

**VIABILIDAD TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
FILTRACIÓN EN LIMPIEZA DE ARENA CON COILED TUBING**

**ARTURO RINCON CASTILLA
CARLOS ANDRES SANCHEZ SANCHEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2015**

**VIABILIDAD TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
FILTRACIÓN EN LIMPIEZA DE ARENA CON COILED TUBING**

**ARTURO RINCON CASTILLA
CARLOS ANDRES SANCHEZ SANCHEZ**

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero de
Petróleos

**DIRECTOR:
M.Sc JOHN ALEXANDER LEON PABON
ING. DE PETRÓLEOS**

**CODIRECTOR:
JULIAN ANDRES QUINTERO SILVA
ING. DE PETRÓLEOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2015**

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía y protector durante todo este camino, brindándome sabiduría, conocimiento y fortalecerme en los momentos mas difíciles.

A mis padres Arturo Rincón y Cecilia Castilla, por brindarme su amor, apoyo incondicional, y creer siempre en mi, y a quienes amo con todo mi corazón.

A mis hermanas Hilayalit y Jennifer que amo mucho y por haber estado siempre para darme consejos que me han hecho crecer como persona.

A Luz Adriana Rueda por llegar a mi vida, llenarme de su inmenso amor y haber estado en los momentos buenos y malos durante este camino. En resumidas cuentas por hacerme feliz todo este tiempo.

A toda mi familia que siempre están para alentarme y llenarme de buenos deseos.

A mis amigos Holman, Sisi, Victor, Mary, Nicolás, Santa, Camilo, Armando, Steven, Carlos, Duvan con quienes pasé momentos inolvidables y me han acompañado desde el inicio, por apoyarme y aconsejarme cuando era necesario.

Gracias,

Arturo Rincón Castilla

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mis padres ya que sin su tiempo y su apoyo no seria la persona que soy ahora, y también a su gran ejemplo que me han dado de salir adelante sin importar las adversidades.

A mi hermano para que le sirva de ejemplo que el trabajo duro y la dedicación siempre deja sus frutos

A mi familia por ser una fuente inagotable de apoyo, y han estado en gran parte de mi vida

Y también a las personas que han estado acompañándome en el proceso de desarrollo de mi carrera y que han aportado grandes experiencias a mi vida, y me han dado su confianza y amistad

Carlos Andrés Sanchez Sanchez

AGRADECIMIENTOS

A todos los que hicieron posible el desarrollo de este trabajo en especial a:

Al ingeniero John León, quien nos guió y brindó sus conocimientos y experiencia para poder desarrollar el presente trabajo de investigación.

Al ingeniero Julián Quintero Silva, por ser guía y soporte. Nos brindo valiosos aportes en el desarrollo del proyecto.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos y profesores por su gran labor y contribución en nuestro crecimiento personal y profesional.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. COILED TUBING	17
1.1 HISTORIA Y DESARROLLO.....	17
1.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.....	18
1.2.1 Tubería flexible.....	19
1.2.2 Carrete.....	20
1.2.3 Arco guía de tubería.....	21
1.2.4 Inyector.....	21
1.2.5 Conjunto de potencia.....	22
1.2.6 Control y monitoreo del equipo.....	22
1.2.7 Equipo de control de pozo.....	23
1.2.8 Grúa hidráulica o base auto-portante del inyector.....	24
1.2.9 Unidad de bombeo de fluidos.....	24
1.3 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA.....	24
1.3.1 Limpieza de pozos.....	25
1.3.2 Registros de pozos.....	25
1.3.3 Descargado del pozo e inicio de la producción.....	25
1.3.4 Estimulación.....	26
1.3.5 Cementación e inyección forzada.....	26
1.3.6 Perforación.....	26
1.3.7 Inyección de productos químicos.....	27
1.4 VENTAJAS Y LIMITACIONES.....	27
2. SISTEMAS DE FILTRACIÓN	29
2.1 HIDROCICLÓN.....	29
2.1.1 Funcionamiento de un hidrociclón.....	31
2.1.2 Factores que afectan el rendimiento de los hidrociclones.....	32
2.2 FILTRO ROTATIVO DE VACÍO.....	32
2.2.1 Descripción general.....	33
2.3 CÁSCARA DE NUEZ.....	35
2.4 TIERRA DE DIATOMEAS.....	37
2.5 CASCARILLA DE PALMA AFRICANA.....	41
3. ESTUDIO DE FILTRACION USANDO CASCARA DE NUEZ, CASCARILLA DE PALMA AFRICANA Y TIERRA DIATOMEA	43
3.1 PARAMETROS USADOS EN LABORATORIO.....	43
3.1.1 Materiales utilizados.....	43
3.1.2 Equipos utilizados.....	46
3.2 ANALISIS TECNICO.....	47
3.3 RESULTADOS PRUEBAS DE LABORATORIO.....	48
4. MODELAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE FILTRACION	54

4.1	SELECCIÓN DE FILTROS.....	55
4.2	SELECCIÓN DEL SIMULADOR.....	56
4.3	GENERALIDADES DEL SIMULADOR.....	56
4.4	HIDROCICLON.....	57
4.4.1	RANGOS DE OPERACIÓN.....	58
4.4.2	ECUACIONES DE DISEÑO.....	58
4.5	FILTRO ROTATIVO DE VACÍO.....	61
4.6	SELECCIÓN DE PARÁMETROS.....	65
4.7	INCLUSION DE PARAMETROS EN EL SIMULADOR.....	67
5.	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	76
5.1	DEPRECIACIÓN.....	76
5.2	ANÁLISIS FINANCIERO.....	83
6.	CONCLUSIONES.....	84
7.	RECOMENDACIONES.....	85
	BIBLIOGRAFIA.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Unidad de Coiled Tubing	19
Figura 2 Carrete de Servicio	20
Figura 3 Equipo de control de pozo	23
Figura 4 Diagrama de flujo de un hidrociclón.....	30
Figura 5 Diagrama esquemático de un filtro continuo de tambor rotativo	35
Figura 6 Vista microscópica de la diatomita.....	38
Figura 7 Ciclo de regeneración de un filtro de diatomea.....	40
Figura 8 Materiales utilizados	46
Figura 9 Equipos utilizados en las pruebas	47
Figura 10 Sistema actual de limpieza de arenamiento con coiled tubing.....	54
Figura 11 Sistema de limpieza de arenamiento con coiled tubing implementando el filtro	55
Figura 12 Panel de Modelos de separación de solidos.....	57
Figura 13 Geometría del hidrociclón	61
Figura 14 Distribución granulométrica	66
Figura 15 Selección de componentes.....	68
Figura 16 Selección del Modelo de simulación	69
Figura 17 Distribución granulométrica	70
Figura 18 Sensibilidad Hidrociclón.....	71
Figura 19 Sensibilidad Filtro rotativo de vacío	72
Figura 20 Resultados.....	72
Figura 21 Tamaño de grano en las corrientes del HC	73
Figura 22 Resultados Filtro rotativo de vacío.....	74
Figura 23 Granulometría en las corrientes del filtro rotativo de vacío	75
Figura 24 Costos sistema actual de limpieza de arenamiento con CT	82
Figura 25 Comparación de gastos entre los filtros estudiados.....	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Composición mineralógica y características generales de la arena diatomea para la práctica	43
Tabla 2 Características físicas de las muestras.....	44
Tabla 3 Resultado del filtro con tierra diatomeas.....	49
Tabla 4 Resultado Filtro con Cascara de nuez	49
Tabla 5 Resultado Filtro con cascarilla de palma africana.....	49
Tabla 6 Tamaño de solidos retenido, ventajas y desventajas de los filtros a analizar.....	51
Tabla 7 Rango de operación del modelo Hycyc.....	60
Tabla 8 Especificaciones de condiciones de funcionamiento y parámetros.	64
Tabla 9 Distribución granulométrica pozo 112-1 campo poza	65
Tabla 10 Depreciación de activos	78
Tabla 11 Costo carrotanque.....	78
Tabla 12 Costo viaje Carrotanque	78
Tabla 13 Costo salario conductor	79
Tabla 14 Costo Total Anual- Sin filtros.....	79
Tabla 15 Costo Total Anual- Filtro Rotativo de Vacío	80
Tabla 16 Costo Total Anual- Hidrociclón.....	80
Tabla 17 Costo Total Anual- Filtro Cascara de Nuez.....	80
Tabla 18 Costo Total Anual- Filtro con Palma Africana	81
Tabla 19 Costo Total Anual- Filtro con Tierra Diatomea	81

RESUMEN

TÍTULO: VIABILIDAD TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN EN LIMPIEZA DE ARENA CON COILED TUBING¹

AUTORES: ARTURO RINCON CASTILLA, CARLOS ANDRES SANCHEZ SANCHEZ²

PALABRAS CLAVES: Filtración, coiled tubing, fluidos, sólidos, limpieza, tratamiento

La industria petrolera está constantemente en la búsqueda de optimizar e implementar técnicas que sean eficaces y económicas para sus operaciones. Este trabajo está basado en determinar la viabilidad de implementar un sistema de filtración que permita separar el contenido de sólidos de la corriente de salida del proceso de limpieza de arenas con coiled tubing. Para ello fue necesario el uso de un simulador de procesos para analizar el porcentaje de remoción de partículas y diámetro de separación de los filtros para hidrociclón y filtro rotativo de vacío. Por otra parte se determina por medio experimental otros tipos de filtros para establecer el porcentaje de remoción de sólidos de estos filtros no convencionales como: Cáscara de nuez, cascarilla de palma africana y tierra de diatomeas, con el fin de comparar económicamente el sistema actual de limpieza y los filtros analizados con el objetivo de determinar el más óptimo a implementar en las operaciones de limpieza con coiled tubing, y a su vez disminuir los costos de operación.

Los equipos de filtración utilizados en nuestro proyecto tienen alta capacidad de remoción, siendo todos aptos para su aplicación, pero se establece un criterio de selección basado principalmente en aspectos económicos, donde el más viable es el más económico con respecto al sistema actual.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Ingenierías de Petróleos. Director: M. Sc John Alexander Leon Pabón. Codirector: Ing. Julian Andrés Quintero Silva

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL VIABILITY OF THE IMPLEMENTATION OF A FILTRATION SYSTEM IN THE CLEANING SAND WITH COILED TUBING³

AUTHORS: ARTURO RINCON CASTILLA, CARLOS ANDRES SANCHEZ SANCHEZ⁴

KEYWORDS: Filtration, coiled tubing, fluids, solids, cleaning, treatment.

The petroleum industry is constantly looking to optimize and implement techniques that are effective and affordable for its operations. This work is based on determining the viability of implementing a filtering system that allows separating the solids content of the output current of the cleaning process with coiled tubing sand. This required the use of a process simulator to analyze the percentage of particulate removal and separation diameter for hydrocyclone filters and rotary vacuum filter. On the other hand is determined by experimental means other types of filters for the percentage of solids removal of these non-conventional filters such as: Nutshell, husks African palm and diatomaceous earth, in order to compare the current economic system and cleaning the filters analyzed in order to determine the most optimal to implement cleaning operations with coiled tubing, and in turn reduce costs operation.

Filtration equipment used in our project has high removal capacity, all being suitable for application, but establishes a selection criteria based primarily on economics, where the most viable is the more economical with respect to the current system.

³ Bachelor thesis

⁴ Faculty of Physical-Chemical Engineering. Petroleum Engineering. Director: M. Sc John Alexander Leon Pabón. Codirector: Ing. Julián Andrés Quintero Silva

INTRODUCCIÓN

La aplicación de procesos de limpieza de arenas con coiled tubing es una de las prácticas más usadas, por medio de bombeo de fluidos como el agua se extraen las partículas sólidas del fondo de pozo, evitando así problemas operacionales y favoreciendo la producción; por lo general el fluido inyectado es acumulado en piscinas y posteriormente es transportado por vía terrestre hacia las plantas de tratamiento. Además en ocasiones el fluido a inyectar no es suficiente por lo que se debe traer más fluido de manera terrestre para así garantizar la operación. Por lo general en las operaciones de limpieza se usan dos fluidos (nitrógeno y agua), los cuales en la salida a superficie el nitrógeno se evapora, quedando como tal para su tratamiento el agua y los sólidos extraídos.

El presente proyecto está enfocado en determinar la viabilidad técnica de implementar un sistema de filtración en las operaciones de limpiezas de arenamiento con coiled tubing por medio de simulación, construyendo un modelo por cada filtro preseleccionado y usando la granulometría y los rangos de operación de los diferentes filtros, se procede a realizar una simulación para obtener los diámetros de partículas separados y por medio de una sensibilidad se determina los parámetros óptimos de operación, después se realiza una comparación con el diámetro promedio de separación con el diámetro interno del coiled tubing y se determina si podría haber problemas con este sistema. Se procede a realizar un análisis económico comparando el proceso actual de limpieza con coiled tubing y los filtros simulados.

1. COILED TUBING

1.1 HISTORIA Y DESARROLLO

En la actualidad, la unidad de tubería flexible o Coiled Tubing ha evolucionado hacia un tipo de unidad portátil, compacta y eficiente que elimina el problema de armar y desarmar conexiones que entran o salen del pozo. En una unidad de tubería flexible se usan longitudes continuas de tubería de tamaños variados que se almacenan en un carrete, cuya longitud es usualmente suficiente para alcanzar la profundidad total del pozo.⁵

Los orígenes de la tecnología de tubería flexible, se remontan al proyecto PLUTO, acrónimo de Pipe Lines Under The Ocean, un plan secreto concebido durante la Segunda Guerra Mundial por ingenieros británicos para transportar combustible desde Inglaterra a varios puntos de la costa de Francia y abastecer a los ejércitos aliados mediante líneas situadas bajo el Canal de la Mancha. El éxito de fabricación y enrollado de una tubería flexible estableció las bases para el futuro desarrollo y utilización de esta tubería en la industria del petróleo.⁶

Inicialmente la tubería enrollada se fabricaba con secciones de 50 pies, soldados en sus extremos hasta alcanzar una longitud de sarta de 15.000 pies, enrollada en un carrete de 9 pies de diámetro, el cual incluía una campana con una unión giratoria, apta para permitir el bombeo continuo de fluido a través de la tubería flexible.

⁵WELL CONTROL SCHOOL. Capítulo 15: Tubería flexible. Luisiana: WCS, 2003. 1 p.

⁶ WRIGHT TR JR Y SAS-JAWORSKY II A. World Oil's Coiled Tubing Handbook. Texas: Gulf Publishing Co, 1998. 7 p.

En 1990, se fabricó la primera sarta de tubería flexible de 2 pulgadas para la terminación permanente de un pozo. Inmediatamente después de este evento, los proveedores comenzaron a fabricar tuberías con diámetro exterior de 2 3/8, 2 5/8, 2 7/8, 3 1/2, y 4 1/2 pulgadas para aplicaciones de servicios de pozos. En la actualidad, las tuberías flexibles se fabrican con acero de alto límite elástico de 90, 100, 110 y 120 Kpsi, y aleaciones resistentes a la corrosión. La disponibilidad de aceros de mayor resistencia y diámetros más grandes junto con la necesidad de reducir los costos, fueron factores clave que subyacen la revolución CT de la década de 1990 y que posteriormente generaron un aumento extraordinario de las operaciones de intervención de pozos.⁷ Hoy en día, es usual que las sartas de CT están formadas por tubería fresada que no requiere soldaduras.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

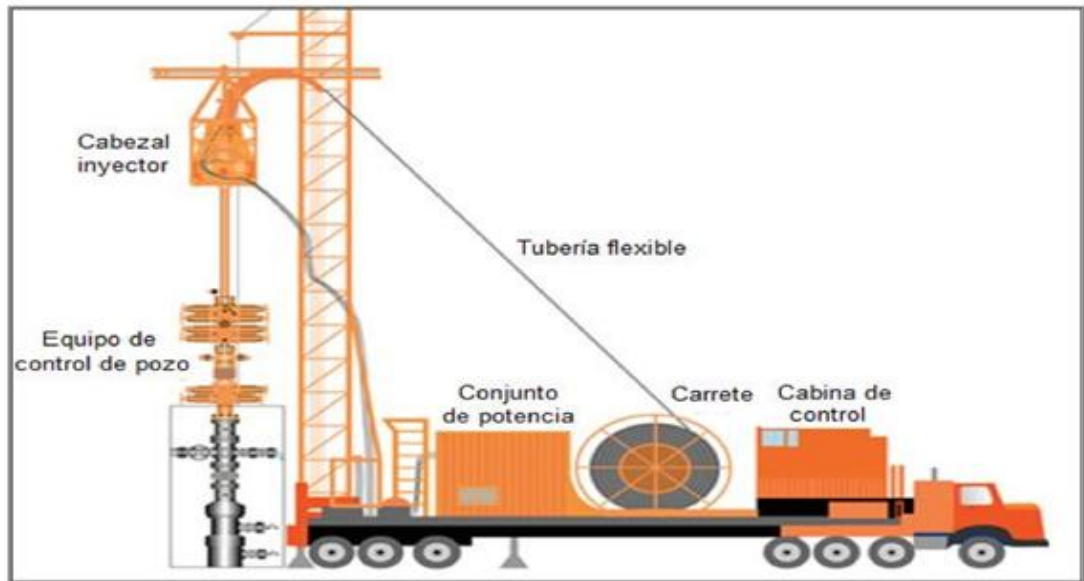
El término Coiled Tubing se traduce literalmente como tubería enrollada y se refiere a cualquier producto tubular de pequeño diámetro y gran longitud fabricado de manera continua; sin embargo, genéricamente se denomina de igual manera a la unidad como tal, la cual incluye el equipo de superficie relacionado. La unidad de CT es un sistema de servicio portátil con fuerza motriz hidráulica, diseñado para insertar y recuperar una sarta continua de tubería en el pozo, generando una optimización en las operaciones.

En cualquier configuración de una unidad de CT, la tubería flexible es insertada en el pozo, en un proceso monitoreado desde la cabina de control, esta se desenrolla del carrete y pasa por el cuello de cisne, a través del cabezal de inyección y del

⁷ AFGHOUL, A., et al. (2004). Coiled Tubing: The Next Generation. En: Oilfield Review: Spring 2004. Texas, USA. 42 p.

equipo de control de pozos impulsada por el conjunto de potencia⁸. Los componentes básicos de la unidad de CT pueden observarse en la Figura 1.

Figura 1 Unidad de Coiled Tubing



Fuente: BIGIO D., et al. "Coiled Tubing Takes Center Stage," Oilfield Review 6, no.4 (1994).

1.2.1 Tubería flexible: La tubería flexible es una tubería electro-soldada, fabricada con una costura longitudinal única, formada por soldadura de inducción de alta frecuencia, sin adición de metal de relleno, lo cual se logra mediante un proceso de fresado que desbasta la sarta al diámetro exterior requerido y la lleva a las tolerancias de redondez.⁹

En cuanto al material de fabricación, el acero al carbón convencional es más que adecuado para cumplir los requerimientos en la mayoría de las operaciones en campo. Para casos especiales, suelen fabricarse sarta de tubería flexible con

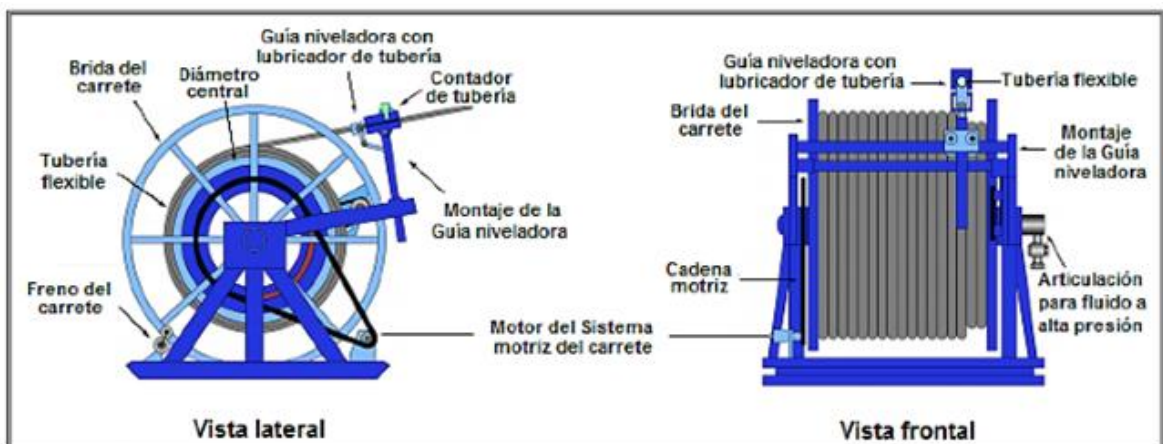
⁸ INTERNATIONAL COILED TUBING ASSOCIATION, ICOTA. An Introduction to Coiled Tubing: History, Applications, and Benefits. Longview, Texas. 2005.

⁹ WELL CONTROL SCHOOL, op. cit., 4 p.

baja aleación de carbón, ya que se logra tener una tubería con baja resistencia, alta ductilidad y alta resistencia al H₂S.

1.2.2 Carrete: El carrete sirve como un mecanismo de almacenamiento de la tubería flexible durante el transporte y como el dispositivo de bobinado durante las operaciones. El extremo interno de la unidad, está conectado a través del segmento hueco del núcleo del carrete, a una articulación giratoria de alta presión montada directamente en el núcleo. Esta articulación giratoria, está asegurada a una sección estacionaria de la tubería que está luego conectada al sistema de bombeo de fluido o gas. En consecuencia pueden mantenerse el bombeo y la circulación continuos durante el trabajo.

Figura 2 Carrete de Servicio



Fuente: SAS-JAWORSKI, A., et al. Petroleum Engineering Handbook, II: Capítulo 16 - Coiled Tubing Well Intervention and Drilling Operations.

1.2.3 Arco guía de tubería: Sobre el cabezal inyector está ubicado el arco guiador de tubería, también llamado cuello de cisne soporta la tubería a lo largo de todo el radio de doblado y guía la tubería flexible del carrete hacia las cadenas inyectoras. El conjunto del arco guía, incluye una serie de rodillos o cojines para soportar la tubería y también una fila de rodillos superiores para centrar la tubería flexible a medida que viaja sobre el arco guía. El número, tamaño, material y espaciamiento de los rodillos puede variar significativamente, según los diferentes diseños de arcos guía de tubería. El radio del arco guía de tubería se define como el radio de curvatura del eje central de los rodillos inferiores.

1.2.4 Inyector: El cabezal inyector es el encargado de sostener la tubería, y de proporcionar la fuerza necesaria para correrla y extraerla del pozo. Éste está diseñado para cumplir las siguientes funciones:

- Proveer el empuje requerido para insertar la tubería en el pozo contra la presión y la fricción.
- Controlar la velocidad de descenso de la tubería dentro del pozo, bajo varias condiciones.
- Soportar todo el peso de la tubería y acelerarla a la velocidad de operación, cuándo se esté extrayendo del pozo.

1.2.5 Conjunto de potencia: El conjunto de potencia es el encargado de suministrar la energía hidráulica o eléctrica a todo el equipo de Coiled Tubing. La mayoría son movidas por motores diesel, aunque un número limitado usa motores eléctricos y su tamaño varía según las necesidades de la unidad. Además la unidad de potencia cuenta con un compresor, requerido para suministrar aire y operar los sistemas neumáticos de la unidad como la bomba que acciona el stripper, conjunto para la lubricación de las cadenas del cabezal inyector y el sistema de arranque del motor.¹⁰

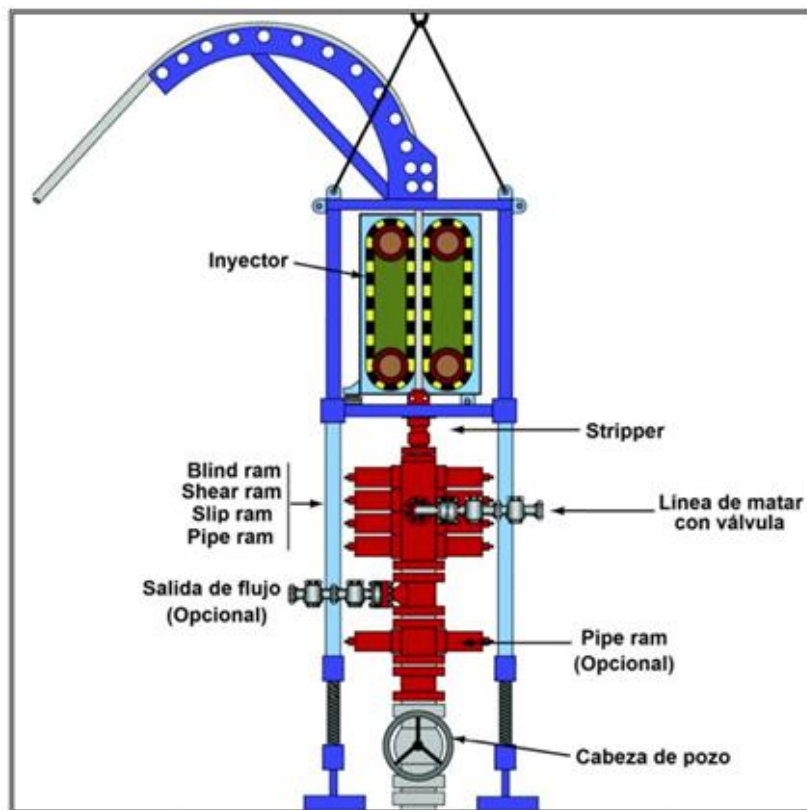
1.2.6 Control y monitoreo del equipo: Normalmente todos los controles están posicionados en una consola remota. El conjunto de la consola está completo con todos los controles e indicadores requeridos para operar y controlar todos los componentes que se hallan en uso y puede estar montado en un patín para uso costa fuera o permanentemente montados como ocurre con las unidades de tierra. La consola montada en un patín, puede estar colocada donde se necesite en el sitio del pozo, según la voluntad del operador. Los parámetros relacionados con el equipo de CT que deben ser controlados durante todo el trabajo para garantizar que el equipo funcione correctamente incluyen la fuerza de tracción, la tensión de la cadena, presiones hidráulicas en el sistema de control de pozos, presión hidráulica del carrete, presión hidráulica en el motor del inyector y presión hidráulica del stripper.¹¹

¹⁰ GARCÍA, E. Proyecto de Identificación: Tuberías Flexibles. Tabasco. Noviembre, 2013.

¹¹ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API Recommended practice for Coiled Tubing operations in oil and gas well services. Washington, 1996 (R: 2007). 35 p. (API RP 5C7).

1.2.7 Equipo de control de pozo: El equipo de control de pozo para CT, está diseñado para proveer seguridad en los servicios de intervención de pozos que se realizan bajo presión. Los componentes para el control de pozo que deben ser instalados, probados y usados necesariamente para mantener el control del pozo todo el tiempo son: un Stripper o componente de control de pozo tipo anular, un ariete ciego (blind ram), un ariete de corte (shear ram), una línea de matar con válvula, un ariete de cuña (slip ram) y un ariete de tubería (pipe ram). Estos componentes se muestran en la figura 3.

Figura 3 Equipo de control de pozo



Fuente: SAS-JAWORSKI, A., et al. Petroleum Engineering Handbook. Volume II - Drilling

1.2.8 Grúa hidráulica o base auto-portante del inyector: A menudo se incorpora una grúa hidráulica dentro del paquete de la unidad, cuando no se tiene disponibilidad de elevación por otros medios en la locación. La función de la grúa, es la de proveer el medio para levantar el inyector hasta el árbol de producción y proveer apoyo y estabilidad. Las bases auto-portantes del inyector, se usan para aplicaciones en que no se tiene grúa después del armado del equipo y también cuando la capacidad de la grúa, o el peso impiden un armado normal del equipo.

1.2.9 Unidad de bombeo de fluidos: La bomba de fluidos, ya sean líquidos o gases, es el método para proveer circulación o para proveer presión a las operaciones. La bomba de líquidos tiene una toma ubicada en los tanques deseados. Se succiona el fluido desde un tanque a través de la bomba, dirigiéndose al manifold y a las líneas donde puede ser mezclado con nitrógeno. De allí va a la articulación giratoria de circulación, en el carrete de la tubería donde se conecta a la misma.

1.3 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA

El CT fue diseñado como una herramienta capaz de brindar seguridad y efectividad a la hora de trabajar en pozos activos mitigando la necesidad de parar la producción al realizar trabajos de estimulación. Sin embargo esta tecnología ha demostrado que puede ofrecer otros beneficios que incluyen: rápida movilización de la sarta dentro del pozo, costos más bajos debido a la aceleración de las operaciones al eliminar la necesidad de efectuar interrupciones para conectar las juntas de tubería, reducción del número de operarios requeridos en algunos procesos, gran velocidad en el transporte y montaje de los equipos, capacidades de carga razonablemente grandes en alcances verticales más profundos y de alto ángulo en comparación con las operaciones con cable o línea de acero, la posibilidad de trabajar bajo presión sin matar el pozo y la capacidad única de

bombear fluidos en cualquier momento, independientemente de la posición dentro del pozo o la dirección de viaje. Estas capacidades resultan particularmente útiles en múltiples operaciones, las cuales son mencionadas a continuación.

1.3.1 Limpieza de pozos: La acumulación de arena durante la Producción del pozo, los agentes de sostén en operaciones de fractura o los sólidos de perforación se pueden lavar y circular a superficie utilizando el coiled tubing. El tamaño de las partículas, el perfil de desviación, la geometría de la instalación y la presión y temperatura del reservorio son elementos fundamentales que determinan qué método y tipo de fluido utilizar en la limpieza.

1.3.2 Registros de pozos: La mayor parte del trabajo convencional de líneas de cable eléctricos, dependen de la fuerza de gravedad para arrastrar la herramienta hacia abajo. Cuando se tienen altos ángulos de desviación, mayores a los 65° y en pozos horizontales, la gravedad no puede arrastrar la herramienta a la profundidad deseada. Si la línea de cable y las herramientas se introducen usando tubería convencional, la tubería dejará de deslizarse solamente por su peso en el caso de inclinaciones por encima de los 26°. Se usa entonces la tubería flexible para llevar hacia adentro las herramientas eléctricas¹².

1.3.3 Descargado del pozo e inicio de la producción: En este proceso, la tubería flexible se corre a la profundidad deseada y se inyecta nitrógeno o espuma liviana a través de la tubería flexible y de regreso a través del espacio anular de la tubería de producción. Esto resulta en una reducción de la presión hidrostática impuesta a la formación, lo cual permitirá que el pozo empiece a fluir.

¹² INTERNATIONAL COILED TUBING ASSOCIATION, op. cit., 11 p.

1.3.4 Estimulación: En ocasiones al bombear un fluido para estimular, este es insuficiente, ya que no se dirige a una localización particular en fondo de pozo y se reducen las posibilidades de que el producto químico conserve su eficacia. La tubería flexible es una solución a este problema, esta se corre en el pozo con una herramienta de inyección tipo jet en el extremo. Cuando la herramienta se sitúa en el objetivo, la sustancia química se bombea a través del tubo y se inyecta directamente sobre la zona dañada; esto resulta más eficaz que el bombeo a través de la tubería de producción al colocar con precisión el fluido de tratamiento para asegurar el cubrimiento total de la zona de interés.

1.3.5 Cementación e inyección forzada: Debido a sus ventajas en cuanto a velocidad, mediciones relativamente precisas de las longitudes y exactitud en las capacidades; la tubería flexible ha ido ganando fuerza cuando se trata de efectuar operaciones de cementación. La cementación localizada, inyección forzada de cemento y muchas otras operaciones relacionadas, se efectúan en la actualidad de forma rutinaria utilizando esta tecnología, ya que representa una alternativa económica con respecto a las técnicas convencionales.¹³

1.3.6 Perforación: La desventaja de no poder rotar la tubería flexible ha sido prácticamente superada por el desarrollo de herramientas rotatorias en fondo del pozo, con lo que se han logrado establecer grandes avances en el área de la perforación. Los mejores resultados obtenidos con esta tecnología se observan en perforación underbalance, perforación de pozos slim hole, profundizaciones verticales en pozos horizontales y re-entradas horizontales a pozos existentes.

¹³ SAN ANTONIO INTERNACIONAL. Aplicaciones: Coiled Tubing [Diapositivas]. 2011.

1.3.7 Inyección de productos químicos: Pueden efectuarse tratamientos químicos de la tubería o de la formación mediante la tubería flexible, a menudo sin matar la zona de producción, o minimizando el tiempo de cierre. Esto provee el beneficio de menos producción perdida y algo aún más importante, menores posibilidades de ocasionar daños a la formación con los métodos de tratamiento de bullheading. Los productos químicos de tratamiento, a menudo son inhibidores de corrosión para la tubería, y ácidos para tratamiento en la formación.

1.4 VENTAJAS Y LIMITACIONES ¹⁴

Las ventajas obtenidas al usar el CT en sus diversas aplicaciones, incluyen:

- Trabajo en pozos activos.
- Entrada eficiente al pozo.
- Reducido impacto en superficie en comparación con la de una plataforma de workover.
- Fácil movilización offshore por la disposición de componentes modulares.
- Circulación continua de fluidos a través del servicio a pozo.
- Realización de trabajos mientras se está produciendo.

¹⁴ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API Recommended practice for Coiled Tubing operations in oil and gas well services. Washington, 1996 (R: 2007). 2-3 p. (API RP 5C7).

- Posibilidad de instalar muchas herramientas adaptadas para workover, perforación y operaciones con wireline.
- Adaptación a completamientos permanentes.

Los modos de falla y algunas razones de problemas en el pasado son: cadencia por tensión, colapso y estallido, fracturas por fatiga, fugas por corrosión, pandeo, crecimiento diametral, taponamiento, uso en tubería de producción inapropiada, daño mecánico, prácticas inadecuadas y faltas en el control de calidad.

2. SISTEMAS DE FILTRACIÓN

El sistema de tratamiento tiene como finalidad la optimización de la calidad del agua. Una parte importante en un proceso de tratamiento de aguas residuales es la existencia de las unidades de filtración.

Estos son tanques cerrados y a presión, que se usan para filtrar sólidos contenidos en el agua los cuales son indeseables o perjudiciales en la operación de inyección y/o vertimiento. Al pasar el fluido sucio a través del filtro, la mayoría de los sólidos son removidos. El fluido una vez ha sido filtrado fluye a la descarga de agua limpia¹⁵.

2.1 HIDROCICLÓN

A continuación se describe algunos de los usos, importancia, diseño y desarrollo del hidrociclón que revolucionó la industria minera en la separación de sólidos. El primer sistema hidrociclón fue patentado en el año de 1891 por Bretni, poco más de un siglo, su aplicación principal fue de tipo industrial, cerca de los años 40. Los hidrociclones originalmente fueron diseñados para promover la separación sólido-líquido, pero actualmente suele usarse para sólido-sólido, líquido-líquido¹⁶ y separación gas-líquido. Se han planteado nuevas aplicaciones para la separación de microorganismos en fermentaciones y biodegradación¹⁷.

Los ciclones son básicamente un cilindro vertical fijo, con una entrada tangencial en el borde superior para la alimentación, este tipo de sistemas son operados con

¹⁵ KIRK, A REVIEW OF WATERFLOOD, 1964

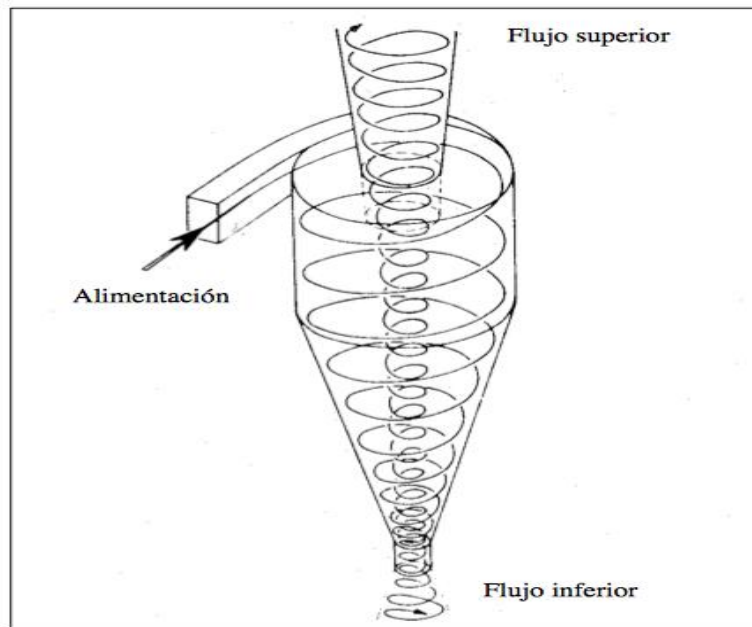
¹⁶ Capela et. al., 1996; Smyth, et. al., 1996

¹⁷ Yuan et. al., 1996; Cilliers, et. al., 1997

suspensiones de sólidos y algunas veces con gases o líquidos. Se denomina hidrociclón al sistema que trabaja con suspensiones de sólidos con agua, ésta es inyectada a una velocidad y presión relativamente alta, utilizando la fuerza centrífuga para acelerar la sedimentación de las partículas.

La alimentación entra a alta velocidad, describiendo una espiral convergente hacia el centro hasta encontrar la salida, la trayectoria circular crea un campo de aceleración centrífuga donde las partículas solidas son más densas que el líquido, se desplazarán radialmente hacia fuera hasta chocar con la pared y caer hacia la salida de fondo (descarga inferior).

Figura 4 Diagrama de flujo de un hidrociclón



Fuente: Salvador, Edgar. Diseño y operación de un hidrociclón para mejorar la técnica de lavado de suelos 2010.

2.1.1 Funcionamiento de un hidrociclón: Este se fundamenta en que la alimentación de la pulpa ingresa tangencialmente a la sección cilíndrica del hidrociclón por la parte superior. La fuerza centrífuga actuará sobre las partículas gruesas que son proyectadas siguiendo una trayectoria helicoidal hacia el extremo inferior de las paredes del hidrociclón y luego descienden, donde son colectadas y descargadas en la parte inferior (underflow). De esta manera el material grueso o más pesado se concentra en las paredes, siendo expulsado por la parte inferior denominada ápice y el material más liviano por la parte superior llamado derrame. La gravedad específica juega un papel muy importante en la clasificación de las partículas, ya que controla la consistencia de la descarga del hidrociclón.

Entrada de material: En esta parte se controla la entrada de material, la velocidad de la pulpa y tiene la finalidad de pre-orientar a las partículas a su punto tangencial de contacto con las paredes del cilindro.

Derrame: Es otra parte importante en la operación, ya que es el más crítico y su tamaño tiene influencia en la presión para un volumen determinado y generalmente se tiene que entre más grande es su diámetro, mayor proporción de sólidos van al derrame y por el contrario, si el localizador del vórtice tiene un diámetro pequeño significa un derrame fino con baja concentración de sólidos. Para todo tipo de pulpa, debe buscarse un balance óptimo con una dilución permitida entre el localizador del vórtice más grande y la presión más baja posible para el objetivo que se desee.

Ápice: Su función es descargar las partículas gruesas, de tal forma que se obtenga su máxima densidad, por lo tanto debe ser de tamaño adecuado para permitir la máxima salida de partículas sólidas en la forma cónica.

2.1.2 Factores que afectan el rendimiento de los hidrociclones: El rendimiento de los ciclones está fuertemente influenciado por sus parámetros de diseño y operación, tales como:

- Velocidad y flujo de alimentación
- Ubicación del vórtice o remolino
- Dilución y presión de la pulpa
- Diámetro de entrada y salidas

2.2 FILTRO ROTATIVO DE VACÍO¹⁸

La filtración se realiza sobre la superficie de un tambor rotativo. Se trata del clásico sistema desplazado en gran parte por los filtros de banda de vacío pero con aplicaciones específicas.

Con la utilización de las nuevas tecnologías basadas en PLC y ordenadores, se consigue llegar a un control absoluto del funcionamiento de estos filtros. A través del panel de control puede quedar perfectamente establecido el ritmo más adecuado del filtro definiendo parámetros como:

- Grado de vacío aplicado
- Velocidad de funcionamiento

¹⁸ gruptefsa.com/sp/fv.htm

- Nivel de carga
- Calidad del lavado de la torta
- Tiempo de secado de la torta

2.2.1 Descripción general: En el Filtro de Tambor a Vacío el producto a filtrar llega de forma continua a la cuba del filtro. Un agitador pendular en la misma cuba impide la sedimentación de los sólidos que lleva en suspensión. El tambor que gira en la cuba es el elemento filtrante; su superficie exterior está dividida en celdas recubiertas por la tela filtrante. De esta superficie 1/3 parte está sumergida en la solución a filtrar, adaptando su velocidad de rotación a las características de la filtración y el producto.

El vacío aplicado al filtro, creado por una bomba exterior, llega a las celdas a través de un cabezal de control y las tuberías consiguientes, dando lugar a la absorción del líquido a través de la tela filtrante depositándose el sólido sobre la misma tela filtrante y como una capa uniforme. El cabezal de control automático tiene por misión dividir el tambor en distintas secciones para que en su rotación las celdas pasan sucesivamente por las zonas de filtración, lavado y secado de la torta de sólidos producidas y su descarga. El filtrado llega desde el cabezal hasta un separador de filtrado auxiliar, desde donde se descarga por bomba o pie barométrico. Si hay un lavado de torta el líquido usado se entrega sobre el tambor por medio de boquillas, y el filtrado que se obtiene con él puede separarse del inicial por una salida independiente.

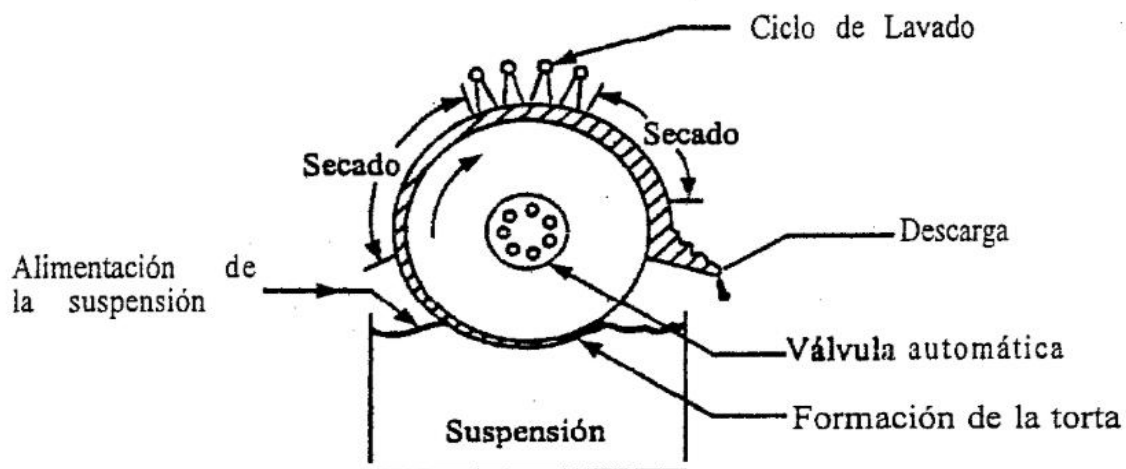
Los filtros de tambor de vacío son los más utilizados en la industria minera, alimenticia, farmacéutica, estos dispositivos se cubre un tambor horizontal de 0.2 a 3m de diámetro con una tela filtrante y se le hace girar lentamente de 0.1 a 2 RPM. La tela es sumergida en el tanque de mezcla de manera parcial. A medida

que la sección del tambor entra en el tanque de mezcla de manera parcial. A medida que la sección entra en el líquido se aplica vacío desde el interior del tambor para que forme una torta en la superficie de la tela mientras el líquido es recogido por tuberías internas del tambor y se coloca en otro tanque. El vacío deja de aplicarse una vez que el tambor alcanza una zona de descarga donde se desprende la torta.

2.2.2 Principales características

- Filtros totalmente continuos con la ausencia de tiempos muertos en su operación.
- Velocidad de giro del tambor ajustable.
- Múltiples posibilidades de descarga de la torta.
- Posibilidad de realizar un lavado continuo de la tela filtrante.
- Tela filtrante seleccionada para cada proyecto y producto.
- Posibilidad de realizar lavados continuos de la torta por aspersion.
- Funcionamiento mecánico, simple y seguro evita averías y permite un fácil mantenimiento y limpieza.
- Poco espacio requerido.

Figura 5 Diagrama esquemático de un filtro continuo de tambor rotativo



Fuente: <https://writer.zoho.com/public/adrian.holguin1988/Preactica-de-laboratorio-61/fullpage>

2.3 CÁSCARA DE NUEZ

La nuez es el fruto del nogal, de forma redondeada u ovoide, con una cáscara dura y rugosa de color pardo rojiza. La parte comestible de su interior tiene un sabor dulce particular.

2.3.1 Origen: Procedente de Persia (región del Himalaya), según unos autores, o de China y Japón, según otros; fue transportado a Grecia y luego a Italia y a los demás países de Europa. Existen evidencias fósiles de la presencia del nogal *J. regia*, en la Península Ibérica, que se remontan al Paleolítico.

El nogal se encuentra vegetando en estado silvestre en la Europa oriental y Asia Menor, asimismo en Norteamérica, formando un cierto número de especies más o menos cultivadas.

2.3.2 La planta: El nogal es un árbol que puede alcanzar hasta 30 metros de altura, de hoja caduca y copa redondeada. Es muy vigoroso. El árbol que produce el fruto es conocido comúnmente por nogal y pertenece a la familia de las Juglandáceas, siendo la especie *Juglans regia* la más cultivada en Europa; es muy vigoroso y alcanza hasta 30 metros de alto, porte erguido durante los primeros 40 años y después pendular. Es de hoja caduca, de copa redondeada, elevada, ramosa y extendida y su tronco, derecho y cubierto con una corteza cenicienta y gruesa, en las ramas jóvenes lisa y de color rojo oscuro y en las viejas agrietada y parda.

2.3.3 Propiedades fisicoquímicas de la Cáscara de nuez¹⁹

- Peso específico: 0,95 kg/L
- Es biodegradable
- Es seguro para la salud
- Durante su combustión produce dióxido de carbono
- Color: marrón
- No es soluble en agua
- Su PH es neutro
- No se combustiona a temperaturas menores de 270 °C

¹⁹ Moliendas Chana. www.moliendaschana.com/productos.htm

- El manejo de la cáscara molida requiere el uso de máscaras con filtro.

Usos²⁰: Es utilizada en la industria alimentaria, en la industria de las pinturas y tinturas. también es usado para la inyección en los pozos de petróleo para evitar las fugas de gas y petróleo a raíz de las fracturas en la perforación del mismo, evitando la pérdida de gas y petróleo que son contaminantes. Para el granallado y limpieza de tanques en buques, camiones, tanques y todo tipo de recipiente que necesite ser removido su superficie interna limpiando las incrustaciones, para la confección de baldosas plásticas, materiales termo- formables, etc.

2.4 TIERRA DE DIATOMEAS

Las diatomeas son algas pardas unicelulares que reportan una valiosa ayuda en diferentes procesos industriales. Las tierras de diatomeas o diatomita constituyen un recurso mineral biogénico. La creciente importancia económica que este recurso ha adquirido, la complejidad del material y su amplio espectro de aplicaciones abren interesantes posibilidades para el desarrollo de técnicas de análisis y geología especializada²¹.

Importantes depósitos de tierra diatomea en Colombia se encuentra en el valle del Cauca, Zarzal y Obando principalmente (Sandoval, 1953), y no están siendo explotados adecuadamente ocasionando que la tierra tenga aplicaciones muy limitadas por sus características que no permiten cumplir las mínimas especificaciones industriales para su uso (Zapata, 1977).

²⁰ MARTE ROSARIO, Marlene. Utilización de la cáscara de nuez Chandler en el yeso. Master en innovación tecnológica en edificación. Universidad politécnica de Madrid. 2011, p. 103.

²¹ BALLETT, Jorge. Tierras de diatomeas, curiosidad natural al servicio de la industria. Revista Creces, ciencia y tecnología. Div. Minerales Industriales, Eprom Ltda. Mayo, 2005.

Figura 6 Vista microscópica de la diatomita



Fuente: Manosalva S, Naranjo M. Diatomitas y diatomeas. Boyacá, Colombia. 2011.

2.4.1 Composición: En su aspecto físico, las tierras de diatomeas o diatomita se presentan como rocas silíceas sedimentarias, de color blanco. A no ser por el bajo peso específico de este mineral- del orden de 0,4 en roca-, los afloramientos naturales de diatomitas pueden confundirse con ocurrencia de caolines, dolomita o yeso. Visto el mineral al microscopio, sin embargo, su carácter único queda de manifiesto. La diatomita esta constituida por restos fosilizados de plantas unicelulares acuáticas relacionadas con las algas, las diatomeas. Estos organismos prosperan comúnmente en medios lacustres o marinos de aguas poco profundas alrededor de los 40 metros, con contenido relativamente abundante de sílice soluble y boro. La presencia de diatomeas es visible incluso en lagunas de aguas quietas, en la forma de una nata iridiscente en la superficie, o una película gelatinosa de color café en las rocas y vegetación acuáticas.

Como mineral, la diatomita está constituida esencialmente por sílice diatomea. Este apelativo circular se explica por las características de la sílice biogénica, que no son comunes a otras formas de sílice natural²².

2.4.2 Propiedades físicas²³

- Aspecto macroscópico: roca purulenta, fina y porosa con aspecto margoso.
- Color por lo regular blanco brillante.
- Alta porosidad.
- Capacidad muy alta para absorber líquidos.
- Capacidad abrasiva suave.
- Conductividad térmica muy baja.
- Alta resistencia a la temperatura.
- Químicamente inerte.
- El porcentaje de humedad varía de acuerdo al depósito.

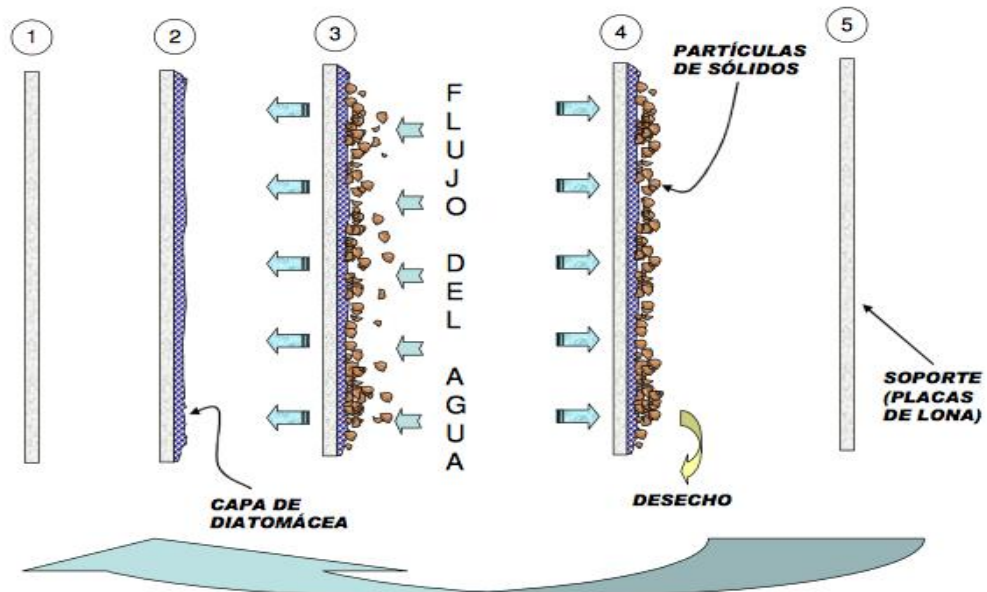
²² RUEDA, María y VEGA, Karen. Determinación del carácter puzolánico de laterita niquelífera, pumita, diatomita, y su efecto como aditivo en el comportamiento del cemento portland tipo I. 2012, p. 56.

²³ MANOSALVA S, NARANJO M. Diatomitas y diatomeas. Boyacá, Colombia. 2011. P. 47.

2.4.3 Aspectos económicos: A escala mundial, se procesa aproximadamente un millón de toneladas al año. El alto costo de transporte agravado por la baja densidad del mineral procesado (5 m³/Tonelada) ha incentivado la descentralización productiva. Países tradicionalmente importadores como Australia, Sudáfrica; y Brasil han desarrollado o están en vías de establecer instalaciones locales para explotar y procesar tierras de diatomeas.

El costo de una planta de capacidad intermedia -50000 toneladas por año- se ha estimado en US\$ 8000000. Debido a que la tecnología de proceso no es estándar y está íntimamente ligada a las características de los depósitos minerales, una fracción considerable de la inversión debe dirigirse hacia prospecciones altamente especializadas, adaptación y desarrollo de técnicas de proceso adecuadas a la materia prima local.²⁴

Figura 7 Ciclo de regeneración de un filtro de diatomea.



Fuente: Tomado de www.oocities.org/edrochac/sanitaria/filtracion.htm

²⁴ BALLETT, Jorge. Tierras de diatomeas, curiosidad natural al servicio de la industria. Revista Creces, ciencia y tecnología. Div. Minerales Industriales, Eprom Ltda. Mayo, 2005.

La figura 7 muestra que consta de la lona (1) se deposita una capa de diatomácea (2). El agua fluye y los sólidos son retenidos en la superficie o capa de diatomácea (3). En condiciones de saturación se invierte el flujo para desprender la capa de diatomácea saturada con sólidos retenidos y este material residual se desecha (4). Finalmente el soporte está disponible para un nuevo ciclo de filtración (5).

2.5 CASCARILLA DE PALMA AFRICANA²⁵

La palma africana (*Elaeis guineensis*) tiene su origen en el occidente de África en el golfo de Guinea, siendo actualmente una de las industrias más prosperas en Malasia, Indonesia y América. En América el Noli o Noli, nativa de Colombia, Panamá, Costa Rica, Venezuela y Brasil; fue identificada por los investigadores como *Elaeis Melanocodea* y luego como Corozo Oleífera, fue designada como la palma de aceite pero con productividad inferior de aceite, con una porción líquida mayor y un crecimiento más lento de la palma. Lo anterior ha dado origen a que genetistas estén estudiando híbridos en Colombia con el fin de sustituir en un futuro las semillas importadas.

2.5.1 Aplicaciones de la cascarilla de palma africana

- Remoción de aceite de aguas residuales producto de la industria petrolera principalmente.
- Lecho filtrante en filtros de lecho vegetal.

²⁵ ARIAS, Carlos Augusto y DELGADO Luis. Separadora de almendra y cáscara del fruto de la palma africana. Diseño, construcción y prueba de un prototipo. Bucaramanga, 1992. 164 p.

- Aditivo en lodos de perforación, para detener o disminuir pérdidas de circulación y para remover las arcillas pegajosas en la parte inferior de la sarta.
- Reemplazo de arena en procesos de limpieza por abrasión.
- Material para reacondicionamiento de vías terciarias.

2.5.2 Uso de la cascarilla de palma africana como medio filtrante: Esta cascarilla posee propiedades oleofílicas y de adsorción que le permiten atrapar los aceites y junto con estos, los sólidos presentes en el agua. Sus propiedades de adsorción se deben a la superficie porosa que posee. Esta cascarilla es apta para ser utilizada en la remoción de contaminantes de aguas residuales industriales y en el tratamiento de potabilización.

La adsorción es un fenómeno, que ocurre en la superficie, en el cual se involucran un adsorbato y un adsorbente. Este fenómeno es posible debido a la aparición de fuerzas de interacción entre ellos.

3. ESTUDIO DE FILTRACION USANDO CASCARA DE NUEZ, CASCARILLA DE PALMA AFRICANA Y TIERRA DIATOMEA²⁶

En pruebas realizadas por W. Agudelo y S. Millán determinaron la eficiencia de remoción, la capacidad de absorción de aceites usando cascarilla de nuez, palma africana y tierra diatomea; por medio de pruebas de laboratorio evaluando estos lechos utilizado 10 tipos de muestras diferentes, las características y resultados de estas pruebas se presentan a continuación.

3.1 PARAMETROS USADOS EN LABORATORIO

3.1.1 Materiales utilizados: Estos fueron los materiales utilizados en la práctica:

- Arena diatomea. Empacada en sacos de polipropileno laminado por 25 kilos. En la siguiente tabla se muestran algunas de sus características.
- Cáscara de nuez. presentación por 40 kilos.

Tabla 1 Composición mineralógica y características generales de la arena diatomea para la práctica

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA	
Terrígeno	Alquímicos
Cuarzo (SiO ₂): 1.0%	Fitolitos opalinos (SiO ₂ +H ₂ O): trazas%
Limonita (FeO OH): 1.8%	Frústulas de diatomea (SiO ₂ +H ₂ O): 81.2%
Arcilla caolinita Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ : 13.0%	Espículas (SiO ₂ +H ₂ O): 1.5%
Arcilla illita (K,H ₃ O) (Al,Mg,Fe) 2(Si,Al) 4O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O): 1.5%	
CARACTERÍSTICAS GENERALES	

²⁶ AGUDELO, William. MILLAN, Sergio. Viabilidad técnica y económica en la implementación de otras alternativas de filtrado para el tratamiento de salmueras y aguas de producción

Textura: organogénica	% absorción: (H ₂ O): 210
Color: beige grisáceo claro	Máximo % de humedad: 2.6
Características distintivas: material pulverizado, amorfo e inodoro, untuoso al tacto y bajo peso aparente	Punto de fusión: 1400 °C +/- 50 °C
Grado de meteorización: nulo	Combustibilidad: nula
PH: 4.7	Conductibilidad térmica: nula
Humedad: 2.60%pp	Granulometría: <38 micras
Retención de humedad: 143.18% pp	Corrosividad: no corrosivo
C.I.C: 32.73 meq/100 grs	Estabilidad: muy estable, químicamente inerte
Densidad aparente: 0.3-0.5 gr/cm ³	Solubilidad: insoluble en agua

Fuente: AGUDELO, William. MILLAN, Sergio. Viabilidad técnica y económica en la implementación de otras alternativas de filtrado para el tratamiento de salmueras y aguas de producción

- Cascarilla de palma africana. presentación por 40 kilos.
- Agua. características y condiciones del acueducto de Bucaramanga. Cantidad 25 galones.
- Muestras representativas en volumen de aguas de producción y salmueras. Muestras seleccionadas aleatoriamente de algunos campos. A continuación la tabla ilustra algunas características físicas de las muestras antes de ser utilizadas en la práctica. Cantidad 10.

Tabla 2 Características físicas de las muestras.

	PH	TEMPERATURA (°C)	CONTENIDO SÓLIDOS TOTALES (Mg/L)	Turbiedad (NTU)	MÁXIMO TAMAÑO DE PARTÍCULA (micras)
MUESTRA 1	7.66	24	10583	975	85
MUESTRA 2	7.89	25	5215	890	75
MUESTRA	7.3	23	2943	720	90

3					
MUESTRA 4	7.39	26	862	550	100
MUESTRA 5	7.56	30	768	390	110
MUESTRA 6	7.8	29	492	270	130
MUESTRA 7	7.1	22	324	160	150
MUESTRA 8	8	26	167	160	60
MUESTRA 9	7.55	27	63	110	50
MUESTRA 10	7.0	28	51	45	63
MÉTODO/ NORMA	Potenciómetro/ SM 4500 B	Termómetro/ SM 2550B	Gravimétrico/ SM 5220 D	Nefelómetro/ SM 2130 B	Método de la pipeta.

Fuente: AGUDELO, William. MILLAN, Sergio. Viabilidad técnica y económica en la implementación de otras alternativas de filtrado para el tratamiento de salmueras y aguas de producción

- Lámina o malla de acero inoxidable. La tela metálica es fabricada con hilos de alambre en acero inoxidable, en aleaciones de primera calidad, asegurando una alta resistencia a la corrosión y larga duración. Tipo de tejido asargado (Los alambres de la trama pasan por encima y por debajo de dos alambres alternados, la Abertura es cuadrada, es menos rígido que el tejido liso, utilizado para filtración menor a 63 Micras). Cantidad 3.
- Recipiente cilíndrico cerrado de fibra de vidrio. Representación del cascarón de un filtro convencional. Cantidad 3.
- Tanque de almacenamiento de líquido de 25 galones. Cantidad 1
- Acoples de P.V.C para la instalación de ductos.

Figura 8 Materiales utilizados



Fuente: AGUDELO, William. MILLAN, Sergio. Viabilidad técnica y económica en la implementación de otras alternativas de filtrado para el tratamiento de salmueras y aguas de producción

3.1.2 Equipos utilizados : Los equipos utilizados en la práctica fueron:

- Una bomba. Graduable. Capacidad máxima de 30 gpm. Cantidad 1.
- Un manómetro. Manómetro de laboratorio para el registro de la caída de presión. Sensibilidad de 0.5 psi. Rango: 0 a 30 psi. Cantidad 3.
- Peso digital. Capacidad máxima de 25 kilos. Cantidad 1.
- Turbidímetro. PCE-TUM 20, el rango de medición es de 0 a 1000 NTU. Cantidad 1.
- Vaso de precipitado y pipetas de laboratorio.

- Paletas de laboratorio.

Figura 9 Equipos utilizados en las pruebas



Fuente: AGUDELO, William. MILLAN, Sergio. Viabilidad técnica y económica en la implementación de otras alternativas de filtrado para el tratamiento de salmueras y aguas de producción

3.2 ANALISIS TECNICO

Una vez efectuado el montaje experimental, se da inicio a la prueba. La prueba consiste en hacer fluir las muestras de agua disponibles por cada uno de los 3 equipos de filtración (SITA). Antes y después de efectuada la prueba, son registrados los valores de algunas propiedades físicas de las muestras para su posterior análisis.

Para evaluar técnicamente estos materiales se requiere hallar el coeficiente Beta (β), posteriormente es calculada la eficiencia de remoción de partículas para cada alternativa planteada y por último son comparados los valores entre sí. Cabe recordar que en la industria no existe una norma o una ley estándar que regule la

medición de la eficiencia de los lechos filtrantes; sin embargo, algunos fabricantes de estos equipos han empleado el uso del número Beta (β) para cuantificar la eficiencia de los mismos.

El coeficiente Beta (β) está definido por la siguiente expresión:

$$\beta_x = \frac{\text{Número de partículas totales en el afluyente}}{\text{Número de partículas totales en el efluente}}$$

Donde x es el tamaño de la partícula, (micras).

La eficiencia de remoción de partículas se deduce de la siguiente expresión:

$$\% \text{eficiencia de remoción} = \frac{\beta - 1}{\beta} * 100$$

3.3 RESULTADOS PRUEBAS DE LABORATORIO

Basándose en los resultados obtenidos en el trabajo realizado por William A. Agudelo R. y Sergio E. Millán R. encontramos que se obtuvieron los siguientes resultados:

- **TIERRA DE DIATOMEAS**

MUESTRA	AFLUENTE	EFLUENTE	BETA (β)	EFICIENCIA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS
1	10583.00	59.00	179.37	99.40%
2	5215.00	25.00	208.60	99.50%
3	2943.00	40.00	73.57	98.60%
4	862.00	15.00	57.47	98.30%
5	768.00	13.00	59.08	98.30%

6	492.00	10.00	49.20	98.00%
7	324.00	3.00	108.00	99.10%
8	167.00	3.00	55.67	98.20%
9	63.00	1.00	63.00	98.40%
10	51.00	1.00	51.00	98.00%
		PROMEDIO		98.60%

Tabla 3
Resultado del
filtro con
tierra
diatomeas

Fuente:

Modificado de AGUDELO, William. MILLAN, Sergio. Viabilidad técnica y económica en la implementación de otras alternativas de filtrado para el tratamiento de salmueras y aguas de producción

- **CÁSCARA DE NUEZ**

Tabla 4 Resultado Filtro con Cascara de nuez

MUESTRA	AFLUENTE	EFLUENTE	BETA (β)	EFICIENCIA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS
1	10583	250	42.33	97.60%
2	5215	120	43.46	97.70%
3	2943	100	29.43	96.60%
4	862	32	26.94	96.30%
5	768	29	26.48	96.20%
6	492	18	27.33	96.30%
7	324	12	27	96.30%
8	167	7	23.86	95.80%
9	63	3	21	95.20%
10	51	2	25.5	96.10%
		PROMEDIO		96.40%

Fuente: Modificado de AGUDELO, William. MILLAN, Sergio. Viabilidad técnica y económica en la implementación de otras alternativas de filtrado para el tratamiento de salmueras y aguas de producción

- **CASCARILLA DE PALMA AFRICANA**

Tabla 5 Resultado Filtro con cascarilla de palma africana

MUESTRA	AFLUENTE	EFLUENTE	BETA (β)	EFICIENCIA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS
---------	----------	----------	---------------------	--

1	10583	130	81.41	98.8%
2	5215	67	77.84	98.7%
3	2943	76	38.72	97.4%
4	862	23	27.48	97.3%
5	768	20	38.4	97.4%
6	492	13	37.85	97.4%
7	324	8	40.5	97.5%
8	167	5	33.4	97.0%
9	63	2	31.5	96.8%
10	51	1	51	98.0%
		PROMEDIO		97.6%

Fuente: Modificado de AGUDELO, William. MILLAN, Sergio. Viabilidad técnica y económica en la implementación de otras alternativas de filtrado para el tratamiento de salmueras y aguas de producción

Una vez conocido los resultados del análisis y estudio técnico se puede afirmar que las alternativas anteriormente planteadas muestran resultados similares a la tecnología extranjera en cuanto a remoción de partículas mayores a 2 micras. La arena diatomea presenta mejores índices en la remoción de partículas; pero todas son muy buenas alternativas válidas en el tratamiento de las aguas de producción y salmueras.

Dado que el estudio se centraba en realizar los respectivos análisis a la arena diatomea, cáscara de nuez y cascarilla de palma, se puede inferir que estas materias primas colombianas se comportan o responde de igual manera al producto que se maneja en el extranjero. Estas alternativas arrojan los mismos resultados sin importar la cantidad de barriles de agua a tratar, tamaño y cantidad de sólidos pues estas variables dependerán exclusivamente de las configuraciones del fabricante. Es importante destacar, que los datos obtenidos permiten validar la teoría mencionada en diferentes investigaciones acerca de la eficiencia de remoción de estas alternativas de filtrado²⁷.

²⁷ HOUCHIN, L.R. DUNLAP, D.D. HUNDSON, L.M. Field mixing and filtration of acid stimulation fluids. Society of Petroleum Engineers [online], 1986. Available from www.onepetro.org: OTC 5244

Tabla 6 Tamaño de solidos retenido, ventajas y desventajas de los filtros a analizar

FILTROS	TAMAÑO SOLIDO RETENIDO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
HIDROCILON	Partículas mayores a 100 micras.	<p>Son dispositivos de fácil construcción, instalación y mantenimiento.</p> <p>Son unidades pequeñas, lo que permite ahorrar espacio.</p> <p>Esfuerzos cortantes altos, lo que evita la aglomeración</p>	<p>Son inflexibles, lo que significa que son rígidos en construcción y permiten poca posibilidad de variaciones en el diseño.</p> <p>La capacidad y la eficiencia se relacionan de manera inversa, es decir, se logra aumentar una en detrimento de la otra.</p> <p>A altas concentraciones, el hecho de que presenten esfuerzos cortantes altos se convierte en una desventaja, ya que existe la imposibilidad de usar floculantes</p>
FILTRO ROTATIVO DE VACIO	Partículas entre 40- 60 micras	<p>Tiene un funcionamiento automático y continuo, por lo que precisa poca mano de obra.</p> <p>Se pueden obtener tortas de cualquier espesor, sin más que modificar la velocidad de giro.</p>	<p>Funcionan a vacío, lo cual limita la diferencia de presiones máxima que se puede aplicar y su empleo para líquidos calientes que tienden a hervir a bajas presiones.</p> <p>No puede utilizarse este filtro para materiales que formen</p>

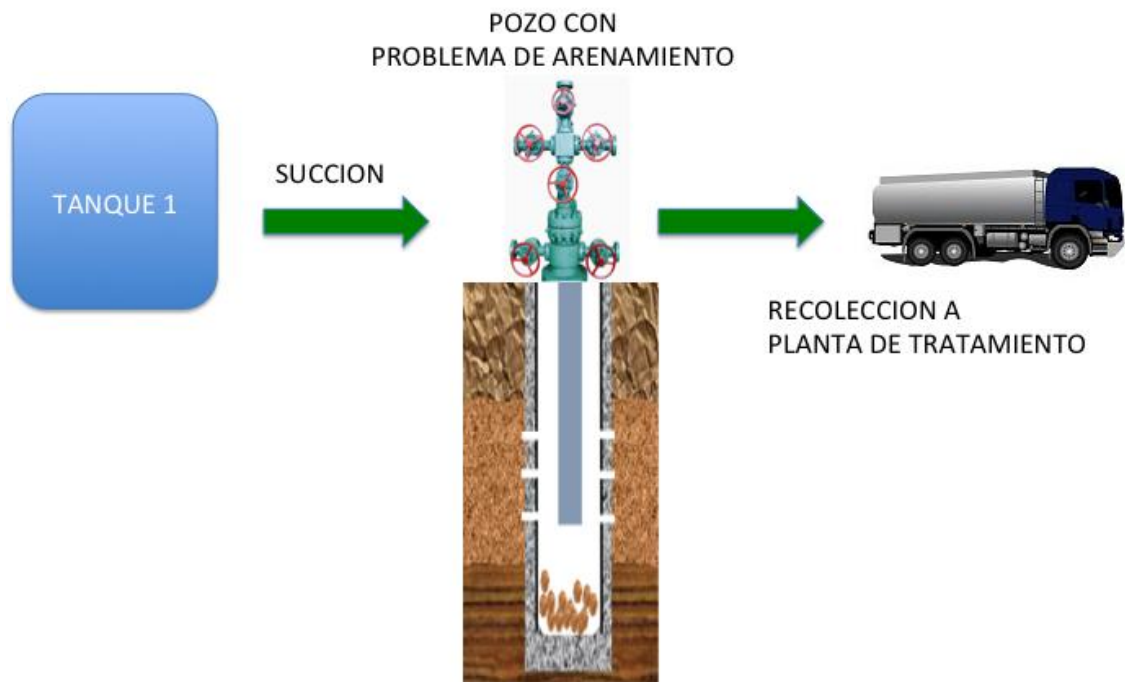
		<p>Tienen una capacidad muy grande.</p>	<p>tortas relativamente impermeables o difíciles de separar de la tela.</p> <p>No es fácil obtener un buen lavado, pero frecuentemente una doble filtración resolverá este problema</p> <p>Es difícil obtener una torta seca</p> <p>Los gastos de instalación del filtro y del equipo de vacío son elevados</p>
<p>FILTRO DE CASCARA DE NUEZ</p>	<p>Partículas mayores a 5 micrones</p>	<p>No es necesaria rotación de los equipos, es decir la bomba de retrolavado o mezcladora.</p> <p>Reduce los costos operativos pues no es necesaria una bomba de retrolavado con gran poder.</p> <p>Simple filosofía de control, fácil de operar con alta fiabilidad.</p> <p>Los medios tienen un medio de vida más largo que los competidores de los productos que utilizan distintas</p>	<p>No son continuos El agua con niveles altos de turbiedad puede tapar rápidamente estos filtros.</p> <p>No retiran completamente todos los químicos orgánicos, sustancias inorgánicas disueltas, como metales pesados o precursores del trihalometano (THM)</p> <p>El agua con arcillas muy finas no es tratada fácilmente usando estos filtros.</p>

		cascaras de nuez negra.	
FILTRO DE CASCARILLA DE PALMA AFRICANA	Partículas mayores a 5 micrones	<p>Malla filtrante desde 10 a 1000 micras, según aplicación.</p> <p>Equipos con caudales de producción desde 10 a 5400 m³ /h.</p> <p>Bajos costos de inversión, gracias al diseño compacto.</p> <p>Minimización de los costos de energía, ya que la filtración se realiza por gravedad.</p>	<p>No son continuos El agua con niveles altos de turbiedad puede tapar rápidamente estos filtros.</p> <p>No retiran completamente todos los químicos orgánicos, sustancias inorgánicas disueltas, como metales pesados o precursores del trihalometano (THM)</p> <p>El agua con arcillas muy finas no es tratada fácilmente usando estos filtros.</p>
FILTRO TIERRA DE DIATOMEA	Partículas mayores a 1 micrones	<p>Un rendimiento fiable, absoluta eliminación de sólidos a cualquier micrón de tamaño especificado.</p> <p>Vida más larga y unos costos más bajos, con gran superficie se tiene alta capacidad de retención de suciedad.</p>	<p>No son continuos</p> <p>El agua con niveles altos de turbiedad puede tapar rápidamente estos filtros.</p> <p>No retiran completamente todos los químicos orgánicos, sustancias inorgánicas disueltas, como metales pesados o precursores del trihalometano (THM)</p> <p>El agua con arcillas muy finas no es tratada fácilmente usando estos filtros.</p>

4. MODELAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE FILTRACION

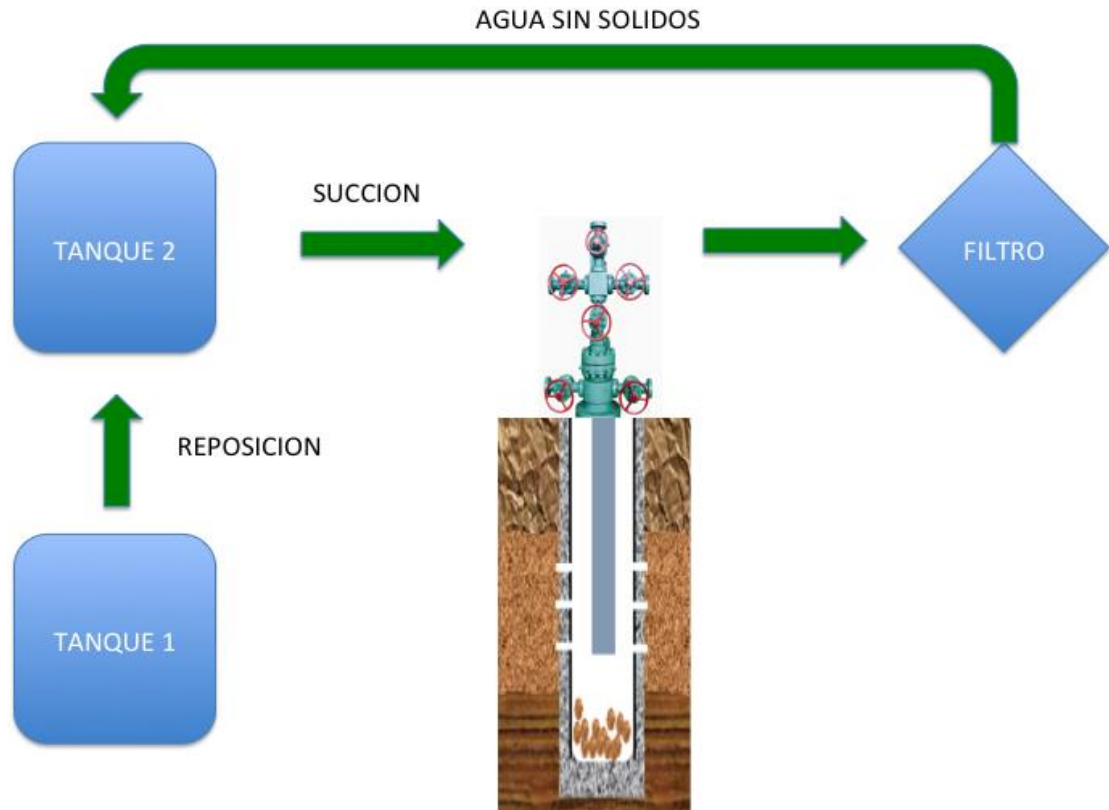
Una de las ultimas practicas utilizadas para limpiar arenamiento en pozos es el coiled tubing, la cual por medio de bombeo de fluidos tales como el agua se extraen las partículas solidas del fondo del pozo, estos fluidos después de salir del pozo deben ser trasladados y posteriormente tratados, y a su vez inyectar otra cantidad de fluido para mantener la columna hidrostática, lo que genera grandes costos y a su vez costos en tratamiento y transporte. En la figura 10 se representa el sistema actual de limpieza de arenamiento con CT.

Figura 10 Sistema actual de limpieza de arenamiento con coiled tubing



Asumiendo que solo se extraen partículas solidas, las cuales podrían ser retenidas por un sistema de filtración implementado con el sistema de limpieza de arenamiento con CT en el pozo, se mitigan costos y se optimizara la operación. En la figura 11 se representa un filtro instalado en el sistema de limpieza de arenamiento con CT.

Figura 11 Sistema de limpieza de arenamiento con coiled tubing implementando el filtro



4.1 SELECCIÓN DE FILTROS

Para la selección del filtro a analizar se compararon los filtros de separación líquido sólido existente en el Mercado como son:

- Hidrociclón
- Filtro rotativo de vacío
- Filtración con cáscara de nuez
- Filtración con tierra diatomeas

- Filtración con cascarilla de palma africana

Para nuestro análisis se implementa el separador hidrociclón y el filtro rotativo de vacío, ya que estos dos mecanismos funcionan de forma continua, a diferencia de la filtración con cáscara de nuez y filtración con tierra diatomeas, debido a que estos filtros se obstruyen y hay que revertir el flujo normal del filtro para eliminar las obstrucciones y mejorar su funcionamiento, debido a este criterio se basa en las pruebas de laboratorio realizadas por W. Agudelo y S. Millan (Capítulo 3). Donde se analizan las propiedades de estos equipos de filtración

4.2 SELECCIÓN DEL SIMULADOR

Para realizar el diseño del hidrociclón y el filtro rotativo de vacío se recurrió a la revisión de la literatura que se presenta en la selección de los parámetros, donde se recurrió al programa aspen plus, que se basa en ecuaciones empíricas generadas por el diseñador.

4.3 GENERALIDADES DEL SIMULADOR

Para la simulación se utilizó un software denominado Aspen Plus; que es un paquete que suele emplearse para una gran variedad de modelado de procesos industriales, químicos, petroquímicos y de refinación. Este programa además contiene una librería de modelos de las operaciones unitarias que permite ajustarlo y acoplarlo a procesos más complejos.

Aspen Plus proporciona un marco de optimización en tiempo real, llevando un control de los procesos y una correcta toma de decisiones. Además contiene un módulo de separación de sólidos con diferentes equipos, entre ellos se encuentra

el Separador de sólidos - Hidrociclón y el filtro rotativo de vacío, en donde a continuación se describen sus características y bondades.

4.4 HIDROCICLON

Este módulo de separación de sólidos que ofrece Aspen Plus, es la simulación de varios equipos, en este caso el de referencia es el hidrociclón, que es un equipo que aprovecha la fuerza centrífuga para separar una mezcla de sólidos de líquidos. En la Figura 12 se muestran los equipos que pueden ser simulados en el módulo de sólidos.

Figura 12 Panel de Modelos de separación de sólidos



Permite usar dos modos de operación, el modo rating y el modo sizing, en el primero es necesario que el usuario especifique el diámetro del hidrociclón y por ende el modelo calculará el diámetro de la partícula en el cual se obtiene un 50 % de eficiencia, mejor conocido como el diámetro de corte 50. Con lo que respecta al modo sizing el usuario especifica la distribución de tamaño de partícula y la eficiencia requerida para el proceso, y por ende el modelo arroja el diámetro requerido del hidrociclón.

En ambos modos de cálculo, la caída de presión es determinada por el usuario, ya que el sistema así lo requiere, en la bibliografía se plantea que existe una caída de

presión en el equipo de no mayor del 10% de la presión que ejerce la bomba (Bouso, 1990).

4.4.1 RANGOS DE OPERACIÓN: El modelo HyCyc usa correlaciones empíricas y semiempíricas, por lo que los resultados pueden ser poco confiables cuando las condiciones de operación están fuera de los márgenes experimentales en que se basan los modelos; de manera general los datos deben encontrarse en los siguientes rangos:

- Diámetro de partícula entre 5 a 200 micrómetros
- Diámetro de hidrociclón entre 0.01 y 0.6 metros
- Caída de presión entre 35 y 345 kPa.
- Eficiencia de separación entre 2% y 98%.
- La concentración de sólidos debe ser menor al 40% de fracción en peso.

4.4.2 ECUACIONES DE DISEÑO: Las ecuaciones de cálculo que usa dicho programa para el cálculo de la eficiencia de separación son las siguientes:

$$E = \frac{\text{flujo másico de sólidos}(\text{descarga inferior})}{\text{flujo másico de sólidos}(\text{derrame})}$$

La reducción de la eficiencia está definida por la fracción de sólidos en la alimentación que se derrama por el localizador del vórtice, menos la fracción del líquido en la alimentación que se va a la descarga inferior

$$E' = \frac{E - R_f}{1 - R_f}$$

Donde R_f es la fracción volumétrica en la descarga inferior para la alimentación.

La eficiencia reducida se obtiene con la siguiente ecuación:

$$E' = 100 \left\{ 1 - \left[\exp \left[\frac{d}{d_{50}} - 0.115 \right]^3 \right] \right\}$$

Dónde:

d : diámetro de las partículas.

d_{50} : diámetro de las partículas para la cual el 50% fue obtenida de la teoría que presenta Bradley en sus diseños, y la cual se enuncia a continuación.

$$\frac{d_{50} D_c}{D_i^2} = \frac{3(0.38)^n}{\alpha} \left\{ \frac{\mu D e (1 - R_f)}{Q(\sigma - \rho)} \tan \frac{\theta}{2} \right\}^{0.5}$$

Dónde:

Q : Flujo volumétrico en la alimentación

D_c : Diámetro del hidrociclón

D_i : diámetro de la entrada

ρ : densidad del líquido

σ : densidad real del sólido

θ : ángulo cónico del hidrociclón

μ : viscosidad del líquido

n : potencia de R es función de la distribución de la velocidad tangencial

α : coeficiente de pérdida de velocidad en la entrada

R_f : flujo en la alimentación

Las dimensiones mínimas y máximas que maneja el programa para el diseño de hidrociclones se aprecian en la tabla

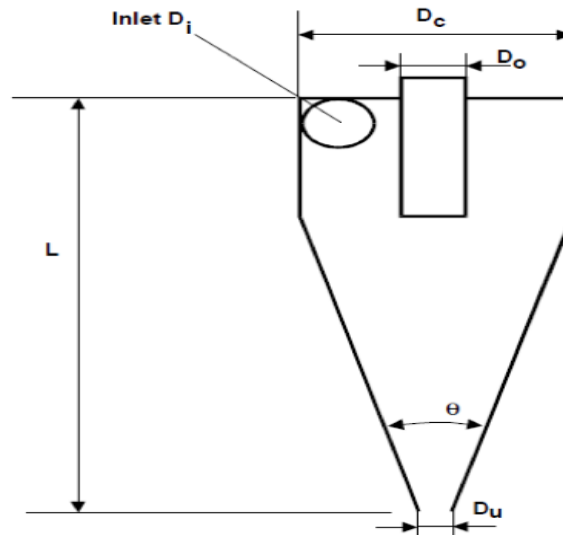
Tabla 7 Rango de operación del modelo Hycyc.

Dimensiones	Mínimo	máximo
Diámetro de entrada	1/7	1/3
Longitud	4	12
Diámetro del localizador del vórtice	1/8	1/2.3
Diámetro del apéndice	1/10	1/5
Ángulo del cono	9"	20"

Fuente: Tomado del Manual de usuario del simulador Aspen plus

A continuación se presenta un diagrama tomado de aspen plus para conocer la nomenclatura de las dimensiones del hidrociclón y que deben ser tomadas en cuenta para su diseño y construcción.

Figura 13 Geometría del hidrociclón



Fuente: Salvador, Edgar. Diseño y operación de un hidrociclón para mejorar la técnica de lavado de suelos 2010.

Dónde:

D_c : diámetro del cuerpo del hidrociclón

D_i : diámetro de la entrada de alimentación

D_o : diámetro del localizador del vórtice

D_u : diámetro del apéndice

L : longitud del hidrociclón

Θ : ángulo cónico

4.5 FILTRO ROTATIVO DE VACÍO

La simulación del filtro rotativo de vacío es continua, el filtro asume la eficiencia de remoción de sólidos igual a 1, así que la corriente de filtrado de salida no contiene sólidos residuales.

4.5.1 Características de la torta de filtro: El filtro asume:

- El espesor de la torta es superior a 0,00635 m.
- El número capilar es mayor que 1.
- La torta de filtro es incompresible o compactado de manera uniforme en todo su espesor (Dombrowski, H. S., and Brownell, L.E., 1954).

Cuando la resistencia específica de la torta (α) cae por debajo de la presión requerida ΔP no es válido , el filtro puede estimarse usando las siguientes correlaciones empíricas.

$$\alpha = \alpha_0(\Delta P)^k$$

Dónde:

α_0 : Resistencia específica en unidades de presión.

k: Compresibilidad de la torta.

Puedes usar esta ecuación para interpolación y cortos rangos de extrapolación donde algunos datos experimentales de α_0 y ΔP son válidos. α_0 es el intercepto de la gráfica $\log \log \alpha$ versus ΔP . α y α_0 tienen las unidades determinadas por la configuración de las unidades específicas, y ΔP está siempre en pascal.

Se usa el diámetro medio en la lámina de torta de filtro para especificar el diámetro medio de partículas sólidas en la torta de filtración. Si se introduce la distribución

del tamaño de partícula (PSD) de la corriente de sólidos de entrada el filtro calcula el tamaño medio de las partículas.

4.5.2 Corrientes de flujo: Entrada: Una corriente de entrada con corriente parcial al menos uno de sólidos.

Salida: Una corriente para el filtrado y una corriente de flujo para los sólidos.

4.5.3 Información general: Se puede utilizar filtros rotativos de vacío para evaluar o calcular tamaño del filtro.

Eficiencia de separación, E, se define como:

$$E = \frac{\text{underflow rate of solids}}{\text{Flujo de alimento con solids}}$$

El filtro asume la eficiencia de separación de los sólidos igual a 1, de modo que la corriente de filtrado de salida no contiene sólidos residuales.

4.5.4 Caída de presión : El filtro calcula la caída de presión por (Brownell, L.E., and Katz, D.I., 1947) a través de la torta de filtro con:

$$Q = \omega R H V = R H \left[\frac{2 \Delta p \omega \theta V}{\mu \alpha W} \right]^{1/2}$$

Donde:

Q: velocidad de flujo de volumen de filtrado

ω : Velocidad angular

R: radio

H: Ancho

V: Volumen de filtrado por unidad de área

ΔP : Caída de presión

θ : Ángulo de mojado

μ : viscosidad

α : Resistencia de filtración

W: masa sólida por unidad de área

4.5.5 Especificaciones: Especificaciones de condiciones de funcionamiento y parámetros

Tabla 8 Especificaciones de condiciones de funcionamiento y parámetros.

Para Realizar Estos Cálculos	Introducir	Cálculo Del Filtro Rotativo De Vacío
Rating	Simulación Diámetro Ancho Revoluciones Torta del filtro	Caída de presión a través del filtro
Dimensionamiento	Diseño Caída de presión máxima admisible a través de la torta de filtro	Diámetro del filtro

	Revoluciones Torta del filtro	
--	----------------------------------	--

Fuente: Tomado del Manual de usuario del simulador Aspen plus

En ambos modos de cálculo, Aspen Plus determina lo siguiente:

- caudal volumétrico filtrado
- El espesor de la torta
- Fracción de masa de sólidos en la torta de filtración de sólidos

4.6 SELECCIÓN DE PARÁMETROS

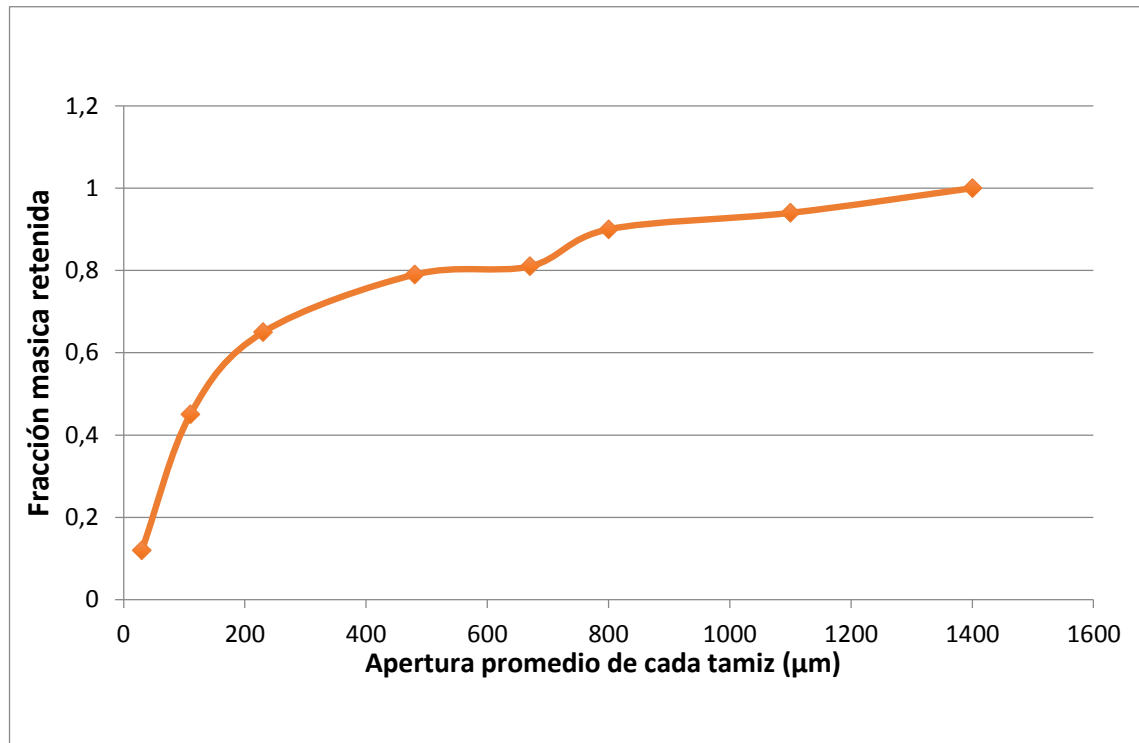
Se toma la distribución granulométrica del pozo 112-1 del campo poza como base de nuestro proyecto en la parte de la simulación, la cual podemos ver a continuación en la tabla y en la gráfica.

Tabla 9 Distribución granulométrica pozo 112-1 campo poza

DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA PARA EL POZO		
ABERTURA PROMEDIO DE CADA TAMIZ	FRACCIÓN MÁSCICA RETENIDA XI	ACUMULADA
30	0.12	0.12
110	0.45	0.33
230	0.65	0.2
480	0.79	0.14
670	0.81	0.02
800	0.9	0.09
1100	0.94	0.04
1400	1	0.06

Fuente: SALCEDO, Jesus. Factibilidad de uso del diseño de empaque con grava para el control de arenas en los pozos del campo posa, golfo de paria, 2011

Figura 14 Distribución granulométrica



También se toman datos como referencia como el diámetro del hidrociclón, el flujo de entrada, la concentración volumétrica de sólidos, el diámetro del filtro rotativo de vacío, las revoluciones por minuto del filtro rotativo de vacío estos datos los tomamos de rangos de operación y también de experiencias de ingenieros que han trabajado en operaciones con coiled tubing

El diámetro del hidrociclón fue obtenido dentro del rango mínimo de operación en la industria de la filtración el cual es de 10 cm y por medio de una optimización se determina que este diámetro es el mejor para este propósito de separación.

El flujo de entrada es obtenido por medio de datos suministrados por ingenieros que han trabajado en la operación de limpieza de arenamiento con coiled tubing, como dato se toma 1.5 GPM.

La fracción volumétrica de sólidos es determinada en 0.2 debido a que es la concentración máxima recomendada por el simulador para obtener resultados confiables.

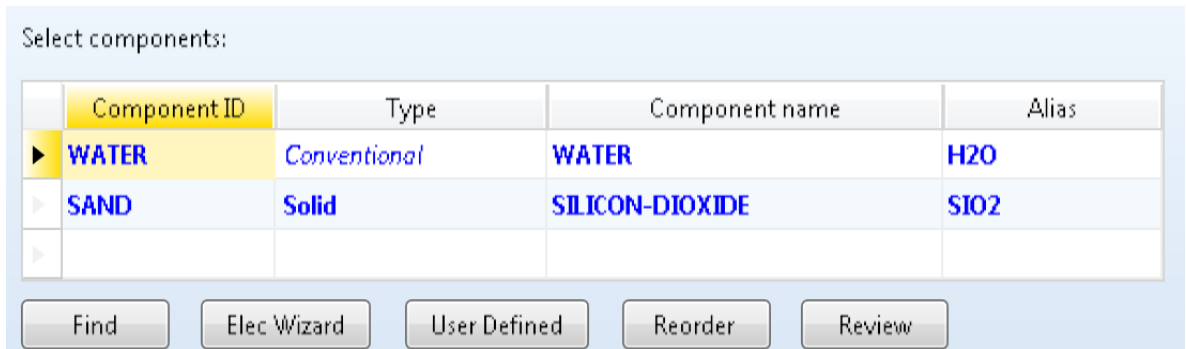
El diámetro del filtro rotativo de vacío se usó de 20 cm, este dato fue tomado dentro de los diámetros más usados en la industria de separación, se toma el menor con el fin de determinar el diseño más compacto y así diseñar un sistema pequeño y fácil de transportar en el futuro.

Las revoluciones por minuto del filtro rotativo de vacío se toma como 1 RPM teniendo en cuenta que está dentro del rango de operación común de estos mecanismos.

4.7 INCLUSION DE PARAMETROS EN EL SIMULADOR

Primero que todo se establecieron los compuestos con los que se van a trabajar en ambas simulaciones en este caso el agua y el SiO_2 , se toma el SiO_2 como compuesto sólido, ya que el óxido de silicio también conocido como sílice, es un mineral que aparece en la arena y es el mineral más abundante de la naturaleza. Este mineral se presenta en forma de granito, gneises, cuarcitas y existe en diferentes colores como por ejemplo: blanco, transparente, amarillo, rosa etc.

Figura 15 Selección de componentes



Se usa la plantilla de sólidos, debido a que reporta las propiedades y el flujos de todo tipo de componentes (vapor, líquido y sólido) juntos. También puede asignar a Aspen Plus reportar:

- Las concentraciones totales de flujo.
- Fracciones de vapor.
- Fracciones sólidas.

Una amplia gama de modelos de unidades de operación para manejo de sólidos está disponible, incluyendo cristalizadores, trituradoras, filtros rotativos de vacío, y los ciclones.

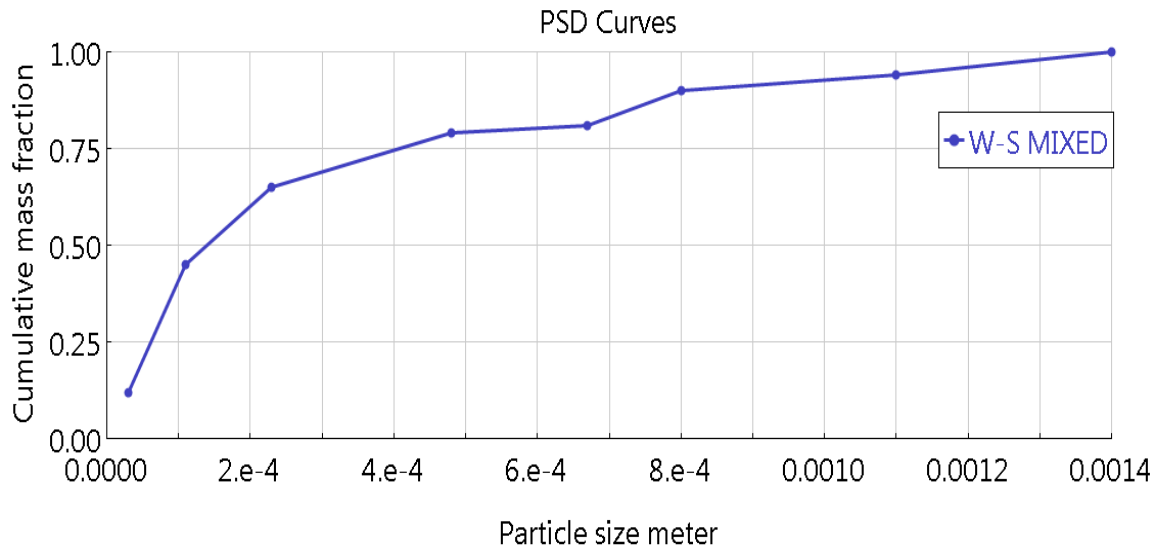
Figura 16 Selección del Modelo de simulación

The screenshot displays a software interface for selecting simulation models. It is divided into several sections:

- Property methods & options:**
 - Method filter: COMMON
 - Base method: SOLIDS
 - Henry components: (empty)
- Petroleum calculation options:**
 - Free-water method: STEAM-TA
 - Water solubility: 3
- Electrolyte calculation options:**
 - Chemistry ID: (empty)
 - Use true components
- Method name:** SOLIDS
- Methods Assistant...** button
- Modify** section (checkbox):
 - Vapor EOS: ESIG
 - Data set: 1
 - Liquid gamma: GMIDL
 - Data set: 1
 - Liquid molar enthalpy: HLMX108
 - Liquid molar volume: VLMX25
 - Heat of mixing
 - Poynting correction
 - Use liquid reference state enthalpy

Luego se establecen las corrientes **w-s**, **sol** y **wat** donde la corriente **w-s** corresponde a la alimentación de los filtros seleccionados donde se asume en ambos que entran a 1.5 GPM, una concentración volumétrica de 20% de sólidos, temperatura de 60 F y presión de 14.7 psia también se introduce la distribución granulométrica anteriormente mencionada

Figura 17 Distribución granulométrica



La corriente **sol** se asume es donde van a salir los sólidos o su gran mayoría; y la corriente **wat** es donde saldrá el agua filtrada y en condiciones de ser reinyectada. Luego establecemos los parámetros de las unidades de separación de cada tipo de filtro, se establece el modo simulación en ambos modelos y se selecciona un diámetro de 20cm y ancho de 200 cm, además se determina una velocidad de giro del tambor de 1 RPM para el filtro rotativo de vacío; al hidrociclón solo se le selecciona un diámetro de 10 cm.

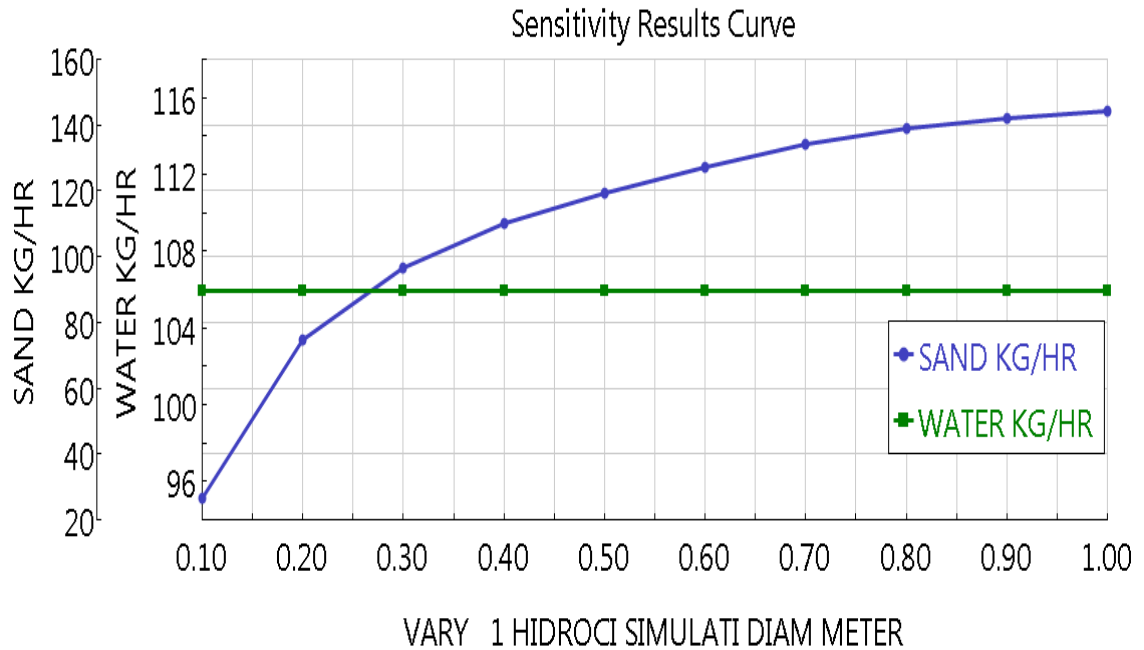
Además de esto se hace una sensibilidad a ambos modelos variando su diámetro y analizando la cantidad de cada tipo de fluido que salen de la corriente **wat** (agua filtrada) con el fin de determinar el diámetro óptimo de operación en ambos modelos.

4.8 ANALISIS REALIZADO CON EL SIMULADOR

Por medio de la sensibilidad de diámetro del hidrociclón contra flujo másico de componentes se establece que el diámetro óptimo para la separación es de 10cm

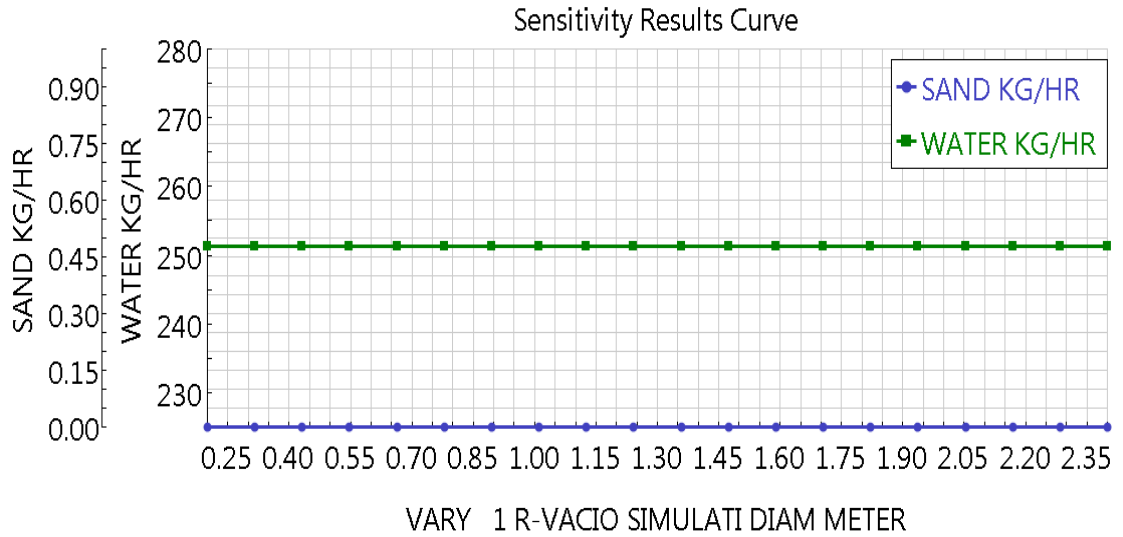
ya que con este diámetro la cantidad de sólidos en la corriente de **wat** (agua filtrada) es significativamente menor como se puede ver en la figura 18.

Figura 18 Sensibilidad Hidrociclón



A comparación de la sensibilidad hecha en el hidrociclón el diámetro en el filtro rotativo de vacío se aprecia que no hay variación en la cantidad de sólidos que salen de la corriente **wat** (agua filtrada), ya que este modelo asume que por la corriente de agua filtrada no salen sólidos.

Figura 19 Sensibilidad Filtro rotativo de vacío



Con estos resultados, se toman para el hidrociclón 10 cm de diámetro y para el filtro rotativo de vacío 20 cm de diámetro, y con estos datos el simulador nos da los siguientes resultados:

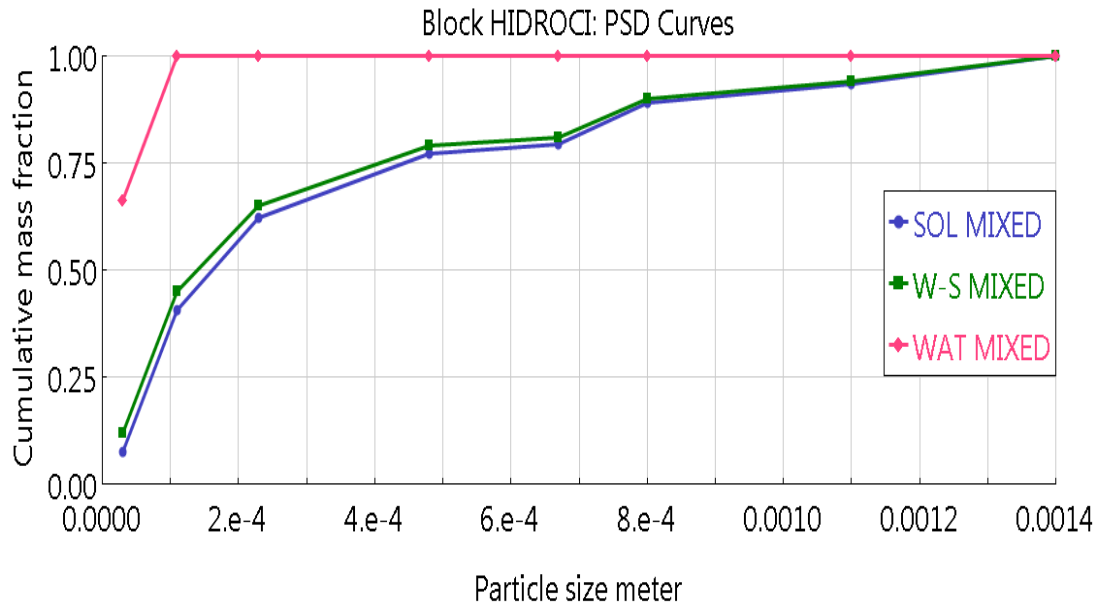
Para el Hidrociclón:

Figura 20 Resultados

HyCyc results		
Number of hydrocyclones:	1	
Pressure drop:	-14.4902	psig
Length of cylinder:	50	cm
Diameter of cylinder:	10	cm
Diameter of inlet:	1.429	cm
Diameter of overflow:	2	cm
Diameter of underflow:	1.5	cm
Inlet liquid velocity:	0.664127	m/sec
Liquid volumetric flow per cyclone:	1.68828	gal/min

La gran mayoría de tamaños son extraídos por la corriente **sol** alrededor de 100 micras en adelante como podremos observar a continuación.

Figura 21 Tamaño de grano en las corrientes del HC



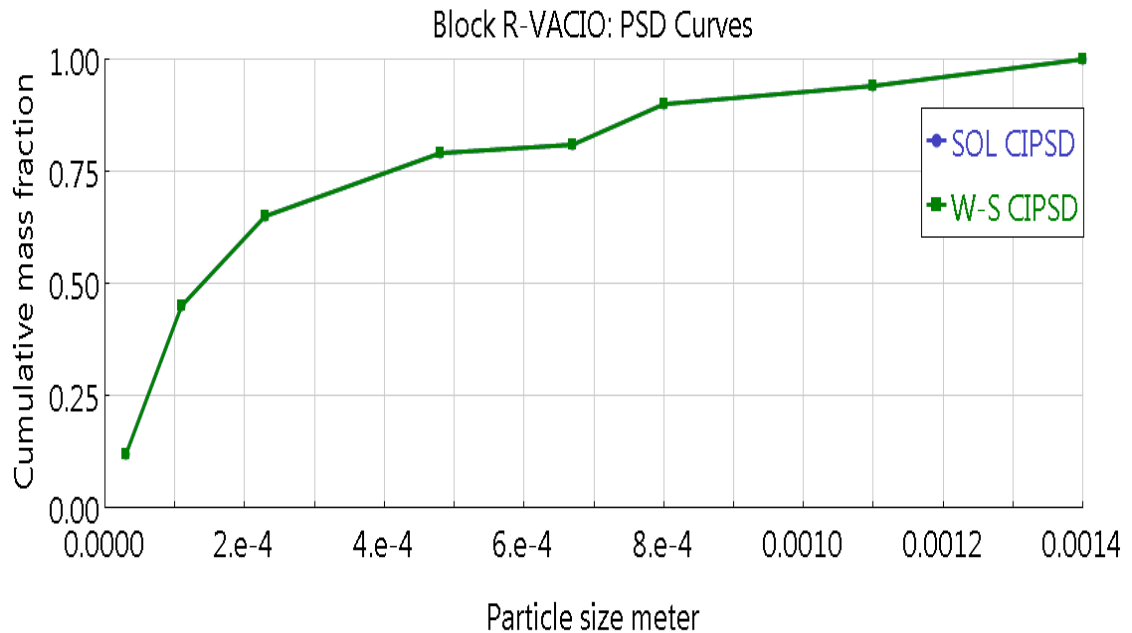
Para el Filtro Rotativo de Vacío: Al no tener contener diferencia con respecto a los diámetros se toma el diámetro menor con el cual se obtienen los siguientes resultados:

Figura 22 Resultados Filtro rotativo de vacío

Filter results		
▶ Pressure drop:	-14.6953	psig
▶ Filter diameter:	20	cm
▶ Filter width:	2	meter
▶ Average particle diameter:	0.0215837	cm
▶ Average solid density:	2.22043	gm/cc
▶ Total solid mass flow rate:	1251.37	kg/hr
▶ Surface tension:	0.0745373	N/m
▶ Volume flow of filtrate:	1.68828	gal/min
▶ Cake thickness:	1.35902	cm
▶ Filtration resistance:	2e+06	meter/kg
▶ Mass fraction of solids in cake:	1	
▶ Average porosity:	0.45	
▶ Cake compressibility:	0	

Y como se describe anteriormente la eficiencia de separación en el filtro rotativo de vacío es asumida como 1, asumiendo que todos los sólidos que entran salen por la corriente **sol** como vemos en la siguiente gráfica

Figura 23 Granulometría en las corrientes del filtro rotativo de vacío



4.9 ANALISIS DE RESULTADOS

Una vez conocido los resultados del análisis se puede afirmar que las alternativas anteriormente planteadas muestran resultados similares, como podemos darnos cuenta el hidrociclón con la configuración dada puede retirar partículas con diámetro mayor a 100 micras aproximadamente, por otra parte el filtro rotativo de vacío que asume una remoción del 100% no es muy fiable los resultados acerca de la remoción de sólidos, pero basándonos en el rango de remoción encontrado en la bibliografía, este sistema puede remover tamaños entre 40 micrones hasta 50 micrones por lo que su eficiencia de remoción es bastante buena, también hay que tener en cuenta que estos sistemas tienen la capacidad de trabajar continuamente.

5. EVALUACIÓN ECONÓMICA

5.1 DEPRECIACIÓN

La depreciación es un reconocimiento racional y sistemático del costo de los bienes, distribuido durante su vida útil estimada, con el fin de obtener los recursos necesarios para la reposición de los bienes, de manera que se conserve la capacidad operativa o productiva del ente publico.

A menudo es difícil estimar la vida útil y el valor de desecho o de recuperación de un activo fijo, pero es necesario determinarlo antes de poder calcular el gasto de depreciación para un periodo. Por lo general, una compañía estima la vida útil de acuerdo con la experiencia previa obtenida con activos similares propiedad de la empresa. Las autoridades fiscales y las distintas agrupaciones mercantiles establecen pautas para llegar a estimaciones aceptables. Con excepción de los terrenos, la mayoría de los activos fijos tienen una vida útil limitada ya sea por el desgaste resultante del uso, el deterioro físico causado por terremotos, incendios y otros siniestros, la pérdida de utilidad comparativa respecto de nuevos equipos y procesos o el agotamiento de su contenido. La disminución de su valor, causada por los factores antes mencionados, se carga a un gasto llamado depreciación. La depreciación indica el monto del costo o gasto, que corresponde a cada periodo fiscal. Se distribuye el costo total del activo a lo largo de su vida útil al asignar una parte del costo del activo a cada periodo fiscal.

El computo de la depreciación de un periodo debe ser coherente con el criterio utilizado para el bien depreciado, es decir, si este se incorpora al costo y nunca es reevaluado, la depreciación se calcula sobre el costo original de adquisición, mientras que si existieron reevaluaos, debe computarse sobre los valores reevaluados. Este calculo deberá realizarse cada vez que se incorpore un bien ó

mejora con el fin de establecer el nuevo importe a depreciar. Por otro lado, debe considerarse el valor residual final ó valor recuperable que será el que tendrá el bien cuando se discontinúe su empleo y se calcula deduciendo del precio de venta los gastos necesarios para su venta, incluyendo los costos de desinstalación y desmantelamiento, si estos fueran necesarios. La forma de calcular la depreciación es la siguiente:

$$IO + RE - VS = DEP$$

Dónde:

IO: Importe o costo inicial.

RE: Reevaluó efectuado.

VS: Valor de salvamento.

DEP: Valor a depreciar

Se han desarrollado varios métodos para estimar el gasto por depreciación de los activos fijos tangibles. La depreciación de un año varia de acuerdo con el método seleccionado pero la depreciación total a lo largo de la vida útil del activo no puede ir más allá del valor de recuperación.

Método de línea recta: Se supone que el activo se desgasta por igual durante cada periodo contable. Este método se usa con frecuencia por ser sencillo y fácil de calcular. EL método de la línea recta se basa en el numero de años de vida útil del activo, de acuerdo con la ecuación:

$$DEPRECIACIÓN = (\text{Costo} - \text{Valor De Salvamento}) / \text{Vida útil}$$

De esta manera se halla la depreciación de los activos pertenecientes al proyecto. Para tal fin se requiere conocer los costos de los equipos, el valor de salvamento y

la vida útil de cada uno de estos elemento. Para este proyecto el valor de la depreciación se calculó así:

Tabla 10 Depreciación de activos

CANTIDAD	EQUIPO	PRECIO US \$	Valor salvamento	Vida útil	Depreciación US \$
1	Hidrociclón	350	17.5	7	47.5
1	Filtro rotativo de vacío	10000	500	7	1357
2	Filtro cascara de nuez	1032	51.6	10	98.04
2	Filtro palma	930	46.5	10	88.35
2	Tierra diatomea	1132	56.6	10	107.54
1	Carro tanque	144000	7200	10	13680

Para realizar la evaluación económica se llevan a cabo varios pasos que se describen a continuación, inicialmente se debe tener en cuenta el proceso base que corresponde a la recolección del fluido y sólidos provenientes de la limpieza de arena con un carrotanque y posteriormente con la implementación de los diferentes filtros a analizar.

Tabla 11 Costo carrotanque

COSTO CARROTANQUE	
Costo US \$/ Unidad	120000
Mantenimiento Anual	24000
Total	144000

Tabla 12 Costo viaje Carrotanque

COSTO VIAJE CARROTANQUE			
Costo US \$ /tanqueo carro tanque	Numero de tanqueadas/ Mes	Costo US \$ mensual	Costo US \$ anual
350	2	700	8400

Tabla 13 Costo salario conductor

SALARIO CONDUCTOR	
Costo US \$ Mensual	Costo US \$ Anual
600	7200

La tabla 11 muestra los gastos operacionales anuales, que se presentan por el transporte del fluido que se produjo de la limpieza hacia la planta de tratamiento. Además hay un cinco por ciento de incremento al costo base anual por viaje del carro tanque.

A continuación se calculan los gastos que acarrea la implementación de un filtro desde el momento de instalación hasta diez años de su aplicación, teniendo en cuenta un incremento del cinco por ciento sobre el valor presente anual correspondiente al salario del conductor.

Tabla 14 Costo Total Anual- Sin filtros

Costo Total Anual US \$						
Año	Costo carrotanque	Mantenimiento anual	Costo viaje carrotanque	Salario conductor	Depreciación	Total
0	144000	0	0	0	0	144000
1	0	8400	14400	7200	13680	43680
2	0	8820	15120	7560	13680	45180
3	0	9261	15876	7938	13680	46755
4	0	9724	16670	8334.9	13680	48409
5	0	10210	17503	8752	13680	50145
6	0	10721	18378	9189	13680	51968
7	0	11257	19297	9649	13680	53883
8	0	11820	20262	10131	13680	55893
9	0	12411	21275	10638	13680	58004
10	0	13031	22339	11170	13680	60220

Tabla 15 Costo Total Anual- Filtro Rotativo de Vacío

Costo Total Anual- Filtro rotativo de vacío US \$					
Año	PRECIO FILTRO ROTATIVO	Costo instalación	Mantenimiento anual	Depreciación	Total
0	10000	500	0	0	10500
1	0	0	1000	1357	2357
2	0	0	1050	1357	2407
3	0	0	1103	1357	2460
4	0	0	1158	1357	2515
5	0	0	1216	1357	2573
6	0	0	1276	1357	2633
7	0	0	1340	1357	2697
8	0	0	1407	1357	2764
9	0	0	1477	1357	2835
10	0	0	1551	1357	2908

Tabla 16 Costo Total Anual- Hidrociclón

Costo Total Anual-Hidrociclón US \$					
Año	PRECIO HIDROCICLON	Costo Instalación	Mantenimiento anual	Depreciación	Total
0	1500	75	0	0	1575
1	0	0	150	204	354
2	0	0	158	204	361
3	0	0	165	204	369
4	0	0	174	204	377
5	0	0	182	204	386
6	0	0	191	204	395
7	0	0	201	204	405
8	0	0	211	204	415
9	0	0	222	204	425
10	0	0	233	204	436

Tabla 17 Costo Total Anual- Filtro Cascara de Nuez

Costo Total Anual-Filtro cascara de nuez US \$					
Año	PRECIO FILTRO CASCARA	Costo Instalación	Mantenimiento anual	Depreciación	Total

	NUEZ				
0	1032	52	0	0	1084
1	0	0	103	98	201
2	0	0	108	98	206
3	0	0	114	98	212
4	0	0	119	98	218
5	0	0	125	98	223
6	0	0	132	98	230
7	0	0	138	98	236
8	0	0	145	98	243
9	0	0	152	98	251
10	0	0	160	98	258

Tabla 18 Costo Total Anual- Filtro con Palma Africana

Costo Total Anual-Filtro palma Africana US \$					
Año	PRECIO FILTRO PALMA AFRICANA	Costo Instalación	Mantenimiento anual	Depreciación	Total
0	930	47	0	0	977
1	0	0	93	88	181
2	0	0	98	88	186
3	0	0	103	88	191
4	0	0	108	88	196
5	0	0	113	88	201
6	0	0	119	88	207
7	0	0	125	88	213
8	0	0	131	88	219
9	0	0	137	88	226
10	0	0	144	88	233

Tabla 19 Costo Total Anual- Filtro con Tierra Diatomea

Costo Total Anual-Tierra diatomea US \$					
Año	PRECIO FILTRO TIERRA DIATOMEA	Costo Instalación	Mantenimiento anual	Depreciación	Total
0	1132	57	0	0	1189

1	0	0	113	108	221
2	0	0	119	108	226
3	0	0	125	108	232
4	0	0	131	108	239
5	0	0	138	108	245
6	0	0	144	108	252
7	0	0	152	108	259
8	0	0	159	108	267
9	0	0	167	108	275
10	0	0	176	108	283

Finalmente se visualiza en la figura 24 los costos anuales del sistema actual de limpieza, y en la figura 25 se comparan los costos anuales al implementar los filtros estudiados teniendo en cuenta costos en mantenimiento, depreciación y costo inicial.

Figura 24 Costos sistema actual de limpieza de arenamiento con CT

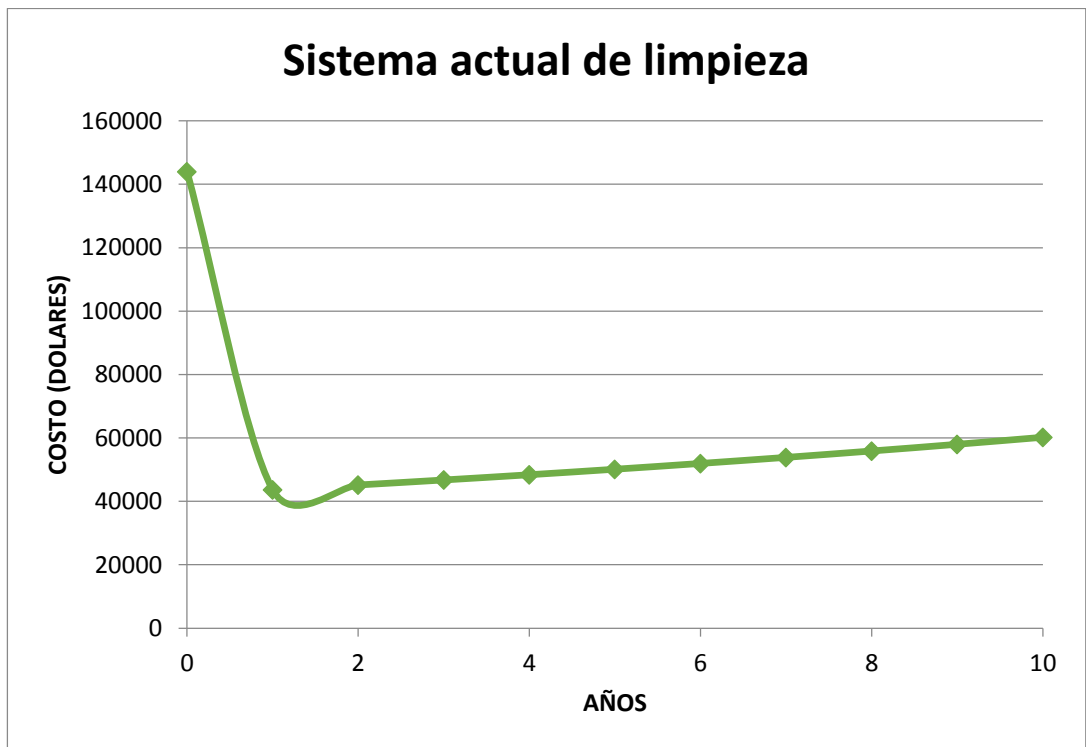
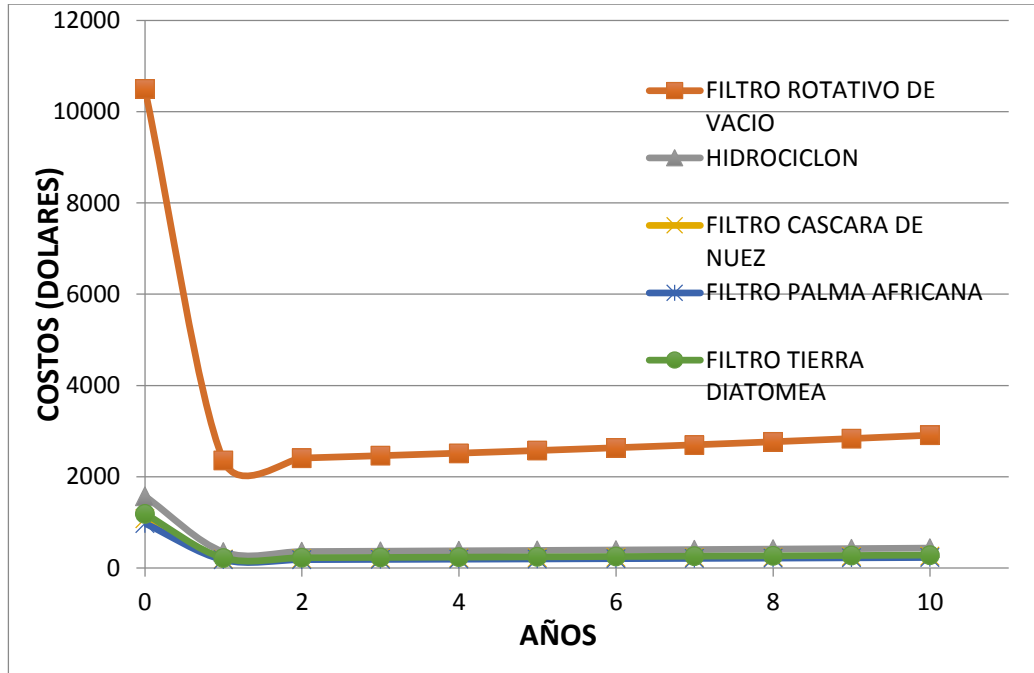


Figura 25 Comparación de gastos entre los filtros estudiados



5.2 ANÁLISIS FINANCIERO

La implementación de un filtro con lecho de cascara de palma africana en un proceso de limpieza de arena con CT es viable teniendo un costo inicial de 930 USD el par, y con remoción de partículas solidas de aproximadamente 97.6 % muestra ser un proceso con unas condiciones adecuadas tanto técnicas y operacionales para su implementación en el sistema, Además la vida útil de estos equipos podría ser superior a los 10 años siempre y cuando se ejecuten los mantenimientos que se requieran a tiempo.

Considerando los otros procesos como el filtros con cascara de nuez, tierra diatomea e hidrociclón, son opciones que pueden ser asequibles económicamente hablando, con respecto a los aspectos técnicos pueden cumplir a cabalidad con las necesidades que se puedan presentar ya que ofrecen una optima eficiencia de remoción de solidos

6. CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta los costos es aconsejable el uso del filtro de cascarilla de palma africana, que nos genera un ahorro de hasta \$13.000 dólares con respecto al sistema actual de limpieza.
- Se determina que la eficiencia de remoción de sólidos es mayor en el filtro rotativo de vacío, ya que en el modelo propuesto por el simulador Aspen Plus se asume una eficiencia de remoción del 100%, se concluye que estos resultados no son aproximados a la realidad por lo que se omite este dato, y se tiene en cuenta el filtro de tierra diatomea que tiene la mayor eficiencia de remoción de sólidos con 98.6%.
- Se descarta el filtro rotativo de vacío para su implementación debido a que los costos de instalación y gastos posteriores anuales superan aproximadamente en \$10.000 y \$2.000 dólares respectivamente en comparación con los otros filtros estudiados.
- Se concluye que los mejores filtros para implementar son el filtro de tierra diatomea, cascara de nuez y cascara de palma africana, ya que tienen un porcentaje de remoción de sólidos mayor a 96.4% además nos ofrece los costos mas bajos de implementación con un valor inferior a \$1.140 dólares.

7. RECOMENDACIONES

Tener en cuenta los efectos de abrasión de las partículas remanentes en el agua a reinyectar contra las paredes del coiled tubing.

Hacer un análisis de remoción de manchas de aceite con los filtros estudiados y determinar la eficiencia de remoción de cada uno de los filtros.

Realizar pruebas de campo para comprar los datos obtenidos con los datos teóricos.

Analizar otros tipos de filtros no estudiados en este trabajo para determinar viabilidad técnica y económica para implementarlo en las operaciones de limpieza de arenamiento con coiled tubing.

BIBLIOGRAFIA

AGUDELO, William. MILLAN, Sergio. Viabilidad técnica y económica en la implementación de otras alternativas de filtrado para el tratamiento de salmueras y aguas de producción

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API Recommended practice for Coiled Tubing operations in oil and gas well services. Washington, 1996 (R: 2007). API RP 5C7.

AFGHOUL, A., AMARAVADI S., BOUMALI, A., NEVES, J., et al. Coiled Tubing: The Next Generation. En: Oilfield Review: Spring 2004. Texas, USA.

BAKAR, H., et. al. Coiled Tubing Deployed Electrical Submersible Pump (CT-ESP). Application at Offshore Operation. Kuala Lumpur, Malaysia. Marzo del 2014. OTC-24752-MS.

BIGIO, D., et. al. Coiled Tubing Takes Center Stage. Oilfield Review 6, no. 4 (1994).

FLORES, A., et. Al. New Artificial Lift System Using Coiled Tubing and Reciprocating Downhole Pumps for Heavy and Viscous Oil. Ciudad de México, México, abril 2012. SPE 153360.

GARCÍA, E. Proyecto de Identificación: Tuberías Flexibles. Tabasco. Noviembre, 2013.

HEAD, P. Wireline or coiled tubing deployed electric submersible pump. Fecha de solicitud: 18 Enero, 2008. USA, patente: US 7753129 B2. 13 Jul 2010.

INTERNATIONAL COILED TUBING ASSOCIATION, ICoTA. An Introduction to Coiled Tubing: History, Applications, and Benefits. Longview, Texas. 2005.

KECK, R., et al. The First Coiled Tubing Deployed ESP in the Gulf of Mexico. SPE/ICoTA Coiled Tubing Conference and Exhibition, Houston, Texas. Marzo de 2004. SPE-89300-MS.

LENIEK, H., YANG, Y. Coiled Tubing Replaces Sucker Rods in Beam Pump Test. Texas, USA, Noviembre de 1999.

LIDISKY, D., RUSSELL, K. Coiled Tubing Deployed Electric Submersible Pumping System. Paper presented at the SPE Electric Submersible Pump Workshop held in

Houston, Texas. Abril 28, 1993.

SALVADOR, Edgar. Diseño y operación de un hidrociclón para mejorar la técnica de lavado de suelos

SALCEDOR, Juan. Factibilidad de uso del diseño de empaque con grava para el control de arenas en los pozos del campo posa, golfo de paria