenta del cronómetro, usando ahora el botón de borrado del cronómetro se pone la lectura en cero y el aparato está listo para iniciar su funcionamiento nuevamente.

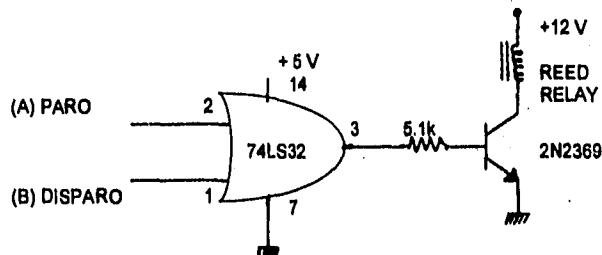


FIG. III.7 CONEXIÓN DE LA COMPUERTA LÓGICA AL RELOJ

III .5 Prototipo II

Esta versión pretende tener mayor versatilidad y poder ajustar la sintonía del circuito con un material metálico en las bobinas como es el acero inoxidable.

Aún cuando esta aleación no es ferromagnética tiene algún efecto de magnetización ante la presencia de un campo magnético variable y es necesario tener un método conveniente y efectivo para contrarrestar la presencia del metal en la bobina, ya que el prototipo I no cumple con este requerimiento.

Así que se propuso una variante del prototipo I (que usa una bobina con dos puntas) usando como detector un pequeño transformador el cual tiene primario y secundario (cuatro puntas).

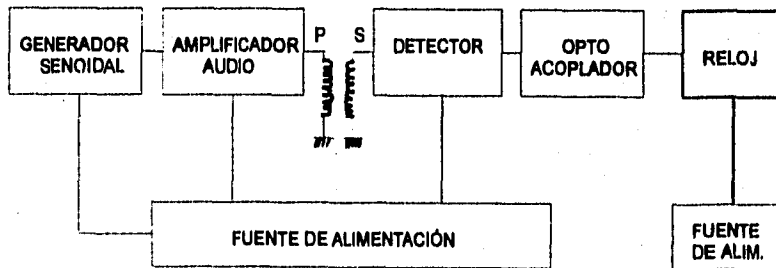


Fig. III.8 DIAGRAMA OPERATIVO DEL PROTOTIPO II.

El principio de funcionamiento es el siguiente:

Al excitar el primario de un transformador con una onda senoidal,

en el secundario se induce una onda igual, la cual puede variar en amplitud dependiendo de la relación del número de vueltas del primario (n_p) al número de vueltas del secundario (n_s) y del acoplamiento magnético entre estas capas de alambre.

Si se recuerda que la relación:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{n_p}{n_s} \quad (3.2)$$

con V_p y V_s los voltajes del primario y secundario respectivamente, es una buena relación entre primario y secundario de un transformador, y se puede usar para diseñar un transformador-detector y amplificar el efecto del paso de la esfera, se propone que sea V_p un voltaje fijo y sea V_s el voltaje inducido, pero se pide que el efecto del paso de la esfera se pueda notar con alguna facilidad, así que se propone que:

$$V_s = 5 V_p \quad (3.3)$$

ahora el número de vueltas n_p y n_s está definida (por lo menos como una relación entre ellas) de la forma:

$$n_s = 5 n_p \quad (3.4)$$

por lo que el secundario tiene cinco veces más vueltas que el primario.

Aparece ahora un problema importante en el diseño del aparato.

Existe un intervalo de frecuencias en el que la amplitud de la señal inducida es grande (y en cierta frecuencia es máxima) ¿cuál frecuencia se tendrá que tomar para detectar el paso de la esfera?

Este problema se resolvió construyendo un generador de señales senoidales con amplitud y frecuencia variables entre cero y dos volts de salida (V_{amp}) y entre 500 Hz y 6 kHz (f), en esta forma podemos variar la amplitud y frecuencia a las condiciones requeridas del experimento (ver diagrama en la siguiente hoja).

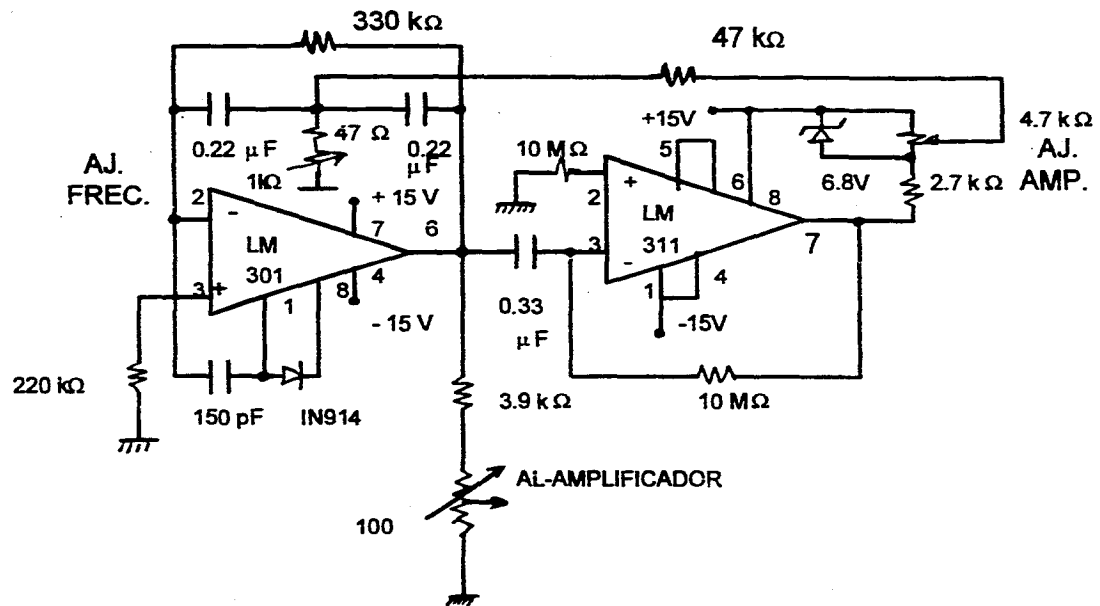


FIG. III-9 DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL GENERADOR SENOIDAL

Con este circuito (figura III.9) se pueden generar ondas senoidales pero éstas no tienen suficiente energía para inducir un campo magnético intenso capaz de pasar a través del tubo de acero, así que hay que agregar una etapa de potencia, la cual se excita por este generador y a la salida se conectan los primarios de los transformadores (de disparo y paro) en paralelo para tenerlos en fase y con igual amplitud.

El circuito integrado que da la potencia es un TDA 2002, un amplificador de audio (de los usados en los autoestéreos), el cual da 8 Watts de potencia de salida con una impedancia de 8 Ω y una alimentación de 12 volts característicos del elemento (ver Fig. III.10).

Así se tiene que la condición esperada para determinar cuál es el valor de n_p y n_s , ya que están los primarios conectados en paralelo n_p es tal que:

$$\frac{1}{8} = \frac{2}{R_{(np)}} \rightarrow R_{(np)} = 16 \Omega$$

Donde $R_{(np)}$ es la resistencia del primario de la bobina ahora sólo se tiene que preparar un embobinado que de 16 Ω , como no hay gran flujo de corriente, el cable en la bobina puede ser delgado (por ejemplo de calibre 34).

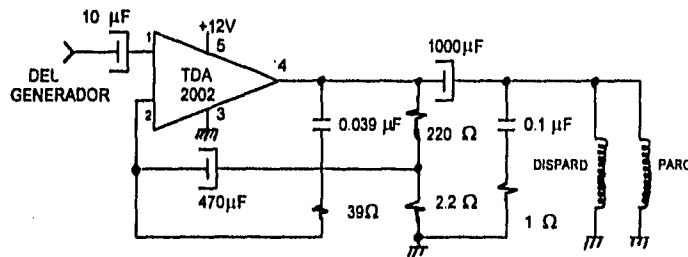


FIG. III.10 DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL AMPLIFICADOR DE POTENCIA

Detectores:

Como detectores (de disparo y paro) se usa también el circuito LA 7205, pero en este caso no se utiliza la parte del circuito oscilante que se encuentra dentro del circuito integrado (las terminales 1,2 y 9) ya que el secundario del transformador está ya oscilando por efecto de inducción del primario y sólo (ver Fig. III.11)

- a) Hay que elegir una frecuencia apropiada para que la esfera sea detectada dentro del tubo (aproximadamente 3 kHz)
- b) Ajustar con el trimpot de 20 k Ω la amplitud a la cual el AGC responda.

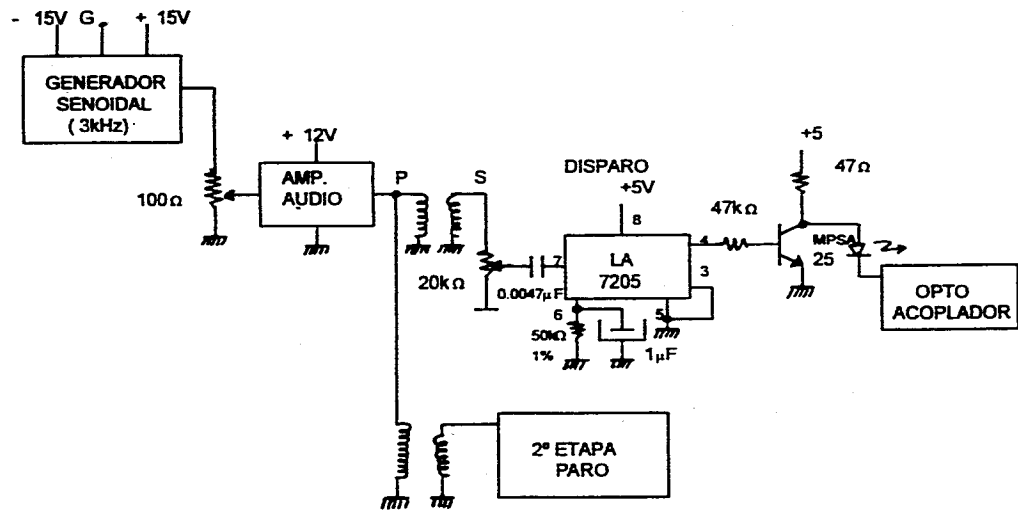


FIG. III.11 DIAGRAMA TOTAL DEL PROTOTIPO II

Hay que hacer notar que en la conexión 6 del C.I. (pin 6) se ha cambiado el arreglo de resistencia-capacitor de $56\text{ k}\Omega$ y $0.1\ \mu\text{F}$ en el primer prototipo a la pareja $58\text{ k}\Omega$ y $1\ \mu\text{F}$ en este segundo prototipo ya que la frecuencia de oscilación ha cambiado (etapa del AGC).

Otro punto importante es que:

- a) Para el primer prototipo, sólo se requiere una fuente de + 5 volts con un consumo de escasos 200 mA.
- b) Para el segundo prototipo, se requieren cuatro fuentes de alimentación de ± 15 volts, + 12 volts y + 5 volts.

La fuente de ± 15 volts se obtiene de un transformador de 18 volts rectificando y filtrando este voltaje alterno.

El diagrama eléctrico es el siguiente:

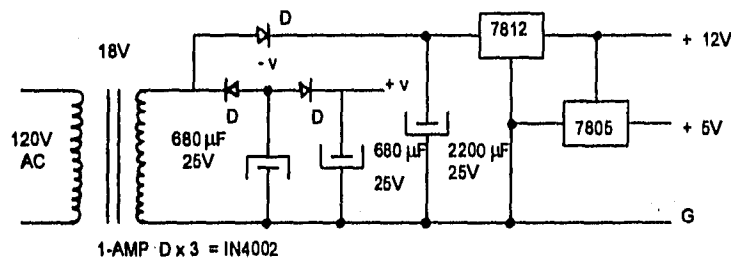


FIG. III.12 DIAGRAMA ELÉCTRICO DE LAS FUENTES DE ALIMENTACIÓN

El regulador de ± 15 volts es un XR 4195 de EXAR, circuito integrado especializado en esta función y muy confiable.

Los voltajes de +12 y + 5 volts se obtienen con los reguladores 7812 y 7805 respectivamente, y la rectificación en este caso es a media onda (pues no hay gran consumo de corriente) y con filtros de valores altos (diagrama en la siguiente hoja).

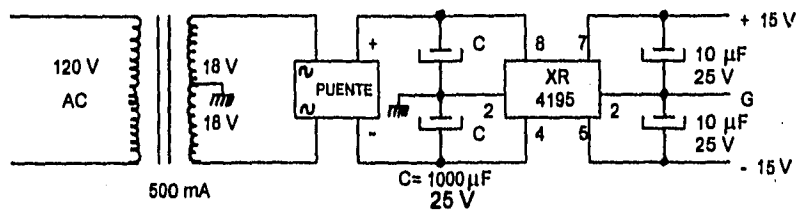


FIG. III.13 DIAGRAMA ELÉCTRICO DE LA FUENTE BIPOLAR

III.6 Resumen.

Los dos prototipos descritos se construyeron para que formen el sistema de detección del viscosímetro de bola rodante. El prototipo I es útil para un intervalo amplio de temperatura, y a presión cercana a la atmosférica. El prototipo II opera para un intervalo amplio de temperatura y presión. Ambos prototipos se probaron en el laboratorio obteniéndose resultados reproducibles de la viscosidad de algunos líquidos y sus mezclas.

III.7 Conclusiones.

- El diseño electrónico de la etapa de detección es original.
- El diseño es en cierta forma simple.
- El aparato electrónico es estable a la temperatura a la que el viscosímetro trabaja y es también estable en el tiempo.
- El costo de fabricación es razonablemente bajo.
- Se ha desarrollado una buena parte de la tecnología de construcción de los aparatos.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS EXPERIMENTALES

IV.1 Introducción.

En este cuarto y último capítulo se presentan:

- Antecedentes experimentales.
- Descripción general del aparato.
- Descripción de como se realiza el experimento.
- Los resultados de la calibración y la obtención de viscosidades de algunos líquidos de interés.

IV.2 Antecedentes experimentales.

Hubbard y Brown realizaron un buen número de experimentos variando los diferentes parámetros en el experimento, como el diámetro del tubo y la esfera, el ángulo de inclinación y las sustancias. Las condiciones experimentales usadas en ese trabajo han cubierto principalmente el régimen laminar, obteniéndose una gran cantidad de datos.

Estos autores citan que el movimiento observado de la esfera fue fundamentalmente un movimiento regular de rotación a velocidad constante y que según Block (1940) menciona, que ha observado y medido la longitud del deslizamiento en combinación con el movimiento de rotación en muchos fluidos viscosos y con ángulos alrededor de los 60° .

Block observó que había deslizamiento cuando usó aceite muy viscoso a grandes inclinaciones y que con fluidos menos viscosos el deslizamiento no apareció, además la velocidad crítica a la cual el flujo cambia de laminar a turbulento puede no ser determinado por observación directa de la bola rodante.

Con ángulos menores a los 30° y en distancias grandes de movimiento comparadas con el radio de la esfera, en ambas regiones, laminar y turbulenta el movimiento fue uniforme y los datos reproducibles.

Se aceptó como límite de utilidad del viscosímetro las condiciones en las que el movimiento de la bola llegara a ser visiblemente irregular, los datos experimentales fueron agrupados de acuerdo con el tamaño del tubo y la bola o la razón del diámetro de la bola al del tubo (d/D).

IV.3 Descripción general del aparato.

Este aparato consta de dos tubos de vidrio o metal, colocados en forma concéntrica como lo muestra la Figura IV.1.

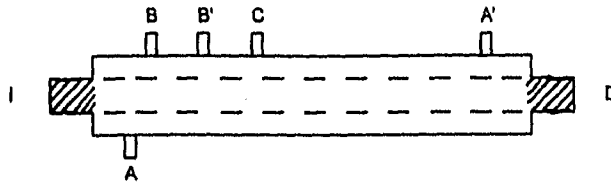


FIG. IV.1 VISTA ESQUEMÁTICA DE LOS TUBOS QUE FORMAN EL VISCOSÍMETRO

En este caso se ha fabricado un viscosímetro de vidrio cuyo tubo interior es de 9 mm de diámetro interior, 13 mm de diámetro exterior y aproximadamente 70 cm de longitud. Tiene extremos roscados para poder atornillar tapones al tubo y sellar su interior, el tubo exterior es de aproximadamente 75 mm de diámetro interior, 83 mm de diámetro exterior y 60 cm de longitud utilizándose una esfera de acero con un diámetro de 8 mm. (diámetro esfera/ diámetro tubo interior = 0.88).

En los puntos AA' del tubo exterior (ver Figura IV.1) se han colocado dos conectores de 7 mm de diámetro interior, aproximadamente, para permitir el paso del líquido calefactor. Se han colocado tres conectores de aproximadamente 5 mm de diámetro interior en B, B' y C, dos para la salida de los cables de los sensores de posición y uno para el sensor de temperatura.

El tubo exterior es la chaqueta que permite aislar al tubo interior del medio ambiente. Esta chaqueta se suelda al tubo interior, donde previamente se han localizado y posicionado los sensores, a una distancia de 10 cm entre ellos y aproximadamente a 25 cm del extremo izquierdo (I) del tubo interior.

Ya que se trabaja a temperaturas mayores que la del medio ambiente se debe de aislar térmicamente la chaqueta (tubo exterior), para esto se cubre el tubo con fibra de vidrio o algún material aislante al calor,

Se deben preparar dos tapones roscados que sellen los extremos del tubo interior y el soporte que permita mantener el ángulo de inclinación (ϕ) constante a lo largo del experimento.

Descripción de como se realiza el experimento.

Hay que lavar y secar muy bien el tubo interior del viscosímetro para no contaminar la muestra a estudiar.

Se coloca el primer tapón en el extremo izquierdo (I) del aparato logrando que el sello sea hermético. Se llena el tubo aproximadamente a la mitad de su volumen y se introduce la esfera, completando el llenado y colocando el otro tapón en el lado derecho (D), sellando herméticamente éste.

Se realizan las conexiones de:

a) Mangueras para el baño térmico, el cual es un baño circulador de agua (puede ser usado como material calefactor etilen-glicol) en A,A'.

b) Los sensores al sistema de detección electrónico, el cual se ha descrito en el capítulo III. Esta conexión se realiza usando conectores del tipo RCA. Hay que cuidar de sellar herméticamente estas salidas de cables en la unión viscosímetro-cables en B,B'.

c) El sensor de temperatura, el cual consiste en un detector de alambre de platino que pertenece a un termómetro digital que ofrece lecturas a centésimas de grado (marca Sistemtechnik). Se sella también herméticamente la conexión entre el viscosímetro y el sensor en C.

Una vez realizados estos pasos se elige la temperatura de trabajo y se pone a calentar el baño térmico.

Cuando la temperatura del viscosímetro está cercana a la temperatura elegida, se hace correr la esfera algunas veces a lo largo del tubo para homogeneizar al líquido y se espera hasta lograr el equilibrio térmico, y en lo posible el equilibrio mecánico.

Una vez logrado el equilibrio térmico se procede a hacer correr un par de veces la esfera a lo largo del tubo antes de tomar los tiempos de translación entre los sensores.

Se realizan generalmente veinticinco mediciones de tiempo para cada líquido estudiado a la temperatura de trabajo.

IV.4 Calibración y resultados experimentales.

En esta sección se presentan los resultados de la calibración del aparato y los resultados de la medición de algunas viscosidades.

Para la calibración se han propuesto cuatro sustancias diferentes combinando éstas con tres ángulos previamente elegidos (5, 7 y 15 grados) en los cuales la esfera no desliza (Geils,1977).

Para 5° las sustancias usadas en la calibración son n-tetradecano y aceite estándar S3.

Para 7° la sustancia usada es aceite estándar S6.

Para 15° las sustancias usadas son aceites estándar S6 y S20.

Para estos cálculos y gráficas se usa la ecuación:

$$\eta = C (\rho_{\text{esf}} - \rho) \Delta t, \quad (4.1)$$

las densidades de las sustancias se han obtenido de las siguientes fuentes:

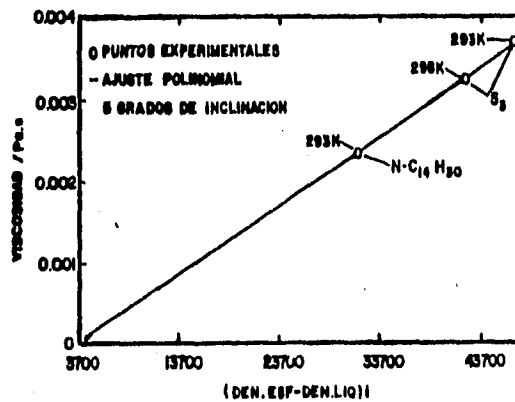
n-tetradecano - American Petroleum Institute

Aceites - Cannon Instrument Co.

La densidad de la esfera ha sido determinada experimentalmente a través de mediciones de masa y volumen, siendo su valor de 7.610 g/cm^3 .

Las siguientes gráficas muestran los resultados de la calibración para los tres ángulos elegidos y se encuentran después de cada gráfica una pequeña tabla con los datos referentes a las gráficas correspondientes.

La gráfica IV.1 muestra los resultados de la calibración del viscosímetro para 5° de inclinación usando n-tetradecano y aceite S3, a 293.15 y 298.15 K.



Gráfica IV.1 η vs. $(\rho_{\text{esf}} - \rho)\Delta t$, para 5° de inclinación.

Los resultados de este experimento se encuentran en la tabla IV.1

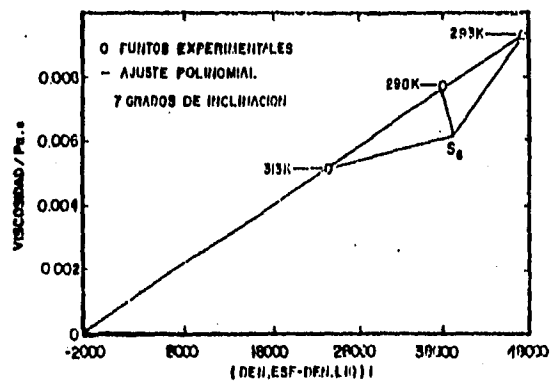
fluido	$(\rho_{\text{esf}} - \rho)\Delta t$ kg s / m ³	$\eta \times 10^{-3}$ Pa.s	T K
S3	47196.46	3.674	293.15
	42181.07	3.225	298.15
N-tetra decano	33024.53	2.342	293.15

Tabla IV.1 Resultados del experimento para 5° de inclinación.

El valor de la constante del aparato es:

$$C = (0.844 \pm 0.003) \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

La siguiente gráfica (Gráfica IV.2) muestra los resultados de la calibración del viscosímetro para 7° de inclinación usando aceite S6, en el intervalo de 293 a 313 K.



Gráfica IV.2 η vs $(\rho_{\text{esf}} - \rho)\Delta t$, para 7° de inclinación.

Los resultados de este experimento se encuentran en la tabla IV.2.

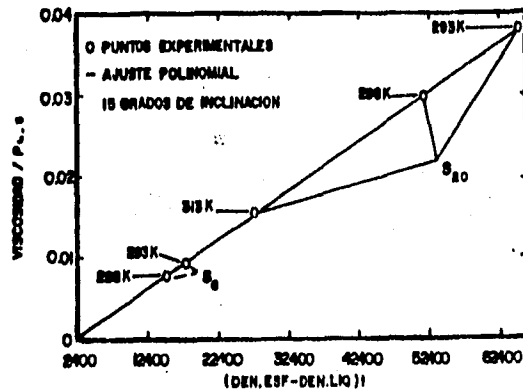
fluido	$(\rho_{\text{enf}} - \rho)\Delta t$ kg s / m ³	$\eta \times 10^{-3}$ Pa. s	T K
S6	49316.57	9.237	293.15
	39677.99	7.708	298.15
	26533.3	5.139	313.15

Tabla IV.2 Resultados del experimento para 7 °de inclinación.

El valor de la constante del aparato es:

$$C = (1.84 \pm 0.009) \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ kg}^{-1}.$$

La siguiente gráfica muestra los resultados de la calibración del viscosímetro para 15° de inclinación usando aceites S6 y S20, en el intervalo de 293 a 313 K.



Gráfica IV.3 η vs $(\rho_{\text{enf}} - \rho)\Delta t$, para 15° de inclinación.

Los resultados de este experimento se encuentran en la tabla IV.3. IV.3.

fluido	$(\rho_{\text{err}} - \rho)\Delta t$	$\eta \times 10^{-3}$	T
	kg s / m ³	Pa. s	K
S20	65096.99	37.85	293.15
	51542.86	29.51	298.15
	27339.79	15.44	313.15
S6	15217.42	9.24	293.15
	15137.31	7.71	298.15

Tabla IV.3 Resultados del experimento para 15° de inclinación.

El valor de la constante del aparato es:

$$C = (6.05 \pm 0.03) \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

Resultados experimentales de los valores de la viscosidad de sustancias puras y sus mezclas.

Las sustancias puras utilizadas son: n-hexadecano, sulfolano y aceite estandar S10.

Las mezclas utilizadas son:

X_1 sulfolano + (1 - X_1) monoetanolamina

X_1 sulfolano + (1 - X_1) dietanolamina.

Los intervalos de temperatura a los cuales se realizan los experimentos con sustancias puras son, respectivamente:

de 293.15 a 303.15 K

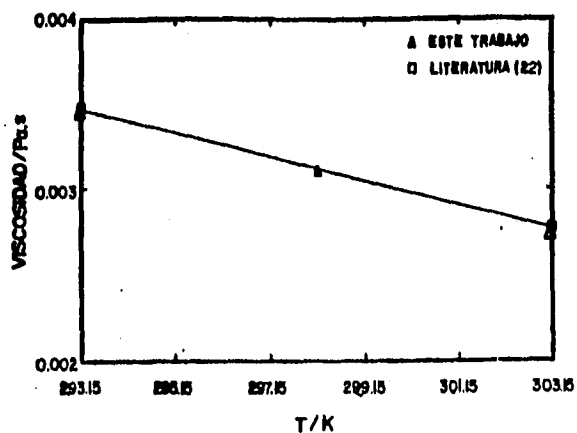
de 303.15 a 323.15 K

de 293.15 a 313.15 K

se usan ángulos de 5° para el n-hexadecano, 7° para el sulfolano y 15° para el aceite S10.

Las siguientes gráficas muestran los resultados de la viscosidad como función de la temperatura (Gráficas IV.4, IV.5 y IV.6) y las tablas (Tablas IV.4, IV.5 y IV.6) muestran los resultados experimentales que han generado las gráficas anteriores.

La primera de estas gráficas representa la viscosidad absoluta como función de la temperatura del n-hexadecano.



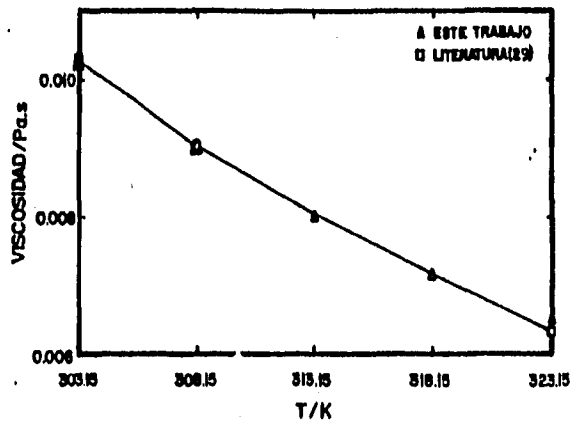
Gráfica IV.4 Viscosidad absoluta obtenida con el viscosímetro de bola rodante como función de la temperatura para n-hexadecano.

La tabla siguiente muestra los resultados experimentales con n-hexadecano a 5° de inclinación, con $C = (8.44 \pm 0.003) \times 10^{-7} \text{Pa m}^3 \text{kg}^{-1}$ y con $\rho_{\text{ref}} = 7.610 \text{ g cm}^{-3}$, (7610 kg m^{-3}).

fluido	T K	Δt s	$\eta \times 10^{-3} \text{Pa.s}$ este trabajo	$\eta \times 10^{-3} \text{Pa.s}$ literatura	% E.R.
hexadecano	293.15	6.05	3.488	3.484	-0.11
	298.15	5.36	3.094	-----	-----
	303.15	4.81	2.777	2.766	-0.40

Tabla IV.4 Resultados experimentales para hexadecano a 5° de inclinación.

La siguiente gráfica es de sulfolano:



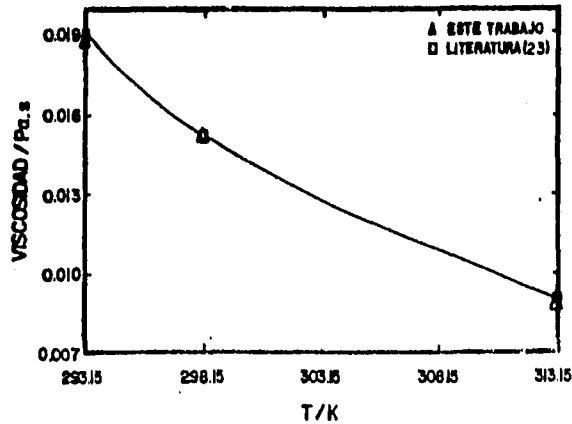
Gráfica IV.5 Viscosidad absoluta obtenida con el viscosímetro de bola rodante como función de la temperatura para sulfolano.

La siguiente tabla muestra los resultados experimentales con sulfolano a 7° de inclinación, con $C = (1.84 \pm 0.009) \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ kg}^{-1}$ y $\rho_{\text{esf}} = 7.610 \text{ g cm}^{-3}$ (7610 kg m^{-3}).

fluido	T K	At s	$\eta \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ este trabajo	$\eta \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ literatura	%E.R.
sulfolano	303.15	8.82	10.289	10.286	- 0.03
	308.15	7.75	9.039	9.033	- 0.06
	313.15	6.82	7.967	-----	---
	318.15	6.12	7.154	-----	---
	323.15	5.54	6.476	6.312	- 2.59

Tabla IV.5 Resultados experimentales para sulfolano a 7 de inclinación.

La siguiente gráfica es del aceite estandar S10.



Gráfica IV.6 Viscosidad absoluta obtenida con el viscosímetro de bola rodante como función de la temperatura para el aceite S10.

La siguiente tabla muestra los resultados experimentales con aceite S10 a 15° de inclinación, con $C = (6.05 \pm 0.03) \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ kg}^{-1}$ y $\rho_{\text{air}} = 7.610 \text{ g cm}^{-3}$

fluido	T K	Δt s	$\eta \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ este trabajo	$\eta \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ literatura	% E.R.
S10	293.15	4.69	19.152	19.043	- 0.58
	298.15	3.75	15.303	15.245	- 0.41
	313.15	2.09	8.593	8.585	+ 0.02

Tabla IV.6 Resultados experimentales para S10 a 15° de inclinación.

Como se puede apreciar de las gráficas y tablas anteriores los resultados de las viscosidades absolutas obtenidas con este aparato comparan muy bien con los pocos valores obtenidos de la literatura, ya que en la mayoría de los casos el error relativo (E.R) no es mayor del 1%.

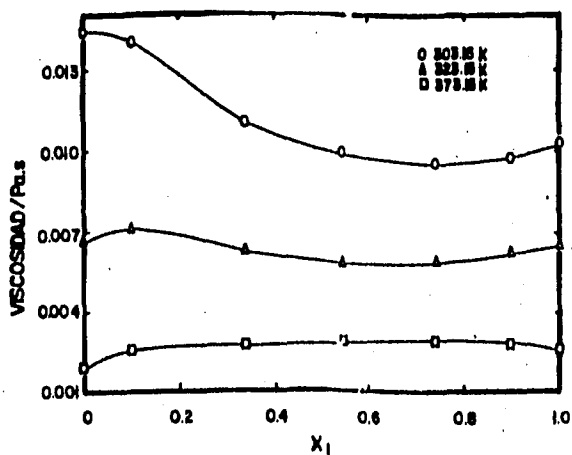
Finalmente se reportan los resultados de la obtención de la viscosidad para las mezclas binarias:

(X_1) sulfolano + $(1 - X_1)$ MEA
y
 (X_2) sulfolano + $(1 - X_1)$ DEA

a las siguientes temperaturas: 303.15, 323.15 y 373.15 K cada una.

Es importante el hacer notar que para estas mezclas no hay valores experimentales reportados en la literatura.

La siguiente gráfica (Gráfica IV.7) muestra la viscosidad absoluta de la primera mezcla (sulfolano + MEA) y la composición.



Gráfica IV.7 Viscosidad absoluta como función de la temperatura y composición para el sistema (X_1) sulfolano + $(1 - X_1)$ MEA.

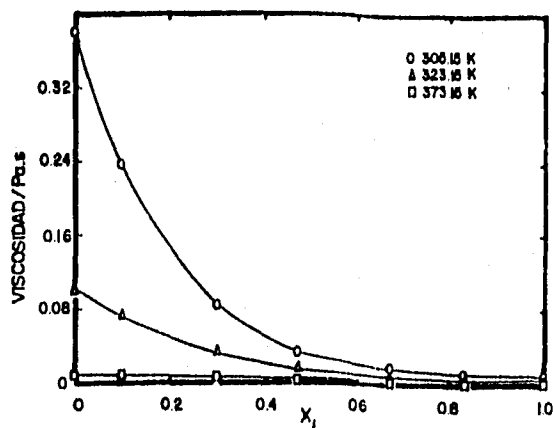
La tabla siguiente (Tabla IV.7) muestra los resultados experimentales de viscosidad vs composición a las tres temperaturas propuestas.

$\eta \times 10^{-3}$ Pa s.

X_1	303.15 K	323.15 K	373.15 K
0.0000	14.424	6.661	1.907
0.1000	14.021	7.103	2.548
0.3369	11.467	6.200	2.711
0.5426	9.923	5.815	2.819
0.7423	9.547	5.850	2.903
0.8999	9.780	6.195	2.803
1.0000	10.289	6.476	2.546

Tabla IV.7 Resultados experimentales de la viscosidad absoluta en la mezcla sulfolano + MEA como función de la composición.

La siguiente gráfica (Gráfica IV.8) muestra la viscosidad absoluta de la segunda mezcla (X_1)sulfolano + (1 - X_1)DEA y la composición.



Gráfica IV. 8 Viscosidad absoluta como función de la temperatura y composición para el sistema sulfolano + DEA.

La tabla siguiente (Tabla IV.8) muestra los resultados experimentales de viscosidad vs composición a las tres temperaturas propuestas para la segunda mezcla.

η Pas s

X_1	303.15 K	323.15 K	373.15 K
0.0000	0.380	0.101	0.010
0.0999	0.238	0.073	0.009
0.2999	0.085	0.033	0.007
0.4687	0.034	0.015	0.005
0.6712	0.018	0.009	0.004
0.8322	0.012	0.007	0.003
1.0000	0.010	0.006	0.002

Tabla IV.8 Resultados experimentales de la viscosidad absoluta en la mezcla sulfolano + DEA como función de la composición.

De la primera mezcla (Gráfica IV.7) puede observarse como entre los 303.15 y 323.15K la viscosidad η tiende a ser mayor en la región de alta concentración de la monoetanolamina (MEA), esto se puede interpretar como una mayor asociación entre las moléculas de MEA, mientras que a 373.15 K la viscosidad es mayor que la de los componentes puros en todo el intervalo de composición, lo cual indica que hay interacciones moleculares fuertes del tipo 1-2 (Hirschfelder, 1954).

De la segunda mezcla (Gráfica IV.8) se aprecia como se comporta la viscosidad para el sistema sulfolano + DEA, ésta tiene un comportamiento asintótico en el intervalo de temperaturas de 303.15 a 323.15 K indicando ésto que no existe asociación molecular importante con DEA, mientras que a 373.15K la viscosidad es constante en todo este intervalo de composición, ésto sugiere que en la mezcla hay interacciones moleculares del tipo 1-2 similares a las de los componentes puros.

IV.5 Resumen.

Se ha descrito el viscosímetro en su totalidad y se ha descrito la técnica experimental para realizar el experimento.

Se ha calibrado el aparato con cuatro sustancias puras y a tres ángulos de inclinación diferentes en un intervalo de temperaturas apropiado a los intereses del experimento, y se han obtenido las tres constantes correspondientes.

Se ha obtenido la viscosidad de tres sustancias puras y de dos mezclas, para las cuales no se encontraron datos reportados en la literatura.

IV.6 Conclusiones.

La fabricación de este aparato resulta accesible para un laboratorio de investigación ya que para su construcción no son necesarios materiales muy especializados.

La técnica experimental es fácil de realizar mas no de uso inmediato si se pretendiera estudiar varios líquidos para una misma temperatura, ya que el limpiado y llenado del aparato requiere de tiempo considerable sin embargo se pueden planear experimentos con la misma sustancia a diferentes temperaturas y cambiar después la muestra.

Esta técnica es muy útil si se pretende hacer un estudio detallado de un líquido puro o mezcla volátiles en un intervalo amplio de temperaturas, ya que al preparar el viscosímetro, éste queda sellado, la muestra no se pierde y se puede fácilmente variar la temperatura de trabajo.

Los resultados que se obtienen son confiables en buena medida de acuerdo con las comparaciones realizadas con los reportes de la literatura y los de este trabajo (cuando los hay).

CONCLUSIONES GENERALES.

Se establece un modelo que explica los fundamentos teóricos del viscosímetro de bola rodante mostrando ser mas consistente que los propuestos en otros trabajos y poniendo en evidencia la necesidad de realizar la calibración del aparato.

Se ha propuesto la instrumentación electrónica del equipo como una novedad, en el uso de este tipo de aparato, habiéndose desarrollado el diseño y la construcción de la misma, teniendo la ventaja de conocer la tecnología de diseño y fabricación.

Se han realizado la calibración y mediciones con sustancias de interés para el I.M.P. obteniéndose resultados muy buenos. En el caso de mezclas, algunos valores no están reportados en la literatura especializada.

SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS.

a) En el capítulo uno se menciona un método acústico de detección, sería interesante el desarrollar la instrumentación pertinente y comparar resultados con el aparato diseñado en este trabajo.

b) Realizar experimentos a temperaturas mayores a las registradas en el capítulo cuatro y aumentar la presión en el viscosímetro.

c) Ampliar la información obtenida para mezclas a temperaturas mayores, ya que se tiene poca información de la viscosidad a esas temperaturas.

LISTA DE SIMBOLOS

$A_{1,2}$	= Area de la sección transversal, m^2 [L^2].
a	= Aceleración lineal, m / s^2 [LT^{-2}].
$a_{0,1}$	= Coeficientes de linealización.
A, B, C_1, C_2	= Constantes.
B	= Fuerza de empuje, N [MLT^{-2}].
b	= Ordenada al origen.
C	= Constante del viscosímetro, $Pa \cdot m^3 / kg$
d	= Diámetro de la esfera, m [L].
D	= Diámetro interior del tubo, m [L].
F	= Fuerza viscosa, N [MLT^{-2}].
f	= Fuerza de fricción, N [MLT^{-2}].
g	= Aceleración de la gravedad, m / s^2 [LT^{-2}].
h	= Radio hidráulico, m [L].
L, l	= Longitud, m [L].
m	= Masa, kg [M].
M	= Momento viscoso, $m \cdot N$ [ML^2T^{-2}].
N	= Fuerza normal, N [MLT^{-2}].
$n_{p,s}$	= Número de vueltas del primario y secundario.
Q	= Flujo volumétrico, m^3 / s [L^3T^{-1}].
R_o	= Número de Reynolds.
r	= Radio de la esfera, m [L].
t	= Tiempo de escurrimiento, s [T].
$V_{p,s}$	= Voltajes del primario y secundario, V [$ML^2T^{-2}C$].
V	= Volumen, m^3 [L^3].
v	= Velocidad de la esfera, m / s [LT^{-1}].

W	=	Peso, N [MLT ⁻²].
Δp	=	Diferencia de presión, Pa [ML ⁻¹ T ⁻²].
Δx	=	Diferencia de distancia, m [L].
Δt	=	Diferencia de tiempo, s [T].
φ	=	Angulo de inclinación (radianes).
η	=	Viscosidad absoluta, Pa s [ML ⁻¹ T ⁻¹], poises.
ν	=	Viscosidad cinemática, m ² /s [L ² T ⁻¹], stokes.
ρ	=	Densidad, kg / m ³ [ML ⁻³].
τ	=	Momento de rotación o torca, m·N [ML ² T ⁻²].
ω	=	Velocidad angular, 1 / s [T ⁻¹].

±

B I B L I O G R A F I A

Aguila Hernández, J., "Estudio de la viscosidad de mezclas binarias de disolventes físicos y químicos como función de la temperatura y composición", Tesis de Maestría. E.S.F.M. Instituto Politécnico Nacional 1994.

Aguila Hernández, J. Molnar de la Parra, R. Trejo Rodríguez, A. "Aparato y procedimiento para determinar el coeficiente de viscosidad de líquidos puros y mezclas", solicitud de patente No. 931614, 1993.

Cheng, D., Viscosity (Parts 1, 2, 3), "Measurement and control", Vol. 14, 73-75, 112-118, 159-163. 1981.

Coughlin, R. F. Y Driscoll, F. F. "Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales". (cuarta edición) Prentice-Hall Hispanoamericana. S.A. México, 1993.

Block, R. B., J. Applied Phys., 11, 635 - 642, 1940.

Bridgman, P. W., "Dimensional Analysis", 1st ed., 65 - 67, New Haven, Yale University Press, 1922.

Dobkin, R. C., "Easily tuned sine wave oscillators", National Semiconductor, Linear Applications Handbook, 1978.

Flowers, A. E., Proc. Am. Soc. Testing Materials, 14. II, 565 - 616, 1914.

Fox, R. W., Mc. Donald A.T., "Introducción a la mecánica de fluidos" (segunda edición) Interamericana, 1983.

Geils, R.H., Keezer, R.C., "Small-volume, inclined falling-ball viscometer" Rev. Sci. Instrum., Vol 48, No. 7 July 1977.

Hersey, M. D., J. Wash. Acad. Sci., 6, 525 - 530 1916.

Hirschfelder, J.O. Curtis, C.F. Bird, R.B., "Molecular theory of gases and liquids", John Wiley and Sons, U.S.A. 1954.

Holman, J.P., "Métodos experimentales para ingenieros", (cuarta edición) Mc Graw Hill, 1984.

Hubbart, R. M. y Brown, G. G. "The rolling ball viscometer", Industrial and Ing. Chemistry. 15 No. 3 213-217, 1943.

Landau, L.D. y Lifshitz, E.M., "Fluid mechanics", Pergamon Press, 1959.

Lewis, H. W. , "Calibration of the rolling ball viscometer",
Analytical Chemistry. Vol. 25 No.3 March, 1953.

Rabinovich, E. Z., "Hidráulica", Editorial Mir, Moscú, 1980.

Sage, B. H., Ind. Eng. Chem., Anal. Ed., 5, 261 - 263, 1933.

Segarra, A., Ma. del P., "Viscosímetro de cilindros coaxiales
(diseño y construcción)", Tesis de Maestría. Universidad Nacional
Autónoma de México, 1989.

SGS Linear integrated circuits. Handbook, 1982.

Sommerfeld, A. "Mechanics of deformable bodies", Academic Press, 1950.

Tily, P. J., "Viscosity measurements", Measurement and control, Vol 16,
March, 1983.

White, F.M., "Mecánica de fluidos", Mc Graw-Hill (Segunda Edición), 1983.

APÉNDICE

Es necesario evaluar la precisión de las mediciones indirectas en los experimentos realizados en este trabajo. En las mediciones indirectas, los valores de la magnitud buscada Y se determinan a partir de las mediciones directas de otras magnitudes relacionadas con Y mediante una dependencia funcional del tipo:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad \text{A.1}$$

dónde X_i ($i = 1 \dots n$) son los valores de las mediciones directas.

Al determinar la magnitud buscada Y, se estima que los resultados de la medición de la magnitud X_i no contienen errores sistemáticos. El error del resultado de la medición indirecta de la magnitud Y depende del error de los resultados de las mediciones directas de las magnitudes X_i independientes unas de otras.

Para apreciar la exactitud del resultado de la medición indirecta de la magnitud Y se usa la desviación típica, la cual se calcula mediante la fórmula

$$\Delta Y = \left[\left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} \right)^2 \Delta X_1^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2} \right)^2 \Delta X_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_n} \right)^2 \Delta X_n^2 \right]^{1/2}, \quad \text{A.2}$$

dónde $\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_n$ son las desviaciones típicas de los resultados de la medición de las magnitudes X_1, X_2, \dots, X_n .

Usando esta relación se calcula la precisión de la constante de calibración del viscosímetro de bola rodante para las tres inclinaciones propuestas en los experimentos, la viscosidad obtenida, la densidad de la esfera y del líquido.

Para la constante de calibración C del aparato se aplica la ecuación

$$C = \eta \left((\rho_s - \rho) t \right)^{-1}, \quad \text{A.3}$$

efectuando el cálculo se tiene que:

$$\Delta C = \left[\left(\frac{1}{(\rho_s - \rho)t} \right)^2 (\Delta\eta)^2 + \left(\frac{\eta}{(\rho_s - \rho)^2 t} \right)^2 (\Delta\rho_s)^2 + \left(\frac{\eta}{(\rho_s - \rho)^2 t} \right)^2 (\Delta\rho)^2 + \left(\frac{\eta}{(\rho_s - \rho)t^2} \right)^2 (\Delta t)^2 \right]^{1/2}, \text{ A.4}$$

Para 25 mediciones con aceite estandar S3 a 293 K y a 5° de inclinación se tienen los siguientes datos:

$\rho_s = 7.610 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$	$\Delta\rho_s = 30 \text{ kg m}^{-3}$
$\rho = 8.396 \times 10^2 \text{ kg m}^{-3}$	$\Delta\rho = 1 \text{ kg m}^{-3}$
$t = 6.007 \text{ s}$	$\Delta t = .01 \text{ s}$
$\eta = 3.674 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$	$\Delta\eta = 2 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}$

efectuando los cálculos apropiados se tiene que

$$\Delta C = \pm 3 \times 10^{-10} \text{ Pa m}^3 \text{ kg}^{-1}.$$

Para 25 mediciones con aceite S6 a 296 K y a 7° de inclinación se tienen los siguientes datos:

$\rho_s = 7.610 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$	$\Delta\rho_s = 30 \text{ kg m}^{-3}$
$\rho = 8.617 \times 10^2 \text{ kg m}^{-3}$	$\Delta\rho = 1 \text{ kg m}^{-3}$
$t = 7.308 \text{ s}$	$\Delta t = 9.10 \times 10^{-3} \text{ s}$
$\eta = 9.237 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$	$\Delta\eta = 2 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}$

para esta inclinación ΔC del aparato es:

$$\Delta C = \pm 9 \times 10^{-10} \text{ Pa m}^3 \text{ kg}^{-1}.$$

Para 25 mediciones con aceite estandar S3 a 293 K y a 15° de inclinación se tienen los siguientes datos:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= 7.610 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3} & \Delta\rho_0 &= 30 \text{ kg m}^{-3} \\ \rho &= 8.572 \times 10^2 \text{ kg m}^{-3} & \Delta\rho &= 1 \text{ kg m}^{-3} \\ t &= 9.640 \text{ s} & \Delta t &= 6.6 \times 10^{-3} \text{ s} \\ \eta &= 3.785 \times 10^{-2} \text{ Pa.s} & \Delta\eta &= 2 \times 10^{-6} \text{ Pa.s} \end{aligned}$$

para esta inclinación ΔC del aparato es:

$$\Delta C = \pm 3 \times 10^{-9} \text{ Pa m}^3 \text{ kg}^{-1}.$$

Para el viscosímetro de bola rodante, como se ha mostrado en los capítulos anteriores la viscosidad está dada por

$$\eta = C\rho_0 t - C\rho t, \quad \text{A.5}$$

y el error que se puede esperar para esta cantidad es:

$$\begin{aligned} \Delta\eta &= \left[\left(\frac{\partial\eta}{\partial C} \right)^2 (\Delta C)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial\rho_0} \right)^2 (\Delta\rho_0)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial\rho} \right)^2 (\Delta\rho)^2 + \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{\partial\eta}{\partial t} \right)^2 (\Delta t)^2 \right]^{1/2}, \quad \text{A.6} \end{aligned}$$

realizando los cálculos correspondientes se tiene que

$$\begin{aligned} \Delta\eta &= \left[\left((\rho_0 - \rho)t \right)^2 (\Delta C)^2 + \left(Ct \right)^2 (\Delta\rho_0)^2 + \left(Ct \right)^2 (\Delta\rho)^2 + \right. \\ &\quad \left. \left(C(\rho_0 - \rho) \right)^2 (\Delta t)^2 \right]^{1/2}, \quad \text{A.7} \end{aligned}$$

Tomando los valores obtenidos para la constante de calibración del aparato se encuentra que $\Delta\eta = 1 \times 10^{-5}$ Pa.s para 5° , $\Delta\eta = 6 \times 10^{-5}$ Pa.s para 7° y $\Delta\eta = 3 \times 10^{-4}$ Pa.s para 15° .

Para calcular el error en la densidad de la esfera se parte de la conocida ecuación

$$\rho_s = \frac{m}{V} \quad \text{A.8}$$

efectuando el cálculo correspondiente se tiene que:

$$\Delta\rho_s = \left(\left(\frac{\partial\rho_s}{\partial m} \right)^2 (\Delta m)^2 + \left(\frac{\partial\rho_s}{\partial V} \right)^2 (\Delta V)^2 \right)^{1/2}, \quad \text{A.9}$$

aplicando este resultado a la ecuación A.8 se tiene que

$$\Delta\rho_s = \left(\left(\frac{1}{V} \right)^2 (\Delta m)^2 + \left(\frac{m}{V^2} \right)^2 (\Delta V)^2 \right)^{1/2}, \quad \text{A.10}$$

sabiendo que:

$$\begin{aligned} V &= 2.68 \times 10^{-7} \text{ m}^3 & \Delta V &= 1 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \\ m &= 2.039 \times 10^{-3} \text{ kg} & \Delta m &= 1 \times 10^{-7} \text{ kg} \end{aligned}$$

se obtiene que el error en la medición de la densidad de la esfera es de

$$\Delta\rho_s = \pm 30 \text{ kg m}^{-3}.$$

Finalmente se calcula el error en la densidad de los líquidos usados, la cual se obtiene utilizando un densímetro de tubo oscilante y como en el caso del viscosímetro se tiene que encontrar experimentalmente la constante del aparato, sólo que en el caso del densímetro se trata de dos constantes A y B. Para la calibración se utilizan dos sustancias de densidad conocida a alguna temperatura.

La densidad en este aparato esta dada por la relación

$$\rho = A + B \tau^2 \quad \text{A.11}$$

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Generalmente estas sustancias son agua y aire dónde ρ_1 y ρ_2 son las densidades de los líquidos y τ_1 y τ_2 son los periodos de oscilación para los líquidos de calibración, se tiene

$$\rho_1 = A + B \tau_1^2, \quad \text{A.12}$$

$$\rho_2 = A + B \tau_2^2, \quad \text{A.13}$$

de estas dos ecuaciones se puede obtener A y B

$$A = \rho_2 - B \tau_2^2, \quad \text{A.14}$$

$$B = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\tau_2^2 - \tau_1^2}. \quad \text{A.15}$$

El error en la medición de la densidad del líquido se cuantifica con la ecuación siguiente:

$$\Delta \rho = \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial A} \right)^2 (\Delta A)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial B} \right)^2 (\Delta B)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \tau} \right)^2 (\Delta \tau)^2 \right]^{1/2}, \quad \text{A.16}$$

ahora el error en B será:

$$\Delta B = \left[\left(\frac{\partial B}{\partial \rho_2} \right)^2 (\Delta \rho_2)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial \rho_1} \right)^2 (\Delta \rho_1)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial \tau_2} \right)^2 (\Delta \tau_2)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial \tau_1} \right)^2 (\Delta \tau_1)^2 \right]^{1/2}, \quad \text{A.17}$$

y finalmente

$$\Delta B = \left[\left(\frac{1}{\tau_2^2 - \tau_1^2} \right)^2 (\Delta \rho_2)^2 + \left(\frac{1}{\tau_2^2 - \tau_1^2} \right)^2 (\Delta \rho_1)^2 + \left[\frac{2\tau_2(\rho_2 - \rho_1)}{(\tau_2^2 - \tau_1^2)^2} \right]^2 (\Delta \tau_2)^2 + \left[\frac{2\tau_1(\rho_2 - \rho_1)}{(\tau_2^2 - \tau_1^2)^2} \right]^2 (\Delta \tau_1)^2 \right]^{1/2}, \quad \text{A.18}$$

y el error en A será

$$\Delta A = \left[\left(\frac{\partial A}{\partial \rho_2} \right)^2 (\Delta \rho_2)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial B} \right)^2 (\Delta B)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial \tau_2} \right)^2 (\Delta \tau_2)^2 \right]^{1/2}, \quad \text{A.19}$$

realizando los cálculos se obtiene que:

$$\Delta A = \left[(\Delta \rho_2)^2 + (\tau_2^2)^2 (\Delta B)^2 + (2B\tau_2)^2 (\Delta \tau_2)^2 \right]^{1/2}, \quad \text{A.20}$$

si los valores que se tienen de las variables y sus errores son

$\rho_1 = 995.6474 \text{ kg m}^{-3}$	$\Delta \rho_1 = 0.05 \text{ kg m}^{-3}$
$\tau_1 = 2862.2169 \text{ s}^{-1}$	$\Delta \tau_1 = 3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$
$\rho_2 = 0.897 \text{ kg m}^{-3}$	$\Delta \rho_2 = 5 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-3}$
$\tau_2 = 2957.8937 \text{ s}^{-1}$	$\Delta \tau_2 = 9 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

la densidad medida con este aparato es precisa dentro del $\pm 0.2 \text{ kg m}^{-3}$.