



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Resultados de Pruebas de
Laboratorio para la Caracterización
de Equipo de Alta Eficiencia para el
Control de la Producción de Sólidos
en Superficie**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Petrolera

P R E S E N T A

Laura Cecilia Sánchez Sánchez

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Israel Castro Herrera



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Introducción

La necesidad de separar los sólidos de los fluidos de producción surge a raíz de que este es uno de los principales problemas a los que actualmente se enfrenta la industria petrolera y a pesar de ser un tema extensamente estudiado, sigue causando muchos problemas. El arenamiento de los pozos se presenta durante la explotación de campos productores de hidrocarburos geológicamente jóvenes y/o con fracturamiento hidráulico inducido con apuntalante (conlleva a riegos de retorno de arena prematuro). Los materiales provenientes de las formaciones “poco consolidadas” o arenas de fractura, erosionan a los equipos de producción, instalaciones superficiales y subsuperficiales aumentando los gastos de mantenimiento y afectando la productividad de los pozos.

La producción de sólidos constituye una problemática vigente en el mundo que repercute drásticamente en la explotación de los campos; puede dañar los equipos de fondo de pozo e instalaciones superficiales, incrementando los costos de operación y provocando producción diferida. El control de la producción de sólidos es un tema complejo, que ha originado que las compañías operadoras dispongan de una amplia gama de tecnologías y conocimientos técnicos especiales disponibles, sin que a la fecha exista un sistema, herramienta o producto químico que resuelva la problemática en cuestión.

Los problemas de producción de sólidos de formación suelen presentarse en aquellas formaciones no consolidadas, cuyos componentes mayoritarios son granos finos y en donde el material cementante no provee suficiente fuerza de cohesión para soportar los esfuerzos ocasionados por el paso de fluidos a través de ellos, esto origina un desprendimiento de los sólidos y por consiguiente el arrastre de las partículas más finas hacia el interior del pozo, que puede ser en forma de granos individuales.

Se conoce como control de la producción de sólidos de formación o apuntalante de fractura hidráulica, al conjunto de técnicas aplicadas, mediante las cuales se disminuye total o parcialmente su aporte a través del sistema integral de producción.

El desprendimiento de partículas de formación o apuntalante de fractura, no ocurre súbitamente, sino que es directamente proporcional a la variación de esfuerzos en el medio poroso, el desprendimiento va aumentando gradualmente hasta llegar a cantidades de arena no manejables por los sistemas de producción, por lo que se deben identificar los pozos para su atención particular con soluciones específicas, ya que una vez que estos llegan a generar cantidades críticas de arena, no hay manera de detener la producción de la misma.

Para controlar la producción de sólidos, se emplean diversas técnicas operativas tales como la optimización de los diseños de fracturamiento y el gasto de producción o técnicas mecánicas tales como instalación de empaques de grava o los cedazos (filtros) autónomos, además de la opción química (consolidación de la roca con la inyección de resinas), apuntalante revestido de resina para estabilizar la región vecina al pozo.

Entre las medidas correctivas para controlar la acumulación de sólidos, en la superficie se han empleado diversas tecnologías, entre ellas los equipos para retener sólidos en superficie, para la adecuada caracterización de estos equipos es necesario conocer el tipo de sólidos que serán producidos.

En este trabajo se presentan los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas para caracterizar un equipo de alta eficiencia para el control de la producción de sólidos en superficie. Las pruebas consisten en caracterizar las partículas de acuerdo con su morfología y composición química. El equipo por caracterizar es un separador ciclónico que funciona debido a la fuerza centrífuga, capaz de separar material como apuntalante y arena de formación de los fluidos de producción, mismo que se someterá a pruebas tecnológicas para verificar su eficiencia.

Contenido

1	Generalidades.....	1
1.1	Terminación de pozos	1
1.1.1	Terminación en agujero descubierto	1
1.1.2	Terminación en agujero entubado	2
1.2	Estimulación de pozos	4
1.2.1	Daño a la formación	4
1.2.2	Tipos de estimulación.....	5
1.3	Arenamiento.....	¡Error! Marcador no definido.
1.3.1	Causas del arenamiento	8
1.3.2	Problemas causados por la producción de sólidos	11
1.4	Técnicas para el control de sólidos	12
1.4.1	Consolidación química o estabilización de la formación.....	13
1.4.2	Fase, orientación y tamaño óptimo de los disparos.....	14
1.4.3	Empaque de grava	14
1.4.4	Liner ranurado	14
1.4.5	Cedazos.....	15
1.4.6	Cedazos expandibles	15
1.4.7	Separadores superficiales.....	16
2	Tecnologías para el control superficial de sólidos.....	17
2.1	Desarenadores.....	17
2.2	Separadores horizontales.....	18
2.3	Separadores verticales	18
2.4	Separadores ciclónicos	19
2.4.1	Origen	19
2.4.2	Descripción	20
2.4.3	Dimensiones	22
2.4.4	Clasificación	23
2.4.5	Aplicación	24
2.4.6	Patentes.....	25
3	Descripción del equipo de alta eficiencia para el control superficial de sólidos.....	28

3.1	Beneficios del uso de la tecnología	28
3.2	Necesidades que satisface el equipo.....	28
3.3	Descripción del equipo	29
3.4	Componentes del equipo superficial de sólidos	30
3.4.1	Múltiple de entrada de flujo.....	30
3.4.2	Unidades de separación de sólidos (US)	30
3.4.3	Ensamble salida de flujo.....	30
3.4.4	Múltiple de flujo inverso.	30
3.4.5	Múltiple de descarga de sólidos.....	30
3.4.6	Sistema de seguridad.	31
3.4.7	Múltiple de salida de flujo.....	31
3.4.8	Sistema de recuperación de sólidos (SRS).....	31
3.4.9	Sistema de adquisición de datos.....	31
3.5	Principio de funcionamiento	32
3.6	Aplicación del sistema	32
4	Análisis a muestras de sólidos.....	33
4.1	Metodología	34
4.2	Resultados	37
4.2.1	Limpieza y secado.....	37
4.2.2	Análisis granulométrico.....	38
4.2.3	Clasificación de los diámetros de los sedimentos	42
4.2.4	Esfericidad y redondez	43
4.2.5	Composición química	52
4.2.6	Fluorescencia de Rayos-X (semicuantitativa).....	55
5	Pruebas de caracterización y de eficiencia de separación	57
5.1	Equipos	57
5.2	Metodología	59
5.2.1	Metodología para pruebas de caracterización de caída de presión contra el gasto en el ESSS con flujo monofásico.....	60
5.2.2	Metodología para pruebas de eficiencia de separación de sólidos a diferente gasto de flujo, bajo condiciones de baja presión.....	62
5.2.3	Metodología para pruebas de eficiencia de separación bajo condiciones de alta presión. .	63

5.3	Resultados	63
5.3.1	Resultados pruebas de caracterización de caída de presión contra el gasto en el ESSS con flujo monofásico.....	63
5.3.2	Resultado pruebas de eficiencia de separación de sólidos a diferentes gastos de flujo, baja presión. 65	
5.3.3	Resultado de eficiencia de separación a condiciones de alta presión.	66
5.4	Discusión de resultados.....	67
6	Conclusiones.....	71
7	Bibliografía.....	73
8	Índice de Figuras.....	75
9	Índice de gráficos.....	76
10	Índice de tablas.....	76
11	Índice de imágenes.....	77

1 GENERALIDADES

1.1 TERMINACIÓN DE POZOS

La terminación de un pozo petrolero es el sistema de procesos ejecutados (disparos, fracturamientos, inducción) y accesorios (aparejo, sistemas artificiales, válvulas, sensores) que se instalan dentro del pozo para comunicar el yacimiento con la superficie y así producir hidrocarburos o en su caso, inyectar fluidos a la formación, es también, la continuación directa de la perforación, se complementan y son igualmente importantes. Es a través de la terminación de un pozo por donde se extraen los hidrocarburos desde el yacimiento, hasta la superficie.

La terminación de un pozo involucra en su planeación todas las consideraciones técnicas para la producción de hidrocarburos, esta se inicia después de cementar la última tubería de revestimiento, o en su caso, después de perforar y tomar registros de la etapa que quedará en agujero descubierto, con la finalidad de dejar el pozo produciendo. Al ser tan importante esta se debe planear y elaborar un programa donde se indique la secuencia de trabajos por realizar. Se debe incluir el estado mecánico, así como los accesorios a utilizar.

Existen diferentes tipos de terminación de pozos. Cada uno de ellos es elegido de acuerdo con las condiciones mecánicas y geológicas presentes en el yacimiento.

1.1.1 Terminación en agujero descubierto

La terminación en agujero descubierto consiste en perforar la zona productora una vez que se ha cementado la última tubería de revestimiento o liner hasta el tope de la zona de interés, dejando la zona productora sin revestimiento. Este tipo de terminaciones son las más económicas y permiten que exista una gran área de contacto entre el pozo y el yacimiento, por lo mismo es ideal para formaciones bien consolidadas y con baja permeabilidad ya que en este tipo de terminaciones la formación no tiene soporte y tiende a desmoronarse.

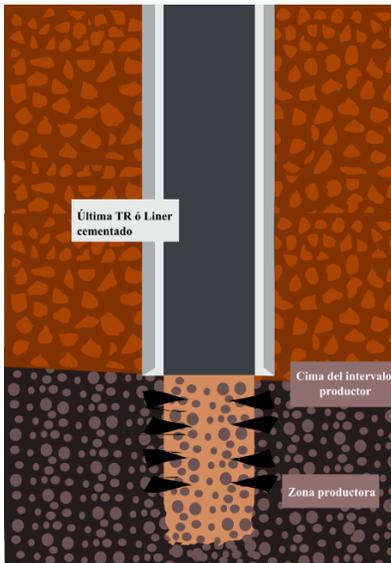


Figura 1. Terminación en agujero descubierto.

Este tipo de terminaciones se encuentra restringido a formaciones altamente consolidadas como lo son las calizas y que además no se espera producción de agua/gas ni producción de arena o derrumbes de la formación, todo esto para que el agujero se mantenga libre de sólidos a lo largo de la vida operativa del pozo, Por eso mismo también debe de realizarse en yacimientos con baja presión en su zona productora en donde el intervalo de aceite y gas es lo suficientemente grande y homogéneo.

1.1.2 Terminación en agujero entubado

La terminación en agujero entubado consiste en perforar la zona productora y una vez que está es perforada, una tubería de revestimiento o liner es introducida y cementada. Este es uno de los diseños más utilizados actualmente ya que ofrece más posibilidades para efectuar reparaciones subsecuentes a los intervalos productores y también es posible probar indistintamente algunas zonas de interés y explotar varias al mismo tiempo.

La forma en que se van a comunicar la formación y el pozo puede ser de dos maneras distintas, la primera utilizando tuberías de revestimiento completas que serán atravesadas usando herramientas externas para la perforación in situ de las tuberías, estas son las pistolas, las cuales son fuertes explosivos enfocados en una dirección por medio de cargas huecas.

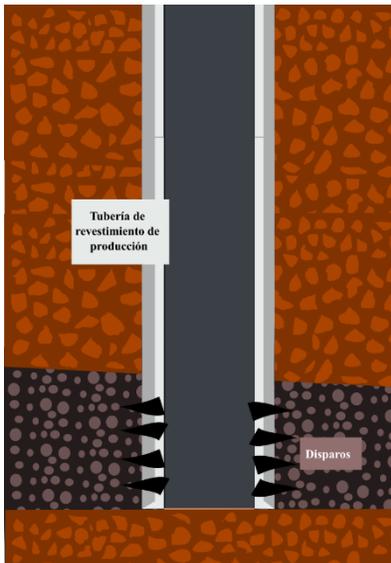


Figura 2. Terminación en agujero entubado.

La segunda forma de comunicación será a través de tuberías de revestimiento que poseen una sección abierta a lo que llaman ranuras, este tipo de terminación es menos utilizado debido a que la tubería de revestimiento es debilitada a causa del ranurado.

La terminación a través de tuberías ranuradas constituye la manera más sencilla de controlar la producción de arena en pozos, esto dependerá del tamaño de sólidos que pueda producir el yacimiento, sólo podrá retener las partículas que sean más grandes que la amplitud de las rejillas y este mecanismo se utiliza sólo si se tiene una arena bien caracterizada y con un tamaño de grano grande ya que de lo contrario la rejilla podría taponarse.

Este tipo de terminación se utiliza en formaciones no compactadas debido a problemas de producción de fragmentos de rocas y de la formación. Generalmente dónde se producen petróleos pesados.

1.1.2.1 Terminación con tubería ranurada no cementada

Para esta terminación la tubería ranurada es colocada a lo largo del intervalo de interés, esta tubería puede ser empacada con grava para impedir la producción de arena hacia el pozo.

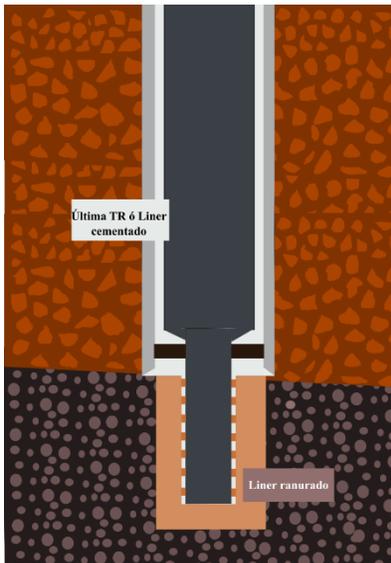


Figura 3. Terminación con tubería ranurada no cementada.

1.2 ESTIMULACIÓN DE POZOS

La estimulación de pozos es un tratamiento que ayuda a restaurar o mejorar la productividad de un pozo, a partir de este se crea o restituye un sistema extensivo de canales en la roca productora de un yacimiento para facilitar el flujo de fluidos a través de la formación de un yacimiento al pozo o viceversa. Los principales objetivos de la estimulación son: para pozos productores, incrementar la producción de hidrocarburos para pozos inyectores, aumentar la inyección de fluidos como agua, gas o vapor, y para procesos de recuperación secundaria y mejorada se utiliza como una técnica para optimizar los patrones de flujo.

1.2.1 Daño a la formación

El daño a una formación productora de hidrocarburos se manifiesta como la pérdida de productividad o inyectividad ya sea parcial o total y que puede ser natural o inducida, esto como resultado de un contacto de la roca con fluidos y materiales ajenos a la formación o bien como resultado de una obturación a los canales de flujo durante la vida productiva natural del pozo, lo anterior da como resultado una zona de permeabilidad alterada que es conocida como la “zona dañada”.

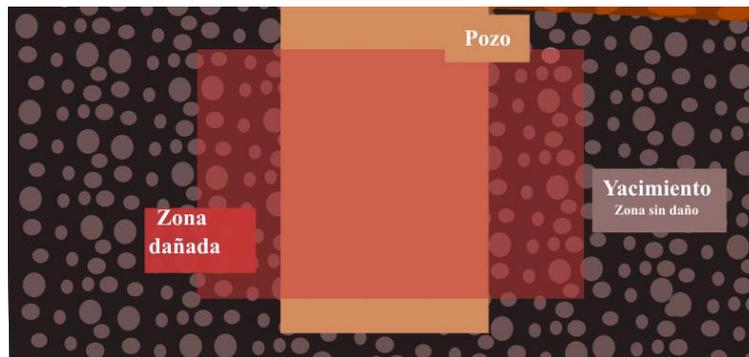


Figura 4. Zona dañada.

1.2.2 Tipos de estimulación

Para lograr la estimulación en pozos existen diferentes técnicas:

- Estimulación matricial: ácida y no ácida
- Fracturamiento hidráulico: ácido y con apuntalante

1.2.2.1 Estimulación matricial

Se divide en dos tipos:

- Ácida
- No ácida

1.2.2.1.1 Ácida

Este tipo de estimulación se da cuando los fluidos de tratamiento reaccionan químicamente y disuelven materiales que dañan la formación y los propios sólidos de la roca. La estimulación es empleada para remover algunos tipos de daño como los causados por arcillas, precipitaciones inorgánicas, etcétera. También es utilizada para estimular la productividad natural del pozo, a través del mejoramiento de la permeabilidad de la formación en la vecindad del pozo (arenas, areniscas y en rocas calcáreas).

1.2.2.1.2 No ácida

En este tipo de estimulación los fluidos de tratamiento no reaccionan químicamente con los materiales o sólidos de la roca. Estas estimulaciones son comúnmente empleadas para remover daños por bloqueos de agua, aceite o emulsión; daños por pérdida de lodo, por depósitos orgánicos etcétera.

Los fluidos comúnmente utilizados son: soluciones oleosas o acuosas, alcoholes o solventes mutuos, acompañados principalmente de surfactantes u otros aditivos afines.

1.2.2.2 Fracturamiento hidráulico

Las técnicas de fracturamiento hidráulico constituyen el medio por el cual se mejora la productividad de un pozo mediante la creación de un canal altamente conductivo en la formación productora de hidrocarburos para facilitar el aporte o inyección de los fluidos del yacimiento al pozo o viceversa, teniendo una marcada influencia en el patrón de flujo y distribución de presiones en la formación, cambiando de flujo radial a lineal lo que disminuye las pérdidas de presión en el yacimiento incrementando la productividad del pozo.

La operación de fracturamiento hidráulico consiste en la inyección de un fluido altamente viscoso al pozo, por encima de la presión de fractura de una formación, con el objeto de generar en ella canales de flujo (fracturas) y colocar un elemento de empaque (arena) que permita incrementar la conductividad de la formación y, por ende, el flujo de fluidos hacia el pozo.

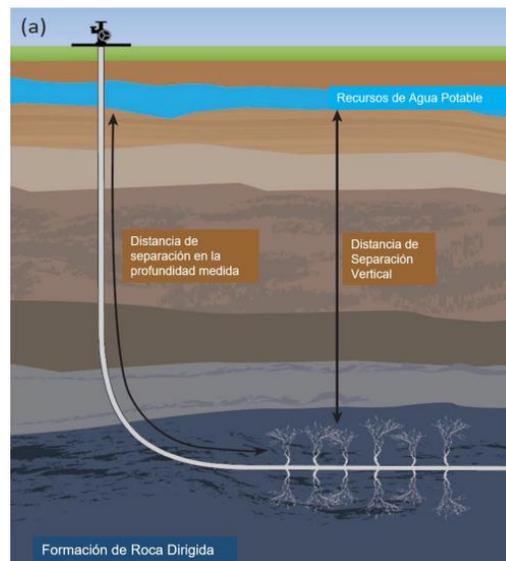


Figura 5. Fracturamiento hidráulico. ¹

1.2.2.2.1 Ácido

El fracturamiento con ácido es la técnica de acidificación más utilizada para la estimulación de formaciones de caliza y dolomía, esto es de formaciones carbonatadas. Consiste en la inyección de un volumen de fluido a la formación, un gasto mayor que el que ésta puede aceptar, provocando una falla en la roca e iniciando una fractura cuya longitud y amplitud serán incrementadas al continuar la inyección, después se inyecta un ácido en solución el cual reacciona con los minerales de la formación disolviéndolos y creando un canal de flujo altamente conductivo.

¹ Héctor E. Muñoz H., 2017.

Este tipo de fracturamiento no se utiliza en areniscas debido a la dificultad existente para que la fractura grabada se mantenga abierta después del tratamiento, ni tampoco cuando existe alguna intercalación de lutita ó de alguna otra frontera natural al flujo.

1.2.2.2.2 Con apuntalante

El proceso consiste en aplicar presión a una formación, hasta que se produce en ésta una falla o fractura. Una vez producida la rotura, se continúa aplicando presión para extenderla más allá del punto de falla y crear un canal de flujo de gran tamaño que conecte las fracturas naturales y produzca una gran área de drene de fluidos del yacimiento. El efecto de incremento de drene de fluidos decrece rápidamente con el tiempo. Esto se debe a que la fisura se cierra y el pozo vuelve a sus condiciones casi originales. Para evitar el cierre de la fractura, se utiliza la técnica de inyectar el fluido de fractura cargado de apuntalante, el cual actúa como sostén de las paredes abiertas de la fractura. Los granos de arena actúan como columnas, evitando el cierre de la fisura, pero permitiendo el paso de los fluidos de la formación. Durante la operación, el bombeo de fluido se realiza de forma secuencial, primero se bombea un precolchón de salmuera o gel lineal, con el objeto de obtener parámetros y poder optimizar el diseño propuesto. Posteriormente se bombea un colchón de gel como fluido, el cual produce la fractura y abre la roca lo suficiente como para que pueda ingresar el agente de sostén; luego, se realiza el bombeo de tratamiento, que es un fluido cargado con arena, el cual apuntala la fractura y la mantiene abierta.

Para controlar la operación, se deben registrar continuamente los valores de:

- Presión
- Gasto
- Dosificación del apuntalante
- Dosificación de aditivos
- Condiciones del fluido fracturante (control de calidad)
-

Durante el proceso se deben monitorear en superficie las presiones siguientes.

- Presión de rotura: es el punto en que la formación falla y se rompe
- Presión de bombeo: es la necesaria para extender la fractura, manteniendo el gasto constante

1.3 PRODUCCIÓN DE SÓLIDOS

La producción de sólidos es la producción de pequeñas o grandes partículas junto con los fluidos que son producidos del yacimiento debido a la baja consolidación de la formación productora. Dentro de la industria comúnmente se utiliza el término producción de sólidos en lugar de producción de arena ya que, esto podría implicar que solo las areniscas frágiles o poco consolidadas son las que están susceptibles de ser producidas.

La producción de sólidos es un problema serio en muchos activos de petróleo y gas debido a que los yacimientos con este tipo de problemas son el porcentaje que sigue creciendo en las reservas mundiales ya que muchos de estos son explotados más allá de los límites de su vida útil que originalmente fue estimada, esto puede traducirse en formaciones debilitadas.

La producción de sólidos se asocia generalmente con las formaciones terciarias más jóvenes, tales como arenas del Mioceno, Eoceno y Plioceno. Estas formaciones se presentan en áreas costa afuera como el Golfo de México, África Occidental, Brasil, en el mar de Malasia y Brunéi, son generalmente yacimientos con alto potencial económico. Sin embargo, la producción de sólidos puede presentarse en cualquier tipo de formación, así como en pozos con fracturamiento hidráulico, en los cuales el apuntalante pierde las condiciones de estabilidad y es desprendido de la fractura por acción del flujo de fluidos.

Factores como son la estructura de la roca del yacimiento, los esfuerzos efectivos que actúan en la formación y el tipo de terminación usada en el pozo influyen en la producción de sólidos.²

Un pozo requiere de técnicas de control de arenas, si es susceptible o produce granos de arena de una porción de matriz del yacimiento; cabe recalcar que, “finos móviles”, que son partículas dispersas de arcilla minerales pueden fluir a través de las gargantas de poros, por lo que no son considerados problemas que requieran control.³

El problema de producción de sólidos en hidrocarburos se encuentra alrededor del mundo, principalmente en zonas donde se explotan campos terciarios. Por tal razón, Además de conocer cuál es la definición de producción de arena también es importante conocer cuáles son los factores y las causas que lo provocan.

1.3.1 Causas de la producción de arena

Para encontrar la presencia de producción de sólidos en los hidrocarburos se pueden presentar varios factores que propician y agravan la producción de arena, es muy importante tener en cuenta todos los factores para optimizar la vida productiva del pozo o bien del campo.

En campos con formaciones poco consolidadas, el simple flujo de fluidos del yacimiento hacia el pozo puede acarrear sólidos que en ciertos casos generan problemas en producción.

Conocer las causas de la producción de sólidos nos conlleva a estudiar las fuerzas que mantienen unidas a los granos de areniscas, este factor puede describir la naturaleza del material de formación y las causas por las que puede llegar a fallar la estructura.

² Rahmati, 2013

³ O. Suman, 1982

Los factores que influyen en la tendencia de un pozo para producir sólidos son:

- El grado de consolidación de la formación
- Reducción de la presión de poro a través de la vida del pozo
- Tasa de producción
- La viscosidad de los fluidos del yacimiento
- Incremento de la producción de agua a lo largo de la vida del pozo
- Ritmo de producción alto
- Actividades de perforación y terminación del pozo

1.3.1.1 Grado de consolidación de la formación

El grado de consolidación de la formación está directamente relacionado con la cohesión de la roca, es la razón de que un pozo se encuentra abierto y no colapse, debido a la cantidad de material cementante que mantiene unidos los granos. Una característica mecánica de la roca que está relacionada con la consolidación es la resistencia a la compresión.

Las rocas sedimentarias consolidadas bien cementadas tienden a ser más resistentes, mientras que las no consolidadas, pobremente cementadas, son más débiles. Los granos de formación en yacimientos de areniscas débiles se sueltan de la matriz de la roca.

1.3.1.2 Reducción de la presión de poro

La presión de poro disminuye de acuerdo con el ritmo de explotación del yacimiento, por lo tanto, los esfuerzos en la formación tienen un mayor impacto en la roca, liberando sólidos, o produciendo mayor cantidad de finos. Este fenómeno se produce en yacimientos de alta porosidad y baja densidad.

1.3.1.3 Tasa de producción

Una diferencial de presión producida entre la formación y el pozo genera fuerzas de arrastre que exceden la resistencia a la compresión de la roca, lo que ocasiona la producción de sólidos por la desestabilización de los granos y del material cementante.

1.3.1.4 La viscosidad de los fluidos del yacimiento

Es la resistencia de los fluidos producidos a fluir a través de los granos de la formación. Impacta en las fuerzas de arrastre ejercidas en el yacimiento, la viscosidad y la velocidad de flujo son los dos parámetros fundamentales para la magnitud de la fuerza de fricción. Con el aumento de la viscosidad del fluido aumenta la fuerza de arrastre en el yacimiento y, por lo tanto, la producción de sólidos.

1.3.1.5 Incremento en la producción de agua

La producción de agua tiene cuatro efectos: reduce las fuerzas capilares por lo que se reduce la cohesión en los granos de arenas, incrementa potencialmente el arrastre de las partículas de arena, cambia la permeabilidad relativa, por lo tanto, incrementa la caída de presión en los granos de arena, y debilita el cemento (especialmente en arcillas) que mantienen las partículas de arena juntas.⁴

La incursión del agua en los yacimientos se interpreta como una reducción de la presión capilar debido al incremento de la saturación de la fase mojante, este fenómeno se presenta en yacimientos mojables por agua, la cohesión entre los granos es determinada por la tensión superficial en cada uno de los granos de arena, por lo que al momento de presentarse la producción de agua la fuerza de tensión superficial es reducida, generando así que el agua producida desestabiliza los arcos de arena generando con ello la producción de sólidos.

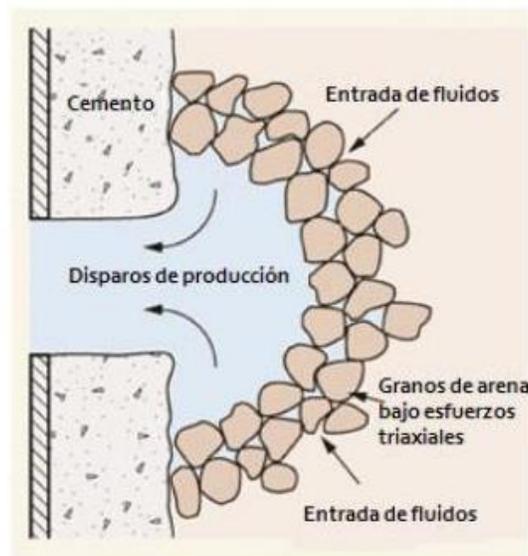


Figura 6. Geometría de un arco de arena alrededor de los disparos de producción (K. Ott & D. Woods, 2001)

1.3.1.6 Ritmo de producción alto

Este es uno de los factores más importantes, al tener un ritmo de producción alto el yacimiento es sometido a grandes esfuerzos por presión diferencial en el fondo del pozo, el gradiente de presión y las fuerzas de arrastre pueden exceder la resistencia de la roca haciendo que falle con mayor facilidad.

1.3.1.7 Actividades de perforación y terminación del pozo

Fracturamiento hidráulico no planificado, invasión del lodo, deficiente cementación del pozo, disparos mal diseñados, incrementos de la producción de agua.

⁴ Mc. Phee et. al., 2000

1.3.2 Problemas causados por la producción de sólidos

Las fallas producidas a escala de grano de arena durante la explotación de hidrocarburos pueden provocar problemas de estabilidad de pozos, colapso de la tubería de revestimiento, reducción de la producción y, en casos extremos, la pérdida del pozo. En condiciones de flujo a alta velocidad, los granos de arena erosionan la tubería y pueden convertirse en obstrucciones fijas o móviles. La capacidad de erosión de la arena depende de varios factores, incluyendo el volumen de arena producida, la velocidad de las partículas de arena y el ángulo de impacto.⁵

Entre los problemas causados por la producción de sólidos se encuentran:

1.3.2.1 Acumulación de sólidos en equipos de superficie

Los sólidos pueden ser acarreados a superficie cuando la velocidad de producción es lo suficientemente grande, esto puede ocasionar obstrucciones fijas cuando los sólidos quedan atrapados en los equipos de superficie o líneas de producción. Cuando se tiene un volumen grande de sólidos acumulados, es necesario realizar una intervención de limpieza.

1.3.2.2 Acumulación de sólidos en el fondo del pozo

Los sólidos no siempre son acarreados hacia superficie, cuando la velocidad de producción no es lo suficientemente grande, estos se comenzarán a acumular en el fondo del pozo, ocasionando que el interior del pozo o la tubería de revestimiento se llene. Esta condición reduce la tasa de producción, es necesario realizar una limpieza al pozo y restaurar la producción.

1.3.2.3 La erosión de los equipos de fondo de pozo y de superficie

En pozos de alta productividad, los fluidos a gran velocidad fluyen llevando arena, lo cual puede producir erosión excesiva en los equipos de fondo de pozo y de superficie, que conduce a un mantenimiento frecuente para reemplazar el equipo dañado.⁶

1.3.2.4 Colapso de la formación

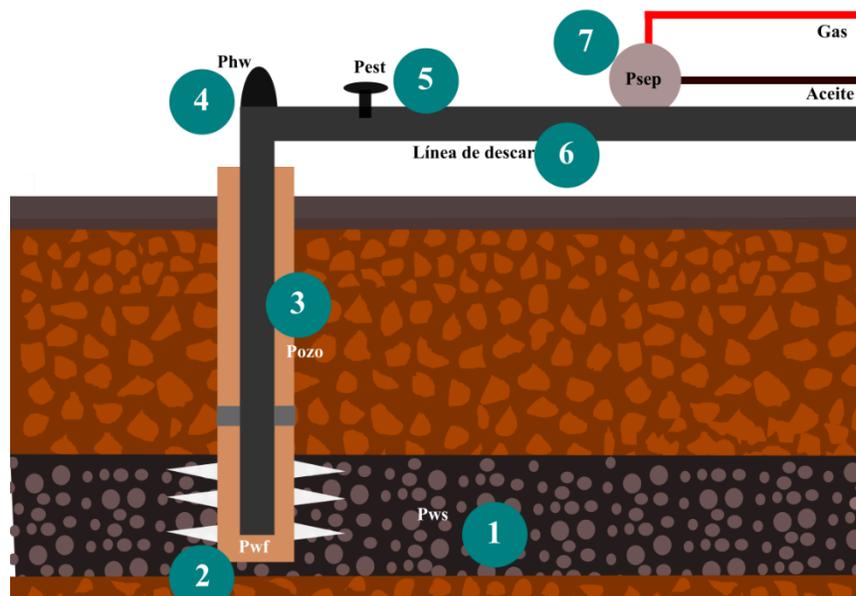
La producción de sólidos puede tener una tasa suficientemente grande y continua durante un periodo de tiempo, al grado de crear huecos en la formación que pueden ir creciendo conforme se producen más sólidos, cuando el hueco es lo suficientemente grande la formación puede colapsar debido a la falta de material que proporciona un soporte. Al colapsar la formación, los granos de arena se reorganizan y tienden a crear una permeabilidad más baja de la que existía originalmente

⁵ A. Acock, T. O'Rourke & D. Shirmboh, 2004

⁶ K. Ott & D. Woods, 2001

1.4 TÉCNICAS PARA EL CONTROL DE SÓLIDOS

Los sólidos provenientes del yacimiento (arena de formación o apuntalante de fracturamiento hidráulico) son arrastrados a través del sistema integral de producción, afectando directamente la productividad de los pozos y la integridad de los equipos e instalaciones. Se han desarrollado muchas tecnologías para la mitigación y manejo de la producción de sólidos, las cuales, se clasifican en técnicas mecánicas, químicas, o combinadas. Existe gran variedad de herramientas y dispositivos que pueden ser instalados dentro del Sistema Integral de Producción.



Donde:

1. Yacimiento
2. Pozo
3. Tubería de Producción
4. Cabeza del pozo
5. Estrangulador
6. Línea de descarga
7. Separadores

Figura 7. Sistema Integral de Producción.

Estas tecnologías se han desarrollado para minimizar o eliminar la producción de sólidos. Sin embargo, cada una tiene su grado de efectividad dependiendo de las características del pozo y el yacimiento. Por eso es fundamental que el ingeniero de terminación de pozos realice un estudio detallado para determinar la necesidad del pozo para la aplicación del óptimo método de exclusión de sólidos. La elección del mejor método para el control de sólidos según las condiciones de cada pozo puede iniciarse desde la etapa de perforación y mantenerse hasta el agotamiento del pozo.

Existen varias maneras de evitar o minimizar la producción de sólidos. En yacimientos no consolidados muy débiles, la producción de arena en gran escala puede ser inevitable, de manera que resultan prácticos los métodos de fondo de pozo para excluir la producción de arena o consolidar la formación cerca del pozo. Las técnicas de exclusión de sólidos incluyen empaques de grava en pozos entubados, empaques con agua a alto régimen de inyección, tecnologías de fracturamiento y empaque, empaques de grava a agujero descubierto y cedazos (filtros) independientes, tales como las tuberías de revestimiento cortas ranuradas y los cedazos expansibles.⁷

⁷ A. Acock, T. O'Rourke & D. Shirmboh, 2004

Entre los métodos de control de sólidos se encuentran:

- Perforación selectiva y orientada
- Tratamientos con tubería flexible
- Mejoras en el diseño de fracturamiento hidráulico
- Consolidación química o estabilización de la formación
- Fase, orientación y tamaño óptimo de los disparos
- Empaque de grava
- Cedazos / cedazos expansibles
- Liner ranurado
- Desarenadores
- Separadores

1.4.1 Consolidación química o estabilización de la formación

Los métodos químicos se utilizan frecuentemente en intervalos cortos en formaciones de alta permeabilidad. Consisten básicamente en inyectar un químico a la formación que ayude a la consolidación o estabilidad de los sólidos y con ello evitar su desprendimiento con el flujo de los fluidos. Se pueden clasificar en dos grupos; consolidación plástica (o in situ) y el uso de grava con recubrimiento de resina (resin-coated gravel).

1.4.1.1 Consolidación plástica (in situ)

El objetivo de esta técnica es el de mantener unidos los granos de la formación por medio de la inyección de químicos a través de los disparos. Para que sea funcional esta técnica tiene que cumplir estas 3 características:

1. El tratamiento hacia la formación tiene que llegar a través de todos los disparos para aumentar su efectividad.
2. La arena consolidada por el tratamiento debe de mantener la permeabilidad para permitir el paso de los fluidos.
3. El grado de consolidación no debe de cambiar con respecto al paso del tiempo o ritmo de producción.

1.4.1.2 Arena con recubrimiento de resina (resin-coated sand)

Al igual que un empaque de grava, el empaque de grava con recubrimiento de resina es diseñado de acuerdo con las características del pozo. La diferencia consiste en que al colocar el empaque de arena es bombeado con la resina, se coloca y consolida el empaque de grava al mismo tiempo evitando así el uso de un cedazo para retener el empaque. Como cualquier método químico para el control de sólidos la permeabilidad es menor a un empaque de grava convencional y la productividad del pozo se ve afectada.

1.4.2 Fase, orientación y tamaño óptimo de los disparos

Esta técnica ha sido ampliamente aplicada, sin embargo, es poco aplicada como un método de control de sólidos. Los disparos orientados pueden ser usados para perforar la roca en una sola dirección y así retrasar o evitar la producción de sólidos.

En yacimientos poco consolidados y formaciones con ambientes tectónicos complejos, los disparos correctamente alineados con el esfuerzo máximo de la formación son más estables que los alineados en otras direcciones. Por lo tanto, los disparos orientados ayudan a eliminar o reducir las fallas o fracturas en la vecindad del pozo y por consecuencia la producción de sólidos.

1.4.3 Empaque de grava

El principio es simple, crear un empaque de arena en el espacio anular con grava y arena de tamaños específicos para evitar la producción de sólidos de la formación, y colocar un cedazo convencional que retenga el empaque de grava. La colocación de un gravel pack previene el colapso de la formación y la producción de finos, operacionalmente es muy complicada además de costosa.

Existen dos métodos de terminación con empaque de arena; agujero descubierto y agujero entubado. La selección del tamaño de grava se realiza mediante un diseño previo con las características de cada pozo.

1.4.4 Liner ranurado

El liner ranurado es una tubería de producción con ranuras o perforaciones que permiten el flujo de fluidos, generalmente se utilizan en pozos con diámetro reducido o en pozos donde se pretende evitar un daño por disparos. El liner ranurado no es muy recomendado para el control de arena debido a que hay partículas con diámetro mucho menor que las ranuras de la tubería, por lo tanto, no son muy funcionales para el control de sólidos. Sin embargo, se siguen clasificando como un método para el control de sólidos.

Hay dos tipos de ranuras que se utilizan en la industria; ranuras rectas y ranuras trapezoidales.

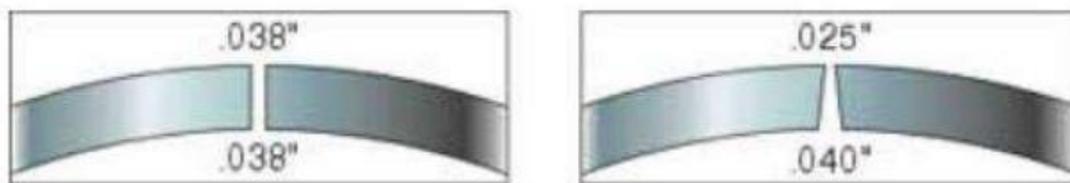


Figura 8. Tipos de ranuras en los liners, izquierda: ranura recta, derecha: ranura trapezoidal.

1.4.5 Cedazos

Los cedazos son generalmente utilizados con empaques de grava y con terminaciones independientes (Standalone). Están compuestos por un núcleo base perforado, con varillas de soporte a los costados, y un alambre o lámina de acero enrollado alrededor del núcleo, de ahí su nombre wire-wrapped, soldado a las varillas de soporte. Su terminación en forma de cuña hace que se forme un puente con los sólidos que permite que se limpien fácilmente. Tienen un área de flujo mayor a la del liner ranurado, sin embargo, siguen siendo muy susceptibles al taponamiento. Existen varios criterios para la selección como la apertura del cedazo con base en el análisis del tamaño de partícula.

1.4.6 Cedazos expandibles

Son relativamente la tecnología más nueva para el control de sólidos, se introdujeron a la industria aproximadamente en 1999⁸. Se han convertido en una de las técnicas principales para el control de sólidos, poco a poco han ido desplazando el empaque de arena a agujero descubierto y agujero entubado en algunas partes del mundo⁹. La eficiencia de este método radica en que elimina el espacio anular entre la formación y el pozo, causa principal de las fallas en terminaciones standalone. Existen dos tipos de cedazos expandibles. El primero está compuesto por hojas entrelazadas de mallas tejidas, las hojas se van desplazando entre ellas conforme se va expandiendo el núcleo, sin embargo, las mallas no se expanden solo se acomodan. Las mallas están protegidas y amoldadas con un núcleo base y una cubierta protectora. Ambos son expandibles, están fabricados con un metal altamente dúctil para resistir la expansión (metal como 316L, S32760 (25Cr), S32750 (super duplex), o aleación 825¹⁰).

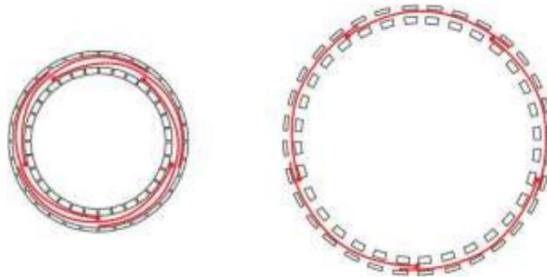


Figura 9. Diagrama de expansión del cedazo expandible.

El otro tipo de cedazo expandible es en el que la malla también sufre una expansión, usado por Halliburton y Baker Hughes. La característica de esta malla es que se fabrica comprimida con pequeñas ondas para que al momento de la expansión se abran completamente y se cree una mayor área de flujo. El tejido de las mallas es muy similar al de los cedazos premium, sin embargo, el núcleo base está fabricado con material con bajo límite elástico esto brinda una mayor región de

⁸ Phillips et. al., 2005

⁹ Bellary et. al., 2009

¹⁰ Jones et. al. 2005

plasticidad. Para la fabricación de estos cedazos utilizan elemento finito para definir de mejor manera los esfuerzos a los que estará sometido.

1.4.7 Separadores superficiales

Como ya se había mencionado anteriormente cuando la producción de hidrocarburos tiene una velocidad lo suficientemente alta, se van a acarrear hacia la superficie sólidos pertenecientes a la formación, la acumulación de estos sólidos en superficie nos puede provocar la obturación en la línea de producción o bien en los equipos, es por esta razón que son necesarios los equipos superficiales para retener sólidos.

Algunos de los equipos superficiales se enlistan a continuación:

- Desarenadores
- Separadores horizontales
- Separadores verticales
- Separadores ciclónicos

2 TECNOLOGÍAS PARA EL CONTROL SUPERFICIAL DE SÓLIDOS.

La producción de sólidos durante la explotación de hidrocarburos representa un problema fundamental en formaciones no consolidadas y/o en campos productores sujetos a fracturamiento hidráulico inducido con materiales apuntalantes. El control de la producción de sólidos es la remoción de la mayor cantidad posible de sólidos con equipos especialmente diseñados para ello, es una tarea fundamental durante las operaciones de producción. Existen varias tecnologías disponibles en el mercado para el monitoreo y control de la producción de sólidos, en ellas se busca, no solo saber el volumen de producción de sólidos, sino también separarlos de otros fluidos. A continuación, se describen las tecnologías más destacadas en superficie:

2.1 DESARENADORES

Desarenadores multifásico (hidrociclones) funcionan por la acción centrífuga, separando los sólidos de los fluidos de producción. Estos pueden ser instalados antes de los separadores, sin embargo, suelen ser temporales, para limpieza generalmente. Los equipos permanentes son generalmente instalados después del estrangulador superficial donde los rangos de presión son bajos. Los hidrociclones pueden remover alrededor de 95% de los sólidos producidos.

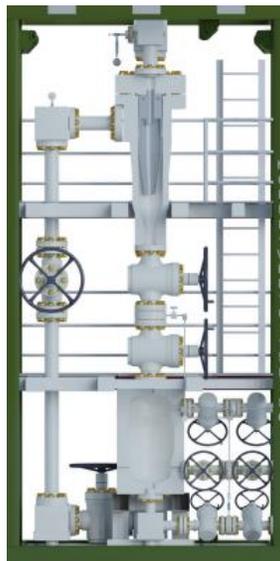


Figura 10. Configuración típica desarenadores a boca de pozo. (eProcess TECHNOLOGIES)

En la actualidad distintas empresas desarrollan proyectos para la separación de sólidos con el uso de equipos superficiales, sin partes móviles, como son los desarenadores. Estos funcionan por la acción centrífuga, logrando separar material como arena y apuntalante de los fluidos de producción, consiguiendo tasas libres de producción de sólidos.

2.2 SEPARADORES HORIZONTALES

Los separadores horizontales son recipientes con sus ejes cilíndricos paralelos al suelo. Se utilizan para separar los fluidos de la corriente de líquidos; gas, agua, aceite y sólidos. Para el caso de la separación de sólidos se sedimentan en la parte inferior del recipiente y son retirados manualmente mediante limpiezas periódicas, en algunos casos la producción de arena es tan alta que las limpiezas a los separadores se vuelven muy frecuentes dificultando la operación. A continuación, se muestra la configuración típica de un separador horizontal:

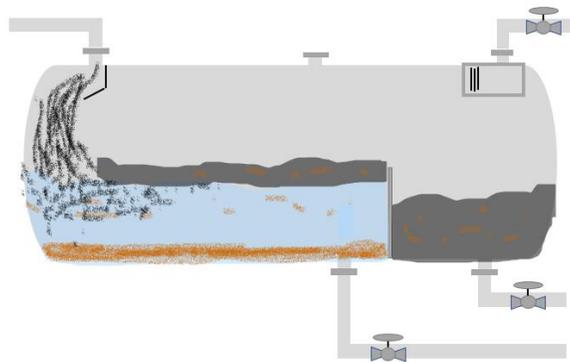


Figura 11. Corte de un separador horizontal.

2.3 SEPARADORES VERTICALES

Estos separadores tienen el mismo principio de funcionamiento que los separadores horizontales, trabajan por segregación gravitacional. Sin embargo, son más adecuados para la separación de sólidos dentro de la corriente de fluidos. Estos separadores son más costosos y difíciles de instalar, debido a que se necesita un mayor tamaño en la configuración del separador para soportar altos gastos de fluidos.

A continuación, se muestra un ejemplo de la configuración de un separador vertical:

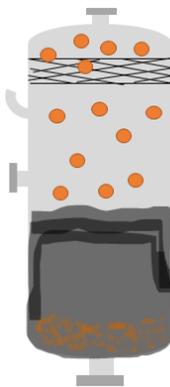


Figura 12. Configuración de un separador horizontal.

2.4 SEPARADORES CICLÓNICOS

El principio de funcionamiento de un ciclón es la separación de fases mediante el uso de fuerza centrífuga, la aceleración de la gravedad es reemplazada por la aceleración centrífuga superando el valor de la fuerza gravitacional haciéndolos más efectivos que las cámaras de sedimentación.

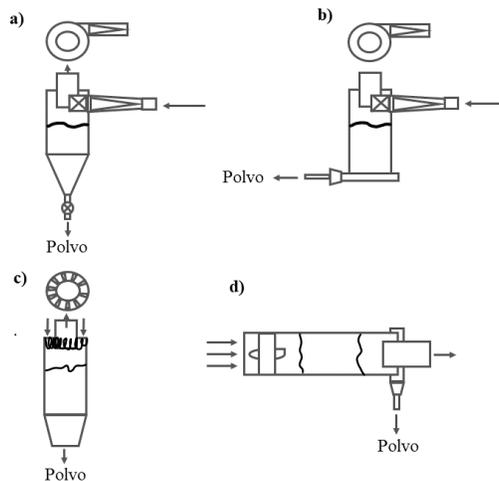


Figura 13. a) entrada tangencial y descarga axial, b) entrada tangencial y descarga periférica, c) entrada y descarga axiales y d) entrada axial y descarga periférica.

2.4.1 Origen

La primera patente de un ciclón fue concedida a John M. Finch de los Estados Unidos. El "colector de polvo", como se llamaba entonces, fue un dispositivo bastante complejo y contenía la esencia de los ciclones modernos de hoy en día, figura 14, el polvo salía por el lado cilíndrico de su cuerpo, en lugar de una salida inferior en forma cónica¹¹.

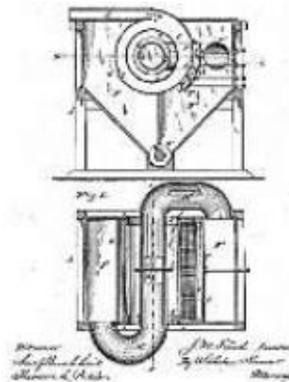


Figura 14. Primer ciclón patentado. (A. Hoffman & L. Stein, 2007)

¹¹ A. Hoffman & L. Stein, 2007

Aun así, la idea de utilizar la aceleración centrípeta para separar partículas de una corriente de gas era una idea bastante radical a finales de 1800. En lugar de diseñar una cámara grande de sedimentación, introdujo el aire cargado de polvo en una pequeña carcasa cilíndrica de una manera tangencial e impartió una velocidad significativa a la mezcla, separando de este modo el polvo del aire bajo condiciones de flujo altamente turbulento utilizando el principio de la aceleración centrípeta, en lugar de la gravedad. Se realizaron mejoras en el diseño de los ciclones y a principios de 1900, comenzaron a aparecer dispositivos ciclónicos que se asemejan más a las unidades modernas de hoy en día. Un ejemplo es el "colector de polvo" del inventor estadounidense O. M. Morse quien, en 1905, fue galardonado con una patente para el propósito de reducir el riesgo de explosiones de polvo en molinos harineros, la máquina mejorada no incluía ninguna parte móvil¹¹.

Debido a que era compacto, de simple construcción, con bajo costo de fabricación y sin piezas en movimiento, los ciclones continuaron creciendo en popularidad y mejorando su construcción y operación. Por 1920 comenzaron a asumir los rasgos que caracterizan a los ciclones modernos de hoy en día, como lo demuestran los dos ciclones molino de harina.

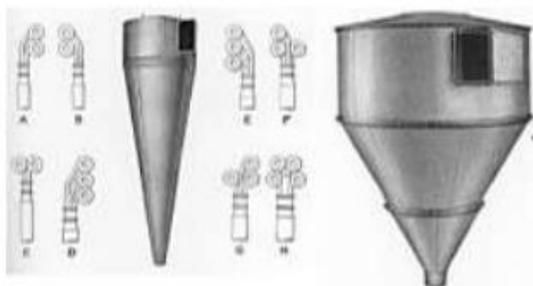


Figura 15. Molinos de harina ciclónicos fabricados por la compañía de Wolf a principios de 1920. (Funk et al. 2013)

La mayor parte de los primeros ciclones se utilizaron para recoger el polvo creado a partir de molinos que procesaban granos y productos de madera. En las décadas que han seguido, los ciclones han encontrado aplicación en prácticamente todos los sectores donde hay una necesidad de eliminar las partículas de una corriente de gas¹¹.

2.4.2 Descripción

Los separadores ciclónicos se han estudiado y desarrollado extensivamente desde principios del siglo pasado; en su configuración estándar inicial, estos incluyen cuatro elementos; una línea de conducción y entrada al cuerpo principal denominada tubo de entrada, un cuerpo principal, una sección cónica con un extremo de salida y una sección de salida en su extremo superior, denominada localizador de vórtice. Esta configuración de separador ciclónico fue desarrollada por Shepherd & Lapple en la década de 1930-1940¹².

¹² Funk et al. 2013, y Mahender et al, 2016),

Estas secciones se describen a continuación:

2.4.2.1 Tubo de entrada

El tubo de entrada del fluido multifásico se aloja tangencialmente con respecto al cuerpo principal, su eje longitudinal puede formar un ángulo recto o puede ser inclinado con respecto a la vertical. En su sección transversal, se diseñan en sección circular o rectangular. Otra característica suya es que la boquilla de entrada al cuerpo principal puede ser de sección recta o cónica. En casos de fluidos altamente erosivos se prevé el tratamiento de su pared interior para reducir el efecto de la erosión.

2.4.2.2 Cuerpo principal o "barril".

El eje longitudinal de este elemento puede ser vertical y en algunos casos horizontal¹³, su diámetro es típicamente varias veces mayor al correspondiente al tubo de entrada. La literatura investigada señala que se han hecho estudios sobre su diámetro y longitud óptimos, y la posición relativa del tubo de entrada en él, esta posición se debe principalmente a los siguientes aspectos: primero al tiempo de residencia necesario para la separación de los fluidos en el caso del separador cilíndrico de ciclón de Gas-líquido (GLCC), después, para minimizar el arrastre de micro gotas de líquido hacia la salida de gas y finalmente para evitar la formación de películas de líquido en la pared interior del elemento y en el caso del separador cilíndrico de ciclón de Gas-sólido (GSCC) para reducir la cantidad de sólidos más pequeños hacia el mismo elemento de salida.

2.4.2.3 Sección cónica

El principio fundamental de estos separadores es el uso de efectos rotacionales y de gravedad sobre los fluidos multifásicos para separar sólidos de diferentes diámetros y/o líquidos de diferentes densidades. En particular, en aquellos separadores con un extremo cónico, el radio de la trayectoria rotacional se reduce gradualmente con la caída, lo que permite separar partículas de diámetro pequeño de aquellas de mayor diámetro que se precipitan al fondo del separador, mientras que las más pequeñas viajan hacia el elemento localizador de vórtice, a una salida superior.

2.4.2.4 Localizador de vórtice

Este elemento ubicado en la cima del separador es típicamente un elemento cilíndrico hueco cuyo eje longitudinal es colineal con el eje del cuerpo principal, permite, dependiendo de las fases a separar, recibir y canalizar i) las partículas sólidas más pequeñas en caso de GSCC, ii) gases en el caso de GSCC, iii) gases en el caso de GLCC y iv) líquidos de menor densidad en el caso de LLCC.

¹³ Dodbiba, & Fujita, 2004

Otras geometrías del tubo de llegada.

Los nuevos desarrollos de separadores ciclónicos incluyen variaciones en la geometría y ángulo del tubo de llegada, como se indica a continuación:

- La información documental encontrada indica que los ángulos horizontales, perpendiculares al eje del cuerpo principal facilita la estratificación de fluidos de diferentes densidades LLCC a baja velocidad y con tiempos de residencia suficientes en el tubo de entrada.
- Para ángulos de entrada que forman entre 25° y 30° con la horizontal, la separación de fluidos de diferentes densidades del tipo GLCC antes de la salida por lo que se pueden optimizar los procesos instalando otros conductos de llegada al cuerpo principal para canalizar fluidos gaseosos en una etapa de pre-separación¹⁴. Se ha determinado que ángulos de 27° permiten estratificación para las condiciones que indica¹⁵.

2.4.3 Dimensiones

La configuración estándar de un ciclón cilíndrico sobre un cono se muestra en la siguiente figura:

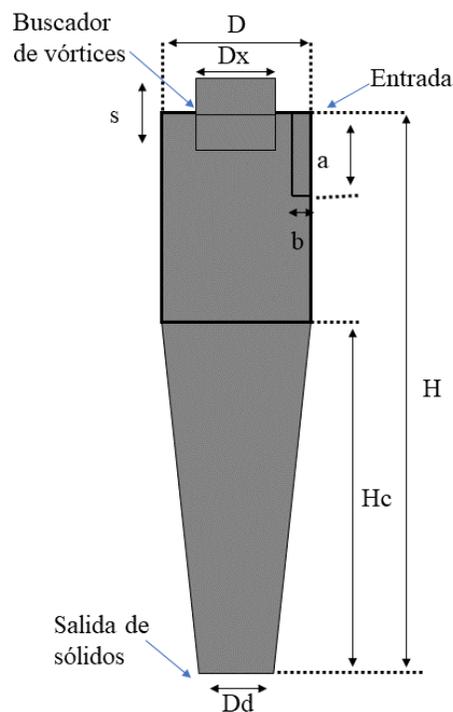


Figura 16. Bocetos de ciclón con cilindro y cono, entrada tangencial y salida de flujo inverso.

¹⁴ Barahona, B. T. R., 2016

¹⁵ Kuba et al, (1995)

La geometría de un ciclón de este tipo está determinada por las siguientes ocho dimensiones:

- Diámetro del cuerpo (diámetro de la sección cilíndrica), D .
- Altura total del ciclón (desde el techo hasta la salida), H
- Diámetro del vórtice, D_x
- Longitud del vórtice (desde el techo del espacio de separación), S
- Alto y ancho de la entrada, a y b , respectivamente
- Altura de la sección cónica, H_c
- Diámetro de la salida de sólidos, D_d

2.4.4 Clasificación

Los separadores se pueden clasificar de acuerdo con las siguientes características:

- Configuración de entrada
- Forma de su cuerpo
- Dirección del flujo de entrada y salida.

2.4.4.1 Clasificación por configuración de entrada

Se utilizan principalmente cuatro tipos de configuraciones de entrada:

2.4.4.1.1 Entrada circular

Tales entradas se encuentran típicamente en los ciclones de bajo costo construidas a partir de chapa metálica, en la que algún sacrificio en el rendimiento de separación es aceptable. A diferencia de la entrada tipo ranura que se describe a continuación, las entradas de tipo circular eliminan la necesidad de fabricar una sección de transición de entrada rectangular.

2.4.4.1.2 Entrada rectangular

Se incluye en esta definición la de entrada helicoidal, es la más ampliamente utilizada en las industrias químicas y en procesos del petróleo. Salvo en los casos en que se requiera refuerzo especial de la pared, las entradas de tipo rectangular normalmente no son difíciles de construir, y por lo general dan buen rendimiento. Debido a que la alimentación del ciclón se transporta en tuberías circulares, se requiere de la construcción de un conducto de transición de una entrada redonda a rectangular y esto se traduce en alguna complicación en el diseño del ciclón con respecto a una entrada de tipo circular.

2.4.4.1.3 Entrada espiral o voluta

En este tipo de entrada, el flujo de gas se estrecha gradualmente, ya que el área disponible para el flujo disminuye. Por lo tanto, sufre cierta aceleración del principal espacio de separación corriente arriba. Dado que el radio de entrada de desplazamiento es mayor que la de cualquiera de los otros

tipos de entrada, produce un mayor momento angular de entrada y como consecuencia, una velocidad de centrifugado más alta dentro del núcleo interior del vórtice.

2.4.4.1.4 Entrada alabes de remolino

Permite que el gas entre paralelo al eje del ciclón, está colocado entre el vórtice (o, en caso de un dispositivo “recto”, un cuerpo sólido central) y la pared exterior del ciclón. Este tipo de entrada se inserta a menudo en los ciclones de cuerpo cilíndrico en lugar de en un cuerpo cónico. Una ventaja de la entrada axial es el alto grado de simetría axial en el flujo, lo que da algunas ventajas operacionales. Las entradas axiales también eliminan la necesidad de fabricar una pieza de entrada para la transición.

2.4.4.2 Clasificación por la forma de su cuerpo

Las dos configuraciones posibles para la forma del cuerpo son:

- Cilindro
- Cilindro sobre un cono

2.4.4.3 Clasificación por dirección del flujo de entrada

Se pueden tener dos tipos de entrada:

- Tangencial
- Axial

2.4.4.4 Clasificación por dirección del flujo de salida

El gas puede salir del ciclón ya sea a través del techo, llamado de flujo invertido, donde el gas sale por la parte superior del ciclón o puede salir por la parte inferior del ciclón, llamado de flujo unidireccional, donde el gas sale por la misma dirección que los residuos sólidos.

2.4.5 Aplicación

Las tecnologías basadas en ciclones se han utilizado desde el siglo pasado con grandes desarrollos hasta nuestros días con éxitos asociados a su estandarización y control de su eficiencia energética y volumétrica; sus aplicaciones incluyen la medición en línea del flujo volumétrico en fluidos multifásicos usando separadores ciclónicos para la separación de fases y en seguida la medición de cada fase por separado con medidores de flujo tipo Coriolis para las fases gaseosas y líquidas separadas¹⁶. Richardson, J. F. et al., (2002) resume en forma general las aplicaciones de estos equipos en la industria:

- a) la separación de partículas (suspendidas en un líquido de menor densidad) por tamaño o densidad, o más generalmente, por la velocidad de caída terminal.
- b) la eliminación de los sólidos en suspensión de un líquido.

¹⁶ Godoy-Alcántar et al., 2008

-
- c) la separación de líquidos inmiscibles de diferentes densidades.
 - d) deshidratación de suspensiones para obtener un producto más concentrado.
 - e) la ruptura de dispersiones líquido-líquido o gas-líquido.
 - f) la eliminación de los gases disueltos en los líquidos.

Los separadores centrífugos son ampliamente utilizados en casi todas las industrias. Algunas de ellas son:

- Petróleo y gas
- Generación de energía
- Plantas de incineración
- Industria metalúrgica / altos hornos e industrias no ferrosas
- Plantas de sinterización de mineral
- Fábrica de la madera y plantas de material de construcción
- Plantas de arena
- Fábricas de cemento
- Hornos de coque
- Calderas de carbón
- Plantas de carbono negro
- Plantas de procesamiento de granos, como molinos de harina (trigo, arroz, etc.)
- Fábricas de productos químicos (plásticos, elastómeros, polímeros, etc.)
- Industria alimenticia

2.4.6 Patentes

Alrededor del mundo se han creado tecnologías con la finalidad de retener sólidos en superficie, cada una de estas tiene características que la definen y que por eso han sido patentadas, algunas de esas patentes se describen a continuación:

2.4.6.1 Patente No. 2 264 688 (2007)

El acceso del gas/producto granular (GS) en este elemento es en forma preferentemente tangencial y en su parte superior, además requiere, en una primera etapa, un separador con una rueda de separador a la altura de la entrada y cuyos detalles no se especifican. Su geometría es cilíndrico-cónica y requiere de al menos dos elementos incorporados dispuestos de forma central y rotacionalmente simétricos dentro de la carcasa de este sistema. El espacio entre los elementos incorporados y la carcasa es importante para controlar la separación. Requiere además de fuentes de gas secundario (potencialmente aire) en su parte inferior, para generar el impulso hacia arriba de partículas finas y gas y así lograr una doble selectividad. Esta invención clama que no solo se logra la separación de materiales a granel del gas, sino también de las partículas finas que lo acompañan. Finalmente, las partículas finas y gas salen por el extremo superior de la carcasa y el producto a granel ya separado sale por su parte inferior. Puesto que el control de la separación se logra también con el flujo de gas desde su parte inferior, se requiere energía adicional a la de la fuente de GS, por lo que sus costos de operación se incrementan significativamente, adicionalmente, este equipo está diseñado para separar solo gases y sólidos.

2.4.6.2 Patente No. US 10, 337, 267 B1 (2019)

Esta patente describe un tanque de separación para la mezcla gas-líquido que incluye una estructura cilíndrica vertical, como cuerpo principal, una tubería de entrada por donde se conduce la mezcla hacia el cuerpo principal, que puede estar conectada tangencialmente a este, un buscador de vértice centrado dentro del cuerpo principal; en la región superior una tubería de salida de gases cuyo eje es perpendicular al eje de simetría del cuerpo principal y en su región inferior una placa colectora de líquidos. Este dispositivo está específicamente diseñado para separar gases de líquidos y no tiene posibilidad de manejar sólidos granulares.

2.4.6.3 Patente No. US 10, 412, 820 B2 (2019).

Esta patente describe un tanque de separación para la mezcla gas-líquido-sólidos que incluye una estructura cilíndrica vertical, como cuerpo principal, una tubería de entrada inferior por donde se conduce la mezcla hacia el cuerpo principal, que puede estar conectada tangencialmente a este, un buscador de vértice centrado dentro del cuerpo principal; en la región superior una tubería de salida de gases cuyo eje es perpendicular al eje de simetría del cuerpo principal; los gases naturales se pueden procesar para obtener hidrogeno y carbón para usar el hidrogeno para producir plasma para derretir y vitrificar sólidos haciéndolos materiales inertes. Este aparato está específicamente diseñado para separar líquidos y consumir los gases transformando las propiedades de los sólidos granulares.

2.4.6.4 Patente No. US 10, 533, 138 B2 (2020).

Esta patente describe un tanque de separación para la mezcla de materiales carbonáceos en presencia de catalizadores homogéneos y compuestos orgánicos líquidos; en este aparato la mezcla se enfría, despresuriza y se separa en una fase gaseosa, una fase de aceite y otra de agua. La etapa de separación se lleva a cabo en una estructura cilíndrica vertical, como cuerpo principal, una tubería de entrada inferior por donde se conduce la mezcla hacia el cuerpo principal puede estar conectada tangencialmente a este; dentro del cuerpo principal hay una serie de etapas, de abajo hacia arriba, una placa deflectora atenuadora, una etapa para romper espumas y oscilaciones, una etapa de coalescencia y una etapa de filtrado; en la región superior existen salidas de gases, agua y aceite. Este aparato está específicamente diseñado para separar los fluidos que se indican y no admite ningún tipo de sólidos.

2.4.6.5 Patente No. US 10, 596, 580 B2 (2020).

Esta patente describe un tanque de separación para la mezcla sólidos-líquido que incluye una estructura vertical cuya forma es cilíndrico-cónica en su cuerpo principal, una tubería de entrada por donde se conduce la mezcla hacia el cuerpo principal, que está conectada tangencialmente a este, una primera etapa de emulsificación por medio de acción ciclónica y una etapa posterior dentro del mismo aparato es la recuperación de los líquidos remanentes en los sólidos húmedos por medio de un tornillo sin fin instalado en una tubería cuyo eje axial es coaxial al cuerpo principal, inducción de esfuerzos cortantes por medio de un proceso 13 de vórtice de geometría variable, coalescencia y floculación inducidas para extracción de estructuras coloidales del fluido y formación de flóculos y grumos y la separación de sólidos agrupados de los líquidos por medio de un proceso de vórtices. Este aparato y procesos no están diseñados para separar sólidos de gases.

2.4.6.6 Patente US 10, 655, 300 B2 (2020).

Esta patente describe un sistema de excavación por chorro de agua e incluye, para propósitos de reciclado de agua, la separación se lleva a cabo, en una primera etapa, en un depósito de separación; en una segunda etapa, un equipo para separar los sólidos del agua por medio de hidrociclones cilíndrico-cónicos; el material de desecho de esta etapa se conduce a otro sistema de drenado. La descripción de estos ciclones indica que son una pluralidad de ciclones convencionales dispuestos en paralelo a lo largo de uno o varios ejes. La alimentación se realiza por su sección cilíndrica superior y los sólidos de desecho se canalizan por el ápex de su sección cónica en la región inferior del separador; estos equipos no están diseñados para manejar otro tipo de gases que no sean aire a presión.

2.4.6.7 Patente US 11, 007, 542 B2 (2020).

Esta patente (Figura 12e) describe un tanque de separación para la mezcla sólidos-líquido que incluye una estructura vertical cuya forma es cilíndrico-cónica en su cuerpo principal, una tubería de entrada por donde se conduce la mezcla hacia el cuerpo principal, que puede estar conectada tangencialmente a este, por donde se conduce la mezcla hacia el cuerpo principal, un buscador de vértice centrado dentro del cuerpo principal que incluye nervaduras para inducir un vórtice en el flujo y una pluralidad de aperturas en él, y su eje es coaxial al eje de simetría del cuerpo principal; en la región superior el buscador de vórtice permite la canalización de moléculas de baja densidad hacia afuera del cuerpo principal, también se incluye en el buscador de vórtice una pluralidad de aperturas que permite la canalización del fluido desde la tubería de entrada hacia el espacio interior del cuerpo principal. Los vórtices inducidos por las nervaduras canalizan las moléculas o partículas de mayor densidad hacia la región cónica inferior del cuerpo principal. Nótese que en este caso, el buscador de vórtice está directamente sujeto al flujo de la matriz fluida por lo que está sujeto directamente al efecto de la erosión, lo cual se agrava por disponer de una multiplicidad de aperturas, y no existe, como en el caso del tubo ranurado de la invención que se reclama en este documento, un elemento previo de exposición a la erosión antes de llegar al buscador de vórtice, induciendo no solo el daño a este elemento, sino su erosión directa por la presencia de aperturas en él. No se especifica, en la patente (US 11, 007, 542 B2), si las aperturas en el buscador de vórtice han sido optimizadas en tamaño, distribución, ubicación y dirección con respecto a su superficie.

3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE ALTA EFICIENCIA PARA EL CONTROL SUPERFICIAL DE SÓLIDOS

El control de sólidos es un reto crítico en la administración de yacimientos y operaciones de producción debido a los altos costos de remoción, erosión de equipos y gastos de mantenimiento significativo, mismos que han afectado la productividad de los pozos. Por lo que el equipo de la Gerencia de Soluciones en Herramientas y Sistemas para pozos del Instituto Mexicano del Petróleo, desarrollo esta nueva tecnología desde la parte de investigación, pasando por el escalamiento de la misma y actualmente buscando operar en distintos activos de la República Mexicana.

3.1 BENEFICIOS DEL USO DE LA TECNOLOGÍA

El implemento de esta nueva tecnología de alta eficiencia ayudará a controlar la producción de sólidos de formación o apuntalante de fractura en pozos productores de hidrocarburos e instalaciones de producción, para evitar la disminución de la producción por su acumulación y/o erosión en todo el sistema integral de producción, a través de la instalación de elementos filtrantes y/o retenedores de sólidos en superficie para:

- Optimizar la productividad de los pozos, al evitar la acumulación de los sólidos a través del sistema integral de producción.
- Salvaguardar la integridad de los equipos e instalaciones superficiales y subsuperficiales.
- Disminuir la inversión por mantenimiento en pozos, líneas de conducción y equipos, debido al empleo de los sistemas integrales desarrollados por el IMP.
- Evitar accidentes catastróficos por fugas, debido a la abrasión que provocan los sólidos.
- Mantener la producción de los pozos después de su terminación, y a salvaguardar la integridad física de sus sistemas y equipos.

3.2 NECESIDADES QUE SATISFACE EL EQUIPO

Controlar de forma integral la producción de sólidos, a través de la implementación e incorporación de retenedores para superficie como proyectos de servicio encaminados a resolver la problemática específica de producción de sólidos en los Activos de Producción de PEMEX Exploración y Producción: Reynosa, Poza Rica-Altamira, Veracruz, Cinco Presidentes, Muspac-Macuspana, Samaria-Sitio Grande, Litoral Tabasco y Bellota-Jujo.

3.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Con base en las problemáticas de la producción de sólidos y del estudio de las tecnologías actuales en el mercado para la separación de sólidos en superficie, así como con la experiencia obtenida de equipos predecesores desarrollados por el IMP, se llegó al diseño del equipo de alta eficiencia para el control superficial de sólidos, para el cual, se determinaron las siguientes variables de entrada de diseño:

- Un equipo fácilmente transportable a cualquier locación del pozo.
- Un equipo con capacidad modular, para cubrir un servicio con un amplio rango de gastos y presiones.
- Un equipo que no difiera la producción.
- Un equipo resistente a presiones de trabajo de 1,100 psi y gastos mayores a 1,000 bpd y hasta 10,000 bpd.
- Un equipo que permita el diagnóstico y la operación conjunta de problemas de sólidos en pozos y baterías de separación.
- Un equipo que cumpla con la normativa de seguridad en locaciones de Pemex Exploración Producción (PEP).
- Un equipo con capacidad de separación de partículas menores a 150 micras.

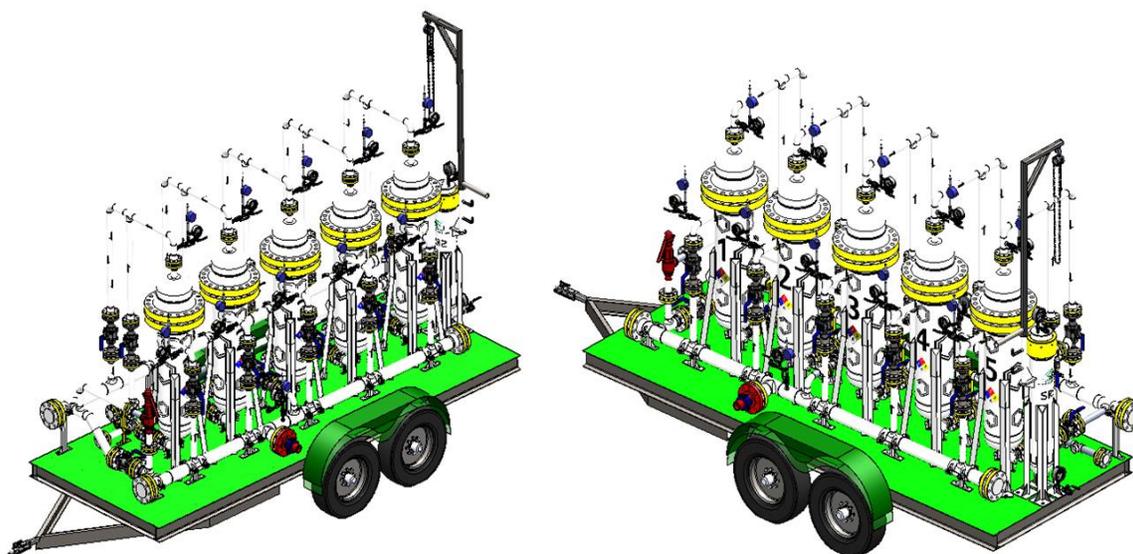


Figura 17. Equipo de alta eficiencia para el control superficial de sólidos.

3.4 COMPONENTES DEL EQUIPO SUPERFICIAL DE SÓLIDOS

El equipo de separación de sólidos superficial está compuesto principalmente de los siguientes subsistemas:

3.4.1 Múltiple de entrada de flujo

Función: Distribuir el flujo de hidrocarburos con sólidos provenientes del pozo hacia cada una de las unidades de separación de sólidos. Cuenta con 5 válvulas de apertura y cierre para incorporar cada unidad de separación en un sistema de corriente en paralelo (Figura 18-a).

3.4.2 Unidades de separación de sólidos (US)

Función: Separar los sólidos del flujo de hidrocarburos proveniente del pozo. Cuenta con 5 unidades de separación, los cuales tienen un diseño interior que permite la separación de los sólidos por un efecto centrífugo/ciclónico. (Figura 18-b).

El diseño interior permite la incorporación de elementos filtrantes tipo vela, lo que permite realizar una separación de partículas finas menores a 150 micras que por condiciones de propiedades de los fluidos de la corriente de hidrocarburos (viscosidad y densidad) y por condiciones de flujo (gasto y presión) no es posible separar por efecto centrífugo (Figura 18-1).

3.4.3 Ensamble salida de flujo.

Función: Conducir la corriente de hidrocarburos limpia de sólidos hacia el múltiple de salida de flujo. Cuenta con un diseño bridado en sus extremos que permite un fácil ensamble y mantenimiento. (Figura 18-c).

3.4.4 Múltiple de flujo inverso.

Función: Invertir la corriente de hidrocarburos al interior de las unidades de separación para limpiar el elemento filtrante tipo vela al interior de cada unidad de separación. Cuenta con una válvula maestra conectada al múltiple de entrada de flujo, así como cinco válvulas para alinear el flujo en inversa a cada unidad de separación, este diseño es bridado en sus extremos lo que permite un fácil ensamble y mantenimiento (Figura 18-d).

3.4.5 Múltiple de descarga de sólidos.

Función: Conducir los sólidos separados de cada unidad hacia el sistema de recuperación de sólidos. Cuenta con 5 válvulas conectadas en paralelo, así como 4 válvulas alineadas en serie para aislar cada unidad de separación durante la recuperación de sólidos. Este diseño es bridado en sus extremos lo que permite un fácil ensamble y mantenimiento (Figura 18-e).

3.4.6 Sistema de seguridad.

Función: Realizar la derivación de flujo de forma segura en caso de represionamiento en las unidades de separación. Cuenta con una válvula de seguridad ajustable a la presión máxima de trabajo solicitada. Cuenta con un bypass de 3" de diámetro interior para derivar el flujo de hidrocarburos al múltiple de salida de flujo. (Figura 18-f y 18-g).

3.4.7 Múltiple de salida de flujo.

Función: Conducir la corriente de hidrocarburos sin sólidos a la línea de descarga del pozo o cabezal de recolección de baterías. Cuenta con 5 válvulas conectadas en paralelo para aislar cada unidad de separación durante la recuperación de sólidos. este diseño es bridado en sus extremos lo que permite un fácil ensamble y mantenimiento. (Figura 18-h).

3.4.8 Sistema de recuperación de sólidos (SRS).

Función: Recuperar los sólidos de forma segura y eficiente de cada unidad de separación. Cuenta con 2 válvulas conectadas en serie al cuerpo principal para aislar el sistema, purgar la presión y recuperar la canasta de filtración de sólidos mediante un sistema de izaje manual. Este diseño es bridado en sus extremos lo que permite un fácil ensamble y mantenimiento (Figura 18-i). El SRS, cuenta con diversas canastas de recuperación de sólidos de diferente tamaño de malla, la cual se selecciona de acuerdo con la necesidad de muestreo de sólidos del pozo productor. (Figura 18-j).

3.4.9 Sistema de adquisición de datos.

Función: Realizar el monitoreo de las presiones en cada uno de los subsistemas del ESSS. Cuenta con sensores de presión diferencial, y manómetros de presión en cada unidad de separación, múltiples de entrada, salida y filtro canasta (Figura 18-k).

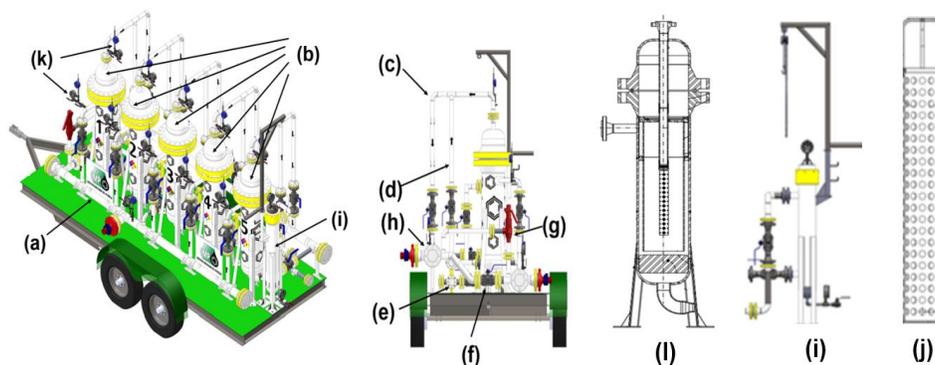


Figura 18(a) Múltiple de entrada de flujo, (b) Unidades de separación de sólidos, (c) Ensamble salida de flujo, (d) Múltiple de flujo inverso, (e) Múltiple de descarga de sólidos, (f) By-pass, (g) Válvula de seguridad, (h) Múltiple salida de flujo, (i) Sistema de recuperación de sólidos, (j) Canasta de recuperación de sólidos, (k) Sistema de adquisición de datos, (l) Corte de U.S. con elemento filtrante.

3.5 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio de operación del equipo de alta eficiencia para el control superficial de sólidos, se basa en el principio de separación centrífuga, el cual consiste en direccionar la corriente de fluido con sólidos a una entrada tangencial de un recipiente cilíndrico para que por efecto de fuerza centrífuga, las partículas más densas se desplacen a la periferia interna de dicho cuerpo cilíndrico, así mismo, forzar a que la corriente principal salga por la parte interior de este cuerpo cilíndrico, por lo que el efecto de la gravedad se suma a estas partículas, forzándolas a caer al fondo del recipiente, donde se recuperarán mediante una válvula para recuperación de sólidos ubicada en la parte inferior del sistema.

3.6 APLICACIÓN DEL SISTEMA

El sistema es aplicable a pozos e instalaciones donde:

- La presión de la matriz fluida es la presión de hidrocarburos fluyendo de pozos, en ambientes que pueden ser corrosivos con H₂S de hasta 2000 partes por millón y en temperaturas de operación de hasta 120 °C.
- El tamaño mínimo de los sólidos granulares separados es de 25 micras y donde el tamaño máximo de los sólidos granulares es de 700 micras.
- La recepción de la matriz líquida fluida con sólidos embebidos en ella se lleva a cabo con tubería y conexiones superficiales con capacidad para soportar hasta 5,000 psi y gastos de hasta 10,000 barriles por minuto.

4 ANÁLISIS A MUESTRAS DE SÓLIDOS

Una parte fundamental para la caracterización del equipo de retención de sólidos en superficie es el análisis de las muestras de sólidos que se están produciendo junto con los hidrocarburos. A través de los análisis realizados se pretende determinar la distribución granulométrica, la composición química de las partículas y la malla adecuada para filtrar la mayor cantidad de sólidos de las partículas de una muestra seca del pozo R-23.

Se ha establecido que la producción de sólidos en el pozo R-23 es una problemática que se presenta, que requiere del conocimiento y caracterización de los sólidos producidos con el objetivo de elaborar una propuesta técnica que permita tener el control y manejo adecuado de la producción de sólidos.

Para caracterizar un equipo de retenedores de sólidos de alta eficiencia en superficie es necesaria la caracterización de los sólidos provenientes de formación. Para la caracterización de la distribución de tamaños de partícula existen dos métodos: análisis por tamizado y análisis de tamaño de partícula con láser (LSP, por sus siglas en inglés). Cualquiera de los dos métodos es ampliamente aceptado, la diferencia radica en el tamaño de muestra que se necesita; para el tamizado de acuerdo con la norma se necesitan 100 gr para realizar un análisis representativo y para el LSP solo se requieren 1 gr.

Dentro del protocolo de pruebas de laboratorio para el análisis de muestras de sólidos, se llevan a cabo las siguientes actividades:

- Entregar muestras de sólidos al especialista encargado con toda la información requerida
- Realizar documentos administrativos requeridos para el lavado y secado de muestra de acuerdo con procedimientos internos de la institución.
- Dar seguimiento a las actividades de laboratorio para recibir en tiempo y forma la muestra para el análisis granulométrico.
- realizar de acuerdo con la norma ASTM D422 el análisis granulométrico de muestra de sólidos previamente lavada y secada.
- entregar en tiempo y forma los resultados del análisis granulométrico
- preseleccionar etapas y diámetro de apertura del elemento filtrante adecuado para las condiciones del pozo.

4.1 METODOLOGÍA

Para lograr la caracterización adecuada de los sólidos producidos, es necesario seguir una metodología para cumplir con las normas establecidas por el American Petroleum Institute. A continuación, se muestra la metodología a seguir según el tipo de análisis realizado por el equipo de trabajo de la gerencia de soluciones en Herramientas y Sistemas para pozos:

- Aplicar norma ASTM D422 y API RP 56 para el análisis de la muestra
- Con la muestra limpia y seca recibida del laboratorio pesar muestra completa y anotarlo en la bitácora
- Elegir el arreglo de tamices a utilizar con base en la siguiente tabla:

Sieve-opening sizes µm											
	3 350/ 1 700	2 360/ 1 180	1 700/ 1 000	1 700/ 850	1 180/ 850	1 180/ 600	850/ 425	600/ 300	425/ 250	425/ 212	212/ 106
Typical proppant/gravel-pack size designations											
	8/12	8/16	12/18	12/20	16/20	16/30	20/40	30/50	40/60	40/70	70/140
Stack of ASTM sieves ^b											
First primary sieve in bold type	4	6	8	8	12	12	16	20	30	30	50
	6	8	12	12	16	16	20	30	40	40	70
	8	10	14	14	18	18	25	35	45	45	80
Second primary sieve in bold type	10	12	16	16	20	20	30	40	50	50	100
	12	14	18	18	25	25	35	45	60	60	120
	14	16	20	20	30	30	40	50	70	70	140
	16	20	30	30	40	40	50	70	100	100	200
	pan	pan	pan	pan	pan	pan	pan	pan	pan	pan	pan

^a Sieve series as defined in ASTM E11.
^b Sieves stacked in order from top to bottom.

Tabla 1. Guía para el arreglo de tamices.

- Pesar una muestra de 100-120 gr de sólidos. O muestra representativa para analizar
- Pesar cada tamiz por separado para conocer su masa sin sólidos
- Colocar la serie de tamices en orden descendente en el “Rotap” y vertir la muestra sobre el tamiz superior
- Colocar la tapa del tamiz y asegurar que los tamices no se muevan. Dejar operando el Rotap a 290 rpm y 156 golpes/min durante 10 min.
- Retirar los tamices del equipo y pesar individualmente el contenido de cada tamiz.
- Calcular los porcentajes individuales de cada tamiz de acuerdo con el peso obtenido anteriormente
- Pasar imán en cada tamiz si la muestra presenta contenido de metal, se retira la mayor cantidad de metal y pesar nuevamente el tamiz. Determinar peso de tamiz con sólido total y peso de tamiz con sólidos sin metal
- Calcular la pérdida operativa: sumar todos los pesos individuales, restar al peso total de la muestra inicial, calcular porcentaje de pérdida (no debe superar el 0.2%)
- Determinar la esfericidad y redondez de las partículas en base a la gráfica de Krumbein

- Documentar los resultados como se muestra en la siguiente tabla y generar gráfica de distribución de partículas:

MALLA	MICRAS	PESO DE TAMIZ SIN SÓLIDOS (gr)	PESO DE TAMIZ CON SÓLIDOS (gr)	PESO SÓLIDOS (gr)	%PESO
50	300	251.65	251.77	0.11	0.11
70	177.8	348.13	348.54	0.39	0.37
80	180	333.87	335.9	2.02	1.94
100	150	324.51	329.98	5.46	5.24
120	125	444.24	459.69	15.45	14.83
140	106	223.32	235	11.68	11.21
200	74	330.62	350.35	19.73	18.94
325	45	210.79	246.79	36	34.55
450	32	213.05	225.5	12.45	11.95
BASE	-	361.03	361.93	0.9	0.86
				104.19	100

Tabla 2. Distribución granulométrica, ejemplo.

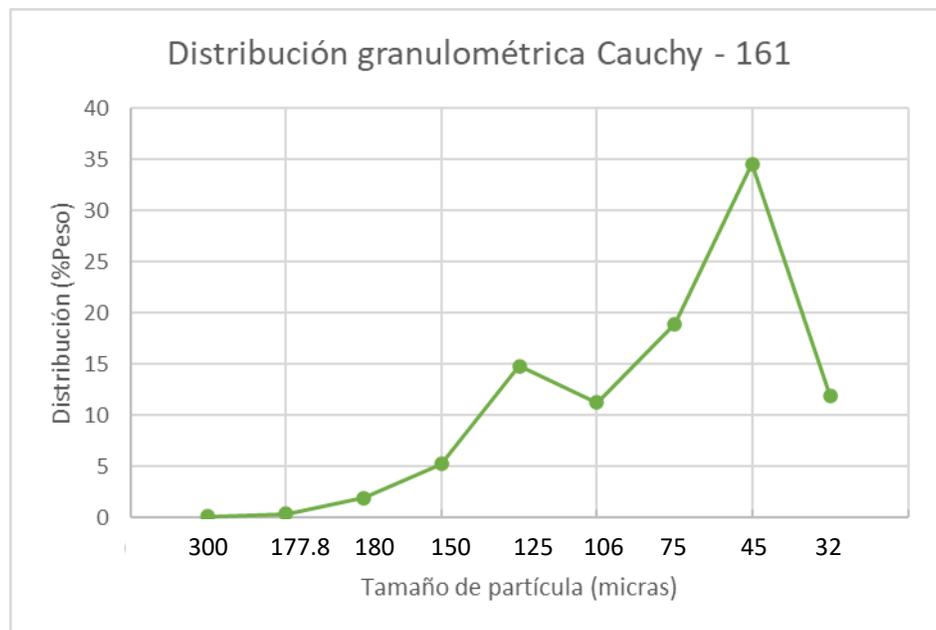


Gráfico 1. Distribución granulométrica, ejemplo.

- Cuando la muestra presenta contenido de metal, documentar los resultados de la siguiente manera. La gráfica de distribución de partículas se genera con los datos de peso de tamiz sin metal

MALLA	MICRAS	PESO DE TAMIZ SIN SÓLIDOS (gr)	PESO DE TAMIZ CON SÓLIDOS (gr)	PESO DEL TAMIZ SIN METAL	PESO SÓLIDOS (gr)	PESO METAL (gr)	PESO TOTAL SÓLIDOS + METAL (gr)	%PESO SÓLIDOS	%PESO METAL
50	300	251.65	256.36	254.35	2.67	2.01	4.68	2.75	42.95
70	177.8	348.13	349.97	349.67	1.47	0.3	1.77	1.52	10.95
80	180	333.87	339.31	338.98	5.14	0.33	5.47	5.3	6.03
100	150	324.51	335.34	335.2	10.7	0.14	10.84	11.03	1.29
120	125	444.24	461.51	461.39	17.13	0.12	17.25	17.66	0.7
140	106	223.32	235.15	235.15	11.66	0.18	11.84	12.02	1.52
200	74	330.62	347.01	347.01	16.23	0.16	16.39	16.74	0.98
325	45	210.79	229.6	229.56	17.74	0.04	17.78	18.29	0.22
450	32	213.05	222.2	222.19	9.14	0.01	9.15	9.42	0.11
BASE	-	361.03	366.14	366.13	5.1	0.01	5.11	5.26	0.2
					96.98	3.3	100.28	100	3.29

Tabla 3. Distribución granulométrica con contenido de metal, ejemplo.

- Envasar las muestras obtenidas de cada tamiz y etiquetarlo de la siguiente manera

NOMBRE POZO—FECHA DE TOMA--#MUESTRA
#MALLA – MICRAS
PESO

Figura 19. Ejemplo de etiqueta de muestras.

4.2 RESULTADOS

Se describirán los resultados del análisis de sólidos a un pozo (R-23) con el fin de ejemplificar la metodología señalada anteriormente.

4.2.1 Limpieza y secado.

De acuerdo con lo señalado por la norma API RP 58 que indica el procedimiento de lavado y triturado del núcleo, se realizó un lavado de muestra para retirar las impurezas que contenía. Se mezcló la muestra con cloruro de metileno en un vaso de precipitado, posteriormente en un embudo se colocó un filtro con arcilla Fuller para retirar las impurezas.



Imagen 1. Muestra Artesa 381



Imagen 2. Primer filtrado de la muestra

La muestra se filtró tres veces para un mejor resultado, y finalmente se llevó a la parrilla para su calentamiento en horno a 100°C durante 3 horas. El resultante se guardó en un contenedor al vacío.



Imagen 3. Secado de muestra en horno a 100 °C



Imagen 4. Muestra lavada y seca, Pozo Artesa 381



Imagen 5. Muestra lavada y seca, Pozo Artesa 381

4.2.2 Análisis granulométrico

Para realizar un análisis granulométrico se requiere la muestra, esta puede obtenerse de un núcleo o bien de una muestra representativa de los sólidos que se están recuperando. Antes de usar cualquiera de las dos técnicas se tiene que preparar la muestra de acuerdo con la norma API RP 58, la cual indica el procedimiento para el lavado y triturado del núcleo.

Un análisis granulométrico se usa para determinar la distribución por tamaños de partículas que conforman una muestra. Para este caso en específico se lleva a cabo a través de un análisis granulométrico por tamiz, los resultados ayudan a hacer la selección adecuada del número de malla óptimo a utilizar para lograr la mayor filtración de sólidos, de acuerdo con las características ya preestablecidas en el retenedor de sólidos superficial.

El procedimiento para tamizar una muestra consiste en pasarla por una serie de mallas de distintos anchos de apertura, que actuaran como filtros de los granos, a la configuración de tamices con distinto número de malla, se le conoce como columna de tamices.

Primero se coloca la muestra de arena en la parte superior de la columna de tamices, iniciando con el tamiz de mayor apertura (malla 30 para este caso), hasta llegar al tamiz de menor apertura (malla 200), como se observa en la siguiente imagen:



Imagen 6. Columna de tamices con la muestra de arena

Una vez que se tiene lista y armada la columna de tamices, esta misma se coloca en el sistema de ROTAP para lograr la separación de sólidos por granulometría en las diferentes aperturas durante 10 minutos operando a 290 rpm y 156 golpes/min.



Imagen 7. Columna de tamices con la muestra de arena acoplada en el ROTAP.

Al concluir este último proceso, se toma el peso de la muestra que se encuentra en cada uno de los tamices, para determinar el peso de sólidos retenido por maya y de esta manera conocer el porcentaje de granulometría.



Imagen 8. Medición de los granos contenidos por tamiz.

La bitácora de las mallas utilizadas para este proceso en conjunto con el peso de los sólidos retenidos en cada una de ellas se muestra en la siguiente tabla:

MALLA	APERTURA (micras)	PESO SÓLIDOS (gr)	PESO SÓLIDOS ACUMULADO (gr)	PESO (%)	PESO ACUMULADO (%)
30	595	2.39	2.39	5.04	5.04
40	400	1.77	4.16	3.73	8.78
50	297	7.2	11.36	15.19	23.97
60	250	12.04	23.4	25.41	49.38
80	177	10.89	34.29	22.98	72.36
100	149	5.41	39.7	11.42	83.77
120	125	1.43	41.13	3.02	86.79
200	74	4.43	45.56	9.35	96.14
BASE	0	1.83	47.39	3.86	100.00
		47.39		100.00	

Tabla 4. Resultados de prueba granulométrica por tamizado.

Con los datos obtenidos de la bitácora anterior es posible realizar un gráfico de distribución granulométrica:

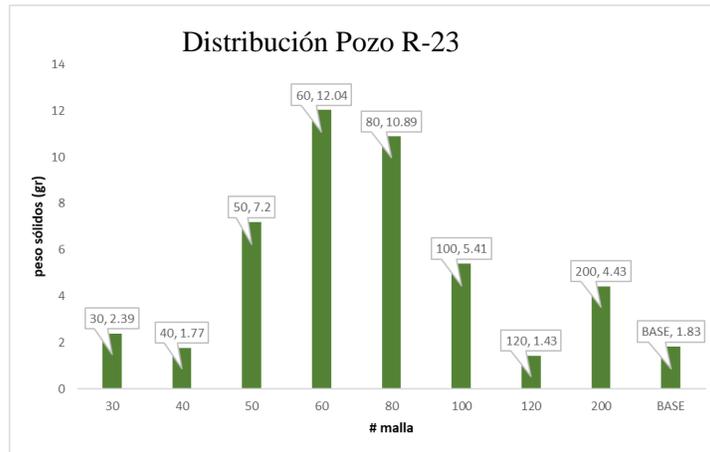


Gráfico 2. Distribución granulométrica por gramos en cada malla.

En la malla #60 se acumularon 12.04 gr de arena, la mayor cantidad de acuerdo con el análisis granulométrico realizado.

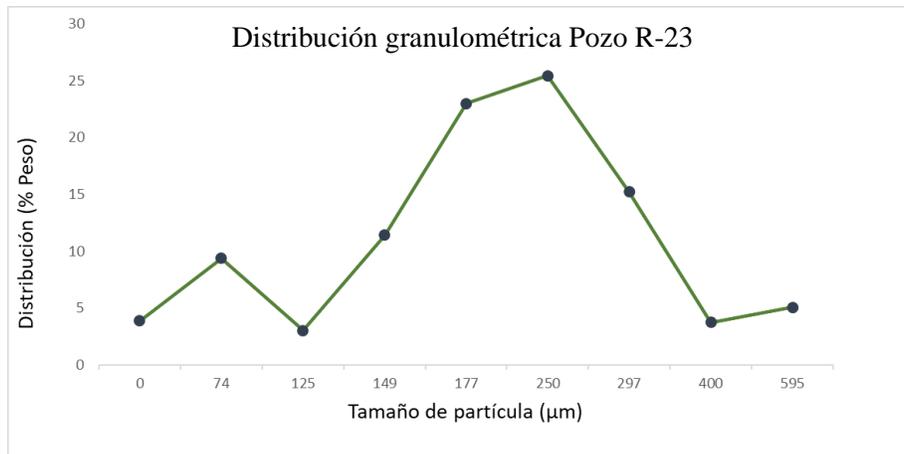


Gráfico 3. Distribución del peso de sólidos por malla, Artesa 381.

Los resultados del análisis granulométrico indican que la mayor cantidad de sólidos se alojaron en la malla #60 (250 [micras]) con un porcentaje en peso de 25.41%.

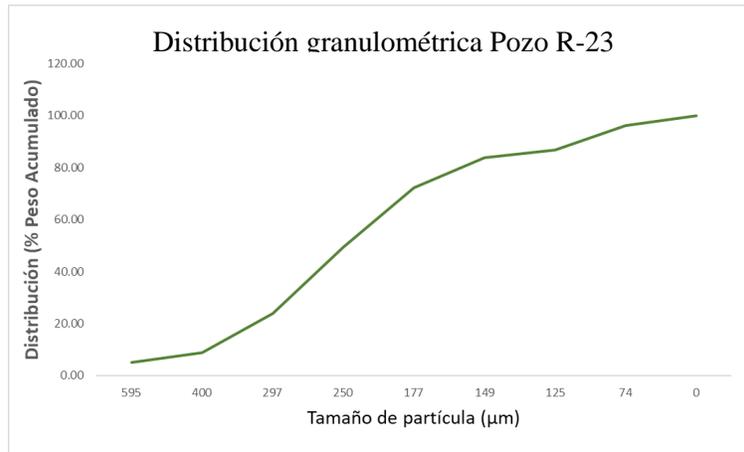


Gráfico 4. Distribución granulométrica acumulada, Artesa 381.

En la acumulación de sólidos el mayor porcentaje se alojó en las mallas número 80 (177[micras]), 60 (250 [micras]), 50 (297 [micras]), 40 (400[micras]), 30 (595 [micras]).

Además del análisis granulométrico, se realizan otro tipo de análisis que sirven para caracterizar de forma precisa los sólidos. Estos análisis se describirán a continuación:

4.2.3 Clasificación de los diámetros de los sedimentos

Una forma de caracterizar adecuadamente los sedimentos es a través de la escala de Udden-Wentworth, C. K. Wentworth (1992) J. A. Udden, (1898), que es la escala granulométrica más utilizada para clasificar los diámetros de los sedimentos en la cual se definen los límites diámetro de toda clase, desde partículas de tamaño arcilla hasta bloques.

Millimeters (mm)	Micrometers (µm)	Phi (φ)	Wentworth size class	Rock type	
4096		-12.0	Boulder	Conglomerate/ Breccia	
256		-8.0	Cobble		
64		-6.0	Pebble		
4		-2.0	Granule		
2.00		-1.0	Very coarse sand		
1.00		0.0	Coarse sand	Sandstone	
1/2	0.50	1.0	Medium sand		
1/4	0.25	2.0	Fine sand		
1/8	0.125	3.0	Very fine sand		
1/16	0.0625	4.0	Coarse silt		
1/32	0.031	5.0	Medium silt	Siltstone	
1/64	0.0156	6.0	Fine silt		
1/128	0.0078	7.0	Very fine silt		
1/256	0.0039	8.0	Clay	Mud	Claystone
	0.00006	14.0			

Tabla 5. Escala Udden-Wentworth (1992).

Basándonos en la clasificación del tipo de grano que se está manejando según Udden-Wentworth, obtenemos los siguientes resultados:

MALLA	APERTURA (micras)	PESO SÓLIDOS (gr)	PESO (%)	TIPO DE GRANO
30	595	2.39	5.04	Arena Muy Gruesa
40	400	1.77	3.73	Arena Gruesa
50	297	7.2	15.19	Arena Gruesa
60	250	12.04	25.41	Arena Media
80	177	10.89	22.98	Arena Fina
100	149	5.41	11.42	Arena Muy Fina
120	125	1.43	3.02	Arena Muy Fina
200	74	4.43	9.35	Limo/arcilla Grueso
BASE	0	1.83	3.86	

Tabla 6. Clasificación del tipo de grano, según su diámetro.

Según los resultados anteriores el tipo de grano predominante según la clasificación utilizada, y por el porcentaje de sólidos retenidos según el # malla, predomina la arena media y fina.

4.2.4 Esfericidad y redondez

Los parámetros de forma más conocidos son la redondez y la esfericidad. La redondez se relaciona a la curvatura o angulosidad del perímetro de la partícula o a la aproximación al círculo. Mientras que la esfericidad relaciona el volumen y la aproximación a la esfera¹⁷.

Los parámetros de redondez y esfericidad se pueden estimar en estudios cualitativos mediante gráficas de comparación visual. Para la cual se utiliza el gráfico de Krumbein y Sloss (API RP 56), que ocupa a la vez la esfericidad y redondez en una escala de 0.1 a 0.9. este gráfico nos indica que entre mayor sea el número, más esférica o redonda la partícula.

Para hacer la comparación de las partículas con la figura anterior, fue necesario realizar a la muestra de sólidos un análisis a microscopio. El microscopio electrónico de barrido ambiental XL30 ESEM TMP PHILIPS es útil para observar objetos que llegan a tener tamaños desde algunos milímetros hasta unos cuantos nanómetros. Este equipo se caracteriza por tener una elevada resolución y una gran profundidad de campo.

¹⁷ Miranda A. R. et al., 2014

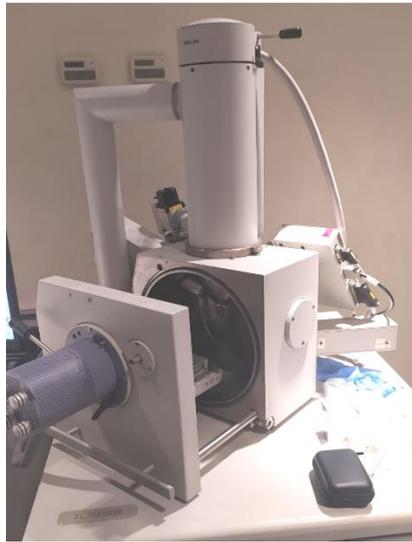


Imagen 9. Microscopio electrónico de barrido ambiental XL30 ESEM TMP PHILIPS.

Este equipo además no necesita de muestras demasiado grandes, ya que de acuerdo con el uso que se le destina específicamente con este análisis, una muestra de granos sólidos de apenas un gramo o menos, es suficiente para capturar distintos granos en una sola muestra.

El análisis de esfericidad y redondez, que regularmente se realiza por comparativa visual con gráficas (Krumbein y Sloss), para visualizar los granos se utilizó el microscopio de barrido electrónico mencionado en el capítulo anterior. Fue con este equipo que se obtuvo la imagen de las muestras de sólidos.

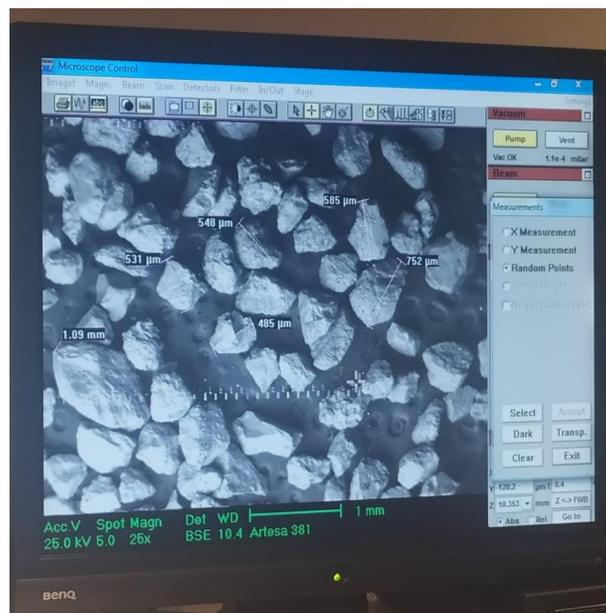


Imagen 10. Caracterización del tamaño de las partículas de la muestra.

A las muestras analizadas, además de obtener una imagen de alta resolución y apreciar detalladamente sus características físicas, el equipo también es capaz de medir el diámetro de cada una de sus partículas, esto se hace manualmente por el técnico encargado del equipo.

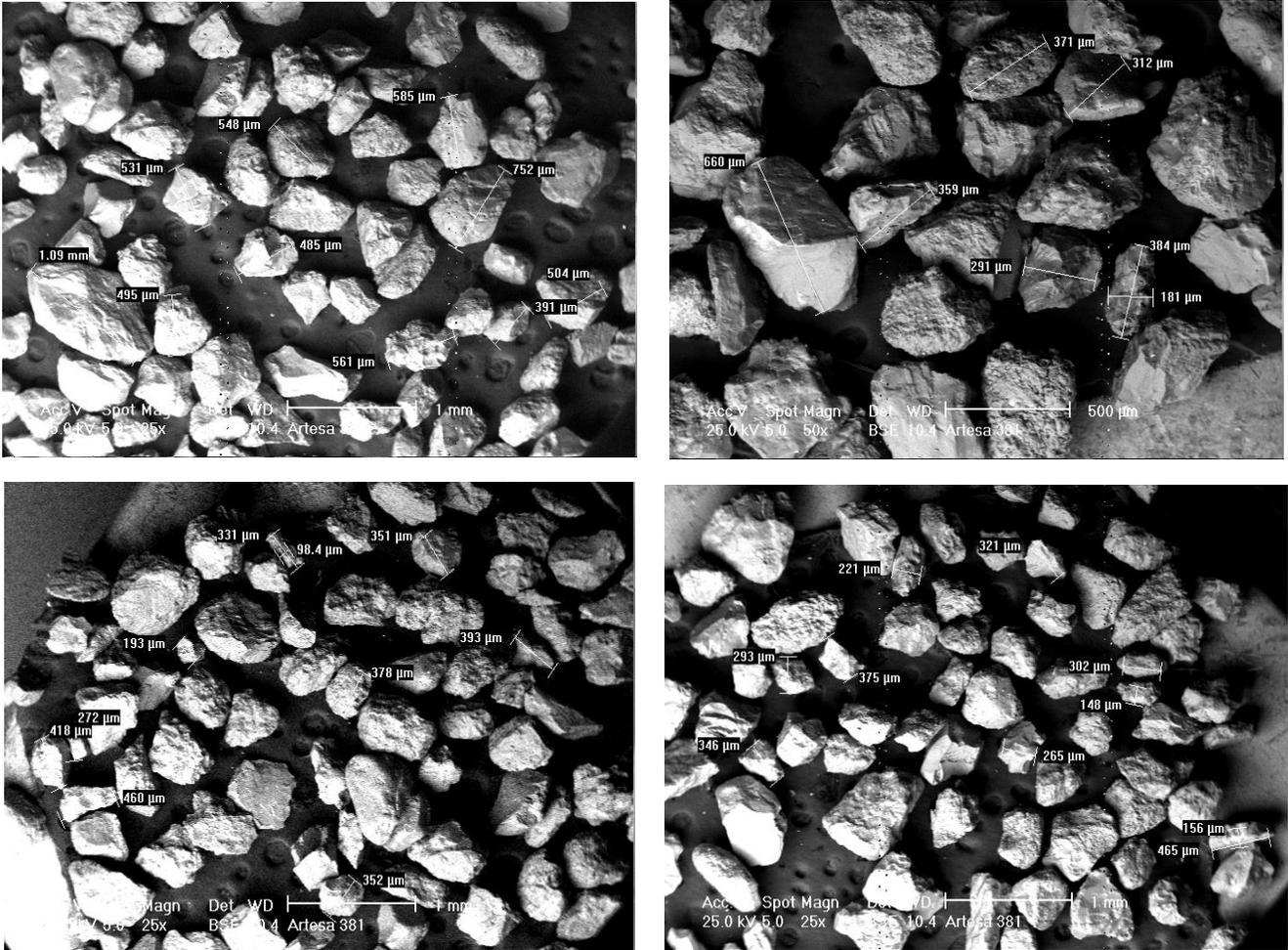


Imagen 11. Visualización de la muestra al microscopio.

Para tener valores de redondez y esfericidad es necesario utilizar las imágenes obtenidas para realizar una comparación visual de los granos con el grafico de Krumbein y Sloss.

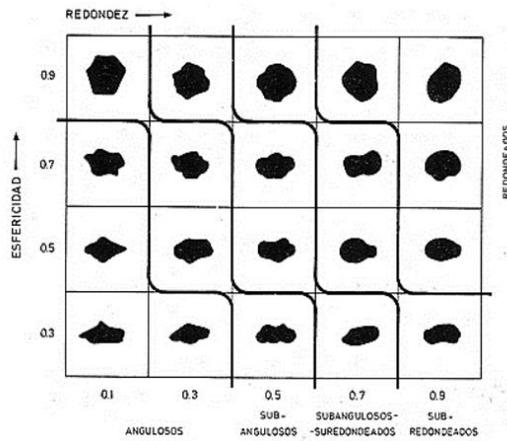
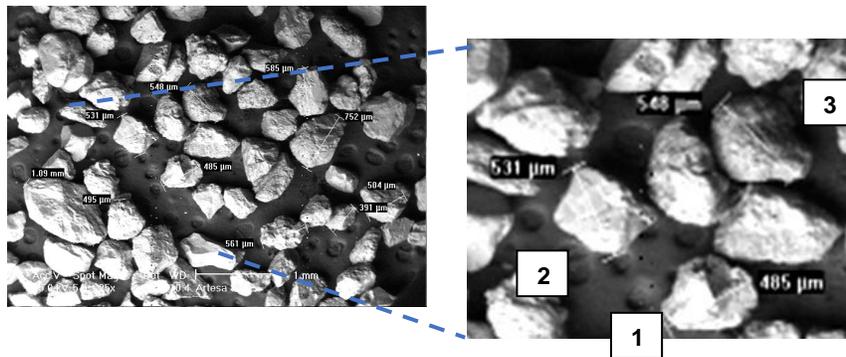


Imagen 12. Esfericidad y redondez, Krumbein y Sloss, 1955.

Al comparar la figura anterior con las imágenes obtenidas en el microscopio electrónico de barrido ambiental XL30 ESEM TMP PHILIPS.



De manera visual se llegó a los siguientes resultados:

Propiedad	Partícula 1	Partícula 2	Partícula 3
Esfericidad	0.7	0.8	0.9
Redondez	0.5 subanguloso	0.5 subanguloso	0.5 subanguloso

Tabla 7. Redondez y esfericidad de 3 partículas de la muestra.

En el caso de la partícula 2 observamos que su valor de esfericidad se encuentra entre los valores 0.7 y 0.9 de la gráfica de comparación visual de Krumbein y Sloss, por lo que tomamos un punto medio entre estas dos referencias, asignándole una esfericidad de 0.8 para toda la muestra, tomando en cuenta que estas tres partículas seleccionadas sean representativas de los valores globales.

Para la corroboración de resultados se realizó un segundo análisis en el fractamovil con el equipo microtrac PartAn 3D:

Bajo las condiciones y los alcances de este trabajo es posible tener datos de esfericidad y redondez a través de una tecnología utilizada por el IMP especializado para identificar redondez y esfericidad en las partículas utilizadas especialmente para el fracturamiento hidráulico. Para este trabajo se utilizó la misma tecnología, pero enfocado a sólidos de producción, en este caso arenas de medio a fino.

PARTAN 3D de Microtrac MRB puede medir 40 parámetros morfológicos de su material, incluidos el tamaño, la forma, la rugosidad de la superficie, la densidad, la transparencia y, por supuesto, 3D en un análisis rápido. El PARTAN 3D puede medir partículas que varían en tamaño desde 22 μm hasta 35 mm¹⁸.

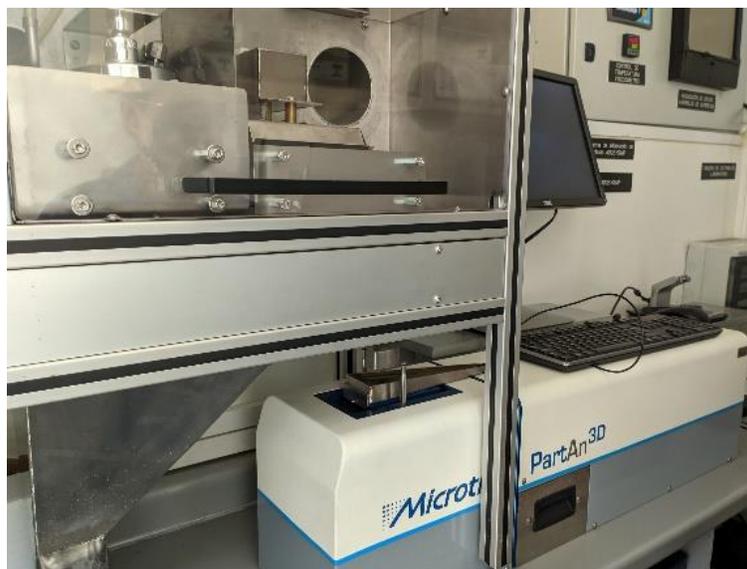


Imagen 13. Equipo Microtrac PartAn 3D.

¹⁸ Microtrac Retsch GmbH, 2022

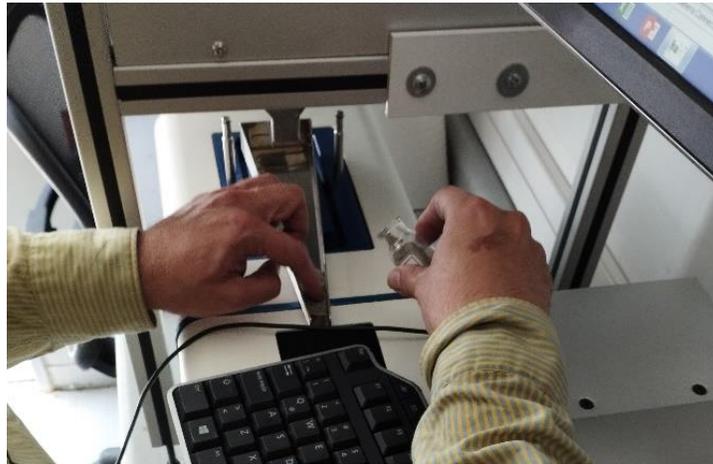


Imagen 14. Colocación de la muestra de arena para la prueba en el equipo PartAn 3D.

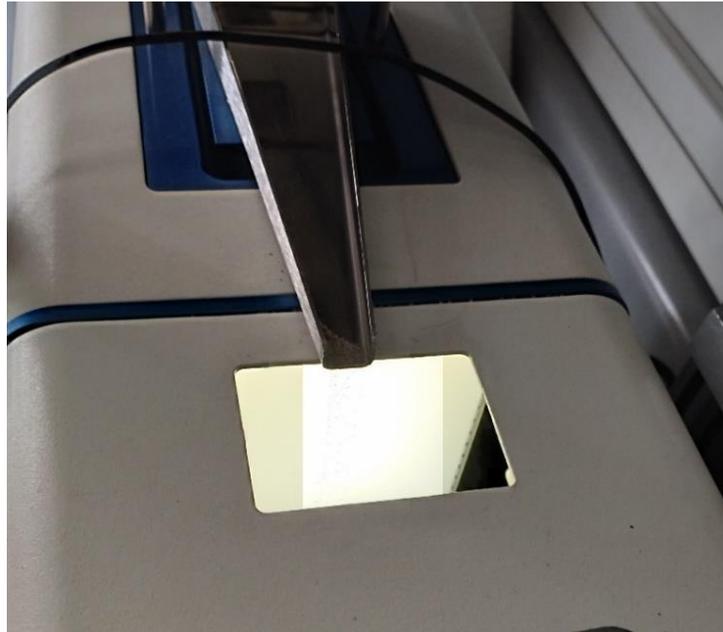


Imagen 15. Ejecución de la prueba.

Para tener una caracterización por el tipo de malla, los sólidos retenidos por cada una de ellas se pasaron por separado para conocer características de redondez y esfericidad según el tamaño de grano de la muestra, en la siguiente imagen se visualizan la forma y tamaño de los granos, y como estos van disminuyendo su tamaño cuando el #malla va aumentando.

Este equipo nos mostró imágenes representativas de la muestra, a través de fotos tomadas durante su flujo, primero se muestra la forma de las partículas según la malla de tamizado en la que se alojó la muestra:

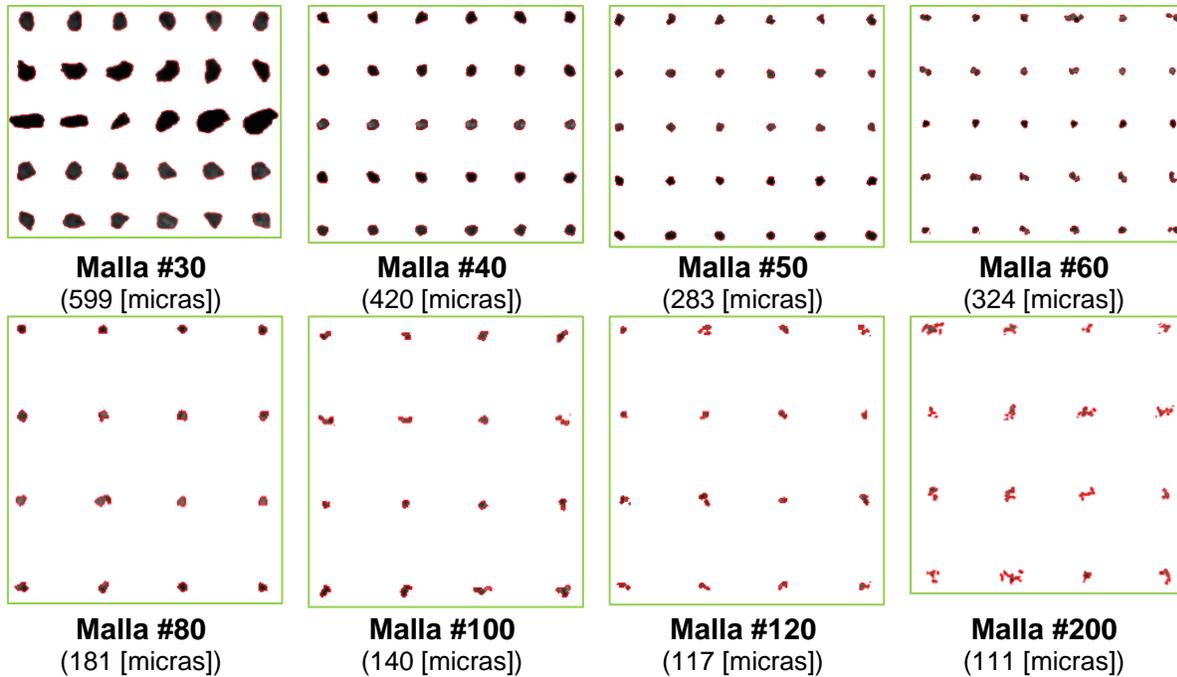


Imagen 16. Forma de las partículas de los sólidos del pozo Artesa 381 (Equipo PartAn 3D).

La mayor concentración de nuestra muestra se encuentra en la malla 60 y 80, por lo que encontraremos una forma muy parecida por lo menos en la mitad de la muestra (48.39%) entre las formas que se indican anteriormente señaladas por la malla 60 y 80 con diámetros de 324 [micras] y 181 [micras], respectivamente.

La siguiente tabla contiene un resumen de la esfericidad y redondez correspondiente a cada malla de tamizado en la que se alojó la muestra:

Malla	Tamaño de partícula [micras]	% Vol	Redondez	Esfericidad
30	599	5.04	0.56	0.92
40	420	3.73	0.56	0.93
50	283	15.19	0.53	0.94
60	324	25.41	0.46	0.93
80	181	22.98	0.42	0.92
100	140	11.42	0.4	0.87
120	117	3.02	0.51	0.86
200	111	9.35	0.47	0.81

Tabla 8. Esfericidad y redondez de la muestra por malla.

La tabla anterior nos indica que la mayor parte de nuestra muestra (48.39%) tendrá una esfericidad entre 92 - 93 y una redondez entre 0.42 - 0.46.

También se obtuvieron resultados generales de la muestra, al unir los granos recolectados por cada tamiz, al pasar la muestra completa por el PartAn 3D, se obtuvieron las siguientes imágenes:

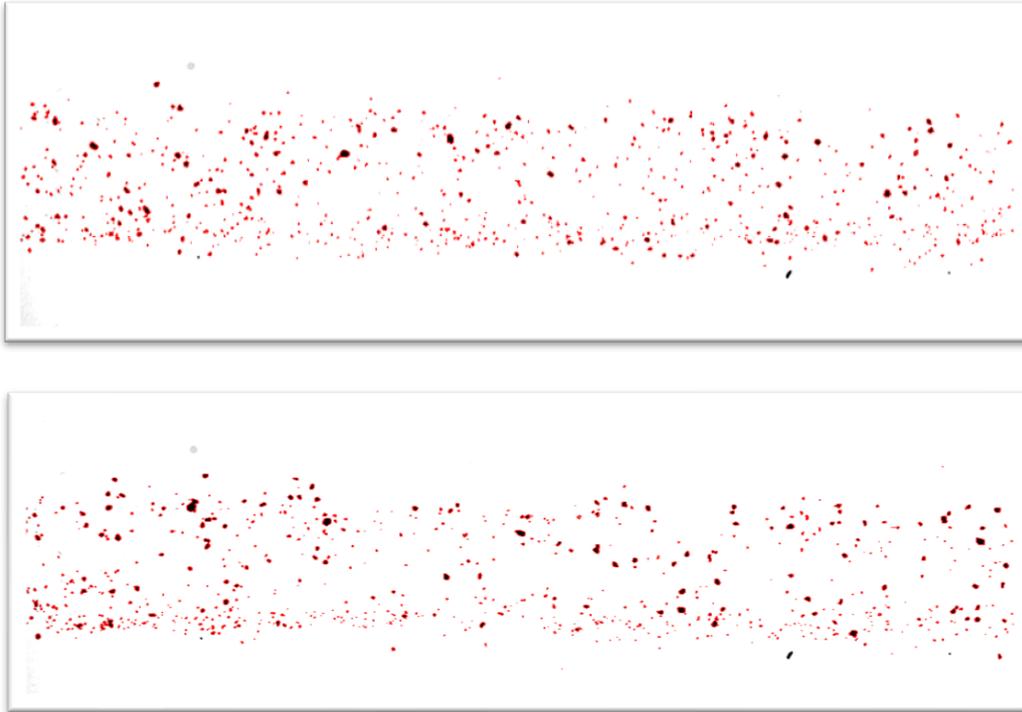


Imagen 17. Forma de la muestra completa, PartAd 3D.

La imagen anterior contiene una imagen de todos los granos de la muestra, sin haber sido separados por un proceso de tamizado.

Con la ejecución de la prueba se obtuvieron los siguientes resultados para esfericidad y redondez de la muestra:

μm	1 FThickness Cum< Vol %	2 FWidth Cum< Vol %	3 FLength Cum< Vol %	4 FThickness Diff Roundness	5 FThickness Diff L/T Ratio	6 FLength Diff Count
4000	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0
3670	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0
3366	100.00	100.00	99.72	0.00	0.00	1
3088	100.00	100.00	99.72	0.00	0.00	0
2833	100.00	100.00	99.72	0.00	0.00	0
2599	100.00	100.00	99.58	0.00	0.00	2
2384	100.00	100.00	99.51	0.00	0.00	1
2187	100.00	100.00	99.40	0.00	0.00	1
2007	100.00	99.72	99.39	0.00	0.00	1
1841	100.00	99.72	99.31	0.00	0.00	3
1689	100.00	99.54	99.15	0.00	0.00	8
1549	99.72	99.43	98.72	0.41	2.18	26
1421	99.72	99.43	98.16	0.00	0.00	50
1304	99.72	99.40	97.23	0.00	0.00	89
1196	99.72	99.21	95.84	0.00	0.00	184
1097	99.61	99.13	93.96	0.58	2.06	341
1007	99.40	98.77	91.24	0.53	1.87	595
923.6	99.40	98.32	87.31	0.00	0.00	1055
847.3	99.21	97.56	82.23	0.55	1.65	1681
777.3	99.12	96.34	76.10	0.56	1.64	2515
713.1	98.91	94.43	69.18	0.52	1.72	3423
654.2	98.25	91.52	61.34	0.50	1.96	4833
600.2	97.51	87.44	53.91	0.53	1.76	5722
550.6	96.20	81.87	46.34	0.53	1.79	7224

Tabla 9. Distribución del tamaño de las partículas.

La tabla anterior muestra los resultados por cada grano que ha sido analizado por el equipo, con los datos recabados el software realiza un análisis estadístico para arrojar resultados generales de la muestra.

De los resultados de la tabla anterior se obtienen las siguientes graficas para esfericidad y redondez:

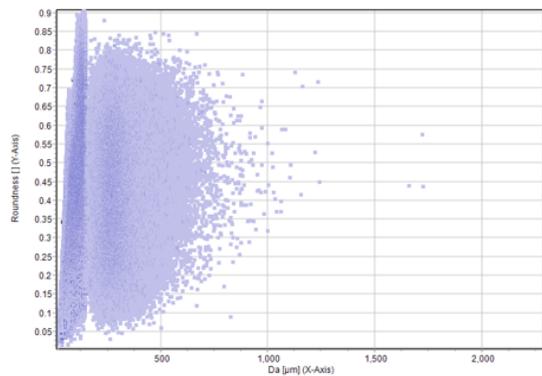


Gráfico 5. Redondez vs. Diámetro de partícula, Part An 3D.

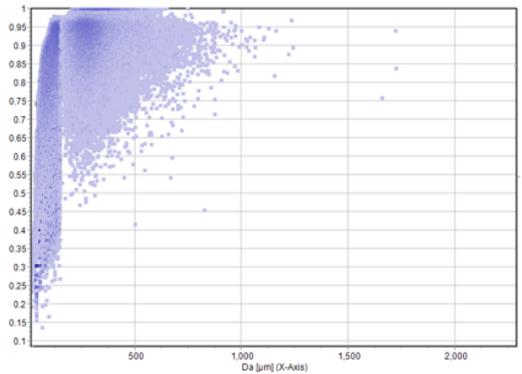


Gráfico 6. Esfericidad vs. Diámetro de partícula, PartAn 3D.

Las gráficas anteriores nos muestran un análisis del diámetro, redondez y esfericidad de la muestra al ser analizadas por el equipo Microtrac y con base a estos resultados, realiza un proceso estadístico para darnos un resultado representativo de la muestra en general como se muestra a continuación:

Pozo Artesa 381	
Da [micras]	260.35
Redondez promedio	0.45
Esfericidad promedio	0.89

Tabla 10. Redondez, esfericidad y diámetro promedio de la muestra.

Es a través de estos análisis que es posible conocer la redondez y esfericidad de la muestra de sólidos, realizar los tres análisis es importante porque de esta manera uno respalda los resultados del otro.

4.2.5 Composición química

Conocer la composición química de las muestras de sólidos es parte de su caracterización, por eso las muestras son analizadas en un microscopio electrónico de barrido de doble haz Nova 200 Nanolab para identificar su composición química. Este equipo está equipado con una lente de inmersión para obtener imágenes de características de menos de 10 nm y espectroscopia de dispersión de energía para el análisis de composición.



Imagen 18. Microscopio electrónico de barrido de doble haz nova 200 Nanolab.

Este equipo arrojará como resultados los elementos presentes en la muestra, así como los porcentajes contenidos de cada uno de ellos.

Los resultados obtenidos para la muestra del pozo en el microscopio se muestran en las siguientes imágenes:



Imagen 19. Composición de la muestra (nova 200 Nanolab).

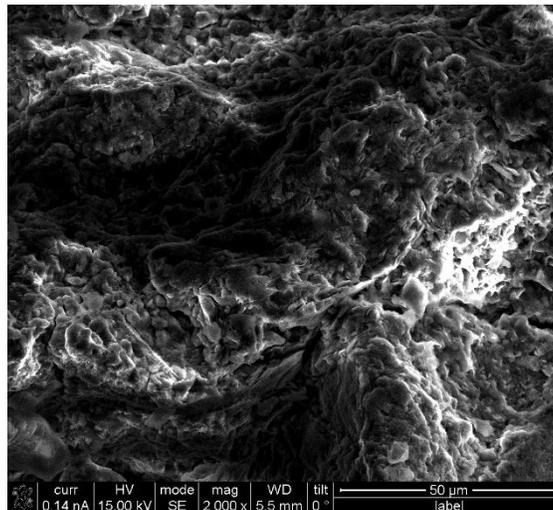


Imagen 20. Visualización de la muestra (nova 200 Nanolab)

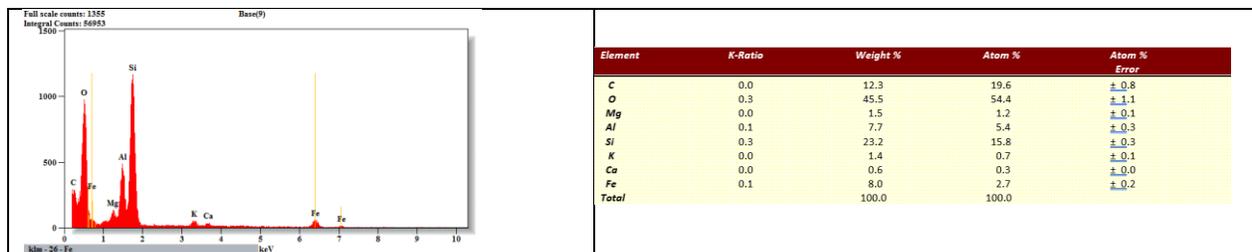


Imagen 21. Resultados, composición de la muestra (nova 200 Nanolab).

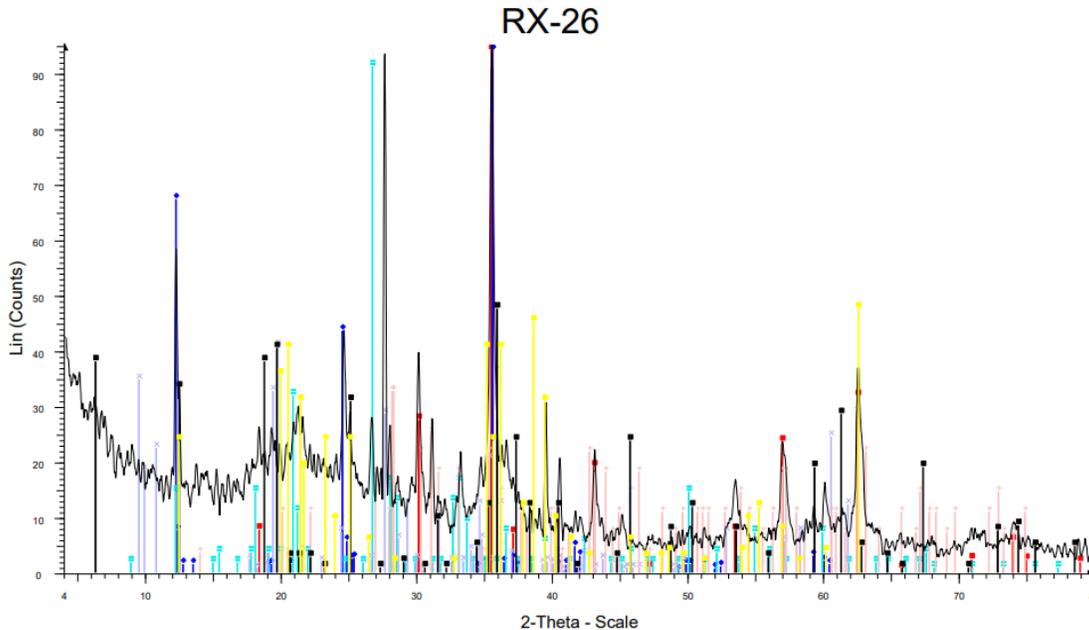
Con los diferentes datos de la composición de la muestra que se obtuvieron en el microscopio electrónico de barrido de doble haz nova 200 Nanolab y con ayuda de un análisis estadístico, los valores representativos de la muestra son los siguientes:

Elemento	K-Ratio	Weight %	Atom%	Atom % Error
C	0	12.36	19.06	0.75
O	0.4	48.98	52.22	0.9
Mg	0	4.93	9.11	0.15
Al	0.1	1.92	1.57	0.3
Si	0.4	28.6	19.23	0.3
K	0	1.04	0.52	0.1
Fe	0.1	4.87	1.8	0.2
Ca	0	0.65	0.35	0.05

Tabla 11. Composición química de la muestra.

4.2.6 Fluorescencia de Rayos-X (semicuantitativa)

Se encontró la fluorescencia de Rayos-X en el laboratorio de caracterización de materiales sintéticos y naturales. Sección de Rayos X, MÖSSBAUER y química combinatoria con el equipo: Espectrómetro de fluorescencia ARL THERMO FISHER de longitud de onda dispersiva (WDXRF), con el método LA-34080109-RX-DF-MP-02.



RX-26 - File: ARTESA 381-2.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - S
Operations: Smooth 0.150 | Fourier 20.000 x 1 | Import

- 01-089-3854 (C) - Magnetite, syn - Fe_3O_4 - Y: 100.00 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 8.39400 - b
- ◆ 00-052-1572 (Q) - Antigorite - $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ - Y: 200.00 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 5.
- ▤ 00-020-0452 (I) - Gismondine - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ - Y: 95.84 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a
- ⊠ 00-042-0544 (I) - Anthophyllite - $\text{Mg}_5\text{Fe}_2 + 2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ - Y: 42.98 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorh
- ⊕ 00-026-0876 (D) - Enstatite, ferroan - $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$ - Y: 38.21 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic
- 00-012-0447 (D) - Kaolinite 1T - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ - Y: 50.00 % - d x bv: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - a 5.14

- 00-019-0751 (N) - Sudoite-1 ITM RGII ITb RG - $\text{Mg}_2\text{Al}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1

Gráfico 7. Fases encontradas por difracción de Rayos-X (Difractómetro SIEMENS 5005).

ARTESA381-2 (RX-20)	CONCENTRACIÓN % PESO
O	43,99
Si	18,49
Mg	14,98
Al	9,22
Fe	7,99
Ca	1,17
Na	0,92
Cl	0,61
Cr	0,36
S	0,34
K	0,30
Ti	0,25
Sn	0,22

Cobertura de elementos de Sodio (Na) hasta Uranio (U)

Tabla 12. Fluorescencia de Rayos-X.

Esta prueba de Fluorescencia en conjunto con la composición química mostrada anteriormente nos reafirma que la muestra está compuesta mayormente por oxígeno (49.99%) y Silicio (18.49%), un elemento que en fluorescencia también muestra una presencia significativa es el magnesio (14.98%).

La recepción de los fluidos, así como el análisis de sólidos granulares son de utilidad dentro del proceso del retenedor de sólidos superficial para la medición y el diagnóstico de sólidos producidos en un pozo o la instalación objetivo donde se planea poner en operación un equipo.

5 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN Y DE EFICIENCIA DE SEPARACIÓN

El equipo de control de sólidos superficial para el control de sólidos de formación o fractura provenientes de perforaciones subterráneas, producidas durante la operación de pozos de hidrocarburos, es una tecnología de superficie que hace uso de elementos filtrantes y cedazos en un equipo de alta eficiencia, especialmente diseñado para proteger la integridad de los equipos y líneas superficiales de conducción.

Este sistema incluye un módulo de separación de sólidos, cuyo desarrollo se basó en el principio de separación ciclónica para separar sólidos que se transportan en una matriz fluida, sujeta a altas presiones. La intención de probar este equipo es evaluar el desempeño de la tecnología.

Para determinar el comportamiento de las caídas de presión en función del gasto en el equipo y llevar a cabo la prueba de la eficiencia de separación, se diseñó un circuito de pruebas tanto para baja como para alta presión, ambos circuitos cuentan con una zona de mezclado bifásica, donde será posible realizar las pruebas de eficiencia de separación mediante un arreglo de válvulas en paralelo que permitirá la incorporación de la arena de apuntalante de forma segura, mientras se mantiene el flujo del fluido de trabajo siempre constante hacia el equipo de separación de sólidos. En la Figura 22 se presenta el diagrama general de dichos circuitos de prueba. En el detalle A de la Figura 23 se muestra dicha zona de mezclado para el circuito de baja presión.

Antes de iniciar con las pruebas fue importante determinar el elemento filtrante con base en el análisis de la muestra de sólidos recuperada “determinación de la granulometría tamaño de partícula y porcentaje de su distribución”. también queda aclarar que estas pruebas se llevaron a cabo en las instalaciones del pozo escuela del IMP SEDE. A continuación, se describirán los equipos, así como la metodología para llevar a cabo las pruebas:

5.1 EQUIPOS

Para el circuito de pruebas de baja presión que se utilizaron los siguientes equipos:

- Bomba de capa límite marca Discflo, modelo 403-14-2HHD de 79 GPM y presión máxima de 200 psi.
- Medidor de flujo coriolis, marca Micromotion, modelo R200S418NCAZEZZZZ, presión máxima: 18 bar.
- Sensores de presión Silicon Sapphire, presión máxima: 20 kpsi, Resolución:0.0003% FS.
- Adquisitor de datos Pioneer PPS33LR Remote Watcher.
- Tubería de 2” pvc Harvel Clear cedula 40.
- Conexiones hidráulicas roscadas de 2” NPT, válvulas de 2” cedula 40 roscables NPT.
- Equipo de separación de sólidos.

- Totem de 1 m³ de capacidad.
- 1.5 m³ de fluido base agua con densidad $\rho=1.01 \text{ gr/cm}^3$ y viscosidad de $\mu= 0.000798 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ a una temperatura media de 30°C.
- 30 kg de apuntalante, arena de fractura de tamaño de 500 micras.

Para el circuito de pruebas de alta presión, que se muestra también en la Figura 20 se utilizaron los siguientes equipos:

- Bomba de alta presión marca Woma, modelo: 330Z, Pmax:10,000 psi. Qmax:319 lt/min.
- Conexiones, accesorios y tubería de golpe FIG1502.
- Niples de 2" NPT para 15,000 psi.
- Combinación FIG1502 a Rosca NPT 2".
- Válvulas de globo Line WCB para 5,000 psi.
- Canasta de filtración de 150 micras y volumen de capacidad de 15 lt.
- Bomba sumergible Truper 1.5HP, Q max:233 lt/min, Pmax:9 mca.
- Mangueras de 15m x 2" D.I. conexiones rápidas LGA.
- Barril de 200 lt de capacidad

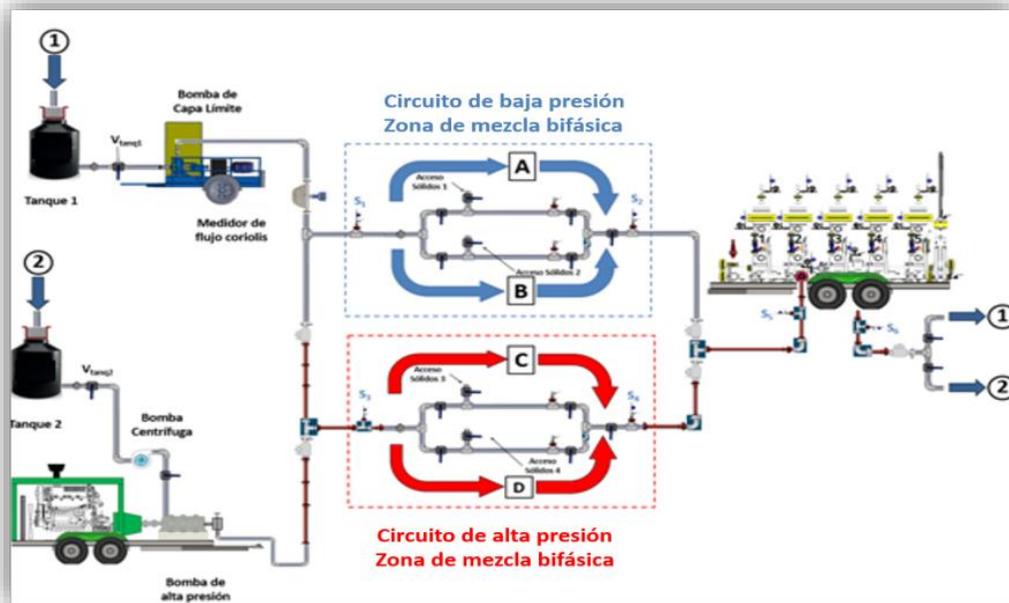


Figura 20. Diagrama de equipos y conexiones.

5.2 METODOLOGÍA

El programa operativo inicial para realizar las pruebas se muestra a continuación:

Programa operativo inicial

1. Realizar la caracterización del tamaño de sólidos a usar.
2. Realizar el peso inicial de sólidos a usar en la prueba.
3. Caracterizar caídas de presión en circuito de pruebas sin sólidos bajo diferentes condiciones de flujo y presión
4. Realizar las aperturas y cierres de válvula necesarias para direccionar el flujo principal al filtro canasta
5. Realizar el vaciado de sólidos en la línea de flujo donde se hará el mezclado .
6. Realizar el direccionamiento del flujo principal de la rama B a la rama A mediante las válvulas de control en donde será el mezclado.
7. Fluir por 5 minutos en dirección del filtro canasta.
8. Cerrar la válvula de acceso al flujo canasta y abrir válvula a canasta de recuperación de sólidos remanentes y fluir por un tiempo de 5 minutos .
9. Purgar filtro canasta y recuperar los sólidos para su pesaje .
10. Realizar el direccionamiento del flujo principal del filtro canasta a la línea de la salida del flujo.
11. Recuperar los sólidos para su pesaje.
12. Volver al paso número 5 y ejecutar los pasos hasta el número 11 hasta cumplir con el peso total estipulado para la prueba .
13. Realizar el análisis en porcentaje de peso para cada una de las estaciones de trabajo y condiciones de presión, gasto y tamaño de partícula.

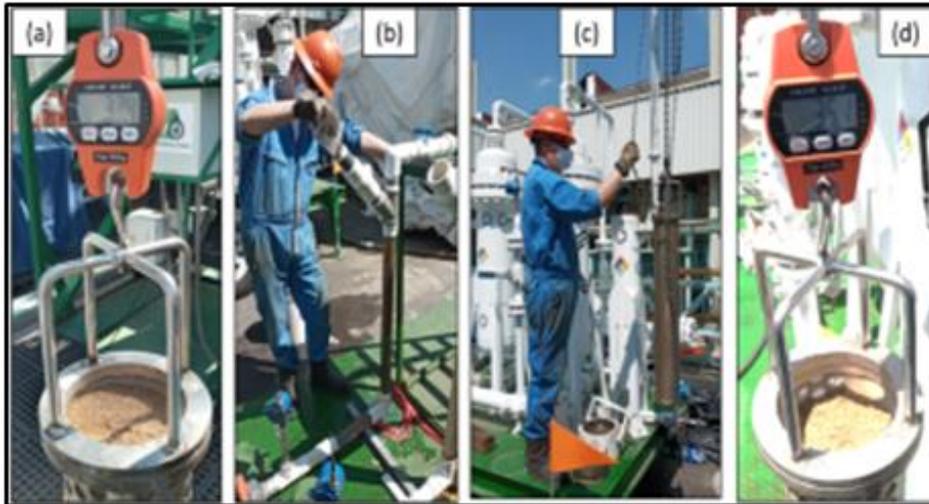


Imagen 22. (a) Muestra el pesaje inicial de sólidos antes de la prueba, (b) la recuperación de la canasta de retención de sólidos posterior a la prueba y (c) el peso recuperado después de la prueba de separación.

5.2.1 Metodología para pruebas de caracterización de caída de presión contra el gasto en el ESSS con flujo monofásico.

Para la caracterización de caída de presión contra el gasto en el equipo de separación de sólidos con flujo monofásico se llevará a cabo mediante el bombeo controlado del fluido de trabajo con la bomba de capa límite a través de cada unidad de separación de sólidos, iniciando con la unidad No.1, monitoreando el gasto (Figura 21-D) y la presión de entrada y salida en todo el equipo de separación de sólidos en el múltiple de entrada (Figura 22-a) y en el múltiple de salida de flujo, posteriormente se incorporara cada unidad de forma paralela mediante la apertura de válvulas de entrada (Figura 22-b) y salida de flujo de cada unidad (Figura 22-c). Los cambios en el régimen del gasto se ajustarán mediante el variador de frecuencia de la bomba de capa límite, en estaciones de 10 Hz en 10 Hz por un tiempo de 2 minutos, iniciando en 20 Hz y terminado en 60 Hz para un total de 5 estaciones.

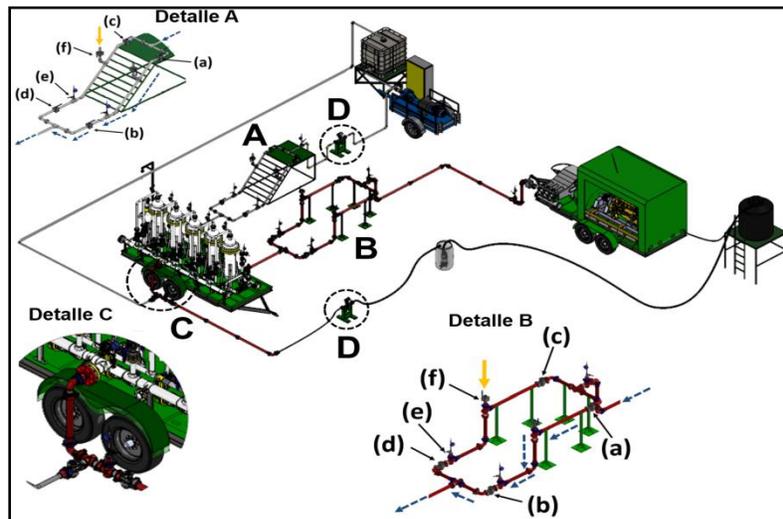


Figura 21. Circuito de pruebas de caracterización y eficiencia de separación baja y alta presión. (A) Zona de mezclado baja presión, (B) Zona de mezclado alta presión, (C) Válvula de represión alta presión.

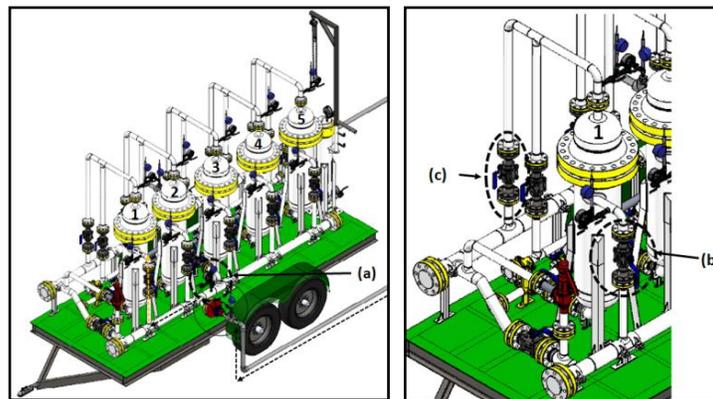


Figura 22. (a) Ilustración de la trayectoria, con flechas y línea punteada, de la alimentación del fluido de trabajo a la US No.1. (b) Válvula de entrada de flujo a la US No.1 y (c) Válvula salida de flujo de la US No.1.

Posteriormente, obtuvo el promedio de las presiones en la entrada y salida del equipo por cada estación, así como también del gasto obtenido en estas para elaborar la matriz de datos de gasto vs frecuencia (Tabla 13), la matriz de datos ΔP Vs frecuencia (Tabla 14), donde se calculó el porcentaje de pérdidas de presión con respecto a la presión de entrada en el ESSS mediante la expresión:

$$\% \Delta P = \frac{p_e - p_s}{p_e} \cdot 100$$

Y finalmente la matriz de datos de ΔP Vs Q (Tabla 15).

Gasto Vs Frecuencia (MSC No.1)	
Estación [Hz]	Gasto [lt/min]
20	
30	
40	
50	
60	

Tabla 13. Matriz de datos
Gasto vs. Frecuencia.

Caídas de presión en MSC No.1				
Estación [Hz]	Presión Múltiple entrada	Presión Múltiple Salida	ΔP_1 [psia]	% ΔP_1 [%]
20				
30				
40				
50				
60				

Tabla 14. Matriz de datos ΔP vs. Frecuencia.

Δp Vs Q (MSC No.1)		
Estación [Hz]	Gasto [lt/min]	ΔP [psia]
20		
30		
40		
50		
60		

Tabla 15. Matriz de datos
 ΔP vs. Q.

Así mismo, se efectuó el gráfico de cada matriz de datos para su posterior análisis del comportamiento de las presiones en función del gasto para el equipo.

5.2.2 Metodología para pruebas de eficiencia de separación de sólidos a diferente gasto de flujo, bajo condiciones de baja presión.

Para efectuar las pruebas de separación de sólidos en el equipo a condiciones de baja presión, se dispuso de una muestra de material granular (peso inicial W_i) cuya granulometría está en los 500 micrómetros y se mezcló con el fluido de trabajo, creando la mezcla bifásica utilizando el arreglo mostrada en el detalle A de la Figura 21, donde a través de la apertura y cierre de las válvulas (c) y (d), se aislaba o incorporaba una rama al flujo principal, permitiendo agregar los sólidos (apuntalante) de forma segura a través de la válvula (f), con la previa purga de presión mediante la válvula (e), para posteriormente, cerrar válvulas (a) y (b) y abrir válvulas (c) y (d) para efectuar el disparo de sólidos mediante la corriente de flujo hacia el equipo, y del módulo de separación No.1.

La mezcla bifásica se inyectó en el equipo Resuss, a 30°C con la densidad y viscosidad del líquido de trabajo indicadas, por la tubería cuya trayectoria se muestra con flechas y líneas punteadas en la Figura 22-a.

Por medio de la apertura y cierre de válvulas (Figura 22-b y 22-c) la mezcla se canalizó hacia el módulo de separación de sólidos número uno del equipo Resuss II-IMP de esta configuración, aunque se pueden operar simultáneamente una o varias unidades de separación. Sensores de presión estratégicamente colocados permitieron monitorear la presión en las líneas del equipo Resuss a lo largo de todo el proceso de separación.

Con el fin de determinar la eficiencia de separación a diferentes condiciones de flujo, se realizaron 5 estaciones de gastos y presiones diferentes para separar los sólidos granulares de la mezcla.

La eficiencia en porcentaje de la operación de separación, η_R se evaluó pesando los sólidos separados y acumulados, W_f , en el Sistema de Recuperación de Sólidos (SRS), también conocido como “filtro canasta” y comparándola con el peso original, W_i , por medio de la expresión:

$$\eta_R = \frac{W_i - W_f}{W_i} \cdot 100$$

5.2.3 Metodología para pruebas de eficiencia de separación bajo condiciones de alta presión.

La prueba de eficiencia de separación a condiciones de alta presión, se llevó a cabo con el mismo principio de operación que la explicada en la metodología de separación de baja presión, solo haciendo énfasis en que se efectuará la dosificación de sólidos en la zona de mezclado de alta presión mostrado en el detalle B de la Figura 21, y que se llevarán las condiciones de flujo en el equipo Resuss II-IMP a un valor máximo de presión de 1500 psia, donde se ajustará el gasto con un válvula a la salida del equipo Resuss II-IMP (Figura 21, detalle C) para obtener condiciones de flujo para el arrastre de sólidos.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Resultados pruebas de caracterización de caída de presión contra el gasto en el ESSS con flujo monofásico.

Los resultados de las pruebas de caracterización de gasto y caída de presión en el equipo Resuss se muestran en la tabla No.16, en ella se encuentran los valores promedios del gasto, las presiones de entrada y salida en el equipo Resuss, así como los cálculos de caídas de presión y porcentaje de caída de presión desde la unidad No.1 hasta la unidad No.5 para cada una de las 5 estaciones de trabajo (20Hz hasta 60 Hz). Así mismo, en el gráfico 8 se presenta el comportamiento de caídas de presión contra gasto en el equipo Resuss a medida que se incorpora cada unidad de separación y el gráfico del porcentaje de pérdidas de presión contra el gasto en el ESSS con la unidad de separación No.1 hasta la unidad de separación No.5 operando en paralelo.

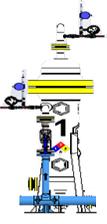
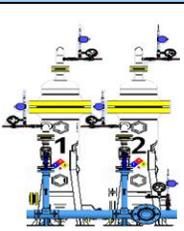
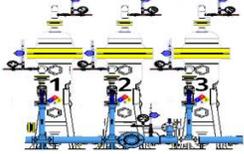
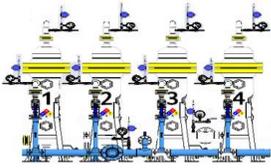
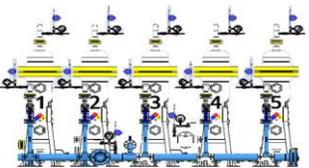
FIGURA	Gasto y Caídas de presión en US No.1						
	Estación [Hz]	Gasto [lt/min]	Gasto [bpd]	Presión Múltiple entrada [psia]	Presión Múltiple Salida [psia]	ΔP_1 [psia]	$\% \Delta P_1$ [%]
	20	169.05	1531.05	15.22	14.94	0.28	1.83
	30	255.57	2314.58	23.35	18.18	5.17	22.16
	40	340.27	3081.68	30.16	21.79	8.37	27.76
	50	425.17	3850.60	38.85	26.36	12.50	32.16
60	509.58	4615.04	49.30	31.87	17.43	35.35	
FIGURA	Gasto y Caídas de presión en US No.1 y US No.2						
	Estación [Hz]	Gasto [lt/min]	Gasto [bpd]	Presión Múltiple entrada [psia]	Presión Múltiple Salida [psia]	ΔP_{1-2} [psia]	$\% \Delta P_{1-2}$ [%]
	20.0	185.0	1675.5	17.4	15.6	1.8	10.6
	30.0	279.8	2534.2	21.3	18.8	2.6	12.0
	40.0	374.2	3389.0	26.5	23.2	3.4	12.7
	50.0	467.8	4237.0	33.3	28.8	4.5	13.5
60.0	557.5	5049.3	41.2	35.2	6.0	14.5	
FIGURA	Gasto y Caídas de presión en US No.1 a US No.3						
	Estación [Hz]	Gasto [lt/min]	Gasto [bpd]	Presión Múltiple entrada [psia]	Presión Múltiple Salida [psia]	ΔP_{1-3} [psia]	$\% \Delta P_{1-3}$ [%]
	20	187.94	1702.1	17.0	15.3	1.71	10.06
	30	285.12	2582.2	20.5	18.5	1.95	9.50
	40	381.23	3452.6	25.3	23.1	2.24	8.83
	50	475.36	4305.1	31.5	28.7	2.79	8.86
60	567.11	5136.1	38.8	35.3	3.49	8.99	
FIGURA	Gasto y Caídas de presión en US No.1 a US No.4						
	Estación [Hz]	Gasto [lt/min]	Gasto [bpd]	Presión Múltiple entrada [psia]	Presión Múltiple Salida [psia]	ΔP_{1-3} [psia]	$\% \Delta P_{1-4}$ [%]
	20	188.69	1708.9	16.83	15.39	1.4	8.57
	30	286.25	2592.5	20.15	18.53	1.6	8.05
	40	382.64	3465.4	24.76	23.03	1.7	7.00
	50	477.89	4328.1	30.86	28.76	2.1	6.82
60	565.47	5121.2	37.69	35.28	2.4	6.41	
FIGURA	Gasto y Caídas de presión en US No.1 a US No.5						
	Estación [Hz]	Gasto [lt/min]	Gasto [bpd]	Presión Múltiple entrada [psia]	Presión Múltiple Salida [psia]	ΔP_{1-3} [psia]	$\% \Delta P_{1-5}$ [%]
	20	189.10	1712.60	16.71	15.11	1.60	9.59
	30	287.16	2600.66	19.88	18.32	1.56	7.85
	40	382.48	3463.96	24.49	22.78	1.71	6.97
	50	476.69	4317.22	30.44	28.44	2.00	6.56
60	548.10	4963.93	35.92	33.70	2.23	6.20	

Tabla 16. Resultados de caracterización caída de presión contra el gasto en el equipo con flujo monofásico.

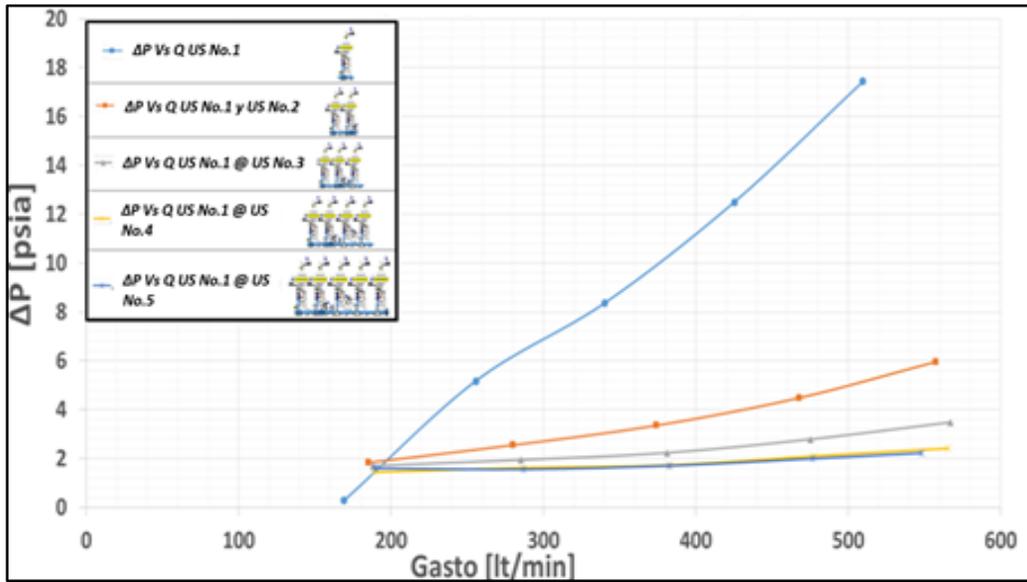


Gráfico 8. Gráfico del comportamiento de caídas de presión contra gasto en el equipo con la unidad de separación No. 1 y operando en paralelo hasta la unidad de separación No. 5.

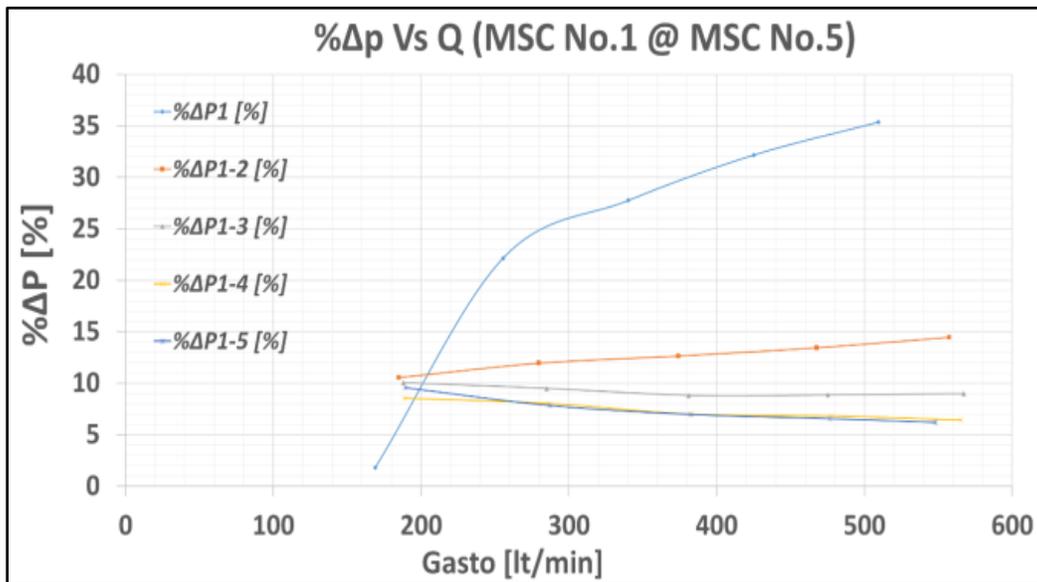


Gráfico 9. Gráfico del comportamiento del porcentaje de caídas de presión contra el gasto en el equipo Resuss con la unidad de separación No.1 y operando en paralelo hasta la unidad de separación No.5.

5.3.2 Resultado pruebas de eficiencia de separación de sólidos a diferentes gastos de flujo, baja presión.

Los resultados de la separación a condiciones de baja presión se reportan en la Tabla 17, en ella se encuentran los valores de presión a la entrada del equipo, el gasto en la línea de entrada, en barriles por día (bpd), el peso de la muestra a la entrada y el peso de la

muestra a la salida en el filtro canasta y finalmente el valor en la eficiencia de separación para las 5 estaciones de trabajo.

Estación	Presión	Gasto	Peso inicial	Peso final	Eficiencia
[Hz]	(psia)	(bpd)	(kg)	(kg)	(%)
20	18.52	1435.02	37.4	35.1	93.85
30	23.06	2198.23	35.1	34.1	97.15
40	28.58	2956.19	37	36.1	97.57
50	38.93	3633.21	37.7	37.5	99.47
60	49.81	4040.75	37.4	37	98.93

Tabla 17. Resultados de eficiencia en la separación para los gastos indicados (baja presión).

En continuidad de ideas, se presenta en el Gráfico 10, el comportamiento de la eficiencia de separación contra el gasto, obtenida de las 5 estaciones de trabajo con la bomba de capa límite operando a baja presión.

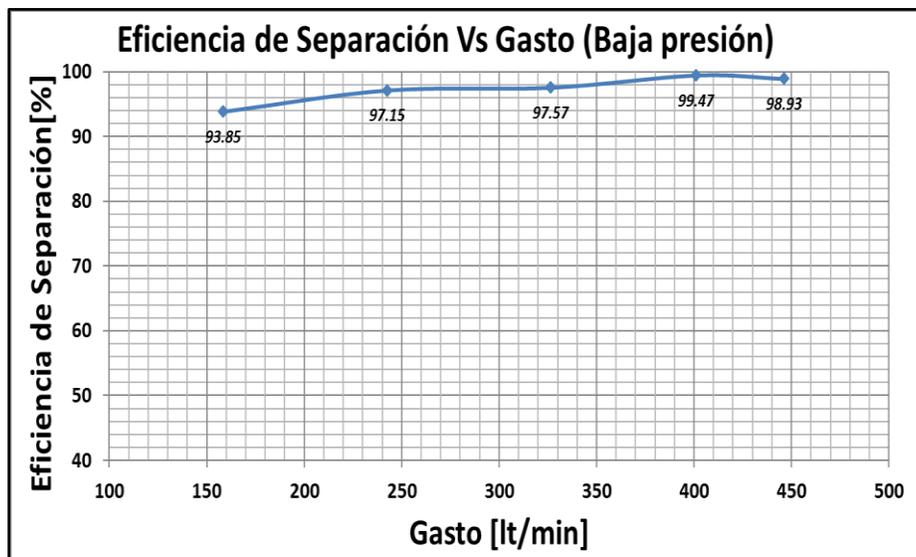


Gráfico 10. Gráfica del comportamiento de la eficiencia de separación contra el gasto a condiciones de baja presión.

5.3.3 Resultado de eficiencia de separación a condiciones de alta presión.

Los resultados de la separación a condiciones de alta presión se reportan en la Tabla 18, en ella se encuentran los valores de presión a la entrada del equipo Resuss, el gasto en la línea de entrada, en barriles por día (bpd), el peso de la muestra a la entrada y el peso de la muestra a la salida en el filtro canasta y finalmente el valor en la eficiencia de separación bajo estas condiciones. Así mismo, se presenta en el Gráfico 11 el comportamiento de la presión durante la prueba de separación a condiciones de alta presión.

Presión	Gasto	Peso inicial	Peso final	Eficiencia
(psia)	(bpd)	(kg)	(kg)	(%)
850.2	1702.8	40.9	36.6	89.5

Tabla 18. Resultados de eficiencia en la separación alta presión.

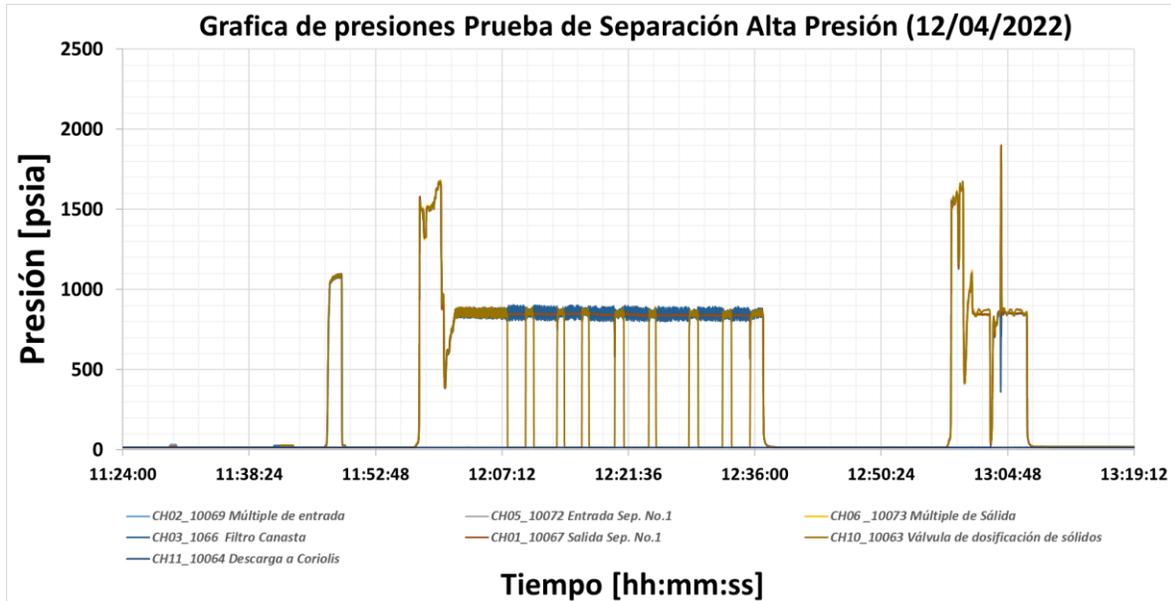


Gráfico 11. Gráfica del comportamiento de la presión durante la prueba de eficiencia de separación a condiciones de alta presión.

5.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos de los tres tipos de pruebas presentadas se analizan en términos de las siguientes relaciones: a) efecto de la caída de presión en función del gasto y, b) eficiencia de separación en función del gasto.

- Efecto de la caída de presión en función del gasto. De la gráfica del comportamiento de la caída de presión vs gasto (Gráfico 8), podemos observar que las mayores caídas de presión se presentan cuando se opera una sola unidad de separación en el equipo al valor máximo de bombeo, llegando a un valor máximo de 14.43 psia con un gasto de 509.58 lt/min, esto equivale a un 35.35% de pérdida de presión en el equipo, por otro lado, al operar las 5 unidades de forma paralela y a condiciones de máximo flujo, se obtiene un valor máximo de caída de presión de 2.23 psia a 548.1 lt/min, equivalente a un 6.2% de pérdidas de presión en el equipo. Este rango de operación permitirá que, durante la operación del equipo en pozos

e instalaciones de separación de hidrocarburos, se puedan alinear a la corriente de flujo del pozo desde 2 hasta las 5 Unidades de separación, obteniendo con ello la máxima reducción de pérdidas de presión y de gasto por el uso del equipo.

- b) Eficiencia de separación en función del gasto. De acuerdo con los resultados en las pruebas de eficiencia de separación a baja presión, se determinó un valor mínimo de 93.85% en la eficiencia de separación a un gasto de 158.45 lt/min para un tamaño de partícula promedio de 500 micras de arena de fractura y con agua como fluido de trabajo. Conforme se incrementa el gasto, se reporta un valor máximo de eficiencia de separación del 98.93% para un gasto de 401.16 lt/min con las mismas características del tamaño de arena, con un rango de presión de 15.2 psi hasta 49.3 psia respectivamente. En lo correspondiente a la prueba de eficiencia de separación a condiciones de alta presión, se obtuvo un valor del 89.5% bajo condiciones de operación de 850 psia y un gasto de 188 lt/min (una reducción del 4.5% con respecto a la prueba de menor valor de eficiencia de separación a baja presión). Dichos resultados permiten catalogar al equipo como un equipo de separación de alta eficiencia bajo condiciones controladas de laboratorio.

6 CONCLUSIONES

En el mundo no existe un método de control de arena único que se adapte a todos los pozos en cada condición, una amplia variedad de métodos de selección se ha utilizado y sigue siendo desarrollado y perfeccionado en la actualidad.

La necesidad de seguir incursionando en nuevas tecnologías para la retención de sólidos en superficie, llevó al equipo de la gerencia de soluciones en Herramientas y Sistemas para pozos a desarrollar un sistema para la medición y control superficial de sólidos de formación y apuntalante de fractura, instalado en pozos productores de hidrocarburos, para proteger la integridad mecánica de equipos y líneas superficiales de conducción, evitando afectar sus condiciones productivas por la acumulación de los sólidos. Es un sistema compacto, constituido por elementos mecánicos que retienen los sólidos sin provocar pérdidas de presión significativas en su interior, es altamente eficiente, seguro, de fácil instalación, operación y mantenimiento, por sus componentes intercambiables.

Es un equipo modular que recolecta partículas sólidas provenientes de formaciones productoras de hidrocarburos o fracturas hidráulicas inducidas. La recolección se realiza en una o más etapas; en la primera se retienen las partículas de mayor diámetro (700 μm), en la segunda las de diámetro intermedio (300 μm) y finalmente las de menor diámetro (43 μm), el equipo está fabricado con materiales de gran resistencia a la abrasión y corrosión. El cuerpo es acero 4140T y protegido con un acabado químico anticorrosivo, está constituido internamente con elementos filtrantes sinterizados de acero inoxidable.

Es un equipo compacto, para ser operado por una persona, con mínimas caídas de presión en su interior en la suma de los gastos máximos de fluidos con sólidos no se alcanza la velocidad de erosión en el interior del sistema, su geometría que evita el choque directo de las partículas sólidas con la pared. Dispone de registradores de presión, que permiten conocer las presiones diferenciales originadas por el flujo de fluidos y acumulación de partículas sólidas en el equipo. Se conecta en superficie a través de conexiones rápidas de golpe a la zona de disparos de los pozos. Es de fácil mantenimiento. Solo se requiere retirar los elementos filtrantes de cada módulo para ser reutilizados después de su limpieza o reemplazados si tuvieron desgaste.

Debido a que tiene la capacidad de realizar separaciones selectivas de partículas de diferente diámetro, permite medir in situ su distribución.

Debido a la gran área de flujo a través de sus elementos filtrantes la pérdida de presión es mínima por lo que no afecta la producción del pozo, dispone de sensores presión a la entrada y salida que son de gran utilidad para programar el reacondicionamiento del equipo. Es muy seguro y cumple con todas las normas y especificaciones requeridas por la industria petrolera.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas de caracterización el equipo puede ser catalogado como un equipo de alta eficiencia a condiciones de laboratorio controladas con una

eficiencia de separación de 93.85% a un gasto de 158.45 lt/min para un tamaño de partícula de 500 micras de arena de fractura y con agua como fluido de trabajo, el máximo de eficiencia alcanzado por el equipo al incrementar el gasto fue de 98.93% a un gasto de 401.15 lt/min con un rango de presión de 15.2 hasta 49.3 psia respectivamente. En condiciones de alta presión la eficiencia alcanzada fue de 89.5% bajo condiciones de operación de 850 psia.

El equipo aún no ha sido probado en un pozo real, se estima que en el próximo año pueda estar operando y se logren alcanzar los valores estimados de eficiencia en casos reales aplicados, para pozos en Veracruz y Muspac-Macuspana pertenecientes a PEMEX.

7 BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Ariel Valenzuela Muñoz. (2008). Reseña: “Equipo de optimización de terminaciones y fracturas”. PEMEX, exploración y producción, Activo integral Burgos.
- ❖ Lizeth Adriana Inda Herrera. (2010). Estimulación de pozos petroleros mejoradores de la conductividad en arenas. Tesis de licenciatura. Ingeniería Petrolera. México, D. F.: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura.
- ❖ Robert M. Pearson. (1988). Sand control. Boston USA: PE 306 Petroleum Engineering.
- ❖ Well Completion Technology. (1999). Sand Control Technology. Houston, Texas USA: WCT.
- ❖ Priscilla De la Fuente Tovar. (2019). Terminación de pozos petroleros. Tesis de licenciatura. Ingeniería Petrolera. México, D. F.: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura.
- ❖ Francisco Garaicochea P.; Miguel Ángel Benítez H. (198). Apuntes de terminación de pozos. México DF: Facultad de Ingeniería UNAM. División de ingeniería en ciencias de la tierra, departamento de explotación del petróleo.
- ❖ Juan Mateo Velázquez Ortega. (2010). Perforación de pozos de gas aplicando terminación tubingless. Tesis de licenciatura. Ingeniería Petrolera. México, D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- ❖ Guillermo Peña Delgado. (2014). Comparación de las diferentes alternativas en la terminación de pozos verticales y diseño de aparejos de producción por cargas axiales. Tesis de licenciatura. Ingeniería Petrolera. México, D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- ❖ William K. Ott, P.E. and Joe D. Woods. (2001). Modern Sandface Completion Practices Handbook. Houston Texas: World oil magazine, Gulf Publishing Company.
- ❖ Julia Alejandra Del Valle Figuera Scalisi. (2012). Propuesta de mejoras a los métodos de control de arena de los pozos productores de la arena O15, Yacimiento OFIM CNX-24, Campo Cerro Negro. Tesis de licenciatura. Ingeniería Petrolera. Monagas, Venezuela: Universidad de Oriente Núcleo de Monagas, Escuela de Ingeniería de Petróleo.
- ❖ Armentor, R. J., Wise, M. R. (2007) “Recuperación del control de la producción de arena”. Oilfield Review.
- ❖ Acock, A., ORourke, T., Shirmboh, D. (2004)“Métodos prácticos de manejo de la producción de arena”. Oilfield Review.
- ❖ Ali, S., Norman, D., Wagner, D. (2002). Método combinado de estimulación y control de la producción de arena. Oilfield Review.
- ❖ Acock, A. 2003. “Métodos de control de la producción de arena sin cedazos”. Oilfield Review.
- ❖ Hoffmann, A. C., Stein, L. E. (2007).“Gas Cyclones and Swirl- Tubes: Principles Desing and Operation”. 2a edición. Bergen and Houston: Springer.
- ❖ API 12J.Especificación para separadores de gas y aceite. Octava edición. 2009.

-
- ❖ Fuping Qian; Yanpeng Wu (2009). “Effects of the inlet section angle on the separation performance of cyclone. Elsevier.
 - ❖ Hector E. Muñoz Herrera (2017). “El fracturamiento hidráulico en el desarrollo de recursos no convencionales”. Comisión Nacional de Hidrocarburos.
 - ❖ Advancing Separation Solutions (2022). Desarenador de boca de pozo. eProcess TECHNOLOGIES

8 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Terminación en agujero descubierto.....	2
Figura 2. Terminación en agujero entubado.	3
Figura 3. Terminación con tubería ranurada no cementada.....	4
Figura 4. Zona dañada.	5
Figura 5. Fracturamiento hidráulico.	6
Figura 6. Geometría de un arco de arena alrededor de los disparos de producción (K. Ott & D. Woods, 2001).....	10
Figura 7. Sistema Integral de Producción.....	12
Figura 8. Tipos de ranuras en los liners, izquierda: ranura recta, derecha: ranura trapezoidal.	14
Figura 9. Diagrama de expansión del cedazo expandible.	15
Figura 10. Configuración típica desarenadores a boca de pozo.....	17
Figura 11. Corte de un separador horizontal.	18
Figura 12. Configuración de un separador horizontal.....	18
Figura 13. a) entrada tangencial y descarga axial, b) entrada tangencial y descarga periférica, c) entrada y descarga axiales y d) entrada axial y descarga periférica.	19
Figura 14. Primer ciclón patentado.	19
Figura 15. Molinos de harina ciclónicos fabricados por la compañía de Wolf a principios de 1920.	20
Figura 16. Bocetos de ciclón con cilindro y cono, entrada tangencial y salida de flujo inverso.	22
Figura 17. Equipo de alta eficiencia para el control superficial de sólidos.	29
Figura 18(a) Múltiple de entrada de flujo, (b) Unidades de separación de sólidos, (c) Ensamble salida de flujo, (d) Múltiple de flujo inverso, (e) Múltiple de descarga de sólidos, (f) By-pass, (g) Válvula de seguridad, (h) Múltiple salida de flujo, (i) Sistema de recuperación de sólidos, j) Canasta de recuperación de sólidos, k) Sistema de adquisición de datos, l) Corte de U.S. con elemento filtrante.....	31
Figura 19. Ejemplo de etiqueta de muestras.	36
Figura 20. Diagrama de equipos y conexiones.	58
Figura 21. Circuito de pruebas de caracterización y eficiencia de separación baja y alta presión. (A) Zona de mezclado baja presión, (B) Zona de mezclado alta presión, (C) Válvula de represionamiento alta presión.	61
Figura 22. (a) Ilustración de la trayectoria, con flechas y línea punteada, de la alimentación del fluido de trabajo a la US No.1. (b) Válvula de entrada de flujo a la US No.1 y (c) Válvula salida de flujo de la US No.1.	61

9 ÍNDICE DE GRÁFICOS.

Gráfico 1. Distribución granulométrica, ejemplo.	35
Gráfico 2. Distribución granulométrica por gramos en cada malla.	41
Gráfico 3. Distribución del peso de sólidos por malla, Artesa 381.....	41
Gráfico 4. Distribución granulométrica acumulada, Artesa 381.	42
Gráfico 5. Redondez vs. Diámetro de partícula, Part An 3D.	51
Gráfico 6. Esfericidad vs. Diámetro de partícula, PartAn 3D.....	52
Gráfico 7. Fases encontradas por difracción de Rayos-X (Difractómetro SIEMENS 5005).....	55
Gráfico 8. Gráfico del comportamiento de caídas de presión contra gasto en el equipo con la unidad de separación No. 1 y operando en paralelo hasta la unidad de separación No. 5.....	65
Gráfico 9. Gráfico del comportamiento del porcentaje de caídas de presión contra el gasto en el equipo Resuss con la unidad de separación No.1 y operando en paralelo hasta la unidad de separación No.5.	65
Gráfico 10. Gráfica del comportamiento de la eficiencia de separación contra el gasto a condiciones de baja presión.....	66
Gráfico 11. Gráfica del comportamiento de la presión durante la prueba de eficiencia de separación a condiciones de alta presión.....	67

10 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Guía para el arreglo de tamices.	34
Tabla 2. Distribución granulométrica, ejemplo.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3. Distribución granulométrica con contenido de metal, ejemplo.....	36
Tabla 4. Resultados de prueba granulométrica por tamizado.	40
Tabla 5. Escala Udden-Wentworth (1992).	42
Tabla 6. Clasificación del tipo de grano, según su diámetro.	43
Tabla 7. Redondez y esfericidad de 3 partículas de la muestra.	46
Tabla 8. Esfericidad y redondez de la muestra por malla.	49
Tabla 9. Distribución del tamaño de las partículas.	51
Tabla 10. Redondez, esfericidad y diámetro promedio de la muestra.	52
Tabla 11. Composición química de la muestra.....	54
Tabla 12. Fluorescencia de Rayos-X.	56
Tabla 13. Matriz de datos Gasto vs. Frecuencia.	62
Tabla 14. Matriz de datos ΔP vs. Frecuencia.....	62
Tabla 15. Matriz de datos ΔP vs. Q.	62
Tabla 16. Resultados de caracterización caída de presión contra el gasto en el equipo con flujo monofásico.	64
Tabla 17. Resultados de eficiencia en la separación para los gastos indicados (baja presión).....	66
Tabla 18. Resultados de eficiencia en la separación alta presión.	67

11 ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Muestra Artesa 381	37
Imagen 2. Primer filtrado de la muestra	37
Imagen 3. Secado de muestra en horno a 100 °C	37
Imagen 4. Muestra lavada y seca, Pozo Artesa 381	37
Imagen 5. Muestra lavada y seca, Pozo Artesa 381	38
Imagen 6. Columna de tamices con la muestra de arena	39
Imagen 7. Columna de tamices con la muestra de arena acoplada en el ROTAP.....	39
Imagen 8. Medición de los granos contenidos por tamiz.	40
Imagen 9. Microscopio electrónico de barrido ambiental XL30 ESEM TMP PHILIPS.	44
Imagen 10. Caracterización del tamaño de las partículas de la muestra.....	44
Imagen 11. Visualización de la muestra al microscopio.....	45
Imagen 12. Esfericidad y redondez, Krumbein y Sloss, 1955.	46
Imagen 13. Equipo Microtrac PartAn 3D.....	47
Imagen 14. Colocación de la muestra de arena para la prueba en el equipo PartAn 3D.	48
Imagen 15. Ejecución de la prueba.	48
Imagen 16. Forma de las partículas de los sólidos del pozo Artesa 381 (Equipo PartAn 3D).	49
Imagen 17. Forma de la muestra completa, PartAd 3D.	50
Imagen 18. Microscopio electrónico de barrido de doble haz nova 200 Nanolab.	53
Imagen 19. Composición de la muestra (nova 200 Nanolab).	53
Imagen 20. Visualización de la muestra (nova 200 Nanolab)	54
Imagen 21. Resultados, composición de la muestra (nova 200 Nanolab).	54
Imagen 22. (a) Muestra el pesaje inicial de sólidos antes de la prueba, (b) la recuperación de la canasta de retención de sólidos posterior a la prueba y (c) el peso recuperado después de la prueba de separación.	60