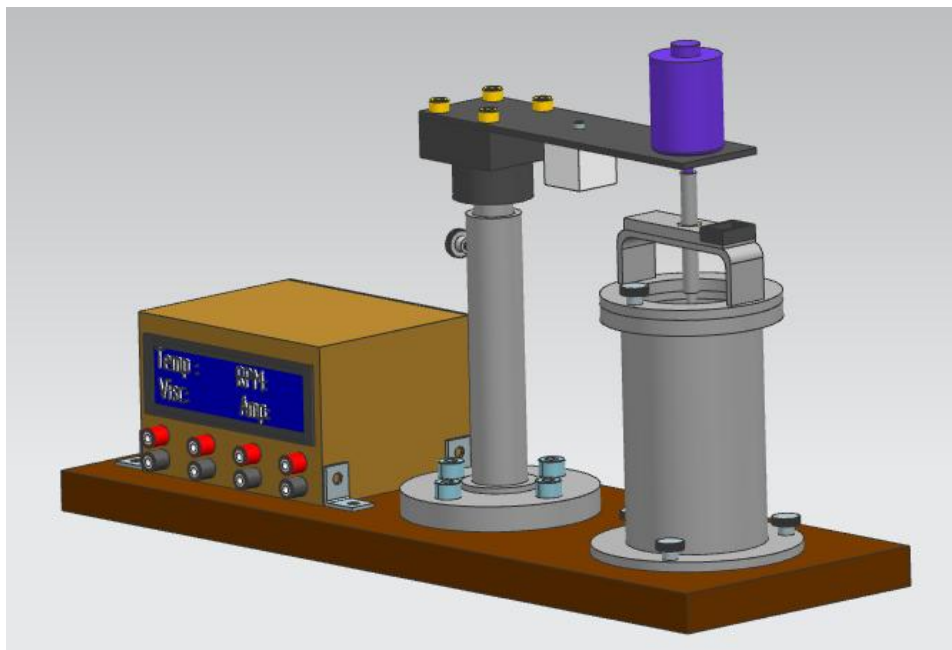


INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO FINAL: “VISCOSÍMETRO DE CILINDROS CONCÉNTRICOS”

Profesores: Ing. Antonio Lotorto
Ing. Hugo Garbuglia

Alumno: Paz, Gustavo



Año 2020

Contenido

1. Introducción.....	2
2. Nociones fundamentales.....	3
3. Ley de viscosidad de Newton	5
4. Viscosidad cinemática vs. Viscosidad absoluta	8
5. Importancia de la viscosidad de los aceites	10
6. Tipos de viscosímetros	14
7. Objetivo del proyecto	20
8. Viscosímetro de cilindros concéntricos	21
8.1 Principio de funcionamiento	21
8.2 Diseño del aparato	27
8.2.1 Materiales utilizados	27
8.3 Cálculo del par del motor.....	34
8.4 Cálculo de la viscosidad a partir de la lectura de datos.....	35
8.5 Cálculo del factor de corrección	36
8.6 Elección de la velocidad del motor.....	37
9. Técnica operativa.....	40
10. Planos mecánicos.....	42
11. Anexo.....	43
12. Bibliografía	44

1. Introducción

La rama de la mecánica aplicada que estudia el comportamiento de los fluidos ya sea en reposo o en movimiento constituye la mecánica de los fluidos y la hidráulica. En el desarrollo de los principios de la mecánica de los fluidos algunas de las propiedades de los fluidos juegan un papel preponderante, mientras que otras o influyen poco o nada. En la estática de los fluidos, el peso específico es la propiedad importante, mientras que en el flujo de los fluidos la densidad y la viscosidad son las que predominan.

En los procesos industriales es importante conocer las propiedades físico-químicas de las sustancias con las que se trabajan y en especial la viscosidad de los fluidos. La mecánica de los fluidos, como área de estudio, se ha desarrollado gracias al entendimiento de las propiedades de los fluidos, a la aplicación de las leyes básicas de la mecánica y la termodinámica y a una experimentación ordenada.

Las mediciones de viscosidad son importantes en la industria para apoyar los cálculos de flujo de líquidos, en la determinación de coeficientes de transferencia de calor y en el control de los procesos químicos. La viscosidad se utiliza como un indicador cuantitativo de calidad en la industria de los aceites, la petroquímica, de los alimentos, la farmacéutica, la textil, de las pinturas, entre otras. A nivel industrial, existe un número indefinido de equipos, con diferentes diseños, que se utilizan para medir viscosidad. Por lo tanto, los resultados que se obtienen varían dependiendo de las unidades en que se reporta la viscosidad.

Para la realización de este proyecto indagamos en el campo de la mecánica de los fluidos, centrándonos en la Ley de viscosidad de Newton de la cual parte el estudio de la viscosidad de los fluidos, dándonos el pie para la formulación del presente trabajo.

Mediante el viscosímetro de cilindros concéntricos vamos a poder determinar el comportamiento de la viscosidad de distintos tipos de aceites en función de la temperatura.

2. Nociones fundamentales

- Definición de fluido:

Los fluidos son sustancias capaces de fluir y se adaptan a la forma de los recipientes que lo contienen, ocupan un volumen definido y tienen superficies libres. Se deforman continuamente cuando se someten a una tensión de cortadura, por muy pequeña que ésta sea. Una fuerza cortante es la componente tangente a la superficie de la fuerza y esta fuerza, dividida por el área de la superficie, es la tensión de cortadura media sobre el área considerada.

Los fluidos pueden dividirse en líquidos y gases. La diferencia esencial entre un líquido y un gas es que los líquidos son prácticamente incompresibles y los gases son compresibles.

- Sistema técnico de unidades:

Las magnitudes fundamentales seleccionadas son la longitud, fuerza y tiempo. Las unidades son el metro, el kilogramo fuerza (o kilogramo peso) y el segundo, respectivamente. El resto de las unidades de las restantes magnitudes pueden deducirse a partir de estas. Así, la unidad de volumen es el m^3 , la unidad de la aceleración es m/seg^2 , la del trabajo es $kg.m$ y la unidad de presión es kg/m^2 .

Como unidad de masa usaremos el kilogramo masa y la unidad técnica de masa (UTM) que se determina a partir del segundo principio de Newton: $1\text{ UTM} = 1\text{ kg}.seg^2/m$

- Peso específico, volumen específico, densidad y densidad relativa:

El peso específico de una sustancia (γ) es el peso de la unidad de volumen de dicha sustancia.

La densidad (ρ) de un fluido se define como su masa por unidad de volumen.

El volumen específico (v) es la inversa de la densidad, es decir, es el volumen que ocupa la unidad de masa.

La densidad relativa de un cuerpo es un número adimensional que viene dado por la relación del peso del cuerpo y el peso de un volumen igual de una sustancia que se toma como referencia, normalmente el agua en condiciones normales. O mejor dicho la relación entre los pesos específicos.

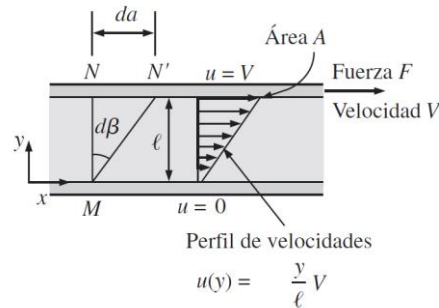
- Viscosidad de un fluido:

De todas las propiedades del fluido es ésta la que requiere mayor atención en el estudio del movimiento del fluido. La viscosidad de un fluido es aquella propiedad que determina la cantidad de resistencia opuesta a las fuerzas cortantes. La viscosidad se debe primordialmente a las interacciones entre las moléculas del fluido.

La resistencia de un fluido a la tensión de cortadura depende de su cohesión y del grado de transferencia de cantidades de movimiento de sus moléculas. Un líquido, con moléculas muchas más cercanas que un gas, tiene fuerzas de cohesión mayores que este. La cohesión parece ser la causa predominante de la viscosidad de un líquido, y como la cohesión disminuye con la temperatura, a la viscosidad le sucederá lo mismo.

3. Ley de viscosidad de Newton

Para obtener una relación para la viscosidad, considérese una capa de fluido entre dos placas paralelas muy grandes (o, lo que es equivalente, dos placas paralelas sumergidas en una gran masa de fluido) separadas por una distancia l . Ahora se aplica una fuerza paralela constante F a la placa superior, en tanto que la placa inferior se mantiene fija. Después de los efectos transitorios iniciales, se observa que la placa superior se mueve de manera continua, bajo la influencia de esta fuerza, a una velocidad constante V .



El fluido, en contacto con la placa superior, se pega a la superficie de ésta y se mueve con ella a la misma velocidad, y el esfuerzo cortante τ que actúa sobre esta capa de fluido es:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

donde A es el área de contacto entre la placa y el fluido. Nótese que la capa de fluido se deforma de manera continua bajo la influencia del esfuerzo cortante.

El fluido en contacto con la placa inferior toma la velocidad de esa placa, la cual es cero (debido a la condición de no-deslizamiento). En el flujo laminar estacionario, la velocidad del fluido entre las placas varía de manera lineal entre 0 y V , y así, el perfil de velocidad y el gradiente de velocidad son:

$$u(y) = \frac{y}{l} V \quad y \quad \frac{du}{dy} = \frac{V}{l}$$

donde y es la distancia vertical medida desde la placa inferior.

Durante un intervalo diferencial de tiempo dt , los lados de las partículas del fluido a lo largo de una recta vertical MN giran describiendo un ángulo diferencial $d\beta$ al mismo tiempo que la placa superior se mueve una distancia diferencial $da = Vdt$. El desplazamiento o deformación angular (o deformación por esfuerzo cortante) se puede expresar como:

$$d\beta \approx \tan \beta = \frac{da}{l} = \frac{Vdt}{l} = \frac{du}{dy} dt$$

Si se reordena, la razón de deformación bajo la influencia del esfuerzo cortante τ queda:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{du}{dy}$$

Por lo que se concluye de que la razón de deformación de un elemento de fluido equivale al gradiente de velocidad, du/dy . Además, se puede verificar de manera experimental que, para la mayoría de los fluidos, la razón de deformación (γ , por lo tanto, el gradiente de velocidad) es directamente proporcional al esfuerzo cortante τ ,

$$\tau \propto \frac{d\beta}{dt} \quad \text{o} \quad \tau \propto \frac{du}{dy}$$

Los fluidos para los cuales la razón de deformación es proporcional al esfuerzo cortante se llaman fluidos newtonianos en honor de sir Isaac Newton, quien lo expresó por primera vez en 1687. La mayoría de los fluidos comunes, como el agua, el aire, la gasolina y los aceites son newtonianos. La sangre y los plásticos líquidos son ejemplos de fluidos no-newtonianos. En el flujo unidimensional de fluidos newtonianos, el esfuerzo cortante se puede expresar mediante la relación lineal, la cual es conocida como la Ley de Newton de la viscosidad:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

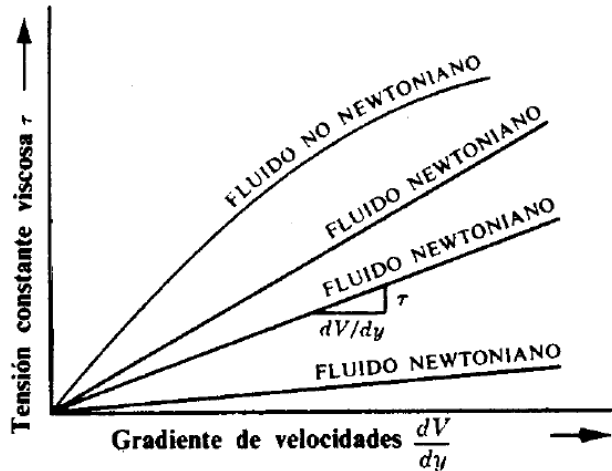
Donde la constante de proporcionalidad μ se llama coeficiente de viscosidad o viscosidad dinámica (o absoluta) del fluido, cuya unidad es $\text{kg/m} \cdot \text{s}$, o de modo equivalente, $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$ (o $\text{Pa} \cdot \text{s}$, en donde Pa es la unidad de presión pascal). Una unidad común de la viscosidad es el poise, el cual equivale a $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (o el centipoise, el cual es un centésimo de poise).

El Poise (en el sistema CGM) es definido como la fuerza (medida en dynas) necesaria para mover un centímetro cuadrado sobre una superficie paralela a la primera a la velocidad de 1 cm por segundo, con las superficies separadas por una película lubricante de 1 cm de espesor.

La medida más común en la mecánica se conoce como viscosidad cinemática, o “centistock” abreviada cSt y se representa por ν . Para calcular la viscosidad cinemática basta con dividir la viscosidad dinámica o absoluta por la densidad del fluido.

Fluidos newtonianos y no newtonianos:

Los fluidos newtonianos se comportan de acuerdo con la ley $\tau = \mu (du/dy)$, o bien que la tensión cortante es proporcional al gradiente de velocidades o velocidades de deformación tangencial. Por lo tanto, para estos fluidos, la gráfica de la tensión cortante en función del gradiente de velocidades es una línea recta que pasa por el origen. La pendiente de esta recta determina la viscosidad.



Los fluidos no newtonianos se deforman de manera que la tensión cortante no es proporcional a la velocidad de deformación tangencial (la razón de deformación no es lineal), excepto quizá a tensiones cortantes muy pequeñas. La deformación de estos fluidos pudiera clasificarse como plástica.

4. Viscosidad cinemática vs. Viscosidad absoluta

Hay dos formas diferentes en las que se puede expresar la viscosidad: viscosidad absoluta y viscosidad cinemática. La diferencia clave entre las dos es que la viscosidad cinemática se mide observando la resistencia a fluir de un fluido bajo la fuerza de la gravedad, mientras que la viscosidad absoluta se mide observando la resistencia a fluir del fluido bajo una fuerza externa controlada, ya sea a través de un capilar o por el movimiento de un cuerpo dentro del fluido.

La viscosidad cinemática [ν] se reporta en centistokes (cSt), mientras que la viscosidad absoluta [μ] está en centipoises (cP). Con fines de comparación, la viscosidad absoluta se puede convertir a viscosidad cinemática dividiéndola entre el peso específica del fluido (ρ).

$$\nu = \mu / \rho$$

La viscosidad de un fluido depende tanto de la temperatura como de la presión, aun cuando la dependencia respecto a la presión es más bien débil.

Para los líquidos la viscosidad dinámica y la cinemática son prácticamente independientes de la presión y suele descartarse cualquier variación pequeña con ésta, excepto a presiones extremadamente elevadas.

La viscosidad depende significativamente de la temperatura e indicar un valor de ella sin mencionar una temperatura correspondiente tiene poco sentido. Por lo tanto, también tiene que medirse la temperatura del fluido durante el experimento y darse con este cálculo.

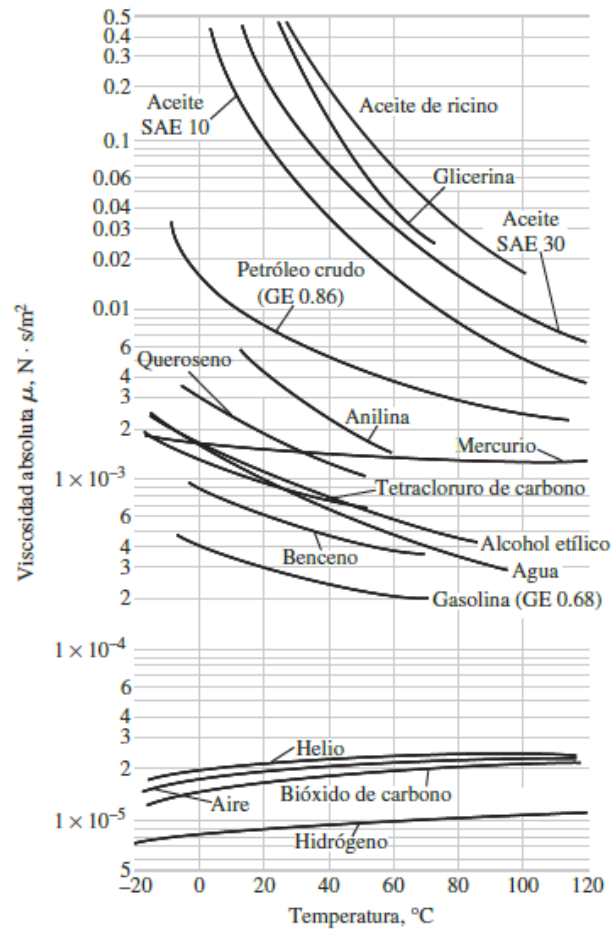
Las viscosidades de algunos fluidos a temperatura ambiente se muestran en la siguiente tabla y se grafican contra la temperatura en la figura de al lado.

Observe que las viscosidades de fluidos distintos son diferentes en varios órdenes de magnitud. También observe que es más difícil mover un objeto en un fluido de mayor viscosidad, como el aceite de motor, que en un fluido de menor viscosidad como el agua. Los líquidos, en general, son mucho más viscosos que los gases.

Viscosidades dinámicas de algunos fluidos a 1 atm y 20°C (a menos que se indique otra cosa)

Fluido	Viscosidad dinámica μ , kg/m · s
Glicerina:	
-20°C	134.0
0°C	10.5
20°C	1.52
40°C	0.31
Aceite para motor:	
SAE 10W	0.10
SAE 10W30	0.17
SAE 30	0.29
SAE 50	0.86
Mercurio	0.0015
Alcohol etílico	0.0012
Agua:	
0°C	0.0018
20°C	0.0010
100°C (líquido)	0.00028
100°C (vapor)	0.000012
Sangre, 37°C	0.00040
Gasolina	0.00029
Amoniaco	0.00015
Aire	0.000018
Hidrógeno, 0°C	0.0000088

Variación de la viscosidad dinámica (absoluta de fluidos comunes con la temperatura a 1 atm ($1 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 1 \text{ kg}/\text{m} \cdot \text{s} = 0.020886 \text{ lbf} \cdot \text{s}/\text{ft}^2$).



5. Importancia de la viscosidad de los aceites

En tribología y la lubricación, con frecuencia se habla de la viscosidad como la característica más importante de un aceite básico. ¿Por qué es tan importante para la lubricación de una máquina? Por un lado, una viscosidad muy baja podría permitir que se presente contacto entre las superficies de los componentes en movimiento en el interior de la máquina, generando desgaste. Por otro lado, una viscosidad muy elevada podría forzar a la máquina y hacerla trabajar con más dificultad para vencer la resistencia interna del lubricante. Solamente la viscosidad correcta maximizará la vida útil y la eficiencia del motor, transmisión, sistema hidráulico o la aplicación que sea. Por esta razón, es importante entender no sólo la viscosidad del aceite básico, sino también cómo puede cambiar debido a las variantes en las condiciones operacionales.

Normalmente se habla de viscosidad ISO para aceites industriales y viscosidad SAE para aceites automotriz. Los términos de viscosidad ISO y SAE no implican ninguna combinación de aditivos ni propósito específico. Solamente refieren a la viscosidad.

Las viscosidades de los aceites normalmente son medidas y especificadas en centistoke (cSt) a 40°C o 100°C., siendo esta la viscosidad cinemática. Esto es la viscosidad absoluta dividido por la densidad del aceite.

Cuando se usa el término “Viscosidad ISO”, se refiere a la viscosidad del aceite en cSt a 40°C (ISO 46 = 46 cSt a 40°C, ISO 150 = 150 cSt a 40°C, etc.). El término “VG” simplemente refiere al Viscosity Grade (Grado de Viscosidad) (VG 46, VG 68, etc.) bajo la norma DIN 51519.

Tabla de viscosidad DIN 51519

Viscosidad ISO	Viscosidad a 40 °C [mm ² /s]	Límites de viscosidad	
Nominal	Media	Mínima	Máxima
ISO VG 2	2.2	1.98	2.42
ISO VG 3	3.2	2.88	3.52
ISO VG 5	4.6	4.14	5.06
ISO VG 7	6.8	6.12	7.48
ISO VG 10	10	9.00	11
ISO VG 15	15	13.50	16.5
ISO VG 22	22	19.80	24.2
ISO VG 32	32	28.80	35.2
ISO VG 46	46	41.40	50.6
ISO VG 68	68	61.20	74.8
ISO VG 100	100	90.00	110
ISO VG 150	150	135.00	165
ISO VG 220	220	198.00	242
ISO VG 320	320	288.00	352
ISO VG 460	460	414.00	506
ISO VG 680	680	612.00	748
ISO VG 1000	1000	900.00	1100
ISO VG 2200	2200	1,980.00	2420
ISO VG 3200	3200	2,880.00	3520

Para el uso automotriz se utiliza una tabla de viscosidades criada por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) basada en la viscosidad cinemática (cSt) a 100°C para la temperatura de operación y una tabla especial de viscosidad en bajas temperaturas para cuidar el motor en el momento de arranque en frío (se define "frío" como temperaturas debajo de 20°C). El comportamiento en calor y frío depende de su índice de viscosidad y aditivos de bombeabilidad que mejoran su punto de fluidez.

Viscosidad SAE N°	Centistokes				Centipoises			
	0°F		210°F		0°F		210°F	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
5w	-	1200	-	-	-	1300	-	-
10W	1200	2400	-	-	1300	2600	-	-
20	-	-	4.7	7.9	-	-	5.7	9.6
30	-	-	7.9	10.6	-	-	9.6	12.9
40	-	-	10.6	13.9	-	-	12.9	16.8
50	-	-	13.9	18.7	-	-	16.8	22.7

Grado de Viscosidad SAE	Viscosidad a Baja Temperatura (°C) , cP		Viscosidades en alta temperatura (°C)		
	Máx. Arranque	Máx. de Bombeo (Sin esfuerzo)	Cinemática (cSt) a 100°C mín.	Cinemática (cSt) a 100°C máx.	Alta Tasa de Corte (cP) a 150°C D4683, D4741 y D5481
0W	6 200 a -35	60 000 a -40	3,8	-	-
5W	6 600 a -30	60 000 a -35	3,8	-	-
10W	7 000 a -25	60 000 a -30	4,1	-	-
15W	7 000 a -20	60 000 a -25	5,6	-	-
20W	9 500 a -15	60 000 a -20	5,6	-	-
25W	13 000 a -10	60 000 a -15	9,3	-	-
20	-	-	5,6	< 9,3	2,6
30	-	-	9,3	<12,5	2,9
40	-	-	12,5	<16,3	3,5 (0W-40, 5W-40, 10W-40)
40	-	-	12,5	<16,3	3,7 (15W-40, 20W-40, 25W-40, 40)
50	-	-	16,3	< 21,9	3,7
60	-	-	21,9	< 26,1	3,7

Por otra parte, también se utilizan los aceites en circuitos hidráulicos, transmitiendo fuerza y movimiento.

La forma de denominar a los fluidos hidráulicos está regulada según la norma DIN 51524 y 51525. Así, los fluidos hidráulicos siguiendo esta normativa se denominan todos con la letra H a la que se le añaden otras letras, para indicar el tipo de aditivos o propiedades del

fluido. A continuación, se muestra la designación de algunos de los fluidos hidráulicos según su tipo:

- Aceites minerales o sintéticos:
 - HH: si se trata de un aceite mineral sin aditivos;
 - HL: si se trata de un aceite mineral con propiedades antioxidantes y anticorrosivas;
 - HP (ó HLP): aceite tipo HL con aditivos que mejoran la resistencia a cargas;
 - HM (ó HLM): aceite mineral tipo HL que incluye además aditivos anti desgaste;
 - HV: aceite tipo HM que además incorpora aditivos que mejoran su índice de viscosidad.

En ocasiones, a las siglas anteriores se les agrega un número que indica el coeficiente de viscosidad según DIN 51517 (clasificación de viscosidad según ISO). Ejemplo, HLP 68 nos indica lo siguiente:

H: se trata de aceite hidráulico;

L: con aditivos para protección anticorrosivas, con propiedades antioxidantes;

P: posee aditivos que mejora la carga;

68: código de viscosidad, según DIN 51517.

La viscosidad de un fluido está relacionada en forma directa con la potencia de bombeo que se necesita para transportar un fluido en un tubo, la pérdida de energía debida a la fricción en un fluido se debe a su viscosidad.

El régimen de flujo laminar se caracteriza por líneas de corriente suaves y movimiento sumamente ordenado, que es lo que sucede en el ensayo del viscosímetro rotacional.

En un circuito hidráulico el flujo del fluido corresponde al régimen laminar a bajos valores del número de Reynolds ($Re \leq 2300$) y suele darse a pequeñas velocidades, en tubos con pequeño diámetro y con fluidos muy viscosos (aceites). En estas condiciones, las fuerzas viscosas predominan sobre las de inercia. Estando el número de Reynolds influenciado por la viscosidad absoluta del fluido.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{V_{prom} \cdot D}{\nu} = \frac{\rho \cdot V_{prom} \cdot D}{\mu}$$

Donde V_{prom} velocidad de flujo promedio (m/s), D longitud característica de la geometría (diámetro en este caso, en m), y $\nu = \mu/\rho$ viscosidad cinemática del fluido (m^2/s).

Un elemento de interés en el análisis de flujo de tubería es la caída de presión ΔP , porque está directamente relacionada con la potencia necesaria para que la bomba mantenga el flujo y está dada por la ecuación:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{32 \cdot \mu \cdot L \cdot V_{prom}}{D^2}$$

Nótese que a partir de la ecuación mencionada la caída de presión es proporcional a la viscosidad absoluta μ del fluido, y ΔP sería cero si no hubiera fricción. Por lo tanto, la caída de presión de P_1 a P_2 , en este caso, se debe por completo a efectos viscosos, y la ecuación representa una pérdida de presión cuando un fluido de viscosidad μ fluye a través de una tubería de diámetro uniforme D y longitud L a la velocidad promedio V_{prom} .

En el análisis de los sistemas de tuberías, las pérdidas de presión comúnmente se expresan en términos de la altura de la columna de fluido equivalente, llamada pérdida de carga h . A partir de la estática de fluidos que $\Delta P = \rho \cdot g \cdot h$ y, por lo tanto, una diferencia de presión de ΔP corresponde a una altura de fluido:

$$h = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g}$$

La pérdida de carga h representa la altura adicional que el fluido necesita para elevarse por medio de una bomba con la finalidad de superar las pérdidas por fricción en la tubería. La pérdida de carga se produce por la viscosidad y se relaciona directamente con el esfuerzo de corte de la pared del tubo.

En la práctica, es conveniente expresar la pérdida de presión en función del factor de fricción el cual también está en función del número de Reynolds en flujo laminar y es independiente de la rugosidad de la superficie de la tubería.

6. Tipos de viscosímetros

Los equipos con que se determina la viscosidad de un fluido, se pueden dividir en dos categorías:

- a) viscosímetros para obtener viscosidades absolutas
- b) viscosímetros para obtener viscosidades cinemáticas

Los primeros se basan en la resistencia que ofrece el fluido al movimiento cuando una superficie sólida se mueve en su seno. Como ejemplo de estos viscosímetros tenemos los de caída de la esfera, de Codatte-Ratsahek, de plato y cono, de cilindros concéntricos (o de Stormer).

Los viscosímetros que determinan viscosidades cinemáticas se basan en el tiempo que requiere un determinado volumen de fluido en pasar libremente a través de un orificio normalizado, por ejemplo, los viscosímetros de Saybolt, Saybolt Furol, Engler.

Descripción de los equipos

- Viscosímetro de caída de la esfera (de Poiseuille):

Este equipo es un simple tubo de vidrio o plástico que se llena con el fluido cuya viscosidad se quiere determinar y permite obtener la velocidad límite que alcanza la esfera de un material determinado (acero, vidrio, etcétera), que se deja caer en su seno.

Como se sabe, la fórmula que da la viscosidad del fluido en función de la velocidad límite, es la siguiente, llamada ecuación de Stokes:

$$\mu = \frac{2}{9} * r^2 * (\rho_S - \rho_L) * \frac{g}{V_1}$$

siendo:

ρ_S : densidad de la esfera.

ρ_L : densidad del líquido.

r: radio de la esfera.

V_1 : velocidad límite alcanzada por la esfera.

Esta ecuación es válida siempre y cuando la esfera caiga en régimen laminar y el diámetro de ésta sea pequeño comparado con el diámetro del tubo. Se considera que el régimen es laminar cuando el número de Reynolds definido por: $Re = \frac{\rho_L * V_1 * d}{\mu}$ sea menor a 0,1.

Siendo d, en la ecuación anterior el diámetro de la esfera.

- Viscosímetro de Saybolt:

Este equipo consiste en un recipiente destinado a contener el fluido cuya viscosidad se quiere determinar y que tiene en su parte inferior un orificio de diámetro normalizado. Este recipiente se halla a su vez dentro de otro que le sirve de baño calefactor, para poder determinar viscosidades a distintas temperaturas. Este viscosímetro posee un mechero para calefacción solidario al equipo.

Una clase especial de viscosímetro Saybolt es el denominado de Saybolt – Furol, que tiene idénticos principios de funcionamiento, pero su orificio tiene un diámetro mayor y sirve para fluidos cuyas viscosidades son altas (desde 480 cp en adelante). La denominación “Furol” proviene de la contracción de las palabras “Fuel and Road Oil”.

- Viscosímetro de Engler:

El principio de funcionamiento de este equipo es igual al de los viscosímetros Saybolt. Las diferencias residen en las formas de obturar los orificios normalizados y en que el viscosímetro de Engler no dispone de mecheros para calefacción incorporados, sino que la misma debe realizarse por algún medio externo.

Como ya fue mencionado, en los viscosímetros de Saybolt y Engler, se determinan viscosidades cinemáticas, que se obtienen midiendo el tiempo de efusión de 60ml de fluido a través de un orificio normalizado que se recogen en un balón aforado y previamente calibrado.

Los resultados de viscosidad cinemática obtenidos se expresan en base al tiempo de efusión en: Segundos Saybolt Universal o Segundos Engler Universal.

Estos resultados se pueden relacionar con la viscosidad cinemática en centistokes mediante la siguiente expresión, en la que θ representa el tiempo de efusión:

$$V = A * \theta - \frac{B}{\theta}$$

Las constates A y B para ambos viscosímetros se expresan en la siguiente tabla:

	A	B
Saybolt	0,22	180
Engler	0,5023	91,83

- Viscosímetro capilar de vidrio:

Los viscosímetros capilares de vidrio están diseñados para dejar pasar a través del capilar un volumen constante de líquido mediante la aplicación de una fuerza reproducible.

Esta fuerza es provista por la presión que ejerce la carga hidrostática debido a los diferentes niveles de las superficies líquidas en el mismo viscosímetro.

El tiempo durante el cual el líquido fluye, es por consiguiente, además de la corrección por energía cinética, proporcional a la razón entre la viscosidad absoluta y la densidad, esta razón es por definición la viscosidad cinemática de un líquido. Se requiere un control exacto de la temperatura y el tiempo de flujo en el uso de este método.

La viscosidad cinemática de un líquido se determina experimentalmente usando la siguiente ecuación:

$$V = C * t$$

siendo:

V: viscosidad cinemática del líquido en cSt

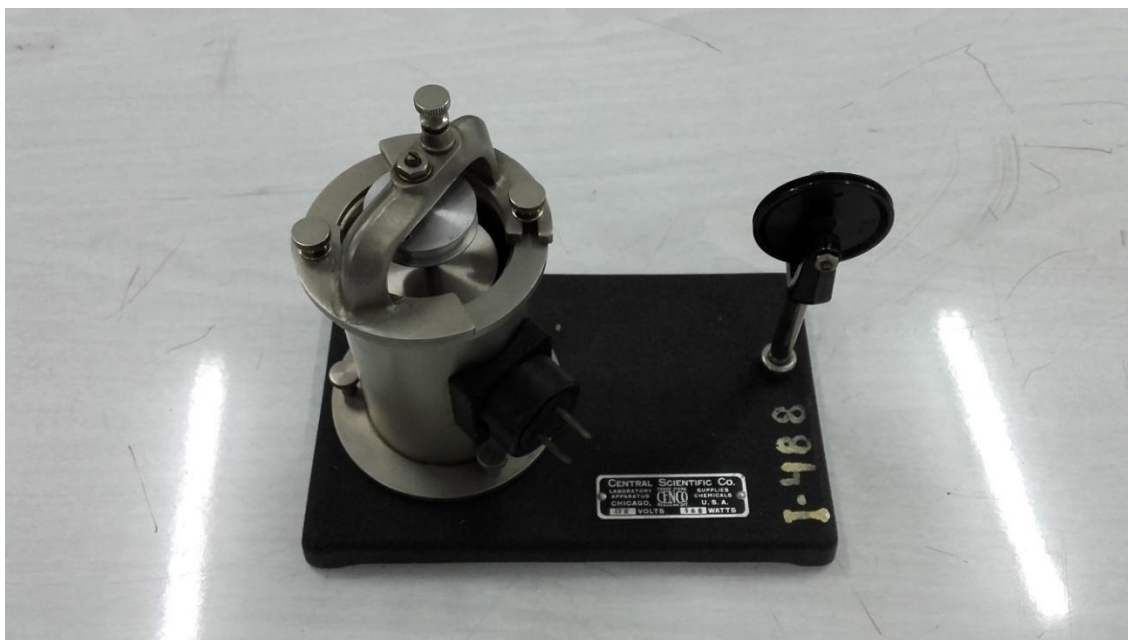
C: constante del viscosímetro

t: tiempo de flujo en segundos

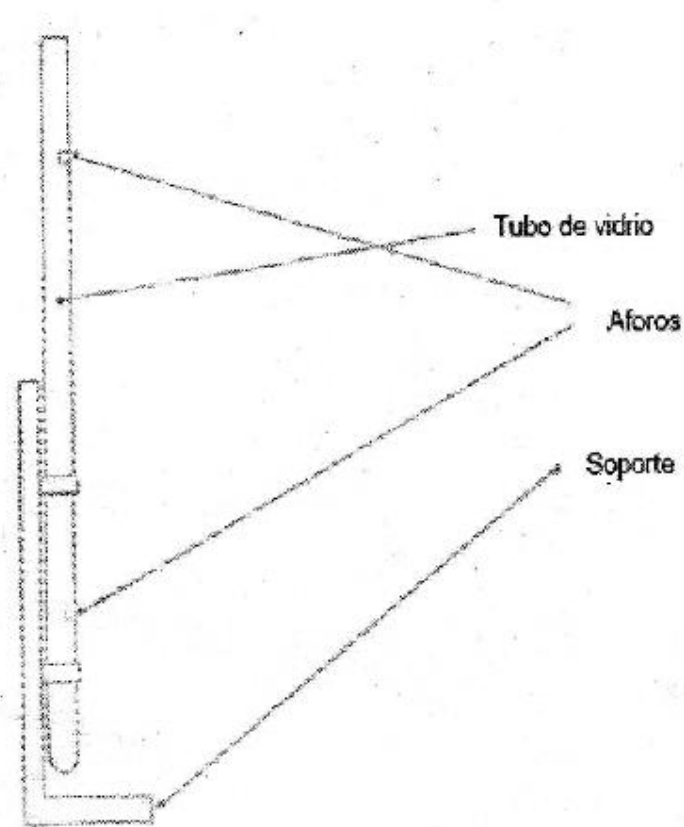
El valor de la constante C se determina mediante el uso de líquidos de viscosidades conocidas o mediante el uso de tablas apropiadas para el viscosímetro en cuestión.

En este tipo de viscosímetros se podrán determinar viscosidades a diferentes temperaturas requiriéndose un baño termostatzado en caso de querer realizar la experiencia a una temperatura diferente a la ambiente. En nuestro caso, sólo lo haremos a temperatura ambiente.

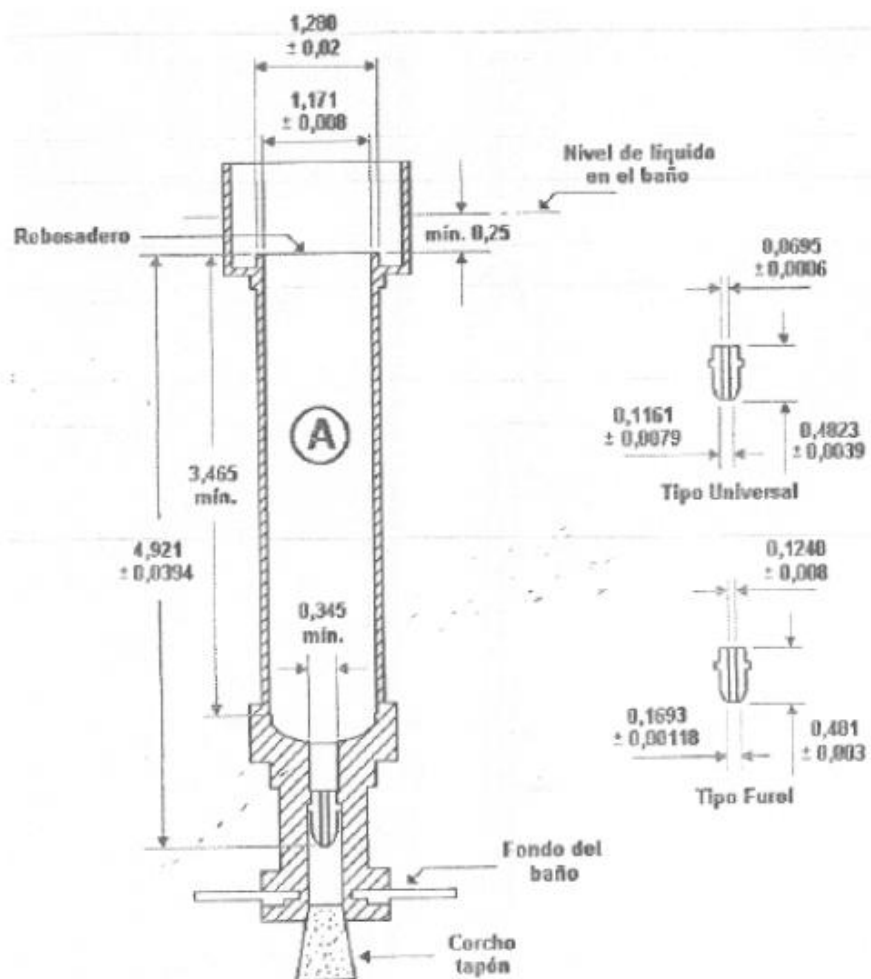
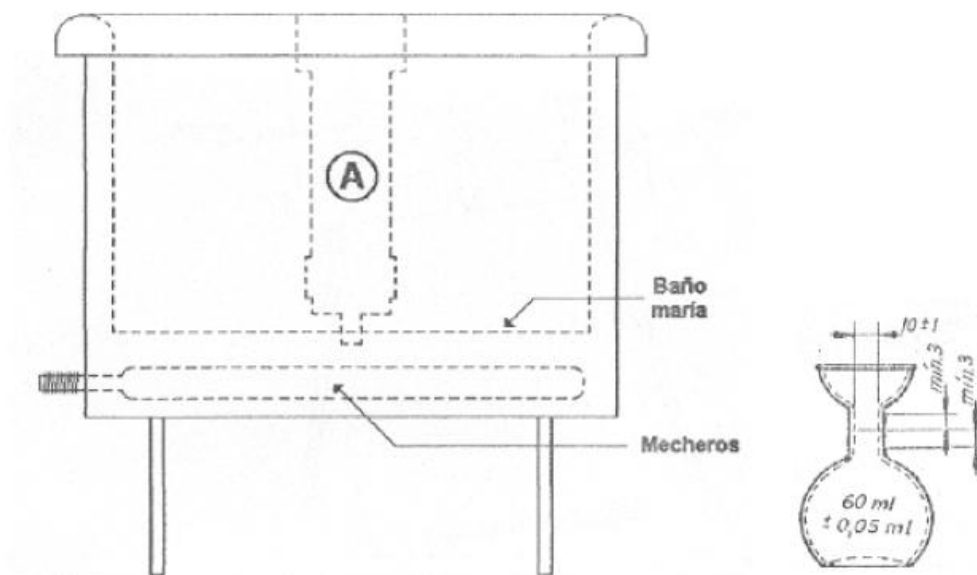
Además, se requiere un soporte que permita que el viscosímetro pueda ser asegurado en una posición vertical.



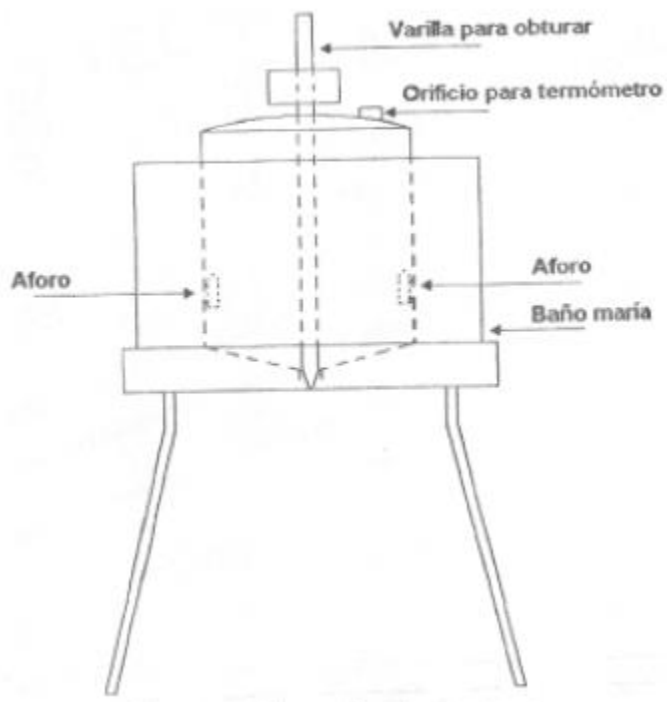
Viscosímetro de cilindros concéntricos



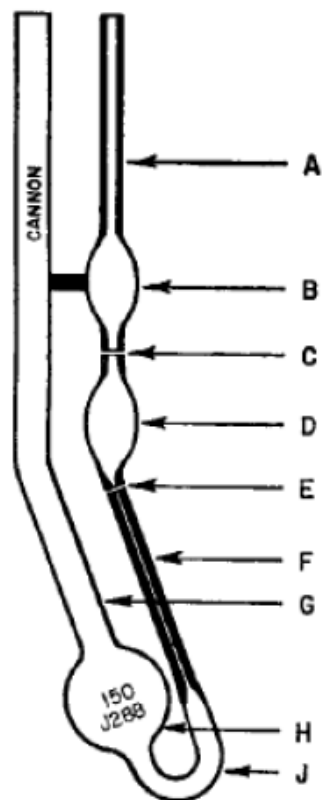
Viscosímetro de caída de la esfera



Viscosímetro de Saybolt



Viscosímetro de Engler



Viscosímetro capilar de vidrio

7. Objetivo del proyecto

El objetivo que persigue nuestro proyecto es el desarrollo de ingeniería para adaptar un viscosímetro de cilindros concéntricos existente que funciona manualmente, para que trabaje con un motor y un microprocesador, de esta manera asegurar una medición exacta del nivel de viscosidad de fluidos a diferentes temperaturas. Esto elimina por completo los errores humanos al momento de calcular el valor de la viscosidad.

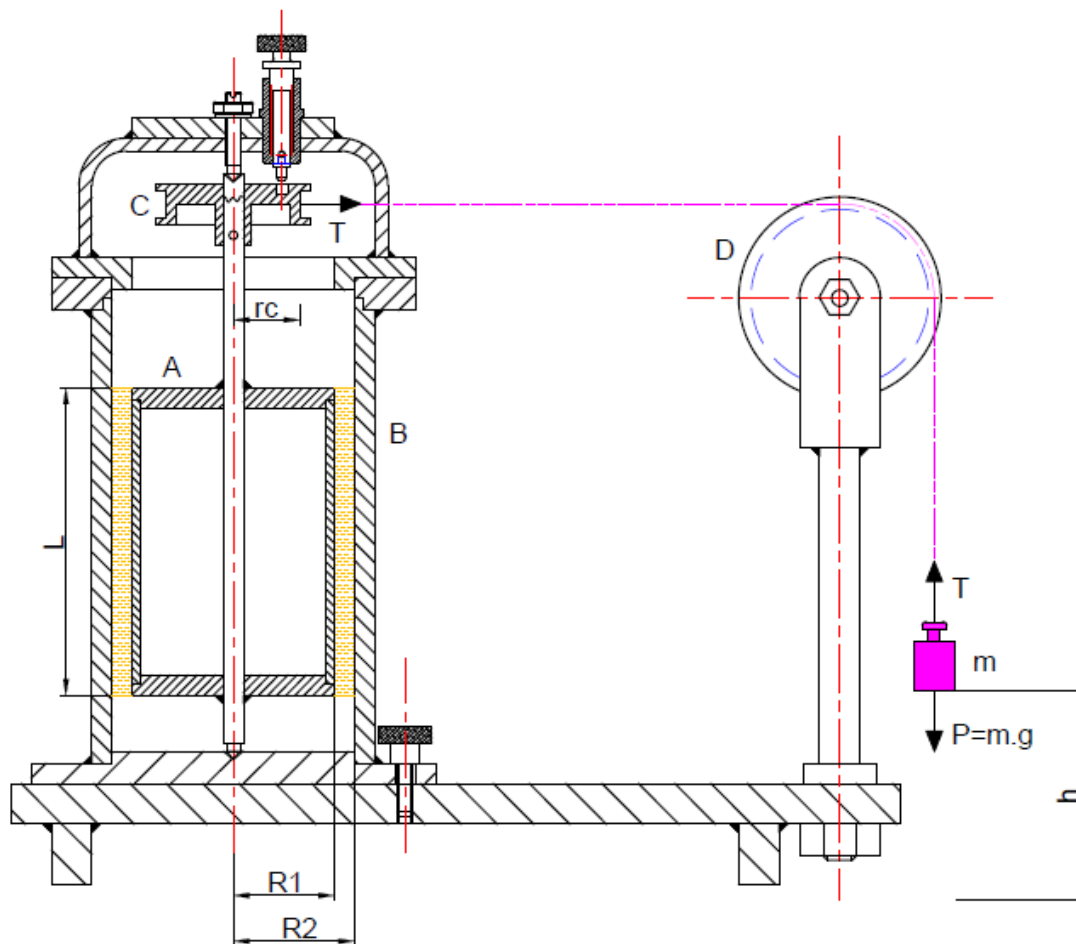
Su nivel de exactitud y precisión en las mediciones será alto. Buscando que sea confiable, de bajo costo y simple de operar.

8. Viscosímetro de cilindros concéntricos

8.1 Principio de funcionamiento

Para explicar el principio de funcionamiento partimos del siguiente ejemplo mostrado en la figura:

El viscosímetro de la firma Central Scientific Company (CENCO), consiste esencialmente en dos cilindros metálicos A y B de diferentes radios montados coaxialmente, uno dentro del otro, sobre una base rígida. El cilindro interno A descansa en un cojinete cónico para girar con muy poca fricción en el interior dentro del cilindro estacionario B, el líquido bajo investigación está contenido en el espacio entre los cilindros. El eje del cilindro interior en la parte superior tiene una polea motora C, alrededor de la cual está envuelto una cuerda, que pasa sobre una polea exterior D, y lleva una masa m en su extremo.



L: altura del cilindro interior

R1: radio exterior del cilindro interior

R2: radio interior del cilindro exterior

rc: radio de la polea motora

m: masa

h: altura que cae la masa

Para encontrar el valor de la viscosidad absoluta debemos aplicar la Ley de la viscosidad de Newton:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Al dejar caer la masa, el cilindro interior gira con una velocidad angular ω . Debemos tomar el tiempo que tarda en caer la masa y conocer la distancia que recorre para conocer la velocidad tangencial de la polea C, este movimiento se transmite a través de la cuerda.

ω : velocidad angular del cilindro C

$V_A = \omega \cdot R_1$ Velocidad tangencial del cilindro A

$V_C = \omega \cdot r_C$ Velocidad tangencial de la polea C

La velocidad de la polea C es la misma velocidad con la que cae la masa durante el tiempo t, por lo tanto:

$$V_C = \frac{h}{t}$$

La velocidad del cilindro A nos queda:

$$V_A = \frac{h \cdot R_1}{r_C \cdot t}$$

La tensión T de la cuerda sobre la polea C genera un torque que se transmite, a través del eje, al cilindro interior A. Este es nuestro torque o momento aplicado que necesitamos conocer para calcular la fuerza tangencial alrededor de toda la superficie lateral del cilindro interior A.

Si despreciamos la masa de la cuerda y la fricción que se puede generar en las poleas, del esquema podemos observar que la tensión de la cuerda va a ser igual al peso de nuestro objeto que dejamos caer:

$$T = \text{Peso} = m \cdot g$$

El momento generado en la polea C:

$$M_{\text{aplicado}} = T \cdot r_c$$

Este par aplicado es igual y opuesto al par que ejerce el fluido a la rotación del cilindro debido a la viscosidad, este es nuestro par resistente:

$$M_{\text{aplicado}} = M_{\text{resistente}}$$

Además, sabemos que la tensión tangencial es:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

F es la fuerza tangencial al cilindro y A es el área lateral:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$$

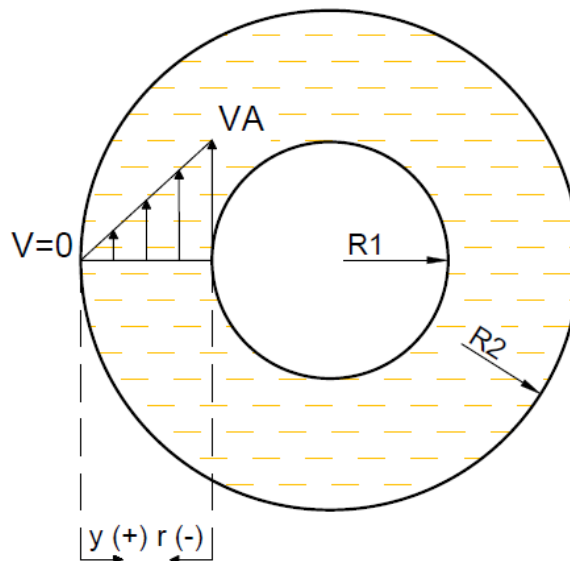
$$F = \tau \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$$

Siendo r un radio genérico entre el radio del cilindro interior y el radio del cilindro exterior.

$$M_{\text{resistente}} = F \cdot r = \tau \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot r = \tau \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l$$

$$\tau = \frac{m \cdot g \cdot r_c}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot r^2}$$

La velocidad del fluido en ensayo se comparte linealmente de la siguiente manera:



Hacemos un cambio de variable:

$$y = -r$$

$$dy = -dr$$

$$V = 0 \rightarrow R_2$$

$$V = V_A \rightarrow R_1$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{\tau}{\mu}$$

$$\frac{du}{-dr} = \frac{\tau}{\mu}$$

Integrado entre radio exterior y radio interior tenemos:

$$\int_0^{V_A} du = \frac{\tau}{\mu} \int_{R_2}^{R_1} -dr$$

$$\int_0^{V_A} du = -\frac{m \cdot g \cdot r_c}{\mu \cdot 2 \cdot \pi \cdot l} \int_{R_2}^{R_1} \frac{dr}{r^2}$$

$$V_A - 0 = -\frac{m \cdot g \cdot r_c}{\mu \cdot 2 \cdot \pi \cdot l} \left[-\frac{1}{r} \right]_{R_2}^{R_1}$$

$$V_A = -\frac{m \cdot g \cdot r_c}{\mu \cdot 2 \cdot \pi \cdot l} \left[-\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right]$$

$$V_A = \frac{m \cdot g \cdot r_c}{\mu \cdot 2 \cdot \pi \cdot l} \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]$$

Despejando la viscosidad absoluta y reemplazando el valor de la velocidad tangencial:

$$\mu = \frac{m \cdot g \cdot t \cdot r_c^2}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot R_1 \cdot l} \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]$$

Esta ecuación permite obtener la viscosidad cuando se considera el torque ejercido por el fluido en contacto con la pared del cilindro interior. En realidad, el cilindro también recibe un torque producto de la fricción con el cojinete de la base y con el fluido que se aloja en el espacio en la parte baja, ya que existe un espacio entre la base de ambos cilindros.

Podría determinarse una expresión matemática para el efecto del torque en la parte baja, pero su formulación es poco precisa ya que el flujo es irregular cerca de los bordes de la base. Esta situación puede simplificarse cuando se considera que, al ser todas las variables

constantes durante el experimento, el efecto en la parte baja también lo es. Entonces, puede introducirse una constante de corrección para los datos mencionados. Por lo que definimos una longitud efectiva, que es la longitud del cilindro sumergida más un factor “e” que debe ser determinado experimentalmente. Por lo tanto, la relación para obtener la viscosidad queda de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{m \cdot g \cdot t \cdot r_c^2}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot R_1 \cdot (l + e)} \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]$$

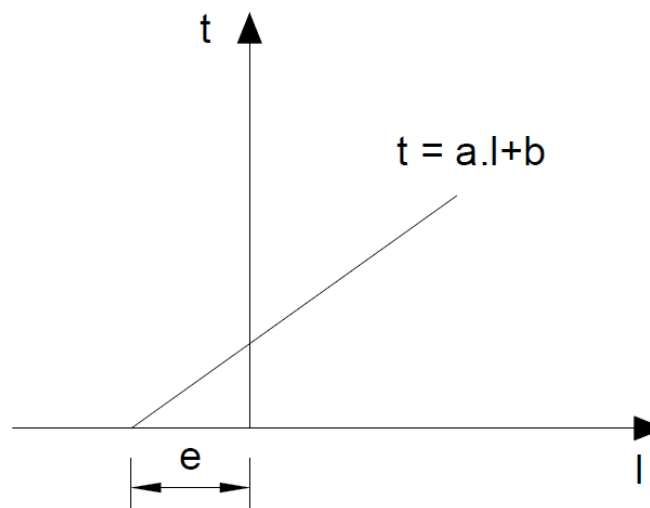
El valor de la constante “e” simboliza el efecto del roce del fluido con la parte baja del cilindro rotativo, el roce de los cojinetes y otras fuentes de disipación de energía.

Podemos observar que el tiempo de descenso para una masa constante es directamente proporcional a la longitud efectiva del cilindro.

Debemos trazar una curva con el tiempo de descenso como ordenada y la longitud sumergida del cilindro como abscisa.

Claramente, si el efecto final fuera cero ($t=0$), la longitud debería significar que no hay torque de fricción. El hecho de que t no sea cero cuando l es cero indica que el final del cilindro es equivalente a cierta longitud adicional.

Tomamos 5 mediciones para encontrar la curva, que cuando intersecta el eje de abscisas ($t=0$) nos da el valor de corrección “e” que debe ser negativo. En la ecuación debe utilizarse su valor absoluto y agregarse a la longitud sumergida l para dar la longitud efectiva.



8.2 Diseño del aparato

El diseño del viscosímetro es geométricamente sencillo en cuanto a la estructura principal donde se encuentra alojado el fluido en ensayo, siendo dos cilindros concéntricos, uno exterior y uno interior. El fluido se encuentra alojado en el espacio comprendido entre ambos cilindros. El cilindro interior será el que rote, esto lo haremos acoplándolo a un motor eléctrico que se encontrará en la parte superior del aparato. Tendremos también una tapa semiabierta con un buje para asegurar el correcto centrado del cilindro interior.

Como necesitamos medir la viscosidad del fluido a distintas temperaturas utilizaremos una resistencia del tipo abrazadera que rodeará al cilindro exterior para conseguir un calentamiento homogéneo.

Para la toma y lectura de datos utilizaremos diversos sensores y un display que conectaremos a una placa Arduino.

8.2.1 Materiales utilizados

Para el diseño de nuestro proyecto nos enfocamos en que los materiales que precisaremos sean de bajo costo, estándar y sencillos de conseguir.

Descripción de los materiales utilizados:

- **Estructura metálica del aparato:**

Nuestro aparato tiene piezas metálicas fijas y móviles obtenidas a través de un proceso de mecanizado para obtener las medidas y superficies convenientes para nuestro diseño y correcto funcionamiento del aparato. Teniendo en cuenta que algunas partes del aparato estarán en contacto con un fluido y/o en rotación y que deberán ser limpiadas con frecuencia será necesario elegir materiales resistentes a la oxidación. En las superficies que están en contacto directo con el fluido requerimos valores de rugosidad bajos para disminuir los efectos que produce la fuerza de rozamiento en nuestros cálculos.

Elegimos el acero inoxidable austenítico AISI 304 para las partes fijas como el cilindro exterior con su base y la tapa. Su bajo contenido en carbono con respecto a la aleación 302 nos otorga una mejor resistencia a la corrosión en las partes soldadas.

Para la parte móvil, el eje y el cilindro interior, seleccionamos el material aluminio 2007 T4, fundamentalmente por su bajo peso específico para no influir en el consumo del motor y por ser naturalmente resistente a la corrosión.

Ambos materiales son de bajo costo, de uso general con buena maquinabilidad pudiendo obtener una buena terminación superficial.

Para las demás partes, tales como la estructura que sostendrá el motor, la chapa que rodeara el cilindro exterior para cubrir la resistencia y la tornillería serán productos estándar sin requerir ninguna prestación en particular.

- **Motor DC:**

Motor de corriente continua que funcione con una tensión de 12 V. Más adelante veremos su elección.

- **Cinta calefactora:**

Para lograr un calentamiento uniforme se utilizará una cinta calefactora de caucho de silicona de la marca StableTemp.

Las cintas están fabricadas de hilos finos y resistentes, con un doble aislamiento de fibra de vidrio trenzado y unidas a cintas planas; esto está totalmente envuelto en caucho de silicona de alta resistencia y tolerancia a altas temperaturas.

Se seleccionará de catálogo la cinta de código JZ-03106-90, ya que la misma cuenta con toma a tierra, necesaria para calentar recipientes metálicos y un control de termostato integrado.



- **Placa Arduino UNO, pantalla y sensores:**

Utilizaremos una placa Arduino UNO a la que le cargaremos un programa para obtener directamente en una pantalla LCD el valor de la viscosidad absoluta y la temperatura del ensayo. Para ello necesitamos diversos sensores.

➤ **Arduino UNO**

Arduino UNO es una placa basada en el microcontrolador ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 6 pueden ser usando con PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de 16Mhz, conexión USB, conector jack de alimentación, terminales para conexión ICSP y un botón de reseteo. Tiene toda la electrónica necesaria para que el

microcontrolador opere, simplemente hay que conectarlo a la energía por el puerto USB ó con un transformador AC-DC.

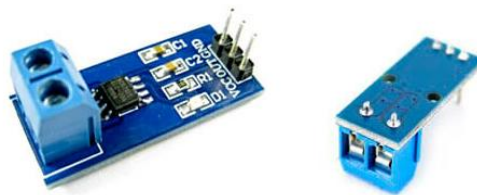
➤ **Sensor de corriente por efecto hall ACS712**

El ACS712 es un sensor de corriente tanto alterna como continua, que permite medir la intensidad eléctrica que atraviesa un conductor.

Internamente el ACS712 consiste en un sensor hall de precisión y bajo offset junto con un canal de conducción localizado cerca de la superficie del integrado. Cuando la corriente fluye por el canal de cobre genera un campo magnético que es detectado por el sensor Hall y es convertido en una tensión.

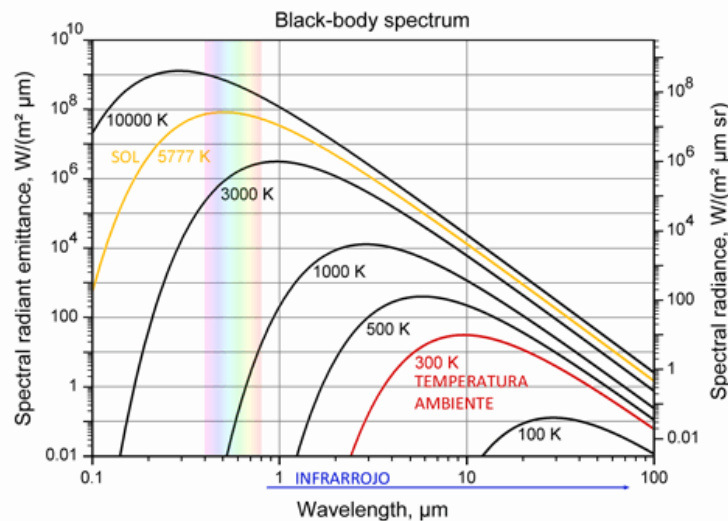
La salida del sensor es una tensión proporcional a la corriente, y altamente independiente de la temperatura.

Este sensor la conectaremos directamente al motor.



➤ **Sensor de temperatura MLX90614**

Según la ley de Stefan-Boltzmann, todo objeto por encima del cero absoluto (°K) emite radiación cuyo espectro es proporcional a su temperatura. El MLX90614 recoge esta radiación y su salida es una señal eléctrica proporcional a la temperatura de todos los objetos en su campo de visión.

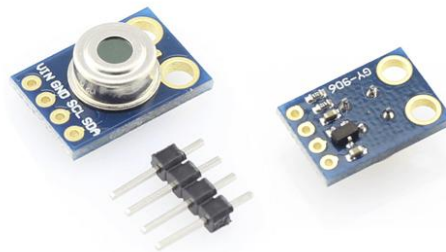


Internamente el MLX90614 está constituido con un chip de silicio con una fina membrana micromecanizada sensible a la radiación infrarroja, junto con la electrónica necesaria para amplificar y digitalizar la señal y calcular la temperatura.

El conjunto incluye un amplificador de bajo ruido, un conversor ADC (conversor analógico digital) de 17 bits, un DSP (procesador digital de señal) y compensación de la temperatura ambiente.

El MLX90614 viene calibrado de fábrica en un amplio rango de temperaturas: -40 a 85 °C para la temperatura ambiente y -70 a 382 °C para la temperatura de objetos. La precisión estándar es de 0.5 °C referente a la temperatura ambiente.

El sensor ira ubicado en la tapa.



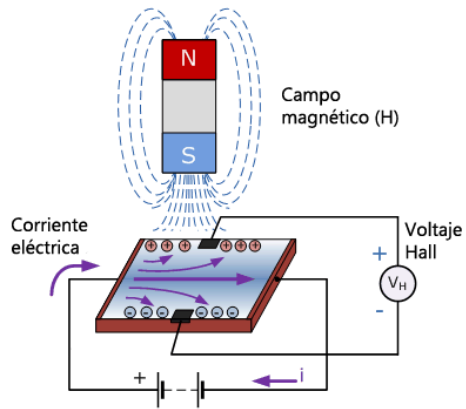
➤ Sensor Hall A3144

Un sensor Hall es un dispositivo que nos permite realizar mediciones de campo magnético. Una ventaja importante de los sensores Hall es que realizan la medición a distancia, sin necesidad de contacto físico. Aunque su alcance es limitado (típicamente pocos centímetros) esto supone que apenas presentan desgaste mecánico. Además, son inmunes a ruidos y polvo. Esto los convierte en sensores fiables y duraderos.

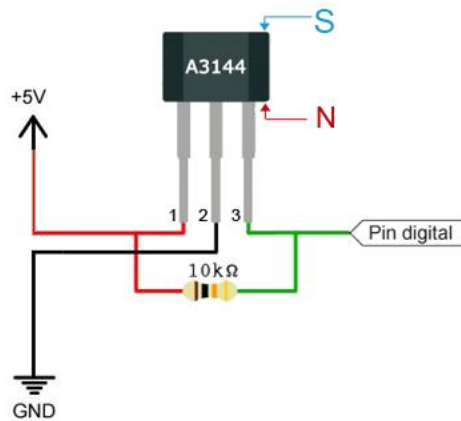
Emplearemos un sensor Hall A3144, de tipo digital Switch para fabricar nuestro tacómetro simplemente acoplado un pequeño imán de neodimio al eje.



Su funcionamiento se basa en hacer circular una corriente eléctrica a lo largo de un semiconductor en presencia de un campo magnético, los electrones son desviados por efecto del campo magnético, dando lugar a una tensión perpendicular a la corriente y al campo magnético.



Su esquema eléctrico es el siguiente:

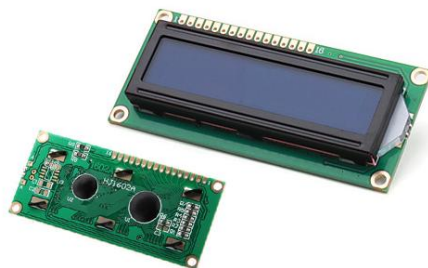


➤ Pantalla LCD Hitachi HD44780

Las pantallas LCD (Liquid Cristal Display) son una de las formas más sencillas y económicas de dotar de un display a un autómata.

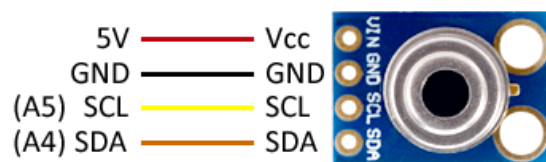
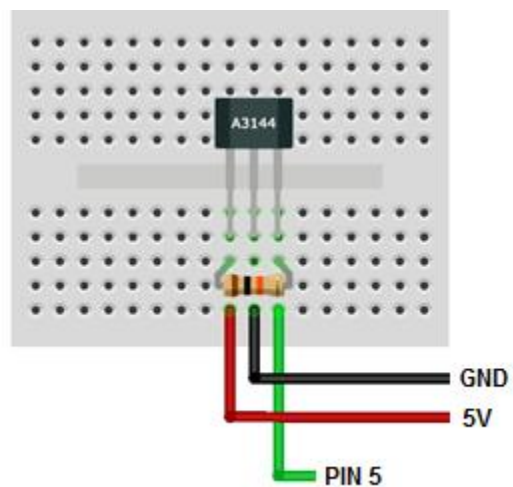
El Hitachi HD44780 es uno de los controladores de LCD's más ampliamente extendidos por su sencillez y bajo precio. Dispone de una pequeña memoria RAM para configurar nuestros propios caracteres o dibujos.

Usaremos el más común de 16x02 (2 líneas de 16 caracteres)

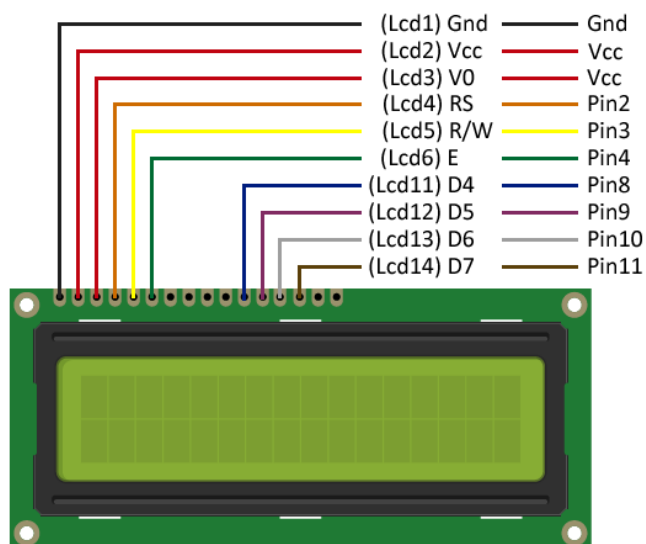


Esquema de conexiones de los dispositivos con la placa Arduino UNO:Sensor de corriente

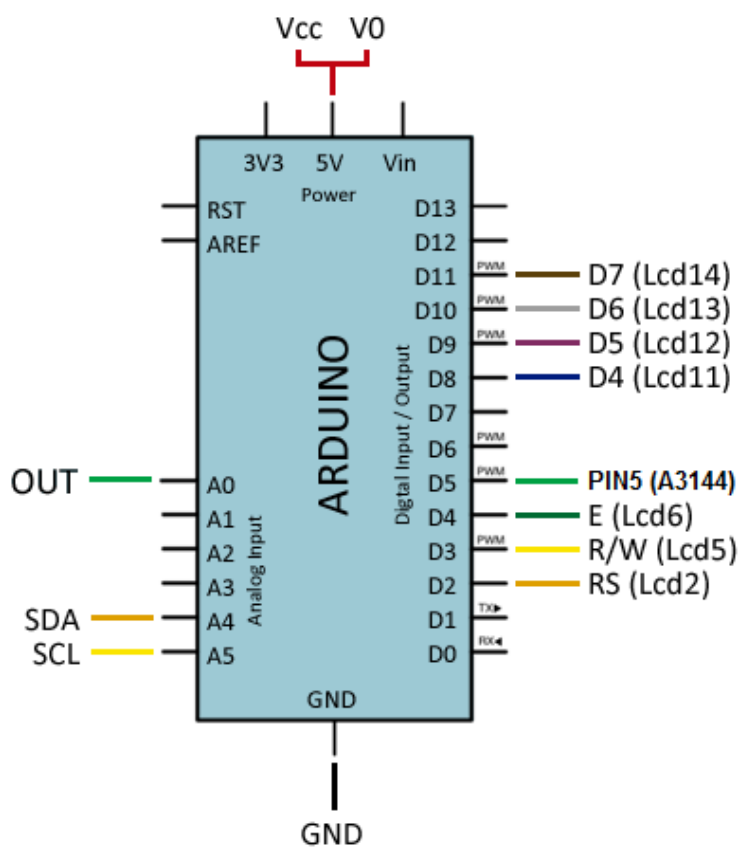
⚠ Máximo 30A.

Sensor de temperaturaSensor de revoluciones

Pantalla LCD



Conexiones en la placa Arduino



8.3 Cálculo del par del motor

En el funcionamiento de todo motor, si despreciamos las pérdidas, la transformación de potencia eléctrica en potencia mecánica, se cumple, según la fórmula:

$$P = E.I = F.V$$

Siendo “F” la fuerza tangencial útil y “V” la velocidad tangencial. Si el radio del entrehierro a través del cual se realiza la transferencia de energía es “r” y la velocidad angular del rotor es “ ω ”, se cumple que:

$$V = \omega.r$$

Reemplazando:

$$E.I = F.\omega.r$$

Siendo el par motor:

$$M = F.r$$

Nos queda:

$$E.I = M.\omega$$

La velocidad angular se mide en “rpm” por lo que lo expresaremos con la letra “n”, el par en “N.m”, sabemos que:

Acomodando las unidades:

$$P = E.I [W] = \frac{2.\pi}{60}.M [N.m].n [rpm]$$

Despejando el torque del motor:

$$M = \frac{60}{2.\pi} \cdot \frac{E.I}{n}$$

Unidades:

$$P = [W] = [V.A]$$

$$n = [rpm]$$

$$M = [N.m]$$

El motor será alimentado con una tensión de E=12 V, lo que variará será la corriente y las revoluciones del motor en función de la viscosidad del fluido en ensayo. Si el fluido es más viscoso la intensidad de corriente será mayor y si el fluido es menos viscoso la intensidad de corriente será menor. Lo mismo pasara con la velocidad, si es más viscoso el fluido

mayor resistencia opone por lo que la velocidad del motor será menor y viceversa. En resumen, estos parámetros variaran según el par resistente que ofrecerá el fluido ensayado.

De esta forma el par varía prácticamente en forma lineal con la intensidad de corriente y las revoluciones del motor.

Por lo expresado, la fórmula final nos queda:

$$M = \frac{360}{\pi} \cdot \frac{I}{n} [N.m]$$

Este es nuestro par aplicado, el que reemplazaremos en la fórmula de viscosidad obtenida en el apartado 5.1.

8.4 Cálculo de la viscosidad a partir de la lectura de datos

De la fórmula de la viscosidad obtenida en el punto 5.1:

$$\mu = \frac{m \cdot g \cdot r_c}{V_A \cdot 2 \cdot \pi \cdot (l + e)} \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]$$

Donde

$$M_{aplicado} = m \cdot g \cdot r_c$$

Lo reemplazamos por:

$$M = \frac{360}{\pi} \cdot \frac{I}{n} [N.m]$$

Y reemplazamos también

$$V_A = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot R_1 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Quedando:

$$\mu = \frac{174,2 \cdot I}{(l + e) \cdot R_1 \cdot n^2} \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right]$$

Para simplificar un poco la formula podemos agrupar todas las dimensiones geométricas que serán constantes y la llamamos "C":

$$C = \frac{174,2}{(l + e) \cdot R_1} \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]$$

Quedando la formula final:

$$\mu = C \cdot \frac{I}{n^2}$$

Unidades:

-Dimensiones geométricas: [m]

-Velocidad: [rpm]

-Par: [N.m]

-Corriente: [A]

De esta manera tendremos expresada la viscosidad absoluta en el SI (Sistema Internacional de Unidades)

Conversión de unidades:

$$1 \frac{N \cdot s}{m^2} = 1 \frac{kg}{m \cdot s} = 1 \cdot Pa \cdot s = 1000 \text{ mPa} \cdot s = 10 \text{ P} = 1000 \text{ cP}$$

8.5 Cálculo del factor de corrección

Como bien mencionamos en el punto 8.1, tenemos que tener en cuenta un factor de corrección “e” que simboliza el efecto del roce del fluido con la parte baja del cilindro rotativo, el roce de los cojinetes y otras fuentes de disipación de energía. Al producir ahora el giro del cilindro con un motor DC debemos encontrar la manera de relacionar las variables que ahora tenemos. Como podemos observar de la fórmula que obtuvimos para un mismo valor de masa, el parámetro que varía con la viscosidad del fluido, es el tiempo. Con un fluido más viscoso el tiempo de descenso será mayor, y con un fluido menos viscoso la masa caerá más rápido.

$$\mu = \frac{m \cdot g \cdot t \cdot r_c^2}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot R_1 \cdot (l + e)} \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]$$

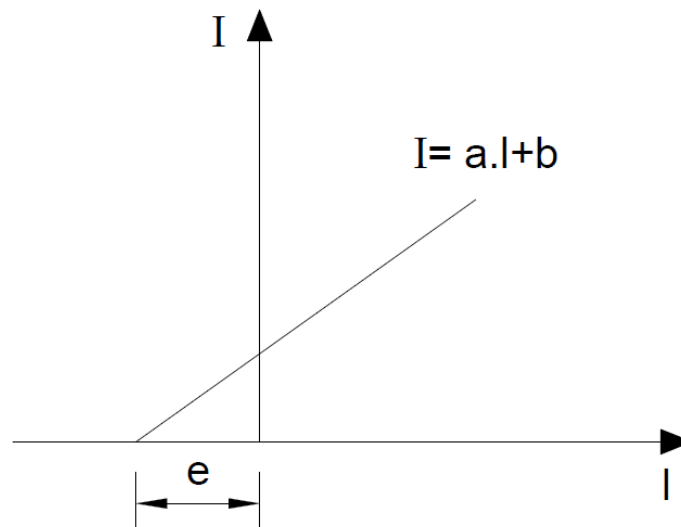
Ahora bien, tenemos un motor DC que hace girar el cilindro interior y no un sistema de poleas con una masa que dejamos caer para producir el torque. Podemos hacer una analogía con el viscosímetro original.

Como dijimos anteriormente el valor de la constante “e” simboliza el efecto del roce del fluido con la parte baja del cilindro rotativo, el roce de los cojinetes y otras fuentes de disipación de energía.

De la fórmula que obtuvimos en el punto 8.4, podemos observar que la corriente que consume el motor DC para una velocidad constante es directamente proporcional a la longitud efectiva del cilindro.

$$\mu = \frac{174,2 \cdot I}{(l + e) \cdot R_1 \cdot n^2} \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]$$

Debemos trazar ahora una curva con la corriente como ordenada y la longitud sumergida del cilindro como abscisa. Haremos 5 mediciones variando la el llenado del cilindro para un mismo fluido hasta llegar al borde superior del cilindro interior, de esta manera encontraremos la curva y así el valor del factor de corrección.



8.6 Elección de la velocidad del motor

La elección de la velocidad del motor será tomando como referencia los valores de viscosidad mostrados en los puntos 4 y 5, de esta manera a prueba y error buscamos motores de corriente continua de un catálogo que nos permita trabajar en el rango de viscosidad que buscamos ensayar.

De tabla y grafico de los puntos 4 y 5 observamos que:

SAE 50 a 20 °C → $\mu = 0.86 \text{ N.s/m}^2 = 860 \text{ cP}$

SAE 20 a 150 °C → $\mu = 2.6 \text{ cP} = 0,0026 \text{ N.s/m}^2$

Estimamos un rango de 1 cP a 1000 cP (0.001 N.s/m^2 a 1 N.s/m^2), ya que elegimos uno de los aceites menos viscosos a 150 °C y uno de los más viscosos a 20 °C.

Debemos buscar ahora un catálogo e ir probando los valores de corriente y velocidad en la fórmula de viscosidad. Usamos la formula sin tener en cuenta el factor de corrección que nos da la longitud efectiva y que representa un torque adicional, ya que no será problema porque estamos tomando en un extremo de nuestro rango una viscosidad muy baja por lo que no será problema ensayar por encima de ese valor si tenemos un torque resistente mayor o adicional.

Los ajustes pertinentes con el factor de corrección se harán experimentalmente.

$$\mu = \frac{174,2 \cdot I}{l \cdot R_1 \cdot n^2} \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right]$$

Las dimensiones geométricas de nuestro equipo:

$$l = 0.07 \text{ m}$$

$$R_1 = 0.05 \text{ m}$$

$$R_2 = 0.06 \text{ m}$$

$$C = \frac{174,2}{l \cdot R_1} \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] = \frac{174,2}{0,07 \cdot 0,05} \left[\frac{1}{0,05} - \frac{1}{0,06} \right] = 165905$$

$$\mu = 165905 \cdot \frac{I}{n^2}$$

Ahora bien, de un catálogo (ver anexo) de la firma SERVO de motores de corriente continua y motorreductores vamos probando con los valores de corriente y velocidad para buscar que sin carga de la viscosidad que obtengamos sea de aproximadamente de 0.001 N.s/m².

● STANDARD SPECIFICATIONS

Model	Rated						No load		Stall torque		Weight	
	Output W	Voltage V	Torque		Current A	Speed r/min	Current A	Speed r/min	mN-m	oz-in		
			mN-m	oz-in								
DMN37SA	4.6	12	9.8	1.39	0.78	4500	0.26	5500	54	7.64	130	0.29
DMN37SB	4.6	24	9.8	1.39	0.37	4500	0.12	5500	54	7.64	130	0.29
DMN37BA	7.2	12	14.7	2.08	1.01	4700	0.25	5500	98	13.89	180	0.40
DMN37BB	7.2	24	14.7	2.08	0.53	4700	0.13	5500	98	13.89	180	0.40
DMN37KA	9.2	12	24.5	3.47	1.20	3600	0.27	4300	160	23.61	210	0.46
DMN37KB	9.2	24	24.5	3.47	0.60	3600	0.14	4300	160	23.61	210	0.46
DMN37JB	14.7	24	39.2	5.55	0.94	3600	0.16	4300	240	34.72	240	0.53

*Intermittent ratings are given for DMN37JB. (Duty 50%)

Vemos que con el motor DMN37BA, se ajusta a lo requerido con sus valores de corriente y velocidad sin carga:

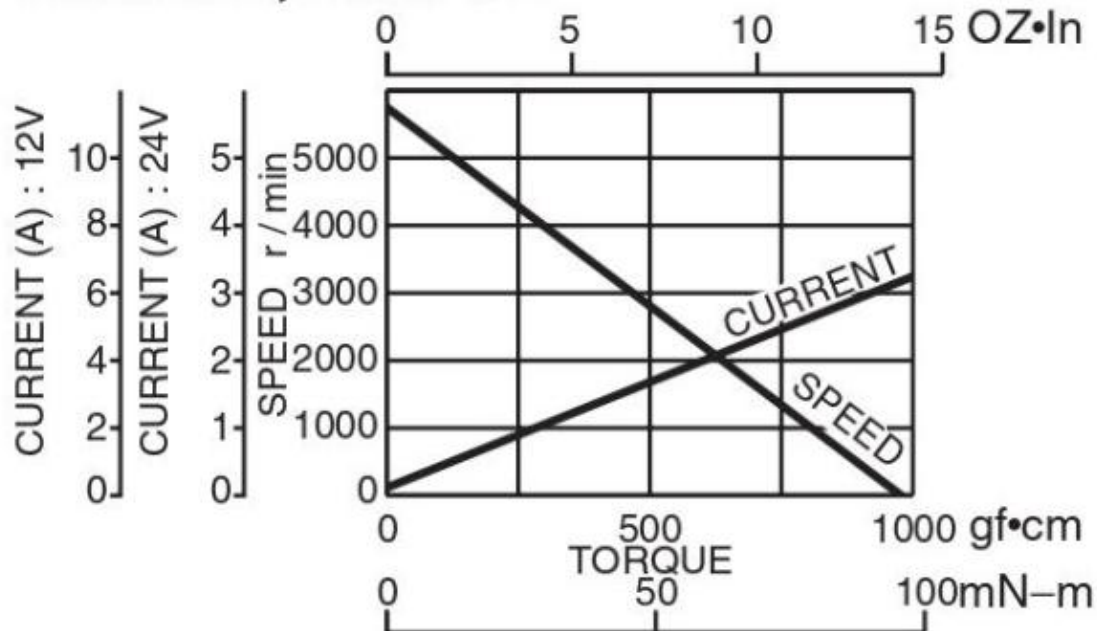
$$I = 0,25 \text{ A}$$

$n = 5500 \text{ rpm}$

$$\mu = 165905 \cdot \frac{0,25}{5500^2} = 0,00137 \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right] = 1,37 \text{ cP}$$

De sus curvas de corriente y velocidad veremos hasta que viscosidad podremos ensayar

DMN37BA, DMN37BB



Donde se cruzan las curvas de torque y velocidad tenemos:

$I = 4 \text{ A}$

$n = 2000 \text{ rpm}$

$$\mu = 165905 \cdot \frac{4}{2000^2} = 0,165 \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right] = 165 \text{ cP}$$

Bajando aún más la velocidad, lo que sería un aumento de viscosidad y un aumento de corriente:

$I = 5 \text{ A}$

$n = 1000 \text{ rpm}$

$$\mu = 165905 \cdot \frac{5}{1000^2} = 0,829 \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right] = 829 \text{ cP}$$

Por lo que concluimos que es una buena elección para los rangos de viscosidad que buscamos ensayar.

9. Técnica operativa

Se debe tener en cuenta que antes de su primer uso hay que calcular el factor de corrección con un fluido de viscosidad conocida. Para lo cual también detallaremos su operatoria:

1. Antes de colocar el fluido en el viscosímetro se debe limpiar el mismo con un solvente adecuado (alcohol, acetato de etilo, tolueno, etcétera).
2. Realizar 4 marcas en el cilindro interno y medir su altura para que una vez introducido el fluido conozcamos hasta que parte se ha llenado el cilindro, la quinta marca será la altura total del mismo.
3. Ensamble el viscosímetro de manera que quede precisamente centrado en el cojinete de la base.
4. Proceder a verter el líquido de prueba entre el espacio de ambos cilindros, hasta la marca requerida.
5. Extraer el cilindro interno para corroborar que el fluido haya llegado a mojar hasta la marca requerida.
6. Encender el microprocesador Arduino.
7. Encender el motor para que el microprocesador Arduino nos brinde el dato de la corriente consumida que es la que nos interesa para calcular el factor de corrección.
8. Repetir los pasos del 4 al 7 para obtener el conjunto de 5 mediciones anotando los valores de corriente y profundidad de llenado.
9. Realizar una tabla y trazar la recta de corriente en función de la longitud.
10. La distancia desde 0 hasta que la recta corta el eje de abscisas es el valor del factor de corrección. Asegurarse de que sea un valor negativo, de lo contrario estaremos incurriendo en algún error.
11. Introducir el valor absoluto del factor de corrección “e” en la fórmula de la viscosidad escrita en el código del programa de Arduino.
12. Cargar el programa a la placa Arduino para finalizar el trabajo.

Una vez obtenido el factor de corrección y habiendo cargado de nuevo el programa nuestro viscosímetro está listo para su uso, en el que la técnica operativa será la siguiente:

1. Antes de colocar el fluido en el viscosímetro se debe limpiar el mismo con un solvente adecuado (alcohol, acetato de etilo, tolueno, etcétera).
2. Ensamblar el viscosímetro de manera que el cilindro interno quede centrado en el cojinete de la base.
3. Proceder a verter el líquido de prueba entre el espacio de ambos cilindros hasta la altura total del cilindro interno.

4. Si no se realiza el ensayo a temperatura ambiente encender la resistencia para calentar la muestra y fijar la temperatura con el termostato.
5. Encender la placa Arduino antes de alcanzar el valor de temperatura buscado.
6. Una vez alcanzada la temperatura requerida encendemos inmediatamente el motor.
7. Una vez encendido el motor el microprocesador de Arduino comenzará la toma de datos. Midiendo temperatura, velocidad, corriente y el valor de viscosidad absoluta. Estos datos serán mostrados a través de la pantalla LCD.
8. Tomamos nota de los datos obtenidos para un posterior análisis o trazado de curvas.

10. Planos mecánicos

Los planos fueron dibujados mediante el software NX versión 12.0.1.7, de la firma Siemens. Primero se diseñó en 3D cada pieza para luego confeccionar los planos finales en 2D.

Se presentan los planos individuales de cada pieza, planos de subconjunto y de conjunto, plano de despiece general y la respectiva lista de materiales.

Se adjuntan los mismos al final del presente informe.

11. Anexo

➤ Hoja de datos:

- Motor DMN37BA
- Aluminio 2007
- Acero inoxidable AISI 304
- Buje 51280
- Caños 1/2" y 3/4" SCH 40 y brida para caño de 3/4"
- Planchuela 1/8"x7/8"
- Cinta calefactora
- Arduino UNO
- Sensor de corriente ACS712
- Sensor de temperatura MLX90614
- Sensor hall A3144
- Pantalla LCD HD44780

Se adjuntan las hojas de datos al final del presente informe.

12. Bibliografía

- Viscosity of a liquid – CENCO Physics.
- Mecánica de los fluidos, fundamentos y aplicaciones – Yunus A. Cengel, John M. Cimbala – Segunda edición – Editorial Mc Graw Hill.
- Mecánica de los fluidos e hidráulica – Ranald V. Giles – Serie Schaum - Editorial Mc Graw Hill.

Se adjunta el apunte teórico “Viscosity of a liquid” de CENCO Physics al final del presente informe.