

***DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CARTUCHOS DE FILTRACIÓN DE FINOS
PARA FLUIDOS DE COMPLETAMIENTO EN LA INDUSTRIA PETROLERA***

**OSCAR ANDRÉS WECK DELGADO
FELIX AUGUSTO SERRATO TOVAR**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
2010**

***DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CARTUCHOS DE FILTRACIÓN DE FINOS
PARA FLUIDOS DE COMPLETAMIENTO EN LA INDUSTRIA PETROLERA***

**OSCAR ANDRÉS WECK DELGADO
FELIX AUGUSTO SERRATO TOVAR**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
Ingeniero de Petróleos

Director:

Director: LUIS HUMBERTO ORDUZ

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA
2010**

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Ciudad y fecha (15, 4,10)

DEDICATORIA

*A mi madre **Nohora Delgado Silva**, quien me ha acompañado siempre entregándome su infinito amor y cariño, sacrificado un todo por su familia. Mi Padre **Federico Weck** quien con su ejemplo me ha guiado y brindado los medios para alcanzar esta meta cumplida. A mis hermanos Federico Germán y Jhon Jairo, para ustedes gracias.*

Quiero agradecer a dios, a mis padres LUIS ALBERTO Y MARIA DE JESUS, quienes con su esfuerzo y dedicación han hecho de este sueño una realidad, son la fuente de mi progreso y desarrollo como persona y como profesional, su motivación y apoyo incondicional son la raíz fundamenta que hoy en día podamos compartir juntos este logro, a mis hijos JUAN ESTEBAN y LUISA FERNANDA quienes son la inspiración de mi progreso.

A todos aquellos que hicieron parte de este camino; Mi familia, Mi Hermano LUIS ABRAHAN Y Mi padrino MANUEL VILLALBA, que siempre estuvieron apoyándome durante los momentos difíciles a ellos gracias.

AGRADECIMIENTOS

A Cristian Chinchilla, ingeniero de petróleos, ingeniero de fluidos BRINADD DE LOS ANDES S.A

Haiber Uriel Gonzales Bonilla, ingeniero químico, Coordinador laboratorio BRINADD DE LOS ANDES S.A

Luis Humberto Orduz, ingeniero de petróleos, Profesor Universidad Surcolombiana.

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE CUADRO	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE ANEXOS	15
GLOSARIO	16
RESUMEN	17
ABSTRACT	18
INTRODUCCIÓN	19
1. FILTRACIÓN	20
1.1. CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DEL PROCESO	20
1.1.1. La fuerza impulsora de la filtración.	20
1.1.2. El mecanismo de filtración.	21
1.1.3. El ciclo de operación.	21
1.1.4. La naturaleza de los sólidos.	21
1.2. COMPONENTES DE LA UNIDAD DE FILTRADO.	24
1.2.1. El contenedor.	25
1.2.2. Elemento filtrante	28
1.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN	31
1.4. MECANISMO DE FILTRACIÓN POR TORTA.	32

1.5. MANTENIMIENTO	33
1.6. FUNCIONAMIENTO	34
1.7. EFECTOS PRÁCTICOS DE LAS VARIABLES DE FILTRACIÓN	35
1.7.1. Presión	35
1.7.2. Torta de filtración	36
1.7.3. Viscosidad y temperatura	36
1.7.4. Tamaño de partículas y concentración	36
1.8. PARÁMETROS QUE AFECTAN EL RENDIMIENTO DEL FILTRO	37
1.9. CÁLCULOS DEL PROCESO DE FILTRACIÓN	37
1.9.1. Limitaciones y conclusiones del modelo	40
1.10. FLUIDOS DE COMPLETAMIENTO	41
1.10.1. Clasificación de los fluidos de completamiento	42
1.10.1.1. Fluidos base agua	42
1.10.1.2. Fluidos base aceite	44
1.10.1.3. Gases	45
2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE FILTROS	46
2.1. MATERIALES	46
2.2. EQUIPO DE FABRICACIÓN	49
2.3. PROCESO DE FABRICACIÓN DE CARTUCHOS ENCORDADOS	52
3. PRUEBA DE FILTRACIÓN	54
3.1. EQUIPOS	54
3.1.1. Unidad de filtrado	55
3.1.2. Bombas	56
3.1.3. Tanques de almacenamiento	57

3.1.4. Tanques de mezclado	57
3.1.5. Espectrómetro	58
3.2. PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS	58
4. RESULTADOS	60
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63
5.1. COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES MEDIDAS DURANTE LAS PRUEBAS	64
5.1.1. Prueba uno y dos algodón	66
5.1.2. Prueba uno y dos fique	70
5.1.3. Prueba tres de algodón	74
5.2. CAUDALES Y PORCENTAJES PROMEDIOS	78
5.3. LIMITACIONES DE LOS RESULTADOS	79
5.4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	79
5.4.1. Discusión de cada variable	80
5.4.2. Correlación y comparación	83
6. CONCLUSIONES	88
7. RECOMENDACIONES	90
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
Anexos	92

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Secuencia operacional de la filtración	32
Tabla 2. Tipos de salmueras	43
Tabla 3. Propiedades mecánicas de la fibra de fique	48
Tabla 4. Volumen de salmuera y concentraciones de sal	59
Tabla 5. Prueba uno cartuchos encordados de algodón	60
Tabla 6. Prueba uno cartuchos encordados de fique	61
Tabla 7. Prueba dos cartuchos encordados de algodón	61
Tabla 8. Prueba dos cartuchos encordados de fique	61
Tabla 9. Prueba tres cartuchos encordados de algodón	62
Tabla 10. Cuadro comparativo de variables de los cartuchos fabricados y los industriales	86

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Propiedades del algodón	47
Cuadro 2. Tención de fabricación cartuchos encordados	53
Cuadro 3. SST de la salmuera de entrada a la unidad de filtrado	60
Cuadro 4. Promedios de la variable por prueba	62
Cuadro 5. Ecuación línea de tendencia y el coeficiente de regresión para el algodón	64
Cuadro 6. Ecuación línea de tendencia y el coeficiente de regresión para el fique	65
Cuadro 7. Porcentaje de disminución de caudal	81
Cuadro 8. Extrapolación de datos	84

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Clasificación filtros de presión	23
Figura 2. Clasificación filtros de vacío	24
Figura 3. Unidad de filtración	25
Figura 4. Tipos de contenedores	26
Figura 5. Cabecera horizontal de unidad de filtrado	27
Figura 6. Filtro de cartucho de polipropileno de 5 micras	28
Figura 7. Núcleo filtrante reciclado	48
Figura 8. Máquina encordadora	49
Figura 9. Sistema de polea acoplada al motor	50
Figura 10. Polea vertical de repartición	51
Figura 11. Tornillo sin repartición	52
Figura 12. Esquema laboratorio BRINADD DE LOS ANDES S.A	54
Figura 13. Unidad de filtrado	55
Figura 14. Interior unidad de filtrado	56
Figura 15. Motor y bomba centrifuga de caracol	56

Figura 16. Tanques de almacenamiento	57
Figura 17. Tanques de mezclado	57
Figura 18. Espectrómetro Hach DR 2800	58
Figura 19. Imagen de cartuchos de algodón antes y después de ser usados en la Prueba	63
Figura 20. Imagen de cartuchos de fique antes y después de ser usados en la prueba	63
Figura 21. Comportamiento del volumen para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón	66
Figura 22. Línea de tendencia del comportamiento del volumen para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón	66
Figura 23. Comportamiento del caudal para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón	67
Figura 24. Línea de tendencia del comportamiento del caudal para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón	67
Figura 25. Comportamiento de la presión para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón	68
Figura 26. Línea de tendencia del comportamiento de la presión para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón	68
Figura 27. Comportamiento de los SST retenidos para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón	69
Figura 28. Línea de tendencia del comportamiento de los SST retenidos para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón	69

Figura 29. Comportamiento del volumen para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique	70
Figura 30. Línea de tendencia del comportamiento del volumen para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique	70
Figura 31. Comportamiento del caudal para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique	71
Figura 32. Línea de tendencia del comportamiento del caudal para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique	71
Figura 33. Comportamiento de la presión para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique	72
Figura 34. Línea de tendencia del comportamiento de la presión para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique	72
Figura 35. Comportamiento de los SST retenidos para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique	73
Figura 36. Línea de tendencia del comportamiento de los SST retenidos para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique	73
Figura 37. Comportamiento del volumen para la prueba tres cartuchos encordados de algodón	74
Figura 38. Línea de tendencia del comportamiento del volumen para la prueba tres cartuchos encordados de algodón	74
Figura 39. Comportamiento del caudal para la prueba tres cartuchos encordados de algodón	75
Figura 40. Línea de tendencia del comportamiento del caudal para la prueba tres cartuchos encordados de algodón	75

Figura 41. Comportamiento de la presión para la prueba tres cartuchos encordados de algodón	76
Figura 42. Línea de tendencia del comportamiento de la presión para la prueba tres cartuchos encordados de algodón	76
Figura 43. Comportamiento de los SST retenidos para la prueba tres cartuchos encordados de algodón	77
Figura 44. Línea de tendencia del comportamiento de los SST retenidos para la prueba tres cartuchos encordados de algodón	77
Figura 45. Caudales promedio	78
Figura 46. Porcentaje promedio de sólidos retenidos	78

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Certificación BRINDAD DE LOS ANDES S.A	92
Anexo B. Control de calidad del proceso de fabricación de cartuchos encordados	96

GLOSARIO

Cartucho: Nombre establecido a los filtros cilíndricos utilizados en la filtración a presión.

Coadyuvantes: Sustancia adicionada en la filtración para disminuir la tensión superficial y permitir la decantación de los sólidos.

Encordado: Proceso mediante el cual se enrolla hilo en un cilindro.

Maquina encordadora: Máquina desarrollada en esta tesis para encordar hilo en un cilindro.

Medio filtrante: Parte del filtro de cartucho que retiene los sólidos durante el proceso de filtración.

Núcleo filtrante: Soporte del medio filtrante

Nutscha: Filtro cuyo principio de funcionamiento puede ser de presión o vacío

Paso: Distancia entre el hilo encordado al dar un giro completo.

Plisados: Material de envolvimiento delgado que puede ser tela, papel o un polímero.

Tornillo sin fin: Tornillo que permite el desplazamiento de la maquina encordadora en dos direcciones.

Tensión: Estado del hilo al ser sometido a una fuerza opuesta a la generada por el enrollamiento del hilo.

RESUMEN

En la industria petrolera el proceso de filtración de fluidos de completamiento se lleva a cabo con diferentes tipos de cartuchos, en esta investigación se desarrollaron cartuchos de filtración encordado a partir de materiales orgánicos, que generan un medio filtrante apropiado a partir del diseño y la geometría del filtro.

La fabricación de los cartuchos se desarrolló con una maquina diseñada y fabricada para tal fin, permitiendo una tensión variable y constante en el proceso de elaboración.

El desarrollo de las pruebas experimentales se llevó a cabo en unidades industriales con fluidos de completamiento, se monitoreó volumen, caudal, presión y sólidos suspendidos. Dichas variables permitieron comparar y analizar los cartuchos desarrollados en la investigación con los industriales.

Los cartuchos industriales retienen entre un 45% y un 70% de sólidos suspendidos, los fabricados en esta investigación alcanzaron un 67% de retención de sólidos para el algodón y un 25% para el fique.

ABSTRACT

In the petroleum industry the fluids of completion filtration it's carried out with different types of cartridges, in this investigation strung filtration cartridge were developed from organic materials, it generates an appropriate filtering way, starting from design and filter geometry.

The production of cartridges was developed with a machine that was designed and built for such end, allowing a variable and constant tension in the process of elaboration.

The development of the experimental tests is carried out in industrial units with completion fluids, to observe: volume, flow, pressure and suspended fluids. These variables allow generate a comparison point and analysis between developed cartridges in the investigation and industrial cartridges, were the obtained results are good.

The industrial cartridges keep between a 45% to 70% of suspended solids, the cartridges development in this investigation reached a 67% of solid retention for a cotton and a 25% in fique.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refiere al tema de fabricación de cartuchos de fino para fluidos de completamiento; desarrollando cartuchos de filtración del tipo encordado, fabricados con material biodegradable que puedan ser producidos con maquinaria colombiana.

El desarrollo de esta investigación pretende generar un conocimiento más amplio del proceso de filtración con cartuchos y la búsqueda de materiales alternativos a partir de la experimentación, la cual se basará en pruebas de laboratorio realizadas con los procedimientos, equipos y fluidos utilizados en la industria petrolera, permitiendo un análisis de la eficiencia y el rendimiento de los cartuchos.

Se experimentó desde el inicio de la investigación con la búsqueda de materiales alternativos y generando una maquina encordadora capaz de realizar el encordado a diferentes pasos y tensiones, siendo éstas las variables de diseño de los cartuchos encordados desarrollados en la investigación.

La importancia de la filtración radica en el control y mitigación del daño de formación, proceso en el que se introducen sólidos a la zona adyacente al pozo, produciendo una disminución de la producción del mismo, ocasionada por disminución de la permeabilidad de este mismo sector.

Mediante diferentes estudios se ha determinado que durante el proceso de terminación o completamiento del pozo se genera daño a la formación. Este daño es ocasionado por los sólidos suspendidos en el fluido de completamiento; es por esta razón que se les aplica el proceso de filtración.

El desarrollo de la tesis conllevó a diseñar y desarrollar un equipo capaz de fabricar los cartuchos a tamaño industrial: dicho equipo es único actualmente en Colombia por su longitud de desplazamiento.

La investigación se desarrolló experimentalmente con pruebas de laboratorio que permitieran controlar, medir y corroborar resultados del proceso, para determinar qué material y cuál proceso de fabricación arroja los mejores resultados.

1. FILTRACION

Los filtros son equipos en los que se lleva a cabo la operación de separación sólido-líquido denominada filtración. Esta operación consiste en una separación física donde no existe transferencia de materia sino que lo que se da es una separación entre distintos estados de agregación.

La filtración es una operación unitaria donde se consigue la separación de los sólidos que se encuentran suspendidos en un medio líquido haciendo pasar la suspensión a través de un medio poroso, el cual va a retener las partículas sólidas dejando pasar el líquido. Los sólidos quedarán retenidos en función de su granulometría y según sea el tamaño de los poros.

El medio filtrante es la barrera que retiene los sólidos y deja pasar el líquido, puede ser un tamiz, una tela, un tejido de fibras, fieltro, membranas poliméricas o un lecho de sólidos. El líquido que atraviesa el medio filtrante se denomina filtrado.

El sistema de operación se clasifica de dos formas, el primero a presión constante. La presión de impulsión de la suspensión se mantiene constante durante todo el ciclo de filtración, con lo que el caudal de filtrado resulta variable y decreciente, ya que la resistencia de la torta aumenta con el espesor de la misma. El ciclo concluye cuando el caudal de filtrado está por debajo de un mínimo.

El segundo a volumen constante, se intenta mantener fijo el volumen de filtrado, lo que exige aplicar presiones crecientes para compensar los aumentos progresivos de resistencia de la torta. El ciclo se dará por terminado cuando se alcance la presión máxima que puede soportar el sistema.

1.1 CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DEL PROCESO

Un proceso de filtración presenta diversas características que se han de tener en cuenta para clasificar el proceso y seleccionar el equipo adecuado. Los distintos criterios de clasificación que se siguen son de acuerdo: la fuerza impulsora, el mecanismo de filtración, el ciclo de operación, la naturaleza de los sólidos.

1.1.1 La fuerza impulsora de la filtración

Dependiendo del mecanismo que ejerce la energía para impulsar el fluido a filtrar, la fuerza impulsora se clasifica en:

- Gravedad.
- Presión o vacío
- Centrífuga

1.1.2 El mecanismo de filtración

El mecanismo de filtración se clasifica dependiendo la proporción de sólidos y su acción el medio filtrante:

- Filtración por torta:

Si la proporción de sólidos es muy elevada, las partículas quedan retenidas en la superficie del medio filtrante estableciéndose gradualmente una torta de espesor creciente sobre el medio filtrante, con lo que en realidad la filtración se va a realizar a través de la torta. Por tanto la mayor parte de partículas se recogen en la torta filtrante y posteriormente ésta se separa del medio.

- Filtración en lecho profundo:

La proporción de partículas sólidas es muy pequeña y con frecuencia su diámetro es menor que el de los poros del medio filtrante por lo que las partículas penetran hasta una profundidad considerable antes de ser atrapadas.

1.1.3 El ciclo de operación

Dependiendo si el ciclo de operación es constante o interrumpido, se clasifica en:

- Continuo
- Discontinuo

1.1.4 La naturaleza de los sólidos

- Torta compresible: si los sólidos son deformables.
- Torta incompresible: si éstos son rígidos.

En general, estas categorías no se excluyen mutuamente y los procesos de filtración suelen clasificarse principalmente de acuerdo al mecanismo de filtración, la fuerza impulsora de la filtración.

Existen numerosos tipos de filtros dependiendo de la aplicación a que estén destinados, su clasificación se puede realizar atendiendo a diferentes criterios, aunque lo más frecuente es su caracterización en función de la fuerza motriz.

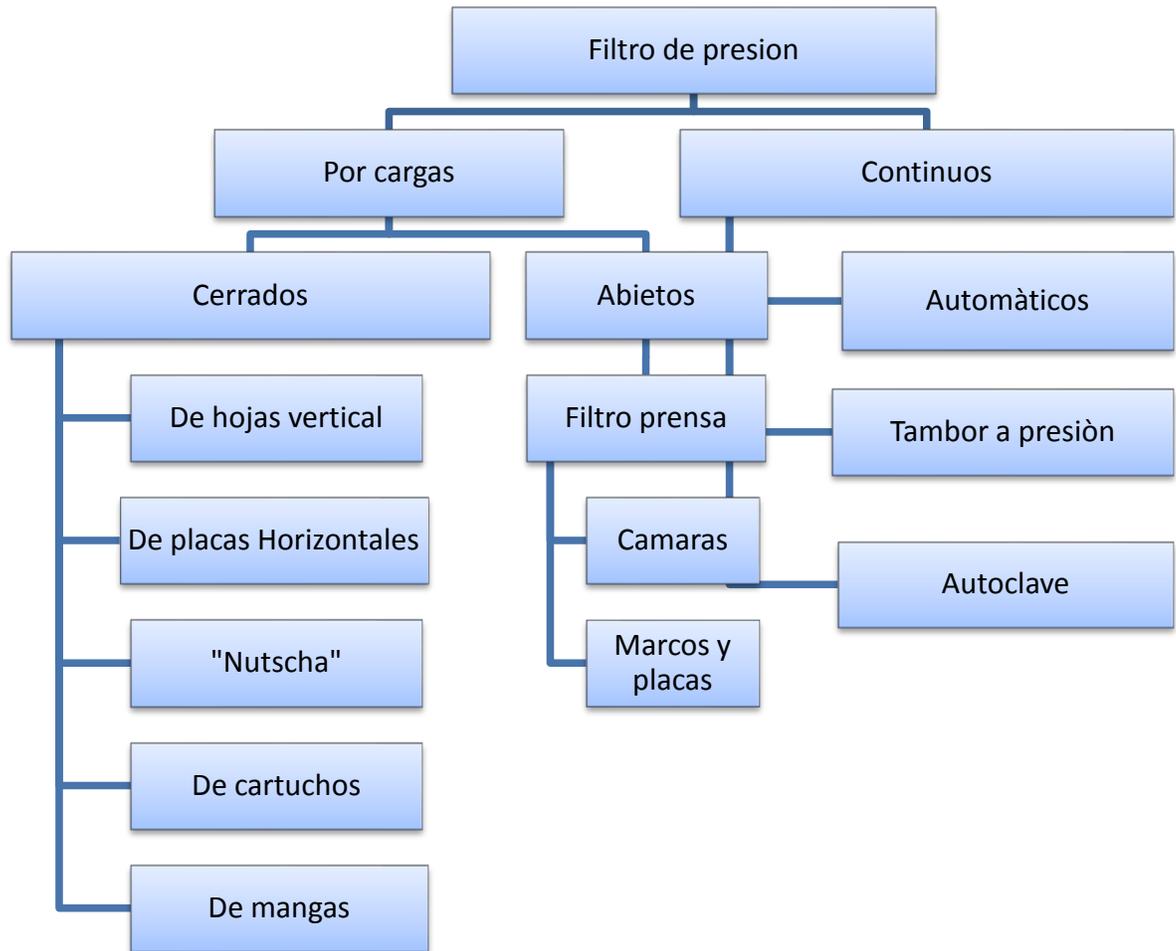
Los factores principales a considerar a la hora de elegir un tipo de filtro frente a otro son: la resistencia específica de la torta, la cantidad a filtrar y la concentración de sólidos. Otra de las características del filtro a tener en cuenta es la facilidad de descarga de la torta.

Ante todo lo que va a decidir la elección del filtro es el factor económico. Normalmente el precio del equipo está directamente relacionado con el área filtrante.

Los filtros clarificadores o de lecho profundo se suelen emplear cuando la cantidad de sólidos presentes en el líquido es muy pequeña, siendo de gran aplicación para la depuración de agua y el tratamiento de aguas residuales. En este grupo se tienen los filtros de lecho y los cartuchos filtrantes. Los filtros de cartucho son cada vez más utilizados en la industria por sus buenos resultados.

Los filtros de presión se clasifican en por cargas y continuos, la figura 1 presenta la clasificación de estos tipos de filtros y sus respectivas subdivisiones.

Figura 1. Clasificación filtros de presión



Si se debe seleccionar entre un filtro de presión o uno de vacío se deben conocer las ventajas e inconvenientes que presentan cada uno de ellos. Los filtros de presión permiten la obtención de tortas con un menor contenido de humedad y los filtros de vacío, aunque permiten un funcionamiento en continuo, el consumo de energía es mayor debido al sistema de vacío y existe una limitación en la diferencia de presión aplicable (ya que la presión máxima no puede sobrepasar el valor de 1 atm).

Figura 2. Clasificación filtros de Vacío



1.2 COMPONENTES DE LA UNIDAD DE FILTRADO

Las unidades de filtración están compuestas por dos componentes esenciales:

- El contenedor.
- El elemento filtrante.

Todos estos componentes se construyen con elementos capaces de resistir temperaturas altas y según los requerimientos de corrosión y presión del proceso.

Figura 3. Unidad de filtración



11.2.1 El contenedor

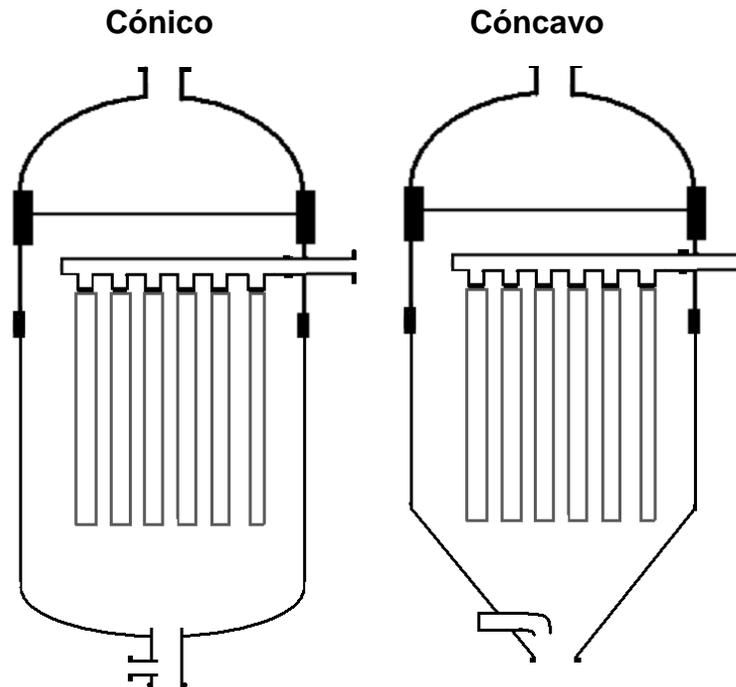
El contenedor o la vasija es el que recubre la unidad de filtración y contiene en su interior los cartuchos y el fluido a filtrar a alta o baja presión.

Hay dos tipos de contenedores:

- Contenedor con base cónica para la filtración con retorta y un encerramiento pulido.
- Contenedor de base cóncava para lechadas espesas.

En la figura 4 se presenta el esquema de los tipos de contenedores, diferenciados por su tipo base.

Figura 4. Tipos de contenedores

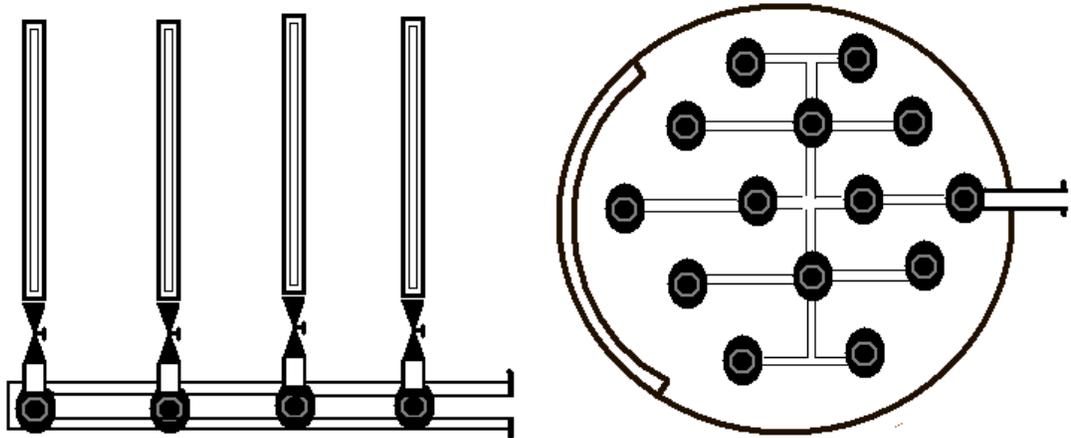


Al colocar el filtro en un contenedor con base cóncava, éste se situará en la parte inferior del recipiente para permitir la fluidez de la lechada entrante. Ésta ingresa lateralmente y es forzada a atravesar los cartuchos de filtración y las flautas que los sostienen, dichas flautas están interconectadas entre sí, en la parte superior llamada cabezal.

Paralelo a la filtración se forma la retorta, la cual puede presentar una irregularidad en el espesor, que interferirá con la eficiencia de lavado de la misma y reduce la efectividad del volumen de la retorta acumulada sobre el elemento filtrante, teniendo en cuenta que la retorta ayuda a la eficiencia del proceso de filtración con cartucho.

En los contenedores cóncavos, para controlar la velocidad de flujo, se coloca en la parte intermedia una conexión de desbordamiento, la cual puede ser una lámina de acero donde el fluido golpea y disminuye velocidad. En este tipo de contenedor la bomba seleccionada debe de tener una capacidad más alta de la calculada en los balances de materia.

Figura 5. Cabecera horizontal de unidad de filtrado



La figura 5 se presenta el cabezal y las flautas de una unidad típica de filtrado para cartuchos. La salida del fluido de filtrado de los cartuchos está conectada a una cabecera horizontal; cada cabecera permite direccionar el flujo a una válvula unida al conector, por el cual sale el filtrado para los tanques de almacenamiento.

La posición de las cabeceras permite un control individual sobre el flujo de cada fila de cartuchos, por lo que el incremento del caudal se logra gracias a que se puede llegar a hacer un control individual de los cartuchos en algunas unidades. Este control individual se fundamenta en un retrolavado del medio filtrante, el cual disminuye la retorta formada secuencialmente. De esta forma se puede mejorar la operación.

Se puede incorporar un visor en la cabecera permitiendo el monitoreo de la calidad del filtrado. El material desprendido del cartucho puede ser aislado y monitoreado.

Las cabeceras están separadas con insertos especiales para que la distancia entre cartuchos puedan ser modificados y así dar cavidad a la retortas que pueden alcanzar hasta 50mm de espesor en algunos filtros.

1.2.2 Elemento filtrante:

El elemento filtrante es una serie de cartuchos de filtración, de diferentes materiales, con forma cilíndrica con lo cual retiene y da forma a la retorta. Operan a presión por ciclos y pueden ser vistos en procesos donde se manipulan dióxido de titanio, gases de combustión, aclaración de salmueras, lodos de perforación, productos químicos con partículas en suspensión menores a 60 micras y muchas otras aplicaciones.

Figura 6. Filtro de cartucho de polipropileno de 5 micras.



Los filtros de cartuchos presentados en la figura 6, son también usados para retirar la concentración de sólidos por medio de la remoción de partículas suspendidas en la salmuera. Esta manera de operar es posible puesto que los cartuchos pueden operar sobre ciclos de tiempo muy cortos si se tienen ratas de filtración altas, mientras que la retorta sea de diámetro pequeño y permita continuar filtrando a caudales óptimos.

Una de las características de los cartuchos es que se utilizan para altas concentraciones de sólidos de gran tamaño, filtrando baches de hasta 60 micrones en tamaño.

El modelo de filtración impuesto por los cartuchos cilíndricos, se describe como un proceso en el cual a mayor volumen de salmuera filtrada, el diámetro de la retorta aumenta y el caudal de filtrado disminuye.

Los cartuchos manejan muy bien la manipulación de líquidos inflamables o combustibles, tóxicos y materiales corrosivos. Son diseñados para operaciones peligrosas donde se incrementa la presión y se requiere de una operación segura. Igualmente ellos se pueden aplicar a procesos donde los fluidos se encuentran a temperaturas altas o bajas y es necesario conservar la temperatura. La combinación de estas características no es posible en otros tipos de filtrado.

Están disponibles en una gran variedad de dimensiones con longitudes que pueden llegar a tener un área de hasta $200 m^2$ y pueden contener más de 200 elementos filtrantes instalados en un rango de 2.5 a 3.5 m de diámetro del contenedor.

La presión se opera en rangos que van desde 1 a 87 psi de presión, pero la mayoría opera a 80 psi. En la industria petrolera se opera con unidades de 15 y 30 cartuchos, con una longitud de cartucho de 20 y 30 pulgadas.

El elemento filtrante consta de los siguientes componentes:

- Núcleo filtrante
- Medio filtrante.

El núcleo filtrante sirve para el paso del filtrado y para soportar el material que filtra o retiene los sólidos del medio filtrante. El núcleo puede ser un conjunto de perforaciones o una malla de forma cilíndrica. En la mayoría de las aplicaciones se requiere generar un vacío para retirar del núcleo el fluido filtrante alojado en él. Ésto se logra mediante la inserción de un tubo perforado en el centro del núcleo, llamado flauta por el cual se retira totalmente el filtrado. Se realiza una purga de aire desde la parte superior de la unidad hacia la cabecera.

El medio filtrante es el elemento fundamental para la práctica de la filtración y su elección es habitualmente la consideración más importante para garantizar el funcionamiento del proceso.

En general, entre los principales criterios de selección del material de medio filtrante se pueden destacar:

- Compatibilidad y resistencia química con la mezcla
- Permeabilidad al fluido y resistencia a las presiones de filtración
- Capacidad en la retención de sólidos
- Adaptación al equipo de filtración y mantenimiento
- Relación vida útil y costo

La variedad de tipos de medios porosos utilizados como medios filtrantes es muy diversa, en forma de telas y fibras tejidas, filtros y fibras no tejidas, sólidos porosos o perforados, membranas poliméricas o sólidos particulados.

La selección del medio filtrante es quizás uno de los principales problemas que enfrenta el ingeniero y requiere de experiencia o de un proceso sistemático de ensayo y error.

Los cartuchos filtrantes pueden ser de diferentes clases en función del tipo de filtración que se pretenda conseguir, y así pueden ser:

- Filtros en profundidad: filtración de clarificación y abrillantado de productos. Admiten altas cargas de contaminantes.
- Filtros plisados: filtración de abrillantado de productos y protección de cartuchos de filtración final. Admiten bajas cargas de contaminantes.
- Filtros inorgánicos: filtración en superficie, sólo trabajan por tamizado. Admiten bajas cargas de contaminantes.
- Filtros de membrana: filtración final esterilizante. Poseen guía de validación de sus resultados de filtración. Integridad estable por procedimientos estándar no destructivos correlacionados con retención bacteriana.
- Filtros de cartuchos encordados: filtración de sólidos finos, que abarca diferente rangos de micraje.

Los filtros de cartucho encordado son ampliamente usados como pre- filtros por su gran poder de filtración a un bajo costo. Estos filtros están disponibles con núcleo de acero inoxidable 304 o polietileno, según sea su aplicación; salmueras, agua, fluidos químicos diversos. Los cuales ofrecen una mejor prefiltración asegurando un periodo largo de vida a los filtros.

Disponibles en 10", 20", 30" y 40" con un rango que va de 0.5 micras a 150 micras.

Su fabricación puede ser en:

- Polipropileno
- Algodón
- Fibra de vidrio

1.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN

La selección de filtros de cartucho se recomienda en los siguientes casos:

- Cuando se requiere una superficie mínima para áreas de filtración de gran tamaño.
- Cuando los líquidos son volátiles y no pueden ser sometidos a vacío.
- Cuando hay un riesgo de peligro ambiental a partir de retortas tóxicas, inflamables o volátiles.
- Cuando el filtrado de alta claridad es necesario para aplicaciones de elevado control de sólidos.
- Cuando se requiere manipular salmueras saturadas que requieren temperaturas elevadas en el tanque.
- Cuando la retorta puede estar seca o con un fluido espeso.

Se deben seleccionar con precaución cuando:

- La retorta es densa, pesada y la presión no es suficiente para sostenerlo en el cartucho de filtración.
- Sea necesario crear durante la filtración una retorta con partículas ajenas a la lechada, cuya función será retener partículas finas de la lechada.

Entre las ventajas de los cartuchos de filtración se encuentra:

- Excelente desempeño de la retorta.
- Se adapta fácilmente al engrosamiento de la retorta.
- Superficie mínima.
- Mecánicamente simple.

Las desventajas son:

- Es necesario un gran espacio para el desmantelamiento de los cartuchos cuando son cartuchos de gran tamaño.
- El vaciado del contenedor para lavarlo y secarlo, una vez se ha formado la torta de filtración, requiere un estrecho monitoreo de la presión en el interior del contenedor para asegurarse de que la torta se aferra a los cartuchos.

1.4 MECANISMO DE FILTRACIÓN POR TORTA

La secuencia de operaciones que tienen lugar en una filtración se conoce como ciclo de filtración y son enumeradas en la tabla.

Tabla 1. Secuencia operacional de la filtración

<i>ETAPA</i>	
1.	Formación de la pre-capa.
2.	Recirculación de los fluidos madre de la pre-capa.
3.	Filtración con recirculación del fluido madre.
4.	Filtración.
5.	Ecurrido/ secado de la torta.
6.	Lavado de la torta.
7.	2º escurrido / secado de la torta.
8.	Descarga de la torta.

Según el tipo de filtro y el modo de operación un ciclo podrá contener más o menos operaciones.

En ocasiones se requiere un pre-tratamiento de la suspensión previo a la filtración. Éste pre-tratamiento se realiza añadiendo un coagulante para decantar las partículas solidas.

Si los sólidos de la suspensión son muy finos, forman una torta densa e impermeable y obstruyen enseguida el medio filtrante. Por consiguiente, es necesario añadir ciertos aditivos que aumenten la porosidad de la torta. Estos aditivos reciben el nombre de coadyuvantes de filtración. Se pueden usar como tales la perlita, la tierra de diatomáceas o la celulosa de madera. Estos materiales forman lechos de porosidades muy elevadas, provocan la reducción de la resistencia específica de la torta a la vez que aumentan su espesor y hacen que ésta sea más compresible. Otra posible utilización de éstos es como pre-capas, depositando una pequeña cantidad del coadyuvante sobre el medio filtrante antes de comenzar la filtración.

Normalmente es necesario realizar un lavado de la torta para recuperar el líquido que haya quedado retenido, para ello se utiliza un disolvente miscible con el filtrado (usualmente agua). El lavado tiene lugar en dos etapas: primero el fluido madre es desplazado de la torta filtrante por el líquido de lavado durante el período de lavado por desplazamiento. En esta etapa el efluente consiste básicamente en el filtrado que ha quedado sobre el filtro, sin producirse dilución apreciable. De esta manera puede separarse hasta el 90% del filtrado retenido.

Durante la segunda etapa, denominada lavado por difusión, el disolvente llega a los huecos menos accesibles del filtro y la concentración de filtrado en el efluente es muy baja. También puede darse durante esta etapa la disolución de alguno de los componentes retenidos en la torta.

Hay que señalar además la existencia de filtros retro-lavado. El secado de la torta se suele efectuar por medio de aire caliente o aplicando vacío.

1.5 MANTENIMIENTO

El filtrado con cartucho requiere de un mantenimiento preventivo y regular a los dispositivos de seguridad y de funciones de automatización que acompañan a los filtros modernos.

El espacio por encima del filtro debe tener un dispositivo de elevación y espacio suficiente para sacar a cada cartucho y desplazarlo horizontalmente a un lugar adyacente al tanque de filtro. Se recomienda tener una plataforma especial para sostener los cartuchos durante el mantenimiento. El espacio también debe ser asignado para la tapa la cual puede ser de bisagra o atornillada.

Los principales componentes que requieren atención son:

- El tanque de filtro debe ajustarse al código de recipientes a presión, como el de ASME “Sociedad Americana De Ingenieros Mecánicos”, y ser revisados periódicamente como lo exige la normativa de seguridad.
- El funcionamiento de la válvula de alivio de presión que se encuentra en la parte superior del tanque se deberá comprobar.
- Las abrazaderas que sellan los extremos superiores de la salida del fluido filtrado.
- Los tornillos de las bisagras de la tapa.
- La mirilla que permite monitorear visualmente la claridad del filtrado debe de ser limpiada periódicamente.
- El cerrojo que desactiva la apertura de descarga de las tortas cuando la vasija está todavía bajo presión.
- El sostenimiento de una elevación mayor a la del filtro, para cuando los cartuchos sean retirados verticalmente no golpee la pared del tanque.
- El estado del medio filtrante, ya sea de tela o malla, se debe hacer periódicamente para asegurarse de que no se dañen.
- El orificio de ventilación en la parte superior de la cabeza de la unidad de filtrado debe ser revisado para mantener la evacuación de aire libre.
- La unidad de filtrado no debe ser saturado con la torta ya que esto hace que los cartuchos se deformen por lo que deben ser revisados periódicamente.

1.6 FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de todo filtro se basa en la existencia de una diferencia de presión que obliga a una suspensión a atravesar el medio filtrante. En la superficie del medio filtrante se van a depositar los sólidos presentes formando con su acumulación una torta por la que debe seguir circulando la suspensión a filtrar.

En las centrífugas la fuerza impulsora se aporta como energía cinética. El sólido se ve lanzado hacia la periferia, que se encuentra perforada, en la que se va a depositar comprimiéndose hasta formar una torta. Estos equipos se emplean igualmente para el lavado o el escurrido de sólidos.

Los factores principales que afectan el filtrado son:

- La naturaleza de la suspensión
- La fuerza impulsora aplicada
- La resistencia de la torta a la filtración
- La temperatura de la suspensión
- El tamaño de las partículas
- La concentración de sólidos en suspensión
- El efecto de la utilización de floculantes y de la agitación
- La naturaleza del medio filtrante

El medio filtrante debe ser resistente mecánicamente y a la acción corrosiva del fluido, mostrar poca resistencia al flujo del filtrado, así como permitir que la torta se desprenda fácilmente.

1.7 EFECTOS PRÁCTICOS DE LAS VARIABLES DE FILTRACIÓN

El efecto de cada una de las variables incluidas en las ecuaciones resueltas de filtración se puede constatar en la mayoría de los casos prácticos y de las aplicaciones, siendo su conocimiento y control de importancia particular para los procesos industriales.

1.7.1 Presión

En la mayoría de los casos, la compresibilidad de la torta de filtración se encuentra entre valores de 0,1 y 0,8 de manera que la mayor parte del aumento de la pérdida de carga del fluido es consecuencia del medio filtrante. En general, si el aumento de presión conlleva un aumento significativo del caudal o velocidad de filtración, es un indicio de la formación de una torta granulada. En cambio, para las tortas espesas o muy finas, un aumento de la presión de bombeo no resulta en un aumento significativo del caudal de filtrado. En otro caso, la torta se caracteriza por una presión crítica por encima de la cual, la velocidad de filtración incluso

disminuye. En la práctica, se prefiere operar a un velocidad constante, empezando a baja presión, aunque por el empleo generalizado de sistemas de bombeo centrífugos, las condiciones habituales son de presión y caudal variables.

1.7.2 Torta de filtración

La teoría señala que, considerando aparte las características del medio filtrante, el caudal promedio es inversamente proporcional a la cantidad de la torta y directamente proporcional al cuadrado del área filtrante. Como resultado de estas dos variables conjuntas, para una misma cantidad de fluido a filtrar se observará que su caudal es inversamente proporcional al cuadrado del espesor de la torta al final del proceso. Esta observación conlleva que la máxima productividad se alcanza teóricamente con aquellas tortas de espesor muy fino cuya resistencia supera a la del medio mismo filtrante. Sin embargo, otros factores como el tiempo para regenerar la torta, su dificultad de descarga y el costo de una superficie filtrante más amplia explica que en la práctica se prefiera trabajar en condiciones de tortas espesas.

1.7.3 Viscosidad y temperatura

El efecto de la viscosidad es como lo indican las ecuaciones de velocidad; la velocidad de flujo de filtrado en cualquier instante es inversamente proporcional a viscosidad de filtrado.

El efecto de la temperatura sobre la velocidad de filtración de sólidos incompresibles es evidente, sobre todo, mediante su efecto sobre la viscosidad.

1.7.4 Tamaño de partículas y concentración

El efecto del tamaño de las partículas sobre la resistencia de la torta y el medio filtrante es muy notable. Afectan al coeficiente en la ecuación para la resistencia de la torta, y los cambios mayores afectan la compresibilidad. Diagrama de partículas visibles e invisibles

1.8 PARÁMETROS QUE AFECTAN EL RENDIMIENTO DEL FILTRO

El rendimiento del filtro es afectado por dos parámetros caudales bajos y baja cantidad de sólidos retenidos, ambas variables dependientes del medio filtrante. El caudal disminuye con la saturación del medio filtrante y su eficiencia aumenta.

La eficiencia de un filtro se calcula con la relación:

$$\beta_x = \frac{Nu}{Nd}$$

Dónde:

- β_x es la proporción beta de las partículas mayores a x mm de diámetro.
- Nu es el número de partículas de más de x mm de diámetro por unidad de volumen aguas arriba.
- Nd es el número de partículas de más de x mm de diámetro por unidad de volumen aguas abajo. Ambas variables son medidas en muestra tomadas al mismo tiempo.

Entre mayor sea la relación beta, la eficiencia será mayor. La eficiencia para un tamaño de partícula dado (E_x) pueden obtenerse directamente de la relación de beta por la siguiente ecuación:

$$E_x = \frac{(\beta_x - 1)}{x}$$

1.9 CÁLCULOS DEL PROCESO DE FILTRACIÓN

Las ecuaciones de filtración no predicen el comportamiento del proceso de manera exacta, ocasionado por la complejidad del proceso de filtración, el cual provoca limitaciones y falencias en los resultados obtenidos, debido a las características de la mezcla a tratar de partículas sólidas y fluido, por su complejidad e interacción pueden ser muy variables en los diferentes casos reales. Sin embargo pueden ser usadas para interpretar resultados a escala de laboratorio.

El principio teórico de la filtración se fundamenta en la cuantificación de la relación básica de velocidad de un fluido o caudal:

$$velocidad = \frac{F}{R}$$

Donde la fuerza impulsora (F) que puede ser la fuerza de gravedad, el empuje de una bomba de presión o de succión, o la fuerza centrífuga.

La resistencia (R) es la resistencia global, la cual es la suma de las resistencias ofrecidas por el medio filtrante y la torta de sólido formada sobre el mismo. La resistencia de la torta es cero al iniciar la filtración, a causa de la deposición continua de sólidos sobre el medio filtrante. Esta resistencia aumenta continuamente con el tiempo de filtración.

Hay que tener en cuenta que en un filtro bien diseñado las resistencias de las conexiones de entrada y salida son pequeñas y pueden despreciarse en comparación con la resistencia de la torta y del medio filtrante.

Por tanto en la filtración por torta los factores más importantes de los que depende la velocidad de filtración son:

- La caída de presión desde la alimentación hasta el lado más lejano del medio filtrante
- El área de la superficie filtrante
- La viscosidad del filtrado
- La resistencia de la torta
- La resistencia del medio filtrante y de las capas iniciales de la torta

La velocidad del fluido se ve condicionada por el hecho de que tiene que atravesar un medio irregular constituido por los canales pequeños formados en los intersticios de la torta y el medio filtrante.

Para calcular la resistencia a la filtración de la torta, suponiendo ésta incompresible, se tiene la siguiente expresión:

$$\gamma_c = \frac{5(1 - \varepsilon)\alpha^{-2}}{\varepsilon^3}$$

Se observa que la resistencia de la torta depende de la porosidad y la superficie específica ε y α , respectivamente.

Y si se desea se puede expresar como resistencia específica (en m/kg):

$$\alpha = \frac{\gamma_c}{\delta_p(1-\epsilon)}$$

Dónde: δ_p es la densidad de la partícula.

El gradiente de presión por unidad de altura de torta formada, L, se expresa a través de la ecuación de Carman-Kozeny:

$$\frac{(-\Delta p)}{L} = \gamma_c \mu U$$

Siendo U la velocidad superficial de filtrado en un tiempo t:

$$U = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt}$$

Y donde V es el volumen de filtrado recogido para un tiempo t.

A medida que transcurre la filtración se van acumulando las partículas que forman un determinado volumen de torta, que se puede determinar por medio del parámetro:

$$\theta = \frac{LA}{V}$$

Este parámetro representa el volumen de torta formado en el paso de una unidad de filtrado.

Sustituyendo en la ecuación del gradiente se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2(-\Delta P)}{\gamma_c \mu \theta V}$$

Donde quedan relacionados el volumen de filtrado, V, con la altura de torta, L.

Si se incluye la resistencia del medio filtrante, ésta se suele expresar como una altura de torta equivalente:

$$L_{eq} = \frac{\theta V_{eq}}{A}$$

Este volumen equivalente, V_{eq} , es el volumen de filtrado necesario para crear una altura de torta L_{eq} y depende únicamente de las propiedades de la suspensión y del medio filtrante.

Si se combinan las dos resistencias señaladas se tiene una ecuación general a partir de la cual se obtienen las ecuaciones de diseño para los distintos tipos de filtración:

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{(-\Delta P)A}{\gamma_c \mu (V + V_{eq})\theta}$$

Es posible espesarla adaptando la formula fluido dinámica de la ley de Hagen-Poiseuille:

$$\frac{dV}{Ad\theta} = \frac{P}{\mu \left[\alpha \frac{W}{A} + r \right]}$$

Donde la velocidad diferencial o instantánea, es decir, el volumen (V) filtrado por tiempo (θ) y por unidad de superficie (A), se relaciona con la fuerza impulsora o caída total de presión (P) sobre el producto de la viscosidad del filtrado (μ) por la suma de la resistencia de la torta y la del medio de filtración (r). La resistencia de la torta se expresa por la relación entre el peso (W) y el área en función de una constante (α) promedio característica de cada torta

1.9.1 Limitaciones y conclusiones del modelo

A parte de la premisa previa por la que el modelo de la ecuación general de filtración solo es aplicable en el caso de fluidos líquidos a los que se pueda aplicar la ley de Hagen-Poiseuille, los resultados experimentales han demostrado que el modelo solo es aplicable en el caso de medios filtrantes que forman torta, sin que pueda emplearse para la modelización de aquellos casos de filtración donde no se forma torta como en el caso de las aplicaciones de fluidos de baja concentración de sólidos y con medios filtrantes muy porosos, donde las partículas son retenidas en el interior de los canales.

1.10 FLUIDOS DE COMPLETAMIENTO

Son también llamados fluidos de terminación o reparación, se define como cualquier fluido que entre en contacto con la formación productora durante la etapa de completamiento.

Hay muchas razones por las que se llevan a cabo la reparación y la terminación/re-terminación. Entre ellas son la reparación de un yacimiento en producción, la terminación de un nuevo yacimiento, la terminación de múltiples yacimientos, el estímulo a los yacimientos existentes para que aumenten su producción, o la reparación de los problemas mecánicos que impidan la producción. Cada una de estas cinco razones integra diferentes principios básicos. Cada uno requiere el control de la presión mientras se lleva a cabo el trabajo.

Los fluidos de completamiento se diferencian de los lodos de perforación, en que mitigan el daño a la formación y no causan taponamiento de los poros aledaños al pozo.

Las funciones de mayor relevancia de los fluidos de completamiento se encuentra: el control de las presiones en las formaciones, la eliminación de sólidos y en especial la mitigación de los daños de formación.

Para la selección del fluido de completamiento se tienen en cuenta: el peso del fluido, la viscosidad, las características de la invasión, la corrosión, la compactibilidad de los aparejos y los aspectos económicos.

El peso del lodo debe ser seleccionado según los requerimientos de presión del pozo, con un rango no mayor a 100 o 200 psi buscando siempre sea equilibrado. Al ser equilibrado la invasión será menor, el fluido no debe ocasionar problemas con las arcillas, sus sólidos suspendidos deben de ser de diámetro menor al de la mitad del diámetro de los poros de la formación.

La viscosidad debe ser suficiente para transportar los cortes y las arenas a superficie sin causar daño a la permeabilidad del pozo por uso excesivo de viscosificantes.

Al seleccionar un fluido de completamiento no debe ser corrosivo y si lo es, debe ser compatible con los tratamientos aplicados al pozo, las bombas, los tanques etc.

1.10.1 Clasificación de los fluidos de completamiento

Los fluidos de reparación o de completamiento se agrupan en tres grandes grupos:

- Los gases tales como el nitrógeno y dióxido de carbono.
- Los base aceite.
- Los base agua.

1.10.1.1 Fluidos base agua

Los fluidos base agua se clasifican en tres categorías: lodos modificados para la perforación, aguas salobres y fluidos especialmente diseñados.

- *Los Lodos Modificados para la Perforación*

El lodo de perforación es acondicionado, controlando la viscosidad, el peso y la pérdida de fluido. Es el más económico, su desventaja radica en que una leve pérdida causara graves daños al pozo.

- *Las aguas salobres*

Las agua salobres o salmueras son una mezcla de agua y sal, la sal mas comúnmente utilizada es la de cloruro de potasio (KCl).

Se caracterizan por no tener sólidos en su formulación, el agua puede aportar sólidos a la salmuera lo que hace indispensable la filtración de las mismas,

implementado la filtración con cartuchos de filtración. La baja presencia de sólidos la hacen ideal para mantener la permeabilidad del pozo y no taponar los poros.

La selección de la salmuera depende de la necesidad de peso para controlar presión en el pozo, es por ende que se encuentre gran variedad de salmueras entre las que se encuentran:

Tabla 2. Tipos de salmueras

<i>Sistema</i>	<i>Densidad g/cm³</i>
Agua dulce filtrada	1.00
Cloruro de potasio	1.16
Cloruro de sodio	1.19
Cloruro de calcio	1.39
Bromuro de sodio	1.52
Bromuro de calcio	1.70
Cloruro de calcio/bromuro de calcio	1.81
Bromuro de calcio/bromuro de zinc	2.42
Bromuro de zinc	2.50

Los problemas principales inherentes en el agua salobre son el costo, el control de la pérdida de la salmuera, su baja capacidad de eliminar sólidos y la cristalización de la sal. Mientras mayor el peso, más rápidamente asciende el costo de la salmuera. Además, conforme que ascienda el peso, se presentan problemas como una mayor corrosión y la temperatura de la cristalización.

- *Fluidos especialmente diseñados*

Los fluidos de especialidad con base agua han sido diseñados para crear las características necesarias de un buen fluido de terminación. Se utilizan polímeros orgánicos para el control de la viscosidad, pero estos solo surten efecto hasta una temperatura de unos 300°F. Es posible alcanzar 16.0 lbs/galón con los sólidos y mantener una excelente permeabilidad si los sólidos de la formación son tratados con ácido. Las pruebas de los núcleos han demostrado que se conserva el 100%

de la permeabilidad original cuando se utilicen estos fluidos. El costo es menos que de las salmueras en la gama entre 11 y 16 lbs/galón.

Las técnicas modernas permiten una viscosidad razonable con peso elevado, un buen control de la pérdida de los fluidos y la mitigación de la hinchazón de la arcilla por la añadidura de KCl (cloruro de potasio).

1.10.1.2 Fluidos base aceite

Se clasifican en dos tipos de sistemas de aceite: las emulsiones de aceite verdadero y las emulsiones invertidas del petróleo.

- *Los sistemas de aceite verdadero*

Al igual que el petróleo crudo, ofrecen algunas grandes ventajas si el peso del fluido es suficiente para soportar las presiones de la formación. El petróleo ofrece buenas características de control de la corrosión, y si es bajo el contenido de los asfálticos y las parafinas, no causa daños en la formación.

Al igual que cualquier fluido para terminación, estos deben ser revisados para determinar el contenido de sólidos, el cual pudiera impedir la permeabilidad de la formación, y deben ser filtrados según el caso.

- *Las emulsiones invertidas del petróleo*

Son eficaces con las arcillas sensibles, ya que las características de la invasión son muy bajas, y el tipo de filtrado (petróleo) no las hace hincharse. Su estabilidad a temperaturas altas (de hasta 500°F) y por su amplia gama de densidades (desde 8.0 lbs./galón hasta 20.0 lbs./galón), las emulsiones invertidas del petróleo son fluidos muy buenos para estas aplicaciones. Sin embargo, por su costo elevado solo son útiles cuando las arcillas con las que trabaje sean muy sensibles, o si el costo puede ser justificado por alguna otra razón.

1.10.1.3 Gases

El nitrógeno y el CO₂ son dos gases de uso común en las operaciones de reparación y de terminación.

Por sus deseables características físicas, el nitrógeno tiene muchas aplicaciones en las operaciones de reparación. Es inerte, lo cual significa que no reaccionará químicamente con ninguna otra sustancia. No dañará las secciones de goma de las herramientas, ni causará daños químicos en las formaciones. No es combustible. El nitrógeno es incoloro, inodoro y tiene bajo punto de ebullición (-320°F). Las siguientes son algunas aplicaciones típicas del nitrógeno en la terminación y reparación de los pozos:

- El transporte de los dispositivos de apoyo de las fracturas
- El lavado de la arena
- La perforación en seco,
- Las pruebas del vástago de perforación

2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE FILTROS

Se fabricaron cartuchos de filtración del tipo encordado con dos materiales diferentes, los cartuchos fabricados se desarrollaron con las especificaciones necesarias para ser aplicados a unidades de filtración estándar de la industria petrolera.

El proceso de encordado fue realizado por una Máquina Encordadora la cual enrolla el hilo en el núcleo filtrante.

El diseño de los filtros consistió en variar la tensión y el desplazamiento del hilo al ser encordado, ambos parámetros manejables con la máquina diseñada para encordar. El desplazamiento del hilo se variaba con el aumento o disminución de la velocidad del eje de distribución.

En la etapa de desarrollo, las variables de diseño manipuladas permitieron generar diferentes tipos de prototipo, de los cuales se seleccionó el que tuviera mayor resistencia de encordado, lo cual permitiría que sus hilos no se desacoplara del filtro, para que resistiera las presiones manejadas por las unidades de filtrado.

2.1 MATERIALES

Los cartuchos desarrollados en esta investigación, fueron fabricados a partir de algodón y fique como medio filtrante.

El algodón es un material de muy buena absorbencia, con un buen comportamiento a la presencia de los solventes orgánicos utilizados en los fluidos de completamiento. Su pH operacional concuerda con el de las salmueras y abarca rangos de temperatura elevados, suficiente para ser utilizado como medio filtrante.

La presentación de estos materiales utilizado fue hilo. En el algodón un hilo de nombre comercial pabilo de 1.92 mm de diámetro y que se caracteriza por poseer las siguientes características:

Cuadro 1. Propiedades del algodón

<i>Propiedades físicas de la fibra</i>		<i>Características</i>
Nombre comercial		Algodón
Peso específico (gr/ cm ³)		1.52
Resistencia específica	Seco	3.5
	Húmedo	4.0
Temperatura de operación constante °C		95
Temperatura de pico con tiempo no superior a dos horas °C		120
Resistencia a la abrasión		Buena
Absorbencia (%)		7-11
Recuperación elástica (%)		75
Elongación (%)	Seco	3
	Húmedo	3
Resistencia a la luz solar		Buena
pH de operación normal		7-11
Efectos de los solventes orgánicos		Resistente

Entre otras propiedades del algodón se puede afirmar que su módulo de elasticidad es de 4,98 a 10,92 (GPa), resistencia tracción 264-654 (MPa) y alargamiento a rotura es de 3,0-7,0(%).

El fique fue utilizado en un diámetro de 0.92mm, se caracteriza por tener una composición química de: cenizas: 1.58 %, fibras: 1.58 %, pentosas: 17.65 %, lignina: 15.47 % Celulosa: 62.70 %.

El fique es un material de color habano, con un brillo opaco y una textura dura. Tiene resistencia ante los álcalis y disolventes orgánicos, ante los ácidos tienen mal efecto y su reacción ante los oxidantes es variable.

Los hilos de fique utilizados en esta investigación, son de una estructura de un cabo, biodegradable, con una densidad lineal de 210 *m/Kg* con resistencia mínima a la tensión de 59 *Kgf*, su elongación máxima a la tensión es del 7%, con buen comportamiento a altas temperaturas por sus propiedades térmicas.

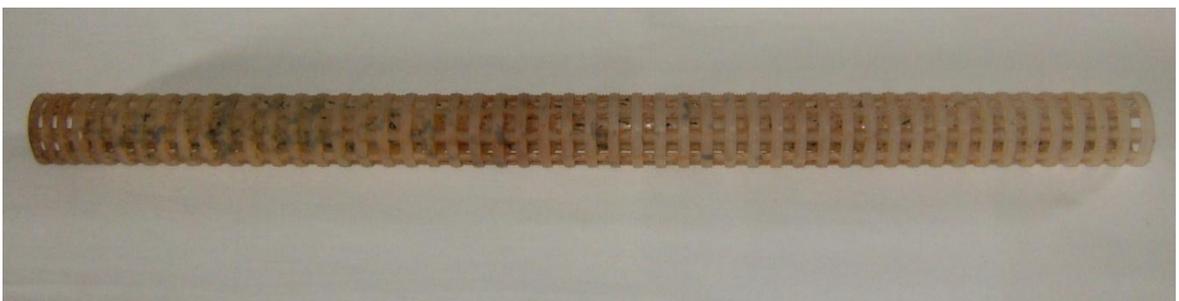
Tabla 3. Propiedades mecánicas de la fibra de fique

<i>Propiedad</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Resistencia a la Tensión (MPa)	305,15	200,00	625,20
Módulo de Elasticidad (GPa)	7,52	5,50	25,50
Porcentaje de elongación a la fractura (%)	4,96	3,20	5,70

Como soporte del medio filtrante se empleó poli-cloruro de vinilo PVC de un diámetro exterior de 3.3 mm y un diámetro interior 2.8 mm Con perforaciones de 0.598 mm 0.534 separadas a 0.6 mm en intercalado 0.5 mm. El área del soporte es de 525 cm^2 y el área efectiva es de flujo es de 127.7 cm^2 equivalente a 24 % del área del núcleo filtrante.

El núcleo filtrante fue reciclado de cartuchos de filtración utilizados en la industria petrolera.

Figura 7. Núcleo filtrante reciclado



2.2 EQUIPO DE FABRICACIÓN

Para la fabricación de los cartuchos encordados, se diseñó y fabricó una máquina capaz de encordar el material en el diámetro y longitud estandarizados por los equipos de filtración. En la figura 8 se presenta la fotografía de la maquina encordadora.

La potencia es suministrada por un motor eléctrico que transforma la energía eléctrica en energía mecánica, el cual tiene acoplado una polea trapezoidal verticalmente, encargada en transmitir un movimiento giratorio. La revoluciones del motor son de 1750 rpm.

Figura 8. Maquina encordadora



El acople de la primer polea se puede observar en la figura 9, dichos acoples permiten disminuir las revoluciones en 80.8%, ocasionado por un diámetro uno de polea de 2 centímetros y el segundo de 10,4 centímetros.

Figura 9. Sistema de polea acoplado al motor



En la figura 9 se observa el eje de distribución, el cual transmite el movimiento al eje sin fin o tornillo de repartición y porta cartucho de filtración, que a su vez genera el movimiento de enrollado del cartucho.

En el eje de distribución, el sistema de polea vertical, cuenta con un diámetro de 13,3 centímetros y 5.8 centímetro, transmitiendo el movimiento al tornillo de repartición, aumentando las revoluciones en 229 %.

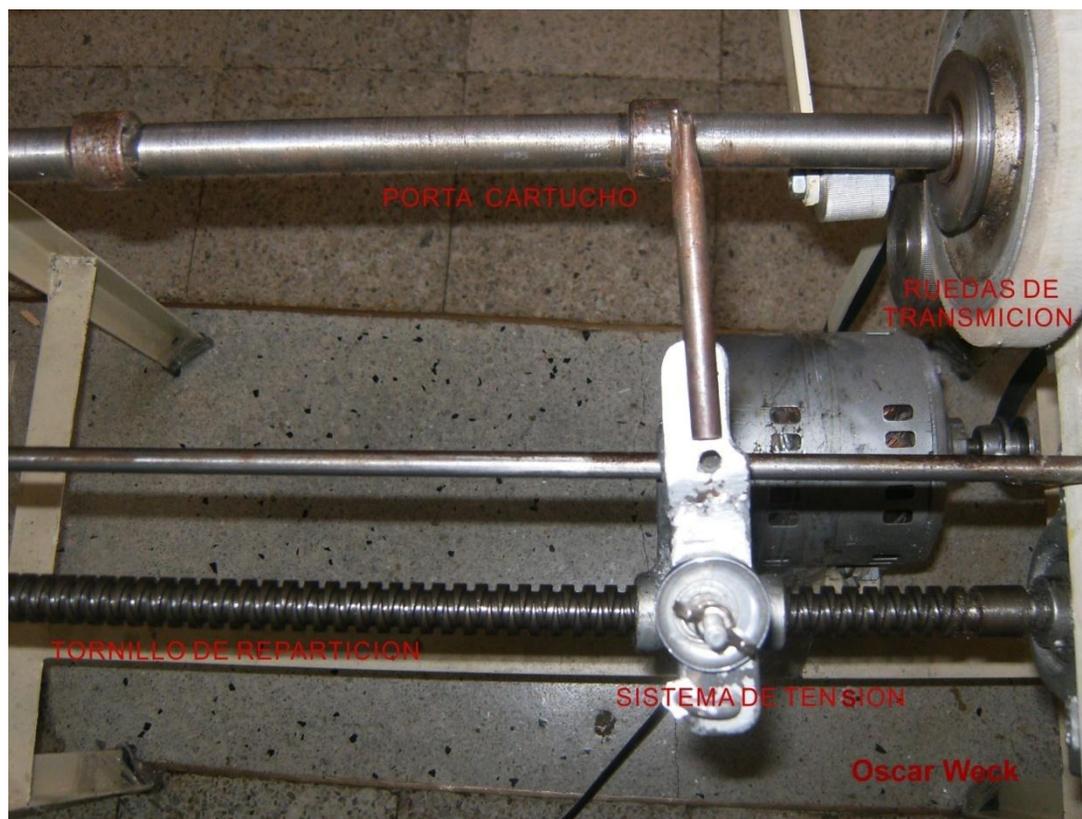
Figura 10. Polea vertical de repartición



El tornillo sin fin o de repartición se puede apreciar en la figura 11y es el encargado en transmitir el movimiento del hilo de derecha a izquierda, permitiendo la distribución del hilo homogéneamente en el cartucho. El tornillo es un eje de dos centímetros de diámetro y cincuenta y ocho de longitud, acoplado en cada vértice a un sistema de rodamiento y a la polea horizontal.

El eje cuenta con dos roscas una izquierda y otra derecha distribuidas en caras opuestas del eje, sobre el eje un dado que permite transportar el hilo y cambiarlo de dirección una vez alcanza el tope de la rosca.

Figura 11. Tornillo sin repartición



Al eje de distribución, se encuentra conectada una rueda de 5,9 centímetros de diámetro, la cual hace un sistema de rueda solidaria con otra rueda de 14 centímetros de diámetro, permitiendo disminuir las rpm en un 57.9 %.

La figura 11 se encuentra el sistema de tensión del hilo del equipo el cual genera la tensión mediante fricción de dos pequeñas placas circulares con el hilo. Además cuenta con un sistema de encendido y apagado.

2.3 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE CARTUCHOS ENCORDADOS

La fabricación de los cartuchos se realizó en un equipo diferente al utilizado por los filtros industriales, diferencia transmitida al encordado y al paso o distancia entre cuerda para un giro, es de resaltar que dicho paso se desarrolló mediante el

proceso de experimentación buscando una geometría única y resistente a las presiones manejadas que permitiera excelentes caudales de filtración.

El encordado fue realizado con una maquina diseñada especialmente para tal fin, encordando fique y algodón ambos con forma de hilo. Los cartuchos tienen una longitud de 50.8 cm, con un diámetro interno de 2.8 cm y externo de 5.9 cm.

Fueron fabricados enrollando el hilo sobre el núcleo del filtro o de forma encordada con una distancia entre cada giro de 4.5 cm de distancia que presentó los mejores resultados de encordado en la fabricación. Se desplaza el hilo de derecha a izquierda y una vez que el total de la longitud del desplazamiento, se devuelve en dirección contraria con la misma velocidad, completando un ciclo del encordado. Este procedimiento se repite hasta alcanzar el diámetro especificado.

Durante la fabricación se aplica una tensión para mejorar el encordado del hilo, dicha tensión es generada por la fricción de dos platinas con el hilo una en la parte superior y la otra en la inferior. Las platinas son de forma circular y aplanada horizontalmente permitiendo que el hilo se ubique en el intermedio.

El cuadro 2 presenta la tensión que se aplicó a cada tipo de cartucho fabricado para las diferentes pruebas.

Cuadro 2. Tensión de fabricación cartuchos encordados

<i>Prueba</i>		<i>Tensión de fabricación Cartuchos Lbf</i>
Algodón	1	0.4
	2	0.5
	3	0.6
fique	1	0.4
	2	0.5

3. PRUEBA DE FILTRACIÓN

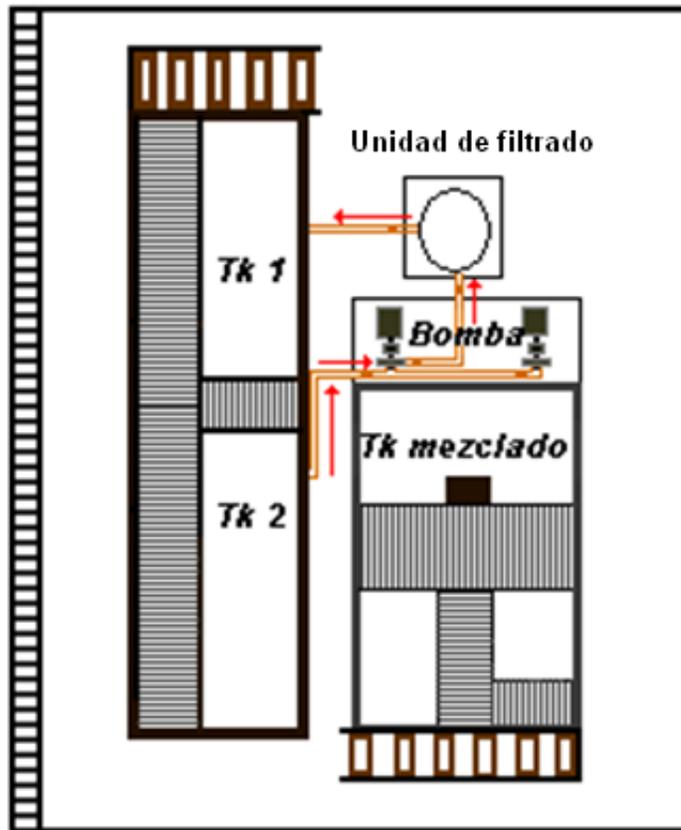
Las pruebas se desarrollaron en el laboratorio de la compañía BRINADD DE LOS ANDES S.A con sede Neiva, permitiendo obtener datos reales y comparables con los obtenidos con filtros industriales.

Los equipos utilizados para las pruebas se relacionan a continuación.

3.1 EQUIPOS

En el desarrollo de las pruebas se utilizaron diferentes equipos; en la figura 12 se presenta el diagrama del laboratorio.

Figura 12. Esquema laboratorio BRINADD DE LOS ANDES S.A



Durante el desarrollo de las pruebas se manejaron los siguientes equipos.

- Unidad de filtrado
- Bombas
- Tanques de almacenamiento.
- Tanques de mezclado
- Espectrómetro HACH 2800.

3.1.1 Unidad de filtrado

La filtración se desarrolló en una unidad de filtrado con capacidad para quince cartuchos de 20 pulgadas de longitud, cuenta con una entrada y salida de 4 pulgadas. La entrada esta ubicada en la parte intermedia del contenedor y la salida en la parte inferior de la unidad de filtrado, cada una de ellas cuenta con una válvula oblea o “wafer” y un manómetro.

La capacidad maneja presiones mayores a 100 psi. La tapa es atornillada con 12 pernos asegurados con tuercas, en el intermedio de la unidad y la tapa se situó un empaque encargado de dar cierre hermético.

La unidad cuenta con doce flautas introducidas en el cabezal que direcciona el filtrado a la válvula de salida, en ellos se introducen los cartuchos. El contenedor es de 42 cm de diámetro con una lámina enfrentada a la dirección del fluido entrante, para evitar que la presión del fluido deteriore los cartuchos de filtración.

Figura 13. Unidad de filtrado



Figura 14. Interior unidad de filtrado



3.1.2 Bombas

La bomba utilizada para enviar el fluido e imprimir presión a la unidad de filtrado es una bomba centrífuga de caracol, Hidromac modelo HZ 4X5X11A RBR, con capacidad de 25 a 3000 GPM, temperatura de trabajo hasta 104°C.

El impulsor de la bomba es conectado a un motor EITA 25E2D, modelo EK88 de 1760 revoluciones por minuto y 25 HP.

Figura 15. Motor y bomba centrífuga de caracol



3.1.3 Tanques de almacenamiento

El tanque de almacenamiento es de forma rectangular, de 2.4m de alto por 11.08m de largo y 2.38m de ancho; se encuentra dividido en dos partes iguales cada una con una capacidad de 210 barriles. Cuenta con dos tuberías de direccionamiento del fluido una ubicada en la parte inferior del tanque y la segunda en la parte superior, ambas con un diámetro de 4 pulgadas.

Figura 16. Tanques de almacenamiento



3.1.4 Tanques de mezclado

El tanque de mezclado tiene capacidad de 73 barriles; en el centro del tanque se encuentra ubicado el agitador impulsado por un motor de 25 HP y una tolva en la parte superior del tanque.

Figura 17. Tanques de mezclado



3.1.5 Espectrómetro

Espectrómetro Hach DR 2800, basado en la proyección y medición de luz monocromática, encargado de medir sólidos suspendidos totales (SST).

Figura 18. Espectrómetro Hach DR 2800



3.2 PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS

La prueba de filtración se realizó con una unidad de quince cartuchos, a temperatura ambiente, en promedio 28 °C. El tipo de salmuera de las pruebas es de cloruro de sodio y formiato de sodio, con densidad de 11 *Lb/gal*.

Se prepara la salmuera con cloruro de sodio hasta 9 *Lb/gal* de densidad, se adiciona formiato de sodio hasta alcanzar una densidad de 11 *Lb/gal*.

Con cloruro de sodio se pueden alcanzar densidades de hasta 10 *Lb/gal*, y formiato de 11.2 *Lb/gal*. El formiato es más costoso que el cloruro de sodio razón por la cual no se prepara un 100% de la salmuera con formiato de sodio, se mezclan las dos sustancias mencionadas para disminuir costos y alcanzar densidades de 11 *Lb/gal*, las cuales se logran por la mayor solubilidad del formiato de sodio.

La tabla 4 especifica los volúmenes de salmuera preparada para las pruebas, los gastos de agua y sal hasta alcanzar el volumen especificado en la segunda columna. La tabla presenta el gasto de cloruro de sodio para alcanzar una densidad de 9 *Lb/gal* y la masa de formiato de sodio que se adiciono posteriormente para alcanzar una densidad de 11 *Lb/gal* y el volumen especificado de salmuera.

Tabla 4. Composición de la salmuera

Prueba	Volumen salmuera <i>Bbls</i>	Volume n agua <i>Bbls</i>	NaCl <i>Kg</i>	Volumen Salmuera NaCl <i>Bbls</i>	HCOONa <i>Kg</i>	Volumen HCOONa <i>Bbls</i>
1 algodón + 1 fique	300	242.3	4852.3	255	17180.3	45
2 algodón + 2 fique	300	242.3	4852.3	255	17180.3	45
3 algodón	250	201.9	4043.2	212.5	14316.9	37.5

El proceso de filtración inicia con el acople de la tubería de succión del tanque dos a la bomba y de la bomba a la unidad de filtrado, de donde se direcciona la salmuera filtrada al tanque de almacenamiento dos.

Se activa el interruptor de encendido de la bomba, se abre válvula del conducto de succión del tanque de almacenamiento y las válvulas de los conductos de entrada y salida de la unidad de filtrado.

La salmuera es mezclada y succionada del tanque uno de almacenamiento, inyectada a presión a la unidad de filtrado, de donde el fluido es enviado al tanque dos de almacenamiento.

Se realizaron cinco pruebas, dos para el fique y tres para el algodón. Las pruebas uno y dos se desarrollaron en un periodo de tiempo de 30 minutos, tomando cada 5 minutos muestras y registro de las variables, la prueba tres se muestreó y registró variables durante 60 minutos cada 10 minutos.

Las muestras fueron tomadas para su posterior análisis de sólidos suspendidos totales (SST) y al mismo tiempo se registró: presión y volumen, variables que permitieron determinar caudal y variación de volumen filtrado para los periodos de tiempo especificados anteriormente.

4 RESULTADOS

Una vez desarrolladas las pruebas se obtuvieron los resultados que se presentan en las tablas y cuadros de este capítulo.

Se desarrollaron cinco pruebas dos para el fique y tres para el algodón, la tercera prueba, se desarrolló con los cartuchos de algodón por presentar los mejores resultados de retención de sólidos y para analizar el comportamiento de los mismos para un periodo más extenso de filtrado.

Para facilitar el análisis e interpretación de los sólidos retenidos por los filtros, la relación de sólidos retenidos se expresa en porcentaje, lo cual permite comparar la capacidad de retención de sólidos de los filtros.

Los sólidos suspendidos promedios a la entrada de la unidad de filtrado para cada prueba se registra en el cuadro 3. Las pruebas uno, dos y tres se desarrollaron con diferentes concentraciones de sólidos.

Cuadro 3. SST de la salmuera de entrada a la unidad de filtrado.

<i>Prueba</i>		<i>SST promedio Entrada ppm</i>
<i>Algodón</i>	1	218
	2	249
	3	228
<i>Fique</i>	1	218
	2	249

Tabla 5. Prueba uno cartuchos encordados de algodón

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Volumen Bbls</i>	ΔV <i>Bbls</i>	<i>Caudal Bbls min</i>	<i>Presión psi</i>	<i>Sólidos ppm</i>	<i>% Sólidos Retenidos</i>
5	25	25	5	35	141	35,321
10	48	23	4,6	46	138	36,697
15	69	21	4,2	53	125	42,661
20	88	19	3,8	58	121	44,495
25	106	18	3,6	61	118	45,872
30	123	17	3,4	64	115	47,2

Tabla 6. Prueba uno cartuchos encordados de fique

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Volumen Bbls</i>	ΔV <i>Bbls</i>	<i>Caudal Bbls min</i>	<i>Presión psi</i>	<i>Sólidos ppm</i>	<i>% Sólidos Retenidos</i>
5	26	26	5,2	15	208	4,587
10	50	24	4,8	20	205	5,963
15	73	23	4,6	22	193	11,468
20	96	23	4,6	23	193	11,468
25	119	23	4,6	25	192	11,927
30	141	22	4,4	25	190	12,844

Tabla 7. Prueba dos cartuchos encordados de algodón

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Volumen Bbls</i>	ΔV <i>Bbls</i>	<i>Caudal Bbls min</i>	<i>Presión psi</i>	<i>Sólidos ppm</i>	<i>% Sólidos Retenidos</i>
5	24	24	4,8	38	142	43,0
10	46	22	4,4	47	129	48,2
15	66	20	4	56	122	51,0
20	85	19	3,8	60	119	52,2
25	102	17	3,4	65	118	52,6
30	118	16	3,2	68	116	53,4

Tabla 8. Prueba dos cartuchos encordados de fique

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Volumen Bbls</i>	ΔV <i>Bbls</i>	<i>Caudal Bbls min</i>	<i>Presión psi</i>	<i>Sólidos ppm</i>	<i>% Sólidos Retenidos</i>
5	25	25	5,00	18	230	7,631
10	49	24	4,80	22	219	12,048
15	72	23	4,60	24	207	16,867
20	95	23	4,60	25	205	17,671
25	117	22	4,40	27	203	18,474
30	138	21	4,20	27	201	19,277

Tabla 9. Prueba tres cartuchos encordados de algodón

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Volumen Bbls</i>	<i>ΔV Bbls</i>	<i>Caudal Bbls</i> <i>min</i>	<i>Presión psi</i>	<i>Sólidos ppm</i>	<i>% Sólidos Retenidos</i>
10	47	47	4,7	48	123	48,2
20	82	35	3,5	63	111	53,7
30	114	32	3,2	70	104	56,9
40	144	30	3	72	99	59,2
50	171	27	2,7	75	87	64,7
60	191	20	2	76	82	67,0

El cuadro 4 registra los valores promedios obtenidos para las diferentes variables de cada prueba.

Cuadro 4. Promedios de la variable por prueba

<i>Prueba</i>		<i>Caudal Bbls/min</i>	<i>sólidos retenidos ppm</i>	<i>Presión psi</i>	<i>% Sólidos promedio por prueba</i>
Algodón	1	126,83	41,82	4,1	41,82
	2	124,50	50,00	3,93	50,00
	3	101,00	58,257	3,18	58,257
fique	1	196,83	9,71	4,7	9,71
	2	210,83	15,33	4,60	15,33

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La discusión de los resultados se enfocará en interpretar y describir el comportamiento de las variables. Las pruebas se discutirán entre filtros de un mismo material, de diferente material y con los resultados que presentan actualmente los filtros industriales encordados.

En las figuras 19 y 20 se presentan dos fotografías tomadas a los cartuchos antes y después del proceso de filtración. En estas imágenes es apreciable el estado de saturación del filtro y su desgaste.

Los filtros utilizados en las pruebas resistieron las presiones de filtración y conservaron el encordado.

Figura 19. Imagen de cartuchos de algodón antes y después de ser usados en la prueba



Figura 20. Imagen de cartuchos de fique antes y después de ser usados en la prueba



5.1 COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES MEDIDAS DURANTE LAS PRUEBAS

En este inciso se presentará las graficas de comportamiento del volumen, el caudal, la presión y el porcentaje de sólidos con el tiempo, para interpretar el comportamiento de los mismos se determinará la línea de tendencia para cada tipo de filtros.

Se establece la ecuación de tendencia de cada variable para extrapolar la variable a tiempos mayores a los registrados por la prueba.

Las líneas de tendencia fueron generadas por el programa Microsoft office Excel 2007 permitiendo obtener la ecuación y el coeficiente de ajuste los cuales se presentan en los cuadros 5 y 6.

Cuadro 5. Ecuación de línea de tendencia y coeficiente de regresión para el algodón

Variable Vs Tiempo	Ecuación línea de tendencia y R^2 para cartuchos de algodón		
	Prueba		
	1	2	3
Volumen	$Y = .00001x^3 - 0.0476x^2 + 5.3754x - 0.6832$ <p style="text-align: center;">0.9999</p>	$Y = 0.001x^3 - 0.0461x^2 + 5.1761x - 0.7322$ <p style="text-align: center;">0.9999</p>	$Y = 4E-7x^4 - 6E-5x^3 - 0.0196x^2 + 4.4475x + 1.445$ <p style="text-align: center;">0.9996</p>
Caudal	$Y = 5.3553e^{-0.016x}$ <p style="text-align: center;">0.9882</p>	$Y = 5.3553e^{-0.016x}$ <p style="text-align: center;">0.9938</p>	$Y = 5.1359e^{-0.015x}$ <p style="text-align: center;">0.9324</p>
Presión	$Y = 16.288 \ln(x) + 8.7573$ <p style="text-align: center;">0.9994</p>	$Y = 17.074 \ln(x) + 9.4644$	$Y = 15.606 \ln(x) + 14.286$ <p style="text-align: center;">0.9629</p>
% sólidos	$Y = 7.2063 \ln(x) + 22.549$ <p style="text-align: center;">0.9353</p>	$Y = 5.8255 \ln(x) + 34.303$ <p style="text-align: center;">0.9678</p>	$Y = 10.263 \ln(x) + 23.371$ <p style="text-align: center;">0.9525</p>

Cuadro 6. Ecuación línea de tendencia y coeficiente de regresión para el fique

Variable vs. Tiempo	<i>Ecuación línea de tendencia y R² para cartuchos de fique</i>	
	<i>Prueba</i>	
	1	2
Volumen	$Y = -0.0119x^2 + 5.0357x + 0.4762$ <p align="center">0.9999</p>	$Y = -0.0143x^2 + 5.0286x + 0.0714$ <p align="center">1</p>
Caudal	$Y = 5.1679e^{-0.006x}$ <p align="center">0.8082</p>	$Y = -0.0143x^2 + 5.0286x + 0.0714$ <p align="center">0.9648</p>
Presión	$Y = 5.6464 \ln(x) + 6.3875$ <p align="center">0.9813</p>	$Y = 5.147 \ln(X) + 9.9057$ <p align="center">0.9886</p>
% sólidos retenidos	$Y = 6.7432 \ln(x) - 2.9191$ <p align="center">0.8936</p>	$Y = 4.9909 \ln(x) - 3.7959$ <p align="center">0.9659</p>

5.1.1 Prueba uno y dos algodón

Figura 21. Comportamiento del volumen para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón

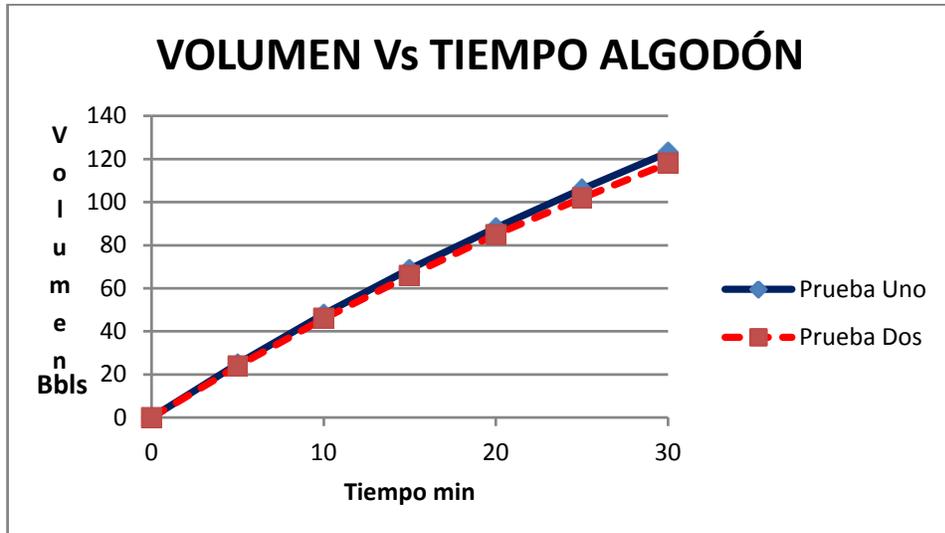
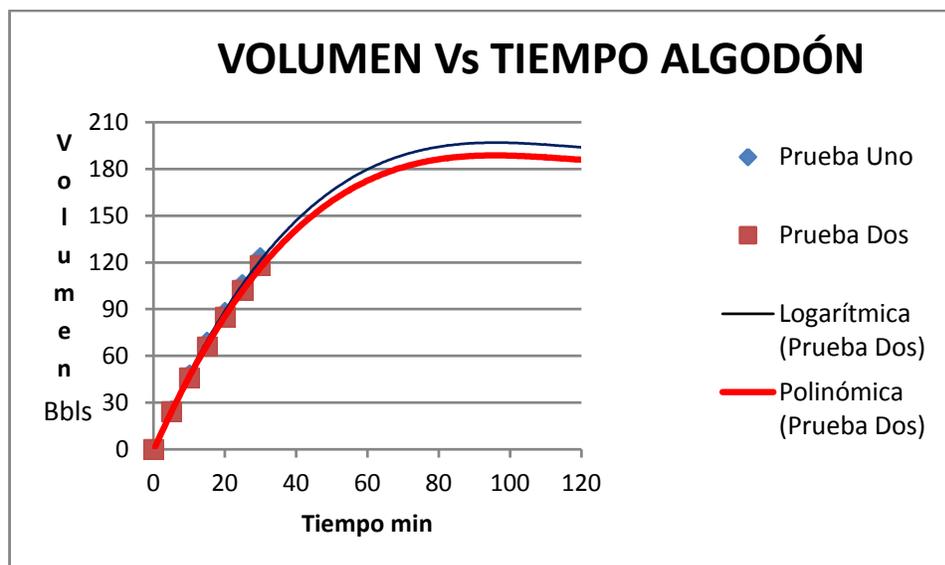


Figura 22. Línea de tendencia del comportamiento del volumen para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón



La línea de tendencia describe el siguiente comportamiento
 $Y = 0.0001x^3 - 0.0476x^2 + 5.3754x - 0.6832$ para la prueba uno y
 $Y = 0.0001x^3 - 0.0461x^2 + 5.1761x - 0.7322$ prueba dos.

Figura 23. Comportamiento del caudal para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón

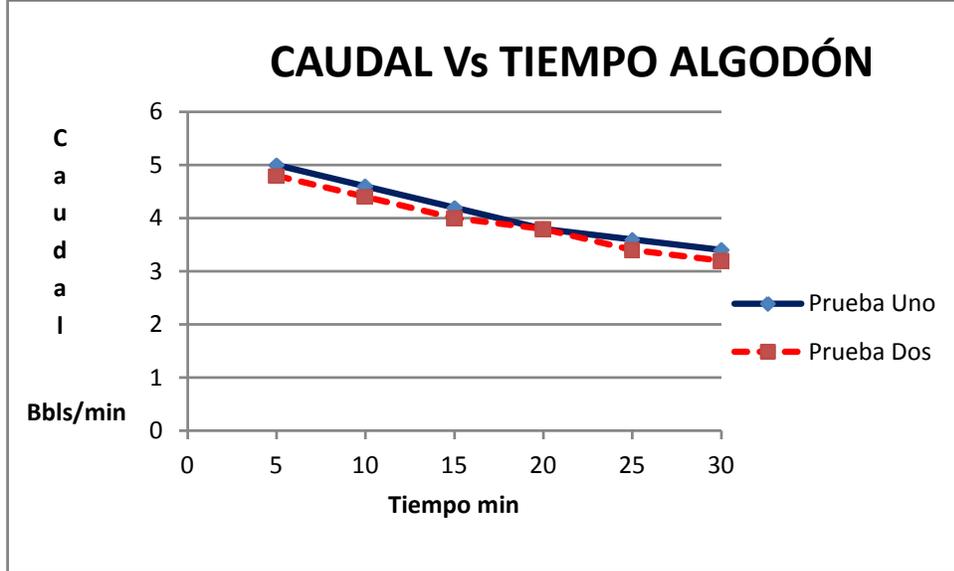
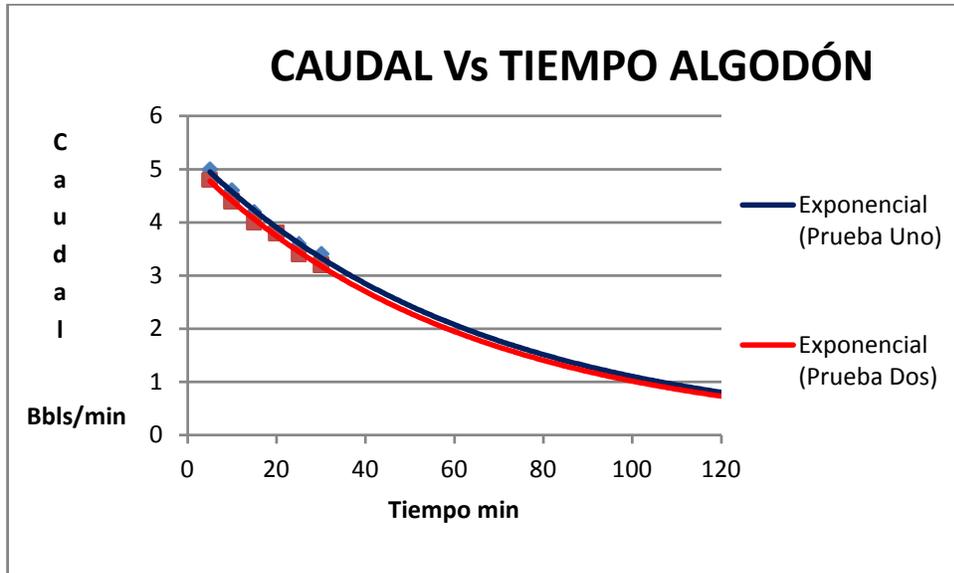


Figura 24. Línea de tendencia del comportamiento del caudal para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón



La línea de tendencia describe el siguiente comportamiento $Y = 5.3553e^{-0.016x}$ para la prueba uno y $Y = 5.1808e^{-0.016x}$ prueba dos.

Figura 25. Comportamiento de la presión para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón

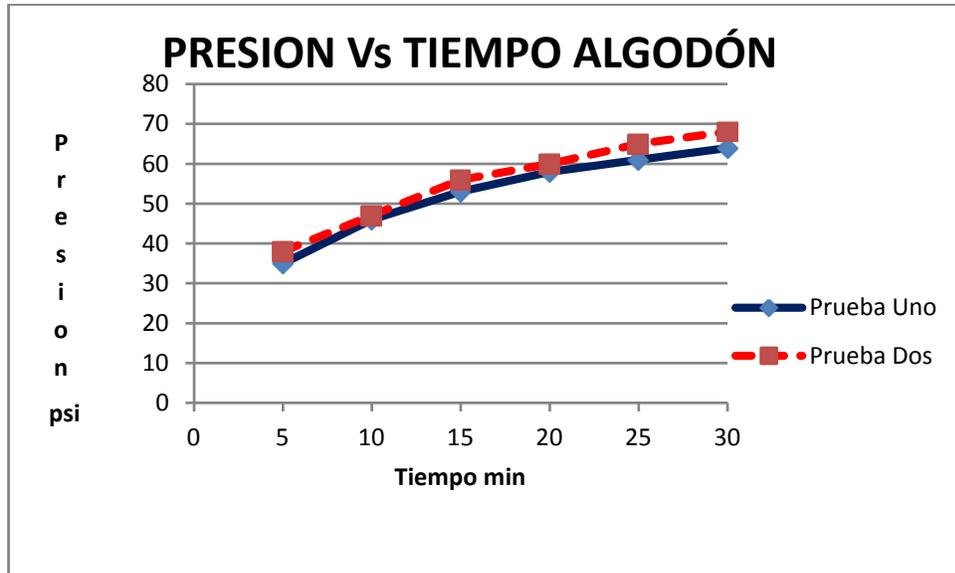
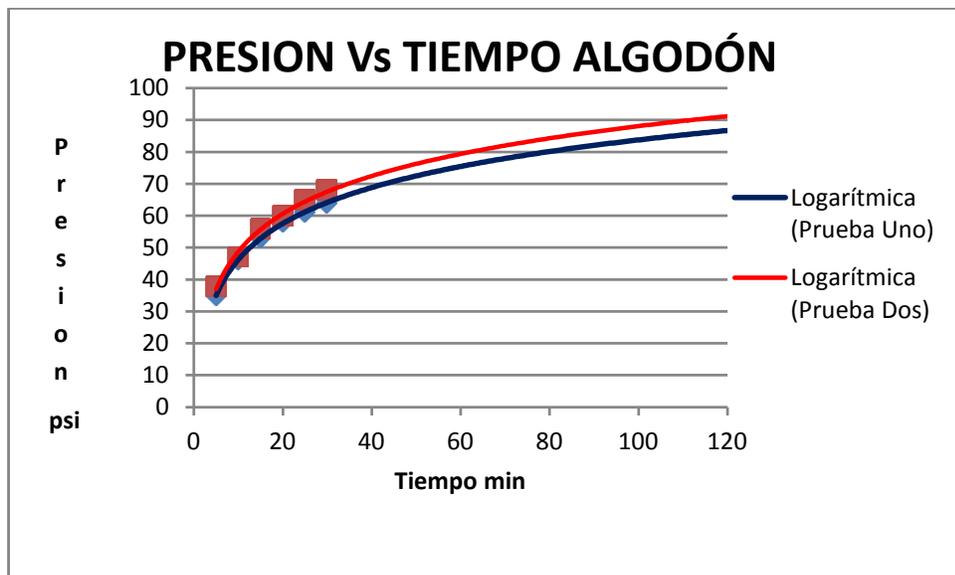


Figura 26. Línea de tendencia del comportamiento de la presión para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón



La línea de tendencia describe el siguiente comportamiento $Y = 16.288 \ln(x) + 8.7573$ para la prueba uno y $Y = 17.074 \ln(x) + 9.4644$ prueba dos.

Figura 27. Comportamiento de los SST retenidos para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón

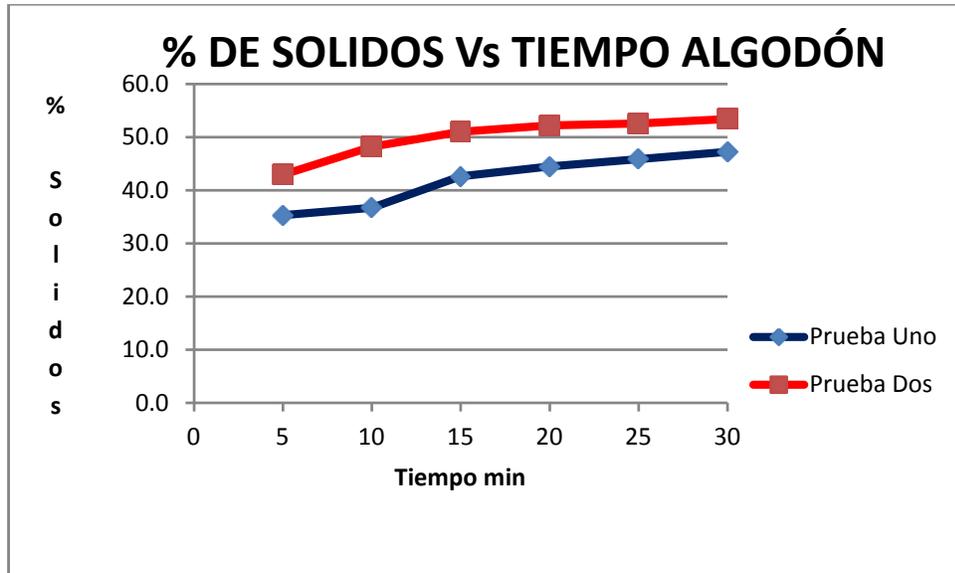
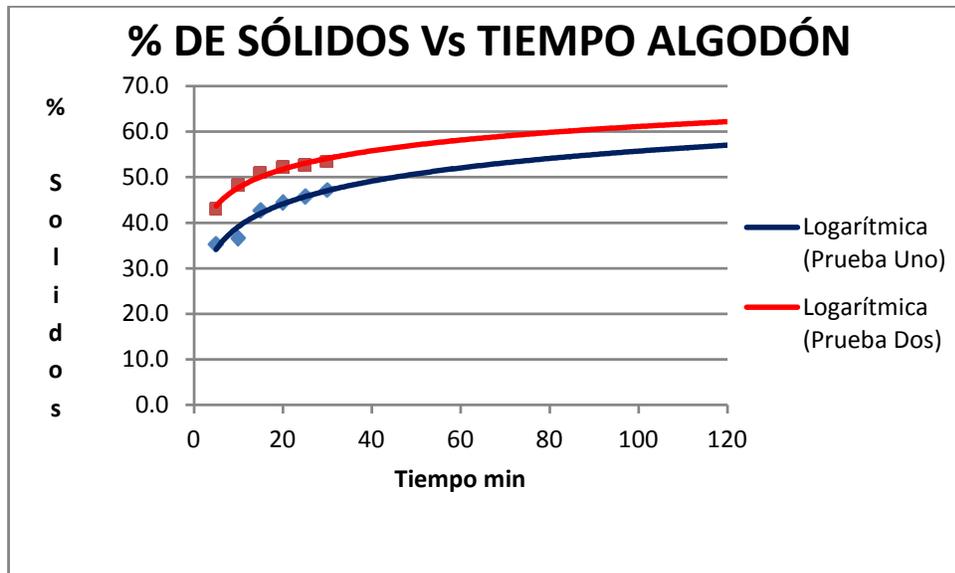


Figura 28. Línea de tendencia del comportamiento de los SST retenidos para la prueba uno y dos cartuchos encordados de algodón



La línea de tendencia describe el siguiente comportamiento $Y = 7.2063 \ln(x) + 22.549$ prueba uno y $Y = 5.8255 \ln(x) + 34.303$ prueba dos.

5.1.2 Prueba uno y dos fique

Figura 29. Comportamiento del volumen para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique

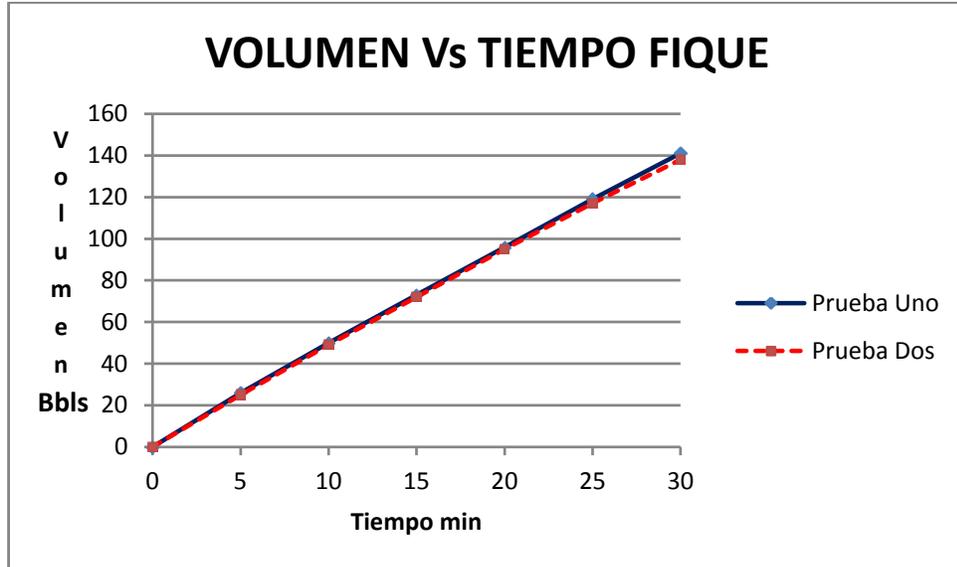
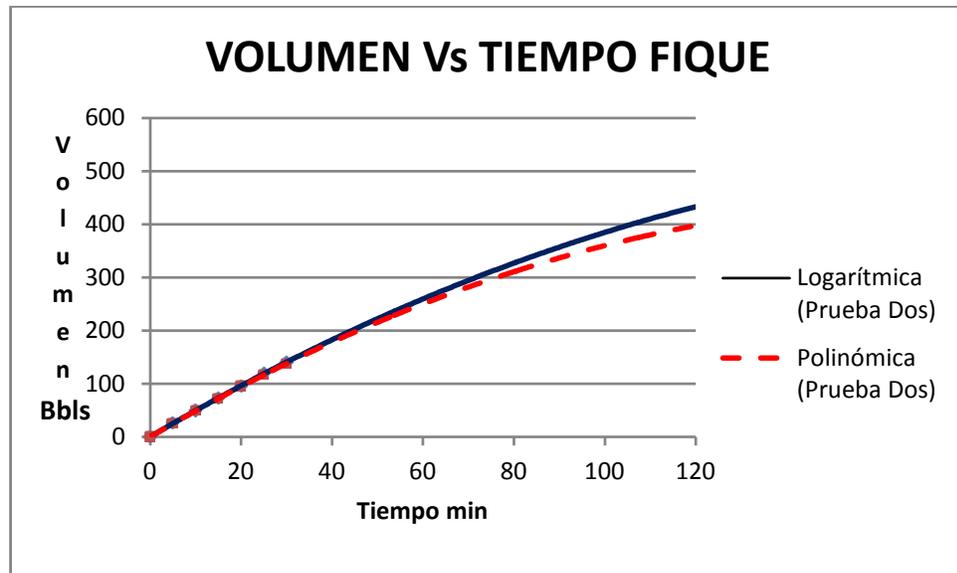


Figura 30. Línea de tendencia del comportamiento del volumen para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique



La línea de tendencia describe el siguiente comportamiento
 $Y = -0.0119x^2 + 5.0357x + 0.4762$ prueba uno y
 $Y = -0.0143x^2 + 5.0286x + 0.0714$ prueba dos.

Figura 31. Comportamiento del caudal para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique

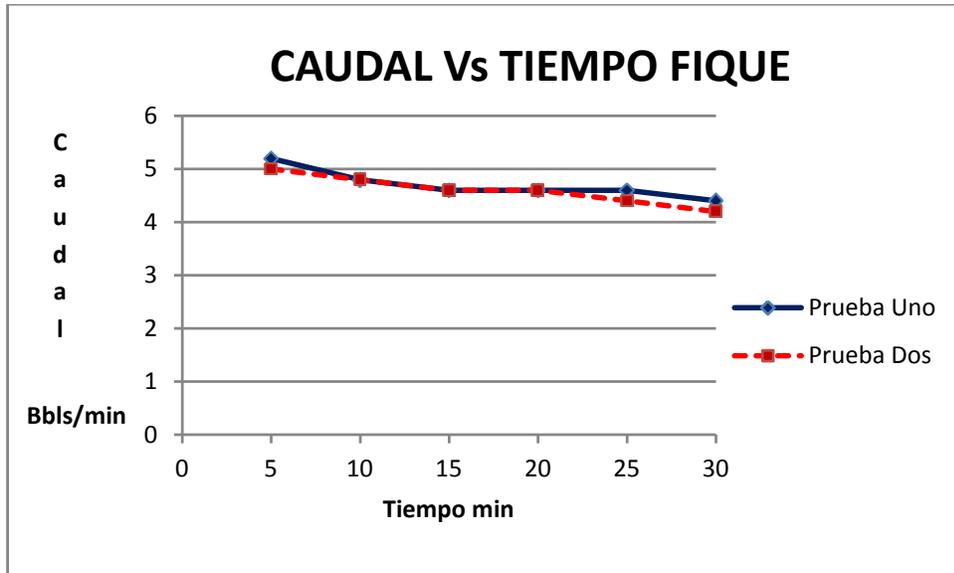
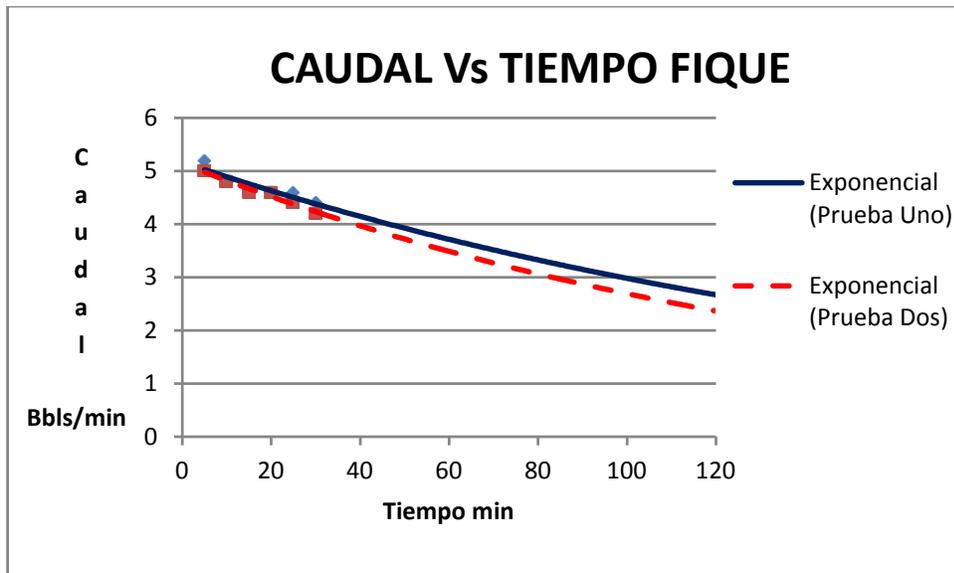


Figura 32. Línea de tendencia del comportamiento del caudal para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique



La línea de tendencia describe el siguiente comportamiento $Y = 5.1679e^{-0.006x}$ prueba uno y $Y = 5.1436e^{-0.006x}$ prueba dos.

Figura 33. Comportamiento de la presión para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique

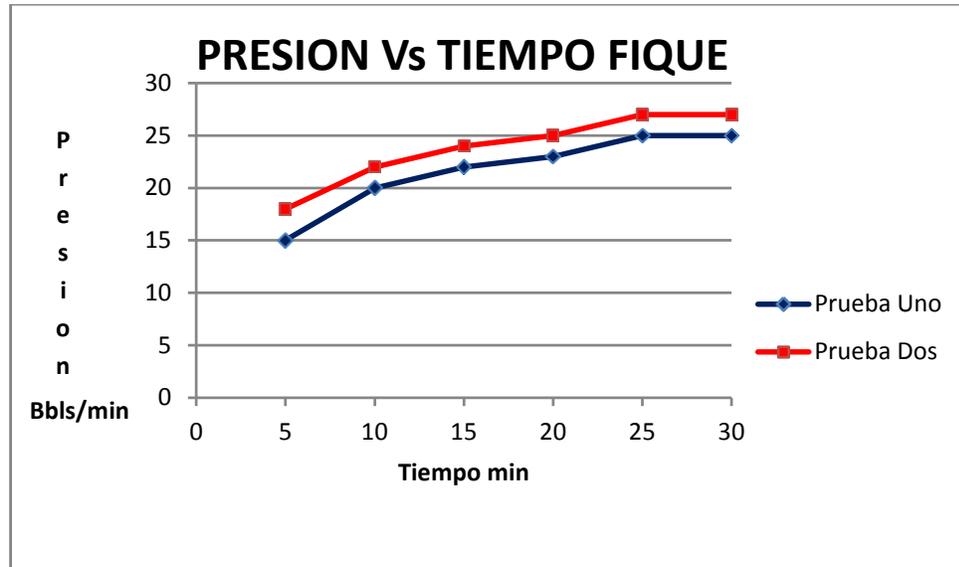
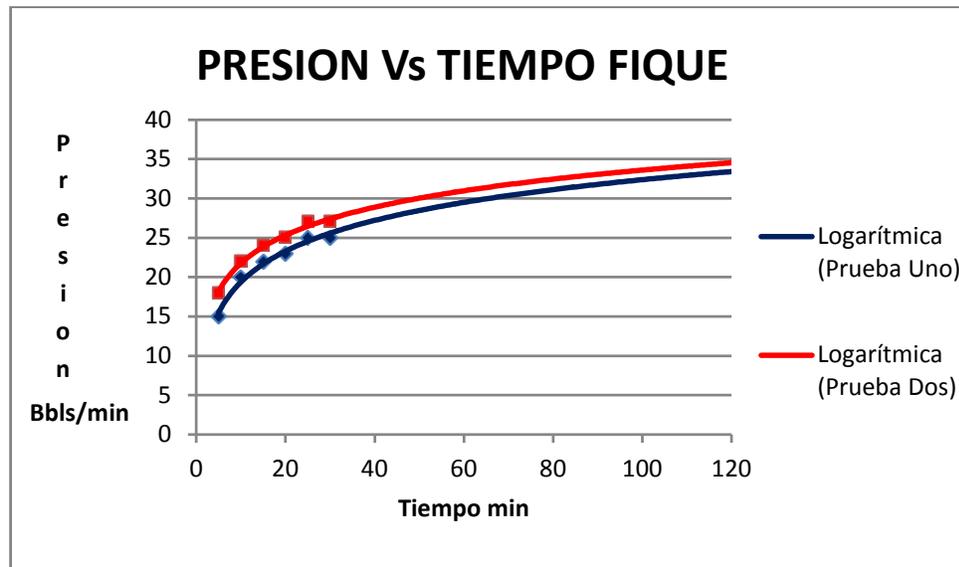


Figura 34. Línea de tendencia del comportamiento de la presión para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique



La línea de tendencia describe el siguiente comportamiento $Y = 5.6464 \ln(x) + 6.3875$ prueba uno y $Y = 5.147 \ln(X) + 9.9057$ prueba dos.

Figura 35. Comportamiento de los SST retenidos para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique

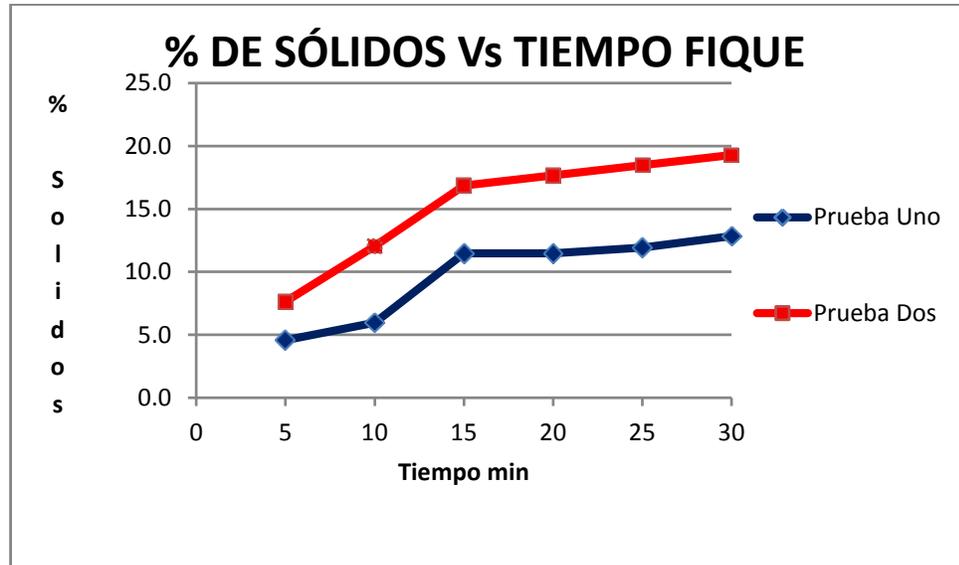
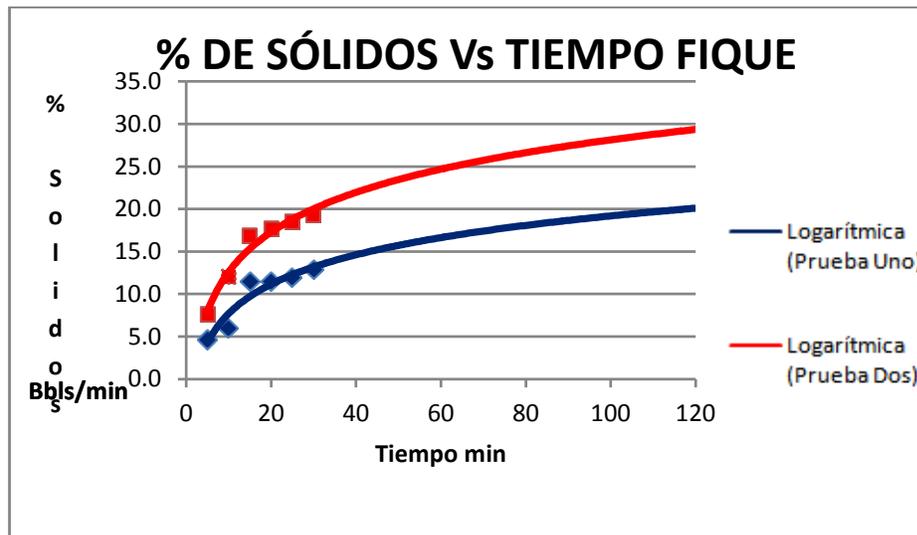


Figura 36. Línea de tendencia del comportamiento de los SST retenidos para la prueba uno y dos cartuchos encordados de fique



La línea de tendencia describe el siguiente comportamiento $Y = 6.7432\ln(x) - 2.9191$ prueba uno y $Y = 4.9909\ln(x) - 3.7959$ de la prueba dos.

5.1.3 Prueba tres de algodón.

Figura 37. Comportamiento del volumen para la prueba tres cartuchos encordados de algodón

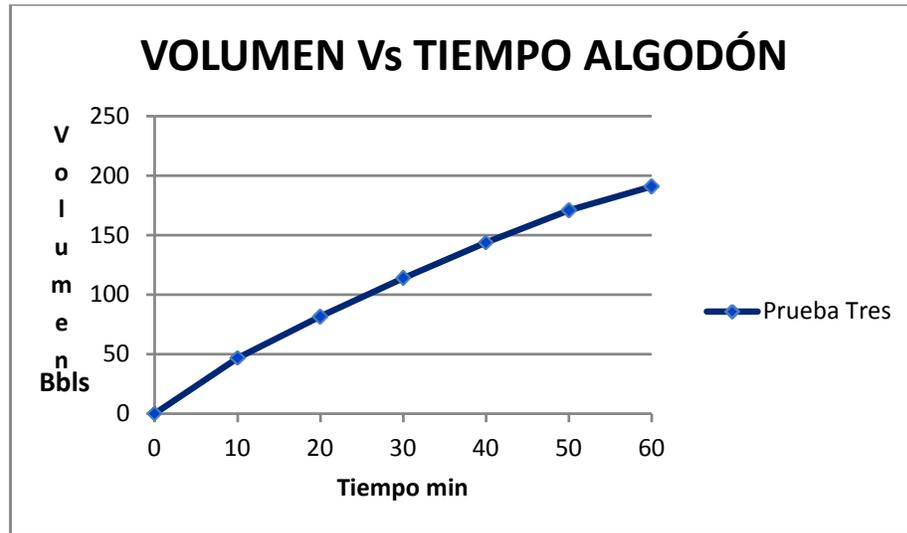
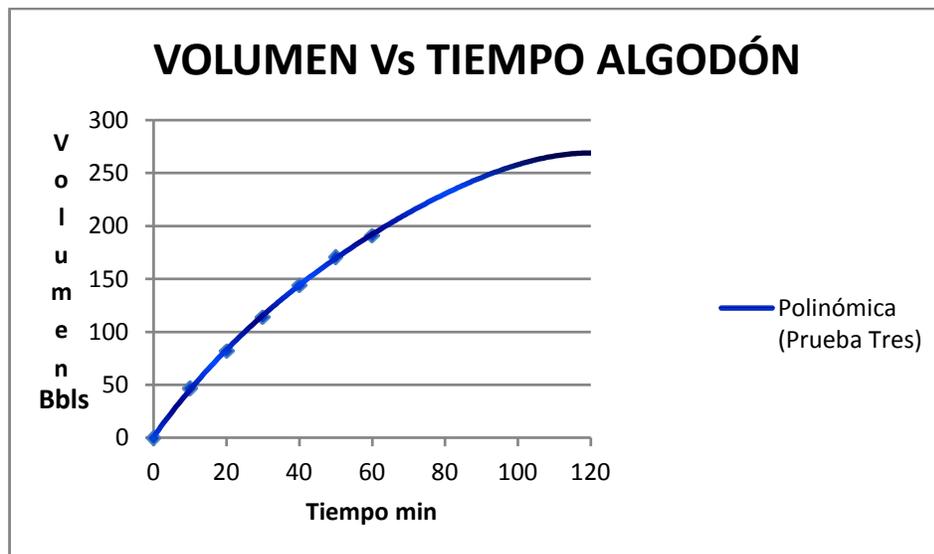


Figura 38. Línea de tendencia del comportamiento del volumen para la prueba tres cartuchos encordados de algodón



La línea de tendencia describe el siguiente comportamiento $Y = 4E - 07x^4 - 6E - 05x^3 - 0,0196x^2 + 4,4475x + 1,445$ de la prueba tres.

Figura 39. Comportamiento del caudal para la prueba tres cartuchos encordados de algodón

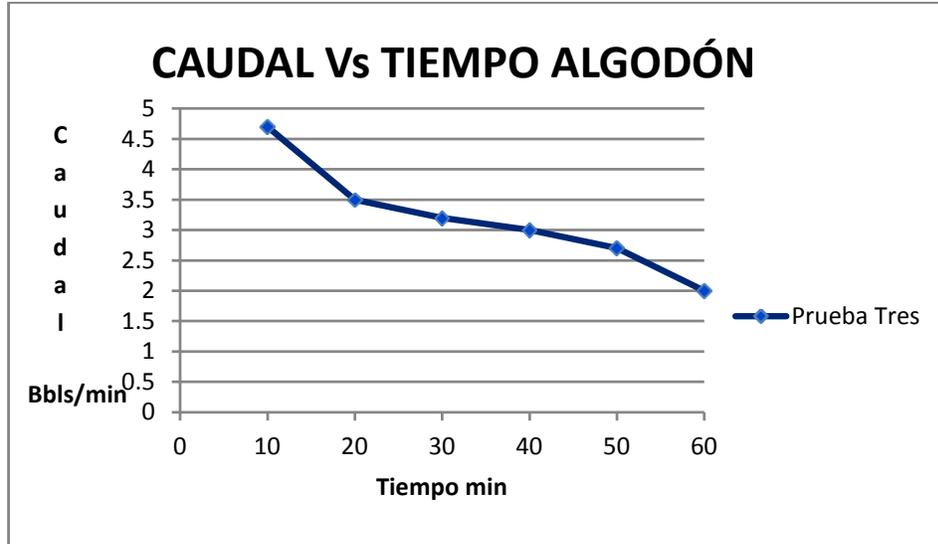
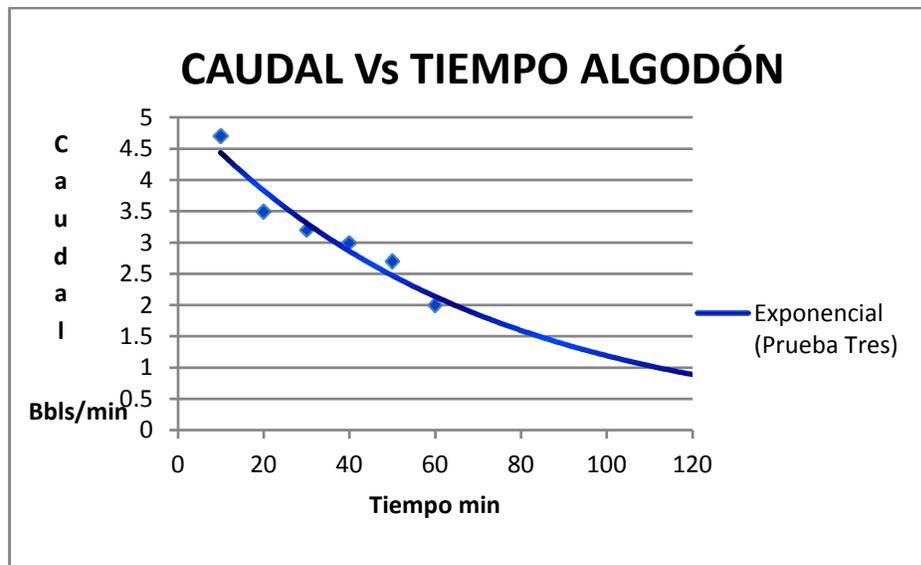


Figura 40. Línea de tendencia del comportamiento del caudal para la prueba tres cartuchos encordados de algodón



La línea de tendencia describe el siguiente comportamiento $Y = 5.1359e^{-0.015x}$ de la prueba tres.

Figura 41. Comportamiento de la presión para la prueba tres cartuchos encordados de algodón

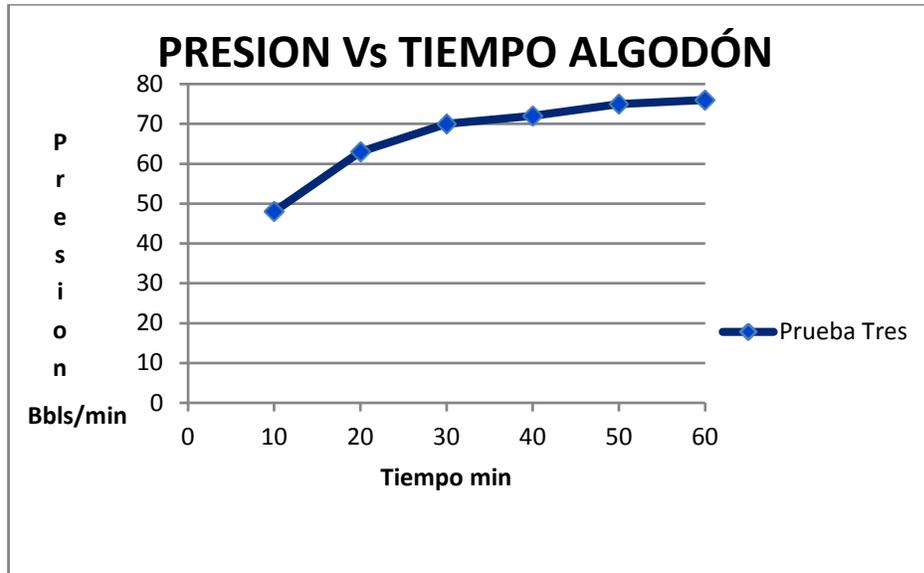
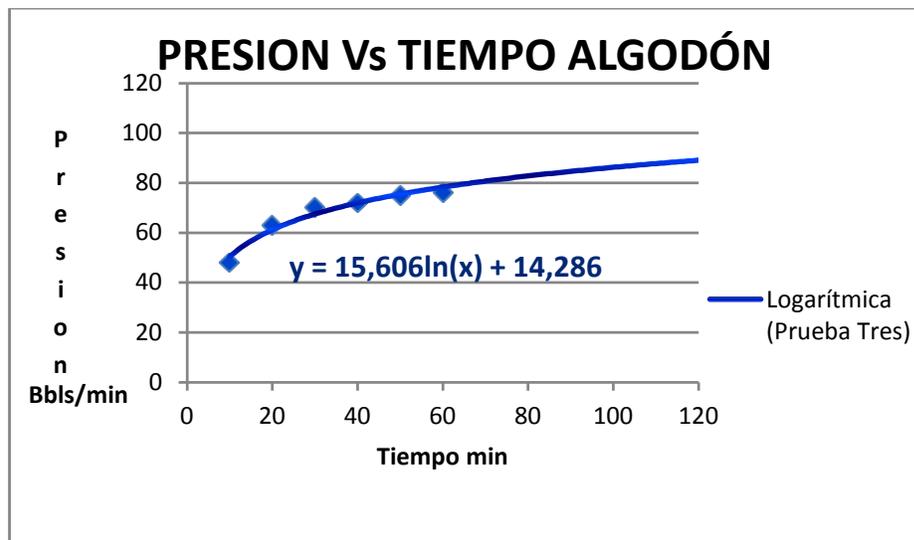


Figura 42. Línea de tendencia del comportamiento de la presión para la prueba tres cartuchos encordados de algodón



La línea de tendencia describe el siguiente comportamiento $Y = 15.606 \ln(x) + 14.286$ de la prueba tres.

Figura 43. Comportamiento de los SST retenidos para la prueba tres cartuchos encordados de algodón

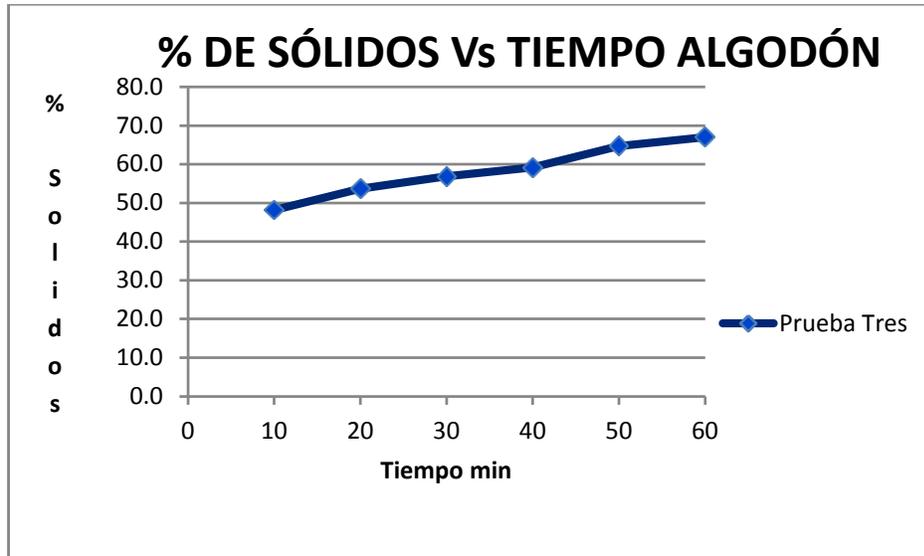
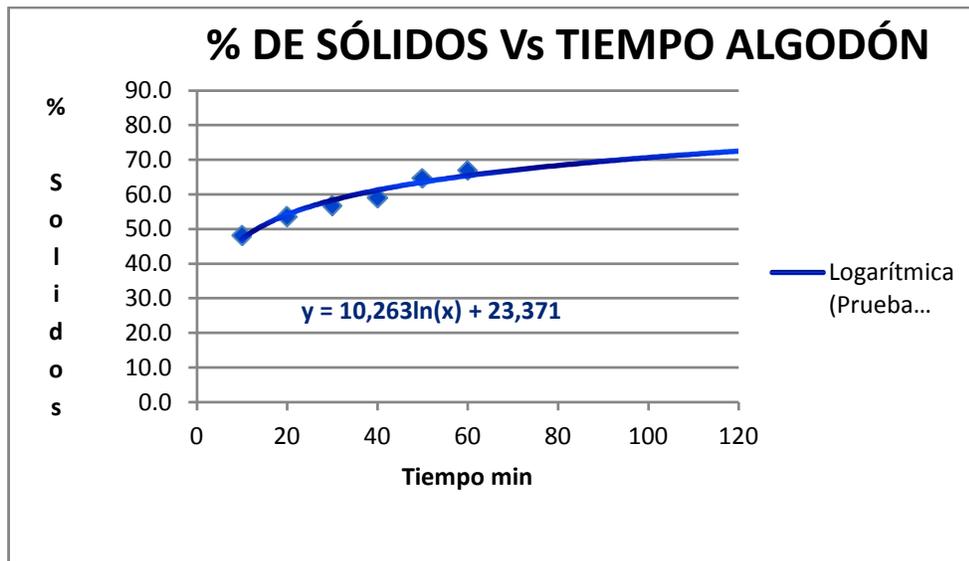


Figura 44. Línea de tendencia del comportamiento de los SST retenidos para la prueba tres cartuchos encordados de algodón



La línea de tendencia describe el siguiente comportamiento $Y = 10.263\ln(x) + 23.371$ de la prueba tres.

5.2 CAUDALES Y PORCENTAJES PROMEDIOS

Figura 45. Caudales promedio

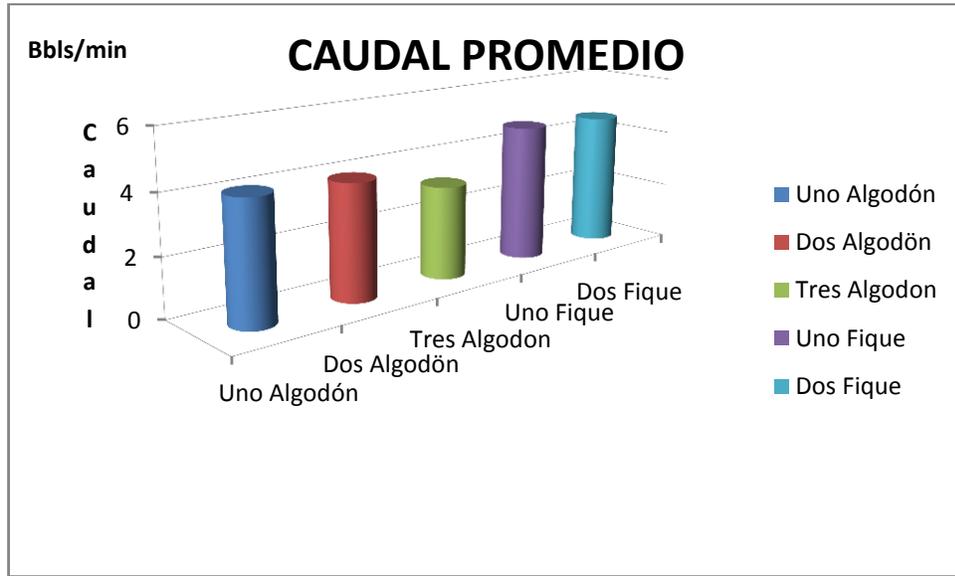
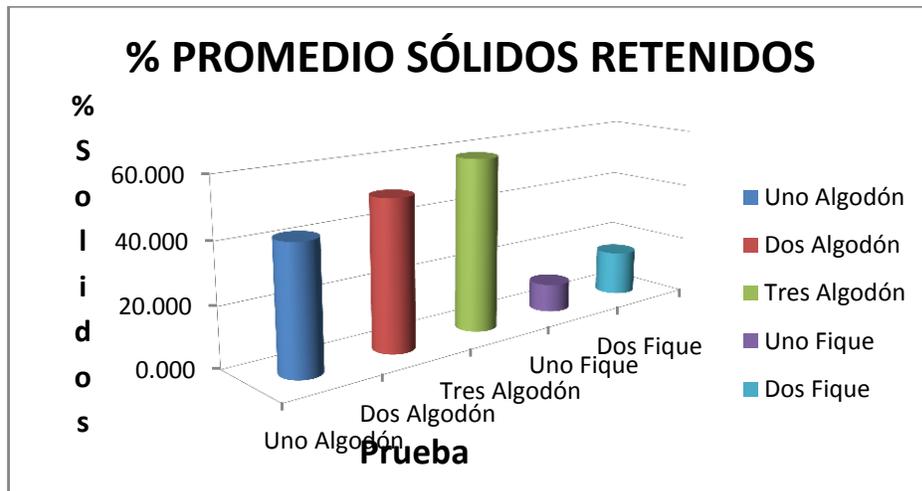


Figura 46. Porcentaje promedio de sólidos retenidos



5.3 LIMITACIONES DE LOS RESULTADOS.

- Los resultados se ven limitados a la exactitud y la calibración de los equipos de laboratorio y de los procedimientos de las pruebas.
- Las pruebas uno y dos se desarrollaron en un periodo de tiempo corto, el cual no alcanzaba la presión y caudal crítico de los cartuchos de filtración, teniéndose que recurrir a la extrapolación de la línea de tendencia trazada para los diferentes comportamientos de las variables.
- El registro de la presión y el volumen fue visual, lo que podría conllevar a error de observación que se reflejarían en los datos tomados en las pruebas. El manómetro con que se midió presión poseía una sensibilidad de 5 PSI y el volumen fué medido en un medidor de columna de vidrio con sensibilidad de 1 Barril.
- El volumen, la presión y la muestra para registrar contenidos de sólidos no se realizaron al mismo tiempo, lo que produjo una diferencia de treinta segundos entre la toma de medida de las dos primeras con la tercera.
- Los valores menores a 5 minutos no pueden ser determinados directamente, lo cual no permite con exactitud determinar el comportamiento inicial de las variables.
- Sin embargo los resultados obtenidos en la medición de la concentración de sólidos y el registro de presión y volumen con respecto al tiempo son confiables y acertados al comportamiento que indica la ecuación general de filtración, pagina 40 de este documento. Dicha ecuación indica que el caudal es directamente proporcional a la presión, que a mayor resistencia de la torta ocasionada por los sólidos retenidos el caudal descenderá y la retención de sólidos se incrementara.
- El coeficiente de ajuste para las curvas de tendencia se encuentra entre 0.93 y 1, sin tener en cuenta los de la curva de caudal y porcentaje de sólidos retirados para la prueba uno del fique, que están en 0.8082 y 0.8936. Tales resultados influyen en el análisis de correlación de las extrapolaciones.

5.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante el proceso de filtración no se generó retorta, lo cual no permitió aplicar los modelos matemáticos desarrollados, en los cuales se determina el comportamiento del caudal a partir de la presión, viscosidad del fluido y resistencia de la torta y el medio filtrante.

La resistencia del medio filtrante es equivalente a la presión inicial al comenzar el proceso de filtración. Los cartuchos fabricados de algodón son los que opusieron mayor resistencia inicial al filtrado.

A pesar de las limitaciones enunciadas en el apartado anterior, los resultados obtenidos proporcionan un indicio del comportamiento de las variables medidas durante las pruebas. A continuación se describirá el comportamiento de las siguientes variables: volumen, caudal, presión y porcentaje de sólidos retenidos extraídos en las pruebas.

5.4.1 Discusión de cada variable

El análisis de un filtro abarca tanto la concentración de sólidos como el volumen, el caudal y la presión. En este aparte se analizará el comportamiento de cada variable por separado para deducir la tendencia de cada variable.

- **Volumen**

La relación entre el volumen y el tiempo es un polinomio de grado tres para el algodón y de segundo grado para el fique, en donde el volumen de salmuera filtrada decrece con el tiempo y tiende a mantenerse constante una vez saturados los filtros.

El algodón para la prueba uno, filtró 123 barriles en 30 minutos, mientras que la prueba dos y tres filtró 118 y 114 barriles en un periodo de tiempo igual, teniendo una tendencia decreciente en el volumen filtrado, ocasionado por el incremento de la tensión en la fabricación y el incremento de los sólidos retenidos, los cuales provocaron una saturación de los filtros y por ende una disminución de la permeabilidad de los filtros de algodón.

El volumen filtrado de los cartuchos de fique para la prueba uno y dos en un periodo de tiempo de 30 minutos fue de 141 y 138 barriles, los cuales son relativamente altos ocasionado por una retención de sólidos baja, debido a una capacidad de adsorción de partículas finas muy regular del medio filtrante, la permeabilidad inicial del filtro es buena y se mantiene así durante el proceso de filtración, conllevando a obtener ratas altas de filtración para estos cartuchos.

- **Caudal**

El comportamiento del caudal con la variación del tiempo es exponencial, con una tendencia decreciente con el avance del tiempo de filtración.

Los resultados obtenidos de las pruebas demuestran que los cartuchos de fique poseen una mayor rata de filtración, producto de una resistencia menor del medio filtrante y por ende mayor en el algodón.

Cuadro 7. Porcentaje de disminución de caudal

<i>Prueba</i>		<i>% de caída de Q entre t= 5 min y t=30min</i>	<i>% de caída de Q entre t= 5min y t=60min</i>
Algodón	1	32,00	59,00
	2	33,33	58,75
	3	31,91	57,45
fique	1	15,38	30,77
	2	12,50	25,21

Para facilitar el análisis y la discusión de los caudales, se determinó el porcentaje de caída del caudal para diferentes tiempos, teniendo como punto de referencia el caudal a cinco minutos.

La disminución del caudal es más pronunciada en los filtros de algodón donde el porcentaje de disminución supera el 30%, caso contrario de los cartuchos de fique donde el descenso del caudal sobrepasa levemente el 15%.

Es apreciable que el porcentaje de caída de caudal para la prueba uno a los treinta minutos, difiere de la tendencia de las demás pruebas, en el cual se esperaría que fuera levemente mayor al dato obtenido en la prueba dos en el mismo periodo de tiempo. Esta diferencia radica en que la saturación del filtro recae directamente sobre el caudal, se saturara con mayor rapidez los cartuchos de la prueba uno con 249 *mg/l* de sólidos suspendidos en la salmuera, que los cartuchos de la prueba dos con 218 mg/l.

Para un periodo de 60 minutos los resultados obtenidos a partir de la extrapolación, se presentan en el en el cuadro 7, del cual se deduce que los rangos de los porcentajes están muy cercanos entre si, corroborando los datos obtenidos al calcular el porcentaje de caída de caudal para un periodo de 30 minutos.

- **Presión**

La tendencia seguida por la presión con el incremento del tiempo es logarítmica, con trayectorias muy simétricas entre sí para los dos tipos de cartuchos de filtración. Se pueden discernir, que los valores de presión registrados, al iniciar la filtración se incrementan con el aumento de la tensión de fabricación de los cartuchos, la cual se debe al efecto directo del medio filtrante de los cartucho.

La presión de filtración de la prueba tres se incrementa en 37% y 26% comparada con las presiones de las pruebas uno y dos de los cartuchos de algodón. En el fique el incremento de la presión de la prueba uno a la dos es del 20%, dichos cartuchos no alcanzaron presiones elevadas, menores a 27 *psi* a 30 minutos de prueba. Debido a la resistencia del medio filtrante, la cual permite el paso de sólidos de mayor tamaño y su baja capacidad de retención de sólidos.

La teoría de filtración con cartuchos está estandarizada para desarrollarse hasta alcanzar presiones de 80 *psi*, pero en la industria petrolera se pueden alcanzar hasta 120 *psi*. El tiempo al cual se alcanza la presión crítica de 80 *psi* será a 79, 60, 67 minutos para las pruebas en orden ascendente, mostrando que los filtros de la prueba dos alcanzarían primero el tiempo crítico de operación, resultado desconcertante, ya que se creería que la prueba tres alcanzaría primero la presión

critica por la densidad del medio filtrante. Sin embargo estos resultados son obtenidos de la extrapolación de la ecuación de la línea de tendencia que cuenta con un excelente ajuste.

Por el contrario a pesar de poseer un buen ajuste las curvas de tendencia para el fique indican que los cartuchos se saturaron en periodos de tiempo muy extensos.

- **Porcentaje de sólidos retenidos**

La capacidad de retención de los sólidos de los cartuchos es evaluada analizando el porcentaje de sólidos retenidos, cuyo comportamiento es logarítmico, tendiendo a aumentar los sólidos retenidos por los filtros, con el paso del tiempo.

El aumento de retención de sólidos en las pruebas, se debió al incremento de la tensión para la fabricación de los diferentes cartuchos.

La retención inicial de los filtros de algodón fue superior a un 35% para los cartuchos de algodón, caso contrario para el fique donde el porcentaje de retención estuvo entre un 4.6 y 7.6 %.

Es claro que la capacidad de retención se incrementa con el tiempo, pero es muy interesante resaltar que a los 15 minutos de transcurrida la prueba para los cartuchos de algodón se alcanza porcentajes superiores al 40% con ratas buenas de filtración.

Con el algodón se logró obtener un máximo de 58.25 % de sólidos retenidos promedios en la prueba tres y para el fique su máximo fue de 15.328 %, demostrando una mayor capacidad de filtración para los cartuchos de algodón.

Para una mejor interpretación los resultados obtenidos durante la prueba se muestra la relación de sólidos retenidos en unidades de porcentaje, calculando el porcentaje para intervalos de tiempo de cinco minutos y promediándolo para mostrar un resultado final.

5.4.2 CORRELACION y COMPARACION

La correlación y comparación se realizó para el conjunto de variables de los cartuchos fabricados para esta investigación y los cartuchos industriales.

- **Correlación entre variables**

Para una interpretación más acertada, se hace necesario comparar las variables. Esta razón hace necesario la correlación de: caudal, presión y sólidos retirados de la salmuera entre sí.

El cuadro 8 registra los datos obtenidos por las pruebas a 5, 30 y 60 *minutos*, este último obtenido a través de la ecuación de la línea de tendencia. La letra *E*, hace referencia a que el dato es obtenido de la extrapolación.

Cuadro 8. Extrapolación de datos

<i>Prueba</i>		<i>Tiempo (min)</i>	<i>Volumen (Bbls)</i>	<i>Caudal (Bbls/min)</i>	<i>Presión (psi)</i>	<i>% de sólidos</i>
A l i g o d ó n	1	5	25	5	3.5	35.3
		30	123	3.4	64	47.2
		60	172 <i>E</i>	2.05 <i>E</i>	74.44 <i>E</i>	52.05 <i>E</i>
	2	5	24	4.8	38	43.0
		30	118	3.2	68	53.4
		60	165.47 <i>E</i>	1.98 <i>E</i>	79.37 <i>E</i>	58.15 <i>E</i>
	3	10	47	4.7	48	48.2
		30	114	3.2	70	56.9
		60	191	2	76	67
F i l t r a c i ó n	4	5	26	4.8	15	4.6
		30	141	3.2	25	12.8
		60	259 <i>E</i>	3.6 <i>E</i>	29.5	16.63
	5	5	25	5.0	18	7.6
		30	138	4.2	27	19.3
		60	250 <i>E</i>	3.59 <i>E</i>	30.98	24.68

Los resultados obtenidos para las diferentes pruebas de un mismo material muestran valores muy cercanos para el caudal y la presión a 60 *minutos* de desarrolladas las pruebas de filtración.

Los porcentajes de sólidos retirados por los cartuchos difieren bastante entre las pruebas de igual y diferente tipo de cartucho, el cual indica que el aumento de la tensión generó un incremento en la capacidad del cartucho para retener sólidos suspendidos.

Entre mayor sea la retención de sólidos, la saturación del filtro se incrementó debido a los sólidos depositados en el medio filtrante, haciendo necesario una mayor presión para llevar a cabo el proceso.

La prueba tres al compararla con la dos y uno del mismo material, demuestra para un tiempo de 60 minutos un incremento considerable de los sólidos retenidos por los filtros, caso contrario de la presión y el caudal, donde los valores son muy cercanos, para el mismo periodo de tiempo. El comportamiento descrito es similar para los cartuchos de fique.

El incremento de la tensión durante la fabricación de los cartuchos de filtración permitió aumentar la capacidad de retención de sólidos sin sacrificar el caudal y la presión de filtración de modo exagerado.

El caudal registrado para las pruebas de algodón, muestra una clara disminución del mismo con el incremento de la tensión, caso contrario de la presión de filtración la cual se incrementa.

En los dos tipos de cartuchos, con el incremento de los sólidos retenidos durante el desarrollo de la prueba, produce que el caudal de salida de la unidad de filtrado disminuya y la presión se incrementa.

La salmuera al poseer una mayor cantidad de sólidos suspendidos muestra un incremento en el porcentaje de sólidos retenidos, observable entre la prueba uno y dos de los cartuchos fabricados a partir de algodón y fique, las cuales se desarrollaron con la misma concentración de sólidos, a un tiempo de prueba de 30 *minutos* con 218 y 249 *ppm* de sólidos suspendidos en la salmuera a filtrar para la prueba uno y dos respectivamente. En estas condiciones se registró para el algodón un incremento del 47.2 al 53.4 % y el fique de 12.8 a 19.3 %.

- **Comparación entre cartuchos encordados de algodón y fique**

La prueba tres para el algodón y la dos para el fique presentaron los mejores resultados, siendo el motivo por el cual el análisis se centrara en ellas.

El cuadro 4 muestra el promedio para cada variable obtenido en la prueba de filtración. A partir de estos datos se aprecia en la figura 31 la superioridad del fique en el caudal de filtración, mientras que la figura 32 se aprecia la mayor capacidad de retención de sólidos del algodón.

Los cartuchos encordados de algodón retuvieron una mayor cantidad de sólidos, apreciable en el porcentaje de sólidos retenidos el cual sobrepasa el 40% inicialmente y supera el 50% desde los 14 minutos de iniciada la prueba, llegando a alcanzar a 60 minutos un 67%. Su capacidad de retención se incrementó en una mayor proporción que los cartuchos fabricados con fique, los cuales comienzan con 7.6% inicial de retención y culminan con máximo de 19.3 % a 30 minutos, extrapolando la línea de tendencia alcanzan un 24.68% a 60 minutos de prueba, resultado relativamente inferior al de los cartuchos de algodón.

El caudal de filtración para un tiempo cercano a cero, calculado a partir de lo extrapolado de la línea de tendencia es de 5,1436 *barriles* para el fique y 5,1808 *barriles* en el algodón, siendo mayor el del algodón. Esta diferencia se invierte a partir de los cinco minutos de transcurrida la prueba en el que el fique pasa a poseer un caudal mayor de filtración. Para un periodo de tiempo de 60 *minutos* es de 2 *Bbbs/min* para el algodón y 3.59 *Bbbs/min* en los cartuchos de fique.

Al tener el algodón un medió filtrante de mayor densidad y capacidad de retención de sólidos, la presión necesaria para filtrar el fluido se incrementa y asciende con mayor rapidez. Los cartuchos encordados de fique operan con presiones menores teniendo que pasar horas para alcanzar el tiempo crítico de operación, caso contrario de los cartuchos de algodón los cuales a 67 *minutos* la presión es de 80 *psi*.

Los mejores resultados fueron presentados por los cartuchos de algodón, superando ampliamente la capacidad de filtración del fique, con caudales de filtración que pueden ser incrementados por medio de bombas centrifugas que imprimen mayor presión a la unidad de filtrado.

- **Comparación de los cartuchos industriales con los fabricados para esta investigación.**

En la industria petrolera el comportamiento de las variables involucradas en el proceso de filtración es muy inconstante, ocasionado por el tamaño y la cantidad de sólidos suspendidos en el fluido de completamiento. Sin embargo en la tabla 10 se presenta los rangos que se obtienen en el proceso de filtración.

Tabla 10. Variables relacionadas

<i>variable</i>	<i>Cartuchos encordados algodón</i>	<i>Cartuchos encordados fique</i>	<i>Cartuchos encordados industriales</i>
Volumen (Bbbs)	191 a 233	250 a 337	200 a 250
Caudal (Bbbs/min)	2 a 1.3	3.6 a 2.9	4 a 3
Tiempo (min)	60 a 90	60 a 90	60 a 90
Presión (psi)	76 a 84	31 a 33	60 a 95
% Sólidos retirados	40 a 70	3 a 27	45 a 70

El tiempo de filtración es un parámetro de partida para comparación y análisis de los cartuchos el cual al igual que las otras variables es dependiente de la cantidad de sólidos presente en fluido a filtrar.

Los resultados obtenidos por los cartuchos de algodón son buenos, ya que el porcentaje de sólidos retenidos por los cartuchos de algodón en los primeros 5 minutos de iniciado el proceso de filtración estuvo sobre 40% y alcanzaron un 70% de retención de sólidos con fluidos, que poseían proporción de sólidos suspendidos intermedia, con rangos de 218 a 249 ppm.

El caudal de los cartuchos de algodón es muy inferior al obtenido por los cartuchos industriales, es rescatable indicar que su comportamiento es proporcional a la presión, y en pozo se manejan presiones superiores a las obtenidas indicando que los cartucho tienen un rango de tolerancia que le permite incrementar el caudal.

Los cartuchos de fique presentaron excelentes resultados de presión, caudal y volumen y muy deficientes en el más importante la retención de sólidos.

6 CONCLUSIONES

- La retención de sólidos promedio para los cartuchos fabricados con fique fue mala, menor al 25% de sólidos retenidos. Para los filtros de algodón muy buena, ya que los cartuchos industriales se puede alcanzar hasta un 70% de retención de sólidos y los cartuchos de algodón oscilaron entre un 40 y 70%, valores muy cercanos a los reales.
- El algodón y el fique puede ser utilizados para la fabricación de cartuchos de filtración del tipo encordado, permitiendo desarrollar nuevas geometrías de encordado, con diferente diámetro de hilo y valores de tensión de fabricación.
- El incremento de la tensión de fabricación mejoro la capacidad de retención de sólidos de los cartuchos de filtración, presentando los mejores resultados con 0.6 *Lbf* en los cartuchos de algodón y de 0.5 *Lbf* con los de fique.
- El parámetro de diseño que permitió obtener un encordado homogéneo y estable durante el desarrollo de las pruebas fue de 4.5 centímetros de paso.
- Los cartuchos encordados fabricados en el desarrollo de esta investigación, fueron probados en unidades industriales y con salmuera como fluido de completamiento, presentando el algodón excelente capacidad de retención de sólidos, y buenos rangos de caudal y volumen filtrado a presiones manejables por los equipos de filtración utilizados en la industria petrolera.
- El fique como medio filtrante en los cartuchos encordados no presente buenos resultados de retención de sólidos y si excelentes rangos de caudal, volumen y presión para el proceso de filtración, demostrando que este material no puede ser aplicado al desarrollo de filtros encordados como único material componente del medio filtrante de un filtro de cartucho encordado. Una mezcla de un material con excelente capacidad de retención de sólidos con el fique podrá presentar muy buenos resultados.
- Los cartuchos encordados de algodón presentaron mejores resultados que los cartuchos encordados de fique, con una capacidad mayo de retención de sólidos desde el inicia hasta finalizar el proceso.

- El incremento de la tensión durante la fabricación de los cartuchos de filtración permitió aumentar la capacidad de retención de sólidos, manteniendo en rangos controlables y aceptables el volumen, la presión y el caudal de filtración.
- La eficiencia de un filtro no puede ser manejada únicamente desde el tamaño y la cantidad de la partículas retenida, como se implementa actualmente por el amplio sector de los fabricantes de cartuchos de filtración; la eficiencia de un filtro debe ser medida en un contexto más amplio, que involucre las presiones y caudales que se desarrollaran con la saturación de los cartuchos de filtración, parámetros esenciales en el proceso.
- La teoría actual del proceso de filtración con cartucho, no plantea modelos matemáticos capaces de predecir el comportamiento de filtros que no generen torta durante el proceso de filtración y cuyo tipo de fluido, tamaño y cantidad de sólido sea muy variable durante el desarrollo del proceso.
- Los primeros 60 minutos del proceso de filtración serán los que definan la capacidad de filtrar del cartucho, posterior a este tiempo las variables presentaron tendencias cercanas entre cartuchos de un mismo tipo de material.
- Para los filtros desarrollados no se determinó el tamaño de partícula retenido por los cartuchos, dejando en pie qué quienes pretendan desarrollar investigación de este tema específico debe determinar o crear un método capaz de hacerlo sin tener que recurrir a los costosos y escasos equipos electrónicos diseñados para este fin.

7. RECOMENDACIONES

- Es indispensable cuando se desarrollan investigaciones de carácter experimental, contar con los equipos y recursos necesarios para desarrollar la investigación.
- En el desarrollo de pruebas de filtración se hace necesario la fabricación de una unidad de filtrado de menor tamaño y con capacidad para uno o tres cartucho de filtración, permitiendo reducir costo de materiales de fabricación de cartuchos y preparación de fluido para desarrollar la prueba. El número de pruebas sería mayor y en ambientes más controlados.
- Contar con diseño experimental impecable, teniendo muy claro las variables a medir y el momento apropiado para realizarlo, ya que una vez desarrolladas las pruebas los datos no medidos obligan a repetir la o las pruebas.
- Diseñar un excelente mecanismo para el control de calidad de los cartuchos que se están fabricando, para asegurar la repetitividad de los cartucho fabricados.
- Es necesario para la fabricación de cartuchos encordados desarrollar y crear el equipo que permita fabricarlo. Cada cambio en la longitud del cartucho y el paso del hilo hace necesario desarrollar una máquina encordadora.
- Las pruebas deben de ser programadas a intervalos de tiempo más extensos, con diferentes tipos de fluidos y concentración de sólidos suspendidos variables.
- Poseer o contar con el equipo capaz de medir la cantidad y el tamaño de partícula presente en una muestra de fluido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMAYA ANDRADE Yair, GUERRERO TORRES Odayr, Diseño, Construcción, Montaje Y Puesta En Marcha De Un Sistema De Filtración De Finos Para Fluidos De Completamiento Y Reacondicionamiento. Universidad Surcolombiana. Neiva, 2006.
- AMPUDIA CASTILLO Olga Teresa, GIRALDO GOMEZ Hellman Andrés, Optimización y Mejoramiento Continuo en el Mejoramiento de Salmueras Utilizadas Como Fluidos de Completamiento por La Empresa FLUIDOS Y SERVICIOS LTDA. Universidad Surcolombiana. Neiva, 2002.
- BRIDGES, Kenneth L., Completion and Workover Fluids. Richardson, Texas 2000
- Control, New Orleans, Louisiana, February 7-8, 1974. SPE Paper 4778.
- 'Filters and Filtration Handbook', T Christopher Dickenson, Elsevier, January 1, 1997
- Norden, Harry V. and Kauppinen, Petteri (1994). "Application of volumen balances and the differential diffusion equation to filtration" Separation Science and Technology 29(10):1319-1334
- PEREZ M, Jorge A. El fique, su taxonomía, cultivo y tecnología. 2 ed. Medellín: Colina. 1974.
- Perry, Robert H. *Manual del ingeniero químico*, 3ª ed. 1992, vol. 2, PP. 19-81
- RALPH S, Millhone, Completion Fluid for Maximizing Productivity – State of Art. Paper SPE 10030.
- Ruth, B. (1946), "Correlating Filtration Theory with Industrial Practice" en *Industrial and Engineering Chemistry*, 38:6, pp. 564-571
- SAND CONTROL, Halliburton Services. 1988.
- Y, Sanabria, M. F. Contreras; "Fibra de fique como refuerzo para materiales compuestos - Universidad de los Andes", IV Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica - Innovación Tecnológica, Energética y de Procesos con miras al TLC. Abril de 2008
- www.filtration-and-separation.com
- www.solidliquid-sepation.com

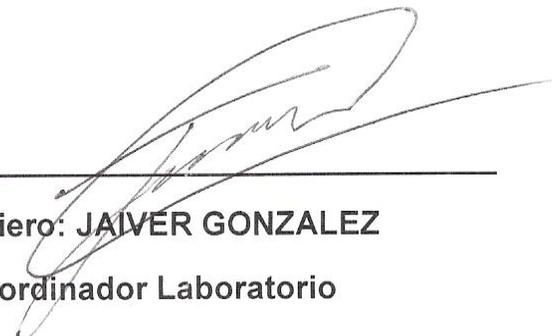
ANEXO A

CERTIFICACIÓN BRINDAD DE LOS ANDES S.A.

El laboratorio base Neiva de la compañía Brindad de los Andes S.A. Certifica que los tesisas Oscar Andrés Weck Delgado y Félix Augusto Serrato Tovar desarrollaron con nuestros equipos y fluidos, cinco pruebas con cartuchos encordados de algodón y fique para la tesis: Diseño y construcción de cartuchos de filtración de finos para fluidos de completamiento en la industria petrolera.

Durante el desarrollo de las prueba se analizó los sólidos suspendidos totales (SST) de las muestra tomadas en nuestro laboratorio.

Atentamente:



Ingeniero: **JAIVER GONZALEZ**

Coordinador Laboratorio



REPORTE RESULTADOS
DE ANALISIS
LABORATORIO BASE
NEIVA

CODIG
O: F-
FC-09
VERSI
N:2
VIGENC
IA: 29-
07-2011

FECHA DE ANALISIS: 30 Enero /2010
HORA: 15:00

TIPO DE MUESTRA: SALMUERA
ENTREGA: *Javier Gonzalez*
RECIBE: *Oscar Andres Weck,
Felix Augusto Benato*

TIPO DE FILTRO	MUESTR A n°	TIEMP O (Min)	SS (mg/l)	% Retenci ón	OBSERVACIONES
Algodón	1	5	141	0,0	La salmuera filtrada presenta una variación de color muy marcada, pasando de amarilla a un color transparente.
	2	10	138	35,3	
	3	15	125	36,7	
	4	20	121	42,7	
	5	25	118	44,5	
	6	30	115	45,9	
Fique	7	5	208	4,6	Desprendimiento de pequeñas partículas durante la filtración. Caudales altos.
	8	10	205	6,0	
	9	15	193	11,5	
	10	20	193	11,5	
	11	25	192	11,9	
	12	30	190	12,8	

PAULO GARZON
OPERADOR

WILSON RUBIANO
AUXILIAR LABORATORIO

JAIWER GONZALEZ
COORDINADOR



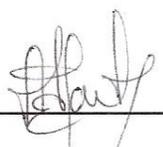
REPORTE RESULTADOS DE ANALISIS LABORATORIO BASE NEIVA
 CODIG O: F-FC-09
 VERSIO N:2
 VIGEN CIA: 29-07-2011

FECHA DE ANALISIS: *06 febrero 2010*
 HORA: *10:00 AM*

TIPO DE MUESTRA: *SALMUERA*
 ENTREGA: *Javier González*
 RECIBE: *Osuar Andres Wreak / Felix Augusto Semate*

TIPO DE FILTRO	MUESTR A n°	TIEMP O (Min)	SS (mg/l)	% Retenci ón	OBSERVACIONES
Algodón	13	5	142	43,0	Variación de color de la salmuera.
	14	10	129	48,2	
	15	15	122	51,0	
	16	20	119	52,2	
	17	25	118	52,6	
	18	30	116	53,4	
Fique	19	5	230	7,6	Desprendimiento de material perteneciente al medio filtrante del cartucho.
	20	10	219	12,0	
	21	15	207	16,9	
	22	20	205	17,7	
	23	25	203	18,5	
	24	30	201	19,3	


 PAULO GARZON
 OPERADOR


 WILSON RUBIANO
 AUXILIAR LABORATORIO


 JAIVER GONZALEZ
 COORDINADOR



**REPORTE RESULTADOS
 DE ANALISIS
 LABORATORIO BASE
 NEIVA**

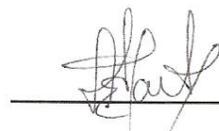
CODIG
 O: F-
 FC-09
 VERSIO
 N:2
 VIGEN
 CIA: 29-
 07-2011

FECHA DE ANALISIS: *13 Febrero/2010*
 HORA: *11:00 AM*
 TIPO DE MUESTRA: *SALMUERA*
 ENTREGA: *Javier González*
 RECIBE: *Oscar Andres Weck.
 Felix Augusto Serrato*

TIPO DE FILTRO	MUESTR A n°	TIEMP O (Min)	SS (mg/l)	% Retenci ón	OBSERVACIONES
Algodón	25	10	123	48,2	Disminución pronunciada del caudal de filtración. Salmuera de color transparente.
	26	20	111	53,7	
	27	30	104	56,9	
	28	40	99	59,2	
	29	50	87	64,7	
	30	60	82	67,0	



**PAULO GARZON
 OPERADOR**



**WILSON RUBIANO
 AUXILIAR LABORATORIO**



**JAIVER GONZALEZ
 COORDINADOR**

ANEXO B

CONTROL DE CALIDAD DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CARTUCHOS ENCORDADOS

El proceso de fabricación fue acompañado de un control de calidad enfocado en mantener los parámetros de fabricación de los cartuchos encordados constantes.

La tensión y el diámetro de cartuchos fueron los parámetros monitoreados y controlados durante el proceso de fabricación. Periódicamente se revisaba que la tensión del hilo al ser encorado fuese constante y el diámetro del cartucho se estuviera lo mas cercano posible 6.0 centímetros.

Se fabrico 45 cartuchos de fique y 30 de algodón. El diámetro y la masa se especifican en el cuadro siguiente:

Cartuchos encordados en algodón.

Muestra	Prueba uno		Prueba dos		Prueba tres	
	Diámetro (cm)	Masa (gr)	Diámetro (mm)	Masa (gr)	Diámetro (mm)	Masa (gr)
1	6.01	523	6.13	563	6.15	571
2	6.02	521	6.12	567	6.16	573
3	6.02	523	6.12	568	6.16	574
4	6.04	524	6.13	568	6.17	574
5	6.08	524	6.12	566	6.18	574
6	6.06	525	6.12	569	6.16	574
7	6.07	523	6.13	568	6.20	575
8	6.10	523	6.14	567	6.17	574
9	6.03	524	6.13	569	6.16	574
10	6.03	523	6.12	568	6.17	574
11	6.05	525	6.12	569	6.18	574
12	6.07	523	6.15	570	6.16	574
13	6.06	523	6.13	568	6.17	574
14	6.20	524	6.14	569	6.18	574
15	6.05	524	6.14	569	6.16	574

Cartuchos encordados en algodón.

muestra	Prueba uno		Prueba dos	
	Diámetro (cm)	Masa (gr)	Diámetro (mm)	Masa (gr)
1	5.99	479	6.12	501
2	6.00	483	6.16	503
3	5.98	484	6.17	507
4	6.04	485	6.13	510
5	5.96	483	6.16	510
6	5.95	485	6.17	512
7	6.07	488	6.16	513
8	6.08	483	6.16	509
9	5.93	486	6.17	512
10	6.00	483	6.17	514
11	5.96	484	6.17	513
12	6.00	484	6.16	517
13	6.00	485	6.16	511
14	5.98	485	6.16	511
15	6.00	483	6.17	513

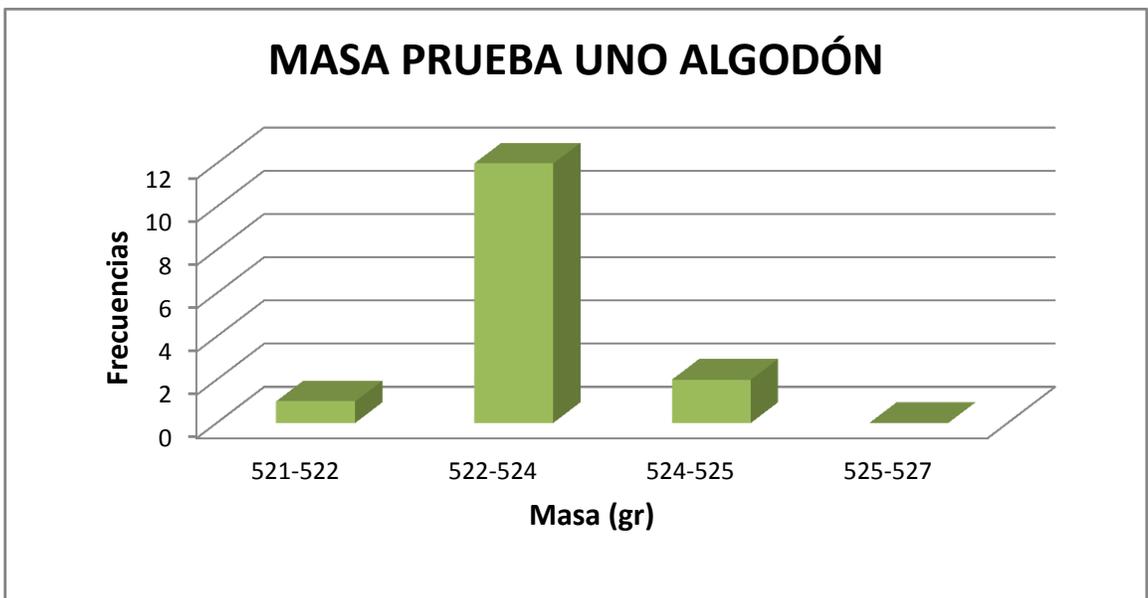
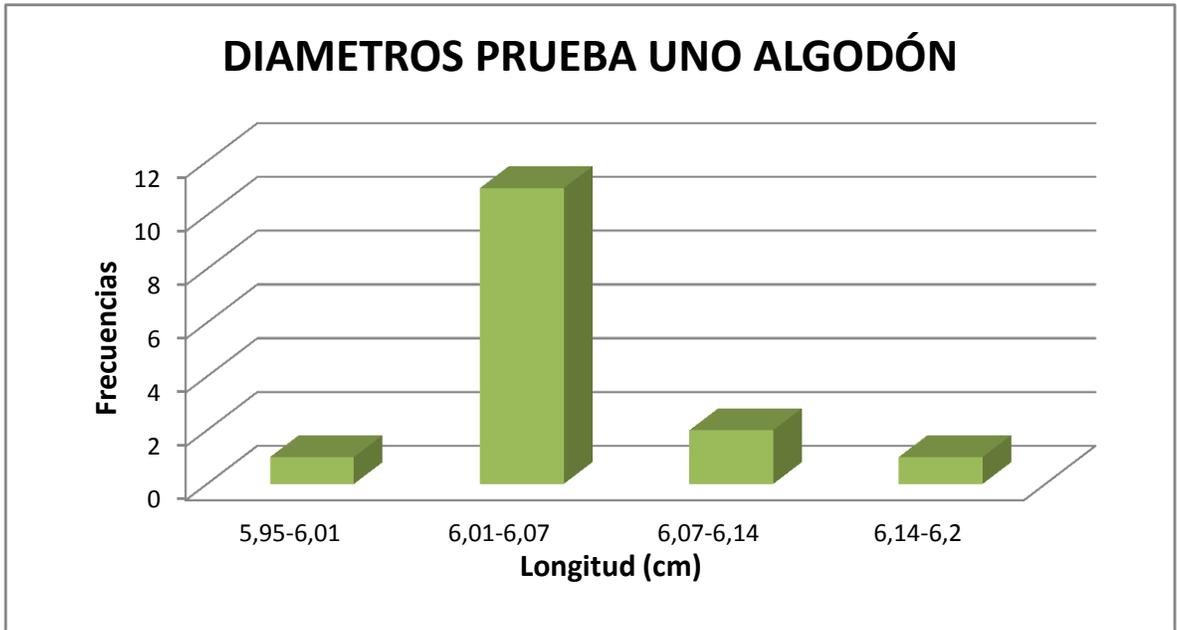
ANALISIS ESTADISTICO

Media o mediana para el Peso y diámetro de cartuchos encordados

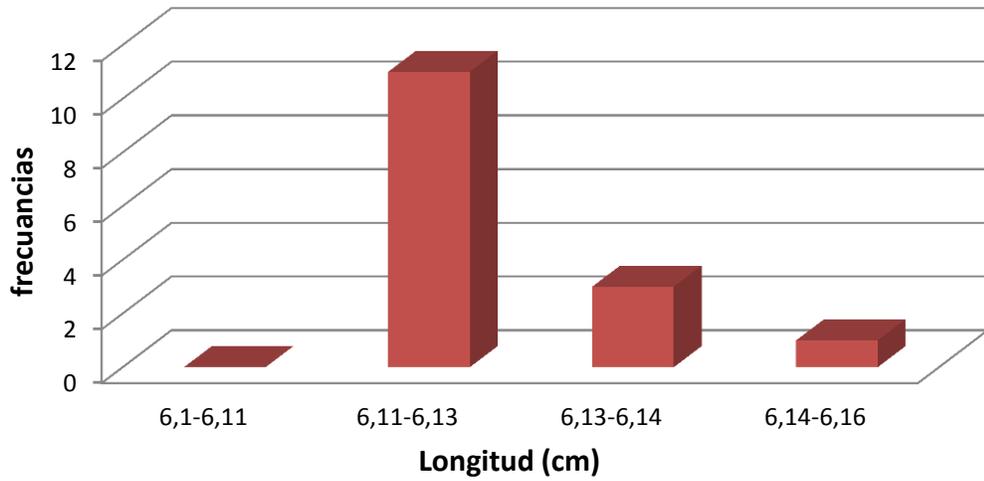
Prueba		Media (Diámetros)	Media (Masas)
Fique	1	6.05	489
	2	6.15	511
Algodón	1	6.05	523
	2	6.12	565
	3	6.17	573

A los diámetros y pesos registrados se les realizo un histograma con el fin de observar la dispersión de las dos variables.

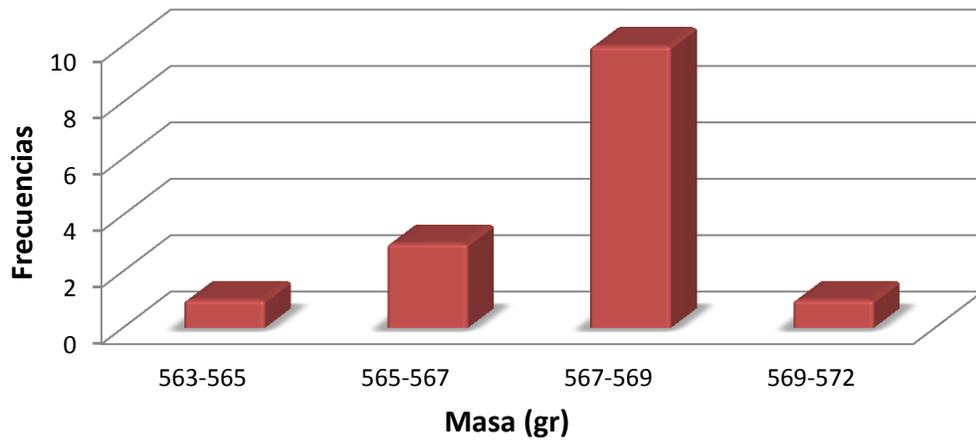
- Histogramas pruebas cartuchos de algodón



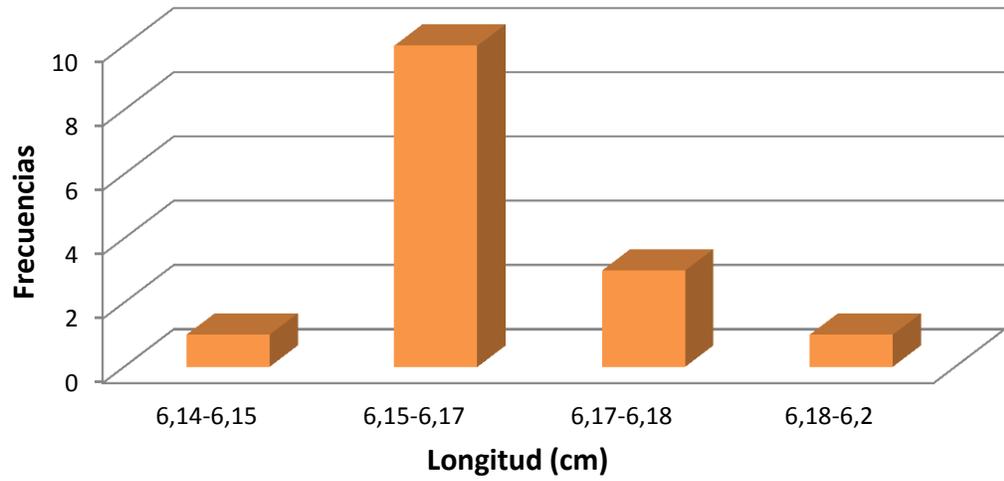
DIÁMETROS PRUEBA DOS ALGODÓN



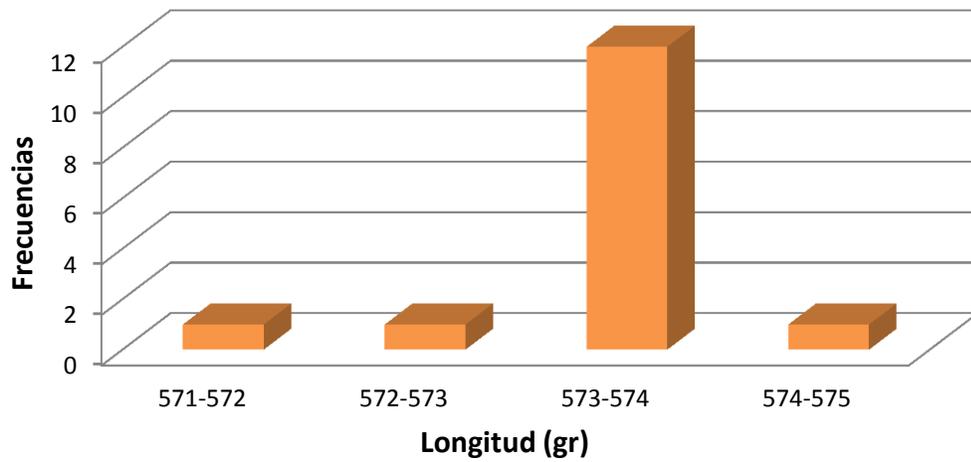
MASA PRUEBA DOS ALGODÓN



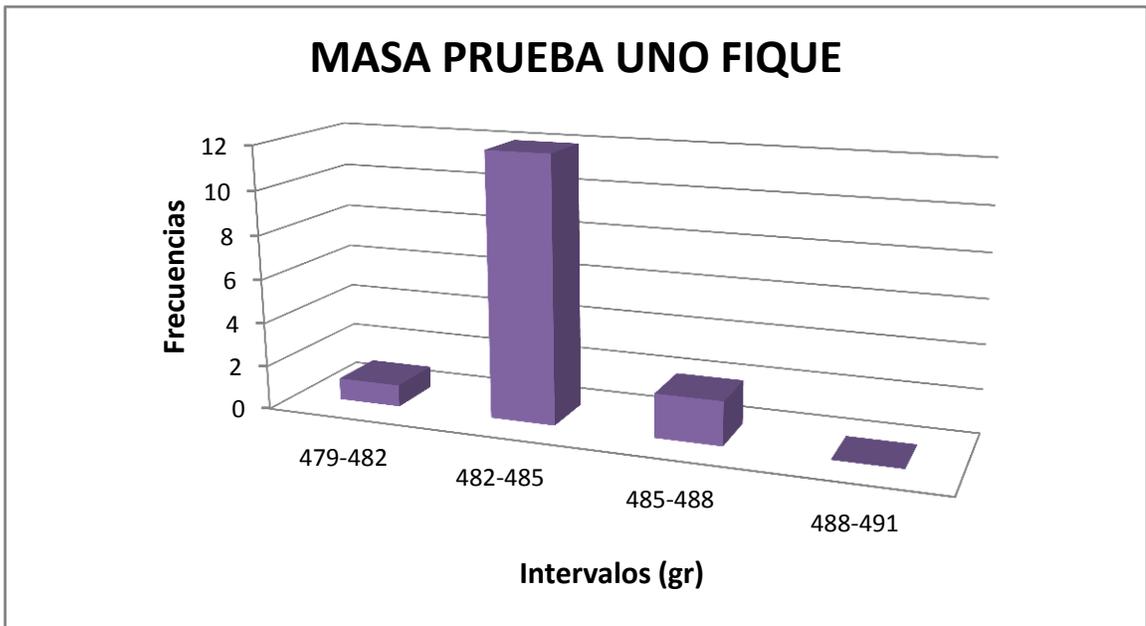
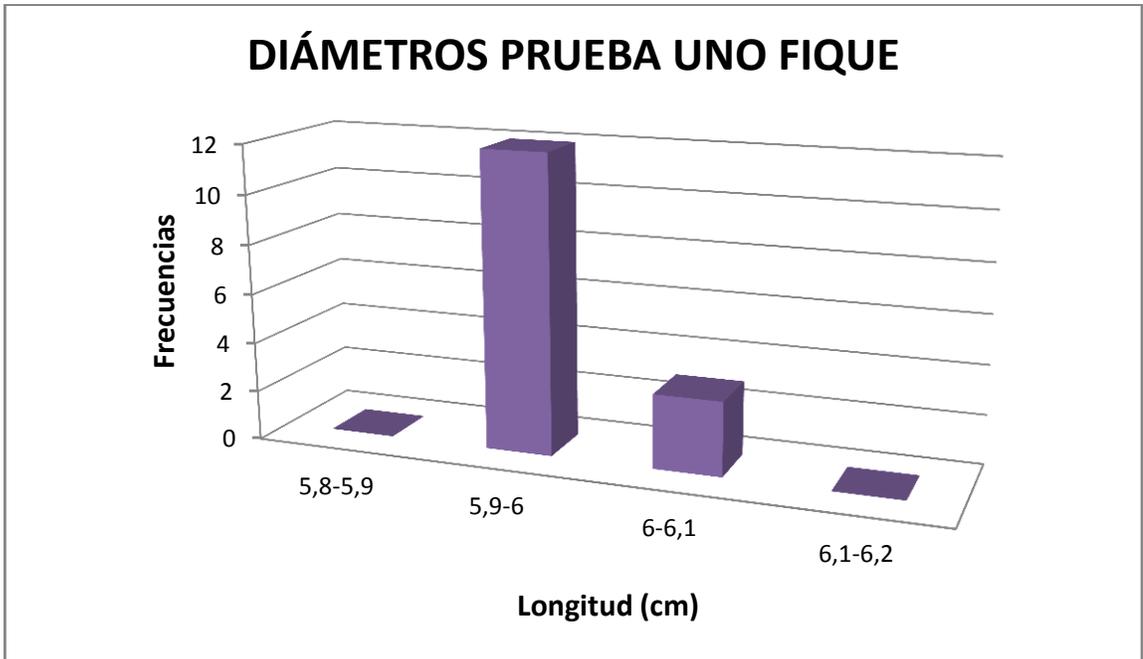
DIÁMETROS PRUEBA TRES ALGODÓN



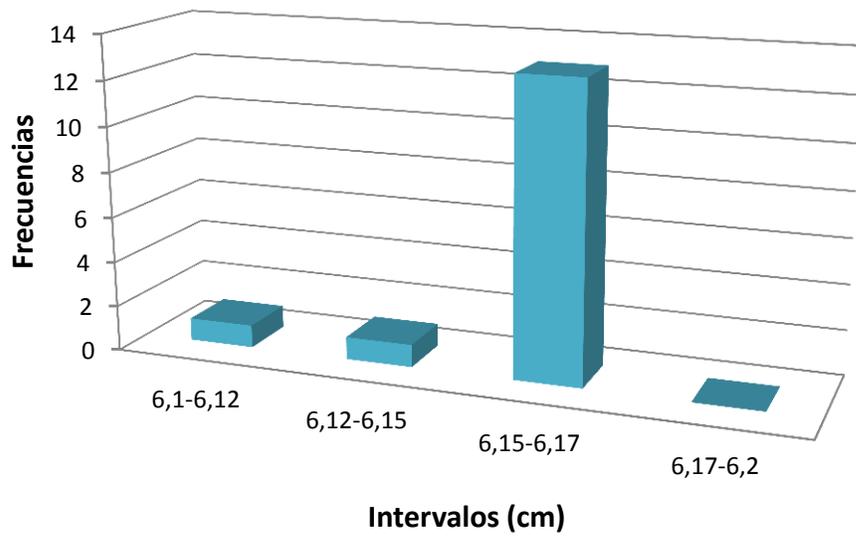
MASA PRUEBA TRES ALGODÓN



- Histogramas pruebas cartuchos de Fique



DIÁMETROS PRUEBA DOS FIQUE



MASA PRUEBA DOS FIQUE

