



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA  
“REDISEÑO DE UN VISCOSÍMETRO DE FLUJO DE  
COUETTE”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO PETROLERO**

**PRESENTA:**

**GÓMEZ HERNÁNDEZ ROBERTO ALEJANDRO**

**DIRECTOR:**

**DR. FRANCISCO ANTONIO GODÍNEZ ROJANO**



Ciudad Universitaria, CDMX., 2016



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.

# Resumen

Este trabajo consiste en el rediseño mecánico (conceptual) de un viscosímetro comercial de flujo de Couette FANN 35. Éste rediseño se propone para ampliar las capacidades de medición del FANN 35 con el que solo es posible caracterizar fluidos bajo condiciones de presión y temperatura ambientales. En contraste, el rediseño propuesto permitiría realizar mediciones de viscosidad de diferentes fluidos sometidos a rangos de presión y temperatura similares a los encontrados en condiciones reales de pozo. El rediseño consta fundamentalmente de la inclusión de dos nuevos subsistemas: una celda de presión y una chaqueta de calentamiento para presurizar y calentar los fluidos, respectivamente. Los cambios que se sugieren al diseño original del FANN 35, implican un costo mucho menor que el debido a la adquisición de un viscosímetro comercial con capacidades de medición a altas presiones y temperaturas. Por ésta razón, el rediseño obtenido resulta atractivo a diversos consumidores que en ocasiones no cuentan con grandes presupuestos, tal es el caso de centros educativos de nivel medio superior y superior así como de pequeñas y medianas empresas dedicadas a dar servicio a las grandes empresas petroleras. Dentro del trabajo se describen las imágenes del rediseño del viscosímetro y se proporcionan los planos de fabricación-ensamble y los cálculos de la resistencia mecánica de la celda de presión y de la transferencia de calor en la chaqueta de calentamiento.

## **Agradecimientos:**

Le agradezco a mi madre Julieta y a mis hermanos Leonardo, Julieta y Rosa su apoyo para que pudiera terminar la carrera, sin ellos no hubiera podido concretar este ciclo importante en mi vida.

Le agradezco de manera especial al Dr. Francisco Godínez, mi asesor, ya que fue un apoyo importante en el trabajo de tesis, su infinita paciencia, ya que me tardé demasiado para terminar la tesis.

A cada uno de mis sinodales, ya que fue con ellos que pude enriquecer mi trabajo de Tesis, como lo fue el Ing. Manuel Villamar Villegas, el Ing. José Manuel González Espinosa, el Ing. Juan Sabido Alcántara, la maestra Rosita y por supuesto a mi asesor el Dr. Francisco Godínez.

Le agradezco a Guillermo Lozano, ya que el sembró en mi la curiosidad científica y por ese motivo decidí estudiar una licenciatura.

Le agradezco al Ingeniero M. Lee, ya que conté con su apoyo para trabajar en temporadas.

Le agradezco a la Maestra Quim. Rosita, por darme la oportunidad de conocer sobre los aparatos de medición, en especial el viscosímetro Fann 35, así como por las enseñanzas de vida que me proporciono.

Agradezco a mis compañeros de clase, que además de eso, tuvimos la fortuna de compartir experiencias, en bibliotecas, en prácticas de campo y algunas reuniones.

Agradezco a mi país, ya que tuve la fortuna de estudiar de manera gratuita desde el preescolar hasta la licenciatura, y espero retribuir algún día lo mucho que me dio mi país.

Agradezco a mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas y brindarme una vida académica, así como experiencias de vida, siempre estaré en deuda con la institución.

# INDICE

Resumen

<b>Capítulo 1</b> .....	<b>6</b>
Introducción .....	6
1. 1 Planteamiento y delimitación del problema .....	6
1.2 Justificación .....	8
1.3 Objetivo general .....	8
1.4 Objetivos particulares .....	8
1.5 Metodología de trabajo .....	8
1.6 Sumario de capítulos .....	9
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>10</b>
2.1 ¿Qué es un fluido? .....	10
2.2. Viscosidad. ....	10
2.3 Fluidos Newtonianos y no Newtonianos .....	11
2.3.1 Fluidos independientes del tiempo .....	13
2.3.2 Fluidos plásticos de Binham.....	13
2.3.3 Fluidos pseudoplásticos .....	13
2.3.4 Fluidos dilatantes.....	14
2.3.5 Fluidos pseudoplásticos y dilatantes con punto de cedencia. ....	14
2.3.6 Fluidos dependientes del tiempo. ....	15
2.3.8 Fluidos Reopécticos. ....	15
2.3.9 Fluidos Viscoelásticos. ....	16
2.4. Propiedades de un fluido de perforación. ....	16
2.4.1. Tixotropía.....	16
2.4.2. Reología .....	16
2.4.3. Viscosidad Plastica.....	17
2.4.5. Punto de Cedencia.....	18
2.4.6. Esfuerzo Gel.....	18
2.4.7. Filtrado Dinámico.....	19
2.4.8. Enjarre .....	19
2.4.9. PH y control de alcalinidad .....	20
2.5. Fluidos que siguen el modelo de Newton.....	20
2.5.1 Fluidos que siguen el modelo de Bingham. ....	20
2.5.2. Fluidos que siguen el modelo de ley de potencias.....	21
2.5.3. Fluidos que siguen el modelo de ley de potencias modificado.....	21
2.7.1 Fluidos Poliméricos .....	23

2.7.2 Sistemas de Fluidos de perforación en base aceite.....	24
2.7.3. Fluido de emulsión inversa.....	24
2.7.4. Fluido de aire seco.....	25
2.7.3. Fluido niebla.....	25
2.7.3. Fluido espumoso.....	25
2.7.3. Fluidos aireados.....	25
2.8. Propiedades Reológicas y Tixotrópicas que definen el comportamiento de los fluidos de control para su aplicación en pozos petroleros.....	27
2.8.1. Sistemas de fluidos de perforación.....	29
2.8.2. Funciones básicas Los fluidos de perforación.....	30
2.9. Aplicación de fluidos de perforación.....	30
2.9.1. Lodos de perforación de fosfatos y bentonita.....	32
2.9.2. Lodos de Cal.....	32
2.9.3. Lodos de yeso.....	32
2.9.4. Lodos de agua de mar con bentonita prehidratada.....	33
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>34</b>
Tipos de Viscosímetros.....	34
3.1 Viscosímetro de tipo capilar.....	34
3.2 Viscosímetro de orificio o de copa.....	35
3.3 Viscosímetro de caída de cuerpos.....	35
3.4 Viscosímetro de cono-placa.....	36
3.5 Viscosímetros de cilindros concéntricos rotacionales.....	37
3.5.1 Viscosímetros de flujo de Couette.....	38
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>41</b>
Rediseño de un Viscosímetro de flujo de Couette.....	41
4.1 Diseño de un soporte para la celda de presión.....	41
4.2 Diseño del vaso presurizado.....	44
4.2.1. Calculo de la Presión máxima admisible en el tanque y los pernos.....	48
4.3 Diseño de la chaqueta de calentamiento.....	51
4.3.1. Calculo de la transferencia de calor de la resistencia.....	55
4.4 Diseño final.....	60
4.5 Costo del primer prototipo.....	62
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>63</b>
Conclusiones y trabajo a futuro.....	63
<b>Referencias.....</b>	<b>65</b>
Anexo A.....	67

Planos de ensamble y fabricación del gato mecánico .....	67
Anexo B.....	76
Planos de ensamble y fabricación de la chaqueta de calentamiento .....	76
Anexo C.....	77
Planos de fabricación y ensamble de la celda de presión .....	77

# Capítulo 1

## Introducción

En este trabajo se propone el rediseño de un instrumento que pueda medir las propiedades reológicas de un fluido de control para perforación de pozos geotérmicos, acuíferos y petroleros. El rediseño contempla la inclusión y el control de dos variables termodinámicas importantes: presión y temperatura; con la intención de recrear en el laboratorio condiciones reales de pozo.

Este instrumento de medición sería de mucha utilidad en el análisis del comportamiento de los fluidos de perforación usados en aguas profundas bajo condiciones más reales.

En este trabajo se parte del diseño comercial de un viscosímetro que funciona bajo el principio de flujo de Couette, y el cuál ya ha sido probado en la industria. A este dispositivo se le agregará una celda para presurizar el fluido de prueba y una resistencia eléctrica para suministrar calor al interior de la celda; además, se describirá el instrumento a grandes rasgos de manera teórica bajo los principios y modelos matemáticos que rigen el flujo de Couette. El rediseño contempla la elaboración de dibujos y diagramas que describen el instrumento, así como cálculos sencillos del calor generado por la resistencia eléctrica; y, por último, se recomienda el trabajo a futuro para que el instrumento se pueda fabricar y su uso sea más amigable y versátil para el usuario.

### 1. 1 Planteamiento y delimitación del problema

Los aparatos de que se usan para medir viscosidad en el ámbito de la enseñanza a nivel licenciatura son por lo general de bajo costo. Por esta razón, son aparatos que presentan limitaciones. Una de ellas es que no permiten medir viscosidades variando la presión y la temperatura.

Sin embargo, hay industrias como la petrolera, en las que es indispensable caracterizar distintos tipos de fluidos sometidos a diferentes condiciones de presión y de temperatura.

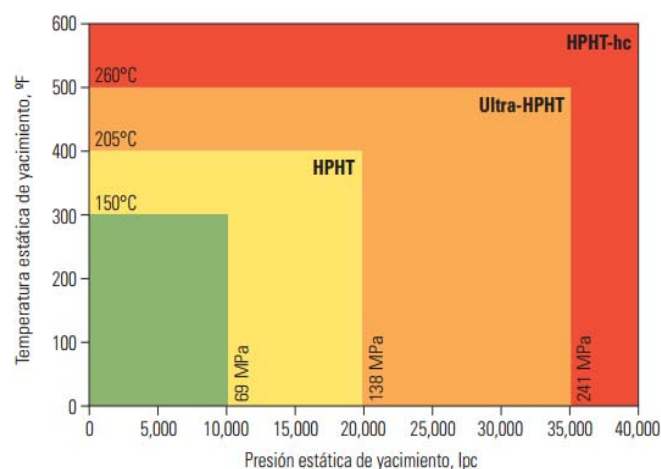


Figura 1. Sistema de clasificación de pozos [1].



Se sabe que las condiciones reales de los fluidos de control a distintas profundidades y en diferentes localidades del Mundo son distintas. Por ejemplo, las condiciones de los pozos HPHT (alta presión-alta temperatura), están dentro de los rangos de 205°C y 138 MPa [1]. En la figura 1, se observan todos los rangos de presión y temperatura de diferentes pozos y su clasificación.

En esta parte, es importante señalar que el alcance de esta tesis sólo se centra en el rediseño teórico/conceptual de un viscosímetro comercial Fann 35, ver figura 2. Los cambios propuestos no deben ser costosos y su implementación debe ser sencilla. El rediseño estará pensado cuidadosamente para soportar ambientes corrosivos y evitar filtración. También se pondrá énfasis en las propiedades mecánicas y térmicas que aseguren la integridad estructural del aparato y permitan su uso continuo sin necesidad de mantenimientos a corto plazo.

Las condiciones de presión y la temperatura a las cuales se realizará el rediseño, corresponden a las de pozos convencionales, es decir 69 [MPa] y 150[°C], ver figura 1, pero que conceptualmente son superadas por mucho.

Finalmente cabe hacer notar que no se contará con un prototipo físico para realizar pruebas y saber si los cambios propuestos en realidad funcionan, pero que teóricamente supera al Fann 90, que alcanzan la presión de 17.24 [MPa] y una temperatura de 260 [°C], contra 472.62 [MPa], y una temperatura de 319[°C], del rediseño propuesto. Si consultamos la Fig.1, veremos que estamos en la zona de HPHT-hc, que marca un rango de 241 a 275 [MPa] y alcanzando la temperatura de 315 [°C], por lo que también presentaremos una ventaja, tal vez la más importante es sin duda el tema económico, en el cual se presenta una evaluación económica, pero que esta expresada en pesos mexicanos en el año de 2016, por lo que esto puede variar a partir del precio del dólar y que si se plantearía producirlo, también cambiarían los costos en base a nuevos costos, como lo es la producción y la mercadotecnia.

La ventaja que tendríamos de funcionar el viscosímetro es realizar principalmente enfocado a pruebas con fluidos de control para pozos petroleros, para prácticamente todas las clasificaciones de pozos existentes; tomando en cuenta obviamente la seguridad del usuario, para realizar dichas pruebas.



**Figura 2.** Viscosímetro comercial FANN 35 basado en el flujo de Couette; este dispositivo no permite caracterizar fluidos sometidos a altas presiones y altas temperaturas como las presentes en un pozo real [2].

## 1.2 Justificación

Esta investigación se realiza para proponer un rediseño de viscosímetros comerciales que permitan caracterizar fluidos de control en base agua sometidos a condiciones reales de presión y temperatura.

La viscosidad de algunos fluidos se mide experimentalmente con viscosímetros y reómetros. La parte de la física que estudia las propiedades viscosas de los fluidos es la reología.

En México existe el problema de la adquisición de aparatos de medición porque en general son muy costosos y requieren mantenimiento periódico; y, además en su gran mayoría provienen del extranjero.

El rediseño implicará cambios sencillos y una inversión monetaria baja. Estos dos aspectos, permitirán que incluso estudiantes de los primeros semestres de ingeniería implementen dichos cambios.

El desarrollo de viscosímetros no solo es importante para caracterizar los fluidos de control que tienen aplicación a la industria petrolera, sino también en otras industrias como lo es la automotriz e incluso la farmacéutica. El rediseño propuesto podría ser atractivo para estos sectores.

## 1.3 Objetivo general

Rediseñar un viscosímetro comercial para fluidos añadiendo presión y temperatura.

## 1.4 Objetivos particulares

- 1) Rediseñar el viscosímetro procurando costos de inversión bajos.
- 2) Rediseñar el viscosímetro de tal manera que los cambios sugeridos sean de fácil implementación.

## 1.5 Metodología de trabajo

- 1) Copiar el diseño original del viscosímetro Fann 35 con base en los planos del fabricante y mediciones realizadas sobre el dispositivo físico. Se generan planos en computadora.
- 2) Se plantea el rediseño de ciertas partes del viscosímetro, teniendo en mente que será necesario incluir presión y temperatura para la caracterización del fluido.
- 3) Se hacen cálculos de transferencia de calor.
- 4) Realizar análisis de elemento finito para establecer los esfuerzos y deformaciones a los que será sometida la celda de presión cuando esté trabajando a máxima temperatura.
- 5) Realizar un cálculo sencillo de costos de rediseño, materiales y fabricación.

## 1.6 Sumario de capítulos

En el Capítulo 2, se definen conceptos básicos como: la viscosidad de un fluido y su dependencia con variables termodinámicas y la clasificación de fluidos dependiendo de sus características reológicas (Newtonianos y no-Newtonianos). En el Capítulo 3, se ven los distintos tipos de viscosímetros y sus principios de funcionamiento. El rediseño del viscosímetro Fann 35 se presenta en el Capítulo 4; tal rediseño contempla dibujos, planos, cálculos de transferencia de calor y resistencia de materiales, así como un cálculo sencillo de costos. Finalmente, en el Capítulo 5, se dan las conclusiones y recomendaciones que pueden mejorar aún más el rediseño propuesto.

# Capítulo 2

## 2.1 ¿Qué es un fluido?

Fluido, desde el punto de vista mecánico, es una sustancia que se encuentra en estado de fluido si experimenta una deformación continua durante el tiempo en que está sometida a una tensión tangencial. Los líquidos y los gases no pueden soportar tensiones tangenciales sin que en su interior aparezca un gradiente de velocidad. Un sólido requiere la aplicación de una tensión finita antes de que se produzca alguna deformación [3].

## 2.2. Viscosidad.

La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción. Por ejemplo, la miel tiene una viscosidad mucho mayor que el agua [3].

La viscosidad es una propiedad física característica de todos los fluidos que emerge de las colisiones entre las partículas del fluido que se mueven a diferentes velocidades, provocando una resistencia a su movimiento. Cuando un fluido se mueve forzado por un tubo, las partículas que componen el fluido se mueven más rápido cerca del eje longitudinal del tubo, y más lentas cerca de las paredes. Por lo tanto, es necesario que exista una tensión cortante (como una diferencia de presión) para sobrepasar la resistencia de fricción entre las capas del líquido, y que el fluido se siga moviendo por el tubo. Para un mismo perfil radial de velocidades, la tensión requerida es proporcional a la viscosidad del fluido.

La viscosidad solo se manifiesta en líquidos en movimiento, se ha definido la viscosidad como la relación existente entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Esta viscosidad recibe el nombre de viscosidad absoluta o viscosidad dinámica. Generalmente se representa por la letra griega  $\mu$ .

Se conoce también otra viscosidad, denominada viscosidad cinemática, y se representa por  $\nu$ . Para calcular la viscosidad cinemática basta con dividir la viscosidad dinámica por la densidad del fluido [3]:

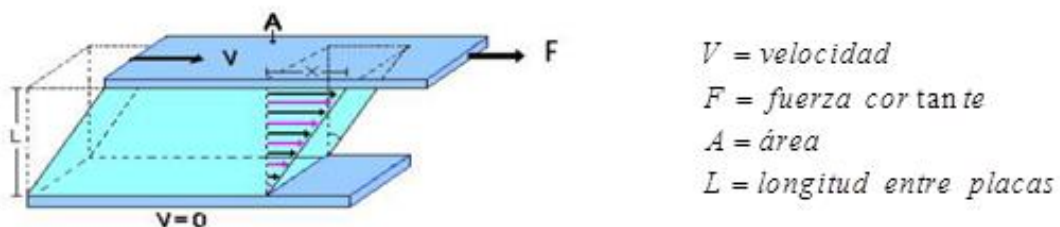


Figura 3. Perfil de Velocidad [3].

La fuerza de fricción o de corte que deberá existir entre las capas de fluido puede ser expresada como un esfuerzo de corte o de fricción por unidad de área en contacto y es designada por  $\tau$ . Para el movimiento laminar (no turbulento), (en el cual la viscosidad juega un papel muy importante),  $\tau$  (como se hizo anteriormente) se observa que es proporcional a la rapidez de deformación relativa, esto es, al gradiente de velocidades,  $dv/dy$ , con una constante  $\mu$ , definida como el coeficiente de viscosidad (también denominada viscosidad absoluta) por lo tanto:

$$\mu = \tau \frac{dv}{dy} \dots\dots\dots(1)$$

$\tau = \text{Tension.}$

$\frac{dv}{dy} = \text{Rapidez de deformación del fluido.}$

Se conoce también otra viscosidad, denominada viscosidad cinemática, y se representa por  $\nu$ . Para calcular la viscosidad cinemática basta con dividir la viscosidad dinámica por la densidad del fluido:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\frac{kg}{m \cdot s}}{\frac{kg}{m^3}} = Cp \dots\dots\dots(2)$$

$\nu = \text{viscosidad dinámica}$

$\rho = \text{densidad del fluido}$

$\mu = \text{viscosidad absoluta}$

$Kg = \text{Kilogramo}$

$m = \text{metro}$

$s = \text{segundo}$

$Cp = \text{centipoise}$

El criterio que define al flujo laminar y al flujo turbulento, es el número de Reynolds, por lo que estas ecuaciones sólo son válidas para flujo laminar, de ser un flujo turbulento, se ocupan otras ecuaciones que no se verán en esta tesis, porque los fluidos que nos interesan son flujos laminares y fluidos no-newtonianos; en especial los plásticos de Binham [4].

### 2.3 Fluidos Newtonianos y no Newtonianos

Desde el punto de vista de la reología, los fluidos más sencillos son los Newtonianos, llamados así porque su comportamiento sigue la ley de Newton: "El esfuerzo de corte es proporcional al gradiente de velocidad o velocidad de corte" [5].

$$\tau = \mu \frac{dv_x}{dy} \dots\dots\dots(3)$$

Los fluidos no-Newtonianos son aquellos fluidos que no se comportan de acuerdo con la Ley de la Viscosidad de Newton. Por exclusión, en este grupo se incluye a todos los fluidos que no exhiben una relación directa entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte. A su vez, éstos pueden ser subdivididos en dos grupos: Fluidos Independientes del Tiempo y Fluidos Dependientes del Tiempo [5]. En la figura 4 se muestran las curvas del comportamiento de diferentes tipos de fluidos. En la figura 4 se muestra un cuadro sinóptico donde se clasifican distintos tipos de fluidos.

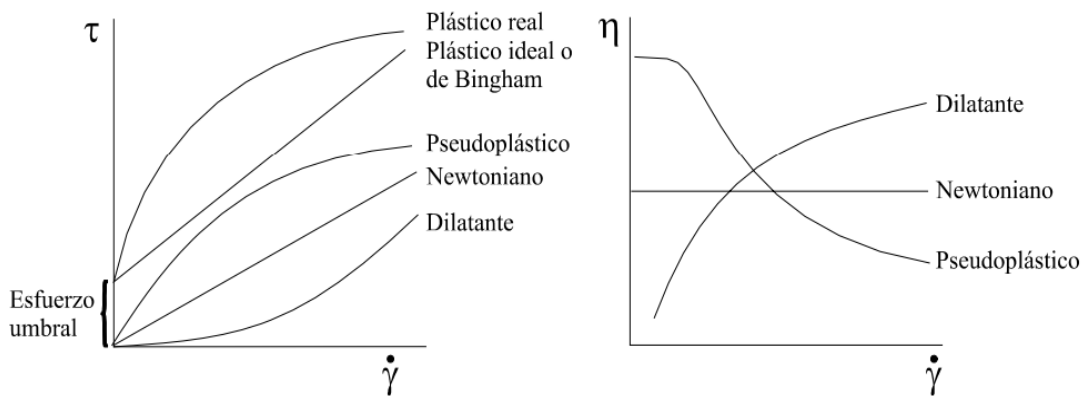


Figura 4. Curvas del comportamiento reológico de diferentes tipos de fluidos [5].

Para los fluidos de perforación, el punto de cadencia o valor inicial del esfuerzo de corte, se debe a una propiedad de estructuración por cargas químicas residuales de las partículas coloidales en suspensión, originando que los líquidos plásticos en reposo adquieran una consistencia gelatinosa, la cual desaparece mediante agitación, a esta propiedad se le denomina tixotropía, y es un proceso reversible e isotérmico. El valor de la viscosidad plástica de un fluido de Binham depende de los siguientes factores: Temperatura del fluido, viscosidad del medio dispersante, fase líquida, concentración de los sólidos forma de los sólidos.

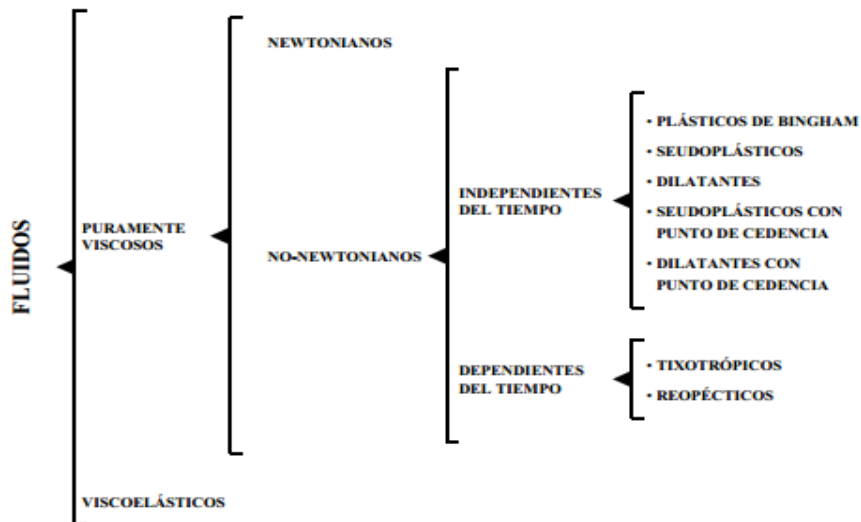


Figura 5. Clasificación Reológica de los fluidos [5].

### 2.3.1 Fluidos independientes del tiempo

Son así denominados debido a que sus propiedades reológicas no cambian con la duración del corte o con su historia de corte. Entre éstos se encuentran los Fluidos Plásticos de Binham, Seudoplásticos, Dilatantes y con punto de cedencia [6].

### 2.3.2 Fluidos plásticos de Binham

Son un caso idealizado de los fluidos no-Newtonianos; pues a fin de iniciar su movimiento se requiere vencer un esfuerzo inicial finito, denominado esfuerzo o punto de cedencia. Una vez que dicho esfuerzo inicial ha sido excedido, estos fluidos exhiben una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte, como se muestra en la Figura 6 [6].

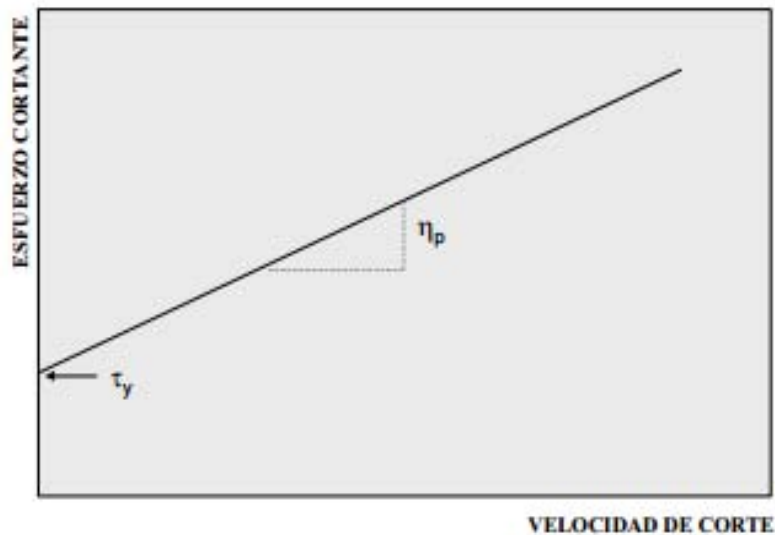


Figura 6. Grafica de fluido de Bingham [5].

### 2.3.3 Fluidos pseudoplásticos

Son aquellos fluidos para los cuales un esfuerzo cortante infinitesimal iniciará su movimiento y para el cual el ritmo de incremento en el esfuerzo cortante decrece conforme se incrementa la velocidad de corte, según se observa en la Figura 7 [6].

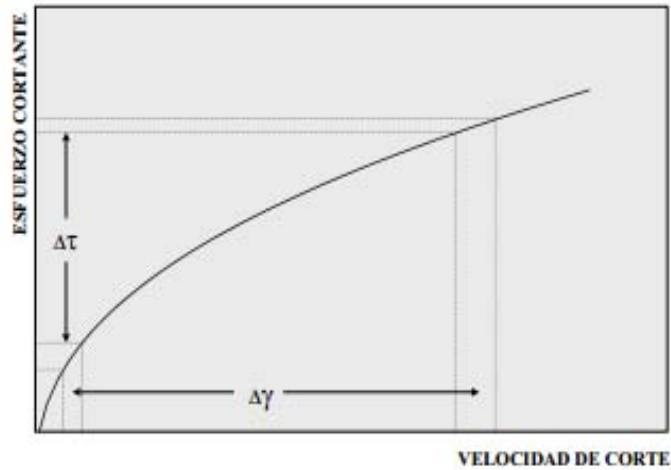


Figura 7. Grafica de fluidos Pseudoplásticos [5].

### 2.3.4 Fluidos dilatantes.

Estos fluidos presentan un comportamiento similar a los Fluidos Pseudoplásticos, con la diferencia de que en los Fluidos Dilatantes el ritmo del incremento del esfuerzo cortante con la velocidad de corte se incrementa, como se observa en la Figura 8[6].

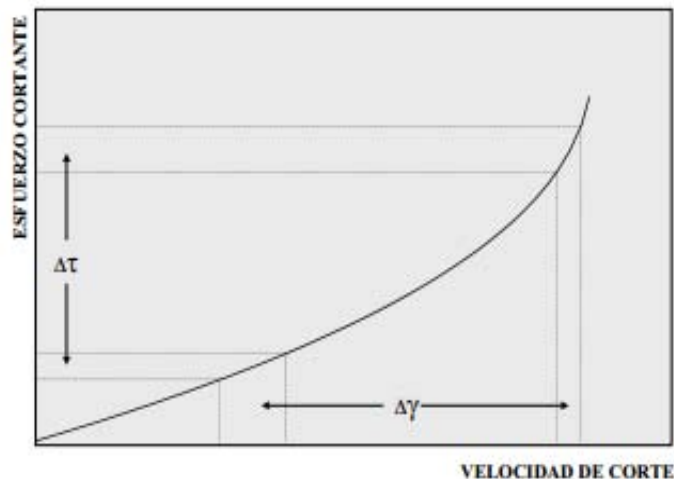


Figura 8. Gráfica de fluidos dilatantes [5].

Matemáticamente éstos fluidos son similares a los Fluidos Pseudoplásticos y, por lo tanto, para ambos tipos de fluidos se aplican las mismas ecuaciones empíricas, con valores apropiadamente diferentes de ciertas constantes reológicas [6].

### 2.3.5 Fluidos pseudoplásticos y dilatantes con punto de cedencia.

Son aquellos fluidos que exhiben un esfuerzo inicial finito o punto de cedencia, como en el caso de los Fluidos Plásticos de Bingham; pero una vez que el esfuerzo inicial ha sido rebasado la relación entre el esfuerzo cortante, en exceso del esfuerzo inicial, con la velocidad de corte resultante no es lineal. Es decir, una vez que el esfuerzo de cedencia ha sido excedido, su



comportamiento esfuerzo-deformación se asemeja al comportamiento de los Fluidos pseudoplásticos o a los dilatantes, como se muestra en la Figura 9[6].

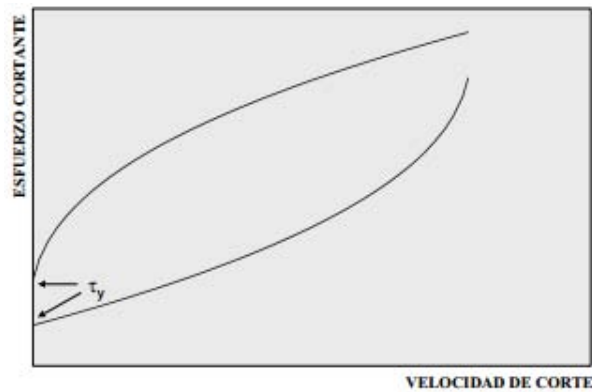


Figura 9. Gráfica de fluidos pseudoplásticos y dilatantes con punto de cedencia [6].

### 2.3.6 Fluidos dependientes del tiempo.

Estos fluidos se caracterizan porque sus propiedades reológicas varían con la duración del corte (esfuerzo cortante y velocidad de corte), dentro de ciertos límites.

Los Fluidos Dependientes del Tiempo se dividen en: Fluidos Tixotrópicos y Fluidos Reopécticos [6].

### 2.3.7 Fluidos tixotrópicos.

Son aquellos fluidos en los cuales el esfuerzo cortante decrece con la duración del corte, su comportamiento se muestra en la figura 10.

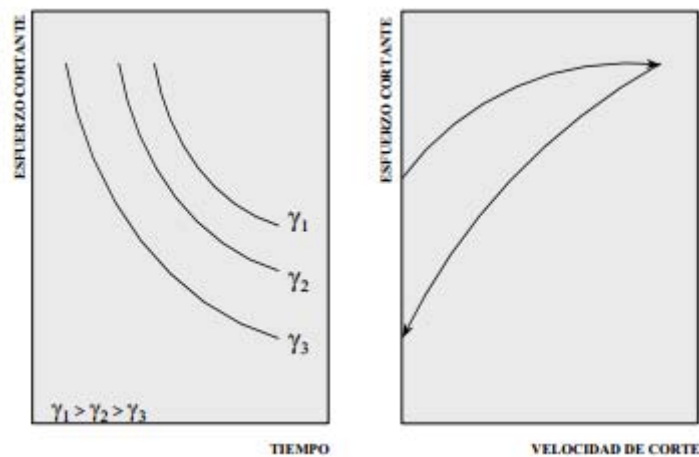


Figura 10. Fluidos tixotrópicos [5].

### 2.3.8 Fluidos Reopécticos.

A diferencia de los Fluidos Tixotrópicos, en los Fluidos Reopécticos el esfuerzo cortante se incrementa conforme se incrementa la duración del corte, como se aprecia en la Figura 11.

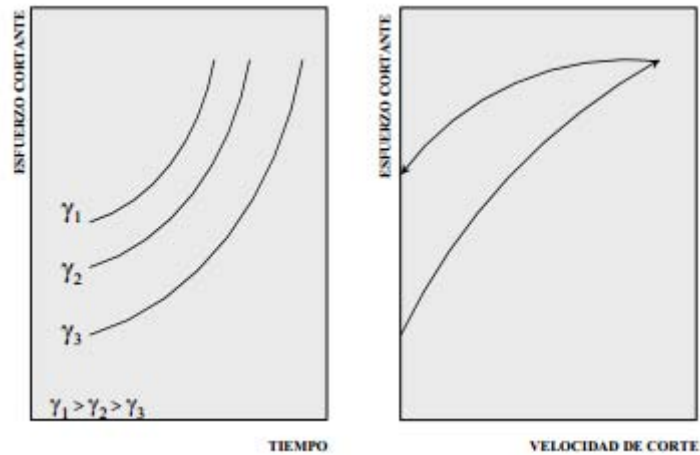


Figura 11. Grafica de fluidos Reopéticos [5].

### 2.3.9 Fluidos Viscoelásticos.

Los Fluidos Viscoelásticos son así denominados debido a que presentan características intermedias entre los fluidos puramente viscosos y los sólidos puramente elásticos, especialmente la característica de deformación bajo la acción de un esfuerzo y de retornar a su forma original indeformada cuando cesa la acción de dicho esfuerzo. Es decir, recobran su forma original después de la deformación a la que han estado sujetos, cuando cesa la acción del esfuerzo.

## 2.4. Propiedades de un fluido de perforación.

### 2.4.1. Tixotropía

Es la propiedad que tienen todos los lodos de perforación de pasar de gel a líquido mediante agitación. Ciertos geles pueden licuarse cuando se agitan vibran y solidifican de nuevo cuando cesa la agitación o la vibración. Gracias a esta propiedad, independiente de la densidad, los lodos colaboran en el mantenimiento de las paredes de la perforación, incluso en las rocas de baja cohesión, al tiempo que ayudan a mantener los detritos en suspensión al interrumpirse la circulación de los mismos.

Se denomina reología al estudio de la deformación y el flujo de la materia. Se define reología como: estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos [6].

### 2.4.2. Reología

Es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. La reología es una parte de la mecánica de medios continuos. Una de las metas más importantes en reología es encontrar ecuaciones constitutivas para

modelar el comportamiento de los materiales, dichas ecuaciones son, en general, de carácter tensorial.

Las propiedades mecánicas estudiadas por la reología se pueden medir mediante reómetros, aparatos que permiten someter al material a diferentes tipos de deformaciones controladas y medir los esfuerzos o viceversa. Algunas de las propiedades reológicas más importantes son:

- Viscosidad aparente (relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte)
- Coeficientes de esfuerzos normales
- Viscosidad compleja (respuesta ante esfuerzos de corte oscilatorio)
- Módulo de almacenamiento y módulo de pérdidas (comportamiento viscoelástico lineal)
- Funciones complejas de viscoelasticidad no lineal

Los estudios teóricos en reología en ocasiones emplean modelos microscópicos para explicar el comportamiento de un material. Por ejemplo, en el estudio de polímeros, éstos se pueden representar como cadenas de esferas conectadas mediante enlaces rígidos o elásticos [6].

Un viscosímetro es un instrumento empleado para medir la viscosidad y algunos otros parámetros de flujo de un fluido. Los viscosímetros de rotación emplean la idea de que la fuerza requerida para rotar un objeto inmerso en un fluido puede indicar la viscosidad del fluido.

La viscosidad aparente está indicada por la indicación del viscosímetro de lodo a 300 RPM ( $\omega_{300}$ ) o la mitad de la indicación del viscosímetro a 600 RPM ( $\omega_{600}$ ). Cabe indicar que ambos valores de viscosidad aparente concuerdan con la fórmula de viscosidad.

La viscosidad plástica (VP) en centipoise (cP) o milipascales-segundo (mPa s) se calcula a partir de los datos del viscosímetro de lodo, como:

La viscosidad plástica se describe generalmente como la parte de la resistencia al flujo que es causada por la fricción mecánica.

La viscosidad plástica es afectada principalmente por:

- La concentración de sólidos.
- El tamaño y la forma de los sólidos.
- La viscosidad de la fase fluida.
- La presencia de algunos polímeros de cadena larga (POLY-PLUS®, hidroxietilcelulosa (HEC), POLYPAC®, Carboximetilcelulosa (CMC)) [6].
- Las relaciones aceite-agua (A/A) o Sintético-Agua (S/A) en los fluidos de emulsión inversa [6].

### 2.4.3. Viscosidad Plástica.

Un parámetro del modelo plástico de Bingham. PV es la pendiente de la línea de esfuerzo cortante/velocidad de corte arriba del umbral de fluencia plástica. La PV representa la viscosidad de un lodo cuando se extrapola a una velocidad de corte infinita sobre la base de las matemáticas del modelo de Bingham. (En el viscosímetro se mide como la resta de la lectura a 600 rpm, menos 300 rpm), como se ve en la ecuación 4:

$$VP(Cp) = \theta_{600} - \theta_{300} \dots \dots \dots (4)$$

**2.4.4. Viscosidad Aparente.**

Fluidos cuya viscosidad depende del tiempo Reopéctico: La viscosidad aparente se incrementa con la duración del esfuerzo aplicado Tixotrópico: La viscosidad aparente decrece con la duración de esfuerzo aplicado [6].

**2.4.5. Punto de Cedencia.**

Se define como la resistencia al flujo debido al grado de atracción entre las partículas sólidas en el fluido, bajo condiciones dinámicas. Se determina mediante las mediciones del viscosímetro. [6].

**2.4.6. Esfuerzo Gel.**

Son medidas realizadas con el viscosímetro de lectura directa y describen el comportamiento de flujo de un fluido de perforación dependiente del tiempo. Los valores de esfuerzo de geles son registrados a los 10 segundos (gel inicial) y a los 10 minutos (gel final). Una medición adicional de los esfuerzos de geles puede ser realizada a los 30 minutos. Los esfuerzos de geles indican las propiedades tixotrópicas de un fluido de perforación y son las medidas de las fuerzas atractivas bajo condiciones estáticas, en relación al tiempo, al contrario de la viscosidad plástica y el punto cedente, que son bajo condiciones dinámicas. Sin embargo, los esfuerzos de geles y el punto cedente, algunas veces pueden estar relacionados, en el sentido de que los valores de esfuerzos de geles disminuirán, conforme disminuye el punto cedente. Los esfuerzos de geles pueden ser Frágiles o Progresivos. Un gel progresivo se incrementa sustancialmente con el tiempo, requiriendo de una alta presión para reiniciar el flujo o romper circulación, luego de una parada, mientras que, un gel frágil se incrementa ligeramente con el tiempo, pero puede ser más alto, inicialmente, que un gel progresivo [6].

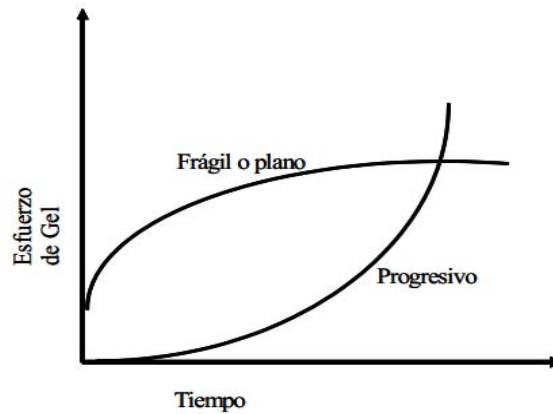


Figura 12. Gráfica de esfuerzo gel vs tiempo [6].

#### 2.4.7. Filtrado Dinámico

Un proceso de filtración en el cual la lechada que se filtra circula por el revoque de filtración de modo tal que el revoque es simultáneamente erosionado y depositado. La tasa de erosión depende de la velocidad de corte del fluido en el frente del revoque. Si la velocidad de corte se mantiene constante, el espesor del revoque y la tasa de filtración alcanzan el estado estacionario, normalmente en cuestión de horas. Cuando las condiciones cambian se establece un nuevo estado estacionario [6].

#### 2.4.8. Enjarre.

Es una capa o película delgada de lodo que se forma en las paredes del agujero. Se presenta principalmente en aquellas formaciones permeables; el espesor de la capa puede variar de 1 a 4 mm. Cuando el enjarre no se forma, el lodo invade las formaciones permeables. Para la formación de enjarre, es esencialmente necesario que el lodo contenga algunas partículas de un tamaño muy pequeño para el cierre de los poros de la formación. Los enjarres pueden ser compresibles o incompresibles, dependiendo de la presión a la que sean sometidos. La formación del enjarre va a depender principalmente de la pérdida de agua y de la permeabilidad de la roca.

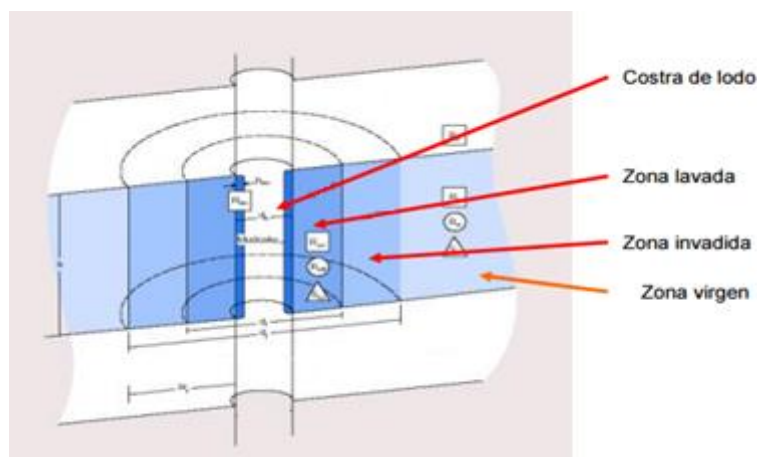


Figura 13. Zona lavada [7].

#### 2.4.9. PH y control de alcalinidad

La determinación y mantenimiento de valores correctos del p H (porción de hidrogeno), tiene mayor importancia hoy en día que en el pasado, en cuanto la formulación de los fluidos de perforación se refiere. El mantenimiento de valores correctos de p H tiene un impacto directo sobre las propiedades correctas de los fluidos.

El p H es una medida del grado de acidez o alcalinidad de una solución acuosa. La dimensión numérica del p H varía entre 0 y 14, siendo los valores bajos los ácidos y los valores altos, los alcalinos. Una solución con p H de 7 es considerado neutral. El p H se puede expresar como el logaritmo negativo de la concentración del ion de hidrogeno. La ecuación es como sigue [8]:

$$pH = -\log(H^+).....(5)$$

#### 2.5. Fluidos que siguen el modelo de Newton.

Este modelo propuesto por Newton, representa a los fluidos ideales. Es decir, caracteriza a aquellos fluidos cuya relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte es lineal. La constante de proporcionalidad, conocida como coeficiente de viscosidad o simplemente viscosidad, es suficiente para describir su comportamiento de flujo. Matemáticamente, esta relación está expresada en la ecuación (3). Ejemplos de fluidos newtonianos lo son todos los gases, líquidos de moléculas simples no elongadas y suspensiones pseudohomogéneas de partículas esféricas en gases o líquidos [5].

##### 2.5.1 Fluidos que siguen el modelo de Bingham.

Este tipo de fluidos es el más simple de todos los fluidos no-Newtonianos, debido a que la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte exhibe una proporcionalidad directa, una vez que un esfuerzo inicial finito, necesario para iniciar el movimiento, ha sido excedido. A este esfuerzo inicial se le denomina punto de cedencia,  $\tau_y$ ; en tanto que la pendiente de la porción lineal del reograma es conocida como coeficiente de rigidez o simplemente viscosidad plástica,  $\eta_p$ . Así, el modelo de Bingham está representado en la ecuación 6 como:

$$\tau = \frac{\eta_p}{g_c} \gamma + \tau_y.....(6)$$

Donde  $\gamma = 0$  si  $\tau \geq \tau_y$  y  $\gamma \neq 0$  si  $\tau > \tau_y$ .

Aunque este modelo es un caso idealizado, las suspensiones de arcillas (20 a 60% de arcillas cálcicas en agua) y el flujo de fluidos de perforación en espacios anulares, asemejan su comportamiento de flujo a este modelo [5].

Por simplicidad, este modelo ha sido empleado extensivamente en la ingeniería petrolera; aun cuando el comportamiento real del lodo de perforación no presenta una relación lineal entre el esfuerzo y la velocidad de corte [5].

### 2.5.2. Fluidos que siguen el modelo de ley de potencias.

El modelo de Ostwald-de Waele, comúnmente conocido como modelo de Ley de Potencias, es uno de los más usados en el campo de la ingeniería y una de las primeras relaciones propuestas entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte. Esta relación está caracterizada por dos constantes reológicas y expresada en la ecuación 7 como:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \dots\dots\dots(7)$$

en donde el índice de consistencia  $K$ , es un término semejante a la viscosidad e indicativo de la consistencia del fluido. Es decir, si el valor de  $K$  es alto, el fluido es más "viscoso" y viceversa. En tanto que el índice de comportamiento de flujo  $n$ , es una medida de la no Newtonianidad del fluido. Entre más alejado de la unidad sea el valor de  $n$ , más no Newtoniano es el comportamiento del fluido.

Si el valor de  $n$  es mayor que cero y menor que la unidad, el modelo representa a los fluidos pseudoplásticos; en tanto que, si  $n$  es mayor que la unidad, el modelo representa a los fluidos dilatantes. Nótese que este modelo se reduce a la Ley de la Viscosidad de Newton, si  $n$  es igual a la unidad.

No obstante que el modelo de Ley de Potencias es eminentemente empírico, ha sido ampliamente utilizado, debido a que a gradientes de velocidad intermedios reproduce adecuadamente el comportamiento de flujo de muchos fluidos pseudoplásticos y dilatantes. Otra ventaja en el uso de este modelo, lo constituye el hecho de que es simple y posee únicamente dos constantes reológicas ( $n$  y  $K$ ); además de que cuando ha sido empleado en problemas de flujo en tuberías ha dado excelentes resultados [5].

### 2.5.3. Fluidos que siguen el modelo de ley de potencias modificado.

El modelo de Herschel-Bulkley, también conocido como modelo de Ley de Potencias con punto de cedencia, fue propuesto con el fin de obtener pseudoplásticos o una relación más estrecha entre el modelo reológico y las propiedades de flujo de los fluidos pseudoplásticos y dilatantes que presentan un punto de cedencia. Entre los modelos propuestos que involucran el uso de tres constantes o parámetros ajustables, el modelo de Herschel-Bulkley es de los más simples y exactos. Este modelo está representado por:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n + \tau_y \dots\dots\dots(8)$$

Donde  $\dot{\gamma} = 0$  si  $\tau \geq \tau_y$  y  $\dot{\gamma} \neq 0$  si  $\tau > \tau_y$  donde  $\tau_y$  representa un esfuerzo inicial o punto de cedencia. Las constantes  $n$  y  $K$  tienen un significado similar a las constantes reológicas del modelo de Ley de Potencias. Como puede observarse en la ecuación 8, este modelo es más general que los anteriores. Es decir, los modelos de Newton, Bingham y Ostwald-de Waele son soluciones particulares de éste; pues si  $n$  es igual a la unidad y  $\tau_y$  es cero, el modelo se reduce a la Ley de Newton (ecuación 3); en tanto que si  $\tau_y$  es diferente de cero, este modelo representa al modelo de Bingham (ecuación 6), con  $K = \eta\rho / g_c$ . Por otro lado, si  $n$  es diferente de la unidad y  $\tau_y$  es

cero, resulta el modelo de Ley de Potencias (ecuación 8). Por este motivo, a este modelo se le ha denominado como modelo de Ley de Potencias Modificado [5].

## 2.6. Viscosidad en función de la temperatura

La viscosidad disminuye con la temperatura. Existen varias fórmulas que permiten evaluar la variación de la viscosidad de un líquido al cambiar la temperatura. Las más importantes son:

- La ecuación que presenta Arrhenius:

$$\mu = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \dots\dots\dots(9)$$

Siendo  $\mu$ , la viscosidad dinámica ( $Pa \cdot s$ ),  $T$  es la temperatura absoluta ( $K$ ) y  $A$  y  $B$  son constantes dependientes del líquido [9].

Como se deduce de la ecuación, la viscosidad disminuye con la temperatura. Esto es debido al hecho de que, conforme aumenta la temperatura, las fuerzas viscosas son superadas por la energía cinética, dando lugar a una disminución de la viscosidad, efecto que ha de tenerse en cuenta para una determinación rigurosa de la misma. En la medición, la temperatura debe permanecer prácticamente constante.

- La ecuación que presenta Poiseuille (1840)

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha T + \beta T^2} \dots\dots\dots(10)$$

Donde  $\mu_0$ , la viscosidad dinámica a  $0^\circ C$ ,  $T$ , la temperatura ( $^\circ C$ ) y  $\alpha$  y  $\beta$ : coeficientes constantes.

### 2.6.1 Viscosidad en función de la presión y la temperatura

La viscosidad en líquidos aumenta exponencialmente con la presión. Excepcionalmente, para el agua a temperaturas menores de  $30^\circ C$  la viscosidad disminuye. Los cambios de viscosidad con la presión son bastante pequeños para presiones distintas de la atmosférica.

Existe una ecuación que permite tener en cuenta la temperatura y la presión, que presenta Barus:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{\left[ \frac{AP-B}{T-T_0} \right]} \dots\dots\dots(11)$$



En esta expresión  $\mu_0$ , es la viscosidad a  $T_0$  y a presión atmosférica y  $A$  y  $B$  para aceites y lubricantes en general tienen valor constante de:  $A: 1/430$  y  $B: 1/36$  [10].

## 2.7. Fluidos de perforación

El uso de fluidos para perforar pozos se remonta a Egipto 3000 años antes de Cristo, donde se perforaban pozos de hasta 20 pies de profundidad, utilizando agua para ablandar y limpiar el hueco. Se presenta la figura 14, la clasificación de los fluidos y los fluidos de control.



Figura 14. Clasificación de fluidos de perforación [5].

### 2.7.1 Fluidos Poliméricos

Por definición, cualquier compuesto que se genera de unidades identificables que se repiten (monómeros) para formar una estructura en cadena se denominan polímeros.

Los polímeros orgánicos utilizados en los fluidos de perforación pueden ser clasificados de acuerdo a su origen y a su composición. Algunos de ellos son naturales, como almidones y la goma guar. Estos se pueden utilizar en su estado natural, luego de un proceso muy breve.

Otros polímeros como la goma xantham requiere un proceso cuidadoso para su elaboración. Hay otra familia de polímeros como CMC (carboximetilcelulosa), que se puede denominar semi-sintéticos. Finalmente los polímeros como los poliacrilatos son los sintéticos.

El uso de los polímeros en la formulación de fluidos de perforación es cada vez más generalizado y al mismo tiempo sofisticado. Muchas veces se diseñan polímeros para satisfacer condiciones de perforación especiales, y a veces pueden reemplazar en una forma completa las arcillas para proveer una protección de formación más efectiva. La versatilidad de los polímeros es extendida y mejorada de una forma constante, y la posibilidad de prácticamente diseñar polímeros con propiedades particulares para cumplir con las necesidades de diferentes condiciones de perforación; hace su uso más extendido y popular [8].

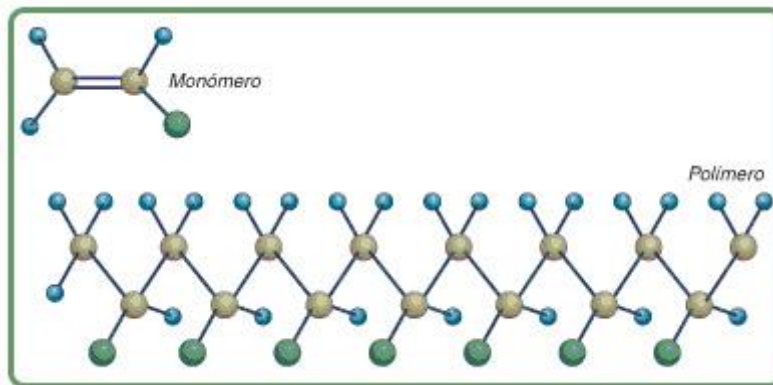


Figura 15. Monómero y polímero [11].

### 2.7.2 Sistemas de Fluidos de perforación en base aceite.

Baroid desarrolló una amplia gama de fluidos de perforación en base aceite para satisfacer las necesidades de la industria a lo largo del mundo entero, y se clasifican en cuatro categorías.

1.-Sistemas INVERMUL/INVEROMUL. Estos sistemas se utilizan con una emulsión controlada y filtrado reducido.

2.-Sistema EZ OIL o sistema relajado. La emulsión de este sistema no es tan ajustada como el anterior y como su nombre lo indica no se controla el filtrado.

3.-Sistema de relajación aceite/agua 50/50. Debido a factores medio ambientales y a razones económicas se reduce la proporción de aceite incrementándose la fracción de agua, hasta alcanzar una relación 50/50.

4.-sistema Baroid 100 o sistema ENVIROCORE. Este sistema no contiene agua, siendo un sistema formulado completamente con aceite. En presencia de agua de formación se forma una emulsión para evitar que el agua se ponga en contacto con formaciones sensibles al agua. El sistema fue diseñado para reducir la interacción entre la formación y el fluido de perforación, produciendo testigos o corazones inalterados de la formación que se perfora.

Los lodos de aceite ofrecen una estabilidad mejorada del hueco comparado con sistemas de base agua y esta estabilidad permite a los operadores perforar a mayores profundidades y con menos problemas a la hora de asentar un revestimiento protector [8].

### 2.7.3 Emulsiones Inversas

Una emulsión inversa se define como un sistema donde la fase continua es aceite y el filtrado también es aceite. El agua que forma parte del sistema consiste de pequeñas gotas que se hallan dispersas y suspendidas en el aceite, actuando cada gota como una partícula de sólido. La adición de emulsificadores hace que el agua se emulsifique en el aceite formando un sistema estable.

Los emulsificantes que se utilizan en el sistema deben ser tanto solubles en agua como en aceite.

El empleo de otros materiales organofílicos proveen las características de gelación y control de la filtración. Hay varias razones que impiden la utilización de aceite solo para la formulación de un fluido de perforación:

- 1.-El aceite solo no puede suspender los materiales densificantes. Cuando las condiciones de la presión de formación requieren la utilización de densidades elevadas de lodo se requiere la adición de agentes de suspensión.
- 2.-El aceite solo no puede proveer el control de la filtración y la invasión de aceite a la formación puede dañar la misma.
- 3.-La falta del control de filtración puede resultar en considerables pérdidas de aceite cuando se perforan formaciones porosas de alta permeabilidad.
- 4.-En el caso de sufrir un influjo de agua de formación el aceite solo no tiene la capacidad de neutralizar el agua emulsificándolo, en el sistema.

Por lo tanto, la inclusión del agua en el sistema es un paso necesario, produciendo los siguientes beneficios:

- 1.-Economía. Como el agua es generalmente más barato que el aceite, su inclusión en el sistema reducirá el costo del lodo.
- 2.-Viscosidad y gelación. Como el agua actúa como sólido en el sistema, su presencia va a ayudar para incrementar la viscosidad. Además, la presencia de agua mejora la dispersión de las arcillas organofílicas que se utilizan para controlar las características de gelación del sistema.
- 3.-Control de filtración. Otra vez, debido a que el agua actúa como un sólido en el sistema su presencia ayudará en la reducción del filtrado.
- 4.-La inclusión de agua permitirá la solubilización de sales para lograr el equilibrio o la deshidratación osmótica de la formación.
- 5.-Seguridad. La adición de agua va a incrementar la temperatura a la cual el aceite combusta reduciendo de esta manera el peligro potencial y latente de un fuego [8].

#### **2.7.4. Fluidos aire seco.**

La perforación con aire seco permite obtener velocidades de penetración altas. De hecho se obtienen las velocidades más altas de cualquier fluido conocido. Los recortes generalmente se reducen a polvo al momento de llegar a la superficie debido a la pulverización y choque a alta velocidad contra la tubería y las paredes del pozo.

El transporte de recortes depende de la velocidad en el espacio anular dado que el aire no tiene un soporte estructural para transportarlos. La perforación con aire o gas está restringida por la estabilidad del agujero, formaciones con producción de agua o altas presiones de formación y por factores económicos. Aun cuando se puede perforar con aire en presencia de flujos de gas, existe la posibilidad de explosiones internas y externas. Sin embargo, la perforación con aire permite velocidades de penetración altas, mejor desempeño de las barrenas, agujeros más uniformes, pruebas de formación continuas, núcleos y recortes más limpios, mejores trabajos de cementación y mejores terminaciones [12].

#### **2.7.5. Fluidos de niebla.**

Como se mencionó, cuando se encuentran zonas productoras de agua, los fluidos a base de aire seco o gas no tienen buen desempeño. En este caso, se pueden utilizar los fluidos de niebla, donde se inyecta una pequeña cantidad de agua y agentes espumantes a la corriente de aire. Los agentes espumantes reducen la tensión interfacial de las gotas de agua [12].

#### **2.7.6. Fluidos espumosos.**

Los fluidos espumosos son más viscosos que los fluidos de niebla porque contienen mayor porcentaje de agua. Las velocidades de penetración con estos fluidos son bastante grandes. El fluido se forma con la inyección de agua y surfactantes espumosos a la corriente de aire. También se pueden formar espumas estables inyectando fluidos de perforación con surfactantes a una corriente de aire. En los fluidos espumosos, la capacidad de acarreo depende más de la viscosidad del fluido que de la velocidad del fluido, a diferencia de los fluidos a base de aire seco o con niebla [12].

#### **2.7.7. Fluidos aireados.**

Estos fluidos se utilizan en zonas de presionadas o de baja presión de formación, con el fin de evitar las pérdidas de circulación que impiden un proceso correcto de perforación. Se preparan inyectando aire y gelatina. Su uso no está muy generalizado [12].

## 2.8. Propiedades Reológicas y Tixotrópicas que definen el comportamiento de los fluidos de control para su aplicación en pozos petroleros.

En las operaciones de limpiezas y moliendas de los pozos se toma en cuenta el efecto que producen la sedimentación de los recortes y material densificado, esto si no marcha bien, es debido a un fluido mal preparado o una hidráulica mal aplicada. Por lo tanto, es necesario saber calcular de acuerdo a sus características, la caída de recortes y establecer los regímenes de bombeo para que a través del espacio anular sean eliminados [6].

En operación el sistema de circulación de un equipo, notará que el bombeo inicial registra una presión en el manómetro de la bomba reciprocante, ésta indudablemente corresponde a la resistencia que opone los fluidos al tratar de circularlos. Los flujos laminares que ocurren generalmente entre diámetros internos de los pozos o agujeros y los diámetros externos de las tuberías, de producción o de trabajo, son los factores preponderantes que intervienen en estas presiones [6].

La falta de avance en las moliendas por la re trituración de los recortes, así como el deficiente acarreo de recortes a la superficie, puede ser originada por:

- 1.-Inadecuadas propiedades reológicas de los fluidos.
- 2.-Hidráulica mal aplicada.

Algunos factores de la hidráulica que son determinantes para la correcta eliminación de recortes en la limpieza del pozo. Estos factores son:

- 1.-Fases y tipos de flujo.
- 2.-Velocidad de asentamiento de los recortes.
- 3.-Velocidad anular.
- 4.-Pérdida de presión en el sistema de circulación.

El conocer estos factores que contribuyen a la limpieza en el interior del pozo, nos permitirá utilizar la técnica hidráulica apropiada para sacar los recortes a la superficie, con la cual se obtendrán ventajas, tales como:

- 1.-Un pozo o agujero más limpio
- 2.-Mayor eficiencia de las herramientas de molienda (barrenas, molinos).
- 3.-Menos pérdidas de circulación
- 4.-Menores riesgos de atrapamiento y pegadura con las sartas de trabajo.
- 5.-Menor peligro de reventones en los pozos.

Una de las más importantes funciones de un fluido de control es la de transportar los recortes a la superficie entre muchas otras, pero en este caso hablaremos sólo del traslado de materiales

sólidos. La falla en esta función puede provocar exceso de sólidos en el fluido, bajo promedio en las moliendas y atrapamientos de tubería [6].

Esta función va a depender de:

- 1.-La densidad de los recortes, tomada del material que se ésta moliendo.
- 2.-La viscosidad del fluido empleado.
- 3.-La velocidad ascendente del fluido en el espacio anular.

Como vemos la viscosidad es una propiedad sumamente importante en los fluidos de control, por lo que nos enfocaremos a describir propiedades de la viscosidad [6].

Los fluidos de perforación son generalmente suspensiones de sólidos en líquidos, los cuales presentan características de flujo bastante complejas, pues no siguen, al menos en una forma rigurosa, alguno de los comportamientos reológicos descritos anteriormente. Además, las condiciones de flujo tales como la presión y la temperatura, así como las diferentes velocidades de corte encontradas en los pozos petroleros, tienden a agravar el entendimiento de las propiedades de flujo de estos fluidos [6].

De acuerdo con las funciones que tienen que cumplir estos fluidos de perforación, y las características tixotrópicas son deseables; pero esta dependencia del tiempo deberá de ser eliminada antes de estudiarlos desde el punto de vista reológico. Sin embargo, los fluidos de perforación (lodos de perforación), pueden ser estudiados como Fluidos no-Newtonianos e Independientes de Tiempo; es decir, pueden ser considerados como Fluidos Plásticos de Bingham y/o pseudoplásticos con y sin Punto de Cedencia [5].



**Figura 16.** Aplicación de fluido de perforación [13].

La descripción reológica de los fluidos ha sido expresada mediante relaciones matemáticas complejas. Afortunadamente en el campo de la ingeniería los fluidos no-Newtonianos más abundantes, estudiados y mejor entendidos son los fluidos pseudoplásticos.

Algunas de las relaciones empleadas para describir a estos fluidos han sido aplicadas al comportamiento reológico de los fluidos de perforación, terminación y reparación de pozos petroleros. Por lo tanto, los fluidos de perforación, terminación y reparación de pozos pueden ser representados por varios modelos reológicos o ecuaciones constitutivas; entre las cuales, las más empleadas son los modelo de Bingham, Ostwald-de Waele y Herschel-Bulkley. Recientemente,

los modelos de Robertson y Stiff y de Casson han sido propuestos para caracterizar a los fluidos de perforación y las lechadas de cemento [5].

### 2.8.1. Sistemas de fluidos de perforación

Los sistemas de fluidos de perforación poseen una fase continua, que es líquida, y una fase discontinua compuesta por sólidos. En ocasiones, también exhiben una fase gaseosa; ya sea por diseño o como resultado del arrastre de gas de formación. Estos fluidos son una mezcla de componentes líquidos y sólidos, cada uno de los cuales está diseñado para modificar una propiedad específica del fluido de perforación, tal como su viscosidad y su densidad. Los fluidos de perforación acuosos, a los que se alude generalmente como lodos a base de agua, son los más comunes. Su composición varía entre mezclas simples de agua y arcilla, y sistemas complejos de fluidos de perforación inhibidores, o estabilizadores de arcillas, que incluyen muchos componentes. En los fluidos de perforación no acuosos, son generalmente lodos a base de sintéticos, la fase continua puede consistir en aceites minerales, ésteres biodegradables, olefinas u otras variantes. Aunque por lo general más costosos que los fluidos de perforación acuosos, estos sistemas tienden a proporcionar un excelente control del pozo, estabilidad térmica, lubricidad y velocidades de penetración, pero generalmente más caros [12].

En rocas fracturadas o en ambientes en los que el pozo no podría sustentar una columna de agua sin una pérdida significativa de fluido en la formación, los perforadores utilizan sistemas de aire, bruma o espuma para ayudar a remover los recortes del pozo y mantener la integridad del mismo [14].

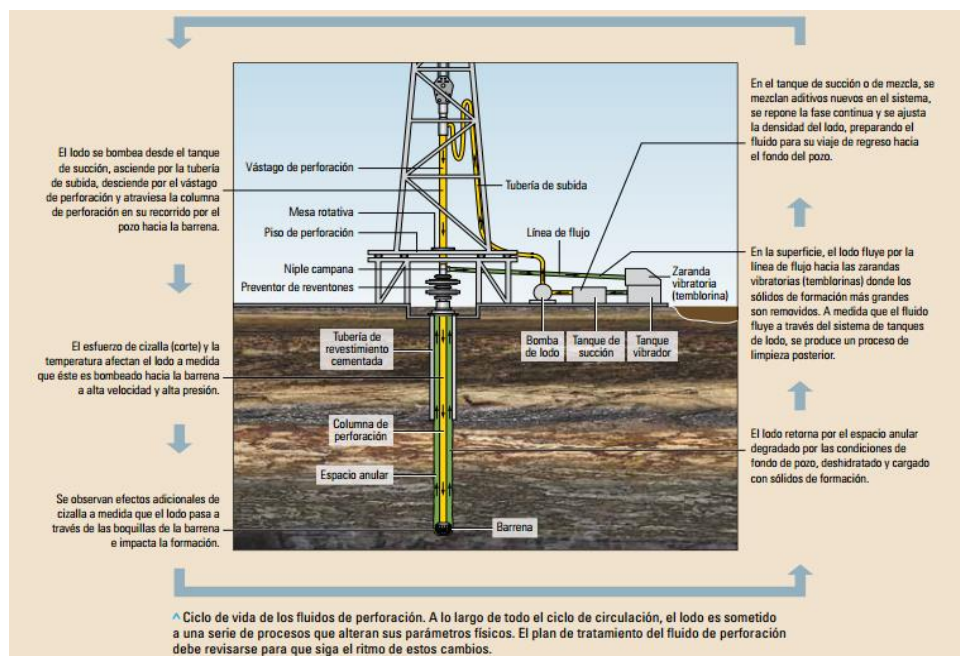


Figura 17. Muestra la circulación del fluido de control y su importancia para la perforación [14].

## 2.8.2. Funciones básicas Los fluidos de perforación

Son formulados para llevar a cabo una amplia variedad de funciones extensas y variadas, las características de rendimiento clave son las siguientes:

**Enfriamiento y lubricación de la barrena:** A medida que el fluido de perforación pasa a través y alrededor del arreglo de perforación, ayuda a enfriar y lubricar así, como también la barrena. La energía térmica es transferida al fluido de perforación, que lleva el calor a la superficie [12].

**Control de las presiones de formación:** El fluido de perforación es vital para mantener el control de un pozo. El lodo es bombeado a través de la sarta de perforación, a través de la barrena y de regreso por el espacio anular. En agujero descubierto, la presión hidrostática ejercida por la columna de lodo se utiliza para compensar los incrementos de la presión de formación que, de lo contrario, producirían el ingreso de los fluidos de formación en el pozo, causando posiblemente la pérdida de control del pozo. Sin embargo, la presión ejercida por el fluido de perforación no debe exceder la presión de fractura de la roca propiamente dicha; de lo contrario, el lodo fluiría hacia la formación; situación que se conoce como pérdida de circulación. Remoción de los recortes del pozo: La circulación del fluido de perforación permite llevar los recortes a la superficie. La conservación de la capacidad del fluido para transportar estos trozos sólidos por el pozo hacia la superficie (su capacidad de transporte), la capacidad de transporte y a la vez evitar un valor elevado de densidad de circulación equivalente (ECD); la densidad real del lodo más la caída de presión producida en el espacio anular por encima de un punto dado del pozo. Por lo que el rediseño del viscosímetro, sería de mucha utilidad para probar en el sitio; por ser una herramienta portátil, o con mayor portabilidad que otros viscosímetros como lo sería el Fann 90 [12].

Con la herramienta a rediseñar se ésta en ventaja por poder hacer análisis de los fluidos a una presión mayor que la atmosférica y a una temperatura fija mayor a la del ambiente. Por otro lado, una ECD alta, no controlada, puede producir incidentes de pérdidas de circulación y con esta herramienta, tendríamos la tendencia del comportamiento reológico y tal vez evitar accidentes, ya que se contaría con un simulador físico para poder probar el fluido de perforación y además de tener la tendencia de toda la hidráulica del pozo. En conclusión, es hacer las pruebas a parámetros más reales como los que se encuentran en el fondo del pozo [12].

## 2.9. Aplicación de fluidos de perforación

Los lodos de perforación tienen utilidades muy particulares, dependiendo de las condiciones a las que nos enfrentemos en las etapas de perforación, por ello, describimos los principales fluidos utilizados en la perforación.

1.-Lodos Base Agua: Cuando se le agrega al agua a los productos químicos orgánicos se les denomina lodos base agua con dispersantes orgánicos, y cuando se les agrega aceite se denominan emulsionados. Los primeros son los más utilizados y se clasifican de acuerdo al dispersante usado en su control [12].

Los lodos base agua emulsionados requieren en su preparación aceite, diésel o crudo en cantidad de 5 a 10% del volumen total del lodo. Las ventajas de este tipo de lodo son:



- Aumentar el avance de la perforación.
- Prolongar la vida de la barrena.
- Reducir la torsión y embolamiento de la barrena.
- Prevenir pegaduras por presión diferencial.
- Mejorar el enjarre.
- Incrementar la lubricidad de la barrena.

Sin embargo, los lodos base agua pueden provocar no sólo disminución de la densidad y el filtrado sino aumento de la viscosidad.

2. Lodos Inhibidos: En algunas operaciones de perforación, los lodos base agua no resultan efectivos, sobre todo cuando se requieren altas densidades sin alterar la viscosidad o gelatinosidad. En estos casos, se recomienda el uso de los lodos inhibidos tales como los cálcicos, base yeso, de agua de mar y de agua saturada de sal. Dentro de las ventajas de los lodos inhibidos tanto cálcicos como base yeso se pueden mencionar la protección que estos 12 brindan a la tubería de perforación de la corrosión y suspensión de la actividad biológica; sin embargo, tienen la desventaja de solidificarse a temperaturas de fondo mayores de 120° C. Por otra parte, los lodos de agua de mar y de agua saturada de sal se usan generalmente para evitar los problemas de perforación provocados por la presencia de sal en la columna litológica [12].

3. Lodos de Bajo Contenido de Sólidos: Se define como un lodo de perforación, terminación o reparación al que cumple ciertos requisitos de densidad, viscosidad y control de filtración con un contenido mínimo de arcilla. Dentro de este tipo de lodos se pueden nombrar los siguientes: gomas, asbestos finamente divididos, arcilla beneficiada, combinados (bentonita prehidratada-lignosulfonato) y lodo no dispersivo. En áreas donde este tipo de lodos es aplicable, se obtienen grandes ahorros por:

- Aumentar el grado de penetración.
- Incrementar la vida de la barrena.
- Mejorar la estabilidad el agujero.

Por otra parte, el uso de este tipo de lodos es delicado (por la estabilidad del pozo), por lo que deben tomarse ciertas consideraciones en su uso tales como: reducción del uso de bentonita para controlar la viscosidad y el filtrado, control del filtrado con polímeros orgánicos, y el uso de doble malla en las temblorinas para una mejor eliminación del recorte y del funcionamiento óptimo del eliminador de sólidos [12].

Solo por mencionar algunos, ya que como vimos, existen diferentes grupos de fluidos de control que utilizamos para la perforación, pero en este caso mencionaremos, otros lodos que se utilizan en ciertas condiciones particulares.

### **2.9.1. Lodos de perforación de fosfatos y bentonita.**

#### Propósito

Para la perforación de pozos de poca profundidad y con densidades de no más de 12 [lpg]. Sensible a las temperaturas de más de 150 [°F], y no funciona en sistemas con más de 5000 mg/l de cloruros o con un contenido de calcio de más de 100 mg/l. El calcio se puede precipitar con soda ash.

#### Aplicaciones especiales

Solamente para perforar huecos de poca profundidad debido a su sensibilidad a altas temperaturas y a los cloruros [12].

### **2.9.2. Lodos de Cal**

Diseñado para perforar formaciones de yeso y anhidrita. El calcio de estas formaciones contamina a los otros sistemas. Utilizado para la perforación de arcillas hidratables, tipo gumbo. El sistema tiene viscosidades más bajas que un sistema disperso de la misma densidad. Tienen una tolerancia mayor a los sólidos que los sistemas dispersos [12].

#### Aplicaciones especiales

Los lodos de cal poseen un buen desempeño hasta temperaturas de 250 [°F]. A partir de esta temperatura el control del filtrado se hace muy difícil. El sistema se deshidrata y tiende a solidificarse. En la mayoría de los casos un lodo de cal se obtiene a partir de la conversión de un lodo bentonítico regular a un lodo de cal. Este proceso se denomina "breakover" o conversión. Durante la conversión se convierte a la bentonita sódica en bentonita cálcica [12].

### **2.9.3. Lodos de yeso**

#### Propósito

Sistema inhibido que va a servir a las mismas funciones que los lodos de cal. Es un lodo de menor alcalinidad que el lodo de cal. El sistema contiene hasta 700 mg/l de calcio en solución contra los 400 mg/l de lodo de cal.

Son más tolerantes a la contaminación de sólidos y soportan temperaturas de hasta 250 [°F].

#### Aplicaciones especiales

Sistema frecuentemente utilizado para perforar lutitas tipo gumbo y formaciones de anhidrita [12].

#### 2.9.4. Lodos de agua de mar con bentonita prehidratada

Propósito

Su propósito primario es en utilizar el agua de costa afuera, ya que se puede utilizar agua de mar, y de no tener que traer agua de lugares lejanos. El agua de mar es barata y su contenido de NaCl, inhibe la hidratación de las arcillas [12].

Problema	Indicaciones	Soluciones
Bajas viscosidad.	Pobre limpieza del hueco.	Agregar bentonita, PAC R y Polímero XC.
Bajos geles.	Pobre suspensión.	
Hueco inestable.	Derrumbe. Torque y arrastre.	Incrementar el exceso de cal. Agregar LIGNOX.
Alta viscosidad.	Aumento del MBT. Altos geles.	Utilizar centrifuga. Diluir, agregar Lignox, agregar THERMA-THIN.
Perforar cemento.	Alta viscosidad.	Diluir, pretratar el sistema con 1-2 lb/bbl de THERMA-THIN.
Alta viscosidad en las maniobras.	Pérdida de lodo sobre las zarandas.	Pretratar el sistema con 1-2 lbs/bbl de THERMA-THIN. Agregar 2 lb/bbl de cal. Ajustar el Ph a 12.

**Tabla 1.** Soluciones a problemas de perforación [12].

# Capítulo 3

## Tipos de Viscosímetros

Existen diversos instrumentos o viscosímetros que permiten medir las propiedades reológicas de los fluidos. Su objetivo es la creación de una situación controlada de flujo donde sea posible medir el esfuerzo cortante y la velocidad de cizalla, que permitan el cálculo de la viscosidad.

### 3.1 Viscosímetro de tipo capilar

El viscosímetro capilar es quizá el instrumento para la determinación de viscosidad más empleado, y también el más antiguo. En este tipo de viscosímetros un fluido es obligado a pasar a través de un tubo observándose una distribución de velocidades de tipo parabólico, de forma que la porción del fluido que está en contacto con la pared del capilar tiene una velocidad nula y la porción del fluido que se encuentra en el centro del tubo tiene una velocidad máxima [15].



**Figura 18.** Perfil parabólico de velocidades en un tubo capilar [16].

En este tipo de viscosímetros la viscosidad se mide a partir del flujo medio y la presión aplicada. La ecuación básica es la ecuación de Hagen-Poiseuille, donde  $\eta$  es la viscosidad del fluido,  $\Delta P$  es la caída de presión a lo largo del capilar,  $r$  es el radio del capilar,  $L$  la longitud del capilar y  $V$  el volumen de fluido que ha circulado en un tiempo  $t$ :

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P \cdot t}{8 \cdot V \cdot L} \dots\dots\dots(12)$$

En la figura 19 se muestran distintos tipos de viscosímetros capilares.



**Figura 19.** Distintos tipos de viscosímetros capilares [17].

### 3.2 Viscosímetro de orificio o de copa

Son empleados normalmente para medir y controlar las propiedades de flujo en la manufactura, procesamiento y aplicaciones de tintas, pinturas y adhesivos. En general son sencillos y fáciles de manejar, aunque presentan el inconveniente de que las medidas de viscosidad no son muy precisas. Ejemplos de viscosímetros de este tipo son los viscosímetros Ford, Zahn, Shell, Saybolt y Furol.

Los viscosímetros de orificio tienen normalmente capilares muy cortos; el viscosímetro típico es un recipiente con un agujero en el fondo. La copa se llena y se mide el tiempo necesario para que se vacíe. En este caso, el caudal depende en gran medida del nivel del líquido y el flujo producido no sigue la ley de Hagen-Poiseuille. De esta forma, la viscosidad y el tiempo de vaciado no se relacionan mediante una ecuación sencilla, sino que el análisis del flujo es bastante complicado. No es recomendable el uso de este tipo de viscosímetros en la caracterización de fluidos No-Newtonianos ni en fluidos tixotrópicos o reopécticos. La figura 20 muestra un viscosímetro de copa comercial muy utilizado [12].



Figura 20. Viscosímetro de orificio o de copa Ford [18].

### 3.3 Viscosímetro de caída de cuerpos

En los viscosímetros de cuerpo móvil la movilidad de una esfera, burbuja, disco en el fluido da medida de la viscosidad del fluido.

Los viscosímetros más conocidos son los de caída de esferas, los cuales se basan en la ley de Stokes, que relaciona la viscosidad de un fluido con la velocidad de caída. Si una esfera cae en el interior de un fluido libremente se acelera hasta que la fuerza de la gravedad se iguala a la fuerza de rozamiento que ejerce el fluido sobre ella. La ley de Stokes relaciona la viscosidad del fluido a través de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{(2r^2 g(d_s - d_1))}{(9v)} \dots\dots\dots(13)$$

Donde  $r$  y  $d_s$  son respectivamente el radio y la densidad de la esfera,  $d_1$  es la densidad del líquido y  $v$  la velocidad de caída. Normalmente se utilizan para fluidos Newtonianos muy viscosos con los que se pueden tener medidas de viscosidades bastante precisas.

Una variación de este tipo de viscosímetros consistiría en hacer caer la esfera por un plano inclinado, pudiéndose aplicar en la ecuación 11, semejante a la siguiente:

$$\eta = \frac{K(d_s - d_1)}{(v)} \dots\dots\dots(14)$$

Donde K es una constante característica del viscosímetro. La figura 21 muestra un viscosímetro de caída de objetos, uno con tubo vertical y el otro con tubo inclinado [15].

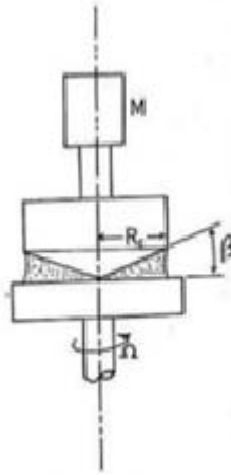


**Figura 21.** Figura de viscosímetro Haake de caída de bola por plano inclinado [17].

### 3.4 Viscosímetro de cono-placa

Viscosímetro de cono-placa. Su funcionamiento de él se basa en la cizalla presente que se genera por movimiento sobre un líquido situado en el espacio comprendido entre un cono y una placa, siendo el ángulo ( $\alpha$ ) entre ambos muy pequeño (inferior a  $4^\circ$ , ya que, para ángulos mayores, los cálculos se complicarían excesivamente). En la figura 22, se muestra de forma exagerada la geometría del sistema. Si el cono gira con cierta velocidad angular ( $\Omega$ ), se generará un movimiento de rotación en el fluido de tal forma que éste girará a una velocidad mayor cerca de las paredes del cono. La figura 22, representa una fotografía de un viscosímetro de cono-placa. Todos los instrumentos de cono-placa permiten extraer el cono para un cambio de la muestra, lo que facilita en muchos casos la limpieza del mismo, siendo ésta, junto con la pequeña cantidad de muestra necesaria las principales ventajas que presenta este tipo de equipo. En la mayoría de los viscosímetros rotacionales la velocidad de cizalla cambia con la distancia al centro de rotación. Sin embargo, en el viscosímetro de cono-placa la velocidad de cizalla a lo largo del espaciado del cono es constante, ya que el espaciado entre el cono y el plato aumenta al aumentar la distancia al centro. Para fluidos no -Newtonianos no es necesario llevar a cabo correcciones, siendo posible aplicar las ecuaciones para fluidos newtonianos [15].

$M = \text{masa}$   
 $R_c = \text{punta de cono}$   
 $\beta = \text{angulo}$   
 $\Omega = \text{giro}$



**Figura 22.** Se muestra el principio de funcionamiento y la geometría del sistema, del lado derecho se muestra una foto de un viscosímetro de cono-placa comercial [17].

Las ecuaciones en las que se fundamenta el viscosímetro de cono-placa, ya que es uno de los más usados en el mercado.

$$\eta = \frac{3\alpha M}{2R_c^3} \dots\dots\dots(15)$$

$$\tau = \frac{3M}{2\pi R_c^3} \dots\dots\dots(16)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\alpha} \dots\dots\dots(17)$$

donde :

$\tau = \text{esfuerzo de deformación o cizalla.}$

$\frac{dy}{dt} = \dot{\gamma} = \text{velocidad de deformación o cizalla.}$

$R_c = \text{Radio del cono.}$

$G = \text{Par de fuerzas aplicado}$

$\Omega = \text{velocidad angular del cono.}$

$\alpha = \text{ángulo del cono.}$

### 3.5 Viscosímetros de cilindros concéntricos rotacionales.

Los viscosímetros rotacionales constan básicamente de dos partes que se encuentran separadas por el fluido a estudiar. Dichas partes pueden ser dos cilindros, dos superficies paralelas, una superficie y un cono de pequeño ángulo, un rotor en el interior de un cilindro. El movimiento de una de estas partes provoca la aparición de un gradiente de velocidades a lo largo del fluido. Para determinar la viscosidad del fluido se mide el esfuerzo necesario para producir una determinada velocidad angular. Este tipo de viscosímetros son mucho más versátiles que los mencionados anteriormente y pueden ser utilizados para fluidos no Newtonianos; sin embargo,

su principal inconveniente es el precio. En los años 90 este tipo de viscosímetros han sufrido una importante transformación al ser conectados a ordenadores lo cual ha hecho más sencillo su uso.

### 3.5.1 Viscosímetros de flujo de Couette.

Por el movimiento de uno de los cilindros se genera una cizalla en el líquido situado en el espacio anular. Este tipo de instrumento puede realizar las medidas de dos formas: 1) haciendo girar uno de los elementos con un cierto par y midiendo la velocidad de giro provocada; 2) provocando una velocidad de giro en uno de los elementos y midiendo el par opuesto. Ambos métodos ya fueron estudiados antes de la Segunda Guerra Mundial, y sus fundamentos fueron introducidos por Couette en 1888, en cuyo honor, al flujo provocado entre los cilindros concéntricos se denomina flujo de Couette. Este tipo de viscosímetro es de los más efectivos para medir la viscosidad, ya que simulan una placa infinita y se pueden realizar pruebas que dependan del tiempo. La figura 23 muestra el principio de flujo de Couette [19].

Flujo con líneas de corrientes circulares, consideremos el siguiente flujo estacionario, bidimensional, axisimétrico:

$$\vec{v} = (u_r, u_\theta, 0) \dots \dots \dots (18)$$

De la ecuación de conservación de la masa podemos demostrar que la velocidad  $u_r = 0$ , por lo que tenemos un flujo unidireccional (líneas de corriente circulares).

Si resolvemos la ecuación de conservación de momentum para la dirección  $r - r'$  tenemos:

$$\rho \left( \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \nabla^2 u_r + \rho g_r \dots \dots \dots (19)$$

La mayoría de los términos son cero ya que  $u_r = 0$  sin embargo sobreviven:

$$\frac{u_\theta^2}{r} = \frac{\partial P}{\partial r}$$

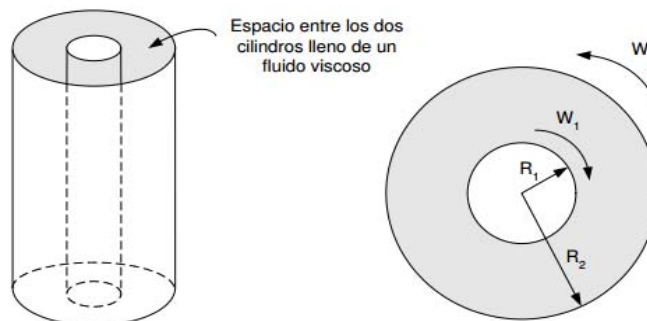


Figura 23. Principio de funcionamiento de un viscosímetro de Couette [19].



Existe un gradiente de presión en la dirección radial como resultado de la fuerza centrífuga.

Ahora, si resolvemos para la dirección acimutal  $\theta - \theta'$

$$\rho \left( \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_\theta u_r}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial (ru_\theta)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right) + \rho g_\theta$$

Ahora, eliminando términos tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial (ru_\theta)}{\partial r} \right) = 0$$

Integrando dos veces tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial r} (ru_\theta) = C_1 r \quad \gamma \quad u_\theta = \frac{C_1}{2} r + \frac{C_2}{r}$$

Las condiciones de frontera:

$$\text{en } r = R_1, u_\theta = \omega_1 R_1.$$

$$\text{en } r = R_2, u_\theta = \omega_2 R_2.$$

Resolviendo para  $C_1$  y  $C_2$  tenemos:

$$C_1 = \frac{2(\omega_2 R_2^2 - \omega_1 R_1^2)}{R_2^2 - R_1^2}$$

$$C_2 = -R_1^2 R_2^2 \frac{\omega_2 - \omega_1}{R_2^2 - R_1^2}$$

Así,

$$u_\theta = \frac{\omega_2 R_2^2 - \omega_1 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} r - \frac{R_1^2 - R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{\omega_2 - \omega_1}{r}$$

Aplicación en viscosimetría.

Consideramos el caso en el que el cilindro exterior se mantiene fijo y el interior gira a una velocidad angular constante. Para dicho perfil de velocidades es:

$$u_\theta = \frac{\omega_1 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} r + \frac{R_1^2 R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \frac{\omega_1}{r}$$

Para el cual el campo de esfuerzos cortantes es:

$$\tau_{r\theta} = \mu r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{u_\theta}{r} \right)$$

$$= -\mu \frac{R_1^2 R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \frac{\omega_1}{r}$$

Si calculamos el torque sobre el cilindro interno tenemos:

$$\begin{aligned} T &= \tau_{r\theta} A R_1 \\ &= \left( -\mu \frac{R_1^2 R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \frac{\omega_1}{R_1} \right) (2\pi R_1 L) R_1 \\ &= -\mu \frac{R_1^2 R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} 2\pi \omega_1 R_1 L \end{aligned}$$

Si medimos el torque en el cilindro interno podríamos utilizar este sistema para medir la viscosidad del fluido:

$$\mu = \frac{T}{2\pi \omega_1 R_1 L} \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_1^2 R_2^2} \dots\dots\dots(20)$$

De acuerdo a las soluciones exactas de Navier-Stokes se busca resolver problemas bajo ciertas condiciones; para simplificar el problema a resolver, debido a la complejidad de las ecuaciones, sólo se usan flujos newtonianos, incompresibles, isotérmicos y de propiedades constantes. En general, buscamos que la geometría del flujo sea tal que algunos de las partes de la ecuación se cancelen. Lo que se busca en cada problema es encontrar el campo de velocidades para poder utilizar alguna de las ecuaciones exactas de Navier-Stokes; cada vez que se quiere añadir una variable o consideración, esta variable puede complicar demasiado la solución del problema [19].

Para poder utilizar técnicas más avanzadas para la solución de más variables, se necesita contar con cursos más avanzados en fluidos.

Por lo que me fue una limitante bastante grande, ya que modificar una parte del viscosímetro se tiene que contar con el conocimiento suficiente para poder volver a calcular los parámetros.

Como vemos en la figura 23, el viscosímetro basado en el principio de Couette, que cuenta con los cilindros interior y exterior, cuenta también con un resorte que es el que mide el torque o la oposición al movimiento libre.

Está herramienta cuenta con ingeniería que tal vez no está bien reconocida, pero en realidad, para poder modificar algo se necesita de un equipo de personas capacitadas, para hacer cálculos y que el aparato pueda funcionar correctamente en esas medidas; lo que, si queda claro, es que se necesitan otros materiales para poder utilizar la herramienta, donde se planea usar el equipo a una presión mayor que la atmosférica y a una temperatura más alta de las condiciones ambientales.

Por lo que se decidió no modificar la parte superior del Fann 35, ya que hacerlo sería mucho más complicado poder llegar a medir el torque de los cilindros, en cual determina la viscosidad por medio de unas formulas.

# Capítulo 4

## Rediseño de un Viscosímetro de flujo de Couette

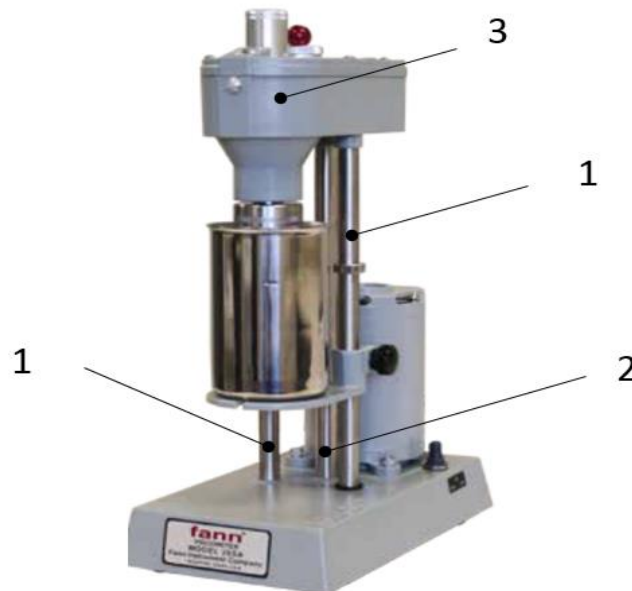
En esta parte se propone un rediseño del viscosímetro Fann 35, como se mencionó en la página 5. El rediseño se centró en tres sistemas importantes: a) un soporte para la celda, b) un vaso presurizado y c) una chaqueta de calentamiento. El rediseño se hizo tomando en cuenta la relación que guardan los sistemas entre sí. Al final, estos tres sistemas se integraron para obtener la propuesta final. Se puso mucho cuidado en las dimensiones y algunas de las características mecánicas de los diferentes componentes para asegurar unos buenos desempeños estructurales y térmicos del nuevo arreglo.

El rediseño contempla la inclusión y el control de dos variables termodinámicas importantes: presión y temperatura; con la intención de recrear en el laboratorio condiciones reales de pozo.

Este instrumento de medición sería de mucha utilidad en el análisis del comportamiento de los fluidos de perforación usados en aguas profundas bajo condiciones más reales.

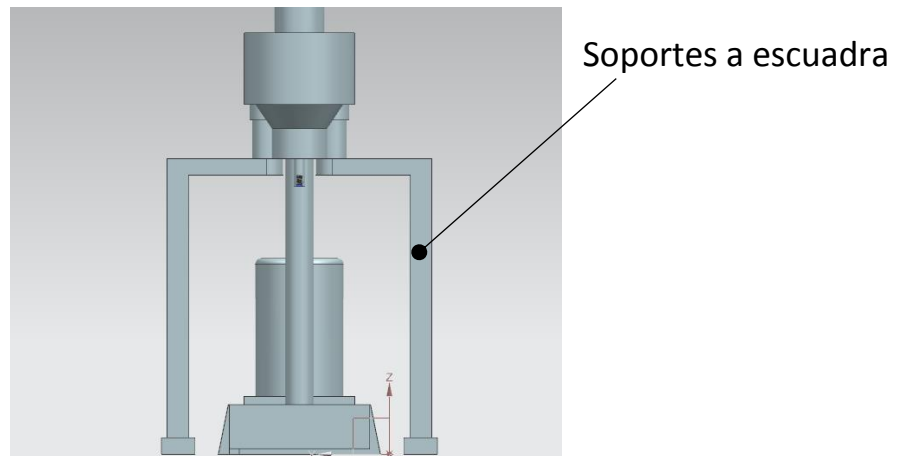
### 4.1 Diseño de un soporte para la celda de presión

El viscosímetro comercial Fann 35 cuenta con tres barras de soporte (ver figura 24). La disposición de estas tres barras limita el tamaño (diámetro) de la celda de presión. Para tener mayor espacio, se decidió modificar el sistema de soportes. La propuesta es cortar las barras (1) y agregar un gato mecánico.



**Figura 24.** Viscosímetro Fann 35. Este dispositivo cuenta con tres barras de soporte. Las barras (1) soportan todo el mecanismo de transmisión (3) de la parte superior, así como la base donde asienta el vaso. La barra (2) se usa primordialmente para transmitir potencia del motor a la transmisión (3), aunque su función también es de soporte [2].

Se sugiere adicionar un par de soportes a escuadra (ver figura 25) para tener mayor espacio y asegurar el soporte adecuado del viscosímetro.



**Figura 25.** Rediseño del sistema de soporte. Se propone cortar las barras laterales tubulares del diseño original y suplirlas por un par de soportes en escuadra en forma de “L” invertida.

Para el soporte donde asienta la celda, se tomó un diseño ya hecho de un gato, ya que su funcionamiento es sencillo y nos sirve para poder sostener tanto el vaso como la celda o solo el vaso, si ese fuera el caso. Además, el gato mecánico propuesto, soporta sobradamente el peso de la celda y brindan mayor precisión y control al subir o bajar la celda en la posición deseada.

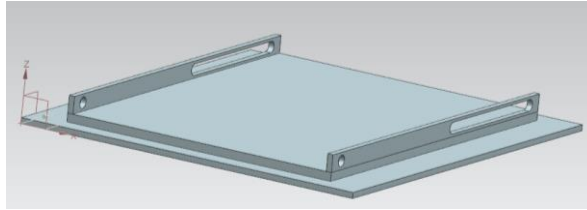
Para el diseño del Gato mecánico, se tomaron en cuenta las relaciones de escala a partir de imágenes de gatos comerciales utilizados para levantar diferentes instrumentos y de vidriería de laboratorio. Los diseños que funcionaron de base se muestran en la figura 26.



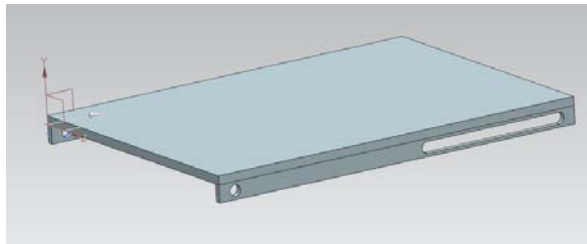
**Figura 26.** Gatos mecánicos comerciales que sirvieron de base para el diseño del soporte a la celda [20].

A continuación, se presentan los componentes del gato mecánico y sus correspondientes modelos 3D:

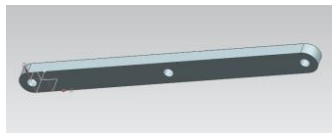
- Base inferior



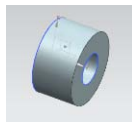
- Base superior



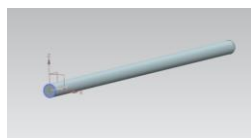
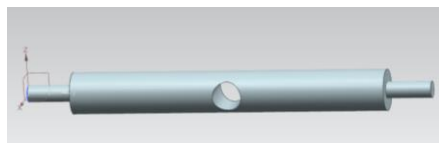
- Eslabones



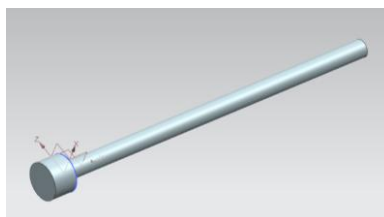
- Perilla



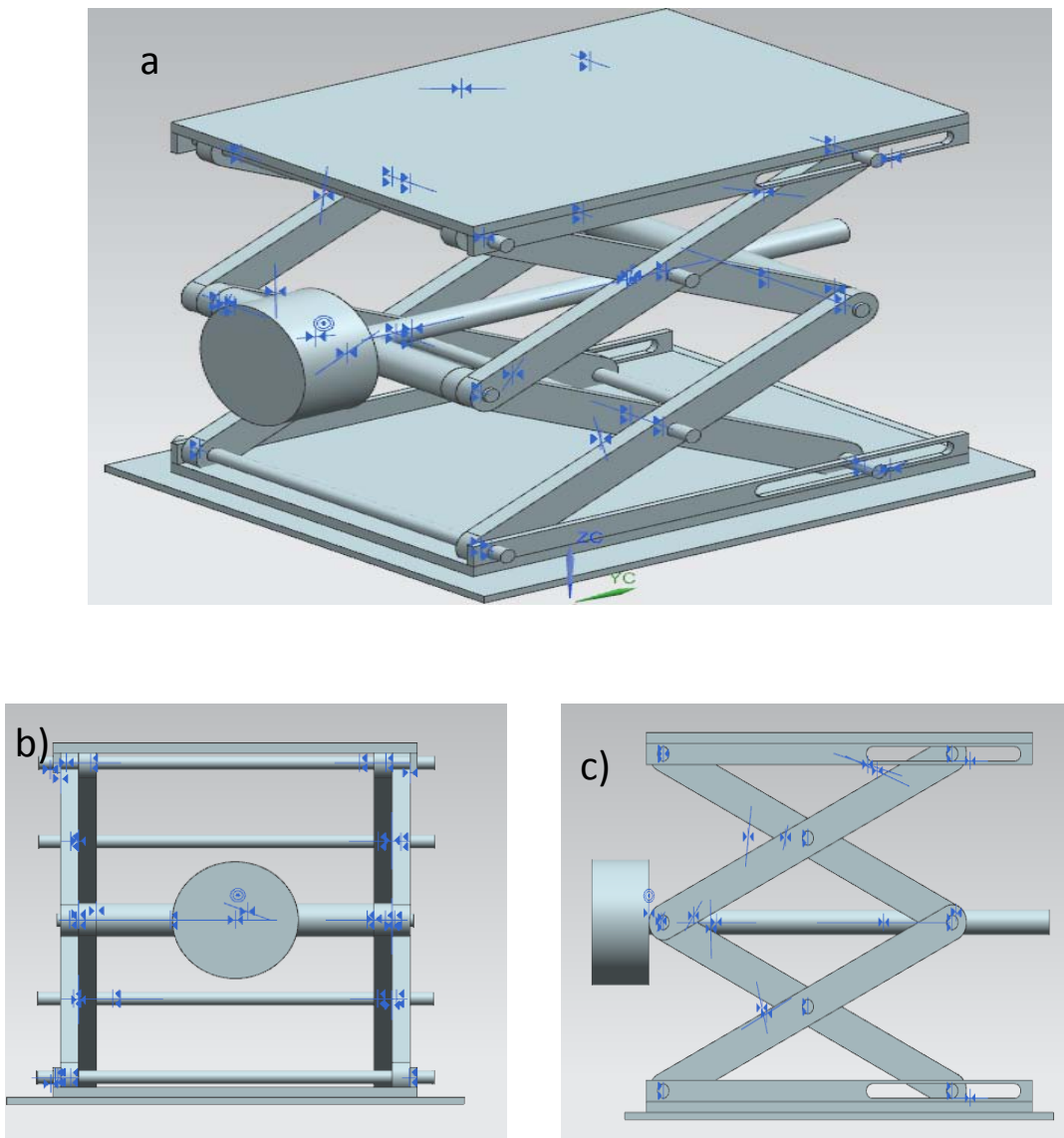
- Pernos



- Tornillo



En la figura 27, se muestra el ensamble del gato mecánico y un par de vistas del mismo.



**Figura 27.** a) Ensamble final del gato mecánico propuesto, vista isométrica. b) Vista lateral izquierda, c) vista frontal.

Cabe recalcar que el nuevo sistema de soporte quedaría constituido por el par de barras en escuadra de la figura 25 y el gato de la figura 27.

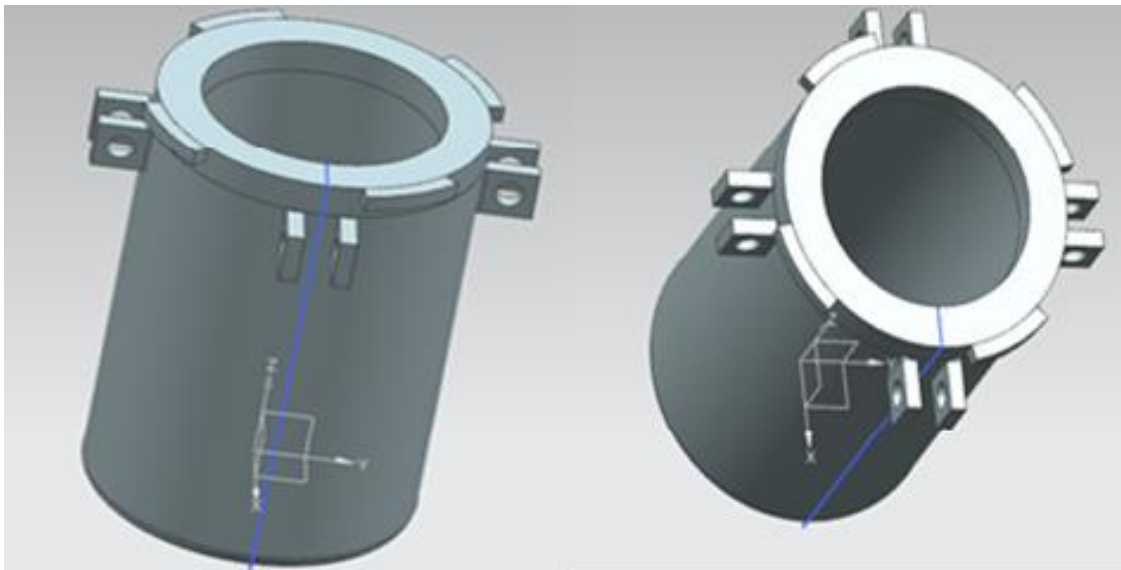
Los planos de fabricación y ensamble del gato mecánico y las barras en escuadra se encuentran en el anexo A.

#### 4.2 Diseño del vaso presurizado

Se diseñó un vaso-celda que tendrá la capacidad de resistir una presión elevada en su interior. Esto permitirá caracterizar diferentes tipos de fluidos bajo condiciones de presión más realistas. Para el diseño se tomaron como referencia algunos tanques de alta presión utilizados para diferentes procesos industriales.

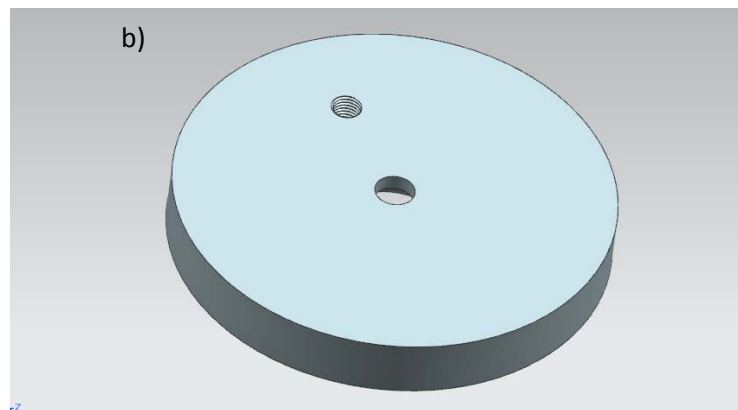
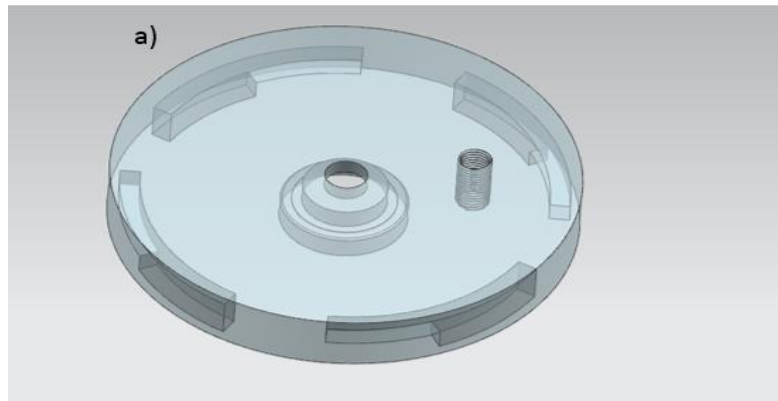
El proceso de diseño del tanque fue el siguiente:

i) Primero se diseñó un vaso cuyo diámetro interior fuera idéntico al del vaso original (que no soporta presión). Para asegurar la resistencia a la presión, se reforzó la pared del vaso considerando media pulgada de espesor y fabricado de una aleación de acero de alta resistencia. Al diseño propuesto se le añadieron orejas para poder colocar pinzas y éstas ayuden a fijar la tapa para evitar fugas y asegurar una operación segura. Además, se adicionaron cejas en la parte exterior del vaso localizadas en la boca del mismo; esto agrega mayor sujeción sobre la tapa. En la figura 28, se ilustra el vaso con orejas que servirán de soporte para montar pinzas de sujeción.



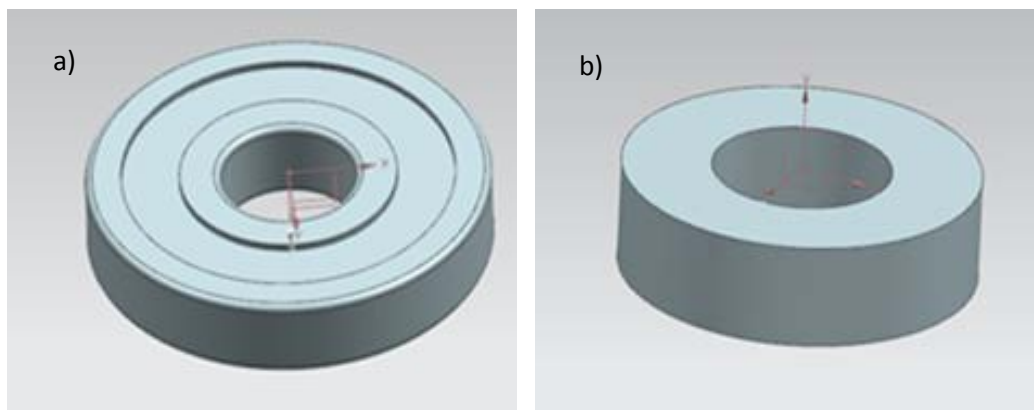
**Figura 28.** Tanque a presión con orejas para montar pinzas sujeción.

ii) Para la tapa del vaso se consideró que en el centro de la misma debe pasar la flecha que hace rotar el cilindro que produce el flujo de Couette. Consecuentemente se considera una abertura en el centro de la tapa; pero además una ranura donde asentará un balero para guiar la flecha que hace rotar al cilindro y un empaque para evitar fugas de presión. Para librar el espesor de la tapa y asegurar el correcto funcionamiento del viscosímetro fue necesario rediseñar la flecha donde se monta el cilindro. Esto se comentará adelante con mayor detalle. Cabe mencionar que la tapa contiene ranuras que embonan con las cejas cercanas a la boca del vaso, que al girarlas un poco fijan mayor el vaso con la tapa por lo cual agrega mayor capacidad de sujeción y otorga mayor seguridad de operación. La figura 29 muestra dos diferentes vistas de la tapa. El orificio lateral que se observa en la misma, se utiliza para presurizar el vaso mediante la inyección de un fluido a presión. Para tal fin, se usa una válvula de pichancha comercial (ver figura 29).



**Figura 29.** Dos diferentes vistas de la tapa; a) Esta vista muestran las ranuras para el balero y el empaque, b) Se muestra la abertura central para permitir la entrada de la flecha que hace rotar al cilindro.

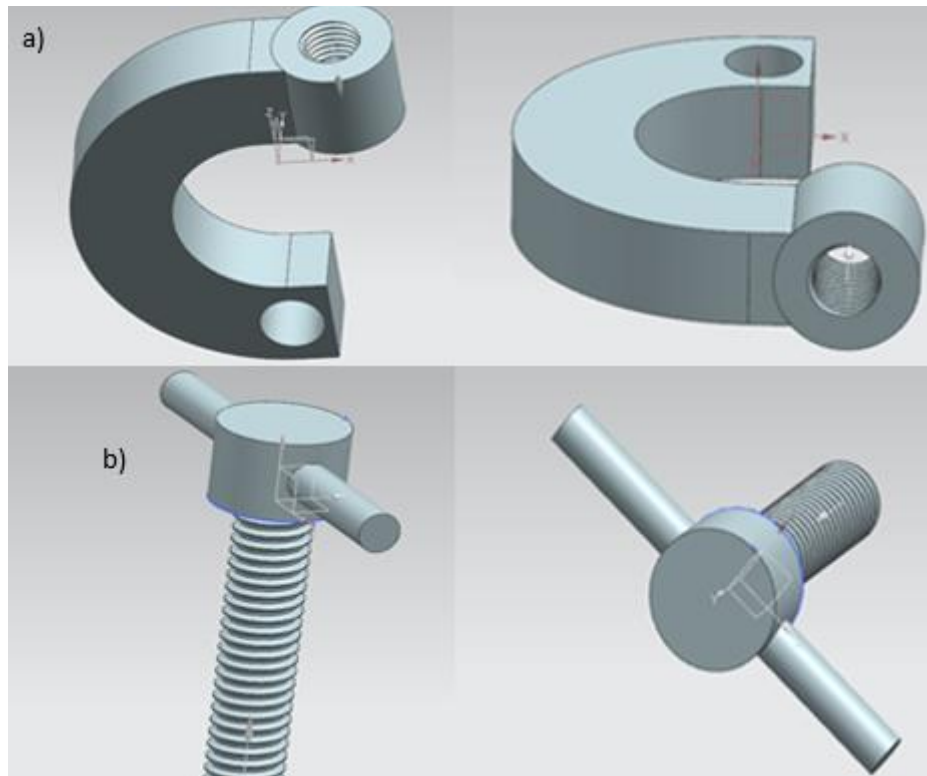
Para poder construir los planos de ensamble y valorar la propuesta final, fue necesario diseñar también el rodamiento y el empaque. Las dimensiones de estos dos elementos se tomaron de productos comerciales con altas resistencias a la presión y a la temperatura (2500 [psi] y 500[°F]). Por supuesto las dimensiones de las ranuras en la tapa son para montar el balero y el empaque. La figura 30 muestra los diseños del balero y el empaque.



**Figura 30.** a) Rodamiento, b) empaque, ambos elementos son resistentes a la presión y a la temperatura.

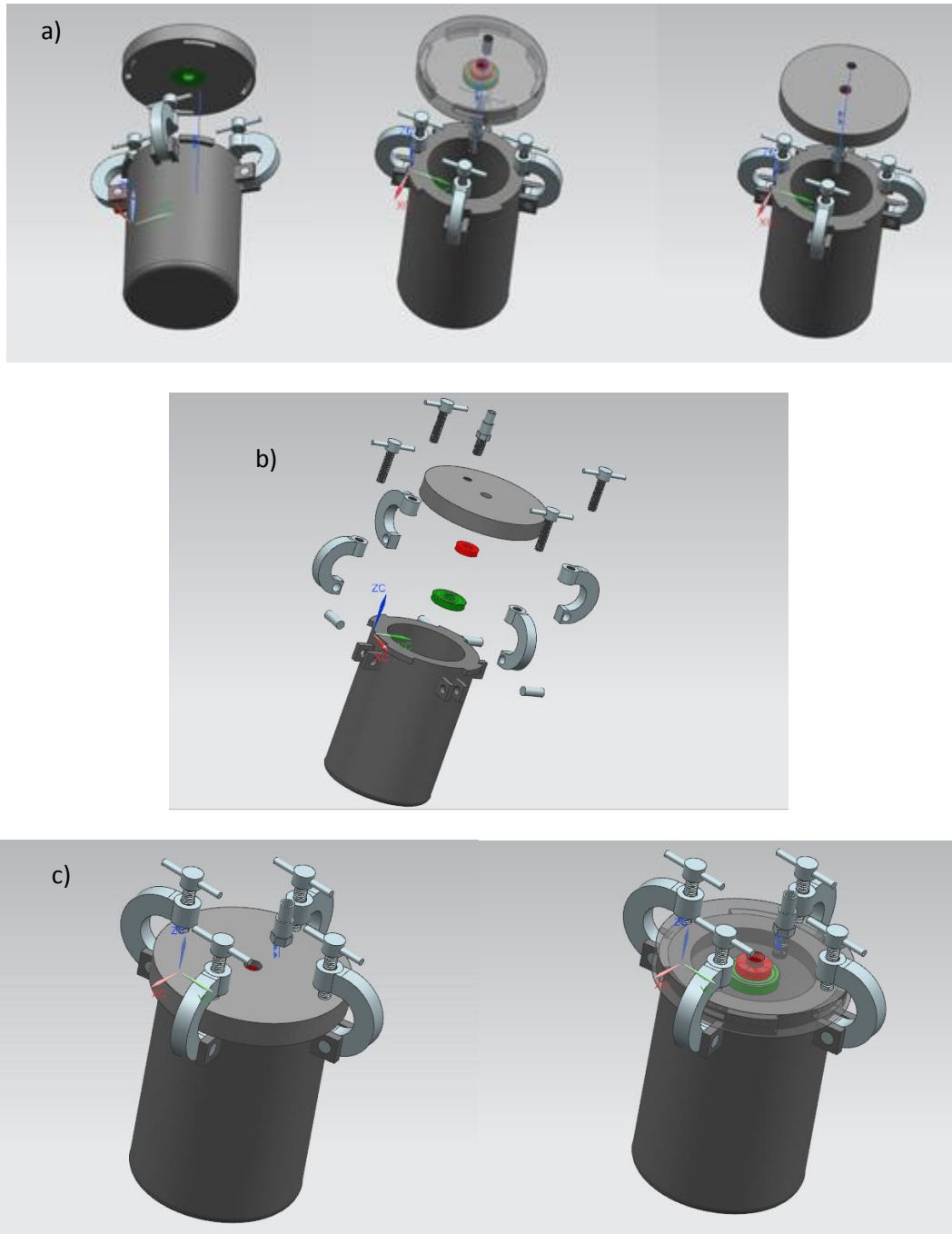


iii) Una vez elaborados los diseños de la tapa y el vaso a presión, se realizó el diseño de las pinzas con sus respectivos tornillos para asegurar y sellar la tapa. Los pernos sobre los que se montan las pinzas se diseñaron tomando en cuenta que estarían sometidos a esfuerzos cortantes. La figura 31 muestra el diseño propuesto para las pinzas de sujeción y los tornillos de apriete.



**Figura 31.** a) Pinza de sujeción, b) tornillo de apriete.

IV) Una vez diseñadas las partes del vaso, lo siguiente es ensamblarlas y observar el diseño final detallado. La figura 32 muestra diferentes vistas del vaso con sus diferentes partes ensambladas.



**Figura 32.** a) Tanque ensamblado con tapa abierta, b) dibujo explosivo de ensamble, c) tanque ensamblado con tapa cerrada y de lado derecho con tapa transparente para observar el sello y el balero.

#### 4.2.1. Cálculo de la Presión máxima admisible en el tanque y los pernos.

En esta parte se hace el cálculo de los esfuerzos longitudinal y circunferencial que el vaso presurizado ha de soportar. La presión de diseño se tomó igual a 20 MPa. Esta presión es mayor a los 17 MPa para los cuales está diseñado un viscosímetro comercial FANN 90 que permite hacer pruebas de caracterización de fluidos sometidos a presión y temperatura. Las expresiones utilizadas para el cálculo de los esfuerzos son calculados de la siguiente manera [21]:

$$S_1 = \frac{P \cdot D}{4 \cdot t} \dots\dots\dots(21)$$

$$S_2 = \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} \dots\dots\dots(22)$$

donde

$D =$  *Diametro medido del recipiente, [m]*

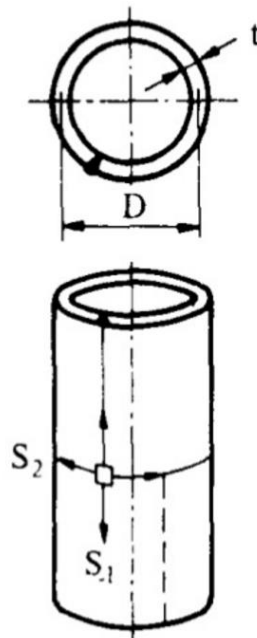
$P =$  *presión externa o interna [Pa]*

$S_1 =$  *Esfuerzo longitudinal [Pa]*

$S_2 =$  *Esfuerzo circunferencial [Pa]*

$t =$  *Espesor de la pared [m]*

La figura 33, muestra la dirección de los esfuerzos longitudinal y circunferencial.



**Figura 33.** Esfuerzos en el vaso presurizado [22].

Los datos de acuerdo al diseño propuesto son:

$$D = 80.4[mm]$$

$$r = 47.7[mm]$$

$$t = 15[mm]$$

Y así los esfuerzos resultan en:

$$S_1 = \frac{20000000[P] \cdot (0.0804[m])}{4 \cdot (0.015[m])} = 26.8[MPa]$$

$$S_2 = \frac{20000000[P] \cdot (0.0804[m])}{2 \cdot (0.015[m])} = 53.6[MPa]$$

Podemos ver que  $S_2 > S_1$ , y esto debe ser tomado en cuenta al momento de elegir el acero con el que se fabricará el vaso. Seguiremos con el cálculo de los pernos que también es necesario ya que es una de las piezas que pueden romperse durante los experimentos y tener problemas de seguridad graves, por lo que es una de las piezas sensibles en el rediseño.

El cálculo de cada uno de los cuatro pernos se realiza a continuación [21]:

$$r = 0.055[mm]$$

$$P = 20[MPa]$$

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

$$F = P \cdot A \Rightarrow 20[MPa] \cdot 0.00950332[m] = 190066.4[N]$$

*Esta fuerza dividida entre 4 por ser 4 orejas.*

$$F = \frac{190066.4[N]}{4} = 47516.6[N]$$

*Esto entre 2 por ser doble oreja*

$$F = \frac{47516.6[N]}{2} = 23758.3[N]$$

*Y finalmente, el esfuerzo de corte en cada perno será:*

$$\tau_{adm} = \frac{23758.3[N]}{(\pi \cdot (0.004^2))} = 472.65[MPa]$$

Ahora se escoge un acero cuyo esfuerzo de cadencia esté por encima tanto de  $\tau_{adm}$  como de  $S_2$ . Se elige un acero SAE J2340 grado MS-264 080-XK (ver tabla 1) con un esfuerzo de cadencia

de 552[Mpa], esto asegura un diseño sobrado considerando una presión máxima en el interior del tanque de 20 [MPa].

Familia	Clasificación				Grado		Cedencia		Tracoon		Elongaocoon Total %	n	r
	SAE	DCX	AISI	DCX	YS	TS	YS	TS					
					Psi	Psi	Mpa	Mpa					
Structural Steel	SAE J2340	MS-6000	HSS	MS-264<S>-025-SK	25,000	35,000	172	241	38	0.2	1.6		
Structural Steel	SAE J2340	MS-6000	HSS	MS-264<S>-030-SK	30,000	40,000	207	276	35	0.2	1.6		
Structural Steel	SAE J2340	MS-6000	HSS	MS-264<S>-035-SK	35,000	45,000	241	310	28	0.18	1.1		
Structural Steel	SAE J2340	MS-6000	HSS	MS-264<S>-040-SK	40,000	50,000	276	345	25	0.18	1.1		
Low-Alloy	SAE J2340	MS-6000	HSLA	MS-264<S>-045-XX	45,000	55,000	310	379	23	0.18	1.0		
Low-Alloy	SAE J2340	MS-6000	HSLA	MS-264<S>-050-XX	50,000	60,000	345	414	22	0.17	1.1		
Low-Alloy	SAE J2340	MS-6000	HSLA	MS-264<S>-060-XX	60,000	70,000	414	483	18	0.16	1.0		
Low-Alloy	SAE J2340	MS-6000	HSLA	MS-264<S>-070-XX	70,000	80,000	483	552	14	0.14	0.9		
Low-Alloy	SAE J2340	MS-6000	HSLA	MS-264<S>-080-XX	80,000	90,000	552	621	12	0.12	0.8		
Low-Alloy	SAE J2340	MS-6000	HSLA	MS-264<S>-100-XX	100,000	120,000	689	827	NA				
Low-Alloy	SAE J2340	MS-6000	HSLA	MS-264<S>-120-XX	120,000	125,000	827	862	4				
Dual Phase			AHSS	MS-264<S>-590-DT	49,313	85,572	340	590	21	0.18			
Dual Phase			AHSS	MS-264<S>-780-DT	60,916	113,129	420	780	15	0.16			
Partial Martensitic			AHSS	MS-264<S>-590-PT	63,817	85,572	440	590	15	0.1			
Partial Martensitic			AHSS	MS-264<S>-780-PT	87,023	113,129	600	780	13	0.07			
Martensitic			UHSS	MS-264<S>-190-MT	176,000	190,000	1213	1310					
Martensitic			UHSS	MS-264<S>-220-MT	202,000	220,000	1393	1517					

Conversiones  
1 mpa = 145.0377 psi

Tabla 2. Esfuerzos de cadencia de algunos aceros comerciales [23].

### 4.3 Diseño de la chaqueta de calentamiento

El diseño de la chaqueta de calentamiento se realizó con base en sistemas comerciales. La figura 34 muestra un ejemplo de una resistencia comercial tipo banda.

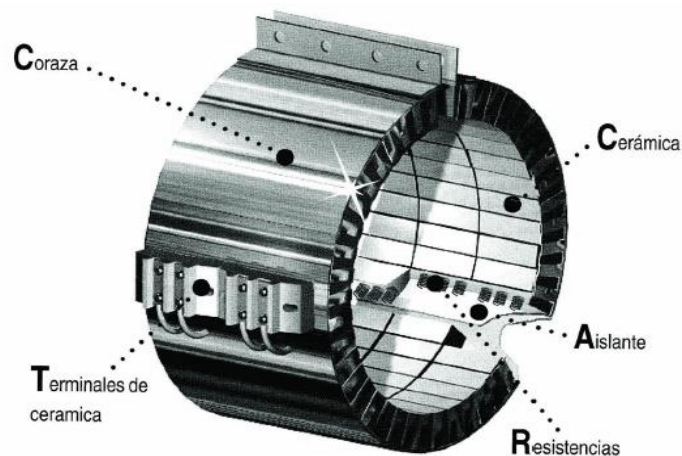
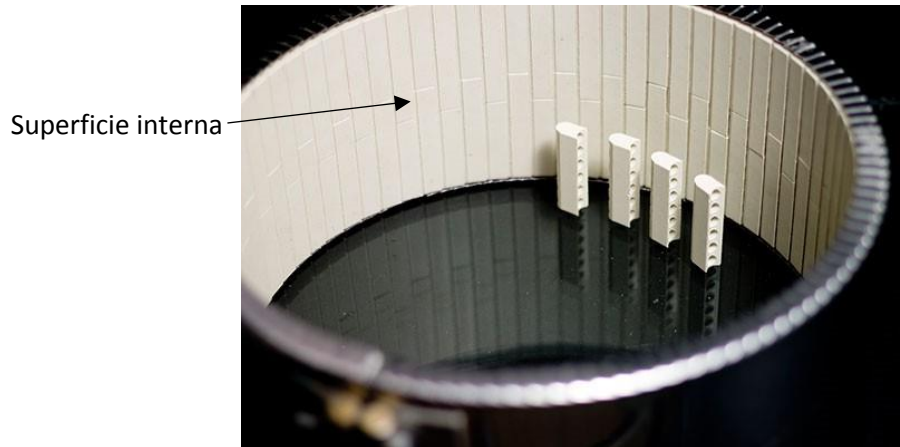


Figura 34. Resistencia comercial tipo banda [24].

Como se aprecia en la figura 35, la resistencia tipo banda tiene una forma de cilindro con cierto espesor y un hueco para poder colocar la celda que será calentada.

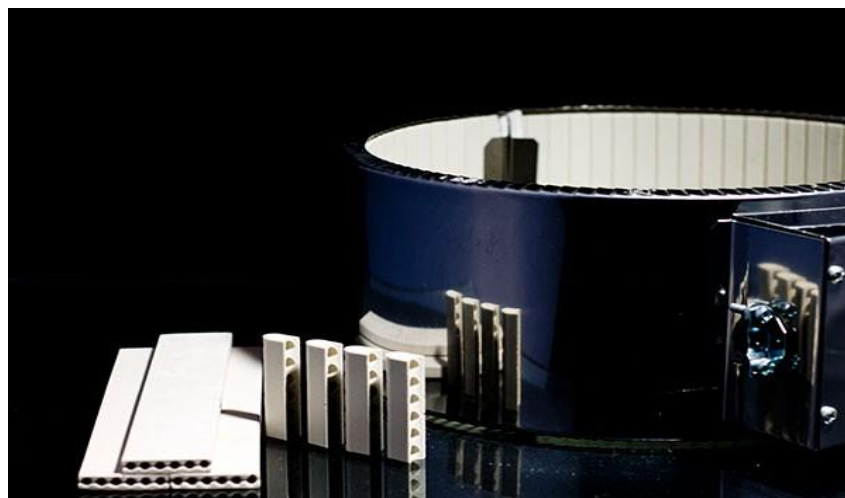
Tabla 2 <http://macareno.mx/2012/05/t/aceros-hss/>

Tal como se observa en la figura 36, el diseño requiere una resistencia eléctrica (Nicromel), un aislante (poliestireno), un cerámico (alúmina), una coraza (acero inoxidable) y las terminales (alúmina). La figura 36, indica la superficie interna que entrará en contacto con la superficie de la celda.



**Figura 35.** Foto de la banda cerámica. La superficie interna de la banda entra en contacto con la superficie externa de la celda, y así se transfiere el calor de la resistencia hacia la celda con el fluido [24].

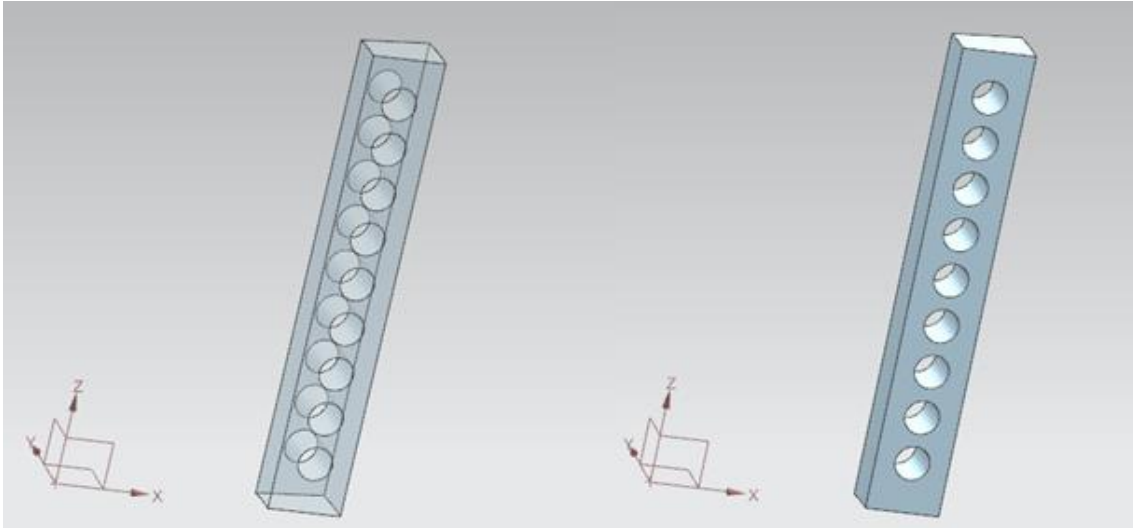
El cilindro de la banda está conformado por ladrillos cerámicos (ver figura 37 y 38) con perforaciones para poder pasar la resistencia a través de ellas y así en volver circularmente la chaqueta para tener mayor generación y transferencia de calor.



**Figura 36.** Resistencia tipo banda conformada por ladrillos cerámicos [24].

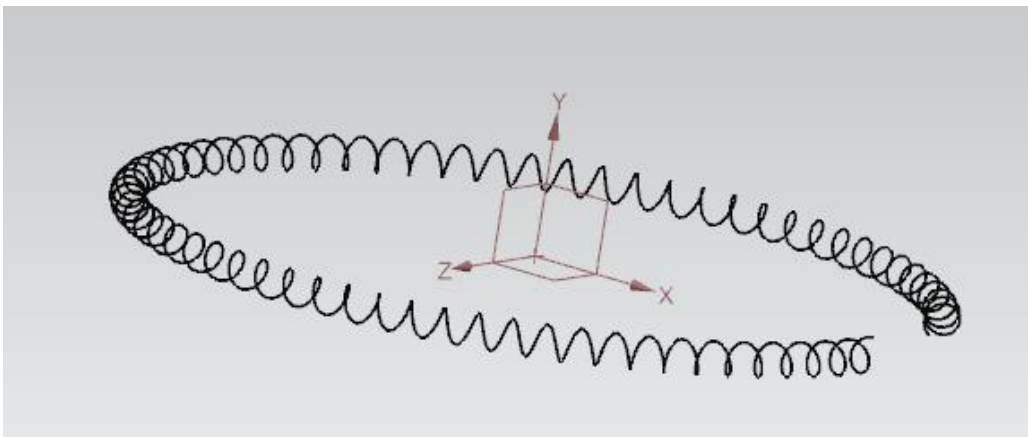
El diseño 3D de los componentes de la resistencia tipo banda se muestran a continuación:

i) Los ladrillos cerámicos se diseñaron con 9 orificios (ver figura 37) para aumentar la generación-transferencia de calor; además su diseño permite un ensamblado más rápido con respecto a los ladrillos de la banda comercial que se muestra en la figura 35.



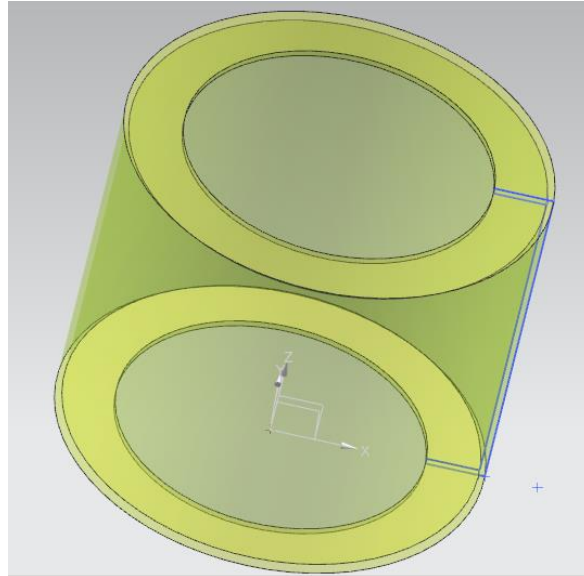
**Figura 37.** Ladrillo cerámico con 9 orificios.

ii) La resistencia, la cual estará por dentro del cerámico, tendrá un diámetro de 5mm, ya que es el más comercial, con una separación de 5mm entre cada perforación, y una longitud de circunferencia de 337mm. Este diseño implica nueve resistencias en paralelo, cada una en forma de circunferencia (ver figura 38). La ventaja de este arreglo, en relación a una sola resistencia en espiral, es que al presentarse daños solo es necesario reemplazar algunos tramos de resistencia y el equipo seguirá funcionando. La figura 38, muestra una de las nueve secciones de resistencia en forma de circunferencia.



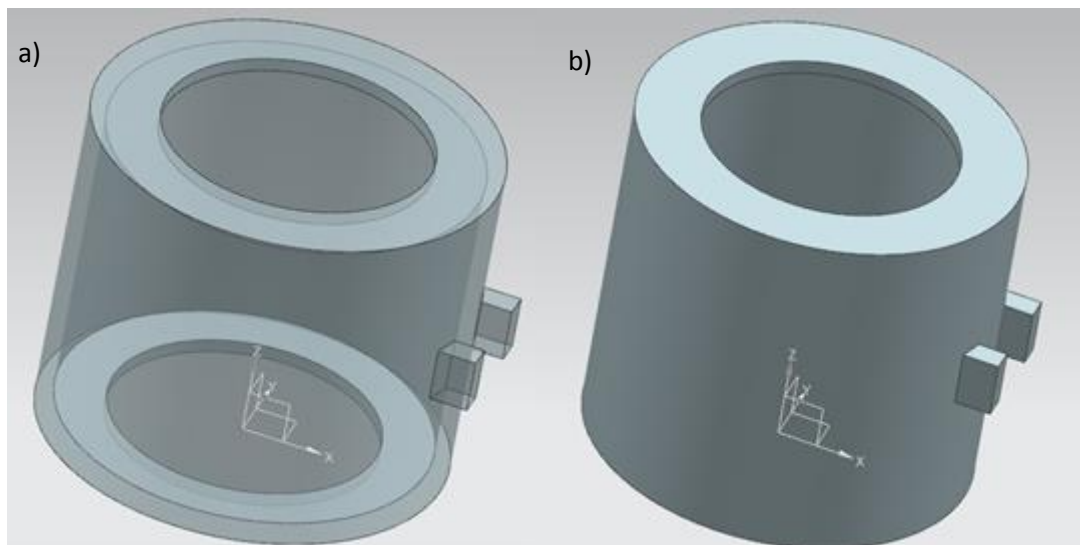
**Figura 38.** Resistencia en forma de circunferencia

iii) La figura 39 muestra la forma cilíndrica que tendrá el aislante. La función de éste, es impedir la salida de calor hacia el ambiente. Este aislante estará ubicado entre el cilindro de ladrillos cerámicos y la coraza.



**Figura 39.** Cilindro de material aislante, en vista transparente.

iv) Por último, se tiene la coraza de acero inoxidable la cual servirá para dar estructura y rigidez a la chaqueta, en otras palabras, mantener en posición tanto al aislante como al cerámico. La coraza posee tornillos de sujeción (ver figuras 40 a y 40 b) para asegurar la forma cilíndrica del arreglo, además de un sistema de cableado para alimentar las resistencias.

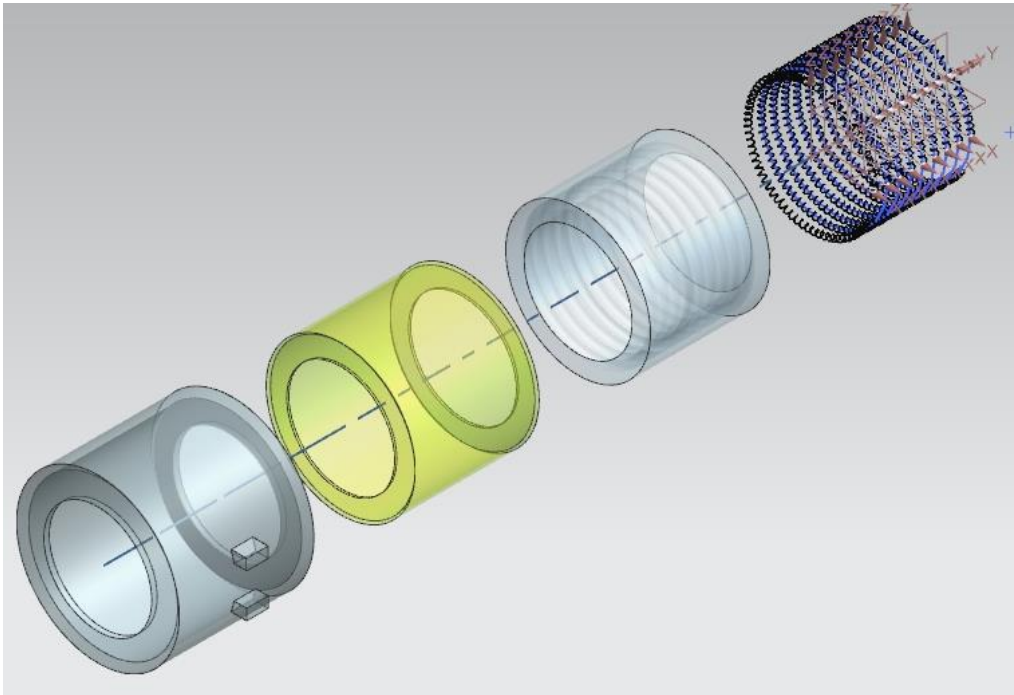


**Figura 40.** a) Coraza de acero inoxidable. b) Vista transparente de la coraza.

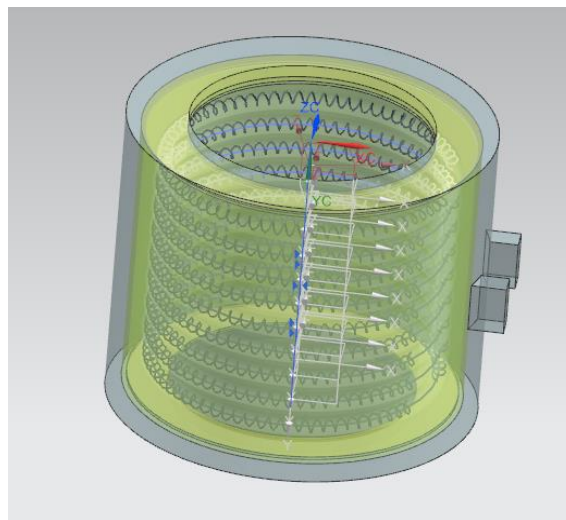
La figura 41, muestra el ensamble final en explosión de la chaqueta de calentamiento. El cilindro en color blanco representa el arreglo de ladrillos cerámicos, el cilindro en amarillo el recubrimiento y en gris la coraza. También se observa las nueve resistencias en forma de circunferencia.

Vale la pena señalar que el diámetro interno de la chaqueta es aproximadamente 5mm más grande que el diámetro externo del vaso, esto es para tener un margen de seguridad por si el vaso llega a expandirse.





**Figura 41.** a) Vista de los elementos de la chaqueta completa que transmite calor a la celda.



**Figura 42.** Ensamble final de la chaqueta de calentamiento. Se puede apreciar el arreglo de las nueve resistencias que generan calor.

#### 4.3.1. Cálculo de la transferencia de calor de la resistencia.

El calor, en esencia, se transporta mediante un gradiente de temperatura, fluye o se transfiere de una región de alta temperatura a una de baja temperatura. La comprensión de este proceso y sus diferentes mecanismos requieren que se relacionen o combinen los principios de la termodinámica y del flujo de fluidos con los de la transferencia de calor. Este último tiene su

propio conjunto de conceptos y definiciones; por lo que se hace el análisis, de la transferencia de calor de las resistencias a la celda.

Se calcula la transferencia de calor que genera la resistencia dentro de la celda al aplicarle un voltaje. Después se determina la intensidad de corriente necesaria para elevar la temperatura en el vaso a un valor superior a 300 °C. Para el cálculo de la transferencia de calor a través de los distintos materiales que conforman la chaqueta, es necesario considerar las resistencias de cada uno de ellos y su conexión en serie. Como primer paso se dan los valores de conductividad térmica de los materiales que vamos a emplear [25]:

**Cerámico**

$$K = 26.35 \frac{W}{mK} \quad \rho = 3900 \frac{kg}{m^3}$$

*Calor específico* = 850 – 900 J / kg°C

*T<sub>máx</sub>* = 1700 °C

**Aislantes (Fibra cerámica, manta cerámica)**

$$K = 0.150 \frac{W}{mK}$$

$$\rho = 240 \frac{kg}{m^3}$$

**Acero inoxidable**

$$K = 13.8 – 18.7 \frac{W}{mK}$$

$$\rho = 8030 \frac{kg}{m^3}$$

Calor específico = 502 J/kg°C

**Alambre Nicromel**

*Calibre 4 AWG con diámetro: 5.19 mm, y resistividad eléctrica*  $1.9 \frac{\Omega mm^2}{m}$

$$R = \rho \frac{L}{S} = \left( 1.9 \frac{\Omega mm^2}{m} \right) \left( \frac{3.033 \text{ m}}{21.15 \text{ mm}^2} \right) = 0.272 [\Omega] \dots\dots\dots(23)$$

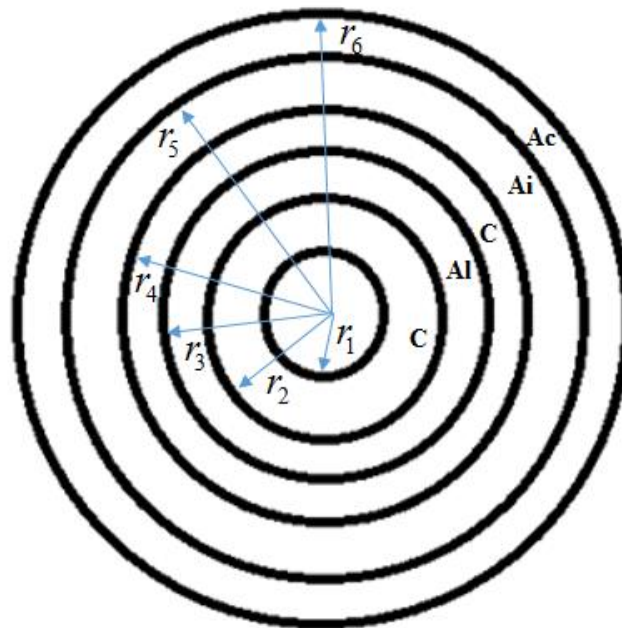
*Si el voltaje se fija en 5 V, entonces la corriente que circularía por el alambre sería:*

$$I = \frac{V}{R} = \frac{5}{0.272} = 18.38 [A] \dots\dots\dots(24)$$

luego por la ley de Watt,  $P = I^2 \cdot R \dots (25)$ , obtenemos la potencia disipada por el alambre en forma de calor:

$$P = 91.91 [W].$$

En la figura 43 se muestran las resistencias correspondientes a cada material y su conexión en serie para el cálculo de la potencia generada en forma de calor.



**Figura 43.** Vista de planta de las resistencias (correspondientes a cada material) que conforman la chaqueta de calentamiento; Ac=Acero, A=Aislante, C=Cerámico, Al=Alambre.

$$r_1 = 50mm$$

$$r_2 = 56.025mm$$

$$r_3 = 61.025mm$$

$$r_4 = 67.05mm$$

$$r_5 = 70.4mm$$

$$r_6 = 75.4mm$$

$$R_{conv1} = \frac{1}{h_1 A_1} = \frac{1}{(18)(0.034)} = 1.633 \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$R_c = \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{2\pi Lu} = \frac{\ln\left(\frac{0.056}{0.05}\right)}{2\pi(0.1108)(11.3)} = 0.0144 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{A1} = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi Lu} = \frac{\ln\left(\frac{0.061}{0.056}\right)}{2\pi(0.1108)(35)} = 3.509 \times 10^{-3} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_c = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi Lu} = \frac{\ln\left(\frac{0.067}{0.061}\right)}{2\pi(0.1108)(11.3)} = 0.012 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{Ai} = \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{2\pi Lu} = \frac{\ln\left(\frac{0.0704}{0.067}\right)}{2\pi(0.1108)(0.150)} = 0.474 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{Ac} = \frac{\ln\left(\frac{r_6}{r_5}\right)}{2\pi Lu} = \frac{\ln\left(\frac{0.0754}{0.0704}\right)}{2\pi(0.1108)(18.7)} = 5.27 \times 10^{-3} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

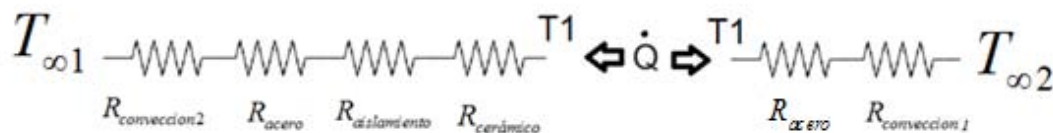
$$R_{conv2} = \frac{1}{h_2 A_2} = \frac{1}{(18)(0.052)} = 1.0684 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

La resistencia equivalente se calcula a partir de:

$$R_{Total} = R_{conv1} + R_c + R_{A1} + R_c + R_{Ai} + R_{Ac} + R_{conv2} \dots \dots \dots (26)$$

$$R_{Total} = 3.2106 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

En la figura 44 se muestra el arreglo de resistencias para calcular la temperatura en el alambre ( $T_1$ ) y la temperatura en el interior del vaso ( $T_{\infty 2}$ ).

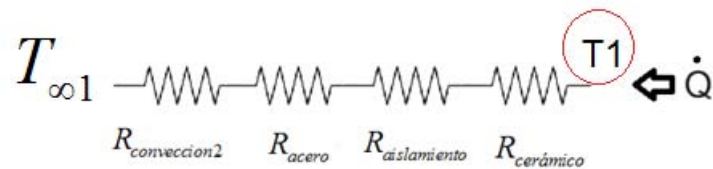


**Figura 44.** Arreglo de resistencias en serie para calcular las temperaturas en el alambre y en el interior del vaso.

Para el cálculo de la temperatura en el alambre ( $T_1$ ) (ver figura 45) hay que recordar que la potencia eléctrica se disipa en forma de calor:

$$\dot{Q} = V \cdot I = (5[V])(18.38[A])$$

$$P = \dot{Q} \approx 91.91[W]$$



**Figura 45.** Arreglo de resistencias para calcular la temperatura en el alambre (resistencia eléctrica).

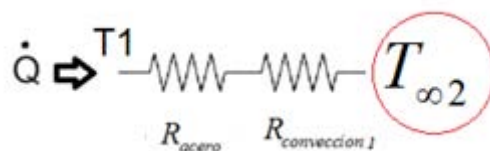
Considerando una temperatura ambiente  $T_{\infty 1} = 25^{\circ}C$ ,

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_{\infty 1}}{R_{Total}} = \frac{T_1 - 25}{R_{cerámico} + R_{aislamiento} + R_{acero} + R_{convección2}} \dots\dots\dots(27)$$

$$91.91 = \frac{T_1 - 25}{1.55967}$$

$$T_1 = 168.35^{\circ}C$$

Para el cálculo de la temperatura en el interior del vaso ( $T_{\infty 2}$ ) (ver figura 46) se tiene:



**Figura 46.** Arreglo de resistencias para calcular la temperatura en el interior del vaso.

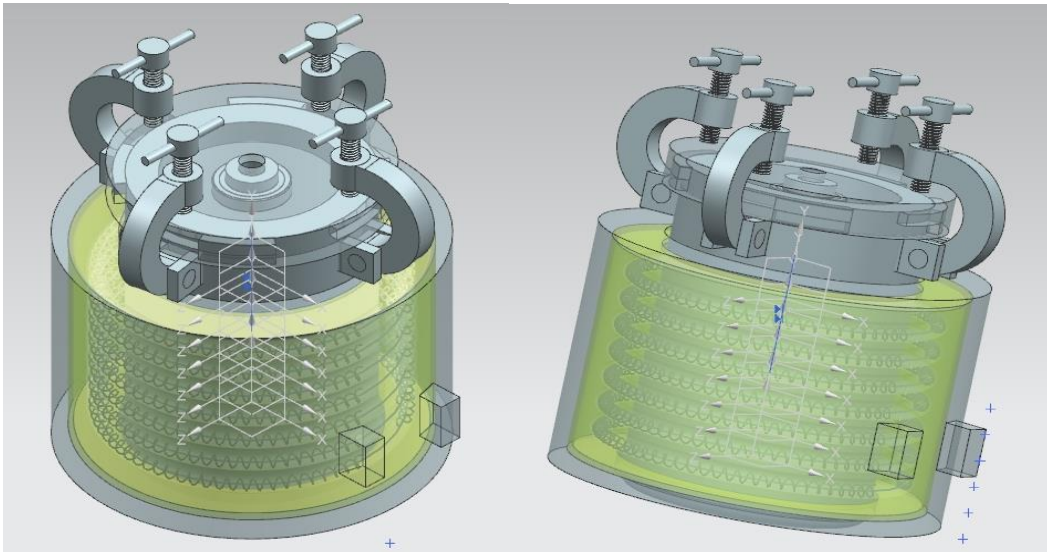
$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 2} - T_1}{R_{Total}} = \frac{T_{\infty 2} - 168.352}{1.6479}$$

$$91.91 = \frac{T_{\infty 2} - 168.352}{1.6474}$$

$$T_{\infty 2} = 319.767^{\circ}C$$

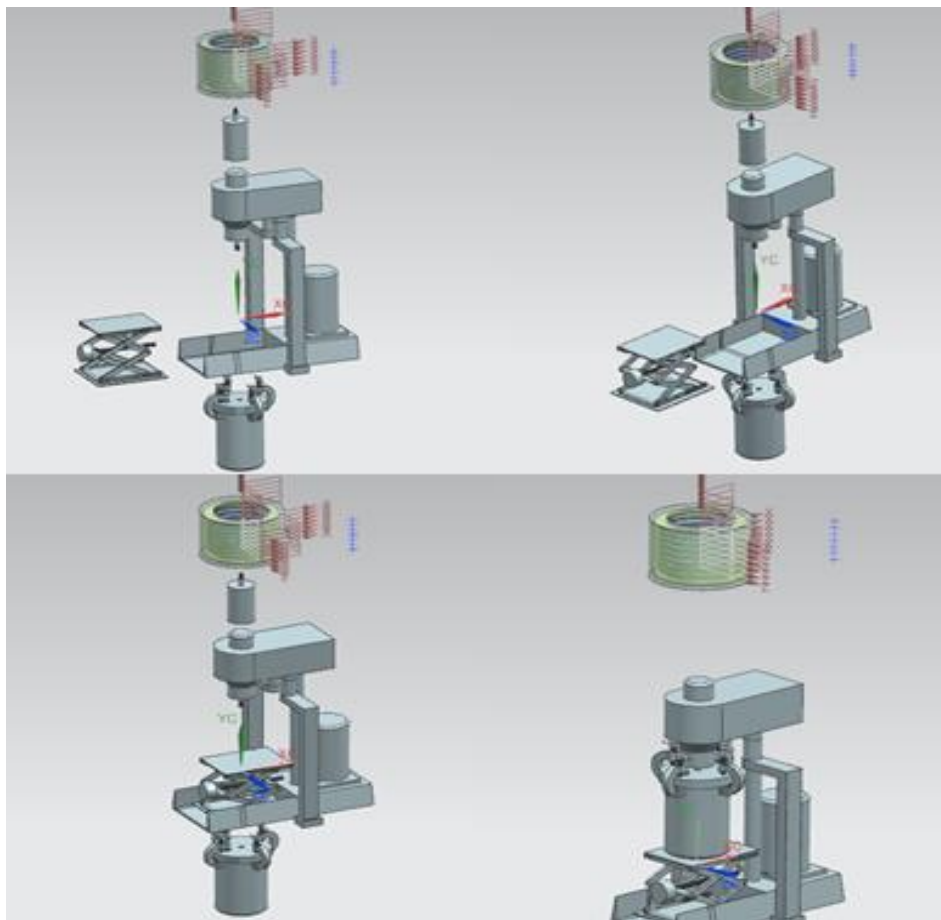
## 4.4 Diseño final

La figura 47 muestra el ensamble de la chaqueta de calentamiento con la celda dentro.



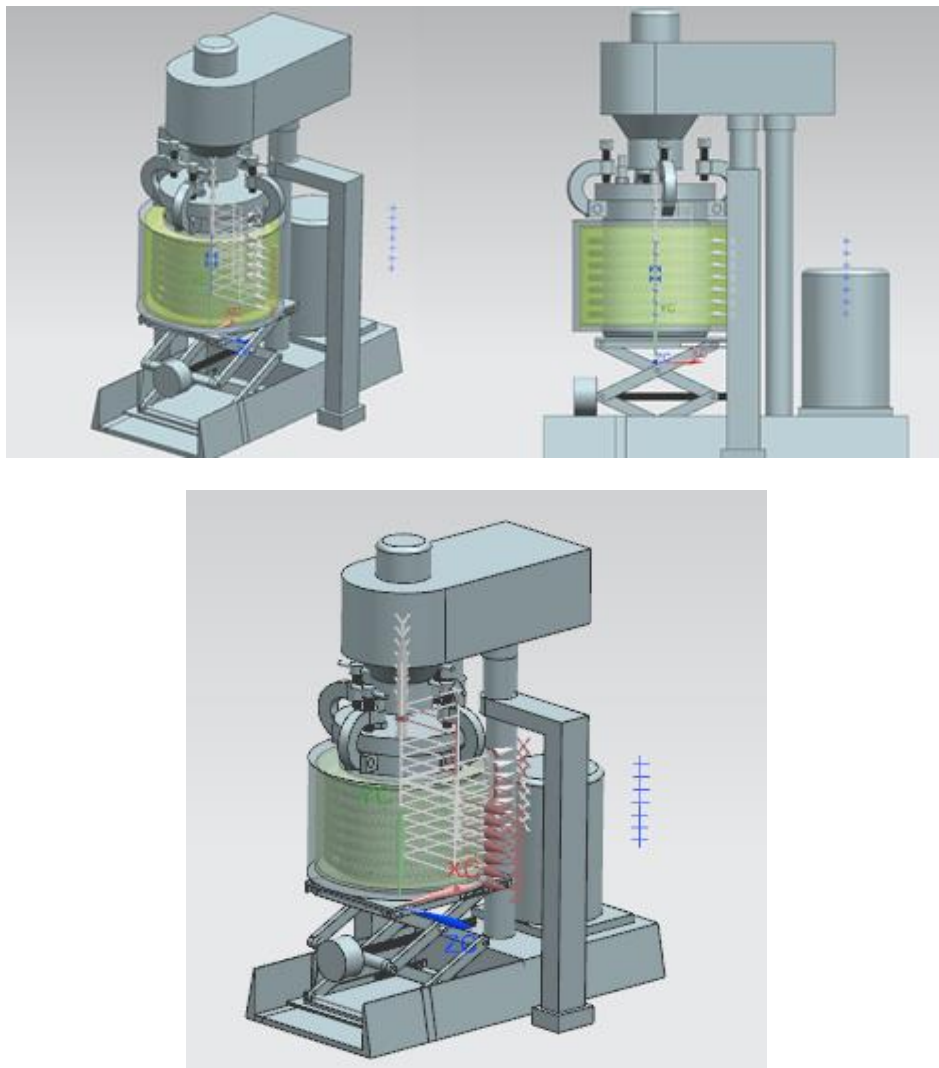
**Figura 47.** Ensamble final de la celda de presión dentro de la chaqueta de calentamiento.

En la figura 48 se muestra el ensamble final en explosión del viscosímetro con los sistemas modificados.



**Figura 48.** Imagen en explosión de los componentes del rediseño.

Finalmente, la figura 49, muestra el ensamblaje completo del rediseño propuesto.



**Figura 49.** Ensamblaje completo del viscosímetro rediseñado.

## 4.5 Costo del primer prototipo

Conceptos por primer prototipo	Piezas	Material	Fabricación	Diseño	Total
<b>Presupuesto de Gato mecanico</b>					
Base superior	1	\$500			\$500
Eslabones	8	\$500			\$500
Tornillo	1	\$500			\$500
Perno sujetador	2	\$500			\$500
Pernos	6	\$500			\$500
Base inferior	1	\$4,500			\$500
<b>Presupuesto de Vaso Presurizado</b>					
Rodamiento para alta presión	1	\$500	\$1,000		\$1,500
Empaques	2	\$500	\$500		\$1,000
Vaso ASME	1	\$10,000	\$15,000	\$10,000	\$35,000
Pinzas para sellar	4	\$5,000	\$3,500	\$1,250	\$13,500
Tanque Nitrogeno Liquido Mcs 20 Lts	1				\$14,990
conexión de vaso y manguera de Tanque	1		\$1,500	\$3,500	\$5,000
Manómetros	1				\$358
Soldar	6	\$224	\$2,500		\$3,844
<b>Presupuesto de Chaqueta de calentamiento</b>					
Resistencias electrica	9	\$300	\$42,500	\$1,500	\$4,300
Bloques de ceramico (Nicromel)	1	\$5,000	\$3,500	\$4,000	\$12,500
Aislante (poliestireno XPS)	1	\$1,500	\$1,500	\$1,000	\$4,000
Coraza de acero inoxidable (AISI 309)	1	\$15,000	\$10,000	\$10,000	\$35,000
Terminales de Aluminia	9	\$700	\$850	\$1,000	\$2,550
				TOTAL	\$136,542

**Tabla 3.** Costos del diseño propuesto (todo esta expresado en pesos mexicanos).

El costo total del viscosímetro modificado para hacer mediciones de fluidos sometidos a presión y temperatura, se obtiene sumando el costo del rediseño (modificaciones propuestas) y el costo del FANN 35 (80 mil pesos), el resultado es de \$ 216542. Este costo final, es mucho menor al costo del FANN 90 (con el que es posible hacer mediciones a 2500 [psi] y 500[°F]), que es de 1 millón de pesos aproximadamente. El ahorro con el rediseño propuesto sería de \$783458 pesos. Además, con el viscosímetro modificado sería posible en principio utilizar presiones de 2900 psi (20 MPa), que resultan ser mayores a los 2500 psi (17.2 MPa) que como máximo es posible usar con un FANN 90.

Esto es una inversión de 136,542, y se tendría que aumentar si no llegara a funcionar por los detalles omitidos, o que el precio varía por el costo del dólar, además de llegar a funcionar se tendría que considerar la etapa de pruebas, y en esa etapa se tendrían costos del fluido de perforación para realizar las pruebas, costo de luz, costo de nitrógeno y lo que se vaya sumando. El costo sería mucho más económico que el viscosímetro de marca, por lo que se puede proponer a llevarse a la etapa de fabricación y pruebas, para desarrollar aparatos especializados.



## Capítulo 5

### Conclusiones y trabajo a futuro

En este trabajo se rediseñó conceptualmente un viscosímetro de Couette, al cual se le añadieron subsistemas para contemplar la caracterización reológica de fluidos de perforación al ser sometidos a niveles de presión y temperatura similares a los existentes en condiciones reales de pozo, esto para observar el comportamiento de la hidráulica de los fluidos de perforación.

Por la experiencia adquirida, el rediseño de un viscosímetro como el que aquí se plantea requiere un análisis mucho más profundo. Lo cual demanda por un lado de personas especializadas en diferentes disciplinas como: reólogos, especialistas en materiales, físicos, matemáticos, ingenieros mecánicos, ingenieros químicos, ingenieros mecatrónicos, ingenieros en computación y por supuesto ingenieros petroleros; por otro lado, el proceso de diseño demanda diversas herramientas como algunos tipos de software especializado para simular el comportamiento de los diferentes subsistemas del instrumento al ser sometidos a diferentes condiciones de presión, temperatura, corrosión, etc. Además, se hace indispensable la fabricación de prototipos para poner a prueba el funcionamiento del instrumento como un todo y de cada uno de sus subsistemas; y, por si fuera poco, el replanteamiento de modelos matemáticos que surgen a partir del rediseño. Algunas de las tareas y actividades que se habrán de realizar para mejorar el rediseño son:

- a) Diseñar un compartimento reforzado para introducir el viscosímetro dentro y reducir riesgos en caso de una fuga de fluido o fallas mecánicas al someter a altas presiones el vaso.
- b) Rediseñar el tanque a presión, considerando una pared más delgada (hecha de acero) reforzada con fibras de carbono. Esto implica reducir al máximo el tamaño de la celda.
- c) Complementar el rediseño mecánico utilizando software con herramientas de elemento finito para analizar los estados de esfuerzo-deformación al someter la celda a diferentes niveles de presión-temperatura.
- d) Tratar de digitalizar lo más posible el sistema de medición (que en el diseño original es puramente mecánico usando un resorte), usando sensores electrónicos de movimiento y de fuerza.
- e) Integrar por un lado una interfaz del instrumento con el usuario y por otro un sistema de almacenamiento de datos digitales (memoria USB).
- f) Desarrollar un software para analizar los datos de almacenamiento y además pueda simular la reología de diversos fluidos a diversas tasas de corte y sometidos a distintas condiciones de presión y temperatura.
- g) Construir el prototipo con los diferentes sistemas rediseñados para hacer pruebas reales de desempeño. Poner a prueba la resistencia del vaso a la presión, temperatura, corrosión, fatiga, etc.

- h) Hacer un análisis detallado de los costos de diseño y fabricación.
- i) Buscar que el diseño sea lo más económico.
- j) Lograr que el instrumento sea lo más portátil posible.

Los puntos anteriores son con los que cuenta el Fann 90, y sería importante hacer el rediseño a fin de competir con él, de manera de no plagiar ningún diseño del Fann 90.

Evidentemente los fluidos de perforación se tienen que cambiar en las diferentes etapas de la perforación, se sabe que entre más profundo es más complicado controlar.

Los fluidos son cuerpos que, debido a la gran cohesión de sus moléculas, mantienen su forma y volumen constante, por lo que sujetos a una temperatura y presión mayor a la inicial puede modificar su comportamiento, como la viscosidad, densidad y volumen; el volumen debido a la evaporización del agua, cuando esta sea el caso, además de los casos del aceite, modificar su espesor y viscosidad.

Los lodos son, básicamente dispersión de arcilla en agua o aceite con varios aditivos para proveer las propiedades deseadas, los sólidos que contienen consisten, en arcillas, aditivos densificantes y sólidos. Las partículas que constituyen un sólido están unidas entre sí por fuerzas muy intensas, de manera que resulta muy difícil separarlas; por ello los sólidos tienen una forma bien definida, pero que, al estar en condiciones extremas de presión y temperatura, se pueden separar las fases, y crear problemas en las etapas de perforación al impedir una circulación adecuada, para remover los recortes y todo lo que más implica.

# Referencias

- [1] G. DeBruijn, R. Greenaway, D. Harrison, M.Parris, S. James, F. Mueller, S. Ray, M. Riding, L. Temple, K. Wutherich, Tecnologías para alta presión y alta temperatura, Oilfield Review, published by Schlumberger, Vol. 20, No.3, 2009, 52-67.
- [2] Fann Model 35 Viscometer Instruction Manual.
- [3] Robert L. Mott. Cuarta edición "Mecánica de fluidos aplicada" Ed. PEARSON
- [4] JOHN K VENNARD, ROBERT L. STREET. Tercera edición en español de la sexta en inglés. Agosto de 1989 "ELEMENTOS DE MECANICA DE FLUIDOS" COMPAÑÍA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MEXICO. Pág. 34-42.
- [5] HIDRÁULICA DE PERFORACIÓN JUAN GILBERTO LEON LOYA, HIDRÁULICA DE PERFORACIÓN MAYO DE 2001
- [6] Sistema Nacional de capacitación Técnico-Practica PEMEX-IMP Fluidos de control nivel 3
- [7] <http://www.glossary.oilfield.slb.com/>
- [8] Baroid Drilling Fluids, Inc. Fluidos de Perforación Fase II.
- [9] Andrade, E. D. C. (1934). LVIII. A theory of the viscosity of liquids-Part II. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 17(113), 698-732.
- [10] A. G. Ward, "The viscosity of Pure Liquids", Transactions of the Faraday Society, 1937, 33, pp. 88-97
- [11] <http://web.esciencia.es>
- [12] UNIVERSIDAD VERACRUZANA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, "ANÁLISIS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN EN LA INDUSTRIA PETROLERA" Presenta para obtener el título de: INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICISTA: HERNÁNDEZ TREJO JOVANNY ALBERTO XALAPA, VER. AGOSTO 2010.
- [13] [geologyanddrillingproblems.wikispaces.com](http://geologyanddrillingproblems.wikispaces.com)
- [14] "Fundamentos de los fluidos de perforación", Don Williamson SLB.
- [15] Julio Cesar Quesada, TEMA 5: Técnicas reométricas, 2008.
- [16] <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3626/1/tema5RUA.pdf>
- [17] [www.directindustry.es](http://www.directindustry.es)
- [18] <http://www.twilight.mx/Viscosímetros/Viscosímetros-Copa-Ford.html>

[19] Soluciones Exactas a Navier-Stokes, Dr. Roberto zenit, Instituto de Ingeniería de los Materiales. Fluidos 2, capítulo 3.

[20] [www.cientificasenna.com](http://www.cientificasenna.com)

[21] Diseño y cálculo de recipientes a presión, Ing. Juan Manuel León Estrada 2001 Editorial INGLESA.

[22] <http://es.shideshare.net/UlisesLozanoMagarinho/calculo-de-resipientes-a-presion>

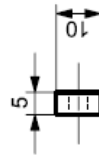
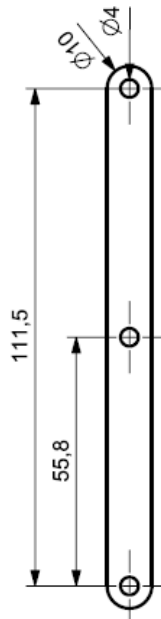
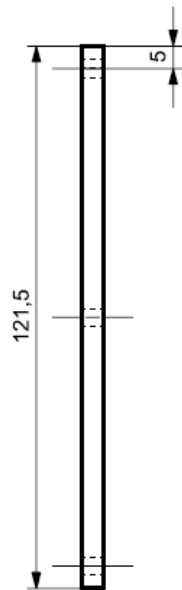
[23] <http://macareno.mx/2012/05/t/aceros-hss/>

[24] <http://resistencias-tipo-banda.mexicored.com.mx/>

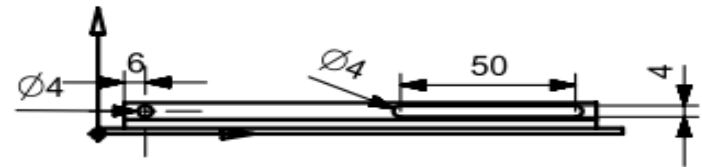
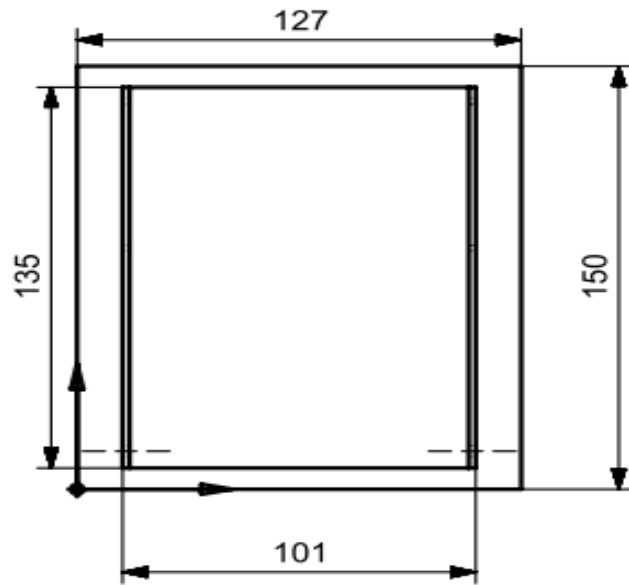
[25] Yunus A. Cengel, Transferencia de calor y masa, 3era Edición, Mc Graw Hill.

# Anexo A

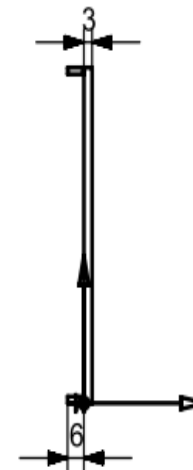
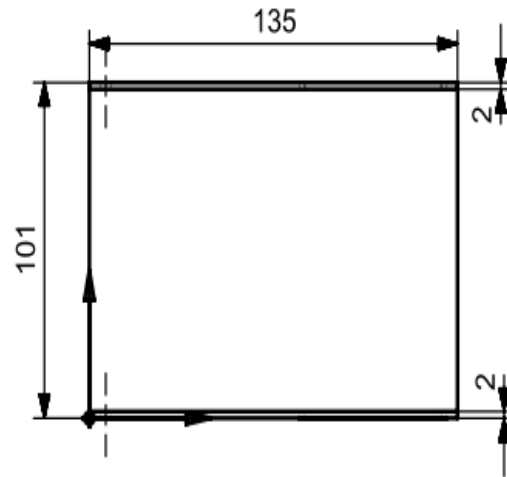
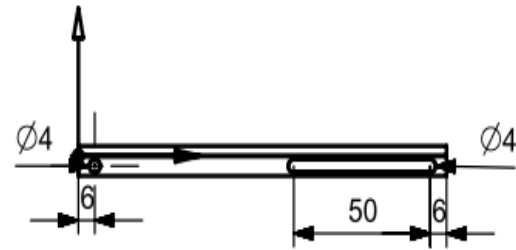
## Planos de ensamble y fabricación del gato mecánico



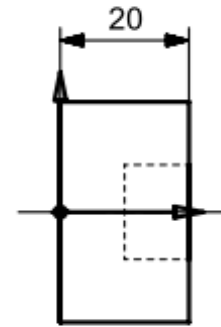
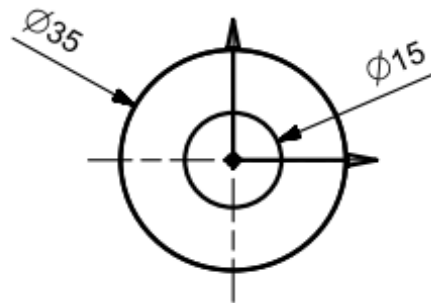
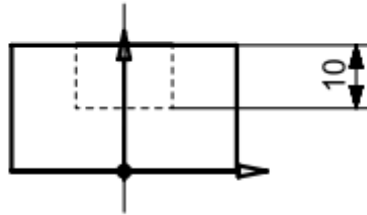
	Universidad Nacional Autónoma de México	
Fecha	08/04/2016	10/04/2016
Acotaciones: mm	A4	Material: Aluminio
Plano: Manufactura eslabon		
No. de piezas: 8	Escala 1:1	Plano No. 1/1



	Universidad Nacional Autónoma de México	
Fecha	08/04/2016	10/04/2016
Acotaciones: mm	A4	Material: Aluminio
Plano: Manufactura base		
No. de piezas: 1	Escala 1:2	Plano No. 1/1

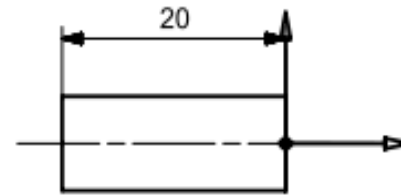
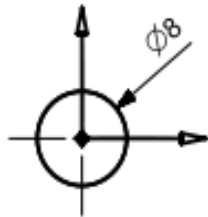
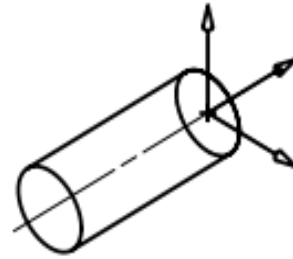


	Universidad Nacional Autónoma de México	
Fecha	08/04/2016	10/04/2016
Acotaciones: mm	A4	Material: Aluminio
Plano: Manufactura base superior		
No. de piezas: 1	Escala 1:1	Plano No. 1/1

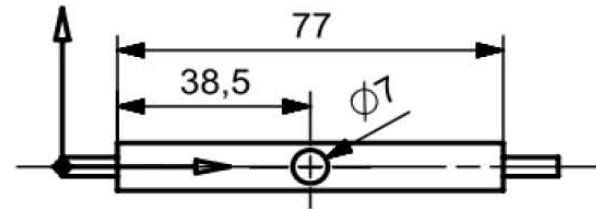
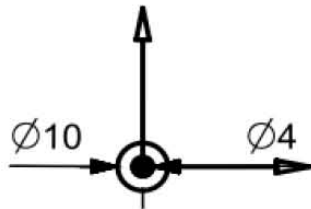
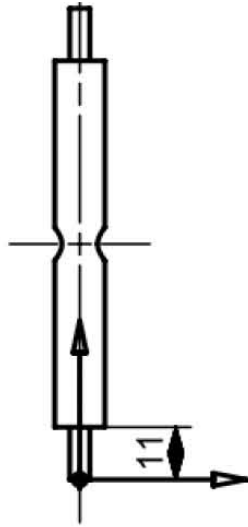


Universidad Nacional Autónoma de México		
Fecha	08/04/2016	10/04/2016
Acotaciones: mm	A4	Material: Aluminio
Plano: Manufactura		
No. de piezas: 1	Escala 1:1	Plano No. 1/1

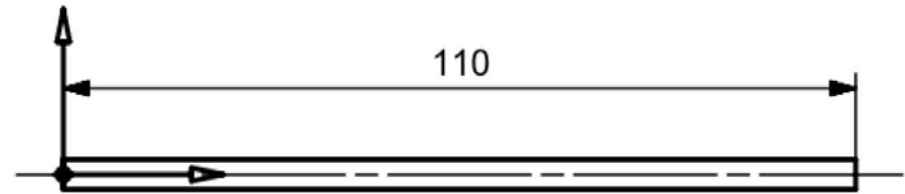
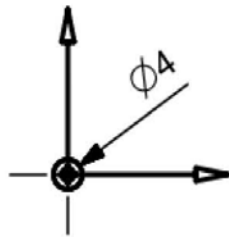




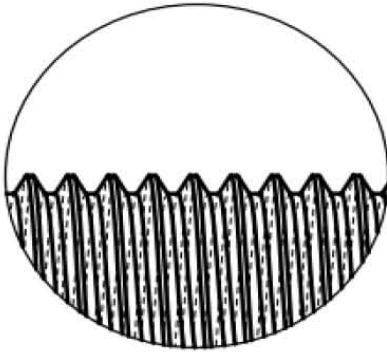
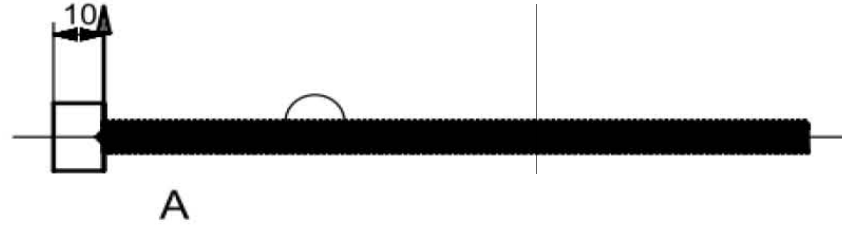
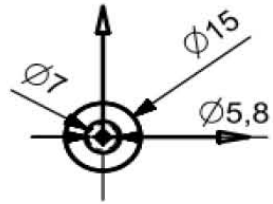
	Universidad Nacional Autónoma de México	
Fecha	08/04/2016	
Acotaciones: mm	A4	Material: Aluminio
Plano: Manufactura perno		
No. de piezas: 4	Escala 2:1	Plano No. 1/1



	Universidad Nacional Autónoma de México	
Fecha	08/04/2016	
Acotaciones: mm	A4	Material: Aluminio
Plano: Manufactura eslabon		
No. de piezas: 2	Escala 1:1	Plano No. 1/1

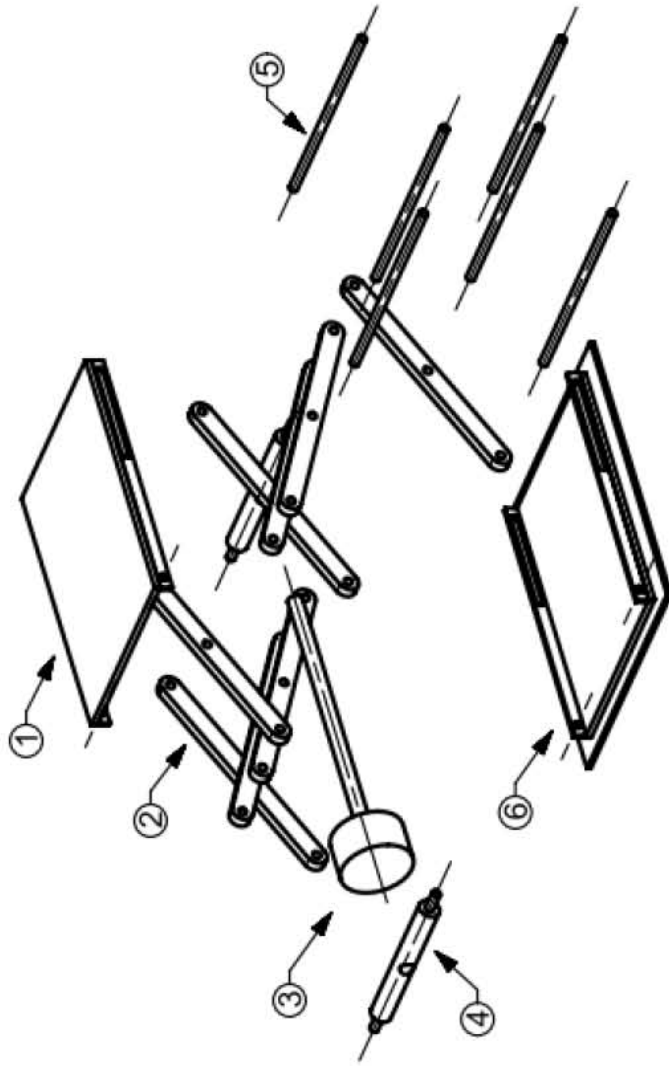


Universidad Nacional Autónoma de México		
Fecha	08/04/2016	
Acotaciones: mm	A4	Material: Aluminio
Plano: Manufactura perno		
No. de piezas: 6	Escala 1:1	Plano No. 1/1



DETAIL A  
SCALE 5:1

Universidad Nacional Autónoma de México		
Fecha	08/04/2016	
Acotaciones: mm	A4	Material: Aluminio
Plano: Manufactura tornillo		
No. de piezas: 1	Escala 1:1	Plano No. 1/1

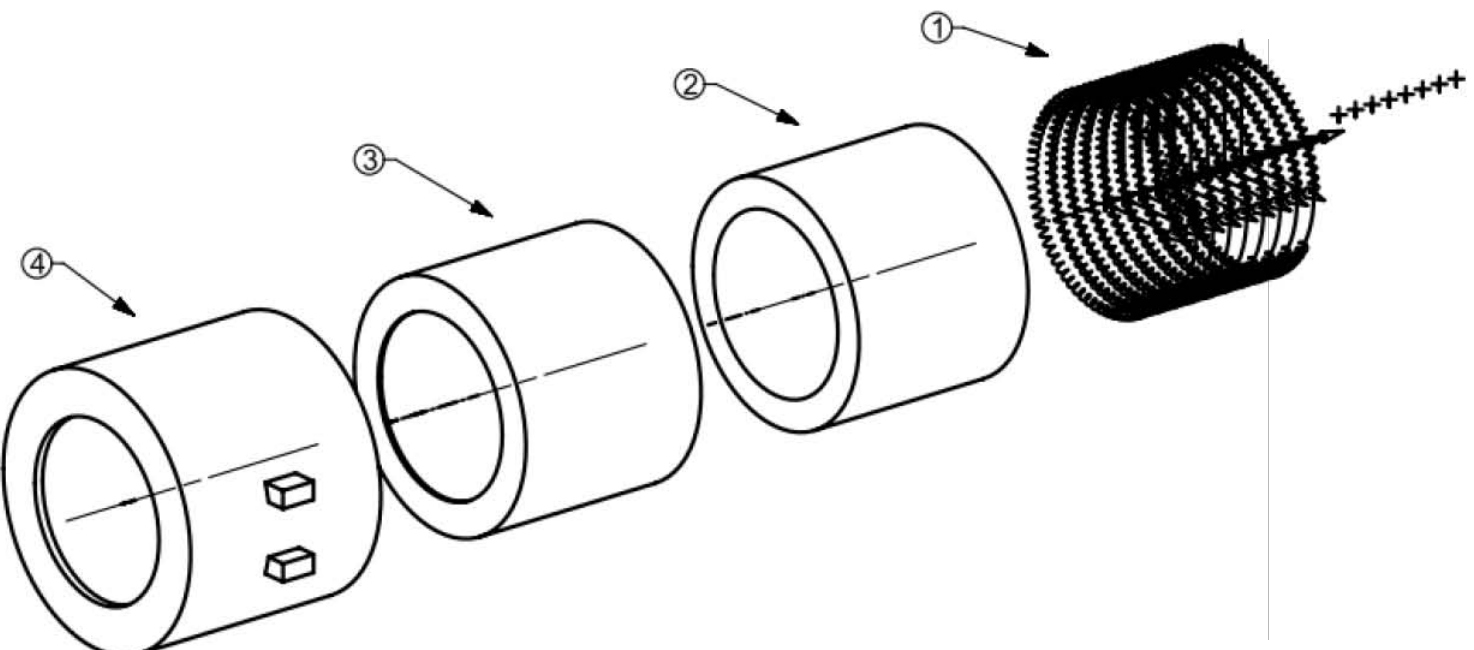


Pieza	Número de piezas	Nombre
1	1	Base superior
2	8	Eslabones
3	1	Tornillo
4	2	Perno sujetador
5	6	Pernos
6	1	Base inferior

## Anexo B

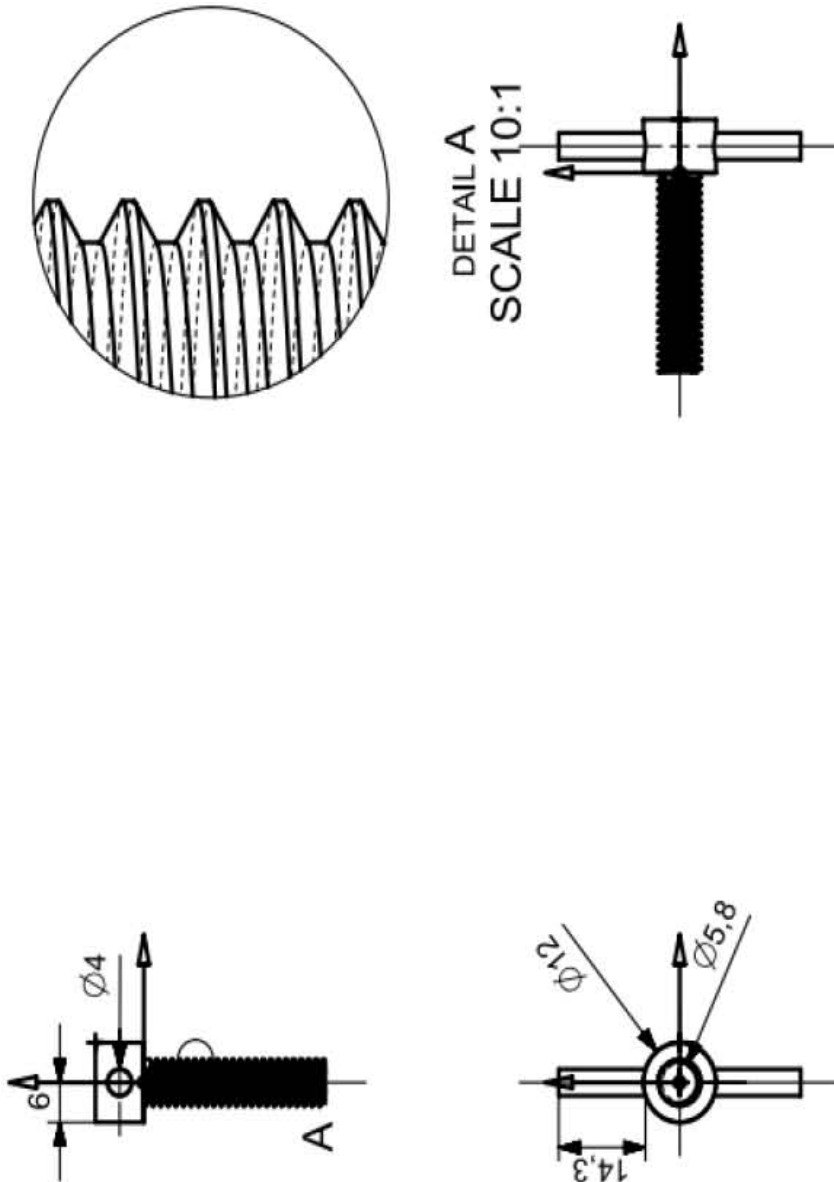
Planos de ensamble y fabricación de la chaqueta de calentamiento

Piezas	Número de piezas	Nombre	Material
1	9	Resistencia	Nicromel
2	1	Cerámico	Alumina
3	1	Aislante	Poliestireno XPS
4	1	Protectora	Acero AISI 309

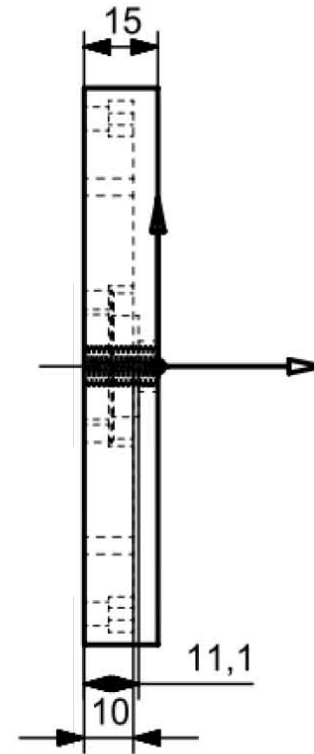
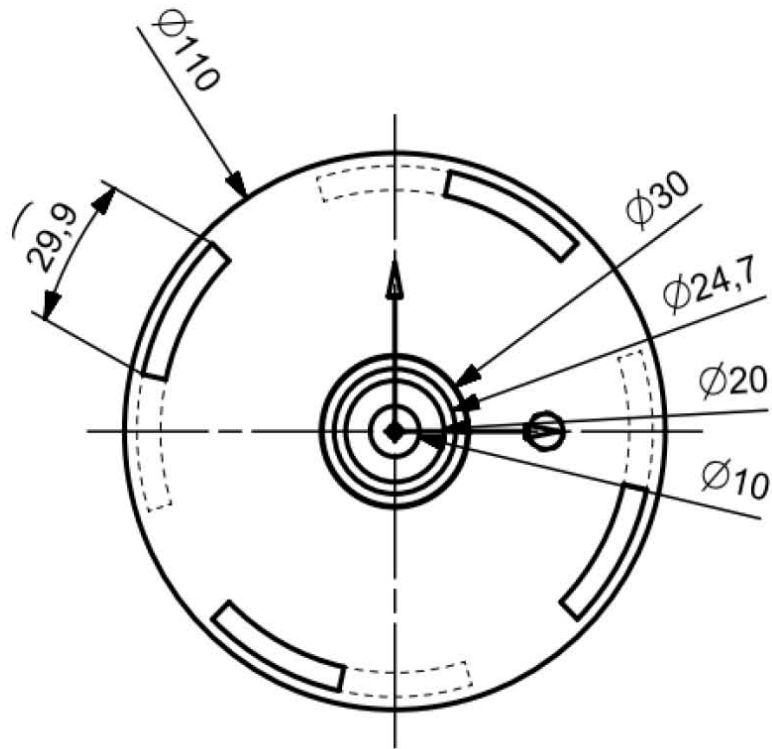


# Anexo C

## Planos de fabricación y ensamble de la celda de presión

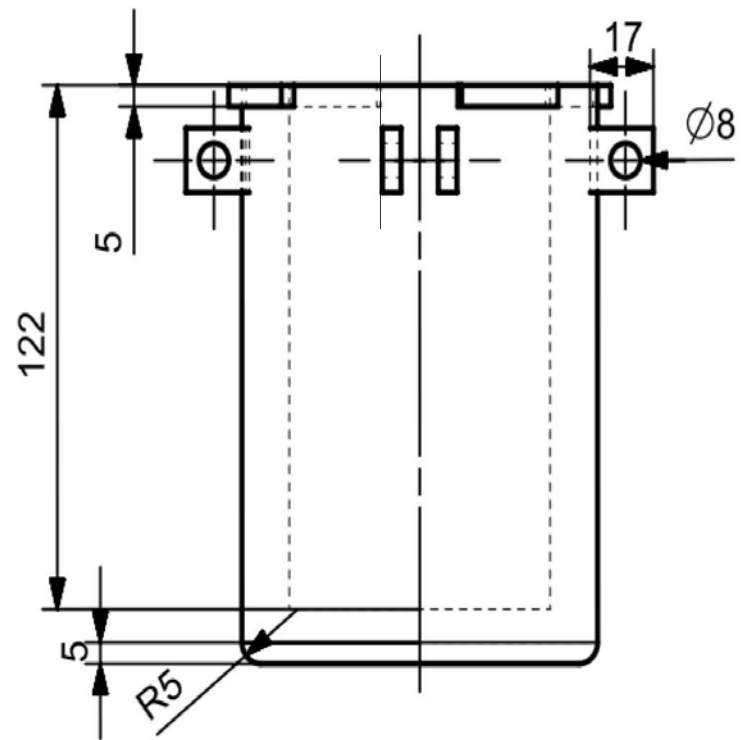
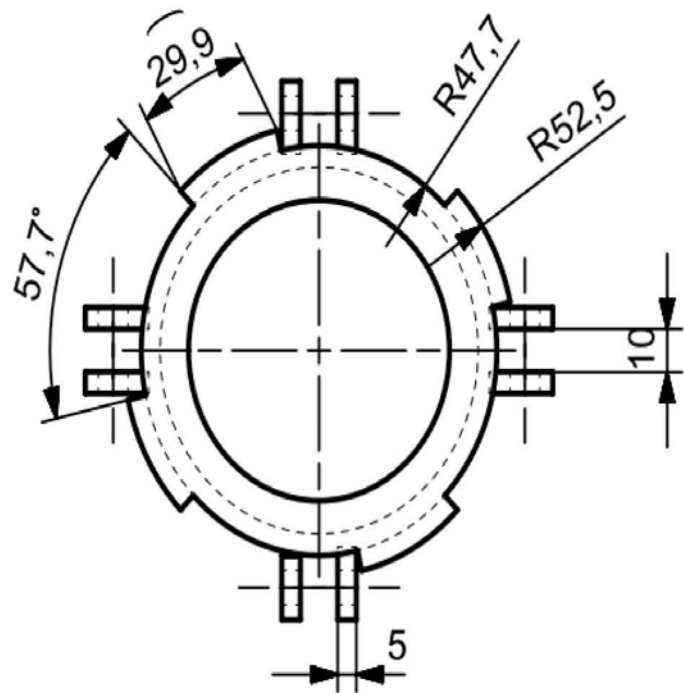


Universidad Nacional Autónoma de México	
Fecha	08/04/2016
Acotaciones: mm	A4
Plano: Manufactura tornillo sujetador	
No. de piezas: 4	Escala 1:1
Plano No. 1/1	

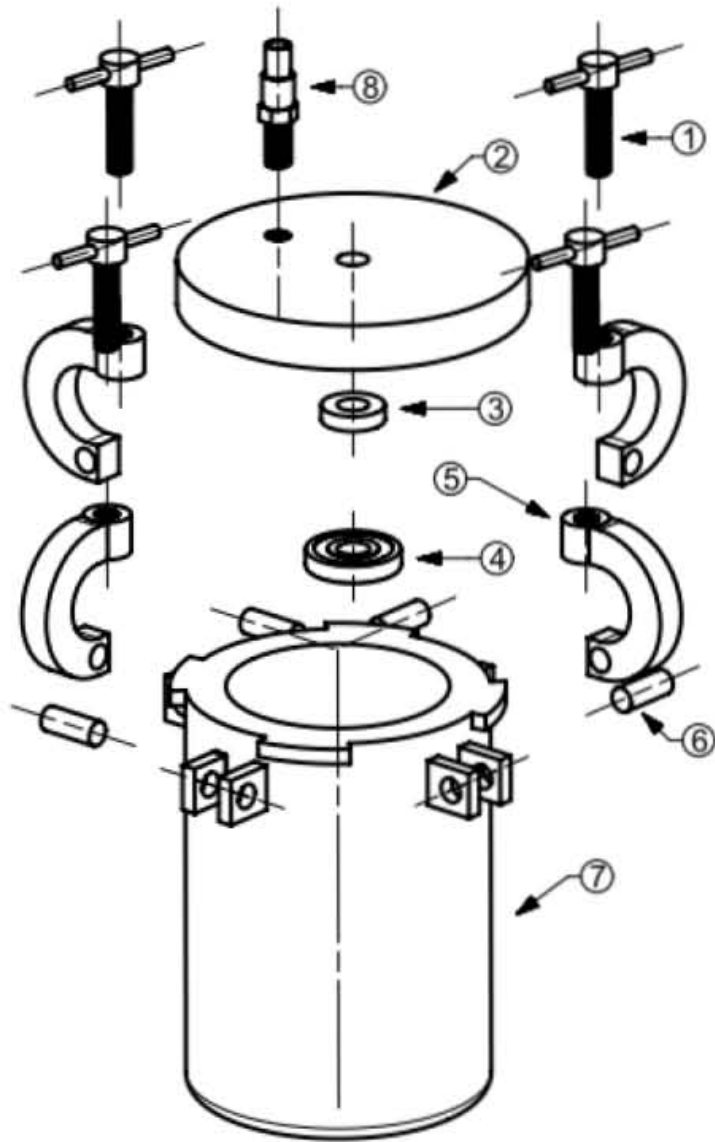


Universidad Nacional Autónoma de México		
Fecha	08/04/2016	
Acotaciones: mm	A4	Material: Acero
Plano: Manufactura tapa		
No. de piezas: 1	Escala 1:1	Plano No. 1/1

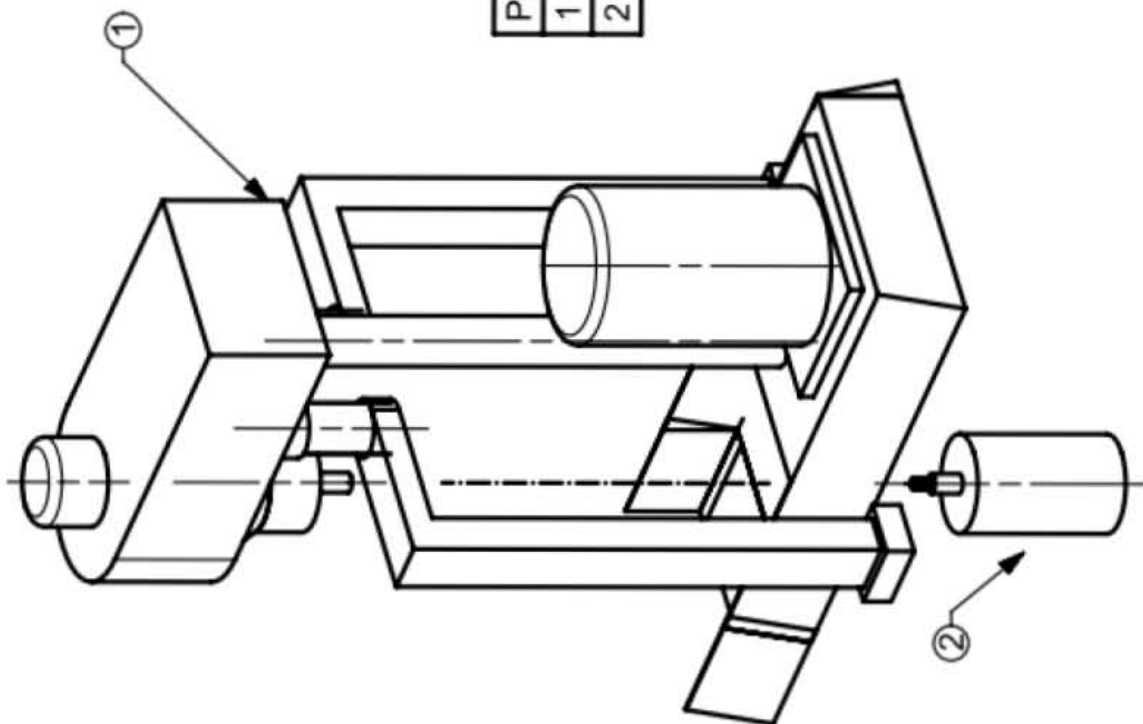




Universidad Nacional Autónoma de México		
Fecha	08/04/2016	
Acotaciones: mm	A4	Material: Acero
Plano: Manufactura tanque		
No. de piezas: 1	Escala 1:1	Plano No. 1/1



Pieza	Número de piezas	Nombre
1	4	Soportes
2	1	Tapa
3	1	Junta
4	1	Rodamiento
5	4	Orejas para soportes
6	4	Pernos
7	1	Vaso
8	1	Anillo acoplador



Piezas	Número de piezas	Nombre
1	1	Viscosímetro
2	1	Agitador