

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2

Neiva, 06 de Abril de 2016

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Ana Maria Montealegre Orozco , con C.C. No. 1077867440 ,

Tatiana Andrea Ortiz Quintero , con C.C. No. 1075266750 ,

_____, con C.C. No. _____,

_____, con C.C. No. _____,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado OPTIMIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DEL SISTEMA PCP PARA EL CAMPO LA HOCHA presentado y aprobado en el año 2016 como requisito para optar al título de Ingeniero de petróleos;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.

- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.

- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores” , los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

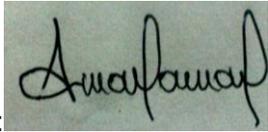
	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE: Tatiana Andrea Ortiz Quintero EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: 

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE: Ana Maria Montealegre Orozco EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: 

Firma: _____

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 3

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: OPTIMIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DEL SISTEMA PCP PARA EL CAMPO LA HOCHA.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Montealegre Orozco	Ana María
Ortiz Quintero	Tatiana Andrea

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Bonilla Camacho	Luis Fernando
Trujillo Lopez	Jaime Andrés

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero de Petróleos

FACULTAD: Facultad de Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Programa de Ingeniería de Petróleos

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2016

NÚMERO DE PÁGINAS: 254

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas x Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general x Grabados___ Láminas___
 Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas o Cuadros x

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS				  		
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Office Word

MATERIAL ANEXO: Ninguno

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*): Ninguno

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Sistema de bombeo por cavidades progresivas (PCP)	Progressive cavity pump (PCP)
2. Parámetros de diseño	Design parameters
3. Velocidad de asentamiento	Settling velocity
4. Velocidad crítica	Critical velocity
5. Caudal crítico	Critical flow
6. Capacidad de levantamiento	Lifting capacity

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

El presente trabajo muestra el desarrollo de los ajustes operacionales del sistema PCP teniendo en cuenta específicamente la producción de arena del campo La Hocha. Para ello se realizó el análisis granulométrico de la arena del campo La Hocha y en comparación con ella, una muestra de arena natural. Asimismo se realizó la prueba de asentamiento para las partículas sólidas, en donde se midió y calculó la velocidad de cada una de las muestras, y con ello se realizaron los ajustes en el parámetro de la velocidad de la bomba y además se tuvo en cuenta la densidad de la arena para el diseño de la capacidad de levantamiento y desplazamiento de la bomba PCP.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This paper presents the development of operational settings PCP system, taking into account specifically sand production of field La Hocha and for this was made sieve analysis of sand of field La Hocha and compared with it, a sample of natural sand. Furthermore the main experiment in the decantation test for solid particles was performed, where it was measured and calculated speed of each sample, and thus adjustments were made in the parameter of the speed of the pump and also taken into account, the density of the sand for the design of the lifting capacity of the PCP pump.



GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

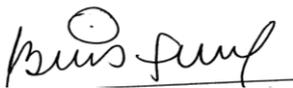
2014

PÁGINA

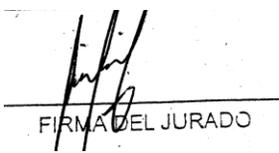
3 de 3

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: Luis Fernando Bonilla Camacho

Firma: 

Nombre Jurado: Jairo Antonio Sepúlveda Gaona

Firma: 
FIRMA DEL JURADO

Nombre Jurado: Luis Humberto Orduz

Firma: 
FIRMA DEL JURADO

OPTIMIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DEL SISTEMA PCP PARA EL CAMPO
LA HOCHA

ANA MARIA MONTEALEGRE OROZCO

TATIANA ANDREA ORTIZ QUINTERO

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA
2016

OPTIMIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DEL SISTEMA PCP PARA EL CAMPO
LA HOCHA

ANA MARIA MONTEALEGRE OROZCO
TATIANA ANDREA ORTIZ QUINTERO

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos

M.Sc LUIS FERNANDO BONILLA CAMACHO
INGENIERO DE PETRÓLEOS

JAIME ANDRES TRUJILLO LÓPEZ
INGENIERO DE OPERACIONES DE PRODUCCIÓN Y SUBSUELO

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA
2016

Nota de aceptación

Jurados

Jurado 1

Jurado 2

Director

Luis Fernando Bonilla Camacho

Neiva, Abril de 2016

DEDICATORIA

A Dios por su infinita grandeza y compañía, por mostrarme y guiarme siempre por el camino adecuado, por nunca dejarme sola, y siempre sostenerme en sus brazos, porque a pesar de que tenga errores, siempre podré contar con él.

A mi familia, mis padres Juan Carlos Ortiz y Martha Cecilia Quintero, por guiarme, corregirme, apoyarme siempre en cada paso de mi vida, por sus maravillosos consejos, por sus palabras de aliento en los momentos necesarios, a mis hermanos por estar siempre a mi lado, porque creer en mí y ofrecerme siempre su apoyo.

A todos mis amigos que de alguna manera me han colaborado en el desarrollo del proyecto, a Nicolás Manuel por su amor, compañía y apoyo en todo lo que necesito.

Tatiana Andrea Ortiz Quintero

AGRADECIMIENTOS

A la compañía Hocol S.A., por su valiosa colaboración en la realización de este proyecto.

Luis Fernando Bonilla, ingeniero de petróleos, director de este proyecto por su apoyo y asesorías brindadas.

Jaime Andrés Trujillo López, ingeniero de operaciones de producción y subsuelo, codirector del proyecto, por su tiempo y colaboración en el mismo.

A la Universidad Surcolombiana por brindarnos los medios necesarios para el desarrollo del proyecto y brindarnos la posibilidad de ser Ingenieros de Petróleos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	19
OBJETIVOS	20
OBJETIVO GENERAL.....	20
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	21
CAPITULO 1: CAMPO LA HOCHA.....	22
1.1. CARACTERISTICAS GENERALES.....	22
1.2. MARCO GEOGRÁFICO	23
1.3. MARCO HISTÓRICO.....	24
1.4. MARCO GEOLÓGICO.....	28
1.4.1. Estratigrafía.....	29
1.4.2. Esquema Estructural	31
1.5. PRODUCCIÓN DE ARENA	35
2. BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESIVAS.....	40
2.1. RESEÑA HISTÓRICA.....	41
2.2. GENERALIDADES	42
2.2.1. Ventajas	42
2.2.2. Desventajas	43

2.3.	COMPONENTES DE UN SISTEMA PCP	44
2.3.1.	Equipo de superficie.....	46
2.3.2.	Equipo de Fondo.....	47
2.4.	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBAY DEFINICIONES ..	48
2.4.1.	Geometría	50
2.5.	TIPOS DE BOMBAS PCP	55
2.5.1.	Bombas de precarga	55
2.5.2.	Bombas Fatboy	56
2.6.	CONSIDERACIONES BASICAS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA PCP	
	57	
2.6.1.	Pruebas de producción	57
2.6.2.	Propiedades de los Fluidos producidos	61
2.6.3.	Estado mecánico del pozo	67
2.6.4.	Selección de la bomba	68
2.6.5.	Parámetros de Diseño.....	68
3.	CAPITULO 3: CONSIDERACIONES TEÓRICAS.....	75
3.1.	VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO	75
3.1.1.	Fuerzas de arrastre	78
3.1.2.	LEY DE STOKES.....	79
3.2.	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....	80
3.2.1.	Método del Tamizado	80
3.2.2.	La Curva Granulométrica	81
3.2.3.	Granulometría en la clasificación de los suelos	82

3.2.4. Características de las curvas granulométricas	83
4. METODOLOGIA	85
4.1. PROCEDIMIENTO	85
4.1.1. Análisis granulométrico	85
4.1.2. Prueba de asentamiento de arena	88
4.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	89
4.2.1. Análisis Granulométrico	89
4.2.2. Prueba de asentamiento de arena	93
4.3. APLICACIÓN AL CAMPO LA HOCHA.....	103
5. CONCLUSIONES	107
6. RECOMENDACIONES	109
7. BIBLIOGRAFIA	110
ANEXOS	113

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características generales del Campo La Hocha	22
Tabla 2. Condiciones de Yacimiento del Campo La Hocha.....	23
Tabla 3. Clasificación de la ASTM relativa a tamaños límites de granos del suelo	82
Tabla 4. Clasificación del MIT relativa tamaños límites del suelo.....	83
Tabla 5. Registro de datos de prueba granulométrica.....	87
Tabla 6. Análisis Granulométrico Arena La Hocha.....	90
Tabla 7. Análisis Granulométrico Arena Común	91
Tabla 8. Composición Granulométrica de la arena La Hocha. Clasificación ASTM	92
Tabla 9. Composición granulométrica de arena común. Clasificación ASTM.....	93
Tabla 10. Resultados prueba de asentamiento. Arena Común sin tamizar	94
Tabla 11. Resultados prueba de asentamiento. Arena La Hocha sin tamizar	95
Tabla 12. Resultados prueba de asentamiento. Arena común.....	97
Tabla 13. Resultados prueba de asentamiento. Arena La Hocha	98
Tabla 14. Capacidad desplazamiento Campo La Hocha. Mes de Noviembre.	104
Tabla 15. Capacidad de levantamiento Campo La Hocha Mes Noviembre.....	105
Tabla 16. . Capacidad desplazamiento Campo La Hocha. Maximo porcentaje de arena desde el 2013.	105

Tabla 17. Capacidad de levantamiento Campo La Hocha. Maximo porcentaje de arena desde el 2013. 106

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Curva de comportamiento de afluencia.	61
Gráfica 2. Curva granulométrica Arena de la Hocha	90
Gráfica 3. Curva granulométrica Arena Común	91
Gráfica 4. % Volumen Vs. Velocidad Crítica. Arena Común sin tamizar	95
Gráfica 5. % Volumen Vs. Velocidad Crítica. Arena La Hocha sin tamizar	96
Gráfica 6. Gráfica de Velocidad Crítica Vs. Diámetro de partículas. Arena Común	98
Gráfica 7. Velocidad Crítica Vs. Diámetro de partícula. Arena La Hocha	99
Gráfica 8. Gráfica de Concentración (gr/l) Vs. Velocidad Crítica. Arena Común ...	99
Gráfica 9. Concentración (gr/l) Vs. Velocidad Crítica. Arena del campo La Hocha.	100
Gráfica 10. Gráfica de % Volumen Vs. Velocidad Crítica. Arena Común	100
Gráfica 11. % Volumen Vs. Velocidad Crítica. Arena La Hocha	101

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación Geográfica del Campo La Hocha. Fuente: Implementación de nuevas tecnologías en sistemas de levantamiento artificial: Reducción del índice de fallas, campo La Hocha, Colombia.....	24
Figura 2. Diseño Sistema ESP pozo La Hocha 1. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha	25
Figura 3. Primer diseño Sistema PCP pozo La Hocha 2. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha	26
Figura 4. Historia de producción del Campo La Hocha. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha	27
Figura 5. Ubicación Campo La Hocha. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha	28
Figura 6. Columna Estratigráfica generalizada del Valle Superior del Magdalena. Fuente: Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y cinemáticos en el sector sur del valle superior del Magdalena (anticlinal de La Hocha).	30
Figura 7. Mapa Geológico Anticlinal La Hocha. Fuente: Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y cinemáticos en el sector sur del valle superior del Magdalena (anticlinal de La Hocha).	32
Figura 8. Mapa Geológico Dominio Norte Anticlinal La Hocha. Fuente: Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y	

cinemáticos en el sector sur del valle superior del magdalena (anticlinal de La Hocha).....	33
Figura 9. Sección estructural restaurada al tope de la formación Monserrate. Ubicada al norte del cierre del Anticlinal de La Hocha. Fuente: Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagneticos y cinemáticos en el sector sur del valle superior del magdalena (anticlinal de La Hocha).	33
Figura 10. Mapa Geológico Dominio Sur Anticlinal La Hocha. Fuente: Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagneticos y cinemáticos en el sector sur del valle superior del magdalena (anticlinal de La Hocha).	34
Figura 11. Sección estructural restaurada al tope de la formación Monserrate. En el dominio Sur del Anticlinal de La Hocha. Fuente: Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagneticos y cinemáticos en el sector sur del valle superior del magdalena (anticlinal de La Hocha).	34
Figura 12. Azimut óptimo para ubicación de pozos en La Hocha. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha.....	36
Figura 13. Optima orientación de los cañones. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha	36
Figura 14. Presión de Fondo Fluyente vs Presión de Yacimiento. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha.....	37
Figura 15. Curva IPR del pozo La Hocha 2. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha	37
Figura 16. Representación de un pozo, donde la energía del yacimiento no es suficiente para elevar a los fluidos hasta la superficie. Fuente: Sistema de bombeo por cavidades progresivas aplicado a pozos desviados.....	40

Figura 17. El tornillo sin fin, inventado por Arquímedes, es el principio de la PCP. Fuente: Sistema de bombeo por cavidades progresivas aplicado a pozos desviados	41
Figura 18. Instalación convencional de un Sistema PCP. Fuente: Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas.....	45
Figura 19. Equipo de superficie del sistema PCP. Fuente: Evaluación del sistema de levantamiento por cavidades progresivas para crudos pesados en los campos Teca y Nare.	46
Figura 20. Partes principales de la bomba de Cavidades Progresivas. Fuente: Evaluación del sistema de levantamiento por cavidades progresivas para crudos pesados en los campos Teca y Nare.	48
Figura 21. Principio de operación de la bomba de cavidades progresivas: El fluido es transportado en las cavidades, generadas por la rotación del rotor dentro del estator. Fuente: Sistema de bombeo por cavidades progresivas aplicado a pozos desviados	49
Figura 22. Gradientes de presión fluyendo en un aparejo de PCP: En la presión de succión (P_s), el fluido entra a la bomba y es descargado con una presión mayor (P_d), capaz de vencer la contrapresión en la cabeza del pozo y poder llegar al tanque de almacenamiento. Fuente: Sistema de bombeo por cavidades progresivas aplicado a pozos desviados.....	50
Figura 23. Formas tridimensionales de rotores helicoidales. Fuente: Evaluación del sistema de levantamiento por cavidades progresivas para crudos pesados en los campos Teca y Nare.....	51

Figura 24. Geometrías en las bombas PCP. Fuente: Evaluación del sistema de levantamiento por cavidades progresivas para crudos pesados en los campos Teca y Nare.....	51
Figura 25. Movimiento del Rotor para una geometría 1:2. Fuente: Evaluación del sistema de levantamiento por cavidades progresivas para crudos pesados en los campos Teca y Nare.....	52
Figura 26. Excentricidad sistema Rotor-Estator. Fuente: Evaluación del sistema de levantamiento por cavidades progresivas para crudos pesados en los campos Teca y Nare.....	52
Figura 27. Paso del Rotor y del Estator. Fuente: Evaluación del sistema de levantamiento por cavidades progresivas para crudos pesados en los campos Teca y Nare.....	53
Figura 28. Configuración de una bomba de Precarga PCP. Fuente: Benefits Of PCP Charge Pumps Applied To Sand Producing Reservoirs 2013.....	55
Figura 29. Esquema de un pozo en condiciones estáticas. Fuente: Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnóstico, Análisis de Falla y Trouble Shooting.....	58
Figura 30. Esquema de un pozo en condiciones fluyentes. Fuente: Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnóstico, Análisis de Falla y Trouble Shooting.....	59
Figura 31. Efecto de la velocidad de operación sobre la eficiencia volumétrica de la bomba	70
Figura 32. Fuerzas ejercidas sobre una esfera al caer en fluido viscoso. Fuente: http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo4.pdf	75

Figura 33. Configuración del experimento88

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: Flujograma para un diseño apropiado de sistema con bombas de cavidades progresivas	113
ANEXO B. Comparación bombas “Fat Boy” Vs. Bombas Convencionales	113
ANEXO C. Granulometría de la arena de La Hocha hecha en campo.	114
ANEXO D. Registro fotográfico prueba granulométrica de la arena	116
ANEXO E. Registro fotográfico de la prueba de asentamiento	118

RESUMEN

El Sistema de Bombeo por Cavidades Progresivas es un método de levantamiento artificial de fluidos, cuya popularidad en la industria petrolera se ha ido incrementando en los últimos años, debido a su buen desempeño en la producción de fluidos viscosos y con grandes porcentajes de arena.

En el presente trabajo se realizará una breve descripción del campo La Hocha, su historia, sus características geológicas, su alta producción de arena, y las razones por las cuales se ha optado por implementar un modelo de operación basado en la producción de arena.

En el Capítulo 2 se describen las partes que componen el Sistema de Cavidades Progresivas (PCP), así como las consideraciones básicas para su diseño, y los parámetros que más influyen en el diseño de las partes del equipo. También se detallan los métodos para calcular los parámetros de diseño como Caudal y Presión. Además se describen las nuevas tecnologías utilizadas en las bombas de cavidades progresivas que logran una continuidad operacional y una viabilidad económica para el campo, tales como Charge Pump, Fat Boy.

En el Capítulo 3 se explican otros conceptos a tener en cuenta para el desarrollo del proyecto, como velocidad de asentamiento de los sólidos, las fuerzas que influyen en la decantación de los sólidos, granulometría, etc. Finalmente en el Capítulo 4 se muestra el desarrollo del proyecto, el paso a paso de cada uno de los procedimientos que se realizaron, con sus correspondientes resultados, así como los cálculos de los parámetros de diseño (Q y P) para los pozos productores de arena del campo La Hocha, y los ajustes que se deben tomar para una adecuada producción de crudo y arena.

PALABRAS CLAVE: Sistema de Bombeo por Cavidades Progresivas (PCP), Velocidad de asentamiento, parámetros de diseño.

INTRODUCCIÓN

El campo La Hocha ubicado en el suroccidente de Colombia, específicamente en el municipio de Tesalia (Huila) en la cuenca Valle Superior del Magdalena, ha presentado una serie de problemas operacionales debido a la producción excesiva de arena, puesto que la formación productora a la cual pertenece Monserrate, es no consolidada, somera y poco cementada.

Como solución al problema de arenamiento, se operan los pozos con Bombas de cavidades progresivas ya que este sistema de levantamiento artificial tiene algunas características que lo hacen ventajoso con respecto a otros sistemas de levantamiento artificial, entre ellos tenemos la habilidad para producir fluidos altamente viscosos y la habilidad para producir fluidos con altas concentraciones de arena.

Sin embargo la producción de arena es tan alta que (se tiene que manejar o diseñar u optimizar las bombas de cavidades progresivas de acuerdo con las condiciones del pozo, específicamente el arenamiento) supera la capacidad nominal de las bombas PCP, causando atascamiento de la misma, o depositación de la arena en el fondo del pozo, obstruyendo los perforados, en consecuencia reduciendo la productividad del pozo. Además, dadas las características de la roca no es apropiado ni favorable hacer control de arena en fondo debido al tamaño del grano (Limo) y taponamiento de la malla a utilizar. Por lo cual se recurre a la inyección de crudo limpio por el anular para operar los equipos a mayores velocidades y poder contrarrestar la velocidad de decantación de la arena, para ello se deben ajustar las condiciones de operación de la bomba y determinar el caudal a inyectar en el anular. Por eso este proyecto busca encontrar las condiciones óptimas de operación de bombas PCP, de acuerdo a los diferentes porcentajes de sólidos y las características de bombeo que presenta el campo La Hocha.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Optimizar las condiciones de operación de las bombas de cavidades progresivas, de acuerdo con los diferentes porcentajes de concentración de sólidos, tamaño y la densidad de los mismos, para con ello obtener una producción de crudo continua.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar y caracterizar los sólidos producidos en el campo La Hocha, mediante el análisis granulométrico.
- Determinar experimentalmente la velocidad de asentamiento de los sólidos en el agua.
- Correlacionar las velocidades de bombeo con la concentración de sólidos del campo La Hocha y la velocidad de asentamiento de las arenas.
- Indicar los ajustes operacionales para optimizar las Bombas de cavidades progresivas (PCP).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante la producción del crudo en el campo la Hocha, se han presentado una serie de problemas, fundamentalmente de arenamiento, lo cual se traduce en una baja producción de crudo, problemas operacionales, taponamiento de las tuberías, tuberías rotas, costos adicionales por tratamiento de arena en superficie y más. Por lo tanto se ha implementado el sistema de levantamiento artificial PCP que es más recomendado para los pozos con alta producción de arena (>5% V/V) y el cual ha demostrado mejor manejo de las arenas en el campo La Hocha, sin embargo se deben utilizar bombas con geometría especial para manejo de arena y utilizar tubería de producción con recubrimiento interno con polímero, con el fin de disminuir los riesgos de falla y alargar la vida útil de los Sistemas de levantamiento Artificial.

La zona de interés del campo La Hocha es altamente friable, presenta arenas de tipo limo, las cuales son muy finas (0.06 mm – 0.002 mm) y no se pueden controlar eficientemente a través de empaques o rejillas, y además con sistemas de control de arenas se disminuye notablemente la producción, lo cual no es rentable, por lo tanto se decidió fluir el pozo con las arenas, y para ello se inyecta el crudo limpio en el anular del pozo para que las arenas fluyan con mayor facilidad y superen las velocidades críticas de asentamiento de la arena. Pero en esta tarea surge otro problema, y es saber la velocidad de asentamiento de esta arena para así conocer el caudal a recircular y además optimizar los equipos de fondo así como los rangos operacionales que debe manejar la bomba de subsuelo.

CAPITULO 1: CAMPO LA HOCHA

1.1. CARACTERISTICAS GENERALES

CAMPO LA HOCHA

Formación	Monserate
Pozo Descubridor	LH-1 (2001)
Pozos Perforados	32
Pozos Productores	24
PCP	21
ESP	2
ESP – PCP	1
Pozos Inactivos	5
Pozos Inyectores (2) Disposal (1)	3
Estado Actual	Explotación
Producción Actual (Crudo)	1230 Bopd
Producción Actual (Agua)	4920 Bwpd
Producción Actual (Gas)	2 MMSCFD
Producción Actual (Arena)	20 bspd
STOOIP	147 MMbls
FR Actual	3.6 %
°API	16
BSW	80 %

Tabla 1. Características generales del Campo La Hocha

Fuente: Implementación de nuevas tecnologías en sistemas de levantamiento artificial-Hocol SA.

CONDICIONES DEL YACIMIENTO

Formación	Monserate
Mecanismo de producción	Gas en solución
Profundidad Promedio (ft)	1500-4000
Neto Petrolífero (ft)	360-1627
Permeabilidad (mD)	40-60-95
Presión de Yacimiento (Psi)	1380
Presión de Burbuja (Psi)	1235
Temperatura del Yacimiento (°F)	115
Viscosidad (cp) @ cond. Yac.	64
Viscosidad (cp) @ cond. Sup, @ 100°F	850
Bo (rb/stb)	1.076

Tabla 2. Condiciones de Yacimiento del Campo La Hocha

Fuente: Implementación de nuevas tecnologías en sistemas de levantamiento artificial-Hocol SA.

1.2. MARCO GEOGRÁFICO

El área de estudio se encuentra ubicada en el sector sur oeste del Valle Superior del Magdalena (VSM), El campo la Hocha, localizado a 100 km al sur de Neiva. Se encuentra situado en la Vereda Alto la Hocha en el municipio de Tesalia, departamento del Huila, Colombia. Su extensión areal está comprendida entre los Contratos de Asociación San Jacinto y Río Páez.

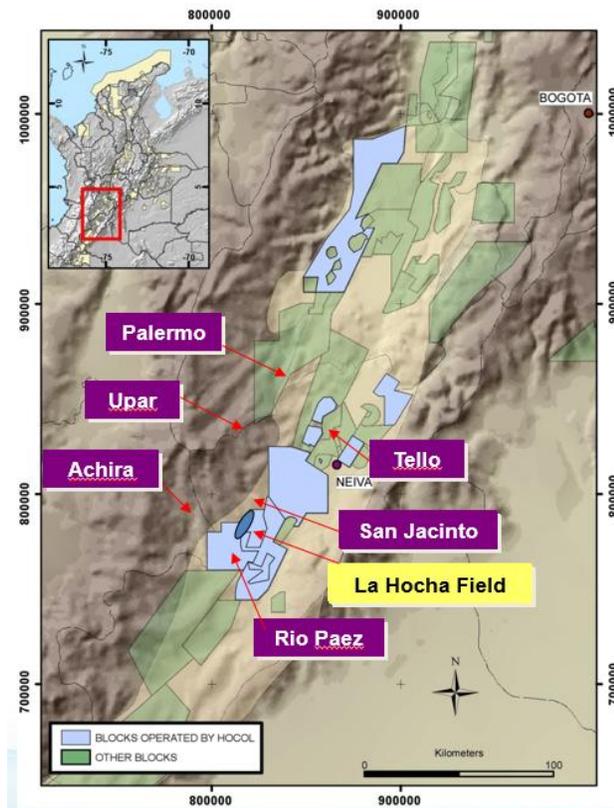


Figura 1. Ubicación Geográfica del Campo La Hocha. Fuente: Implementación de nuevas tecnologías en sistemas de levantamiento artificial: Reducción del índice de fallas, campo La Hocha, Colombia.

1.3. MARCO HISTÓRICO

El campo La Hocha fue descubierto en Noviembre de 2001 con la perforación del pozo La Hocha 1, se iniciaron labores de producción mediante el contrato de asociación San Jacinto y Rio Páez, entre las empresas Ecopetrol S.A.- Hocol S.A.; esta última operadora del campo.

Desde las pruebas iniciales en el pozo La Hocha 1 se evidenció el problema de producción de arena y para producir se implementó como sistema de levantamiento artificial bombeo electrosumergible (ESP). La principal causa de las fallas e intervenciones a pozo fue reducción de la tasa producción y disminución de la presión de entrada a la bomba (PIP) por arenamiento de los intervalos

productores, en la Figura 2 se ilustra el estado mecánico inicial del pozo La Hocha 1 y el recurrente problema de arenamiento.

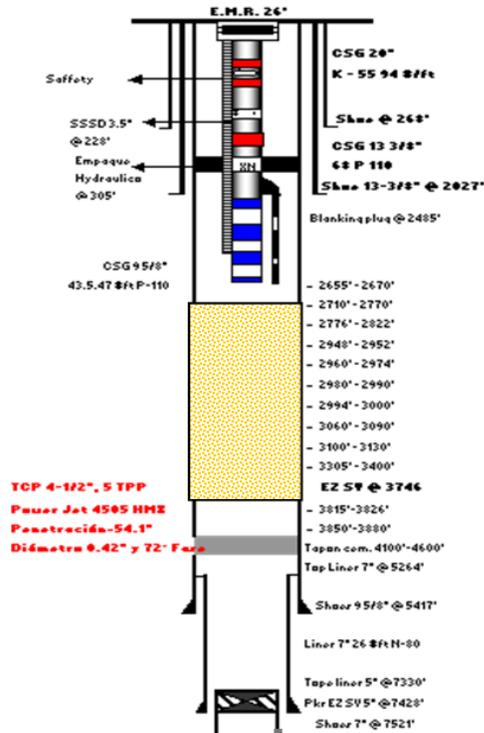


Figura 2. Diseño Sistema ESP pozo La Hocha 1. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha

En febrero de 2002, para el pozo La Hocha 2 se optó por combinar la ESP por una bomba de cavidades progresivas PCP ubicada encima de las perforaciones y como modificación se implementó una sarta de velocidad por debajo de la bomba para tener succión desde el fondo del pozo y facilitar la producción de la arena como se ve en la Figura 3; sin embargo adicional a los problemas de arenamiento se presentaban paradas de pozo por alto torque, desenrosque de las varillas convencionales y eventos de tubería rota por fricción y abrasión entre la sarta de varillas y la tubería de producción. Ante ello se realizaron trabajos de workover para control de arena en fondo de pozo.

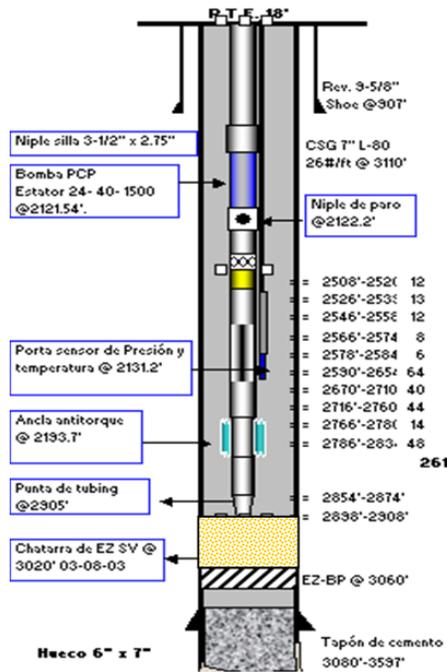


Figura 3. Primer diseño Sistema PCP pozo La Hocha 2. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha

En julio de 2003 se diseñó un trabajo llamado “Extension Pac” para el pozo La Hocha 8; que consistió en colocar un arreglo de mallas de acero inoxidable frente a las perforaciones en un lecho de material apuntalante malla 30/50, como fluido de transporte se usó salmuera Cloruro de Potasio (KCl) al 2% y se adicionó un polímero tipo resina llamado “Sandwesh” para darle mayor soporte al lecho empacado y capturar los finos que puedan migrar y dañar la conductividad de la fractura. El resultado del trabajo no fue el mejor, porque aunque hoy no se produce arena de formación se evidencia baja productividad del pozo (0.08 Bl/psi), probablemente hay taponamiento de las mallas y del lecho empacado con material de formación y depósitos orgánicos e inorgánicos.

En septiembre de 2003 se diseñó y realizó un segundo trabajo denominado “Screen Less Completion” en el pozo La Hocha 3. Previo a esto se realizó el Estudio de Geomecánica de Rocas para determinar la orientación de los esfuerzos y a partir de ellos se diseñó el completamiento que consistió en cañonear

orientando los cañones en dirección del máximo esfuerzo principal N65W, seguido a esto se fracturó usando fluido gelificado base diesel con material apuntalante malla 20/40 y fibras de “PropNet” cuyo objeto era entrelazarse y retener el apuntalante dentro de la fractura; este trabajo no fue exitoso ya que la productividad del pozo es mínima (0.01 Bl/psi), el material apuntalante no quedó confinado dentro de la fractura y por el contrario hay retorno hacia el pozo, como consecuencia se han tenido sinnúmero de paradas e intervenciones para limpieza.

Ante el resultado de los trabajos anteriores se concluyó que no fueron seleccionados los mejores pozos y que dadas las características de la roca es difícil pensar en hacer control de arena en fondo.

En Noviembre de 2003 se visitaron algunos campos similares a La Hocha en Canadá para observar el manejo que le dan a este problema y se encontró que en la mayoría de los casos no hacen control de arena en fondo y por el contrario se preparan para producirla y manejarla en superficie. De esta manera han logrado desarrollar un modelo operacional que les permite convivir con el problema y tener costos de operación razonables.

En la Figura 4 se muestra la historia de producción del campo La Hocha y en ella se puede ver el impacto de las diferentes paradas por falla de pozos, causadas principalmente por arenamiento.

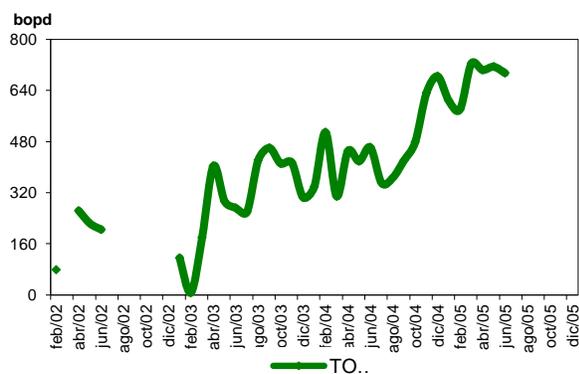


Figura 4. Historia de producción del Campo La Hocha. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha

1.4. MARCO GEOLÓGICO

El campo La Hocha se encuentra localizado en la subcuenca de Neiva, al sur de la Cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM). El VSM es una depresión elongada con rumbo SSW – NNE que se desarrolla entre la Cordillera Central, al oeste, y la Cordillera Oriental al este; se extiende por aproximadamente 400 Km de sur a norte con un ancho promedio de 50 Km, como lo muestra la Figura 5.

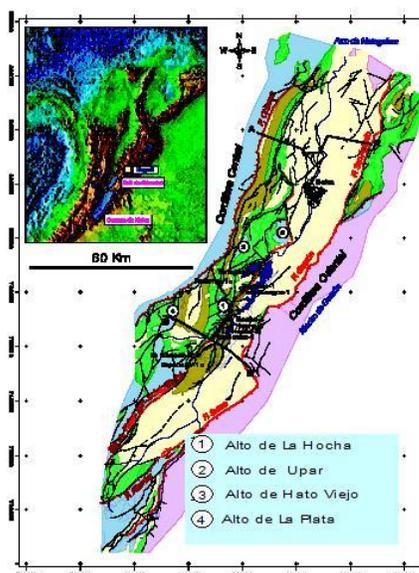


Figura 5. Ubicación Campo La Hocha. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha

La geometría de la trampa corresponde a un anticlinal asimétrico, esta estructura corresponde al compartimiento superior del Sistema Apilado de La Hocha y se ha denominado “Estructura Somera de La Hocha” donde la Formación Monserrate es el reservorio principal; esta secuencia corresponde a un evento regresivo que comienza en la Formación Villeta y termina al tope del Monserrate donde finalizan las condiciones depositacionales de ambiente marino en la cuenca del VSM. Por sus ambientes de depositación la roca se subdivide en cuatro miembros denominados Km1, Km2, Km3 y Km4 de los cuales por sus características petrofísicas los tres primeros se consideran reservorio. Las arenas de Monserrate se describen como areniscas cuarzosas de grano muy fino a fino y bien

seleccionadas, con pobre contenido de cemento fosfático lodoso con parches de calcita levemente dolomitizada y algunas veces feldespática.

La depresión del valle superior del río Magdalena que separa las cordilleras Oriental y Central, se originó con el levantamiento de las cordilleras a lo largo de fallas inversas, lo que trajo como consecuencia el aporte masivo de sedimentos gruesos y finos, tanto de la Cordillera Oriental como de la Central, que conforman en gran medida el relleno aluvial del valle.

1.4.1. Estratigrafía

El basamento económico Pre-cetáceo está conformado por rocas ígneas intrusivas y extrusivas de composición ácida correspondientes al batolito de Ibagué y la formación Saldaña.

La cobertura productiva de carácter sedimentario está determinada por dos secuencias deposicionales diferentes caracterizada por presentar rocas de origen clástico y químico:

- La primera se trata de una secuencia clástica marina que abarca desde el Cretáceo Medio (Aptiano-Albiano) hasta el Paleógeno(Paleoceno) de un ambiente marino transicional desarrollando un ciclo regresivo que permitieron la depositación en el área de las formaciones Caballos, Villeta, Monserrate y Guaduala respectivamente.
- La segunda secuencia compuesta por rocas sedimentarias de origen continental que abarcan desde el Eoceno hasta el reciente, que corresponden estratigráficamente a las formaciones Gualanday, Potrerillos, Doima, Honda, Gigante y Depósitos Cuaternarios

CENOZOICO	Cuaternario			
	Neogeno			
	Paleogeno		Honda	
			Doima	
			Potrerillos	
			Chicoral	
			Guaduala	
	MESOZOICO	Cretácico	Superior	Monserate
				Villeta
			Inferior	Caballos
Jurásico			Saldaña	
Triásico				

Figura 6. Columna Estratigráfica generalizada del Valle Superior del Magdalena. Fuente: Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y cinemáticos en el sector sur del valle superior del Magdalena (anticlinal de La Hocha).

Formación Monserate: es considerada como la unidad litológica productora del campo La Hocha y Litológicamente está constituida por cuatro miembros dos arenosos y dos lutíticos.

- *La unidad K4:* está compuesto por arcillolitas y limolitas con un nivel de roca fosfórica.
- *La unidad K3:* está representado por areniscas cuarzoarenosas blancas a grises y de grano medio a fino.
- *La unidad K2:* está conformada por limolitas silíceas y chert, este miembro presenta dos niveles de roca fosfórica, es común el intenso plegamiento de estas rocas.
- *La unidad K1:* está compuesta por cuarzoarenitas de grano grueso con cemento silíceo.

La formación Monserrate fue depositada en un ambiente de plataforma cercano a la línea costa, asociado a zonas de frente de costa y plataforma. Está constituida por cuarzo areniscas de grano fino a medio principalmente con restos fósiles. Hacia la base de esta formación se encuentran niveles de lodolitas a areniscas de grano muy fino color crema, hacia el sur se encuentran algunos niveles delgados de calizas dentro de la secuencia arenosa. Esta formación se encuentra fracturada indicando un comportamiento competente. La formación Monserrate descansa sobre la Formación Villeta en contacto normal y sobre ella descansa en para conformidad la suprayacente Formación Guaduala.

1.4.2. Esquema Estructural

El anticlinal de La Hocha es una estructura con doble cabeceo, en el sector sur es paralelo al trazo de la Falla San Jacinto y el sector norte es oblicuo al trazo de la Falla de San Jacinto, Figura 7.

Al norte del anticlinal (Figura 8 y 9) se observan 3 sistemas de fallas principales, 2 con despegue somero dentro de la formación Saldaña (fallas de Teruel y Pedernal), variando al Este hacia una falla con despegue profundo y con un alto ángulo de falla (Falla San Jacinto).

El dominio sur (Figura 10 y 11) está controlado por tres sistemas de fallas. El sistema de fallas de La Hocha con despegue somero en la Formación Saldaña la cual tiene convergencia al Este. Las fallas las Mesitas que es un sistema de fallas inversas que tiene convergencia al Oeste los cuales afectan el flanco Oeste del Anticlinal de La Hocha. El otro sistema está asociado a la Falla San Jacinto, el cual presenta movimientos transpresivos por la presencia de estructuras en flor positiva.

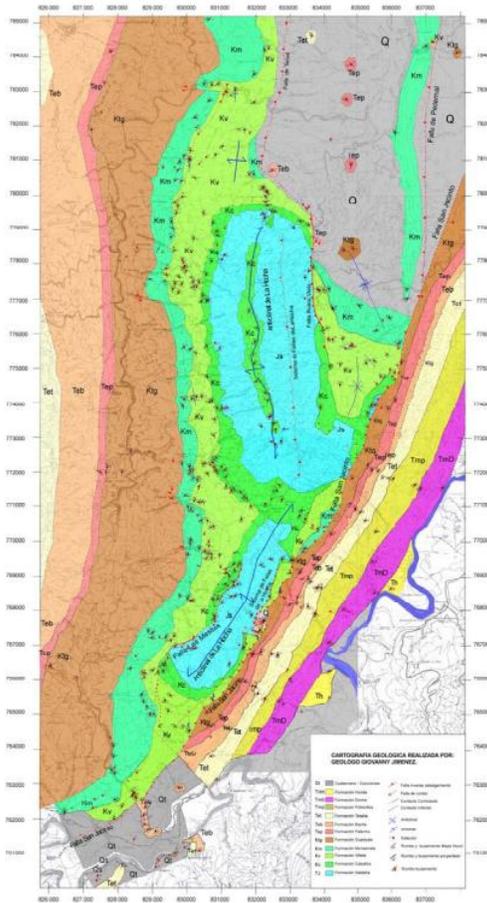


Figura 7. Mapa Geológico Anticlinal La Hocha. Fuente: Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y cinemáticos en el sector sur del valle superior del Magdalena (anticlinal de La Hocha).



Figura 7A. Cartografía Geológica. Fuente: Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y cinemáticos en el sector sur del valle superior del Magdalena (anticlinal de La Hocha).

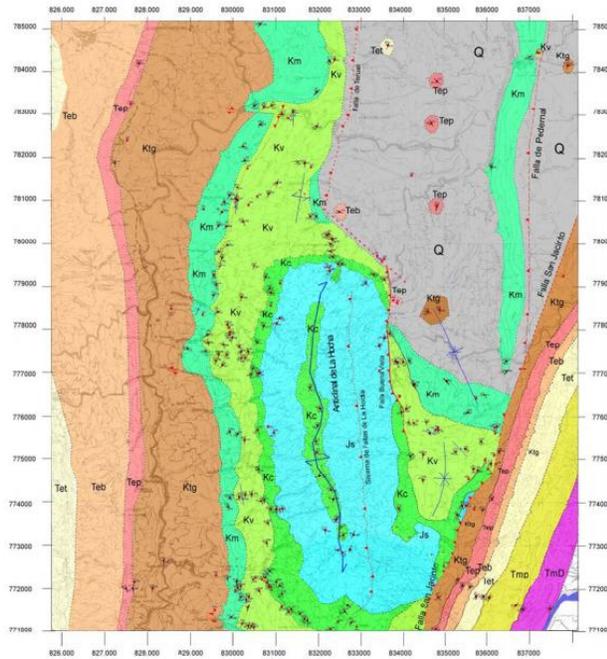


Figura 8. Mapa Geológico Dominio Norte Anticlinal La Hocha. Fuente: Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y cinemáticos en el sector sur del valle superior del Magdalena (anticlinal de La Hocha).

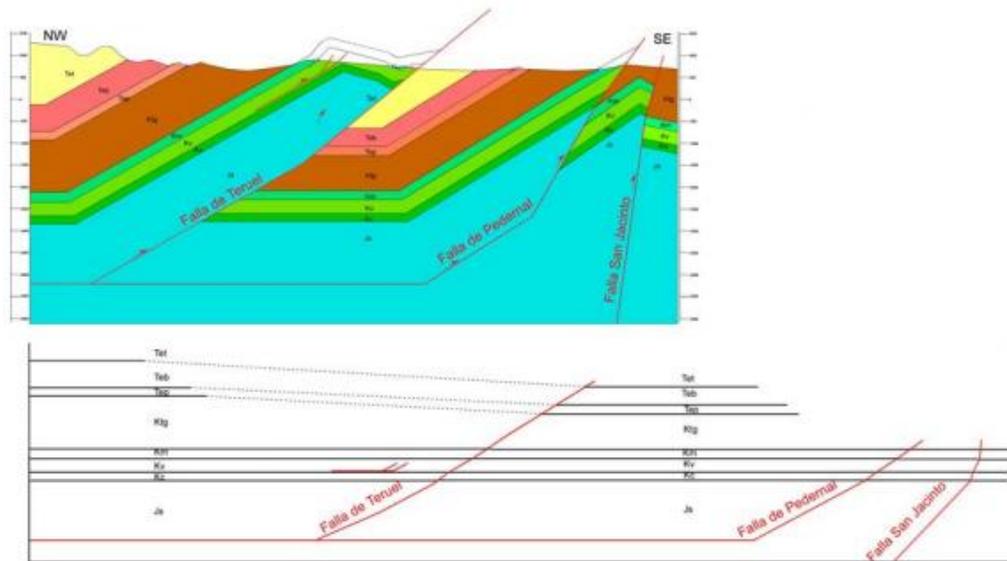


Figura 9. Sección estructural restaurada al tope de la formación Monserrate. Ubicada al norte del cierre del Anticlinal de La Hocha. Fuente: Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y cinemáticos en el sector sur del valle superior del Magdalena (anticlinal de La Hocha).

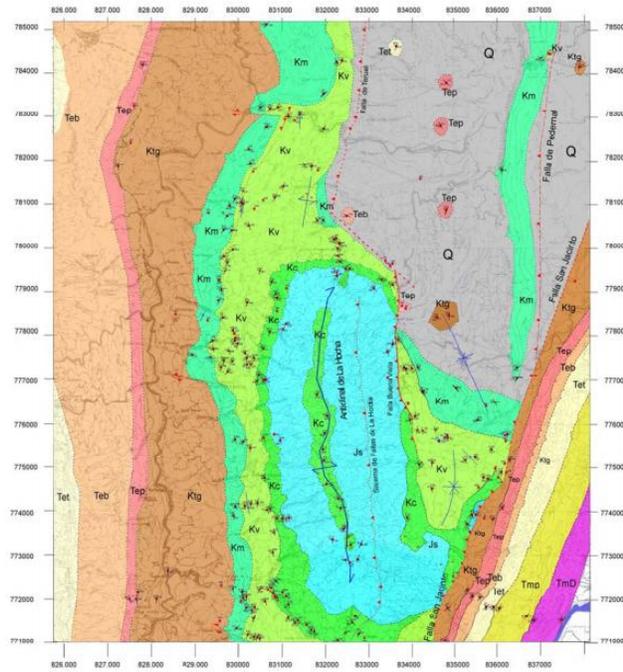


Figura 10. Mapa Geológico Dominio Sur Anticlinal La Hocha. Fuente: Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y cinemáticos en el sector sur del valle superior del Magdalena (anticlinal de La Hocha).

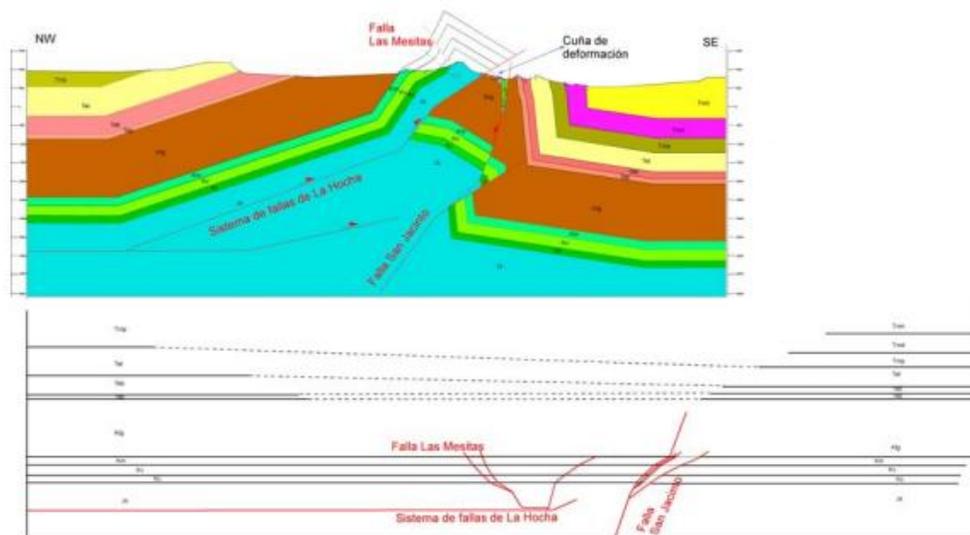


Figura 11. Sección estructural restaurada al tope de la formación Monserrate. En el dominio Sur del Anticlinal de La Hocha. Fuente: Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y cinemáticos en el sector sur del valle superior del Magdalena (anticlinal de La Hocha).

Las secciones estructurales muestran que los espesores de las unidades Cretácicas y Cenozoicas, cambian a través de la Falla San Jacinto, siendo más espesas en el bloque colgante y disminuyen su espesor hacia el bloque yacente, este efecto podría indicar que esta falla podría corresponder a una falla con evidencia de inversión tectónica.

1.5. PRODUCCIÓN DE ARENA

La formación productora (Monserrate), presenta una baja resistencia, debido a esto, la roca exhibe un bajo grado de cementación, lo cual conlleva a que los granos de la roca se disocien de la matriz y se produzcan en superficie.

Las principales causas de la producción de arena están ligadas a los ambientes de depositación, procesos geológicos de consolidación de la roca, profundidad y tiempo geológico; bajo estas premisas se conocen principalmente tres tipos de arena:

- Movediza, que carece de material cementante.
- No Consolidada, que es pobremente cementada, y
- Semi Competente, que tiene los granos cementados y consolidados.

Con base en lo anterior y la descripción geológica de la roca se puede decir que la Formación Monserrate del Campo La Hocha pertenece al grupo de las No Consolidadas ya que es somera, poco cementada y “Joven” por lo tanto es normal esperar alta producción de arena.

En el subsuelo los principales factores que controlan si la roca fallará mecánicamente son; la resistencia, el esfuerzo efectivo ejercido sobre la formación, una combinación de los esfuerzos terrestres principales que actúan sobre la roca, la presión de poro y los esfuerzos introducidos por la perforación. Con base en los resultados del Estudio de Daño de Formación, hecho para el

campo se puede decir que para minimizar este problema los pozos se deben perforar perpendicular a la dirección del Máximo Esfuerzo Horizontal Azimut N25E como lo muestra la Figura 12 y orientar el cañoneo en dirección al Máximo Esfuerzo Principal ilustrado en la Figura 13.

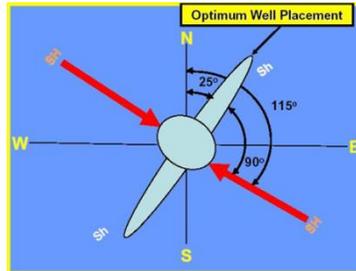


Figura 12. Azimut óptimo para ubicación de pozos en La Hocha. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha

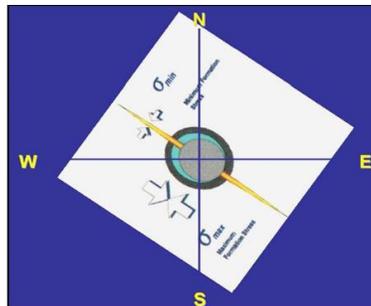


Figura 13. Óptima orientación de los cañones. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha

La producción de arena en La Hocha es un proceso “sensible” ya que al producir los pozos a altas tasas se produce arena de formación en grandes cantidades y si por el contrario se produce a bajas tasas es probable que la explotación de los pozos deje de ser económicamente rentable. Aplicando este modelo al pozo La Hocha 2 se puede ver en las Figuras 14 y 15 que la producción de arena y la tasa de producción de fluidos están directamente relacionados con el diferencial de presión aplicado al yacimiento.

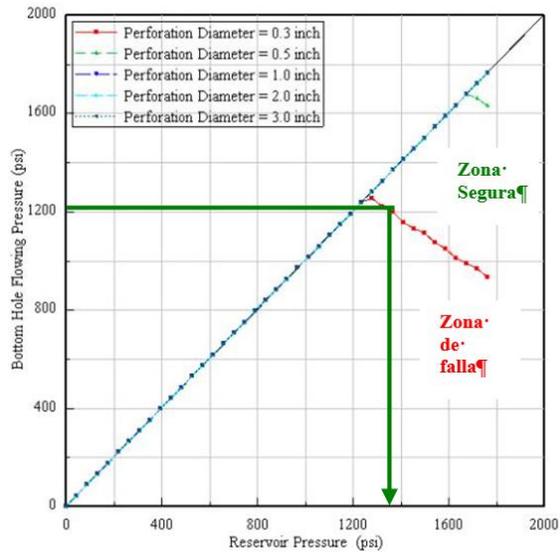


Figura 14. Presión de Fondo Fluyente vs Presión de Yacimiento. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha

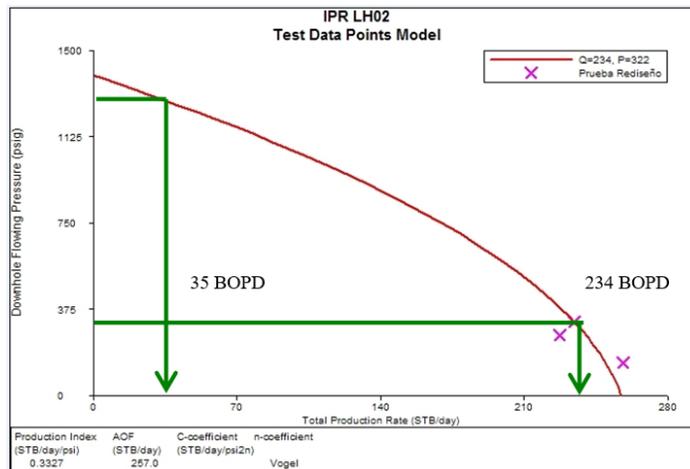


Figura 15. Curva IPR del pozo La Hocha 2. Fuente: Bombas PCP de Precarga para Manejo de Arena en el Campo La Hocha

Durante la producción de fluidos, la fuerza de arrastre es causante de la producción de arena cuando sus valores son más altos que la resistencia mecánica de la roca, la producción de altas tasas de fluido ocasionan altas velocidades de flujo que vencen la resistencia de los granos.

Adicionalmente a medida que los yacimientos “Envejecen o Maduran” aparecen otros factores como el depletamiento ya que la caída en la presión de poro hace

que los granos se desprendan fácilmente y migren hacia las zonas de menor presión y el incremento en el corte de agua que se disuelve la matriz cementante de la roca y favorece la producción de arena.

Los principales problemas asociados a la producción de arena que redundan en alto costo operacional están representados en:

- Incrementan los costos en las facilidades de producción por mantenimiento de equipos.
- Dificultades en el tratamiento para colocar el crudo en especificaciones de venta.
- Incrementan los costos debido reposición de equipos como bombas de subsuelo, varillas, tuberías y válvulas de cabezales.
- Reducción en la producción del pozo por alta frecuencia de intervenciones para limpieza.
- Problemas de daño de la formación lo que lleva a incrementar los trabajos de workover.
- Socavaciones y derrumbes que pueden conllevar al colapso del revestimiento y pérdida del pozo.
- Tratamiento de residuos sólidos aceitosos.

Los anteriores problemas se pueden afrontar de cuatro formas principales a saber:

1. Disminución de las fuerzas de arrastre: Bajando las tasas de producción y por ende las velocidades de flujo, se hace teniendo en cuenta la velocidad crítica, considerando el aumento en la densidad de cañoneo para tener mayor área de flujo.

2. Métodos mecánicos: Consiste en colocar barreras que bloquean el paso de la arena y permiten el flujo de fluidos hacia el pozo; dentro de los principales podemos mencionar:
 - Tubería ranurada (liner ranurado): Se colocan desde el completamiento y se ubican frente a la formación productora.
 - Mallas con envoltura de alambre: Son tuberías API que previamente han sido ranuradas o perforadas envueltas con una base de alambre y enrollados en espiral dejando cierta separación entre ellas para retener los granos.
 - Empaquetamientos con grava: Comúnmente utilizado en combinación con los dos anteriores, consiste en colocar un lecho de grava o apuntalante como primera barrera para retener los granos de arena de formación lejos de la tubería ranurada o las mallas, puede colocarse en hueco abierto o dentro del revestimiento según diseño.
3. Métodos químicos: Consiste en forzar productos químicos hacia la formación, como líquidos plásticos y resinas que pueden aglutinar y compactar la arena cercana al pozo.
4. Producción de arena: Se debe diseñar un modelo operacional que permita mantener los pozos en operación durante la etapa más crítica hasta lograr la estabilización del hueco, se debe tener un sistema de levantamiento que ofrezca tolerancia a la producción de arena, definir y mantener condiciones óptimas de operación para disminuir el aporte de arena y adicionalmente prepararse en superficie para separar y manejar los sólidos.

2. BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESIVAS

En todos los sistemas de fluidos, los fluidos fluyen de un lugar de mayor presión hacia otro de menor presión (diferencia de presiones). Es el caso de los fluidos que fluyen del yacimiento al pozo, lo hacen porque existe una diferencia de presión entre la presión de fondo estática (P_{ws}) y la presión de fondo fluyendo (P_{wf}). El valor de esta diferencia ($P_{ws} - P_{wf}$) hace que los fluidos se eleven hasta la superficie o que sólo alcancen cierta profundidad por debajo de la superficie (Figura 16).

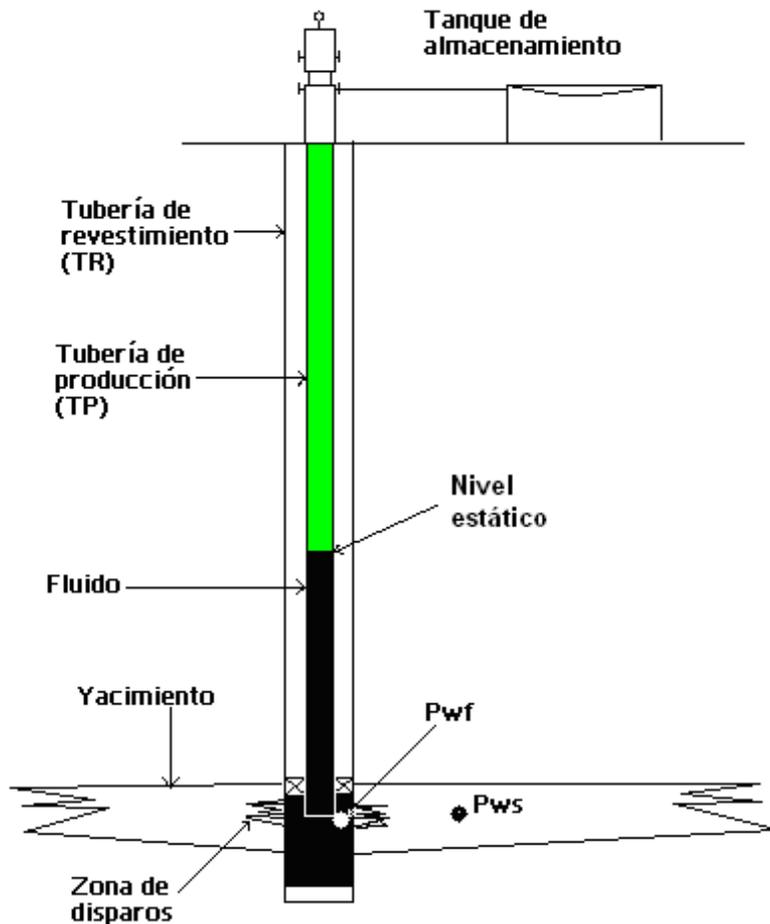
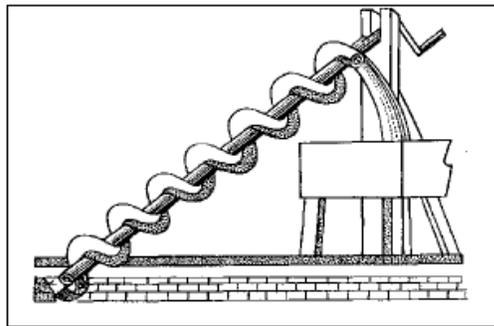


Figura 16. Representación de un pozo, donde la energía del yacimiento no es suficiente para elevar a los fluidos hasta la superficie. Fuente: Sistema de bombeo por cavidades progresivas aplicado a pozos desviados

El sistema de levantamiento artificial de Bombeo por Cavidades Progresivas (Sistema PCP) consiste en elevar los fluidos dentro del pozo hasta la superficie, incrementando su presión por medio de la bomba de cavidades progresivas.

2.1. RESEÑA HISTÓRICA

La Bomba de Cavidades Progresivas (PCP) tiene su origen en el “*tornillo sin fin*”, uno de los numerosos inventos de Arquímedes (287 a.C - 212 a.C), este invento fue originalmente utilizado como sistema para sacar agua de la sentina de los barcos y posteriormente como sistema para elevar agua, harina o grano (Figura 17).



Tornillo de Arquímedes

Figura 17. El tornillo sin fin, inventado por Arquímedes, es el principio de la PCP. Fuente: Sistema de bombeo por cavidades progresivas aplicado a pozos desviados

Tiempo después, el científico Francés René Moineau presentó, a mediados de los años 30's (del siglo XX), una tesis doctoral que contenía el principio de la bomba de cavidades progresivas.

En la década de los años 50's, la PCP fue utilizada por primera vez en la industria petrolera en la perforación de pozos direccionales como una bomba de lodos.

En los años 70's, algunos operadores de Canadá, de yacimientos con petróleos viscosos y alto contenido de arena, comenzaron a experimentar con bombas de

cavidades progresivas. Muy pronto, las fábricas comenzaron con importantes avances en términos de capacidad, presión de trabajo y tipos de elastómeros.

Algunos de los avances logrados y que en la actualidad juegan un papel importante, han extendido su rango de aplicación que incluyen:

- Producción de petróleos pesados y bitúmenes (< 18°API) con cortes de arena hasta un 50 %.
- Producción de crudos medios (18-30 ° API) con limitaciones en el % de SH2.
- Petróleos livianos (>30° API) con limitaciones en aromáticos.
- Producción de pozos con altos % de agua y altas producciones brutas, asociadas a proyectos avanzados de recuperación secundaria (por inyección de agua).

En los últimos años, el Sistema PCP se ha estado desarrollando de manera gradual al punto de ser uno de los sistemas de bajo mantenimiento y alta eficiencia en aplicaciones con aceites pesados. Es difícil saber cuántos pozos están operando actualmente con este sistema a nivel mundial; una aproximación es de 60,000 unidades. Lo cierto es que su aplicación, así como la experiencia en su utilización, es cada vez mayor.

2.2. GENERALIDADES

2.2.1. Ventajas

Los sistemas PCP tienen algunas características únicas que los hacen ventajosos con respecto a otros métodos de levantamiento artificial, una de sus cualidades más importantes es su alta eficiencia total. Típicamente se obtienen eficiencias entre 50 y 60%. Otras ventajas adicionales de los sistemas PCP son:

- Habilidad para producir fluidos altamente viscosos.

- Habilidad para producir con altas concentraciones de arena.
- Habilidad para tolerar altos porcentajes de gas libre (no se bloquea).
- Ausencia de válvulas o partes reciprocantes evitando bloqueo o desgaste de las partes móviles.
- Muy buena resistencia a la abrasión.
- Bajos costos de inversión inicial.
- Bajos costos de energía.
- Demanda constante de energía (no hay fluctuaciones en el consumo).
- Simple instalación y operación.
- Bajo mantenimiento.
- Equipos de superficie de pequeñas dimensiones.
- Bajo nivel de ruido.

2.2.2. Desventajas

Los sistemas PCP también tienen algunas desventajas en comparación con los otros métodos. La más significativa de estas limitaciones se refiere a las capacidades de desplazamiento y levantamiento de la bomba, así como la compatibilidad de los elastómeros con ciertos fluidos producidos, especialmente con el contenido de componentes aromáticos. A continuación se presentan varias de las desventajas de los sistemas PCP:

- Capacidad de desplazamiento real de hasta 2000 Bls/día o 320 m³/día (máximo de 4000 Bls/día o 640 m³/día).
- Capacidad de elevación real de hasta 6000 pies o 1850 metros (máximo de 1050 pies o 3500 metros).
- Resistencia a la temperatura de hasta 280 °F o 138 °C (máxima de 350 °F o 178 °C).

- Alta sensibilidad a los fluidos producidos (los elastómeros pueden hincharse o deteriorarse con el contacto de ciertos fluidos por periodos prolongados de tiempo).
- Opera con bajas capacidades volumétricas cuando se producen cantidades de gas libre considerables evitando una buena lubricación).
- Tendencia del estator a daño considerable cuando la bomba trabaja en seco por periodos de tiempo relativamente cortos.
- Desgaste por contacto entre las varillas de bombeo y la tubería de producción puede tornarse un problema grave en pozos direccionales y horizontales.
- La mayoría de los sistemas requieren la remoción de la tubería de producción para sustituir la bomba.
- Los sistemas están propensos a altas vibraciones en el caso de operar a altas velocidades requiriendo el uso de anclas de tubería y estabilizadores o centralizadores de varillas de bombeo.
- Poca experiencia en el diseño, instalación y operación del sistema.

Sin embargo, estas limitaciones están siendo superadas cada día con el desarrollo de nuevos productos y el mejoramiento de los materiales y diseño de los equipos.

En su aplicación correcta, los sistemas con bombas de cavidad progresiva proveen el más económico método de levantamiento artificial si se configura y opera apropiadamente.

2.3. COMPONENTES DE UN SISTEMA PCP

Las bombas de cavidades progresivas (PCP) son bombas de desplazamiento positivo la cual consiste, en un rotor de acero de forma helicoidal y un estator de elastómero sintético moldeado dentro de un tubo de acero.

El **estator** es bajado al fondo del pozo formando parte del extremo inferior de la columna de tubos de producción (tubings), mientras que el **rotor** es conectado y bajado junto a las varillas de bombeo. La rotación del rotor dentro del estator es transmitida por las varillas de bombeo, cuyo movimiento es generado en superficie por un **cabezal** (Figura 18).

La integración de los componentes es indispensable, ya que cada uno ejecuta una función esencial en el sistema para tener las condiciones de operación deseadas que permitan impulsar a la superficie el caudal de aceite requerido.

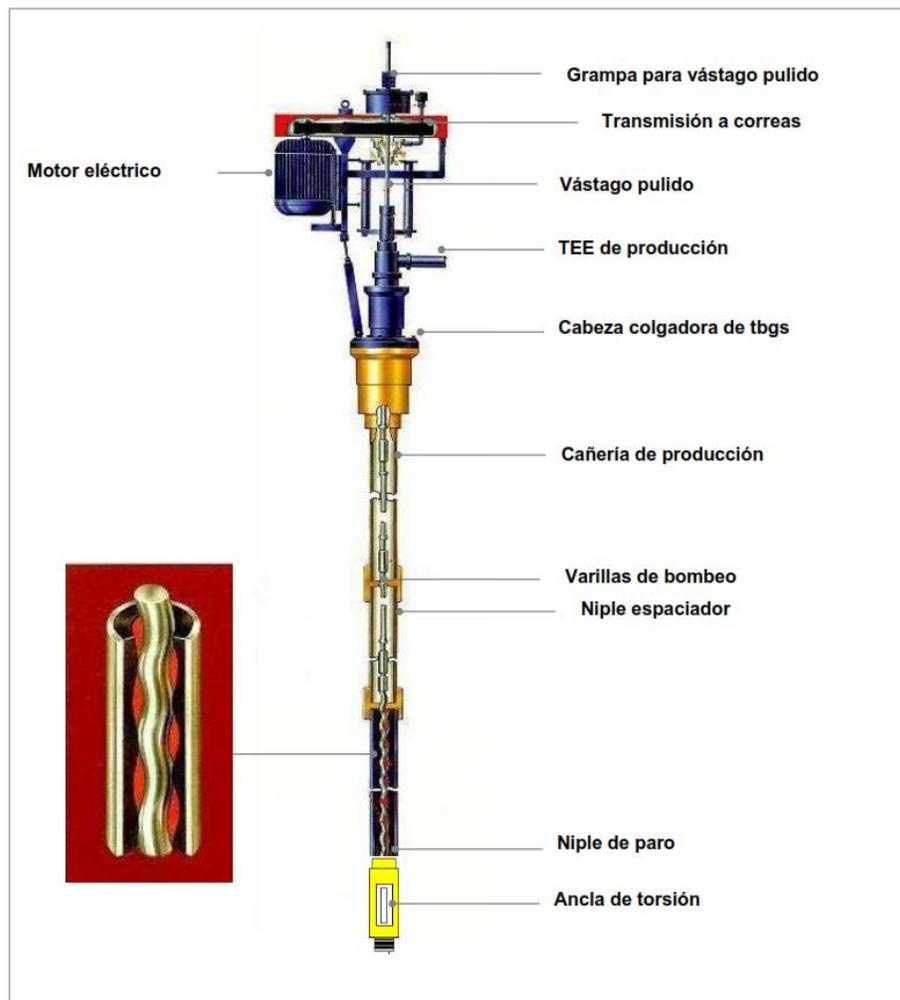


Figura 18. Instalación convencional de un Sistema PCP. Fuente: Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas.

2.3.1. Equipo de superficie

El equipo de superficie utilizado en los sistemas de levantamiento con bombas de cavidades progresivas consta de un conjunto de partes que deben estar en capacidad de:

- Suspender la sarta de varillas y soportar la carga axial del equipo de fondo.
- Entregar la energía necesaria (torque) para hacer rotar la barra lisa a la velocidad requerida y por ende dar óptimo funcionamiento al sistema de levantamiento.
- Prevenir la fuga de fluidos en superficie.

Las partes del equipo de superficie del sistema levantamiento por cavidades progresivas son las siguientes.

- Cabezal de rotación
- Sistema de transmisión
- Sistema con poleas y correas
- Motor Eléctrico
- Variador de velocidad
- Barra Lisa

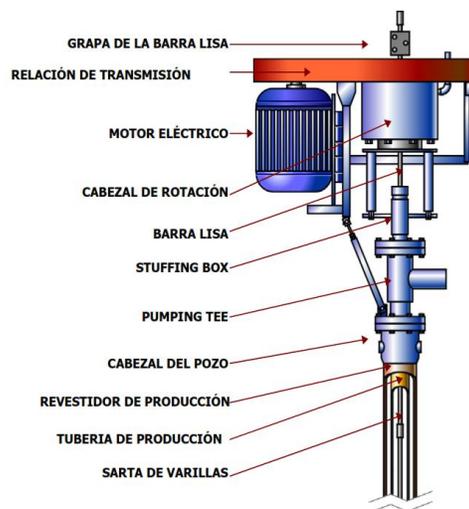


Figura 19. Equipo de superficie del sistema PCP. Fuente: Evaluación del sistema de levantamiento por cavidades progresivas para crudos pesados en los campos Teca y Nare.

2.3.2. Equipo de Fondo

2.3.2.1. Sarta de Varillas

La sarta de varillas al igual que en bombeo mecánico es la que comunica el movimiento desde la barra lisa a la parte móvil de la bomba, que en este caso es el rotor.

2.3.2.2. Bomba de cavidades progresivas

Las bombas de cavidades progresivas, son bombas de desplazamiento positivo que constan de 2 partes fundamentales rotor y estator. Al igual que en bombeo mecánico estas bombas pueden ser insertas o tipo Tubing.

2.3.2.3. Rotor

El rotor es un cuerpo construido en acero de alta resistencia torneado en forma helicoidal y recubierto por una capa fina de cromo endurecido para hacerlo más resistente a la abrasión, es maquinado con “n” lóbulos. En los casos donde estén presentes agentes corrosivos o acidificantes en alta concentración, se utiliza el acero inoxidable por su capacidad de resistencia a estos ambientes agresivos. La principal función del rotor es bombear el fluido girando de modo excéntrico dentro del estator creando cavidades que progresan en forma ascendente.

2.3.2.4. Estator

Los estatores son tubos de acero (generalmente 4140), que tienen un recubrimiento interno con material elastomérico. Dependiendo de la geometría de la bomba los elastómeros son torneados como hélices de dos o más lóbulos ($n+1$ lóbulos).

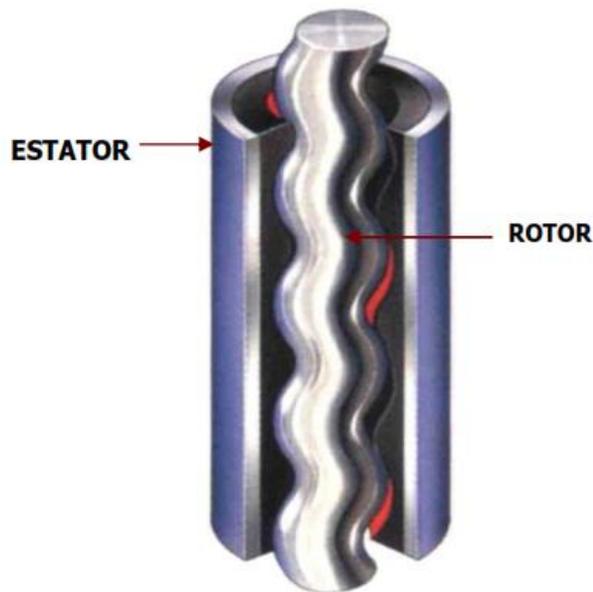


Figura 20. Partes principales de la bomba de Cavidades Progresivas. Fuente: Evaluación del sistema de levantamiento por cavidades progresivas para crudos pesados en los campos Teca y Nare.

2.3.2.5. Elastómero

Son materiales sintéticos (goma endurecida) y moldeados como hélices de dos o más lóbulos (dependiendo de la geometría), los cuales presentan en alguna medida las propiedades del caucho, en particular su elasticidad y su flexibilidad. Es necesario que los elastómeros mantengan su resistencia mecánica por largo tiempo para garantizar su efectividad en ambientes donde las variables presión, temperatura y composición química de los fluidos suele variar.

2.4. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBAY DEFINICIONES

La Bomba de Cavidades Progresivas (PCP) está compuesta por dos piezas fundamentales, el rotor y el estator. El rotor tiene la forma de un tornillo y gira dentro del estator, el cual está revestido internamente por un elastómero moldeado al doble del paso del rotor.

Cuando el rotor gira dentro del estator, se genera una serie de cavidades que se van desplazando desde el principio hasta el final de la bomba (Figura 21). Las cavidades se llenan del fluido en la succión, y lo descargan al final de la bomba con una presión mucho mayor, necesaria para poder elevar los fluidos hasta la superficie y poder vencer la contrapresión requerida en la cabeza del pozo, (Figura 2.4.).

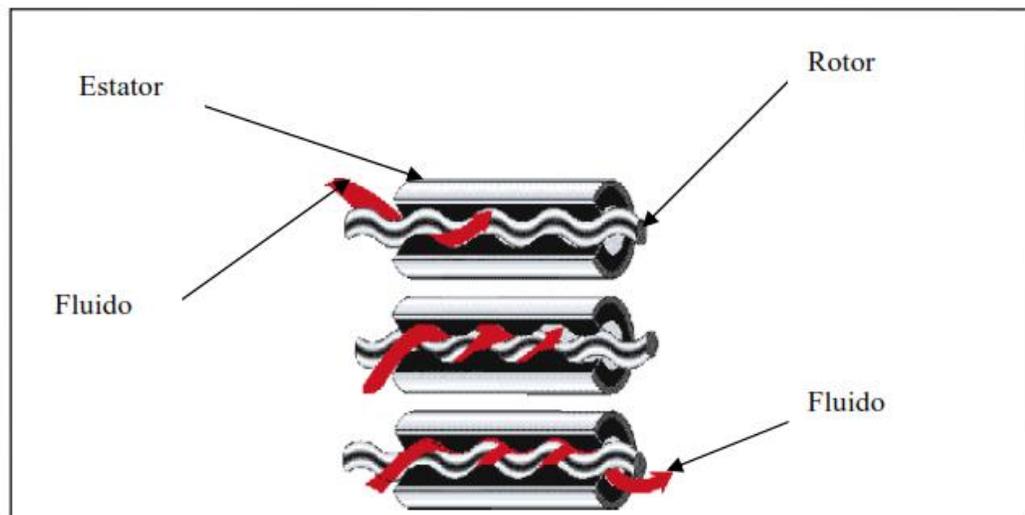


Figura 21. Principio de operación de la bomba de cavidades progresivas: El fluido es transportado en las cavidades, generadas por la rotación del rotor dentro del estator. Fuente: Sistema de bombeo por cavidades progresivas aplicado a pozos desviados

El movimiento del rotor es generado por una sarta de varillas (o por una varilla continua). La sarta de varillas transmite el movimiento rotacional al rotor desde un motor ubicado en la superficie, el cual regula la velocidad de rotación.

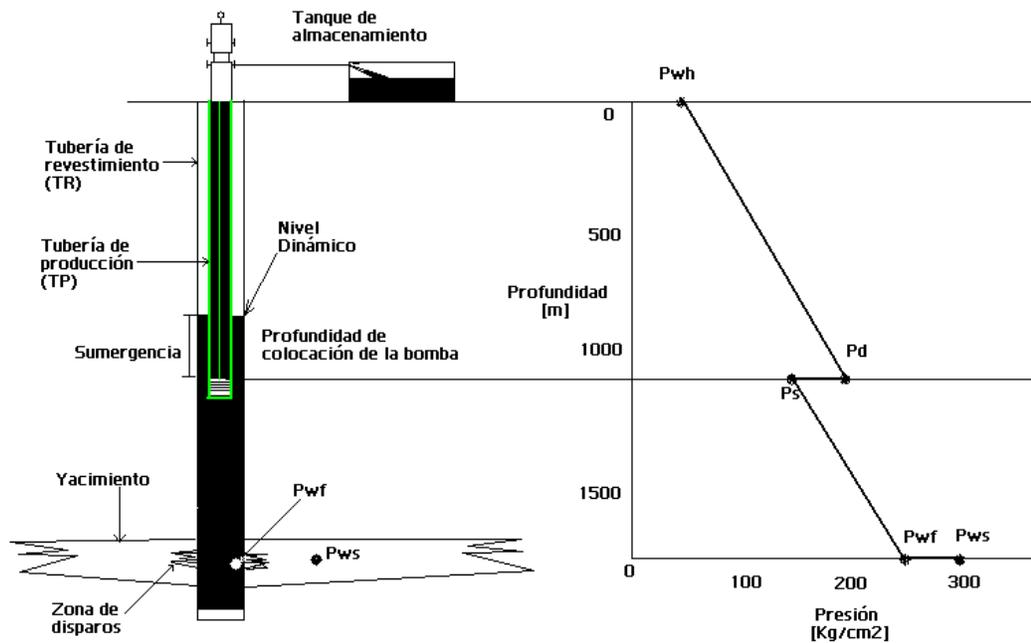


Figura 22. Gradientes de presión fluyendo en un aparato de PCP: En la presión de succión (P_s), el fluido entra a la bomba y es descargado con una presión mayor (P_d), capaz de vencer la contrapresión en la cabeza del pozo y poder llegar al tanque de almacenamiento. Fuente: Sistema de bombeo por cavidades progresivas aplicado a pozos desviados

Este tipo de bombas se caracteriza por operar a baja velocidades y permitir manejar altos volúmenes de gas, sólidos en suspensión y cortes de agua, así como también es ideal para manejar crudos de mediano y bajo Grado API.

2.4.1. Geometría

La geometría de la bomba está sujeta a la relación de lóbulos entre rotor y estator, y está definida por los siguientes parámetros:

2.4.1.1. Relación de Lóbulos

En este tipo de bombas el rotor al igual que el estator está formado por lóbulos. El estator siempre deberá tener un lóbulo más que el rotor, con el fin de permitir que se forme la cavidad.

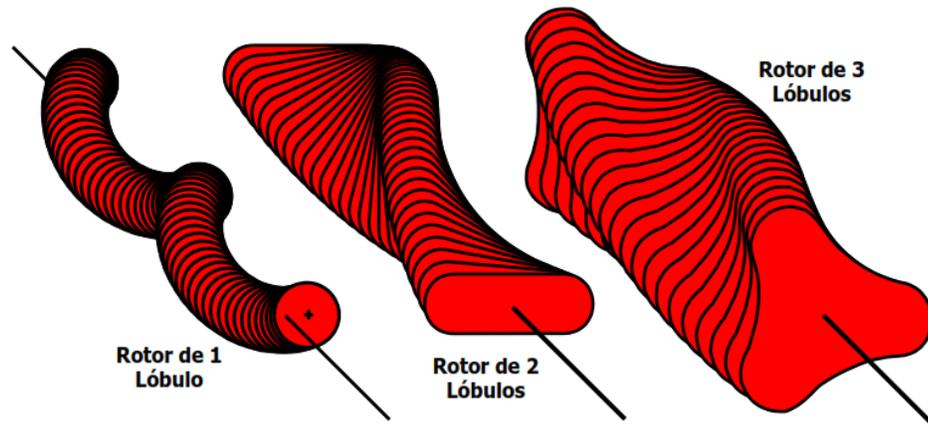


Figura 23. Formas tridimensionales de rotores helicoidales. Fuente: Evaluación del sistema de levantamiento por cavidades progresivas para crudos pesados en los campos Teca y Nare.

En la siguiente figura se esquematizan diferentes geometrías Rotor-Estator de las bombas PCP:

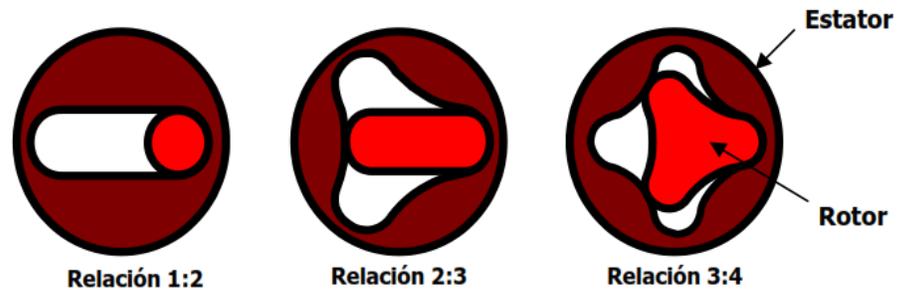


Figura 24. Geometrías en las bombas PCP. Fuente: Evaluación del sistema de levantamiento por cavidades progresivas para crudos pesados en los campos Teca y Nare.

Es importante anotar que el rotor no es concéntrico con el estator. Por tanto el movimiento del rotor dentro del estator resulta en la combinación de dos movimientos, uno la rotación alrededor de su propio eje en una dirección (en sentido de las agujas del reloj) y otro la rotación en sentido contrario de su eje longitudinal alrededor del eje del estator.

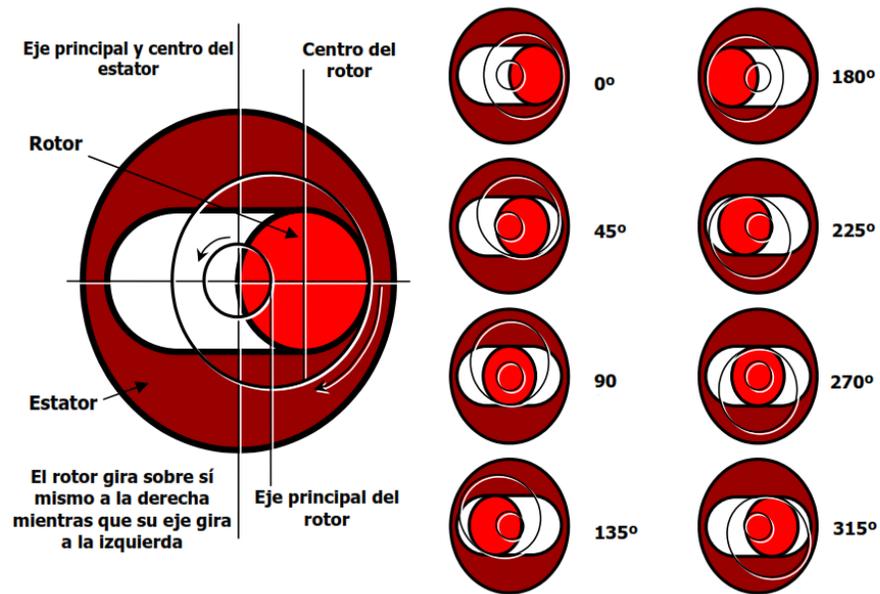


Figura 25. Movimiento del Rotor para una geometría 1:2. Fuente: Evaluación del sistema de levantamiento por cavidades progresivas para crudos pesados en los campos Teca y Nare.

2.4.1.2. Excentricidad

La excentricidad hace referencia a la distancia entre el eje central del rotor y el eje central del estator y se simboliza como **E**.

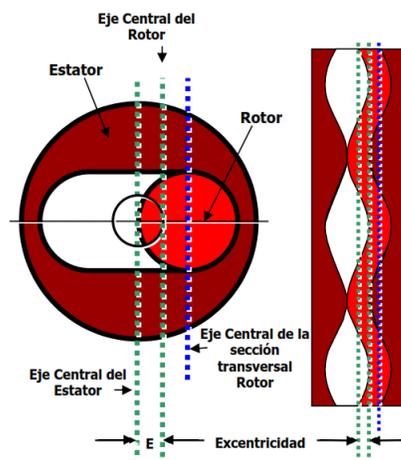


Figura 26. Excentricidad sistema Rotor-Estator. Fuente: Evaluación del sistema de levantamiento por cavidades progresivas para crudos pesados en los campos Teca y Nare.

En la geometría 1:2 el eje central en el rotor se refiere, al eje sobre el que se realiza el movimiento, no al eje central de la sección transversal. Es importante esta observación al momento de definir la excentricidad del sistema rotor-estator. Por otro lado el eje central del estator es también el eje de la sección transversal.

2.4.1.3. Paso del rotor y el estator

El “paso del rotor” está definido como la distancia lineal que separa dos crestas consecutivas del rotor separadas por 180° de rotación para el caso de las bombas con geometría 1:2.

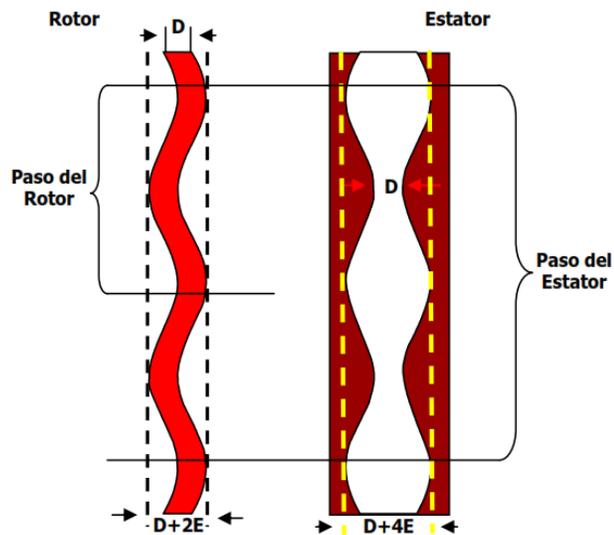


Figura 27. Paso del Rotor y del Estator. Fuente: Evaluación del sistema de levantamiento por cavidades progresivas para crudos pesados en los campos Teca y Nare.

La relación entre el paso del rotor y el paso del estator viene definida por la siguiente fórmula:

$$P_S = \frac{L_r + 1}{L_r} \times P_R \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

P_S = Paso del Estator (in o mm)

L_r = Numero de Lóbulos del rotor

P_R = Paso del Rotor (in o mm)

Para garantizar un sello total y efectivo en la bomba, la longitud de rotor que debe estar dentro del estator, debe ser al menos igual a un paso de este último.

La línea continua de contacto entre rotor-estator es llamada “Línea de Sello” y su eficiencia depende de la presión diferencial que existe entre las dos cavidades consecutivas separadas por dicha línea.

2.4.1.4. Cavidades

Las cavidades son volúmenes lenticulares, espirales y cerrados en los espacios vacíos entre el rotor y el estator. Cada cavidad se mueve en forma de espiral alrededor del eje del estator, progresando desde la entrada hacia la salida de la bomba como consecuencia de la rotación del motor.

La longitud de cada cavidad es igual a la longitud del paso del estator. Para calcular el número de cavidades (C), se utiliza la siguiente fórmula:

$$C = L_r \left(\frac{H_S}{P_R} - 1 \right) \quad (Ec.2)$$

Donde:

$H_S =$ Longitud del Estator (ft)

$L_r =$ Numero de Lóbulos del rotor

$P_R =$ Paso del Rotor (ft)

2.5. TIPOS DE BOMBAS PCP

Existen diferentes configuraciones de bombas de cavidades progresivas. Sin embargo, en el campo La Hocha utilizan principalmente bombas de precarga y bombas FATBOY, descritas a continuación:

2.5.1. Bombas de precarga

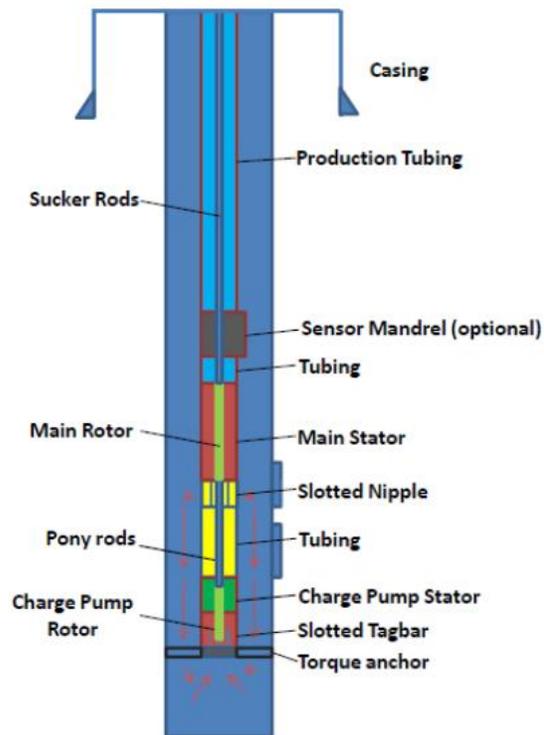


Figura 28. Configuración de una bomba de Precarga PCP. Fuente: Benefits of PCP Charge Pumps Applied To Sand Producing Reservoirs 2013

Las bombas de precarga son dos PCP separadas por una ranura de niple. La bomba de fondo es la propia bomba de carga y tiene alto desplazamiento y bajo levantamiento. La bomba superior o principal tiene bajo desplazamiento y alto levantamiento. La bomba de carga que recircula el fluido desde su desplazamiento es de tres a cuatro veces la de la bomba principal.

Al manipular la arena el primer objetivo es que entre en la bomba, con el fin de producir y evitar que se instale en la ratonera. La bomba de carga tiene un rotor de paletas que mueve el fluido en la succión de la bomba ayudando la arena entrar en la bomba. Este tipo de rotor es más largo que los tradicionales y tiene su parte inferior mecanizada de tal manera que se asemeja a una pala. Esta parte extendida gira dentro de un Tag Bar ranurada agitando el líquido y manteniendo la arena en suspensión.

Como la bomba de carga tiene tres veces la capacidad de la bomba principal, significa que no hay líquido adicional que necesite escapar, y para eso es el niple con ranuras entre las bombas. Esta recirculación de líquido aumenta la velocidad en el espacio anular casing-tubería y en el propio casing, provocando una mejor agitación, la reducción de sedimentación de arena y reduciendo también el porcentaje total de arena en caso de una slug de arena.

2.5.2. Bombas Fatboy

La tecnología “Fat Boy” tiene un área mayor de la sección transversal de la cavidad de la bomba, un ángulo de barrido del rotor más agresivo y una disminución en el ángulo del Pitch de la Bomba, permitiendo una producción superior por la mejora de la circulación de petróleo pesado y arena al tiempo que mejora la capacidad de bombear partículas grandes, tales como la pirita o residuos.

Con este tipo de modelo de bomba se requiere menor presión para llenar las cavidades de la bomba resultando en un incremento en el llenado de la cavidad, mejora el movimiento de crudo pesado y arena, además de mejorar la capacidad de bombeo de partículas grandes.

El rotor de paletas, combinado con la Tag Bar ranurada, genera una acción de mezcla en la entrada de la bomba que ayuda mantener los sólidos en suspensión, lo que permite el rotor para manejar grandes cortes de arena sin interrumpir la producción.

2.5.2.1. Características principales

- Aumento del área de la sección transversal de la cavidad de la bomba.
- Angulo de inclinación más agresivo
- Disminución de la longitud de paso

2.5.2.2. Beneficios

- Aumento de la capacidad de llenado de las cavidades
- Mejorar la circulación de aceite pesado / arena
- Longitud de la bomba más corta
- Mejora de la capacidad de bombear partículas grandes (pirita, escombros, etc.)

2.6. CONSIDERACIONES BASICAS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA PCP

El éxito del diseño de un aparejo de Bombeo por Cavidades Progresivas (PCP), depende de la buena calidad de la información utilizada, que incluye: pruebas de producción, propiedades de los fluidos producidos, estado mecánico del pozo y datos complementarios que permitan asegurar el funcionamiento confiable del sistema.

2.6.1. Pruebas de producción

Los datos del comportamiento de flujo en el yacimiento y en la tubería de producción, establecen la capacidad máxima de producción del pozo y la presión de fondo fluyendo para cualquier caudal menor que el máximo. Este

comportamiento se describe con las presiones: estática y de fondo fluyendo, medidas a una profundidad conocida y con el caudal correspondiente. Si no hay gas en el pozo, los niveles estático y dinámico del fluido son suficientes en lugar de las presiones.

Además la capacidad de flujo del pozo, obtenida de una prueba de producción, permite diseñar la bomba asegurando que el rango de caudal en el que opere se encuentre cerca de su máxima eficiencia.

El nivel estático Es el nivel de fluido que equilibra exactamente la presión de yacimiento, cuando está abierto el espacio anular (presión en la tubería de revestimiento igual a cero). Es el nivel más alto alcanzado por el fluido en el pozo. La presión ejercida por esta columna de fluido al nivel del yacimiento se llama **presión estática de fondo**.

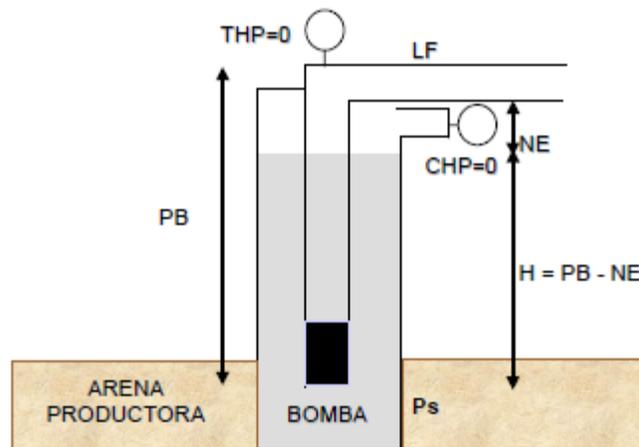


Figura 29. Esquema de un pozo en condiciones estáticas. Fuente: Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnóstico, Análisis de Falla y Trouble Shooting.

El nivel dinámico, también se conoce como el nivel de bombeo. Es el nivel de fluido que equilibra la presión cuando está abierto el espacio anular y se estabiliza cuando la producción del yacimiento es igual al caudal de la bomba. En tal caso, la presión hidrostática más la presión en la tubería de revestimiento equilibra la **presión de fondo fluyente**

Un nivel dinámico se refiere a una producción determinada, si aumenta la producción, baja el nivel, por el contrario si baja la producción, sube el nivel.

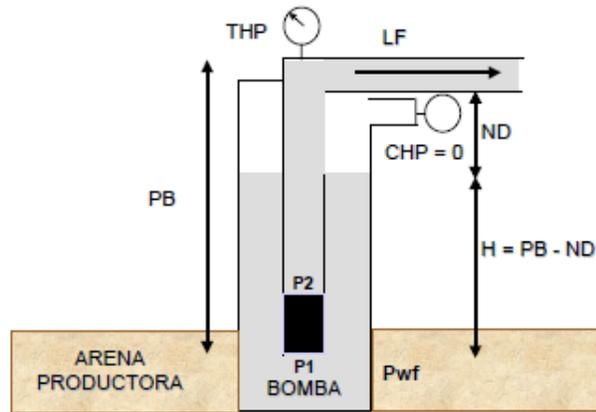


Figura 30. Esquema de un pozo en condiciones fluyentes. Fuente: Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnóstico, Análisis de Falla y Trouble Shooting.

Para el diseño apropiado de un sistema de Bombeo por Cavidades Progresivas (y cualquier otro método de levantamiento artificial), se debe conocer la capacidad del yacimiento en el área del pozo, solo el conocimiento de las presiones en el fondo del pozo (P_{wf}) y sus correspondientes tasas de producción (Q) permitirán construir una relación que refleje lo que el yacimiento es capaz de ofrecer en este punto de drenaje. De allí la importancia de establecer la relación entre la afluencia de los fluidos desde el yacimiento al pozo, las cuales son producto de fuerzas que a su vez tienen lugar al variar las presión en el yacimiento desde una presión promedio del yacimiento (P_s) a las presiones de fondo fluyente (P_{wf}). Esta relación se conoce como Índice de Productividad (IPR).

La presión de fondo fluyendo para cualquier caudal, se determina con los datos de la curva de comportamiento de flujo (IPR), calculada mediante alguna de las formas comúnmente aceptadas:

- 1) *Línea recta de índice de productividad*, utilizada cuando no hay gas presente o cuando todo el gas se encuentra en solución a la profundidad del intervalo productor. Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$IP = \frac{Q}{\Delta P} = \frac{Q}{(P_s - P_{wf})} \quad (Ec.3)$$

Donde:

IP: Índice de productividad (B/d/Psi)

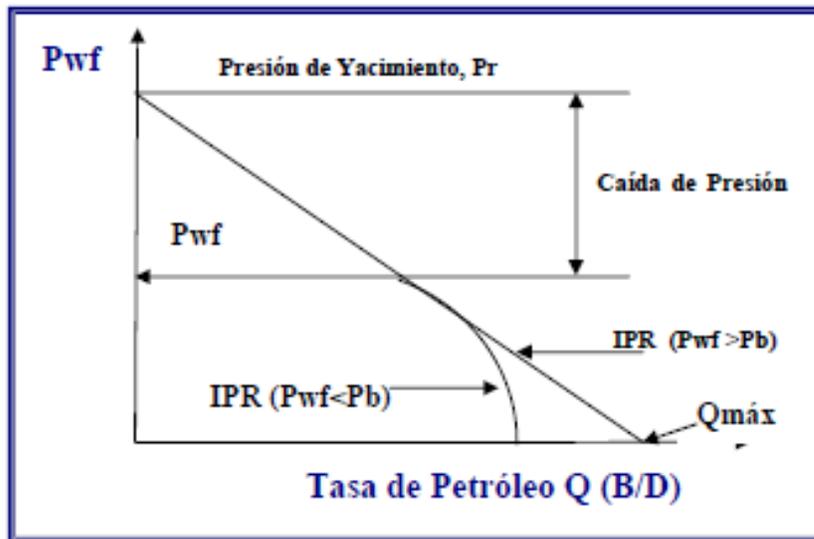
Q: Tasa de producción (B/d)

P_s: Presión estática (Psi)

P_{wf}: Presión de fondo fluyente (Psi)

- 2) *Curva de comportamiento de flujo (IPR, por sus siglas en inglés)*, utilizada cuando la presión de fondo fluyendo es inferior a la de saturación, lo que implica la presencia de gas libre en el yacimiento. La ecuación comúnmente utilizada es la ecuación de Vogel, la cual se expresa matemáticamente como:

$$\frac{Q_o}{Q_{o_{max}}} = 1 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_s} \right) - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_s} \right)^2 \quad (Ec.4)$$



Gráfica 1. Curva de comportamiento de afluencia.

La temperatura de flujo en el fondo y en la cabeza del pozo son datos necesarios, particularmente si hay gas presente. La cantidad de gas en solución y el volumen de gas libre son sensibles a la variación de temperatura y cambian continuamente durante su trayectoria por la tubería de producción.

2.6.2. Propiedades de los Fluidos producidos

En un buen diseño de un sistema PCP se deben tomar en cuenta las características de los fluidos producidos a razón de seleccionar los componentes adecuados y compatibles con ciertos elementos y a la vez que optimicen el sistema. Propiedades del crudo como la viscosidad y la densidad, corte de agua, gas libre, CO₂, H₂S, contenido de arena, presencia de aromáticos y altas temperaturas, pueden volverse parámetros críticos de los sistemas, sino se consideran sus rangos máximos de aceptación al momento de diseñar correctamente.

2.6.2.1. Viscosidad y densidad del aceite

La viscosidad tiene una relación importante con la fricción dentro de la bomba e influye en forma directa en su volumen y requisitos de potencia para una presión dada de descarga.

La capacidad de bombeo por revolución se incrementa cuando aumenta la viscosidad, y se reduce cuando sube la presión. Hay que tener en cuenta que cuando las bombas de cavidades progresivas funcionan con líquidos muy viscosos, tienen capacidad casi ilimitada para aumentar la presión.

Las pérdidas de presión por fricción ocasionadas por la viscosidad, son causadas por la fricción interna del fluido.

En cuanto a las pérdidas de presión, ocasionadas por la alta viscosidad y densidad del aceite, las mismas se traducen en una presión diferencial adicional a la presión hidrostática, alcanzando, en muchos casos, rangos excesivos de levantamiento neto que afectan principalmente la presión de descarga de la bomba, y en consecuencia, la presión diferencial a través de la misma. Por otra parte, esta presión adicional tiene su efecto sobre el torque requerido por el sistema así como también sobre la potencia total.

Para el diseño, se debe tener especial cuidado en si el fluido es newtoniano o no newtoniano. Aunque la viscosidad puede estar dentro de límites razonables de bombeo cuando circula el líquido, en algunos sistemas que manejan líquidos no newtonianos puede haber problemas para el arranque y el paro.

2.6.2.2. Gas libre asociado al petróleo

La bomba de cavidad progresiva tiene la habilidad para tolerar altos porcentajes de gas libre; sin embargo, cuando la bomba opera por largos periodos de tiempo con altos contenidos de gas libre, se acelera el proceso de desgaste del

elastómero, debido a que no hay suficiente capacidad de disipación del calor generado por la fricción entre el rotor y el estator.

La bomba se comporta a su más alta eficiencia cuando se bombean únicamente líquidos y aunque puede bombear gas libre, su presencia en exceso es causa de una operación ineficiente.

Si la producción del pozo tiene gas asociado, entonces entre el nivel dinámico del fluido y el fondo, existe un rango de combinaciones de líquido y gas con diferentes densidades, mismas que influyen significativamente sobre la capacidad requerida para la bomba y su profundidad de colocación.

Una gran cantidad de gas libre y en solución tiene efectos benéficos ya que disminuye el peso de la columna hidráulica en la tubería de producción y reduce la demanda de potencia al motor, pero la bomba necesita manejar un caudal mayor para compensar los requerimientos de crudo en la superficie.

2.6.2.3. Presencia de arena

Con un diseño y operaciones apropiadas el sistema de PCP puede producir moderadas a altas concentraciones de arena. Sin embargo, al producirse flujos rápidos de arena por periodos cortos de tiempo (tapones), pueden ocasionarse problemas de obstrucción y bloqueo del sistema.

La acumulación de arena debajo de la bomba y en la tubería de producción es un problema corriente. Se debe o bien a paradas de producción o bien a una velocidad de ascenso del fluido bombeado insuficiente con respecto a la velocidad de asentamiento de la arena. Los fluidos viscosos disminuyen la velocidad de sedimentación de la arena pero, conducen a un aumento de las pérdidas de presión por fricción.

Los problemas de asentamiento, tanto por encima como por debajo de la bomba, son más frecuentes en pozos direccionales u horizontales. La habilidad de un

fluido para transportar la arena mejora cuando su viscosidad y velocidad aumentan.

El diseño inicial del sistema debe hacerse en función de obtener la velocidad suficiente de acarreo aún en las condiciones más críticas de producción (menor producción posible), la cual debe ser mayor a la velocidad de asentamiento de la partícula con una diferencia considerable al menos de 1.6 veces, y a su vez, debe evitar la acumulación de arena en la entrada y salida de la bomba.

Para minimizar la acumulación de arena, es importante tener un filtro por debajo de la bomba que sea capaz de permitir un tiempo razonable de operación antes de que la arena llegue al nivel de la bomba. Por otro lado, cualquier restricción en la entrada de la bomba puede crear tendencia a formar tapones de arena por lo que se recomienda, en el caso de pozos productores de arena, diseños de entrada de bomba de diámetro constante y que nunca signifique una restricción, por el contrario, que permita el flujo libre y directo desde el fondo hasta la bomba.

Aunque es común bombear aceite con 5 a 15% de sólidos, también se ha logrado bombear con 70% de sólidos. Las propiedades de la suspensión son las que más influyen en la velocidad de la bomba. Cuanto mayor sea el contenido de sólidos, más potencia se requiere y menor será la velocidad. Sin embargo, la descarga por revolución del motor es constante con cualquier material.

La abrasividad de la suspensión influye en la velocidad de la bomba y se tiene menor capacidad con materiales muy abrasivos. Se debe esperar más mantenimiento de la bomba conforme incrementa la cantidad de sólidos en suspensión.

El principio de operación de la bomba de cavidad progresiva, permite arrastrar las partículas sólidas a través de las cavidades sin ningún problema; sin embargo, cuando las partículas sólidas son muy pequeñas o las líneas de sello entre el rotor y el estator no están sellando correctamente, las partículas sólidas se meten entre

el rotor y el estator, provocando un rozamiento que termina desgastando las partes internas de la bomba.

La arena también influye en el desgaste entre las varillas y la tubería de producción, principalmente en pozos direccionales y horizontales. Cuando las varillas están en constante rozamiento con la tubería de producción, a causa de la desviación del pozo, la presencia de arena en el flujo de aceite provoca un desgaste extra a causa de la severa abrasión que esta provoca con los materiales en contacto.

La PCP puede bombear fluidos cargados de arena; sin embargo, hay que tomar una serie de precauciones:

- Evitar los amontonamientos de arena en la admisión, protegiendo los orificios de admisión de la bomba.
- Asegurarse de que al momento de parar la bomba no se sedimenta la arena en la tubería de producción (riesgo de dificultad en el arranque).
- En presencia de arena, las bombas se pueden equipar con rotores recubiertos con un importante espesor de cromo y un elastómero muy elástico.

2.6.2.4. Presencia de CO₂ y H₂S

El CO₂ y el H₂S causan corrosión en las varillas y en la tubería de producción así como extensión de la vulcanización del elastómero, lo que provoca endurecimiento y eventual ruptura del mismo. Es práctica común utilizar inhibidores de corrosión para mitigar la corrosión.

Los elastómeros fabricados con nitrilo hidrogenado (HNBR) presentan una mayor resistencia a los hidrocarburos, al H₂S y a los inhibidores de corrosión.

Existen varillas fabricadas con materiales especiales capaces de mitigar el efecto corrosivo del CO₂. De acuerdo a las especificaciones API, la varilla grado D es la que resiste mejor los efectos corrosivos del CO₂. Los materiales con que se fabrica este tipo de varilla son una aleación de acero de níquel cromo y molibdeno. La implementación de una varilla más resistente a la corrosión involucra un costo superior.

2.6.2.5. Presencia de aromáticos

Los componentes aromáticos del crudo (especialmente los aceites livianos), como el benceno, el xileno, y el tolueno inducen problemas de hinchamiento de los elastómeros.

En función de la combinación: densidad del crudo / porcentaje de aromáticos, se eligen los elastómeros mejor adaptados (a función nitrilo) y se ajustan los cierres iniciales. Los fabricantes no recomiendan utilizar estatores elastoméricos, cuando existe un contenido de aromáticos (livianos) en el fluido superior al 12%. Este límite tiende a disminuir si además existe presencia de H₂S y/o temperaturas altas.

2.6.2.6. Temperatura

Se debe prestar especial atención a la temperatura a la cual se bombea el líquido del proceso, pues no debe exceder el valor máximo de diseño del fabricante de la bomba. También es necesario definir las temperaturas, máxima y mínima, esperadas en determinada aplicación para poder hacer cálculos exactos de la viscosidad y determinar la potencia requerida por la bomba.

La temperatura de flujo en el fondo y en la cabeza son datos necesarios particularmente si hay gas presente. La cantidad de gas en solución y el volumen de gas libre son sensibles a la variación de temperatura, y cambian continuamente durante su trayectoria por la tubería de producción.

La temperatura de fondo es importante para la instalación de aparejos de bombeo por cavidades progresivas, ya que los cambios de temperatura causan un comportamiento cíclico de expansión y contracción sobre el elastómero, siendo este proceso muy diferente al experimentado por el rotor. Estas diferencias en las características de expansión térmica de ambos materiales, hacen que el dimensionamiento óptimo de las partes en aplicaciones de altas temperaturas se vuelva complicado.

Las altas temperaturas afectan el espaciado del rotor, debido al efecto de expansión térmica sufrido por el material de la sarta de varillas. Si la tubería de producción está anclada, los cambios de temperatura provocarán que las varillas se elonguen en relación a la tubería. Por ejemplo, si la temperatura alcanza 212°F causará que una sarta de unos 3,000 pies se expanda alrededor de 3 pies más. En general, la PCP cuya implantación en pozo no excede los 2000m, funciona a temperaturas inferiores a 110°C. No obstante, existen propuestas de elastómeros para soportar temperaturas de 160°C.

2.6.3. Estado mecánico del pozo

Las dimensiones físicas del pozo son datos importantes que deben ser considerados para la selección de los componentes del Sistema PCP, sobre todo por las posibles limitaciones dimensionales que ello signifique.

La profundidad del pozo y de la zona de disparos, son datos importantes para diseñar la profundidad de asentamiento de la bomba. En lo que respecta a los diámetros de la tubería de producción y de revestimiento, estos deben de ser conocidos para diseñar las dimensiones de la bomba. Por otra parte, el espacio anular entre el estator y la tubería de revestimiento debe permitir el paso de eventuales herramientas de pesca o medición, así como la instalación de modelos específicos de separadores de gas.

2.6.4. Selección de la bomba

Para la selección de una bomba de cavidades progresivas se deben tener en cuenta ciertas variables que restringirán dicha selección. Entre ellas podemos nombrar:

- ✓ Caudal a extraer
- ✓ Profundidad de la bomba
- ✓ Diámetro del casing
- ✓ Tipo de fluido

La combinación de estas determinara:

- ✓ Geometría de la bomba (“singlelobe”, “multilobe”)
- ✓ Número de etapas
- ✓ Diámetro del tubing y varillas de bombeo
- ✓ Tipo de elastómero (Contenido de acrilonitrilo, Hidrogenadas, Biton, etc.)

2.6.5. Parámetros de Diseño

La capacidad de desplazamiento y de levantamiento de la bomba son los criterios más importantes, en la selección de la bomba. Sin embargo, previo a la selección de estos parámetros, es necesario conocer las condiciones de producción, las cuales se obtienen de la experiencia de los pozos vecinos, el comportamiento de influjo IPR, y el conocimiento de las propiedades de los fluidos producidos.

El desplazamiento teórico lo define el tamaño y la velocidad de rotación de la bomba. La capacidad de levantamiento es, generalmente, una carga y da el límite máximo de carga que la bomba es capaz de levantar. Cuando se diseña una PCP el cálculo de la carga dinámica total debería ser menor que la capacidad de levantamiento de la bomba.

2.6.5.1. Capacidad de desplazamiento de la bomba

El caudal teórico entregado por la bomba es función del volumen de las cavidades y de la velocidad de rotación del rotor. El caudal de aceite que entrega la bomba en la descarga es diferente al caudal de aceite que llega a la superficie esto, entre otros factores, se debe a que existe cierta cantidad de gas que se encuentra disuelto en el aceite y que se separa conforme va llegando a la superficie, a causa de las variaciones de presión y temperatura; por lo tanto, el caudal de líquido calculado en la descarga de la bomba, será menor al llegar a la superficie.

Como el área transversal para el flujo del fluido es constante en cualquier parte de la bomba, el caudal teórico Q_t en la descarga se calcula de la siguiente manera:

$$Q_t = V \times A = 4 \times E \times D_{ROT} \times n \times Ps \quad (Ec.5)$$

Donde:

Q_t = Caudal teórico entregado por la bomba

V = Velocidad del fluido en la bomba

A = Área transversal de la cavidad

E = Exentricidad existente entre el centro del estator y el centro del rotor

D_{ROT} = Diámetro del rotor

n = Número de revoluciones

Ps = Paso del estator

Debido a las altas concentraciones presentes en el campo La Hocha, los diseños del desplazamiento de la bomba se realizan con base a la velocidad crítica de la arena presente en el fluido, por lo cual el caudal crítico o mínimo es:

$$Q_{mínimo} = V_c \times A \quad (Ec.6)$$

Donde

$Q_{mínimo}$ = Caudal mínimo que debe manejar la bomba

V_c = Velocidad Crítica de la arena dentro de la bomba

$A = \text{Área transversal de la tubería}$

Nota: El caudal teórico de la bomba se obtiene de la gráfica de eficiencia y presión de descarga del fabricante en conjunto con la velocidad de operación de la bomba.

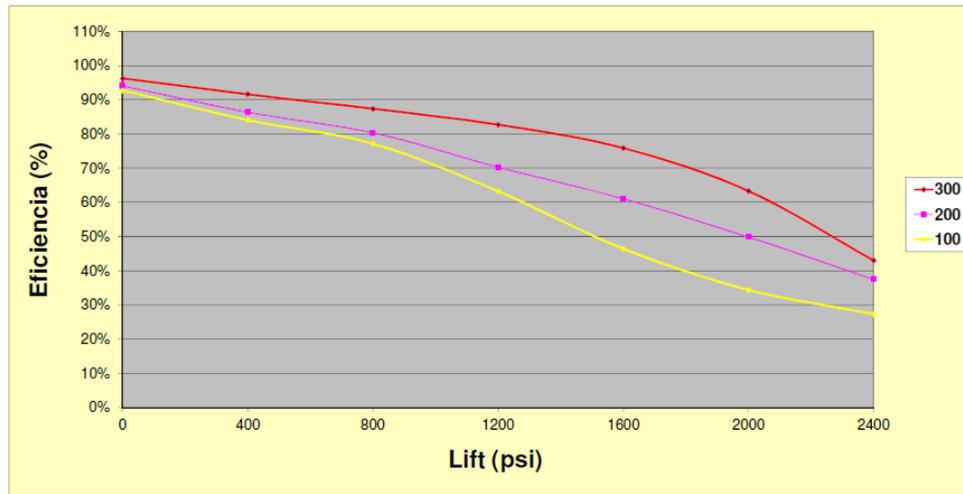


Figura 31. Efecto de la velocidad de operación sobre la eficiencia volumétrica de la bomba

2.6.5.2. Capacidad de levantamiento de la bomba

El primer parámetro a tomar en cuenta en la capacidad de levantamiento es el levantamiento neto requerido por el sistema para una determinada condición de producción. El levantamiento neto es definido como la diferencia entre la presión de entrada y la presión de descarga de la bomba, es decir:

$$\Delta P_{neto} = P_{descarga} - P_{entrada} \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

$\Delta P_{neto} = \text{Levantamiento neto requerido (psi)}$

$P_{descarga} = \text{Presión de descarga de la bomba (psi)}$

$P_{entrada} = \text{Presión de entrada de la bomba (psi)}$

La presión de entrada de la bomba es función de la energía de aporte del yacimiento (IPR) reflejadas por las medidas de nivel del fluido y las presiones en el espacio anular. Así, la presión de entrada pudiera calcularse como una función aditiva de la presión del revestidor en la superficie, la presión equivalente de la columna hidrostática del líquido. En el caso de existir componentes adicionales en el sistema de pérdidas de presión ocurridas por el flujo a través de estos elementos deben sustraerse. Un estimado de la presión de entrada puede definirse como:

$$P_{Entrada} = P_{Csg} + P_{fluido} - P_{Aux} \quad (Ec.8)$$

Donde:

$P_{Entrada}$ = Presión de entrada a la bomba (psi)

P_{Csg} = Presión del revestidor en la superficie (psi)

P_{fluido} = Presión equivalente a la columna hidrostática del fluido (Psi)

P_{Aux} = Presión equivalente a las perdidas en equipos auxiliares

La presión de descarga de la bomba será función de los requerimientos de energía necesarios para poder fluir una cantidad determinada de fluidos a través de la sarta de tubería desde el fondo hacia la superficie. Es función de la presión de superficie, la presión equivalente de la columna hidrostática de fluidos contenidos en la tubería de producción y las pérdidas de presión debido a las restricciones del flujo. Así, las presiones de descarga puede ser calculada como:

$$P_{Descarga} = THP + P_{Fluidos} + P_{Fricción} \quad (Ec.9)$$

Donde:

$P_{Descarga}$ = Presión de descarga de la bomba (psi)

THP = Presión de superficie de la tubería de producción (psi)

$P_{Fluidos}$ = Presión equivalente de la columna hidrostática de fluidos (psi)

$P_{Fricción}$ = Perdidas de fricción en la tubería (psi)

La presión hidrostática del fluido es igual a:

$$P_{\text{Fluidos}} = C * H * \rho_m \quad (\text{Ec.10})$$

Donde:

P_{Fluidos} = Presión equivalente de la columna hidrostática de fluidos (psi)

H : Altura vertical de la columna (ft)

ρ_m : Densidad de la mezcla (lbs/ft³)

C : Constante

La densidad de la mezcla es:

$$\rho_m = \rho_o * F_o + \rho_w * F_w + \rho_s * F_s \quad (\text{Ec.11})$$

Donde:

ρ_o : Densidad del petróleo (lbs/ft³)

ρ_w : Densidad del agua (lbs/ft³)

ρ_s : Densidad de la arena (lbs/ft³)

F_o , F_w y F_s = Fracción del petróleo, agua y arena respectivamente

2.6.5.3. Pérdidas de flujo

Las pérdidas de flujo más críticas para el diseño son las que hacen referencia a las pérdidas de flujo por efecto de fricción y restricción de área entre la tubería y las varillas.

Existen diferentes métodos para calcular las pérdidas de presión por fricción. En esta ocasión se calculará por medio del patrón de flujo en la tubería, de acuerdo al número de Reynolds.

- Si $Re < 2100$ el flujo es laminar.
- Si $Re > 2100$ es flujo turbulento.

$$Re_{Anular} = \frac{C \times Q \times \rho}{\mu (D_t + D_r)} \quad (Ec.12)$$

Donde:

$Q =$ Rata de flujo (bls/dia)

$\rho =$ Densidad del fluido (lbs/ft³)

$\mu =$ Viscosidad del fluido (cp)

$D_t =$ Diámetro interior del tubing (in)

$D_r =$ Diámetro exterior de la varilla (in)

$C =$ Constante (1.478)

Si $Re < 2100$

$$P_{laminar} = \frac{C \times Q \times L \times \mu}{(D_t - D_r)^2 \times (D_t^2 - D_r^2)} \quad (Ec.13)$$

Donde:

$P_{laminar} =$ Pérdidas flujo laminar (Psi)

$L =$ Longitud de flujo (ft)

$C = 1.94 \times 10^{-5}$

Si $Re > 2100$

$$P_{turbulento} = \frac{C \times Q^{1.8} \times L \times \mu^{0.2} \times \rho^{0.8}}{(D_t - D_r)^{1.2} \times (D_t^2 - D_r^2)^{1.8}} \quad (Ec.14)$$

Donde:

$P_{turbulento} =$ Pérdidas flujo turbulento (Psi)

$C = 4.317 \times 10^{-8}$

Es muy importante aclarar, que estas ecuaciones sólo pueden ser aplicadas a fluidos newtonianos, es decir aquellos donde la viscosidad es independiente a las tasas de corte que son aplicadas sobre los mismos (la relación entre el esfuerzo y la tasa de corte es proporcional, siendo la viscosidad la constante de proporcionalidad.)

Las pérdidas de flujo representan un factor que influye altamente en el diseño del sistema PCP por lo que omitir este cálculo no es algo recomendable. En el caso de crudos livianos o con alto corte de agua las pérdidas por fricción no tendrán un efecto muy marcado debido a la baja viscosidad de estos, pero en el caso de grupos medianos a pesados con viscosidades mayores a 500 cp, las pérdidas de flujo serán más significativas a medida que aumenten la viscosidad y la densidad o se reduzca el área transversal de flujo en la tubería.

Una vez establecidos la capacidad mínima de desplazamiento y el levantamiento neto mínimo requerido, se establece, en función de estos valores, el rango de modelos de bombas que cumplan con las especificaciones de una aplicación específica. En caso que ninguna bomba cumpla con los requerimientos mínimos necesarios, habrá que aumentar la velocidad de operación deseada, disminuir los requerimientos de producción o disminuir el requerimiento de levantamiento. Además deberá tomarse en cuenta la disponibilidad y el costo de un modelo específico al momento de tomar la decisión.

3. CAPITULO 3: CONSIDERACIONES TEÓRICAS

3.1. VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO

Cuando una partícula sólida cae en un fluido viscoso, existen tres fuerzas que actúan sobre ella (ver Figura 31):

- ✓ La fuerza gravitacional (peso) que actúa hacia abajo (W).
- ✓ La fuerza de empuje o flotante (U).
- ✓ La fuerza de arrastre (F_D).

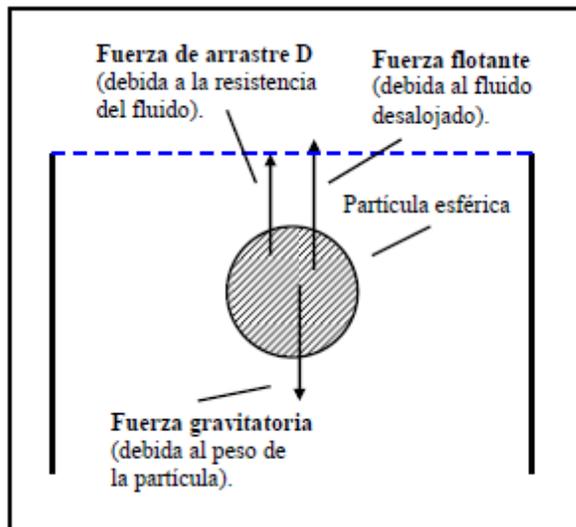


Figura 32. Fuerzas ejercidas sobre una esfera al caer en fluido viscoso. Fuente: <http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo4.pdf>

Para el sistema de la Figura 32, la ecuación de movimiento resulta:

$$W - U - F_D = m * \frac{dv}{dt} = m * a \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

m = masa de la partícula,

v = velocidad de la misma

a = aceleración.

La ecuación 15 puede reescribirse como sigue:

$$m * g - mf * g - F_D = m * \frac{dv}{dt} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde mf es la masa de fluido desalojada por la partícula.

Si las partículas son pequeñas se aceleran rápidamente hasta llegar a una velocidad constante, definida como **velocidad terminal o crítica**. Bajo estas condiciones la aceleración es nula y la ecuación 16 se transforma en:

$$m * g - mf * g - F_D = 0 \quad (\text{Ec. 17})$$

Para una esfera conocemos que su masa está dada por:

$$m = \frac{\pi}{6} * d^3 * \rho_p \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde:

ρ_p = densidad de la partícula.

d = diámetro de la partícula

La masa del fluido desplazado está dada por:

$$mf = \frac{\pi}{6} * d^3 * \rho_f \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde ρ_f es la densidad del fluido donde se mueve la partícula. Teniendo en cuenta las ecuaciones 17 a 19, la fuerza de arrastre puede escribirse como:

$$F_D = \frac{\pi}{6} * (\rho_p - \rho_f) * g * d^3 \quad (\text{Ec.20})$$

La fuerza de arrastre está relacionada con un factor de fricción, que en este caso se llama, factor de arrastre (C_D). La fuerza de arrastre en términos del coeficiente de arrastre es:

$$F_D = \frac{1}{2} * C_D * \rho_f * v^2 * A \quad (\text{Ec.21})$$

Donde A_p es el área proyectada de la partícula, en el caso de una esfera el área proyectada de la partícula está dada por el área del círculo. Igualando las expresiones 20 y 21, el C_D puede expresarse como sigue:

$$C_D = \frac{\frac{\pi}{3} (\rho_p - \rho_f) * g * d^3}{\rho_f * v^2 * A_p} \quad (\text{Ec.22})$$

Para una esfera el $A_p = \frac{\pi * d^2}{4}$, la ecuación 22 puede reescribirse como:

$$C_D = \frac{\frac{4}{3} (\rho_p - \rho_f) * g * d}{\rho_f * v^2} \quad (\text{Ec.23})$$

Entonces:

$$V = \left(\frac{4 * g * (\rho_p - \rho_f) * \frac{d}{1000}}{3 * \rho_f * C_D} \right)^{0.5} \quad (\text{Ec.24})$$

Donde:

$V = \text{Velocidad de asentamiento (m/s)}$

$d = \text{Diámetro de la partícula (mm)}$

$\rho_f = (\text{Densidad del fluido (Kg/m}^3\text{)})$

$\rho_s = (\text{Densidad de la arena (Kg/m}^3\text{)})$

$C_D = \text{Coeficiente de resistencia}$

Si se conoce el valor de factor de arrastre es posible determinar la velocidad terminal. A partir de datos experimentales se ha comprobado que el coeficiente C_d (que es un factor adimensional) es función del número de Reynolds de la partícula, el cual se define como:

$$Re = \frac{\rho_f * v * d}{\mu} \quad (\text{Ec.25})$$

Donde:

$v = \text{Velocidad de asentamiento (m/s)}$

$d = \text{Diametro de la partícula (mm)}$

$\rho_f = (\text{Densidad del fluido (Kg/m}^3\text{)})$

$\mu = (\text{Viscosidad del fluido (cp)})$

Numerosos intentos se han hecho para establecer relaciones teóricas de la velocidad de sedimentación terminal de esferas sólidas pero las expresiones teóricas son normalmente válidas para Re , basado en el diámetro de partícula, de menos de 200μ . Para una mayor Re , debe hacerse relaciones experimentales y empíricas más complejos.

3.1.1. Fuerzas de arrastre

La fuerza de arrastre, la que produce un fluido a un objeto en su seno, es una combinación de la fuerza de inercia y de la de rozamiento. Para número de Reynolds bajos, domina la de rozamiento y para altos, la de inercia. La fuerza de arrastre podemos escribirla como:

$$F_\alpha = \rho v^2 D^2 f(Re) \quad (\text{Ec.26})$$

En donde $f(Re)$ es una función del número de Reynolds.

Para objetos grandes, la fuerza inercial es la dominante, por lo tanto la fuerza de arrastre está definida como:

$$F_a = \frac{1}{2} * C_D * \rho_f * v^2 * A \quad (Ec.27).$$

Siendo:

A_p : Área de la partícula.

ρ_f : Densidad del fluido

C_D : Coeficiente de arrastre

v : Velocidad de la partícula

3.1.2. LEY DE STOKES

Para los objetos muy pequeños domina la fuerza de rozamiento. La ley de Stokes nos da dicha fuerza para una esfera:

$$F_r = 6\pi\eta vr \quad (Ec.28)$$

En donde r es el radio de la esfera.

Cuando una disolución precipita, la velocidad de sedimentación está determinada por la ley de Stokes, la cual es:

$$v = \frac{2r^2(\rho_p - \rho_f) g}{9\eta} \quad (Ec.29)$$

En donde:

r = radio de la partícula (cm)

ρ_p = densidad de la partícula (gr/cm³)

ρ_f = densidad del fluido (gr/cm³)

$g = \text{gravedad (cm/seg)}$

$\eta = \text{viscosidad dinamica (Poises)}$

$v = \text{velocidad de la partícula (cm/seg)}$

3.2. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Se llama análisis granulométrico al proceso de determinación de la proporción en que entran los distintos tamaños de granos en un suelo dado.

A dicha proporción de los diferentes tamaños de partículas se le da el nombre de gradación; por lo cual puede decirse que el análisis granulométrico es el proceso de determinación de la gradación de un suelo.

Este significado de gradación es muy diferente del que se tiene en geología, que es el de un conjunto de procesos que tienden a nivelar o aplanar la superficie terrestre. Si el proceso es destructivo, es decir, si hay tendencia a rebajar el nivel, se llama degradación; y si la tendencia es a rellenar, o sea a elevar el nivel, se llama agradación.

3.2.1. Método del Tamizado

Consiste en hacer pasar las partículas del suelo, previamente secado a la estufa y pulverizado, por una serie de mallas o tamices de tamaños de agujeros específicos. Las mallas son colocadas en serie, una encima de otra en orden descendente de tamaños de abertura de arriba hacia abajo, con una tapa encima de la superior, y en la parte inferior un recipiente de forma igual a los tamices, que en lugar de malla posee un fondo metálico.

Con sacudidas horizontales y golpes en sentido vertical, que pueden ser mecánicas o manuales, se hacen pasar las partículas por una serie de cedazos y

se pesa finalmente el suelo retenido en cada uno. Con los datos obtenidos se puede calcular la cantidad de suelo en peso que pasó por cada malla.

3.2.1.1. Sistema de numeración de mallas

Existen distintos sistemas de numeración de tamices para suelos:

- Sistema patrón americano, o U.S Estándar.
- Las normas alemanas DIN (Deustcher Industrie Normen)
- Las normas de la IMM (Institute Of Mines And Metalurgy) de los Estados Unidos
- Las normas inglesas BSS (British Standards Society)
- La serie Tyler
-

3.2.2. La Curva Granulométrica

Los resultados de los ensayos de tamizado se llevan a un gráfico llamado curva granulométrica. En él se tienen como abscisas, en la escala logarítmica el tamaño de los granos en milímetros, y en ordenadas, en escala aritmética, los porcentajes en peso de partículas de tamaño menor que cada uno de los dados de las abscisas.

Es claro que los tamaños dados son solo aproximaciones a los valores reales de las partículas; por ello reciben el nombre de diámetros equivalentes, D . Para las partículas gruesas, el diámetro equivalente es la dimensión del lado del agujero cuadrado más pequeño que deja pasar el grano. Para las partículas finas, el diámetro equivalente es el de una esfera imaginaria del mismo peso unitario que la partícula que cae a la misma velocidad que está dentro del agua. La razón de que los diámetros estén dados en escala logarítmica y no aritmética es muy sencilla: los tamaños de las partículas de suelos varían dentro de una escala muy grande

de valores, en tanto que un grano de cascajo puede tener dimensiones de varios centímetros, es decir, que una curva granulométrica con tamaños de grano en escala aritmética no alcanzaría a representar nada de utilidad.

3.2.3. Granulometría en la clasificación de los suelos

La distribución de tamaños de granos es la base única de antiguas clasificaciones de suelos. Ella tiene bastante valor para la descripción de suelos gruesos – granulares. Las clasificaciones actualmente usadas en ingeniería se basan todas, no solamente en la granulometría, sino en ensayos de laboratorio llamados límites de Atterbeg.

Clasificación de la ASTM (American Society for Testing and Materials) relativa a tamaños límites de granos del suelo

DENOMINACIÓN	TAMAÑO (mm)
Grava	76.2 a 4.76
Arena gruesa	4.76 a 2.00
Arena media	2.00 a 0.42
Arena fina	0.42 a 0.074
Limos	< 0.074

Tabla 3. Clasificación de la ASTM relativa a tamaños límites de granos del suelo

Clasificación del MIT (Massachusetts Institute of Technology) y Normas Británicas

DENOMINACIÓN	TAMAÑO (mm)
Grava	>2.00
Arena gruesa	2.00 a 0.6
Arena media	0.6 a 0.2
Arena fina	0.2 a 0.06
Limo grueso	0.06 a 0.02
Limo medio	0.02 a 0.006
Limo fino	0.006 a 0.002
Arcilla	<0.002
Coloides	<0.001

Tabla 4. Clasificación del MIT relativa tamaños límites del suelo

3.2.4. Características de las curvas granulométricas

De las curvas granulométricas se pueden obtener algunos parámetros o características que son útiles bien para conocer mejor el suelo o bien para estudios posteriores de otras características de los mismos, como lo es:

3.2.4.1. Coeficiente de uniformidad.

El coeficiente de uniformidad (C_u) es el cociente entre el D_{60} y el D_{10} ,

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (Ec.30)$$

Siendo el D_{60} y el D_{10} el diámetro o tamaño de partículas correspondiente a la curva granulométrica al 60% y 10% "que pasa". El coeficiente de uniformidad da un valor que permite conocer si el suelo está bien o mal gradado, es decir si el tamaño de las partículas es muy uniforme o por el contrario existen variedad de partículas de distintos tamaños. Si el coeficiente de uniformidad está entre 4 y 8,

puede decirse que el suelo está bien gradado. Si el valor de C_u es menor a 4 está mal gradado o que las partículas son casi toda del mismo tamaño.

4. METODOLOGIA

4.1. PROCEDIMIENTO

Los procedimientos descritos a continuación se realizaron con dos muestras de arena. La primera pertenece a un pozo del campo La Hocha, a la cual se le realizó un proceso previo de secado para retirarle la mayor cantidad de crudo. La segunda es una arena común totalmente seca.

La prueba de asentamiento se realizó en un fluido base agua, ya que al realizarse en un fluido más viscoso las velocidades críticas van a ser menores y cuando se realiza un diseño, se debe hacer con las velocidades más altas para que el diseño del sistema no sea insuficiente. . Además los fluidos base agua permiten un mayor control experimental y manejo visual de las velocidades a calcular.

4.1.1. Análisis granulométrico

4.1.1.1. *Materiales:*

- Muestra de suelo (Arena natural seca y Arena del campo La Hocha)
- Tamices certificados NTC #32 (#1", #3/4", # 1/2", #3/8", #4, #8, #10, #12, #16, #20, #30, #40, #50, #100, #140, #200).
- Balanza.
- Bandeja y espátula.
- Agitador.

4.1.1.2. Método

- Se determinó la masa de cada una de las muestras en estado seco.
- Se extendieron uniformemente en forma circular cada una de las muestras de arena en una bandeja, para luego con la espátula cuartearlas procurando obtener partes iguales. se tomaron dos cuartos opuestos.
- Las muestra se depositaron en un recipiente para luego ser colocado en una serie de tamices acoplados uno encima del otro, organizados de menor a mayor en forma ascendente, estando en la base un recipiente sin malla seguido por el tamiz #200 hasta llegar al #1.
- La serie de tamices se colocó en un agitador eléctrico por 10 minutos para que su mezcla fuera homogénea.
- Se quitaron la serie de tamices del agitador y se obtuvo el peso del material que quedo retenido en cada tamiz, luego se sumaron estos pesos y se compararon con el peso que se obtuvo inicialmente. Como el peso que se perdió fue menor a 3%, la prueba es considerada válida.
- Se calculó el porcentaje parcial retenido en cada tamiz y en el recipiente receptor.
- Se registraron los datos en la tabla 5 para ser procesados y luego graficados en la curva granulométrica.
- Se calculan los datos faltantes

Nota: Para el análisis granulométrico de la arena del campo la Hocha, se usaron los tamices por debajo de No.10 debido a que no presenta partículas sólidas de diámetro mayores a 2 mm. Para la arena común si se utilizaron toda la variedad

de tamices disponibles en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Surcolombiana.

REGISTRO DE DATOS					
Tamiz	Abertura tamiz (mm)	Peso retenido (Gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% En peso que pasa
4"	101,600				
3 1/2"	88,900				
3"	76,200				
2 1/2"	63,500				
2"	50,800				
1 1/2"	38,100				
1"	25,400				
3/4"	19,050				
1/2"	12,700				
3/8"	9,525				
4	4,760				
8	2,380				
10	2,000				
12	1,680				
16	1,190				
20	0,840				
30	0,590				
40	0,420				
50	0,297				
100	0,149				
140	0,105				
200	0,074				
			100,000%		

Tabla 5. Registro de datos de prueba granulométrica

4.1.2. Prueba de asentamiento de arena

4.1.2.1. Materiales

- Tubo de acrílico transparente de 1.80 m de altura, ID=6,7 cm (2,64 in).
- Muestra de arena (Arena seca y Arena Campo La Hocha – pozo 27).
- Flexómetro.
- Cronómetro.
- Termómetro.

4.1.2.2. Método

- El arreglo experimental se montó conforme mostramos en la figura a continuación.

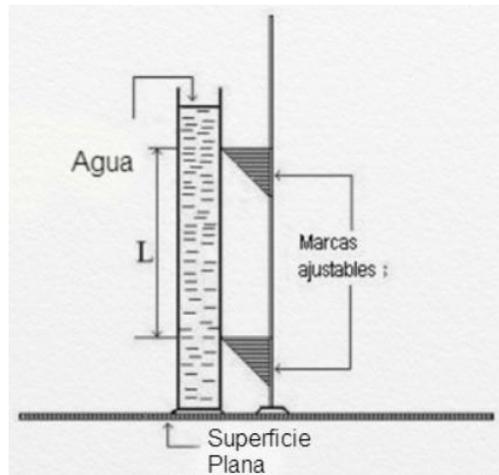


Figura 33. Configuración del experimento

- La velocidad crítica se determinó experimentalmente a partir de la distancia entre las marcas ajustables, medidas con un flexómetro, y el tiempo de recorrido entre las marcas medido con un cronómetro.
- Se separó la muestra de arena por tamaños de grano y cantidades diferentes.

- Cada muestra se arrojó a través del tubo lleno de agua y se tomó el tiempo que tardó en pasar por las medidas de referencia.
- Se repitió el procedimiento con cada una de las muestras

Nota:

- La primera marca de referencia se situó aproximadamente 30 cm debajo del nivel del agua, para con ello medir mejor los tiempos y además para que la arena no tenga aceleración y su velocidad sea constante, la segunda marca se ubicó a 20 cm de la superficie plana.
- El diámetro del tubo simula el diámetro que se utiliza en los pozos del campo La Hocha.
- Cada vez que se arrojó una nueva muestra de arena, el agua estaba limpia, es decir, sin residuos de arena.
- Se registró varias veces (mínimo 3) el tiempo en cada muestra para disminuir el porcentaje de error.

4.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

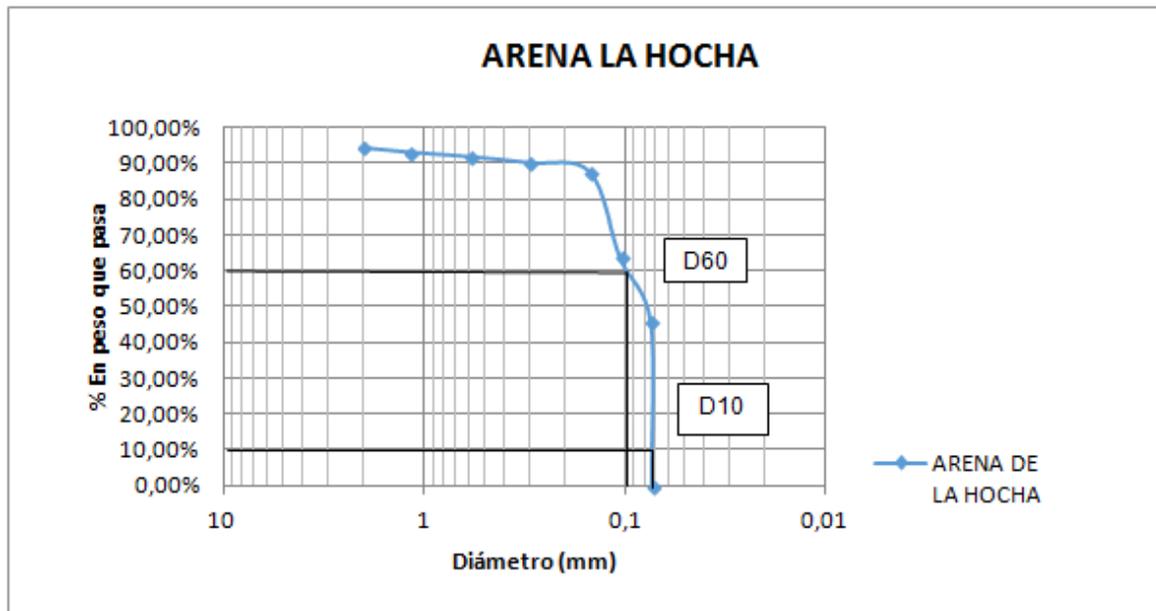
4.2.1. Análisis Granulométrico

Descripción de la muestra:

- Muestra de arena del campo La Hocha
- Cantidad analizada: 2052,3 gramos.
- Muestra con trazas de hidrocarburos
- Densidad aproximada: 2,2 gr/cm³

ARENA DE LA HOCHA					
Tamiz	Abertura tamiz (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% En peso que pasa
10	2	112,5	5,48%	5,48%	94,52%
16	1,190	24,2	1,18%	6,66%	93,34%
30	0,590	27,1	1,32%	7,98%	92,02%
50	0,297	34,5	1,68%	9,66%	90,34%
100	0,149	52,5	2,56%	12,22%	87,78%
140	0,105	490,5	23,90%	36,12%	63,88%
200	0,074	360,5	17,57%	53,69%	46,31%
Colector	<0,074	950,5	46,31%	100,00%	0,00%
Total		2052,3	100,00%		

Tabla 6. Análisis Granulométrico Arena La Hocha



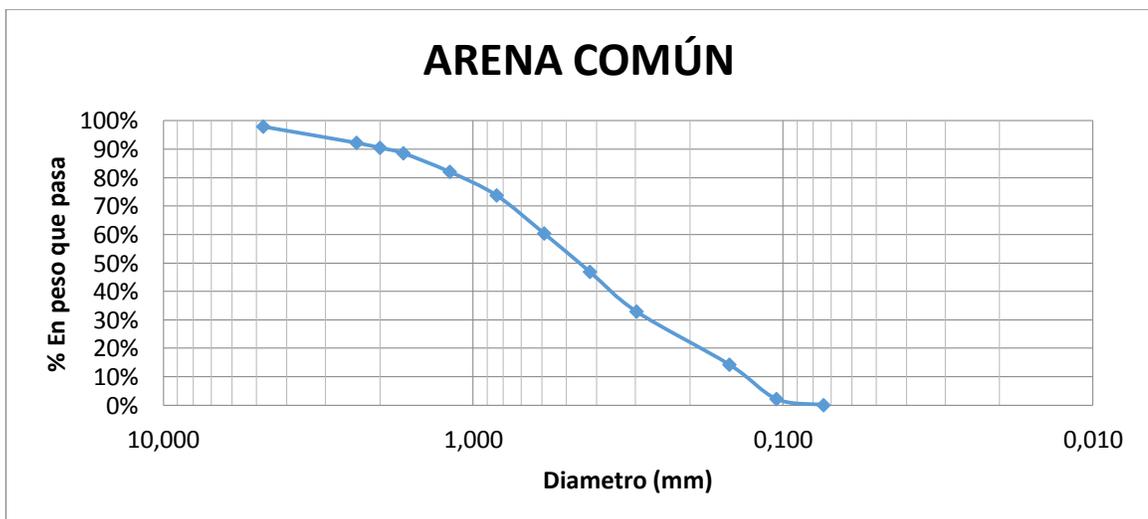
Gráfica 2. Curva granulométrica Arena de la Hocha

Descripción de la muestra:

- Muestra de arena natural
- Cantidad analizada: 2196,8 gramos
- Muestra totalmente seca.
- Densidad aproximada: 2,65 gr/cm³

ARENA COMÚN					
Tamiz	Abertura tamiz (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% En peso que pasa
4	4,760	45,2	2,1%	2,1%	97,9%
8	2,380	124,9	5,7%	7,7%	92,3%
10	2,000	38,8	1,8%	9,5%	90,5%
12	1,680	42,1	1,9%	11,4%	88,6%
16	1,190	143,3	6,5%	17,9%	82,1%
20	0,840	182,2	8,3%	26,2%	73,8%
30	0,590	294,1	13,4%	39,6%	60,4%
40	0,420	296,3	13,5%	53,1%	46,9%
50	0,297	307,2	14,0%	67,1%	32,9%
100	0,149	409,8	18,7%	85,8%	14,2%
140	0,105	265,3	12,1%	97,8%	2,2%
200	0,074	47,6	2,2%	100,0%	0,0%
		2196,8	100,0%		

Tabla 7. Análisis Granulométrico Arena Común



Gráfica 3. Curva granulométrica Arena Común

El coeficiente de uniformidad de la arena la Hocha, mediante la Ec.31 es:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0,1}{0,071} = 1,4 \quad (\text{Ec.31})$$

De acuerdo con su valor, podemos clasificar la arena como mal gradada, porque da un valor pequeño, menor a 4. En cambio el coeficiente de uniformidad de la arena común es 4,61, con el cual podemos indicar que es una arena bien gradada.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0,6}{0,13} = 4,61 \quad (\text{Ec.32})$$

Los resultados que se obtuvieron en el laboratorio muestran que la arena de Hocha (Grafica 2) es en su mayoría arena fina y limos, puesto que sus porcentajes, de acuerdo con la clasificación ASTM son 45,71% y 46,31% respectivamente, es decir el 92,02% corresponden a arenas finas y limos.

DENOMINACIÓN	TAMAÑO (mm)	Cantidad (%)
Arena Gruesa	4.76 – 2.00	5,48%
Arena Media	2.00 – 0.42	2,5%
Arena Fina	0.42 – 0.074	45,71%
Limos	<0,074	46,31

Tabla 8. Composición Granulométrica de la arena La Hocha. Clasificación ASTM

Nota: En el Anexo C se encuentra la granulometría hecha por el laboratorio Antek al campo la Hocha, en ella se dispone de mayor variedad de tamices.

La muestra de arena común, al ser una arena más gradada se observa más variedad de tamaños de granos en comparación con la arena de La Hocha (Gráfica 3). De acuerdo con la “Clasificación ASTM” de tamaños límites de granos de suelo, esta arena está clasificada de la siguiente manera:

DENOMINACIÓN	TAMAÑO (mm)	Cantidad (%)
Arena Gruesa	4.76 – 2.00	9,5%
Arena Media	2.00 – 0.42	43,6%
Arena Fina	0.42 – 0.074	44,7%
Limos	< 0.074	2,2%

Tabla 9. Composición granulométrica de arena común. Clasificación ASTM

4.2.2. Prueba de asentamiento de arena

La prueba se realizó con el fin de determinar la velocidad crítica de los sólidos en función de la concentración y el tamaño de partícula de los mismos.

La prueba se realizó en dos fases. En la primera fase se realizó la prueba con las arenas sin tamizar y para poder así analizar su comportamiento en conjunto.

Para la segunda fase se tamizaron las arenas respectivamente. Teniendo en cuenta que la arena común tiene mayor variedad de tamaños que la arena de La Hocha, se trató de tomar el mismo tamaño de las partículas presentes en la arena de La Hocha para la arena común, es decir los mismos números de tamices presentes en cada muestra. Para el cálculo de la velocidad crítica se utiliza el principio básico de movimiento de física, en el cual velocidad crítica es $v = x/t$, donde $x = distancia (m)$, la cual es la distancia que abarca las líneas de referencia, es decir 1,40 metros y $t = tiempo (seg)$, es el tiempo que tardan aproximadamente la mitad de las partículas en cruzar la línea de referencia.

Los cálculos se hicieron en el sistema inglés de unidades.

Muestra de cálculo:

- Tamiz No. 16, masa 4 gr:

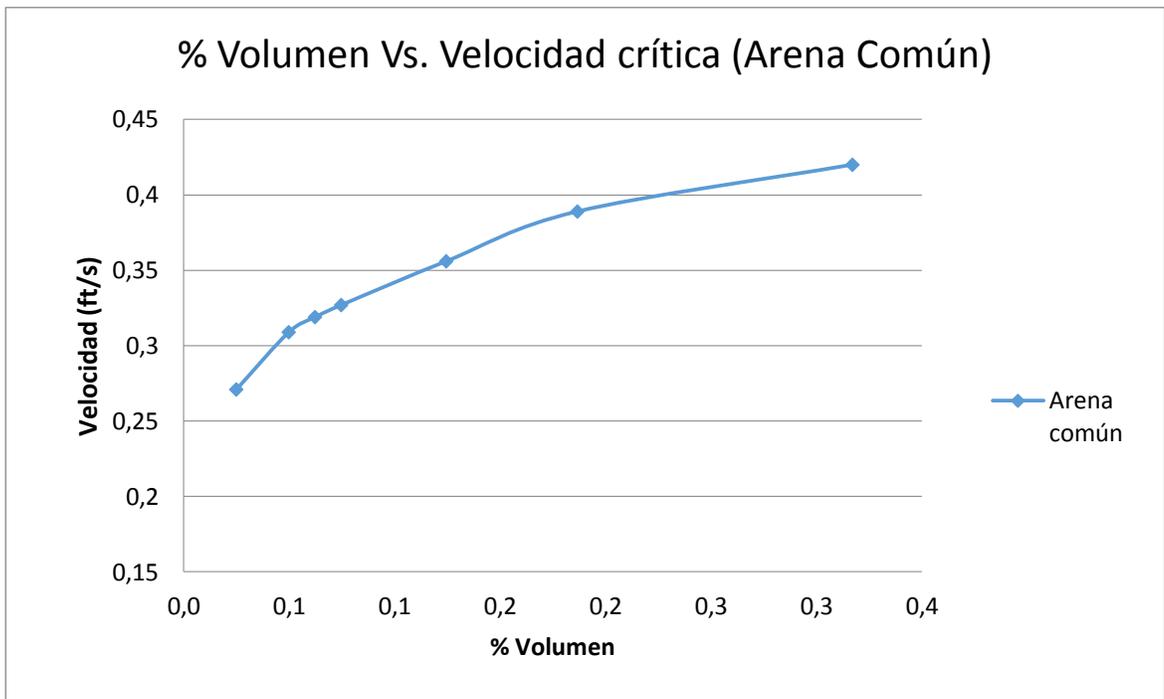
$$V_c = \frac{x}{t} = \frac{1,40 \text{ m}}{8,89 \text{ seg}} \times \frac{1 \text{ ft}}{0,3048 \text{ m}} = 0,5166 \text{ ft/seg}$$

Los resultados se presentan a continuación:

Fase 1.

ARENA COMÚN		
MASA (GR)	% VOL.	VELOCIDAD (FT/S)
4	0,0249	0,271
8	0,0498	0,309
10	0,0622	0,319
12	0,0747	0,327
20	0,1245	0,356
30	0,1867	0,389
50	0,3171	0,419

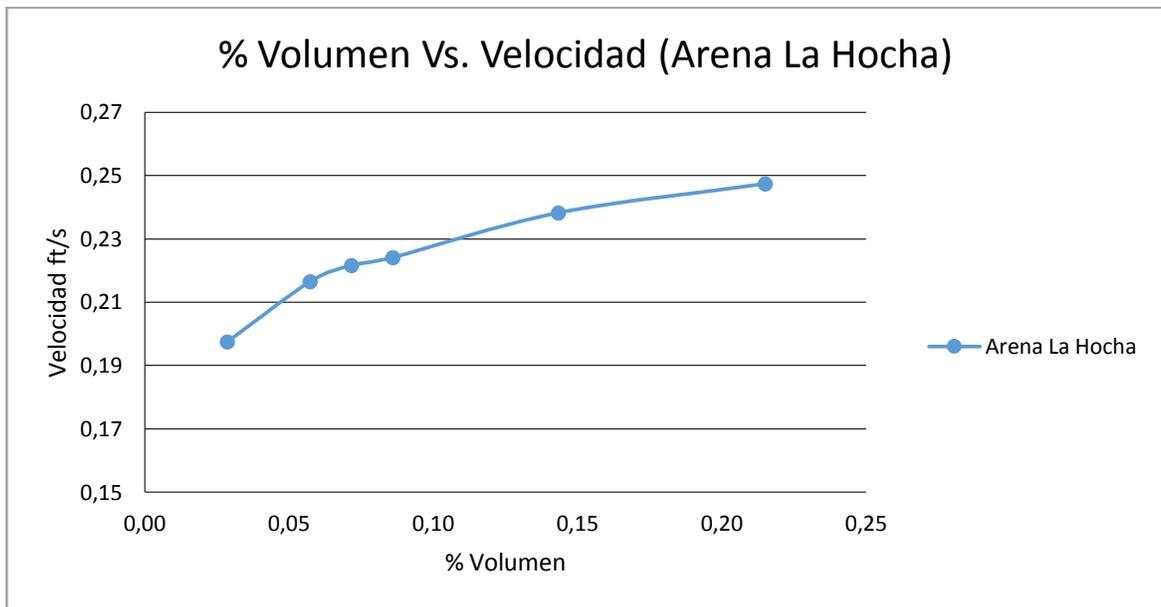
Tabla 10. Resultados prueba de asentamiento. Arena Común sin tamizar



Gráfica 4. % Volumen Vs. Velocidad Crítica. Arena Común sin tamizar

ARENA CAMPO LA HOCHA		
MASA (Gr)	% VOLUMEN	VELOCIDAD CRÍTICA (ft/seg)
4	0,0287	0,197
8	0,0574	0,216
10	0,0717	0,222
12	0,0860	0,224
20	0,1434	0,238
30	0,2151	0,247

Tabla 11. Resultados prueba de asentamiento. Arena La Hocha sin tamizar



Gráfica 5. % Volumen Vs. Velocidad Crítica. Arena La Hocha sin tamizar

Fase 2.

ARENA COMÚN							
Tamiz	Diámetro (mm)	Masa (Gr)	Tiempo Promedio (Seg)	Distancia (m)	Conc (Gr/L)	%Vol.	Velocidad (ft/seg)
No. 16	1,19	4	8,89	1,4	0,6596	0,0249	0,5166
		8	8,43	1,4	1,3192	0,0498	0,5448
		10	8,18	1,4	1,6490	0,0622	0,5615
		12	8,04	1,4	1,9789	0,0747	0,5713
		20	7,93	1,4	3,2981	0,1245	0,5795
		30	7,86	1,4	4,9471	0,1867	0,5840
		50	7,76	1,4	8,2452	0,3111	0,5920
No.30	0,59	4	13,46	1,4	0,6596	0,0249	0,3412
		8	12,43	1,4	1,3192	0,0498	0,3694
		10	11,89	1,4	1,6490	0,0622	0,3863
		12	11,65	1,4	1,9789	0,0747	0,3941
		20	11,50	1,4	3,2981	0,1245	0,3993
		30	11,42	1,4	4,9471	0,1867	0,4023
		50	11,34	1,4	8,2452	0,3111	0,4075
No. 50	0,297	4	18,44	1,4	0,6596	0,0249	0,2490
		8	16,31	1,4	1,3192	0,0498	0,2817
		10	15,58	1,4	1,6490	0,0622	0,2948
		12	14,9284	1,4	1,9789	0,0747	0,3077

		20	13,515	1,4	3,2981	0,1245	0,3399
		30	13,43	1,4	4,9471	0,1867	0,3420
No. 100	0,149	4	27,09	1,4	0,6596	0,0249	0,2276
		8	23,54	1,4	1,3192	0,0498	0,2326
		10	22,64	1,4	1,6490	0,0622	0,2367
		12	21,86	1,4	1,9789	0,0747	0,2371
		20	20,22	1,4	3,2981	0,1245	0,2430
		30	18,83	1,4	4,9471	0,1867	0,2450
		50	18,15	1,4	8,2452	0,3111	0,2530
No. 140	0,105	4	36,91	1,4	0,6596	0,0249	0,1245
		8	32,49	1,4	1,3192	0,0498	0,1414
		10	32,03	1,4	1,6490	0,0622	0,1434
		12	30,37	1,4	1,9789	0,0747	0,1513
		20	27,75	1,4	3,2981	0,1245	0,1655
No. 200	0,074	4	47,26	1,4	0,6596	0,0249	0,0972
		8	44,5	1,4	1,3192	0,0498	0,1032
		12	42,78	1,4	1,9789	0,0747	0,1074

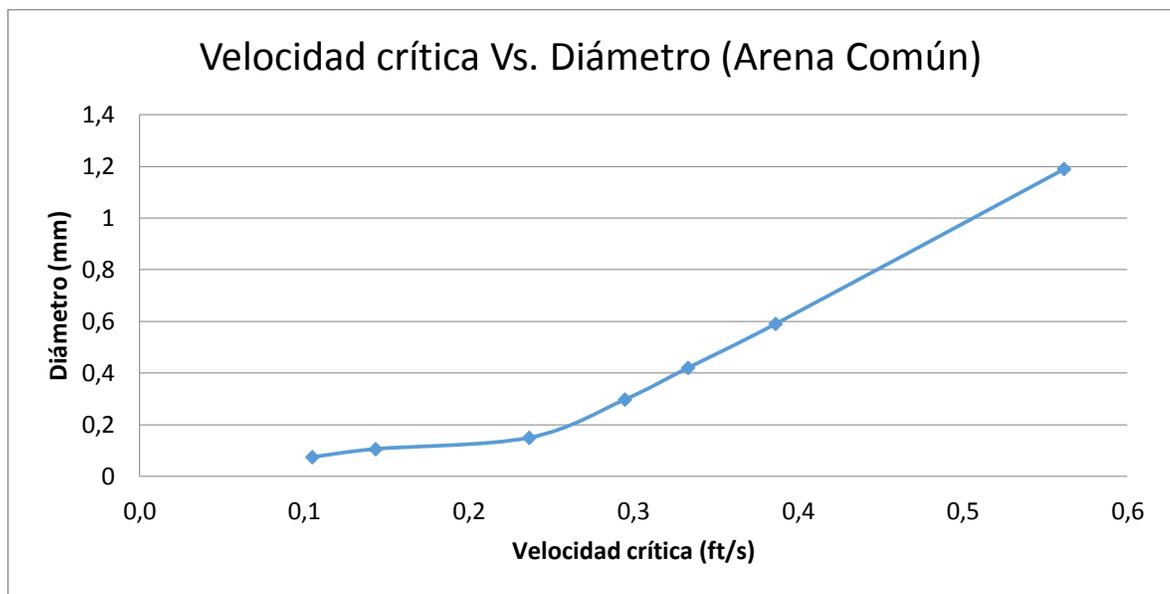
Tabla 12. Resultados prueba de asentamiento. Arena común.

ARENA DEL CAMPO LA HOCHA							
Tamiz	Diámetro (mm)	Masa (gr)	Tiempo Promedio (s)	Distancian (m)	Con (gr/L)	Concentraci ón (%)	Velocidad (ft/s)
16	1,19	4	12,88	1,4	0,6596	0,0287	0,3568
		8	11,80	1,4	1,3192	0,0574	0,3850
		12	11,45	1,4	1,9789	0,0860	0,3971
30	0,59	4	18,20	1,4	0,6596	0,0287	0,2314
		8	16,50	1,4	1,3192	0,0574	0,2524
		12	15,60	1,4	1,9789	0,0860	0,2590
50	0,297	4	35,90	1,4	0,6596	0,0287	0,1228
		8	34,65	1,4	1,3192	0,0574	0,1426
		10	33,20	1,4	1,6490	0,0717	0,1493
		12	32,50	1,4	1,9789	0,0860	0,1501
100	0,149	4	57,55	1,4	0,6596	0,0287	0,0789
		8	54,70	1,4	1,3192	0,0574	0,0860
		10	53,85	1,4	1,6490	0,0717	0,0900
		12	51,90	1,4	1,9789	0,0860	0,0901
		20	50,55	1,4	3,2981	0,1434	0,0940
140	0,105	4	70,35	1,4	0,6596	0,0287	0,0602

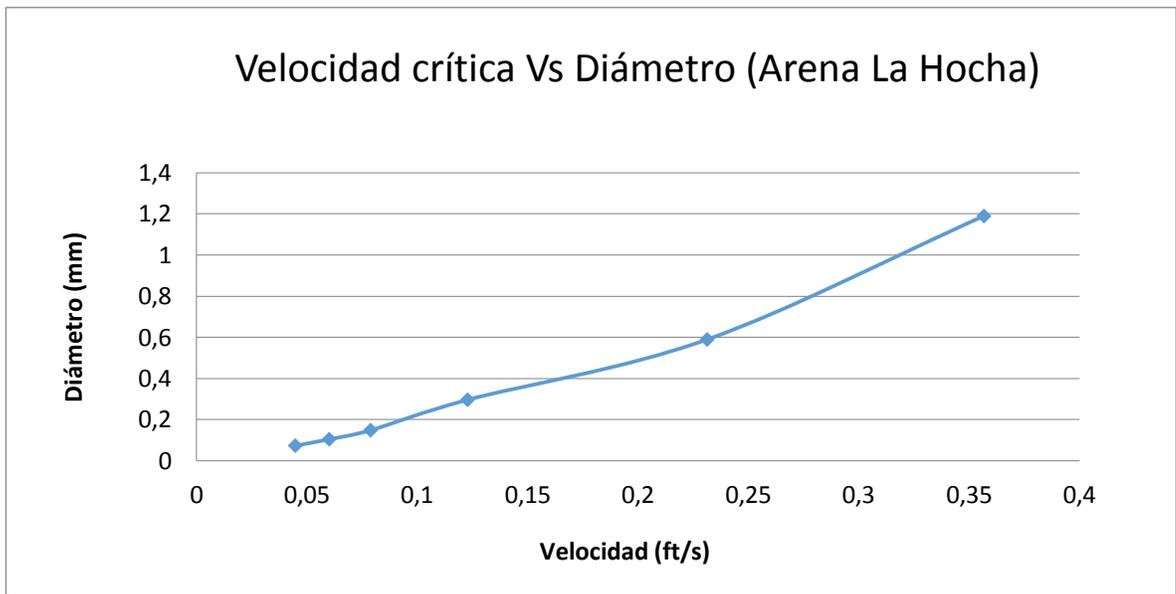
		8	66,90	1,4	1,3192	0,0574	0,0668
		10	65,15	1,4	1,6490	0,0717	0,0681
		12	64,05	1,4	1,9789	0,0860	0,0693
		20	62,95	1,4	3,2981	0,1434	0,0717
		30	62,15	1,4	4,9471	0,2151	0,0725
200	0,074	4	95,90	1,4	0,6596	0,0287	0,0448
		8	90,30	1,4	1,3192	0,0574	0,0500
		10	89,15	1,4	1,6490	0,0717	0,0515
		12	88,05	1,4	1,9789	0,0860	0,0532
		20	86,60	1,4	3,2981	0,1434	0,0539
		30	86,20	1,4	4,9471	0,2151	0,0540

Tabla 13. Resultados prueba de asentamiento. Arena La Hocha

4.2.2.1. Velocidad Crítica Vs. Diámetro

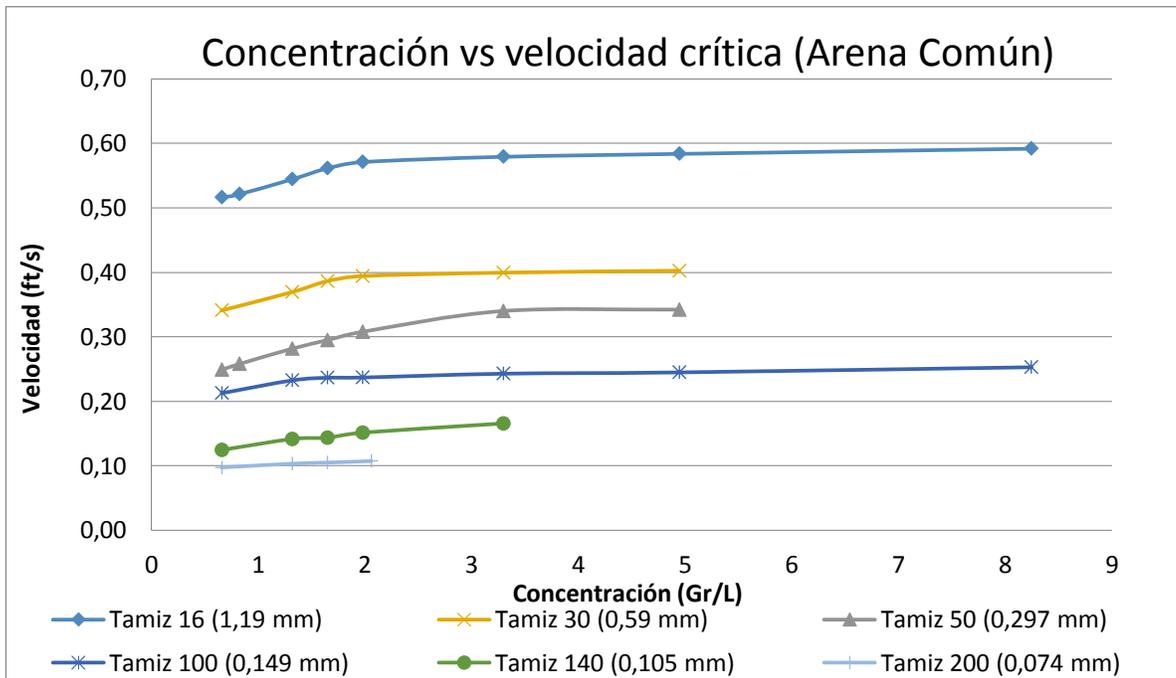


Gráfica 6. Gráfica de Velocidad Crítica Vs. Diámetro de partículas. Arena Común

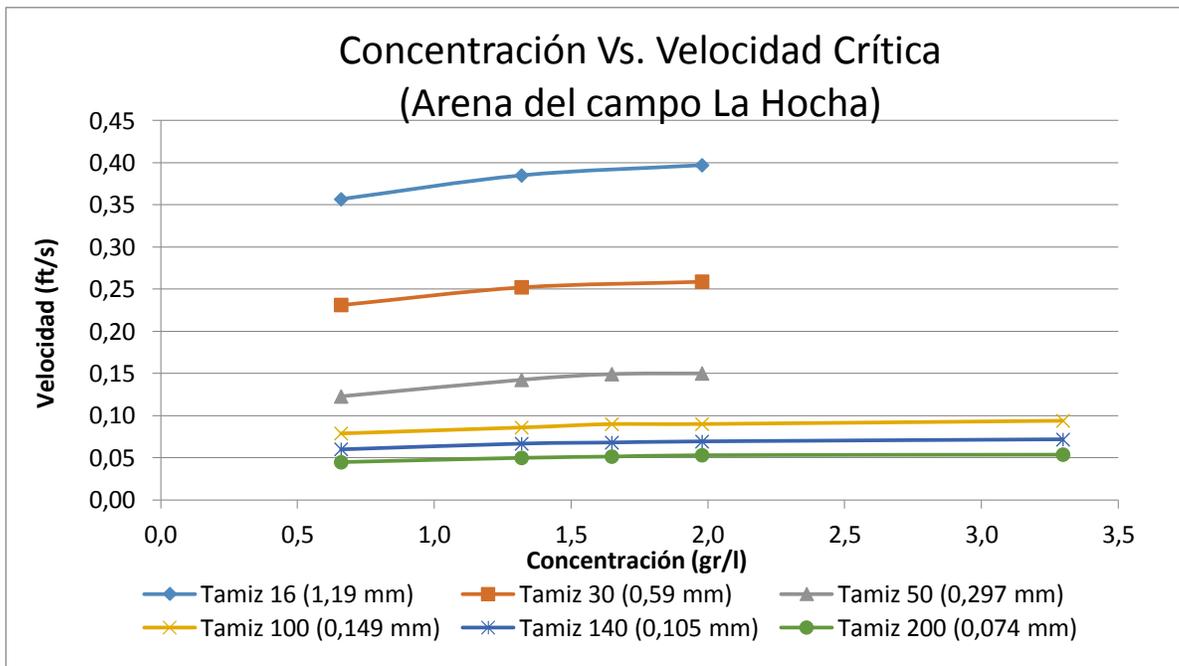


Gráfica 7. Velocidad Crítica Vs. Diámetro de partícula. Arena La Hocha

4.2.2.2. Concentración Vs. Velocidad crítica

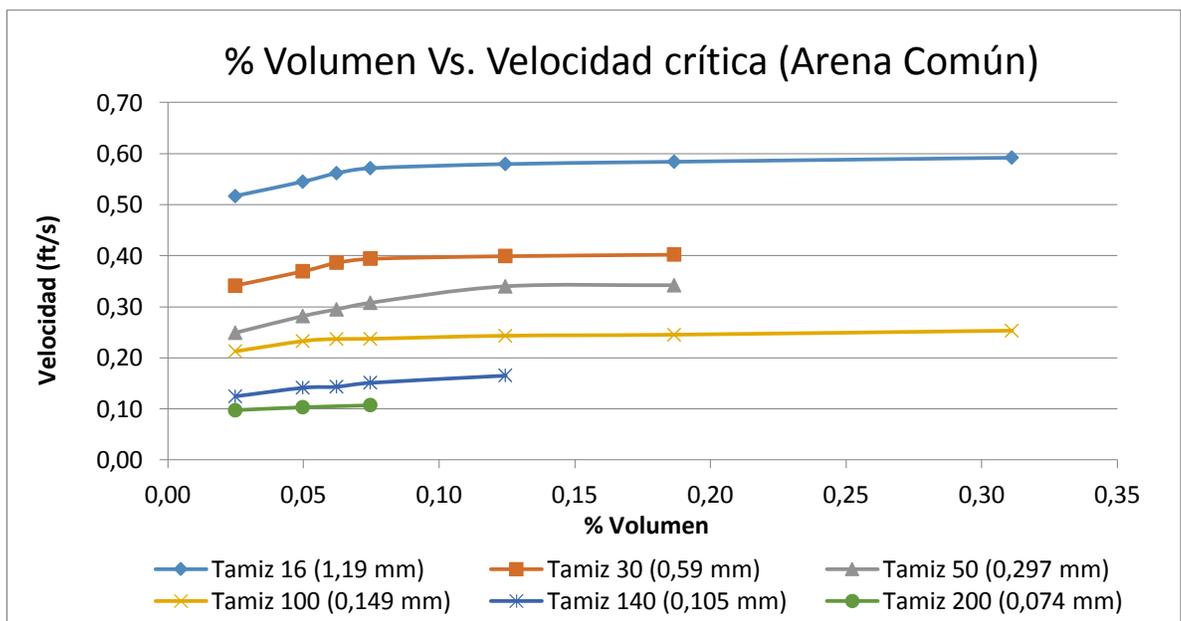


Gráfica 8. Gráfica de Concentración (gr/l) Vs. Velocidad Crítica. Arena Común

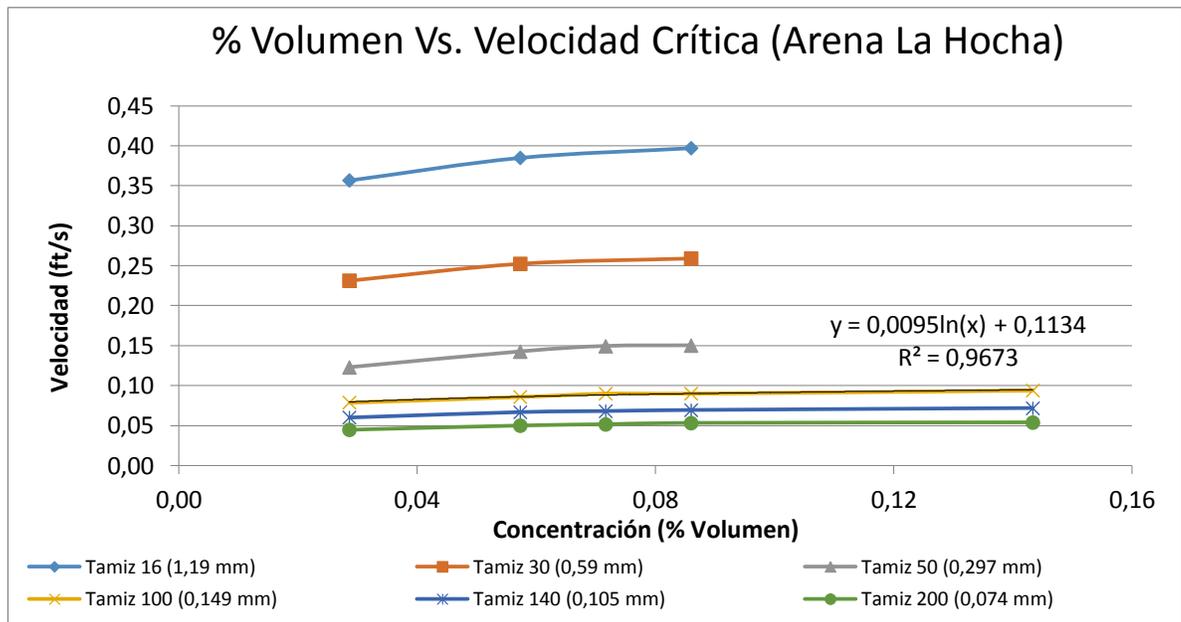


Gráfica 9. Concentración (gr/l) Vs. Velocidad Crítica. Arena del campo La Hocha.

4.2.2.3. % Volumen Vs. Velocidad Crítica



Gráfica 10. Gráfica de % Volumen Vs. Velocidad Crítica. Arena Común



Gráfica 11. % Volumen Vs. Velocidad Crítica. Arena La Hocha

En la gráfica 4 y 6 se muestra el comportamiento de las partículas en conjunto, donde se observa que a medida que la concentración aumenta, la velocidad crítica tiende a ser constante. Así mismo se observa que el rango de velocidad crítica no supera las máximas velocidades de las partículas más grandes (0,4 ft/seg para La Hocha y 0,6 ft/seg para la Arena Común).

En las gráficas 6 y 7 se observa que la velocidad crítica aumenta proporcionalmente con el aumento del diámetro de las partículas, es decir, al haber un cambio abrupto en los diámetros así mismo el cambio en la velocidad crítica será significativo, donde el valor máximo de velocidad crítica con la mayor concentración, es decir de las partículas de arena de mayor diámetro utilizado en el experimento (1,19 mm) fue de 0,39 ft/s para la arena de La Hocha y de 0,59 ft/s para la arena común.

En las gráficas de concentración vs. Velocidad crítica se puede observar que el comportamiento de los sólidos es logarítmico, y crece lentamente, tendiendo a ser constante para valores de concentración de sólidos altos, por lo tanto la concentración tiene una pequeña influencia en la velocidad, en la cual la mayor

variación observada en la velocidad crítica es de 0,1 ft/s. Por lo tanto, cuando hay concentraciones significativas de sólidos en el pozo, se debe tener cuidado en el diseño del sistema Pcp, puesto que la velocidad de asentamiento de las arenas puede aumentar un 0,1ft/s, el cual sino se tiene en cuenta, puede afectar la bomba y provocar influjos de arenas.

En las gráficas 8 y 9 de la arena común, se observa además del comportamiento de la concentración de las partículas sólidas, la variación del diámetro con respecto a la velocidad, en la cual se aprecia un rango de 0,1 ft/s a 0,6 ft/s para limos y arenas gruesas respectivamente. Mientras que en las gráficas 10 y 11 de la arena del campo La Hocha, el rango de variación de la velocidad con respecto al diámetro es de 0,05 ft/s a 0,4 ft/s, esto se debe a que la muestra de arena La Hocha cuenta con trazas de hidrocarburos, por lo tanto su densidad es menor, y en consecuencia su velocidad crítica también. Además se observa que los limos y arenas finas del campo La Hocha tienen una velocidad crítica menor a 0,15 ft/s.

En vista de que el diseño del sistema Pcp debe contrarrestar las velocidades críticas de los sólidos, este último se realiza en función de las partículas de arena de diámetro mayor y de su concentración.

Experimentalmente se logró observar que a medida que las partículas disminuían su diámetro, el tiempo que tardaban en cruzar la línea de referencia se hacía mayor, es decir que su velocidad crítica disminuía. También se observó en el tiempo de prueba, que no todas las partículas finas llegaban al fondo del recipiente ya que al ser tan livianas, tendían a chocar entre ellas y con las paredes del tubo disminuyendo así la velocidad con la que descendían, este choque generaba vórtices entre las partículas quedando en su mayoría en suspensión o cambiando su dirección hacia la superficie. Contrario de lo que pasaba con las partículas de mayor tamaño, ya que debido a su mayor tamaño la velocidad de descenso era mayor que el arrastre generado por la fricción y los vórtices de las mismas partículas, lo cual hacía que descendieran a una velocidad mayor. Esto muestra

que las partículas de arena con las que se deben tener cuidado son con las más grandes, ya que su velocidad crítica es mayor lo que las hace menos manejables.

4.3. APLICACIÓN AL CAMPO LA HOCHA

Para calcular la capacidad de desplazamiento de los pozos (caudal crítico de diseño) de campo La Hocha se toma como $V_C = 0.4 \text{ ft/seg}$ para concentraciones mayores a 2% y $V_C = 0.3 \text{ ft/seg}$ para concentraciones entre 1% y 2%, debido que a bajas concentraciones la velocidad crítica es menor y no tendrá un aporte significativo de partículas de arena y por último, para concentraciones menores o iguales al 1% se diseña con una velocidad crítica de 0,15 ft/s, ya que de acuerdo al análisis granulométrico, prevalecen las arenas finas y limos y en concentraciones bajas, su asentamiento es fácil de contrarrestar. Los valores de Q máx. se obtuvieron de los barriles producidos por cada pozo. Aplicando la ecuación 6, tenemos los siguientes resultados:

Pozo	Diámetro Tubing (in)	Velocidad Crítica (ft/seg)	% Arena	Q máx. (Prod). (Bls/Día)	Q Crítica (Bls/Día)	Q Inyec. (Bls/Día)
LH-004	2,992	0,15	0,5	4	112,7	0
LH-006	2,67	0,3	1,8	25	179,5	154,5
LH-010	2,992	0,15	1,0	10	112,7	0
LH-011	2,992	0,3	1,8	12	225,4	213,4
LH-013	2,75	0,3	1,2	14	190,4	176,4
LH-014ST	2,992	0,15	0,1	54	112,7	0
LH-016	2,992	0,15	0,1	750	112,7	0
LH-018	2,99	0,15	1,0	9	112,5	0
LH – 20	2,992	0,15	0,8	10	112,7	0
LH – 22	2,75	0,15	1,0	40	95,2	0
LH – 23	2,99	0,15	0,1	145	112,5	0
LH – 25	2,67	0,15	0,1	166	89,7	0
LH – 27	3,68	0,4	6,0	304	454,6	150,7

LH – 28	2,67	0,15	0,1	722	89,7	0
LH – 31	2,67	0,4	3,5	50	239,3	189,3
LH – 33	2,99	0,15	1,0	17	112,5	0

Tabla 14. Capacidad desplazamiento Campo La Hocha. Mes de Noviembre.

Cuando $Q_{Crítico} < Q_{Máximo}$ el diseño se hace con $Q_{Máximo}$, si $Q_{Crítico} > Q_{Máximo}$ el diseño se hace con $Q_{Crítico}$ por lo que si el $Q_{producido}$ es menor, se reinyecta crudo para alcanzar el nivel de $Q_{Crítico}$ y poner en producción el pozo, además cuando el porcentaje de arena del pozo es menor o igual a 1%, el caudal de inyección es cero, puesto que no sobrevendrá un aporte significativo de sólidos en el pozo, y por lo tanto no requerirá un caudal mayor para contrarrestar los sólidos producidos.

Para calcular la capacidad de levantamiento de los pozos de campo La Hocha se aplica la Ecuación 10. Las pérdidas por fricción se calculan por medio de las ecuaciones 14 y 15, de acuerdo al régimen de flujo. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Pozo	BSW	% Arena	THP (Psi)	P. Hidrostática	P. fricción (PSI)	P Descarga (Psi)
LH-004	1,0	0,5	300,0	1072,22	23,27	1395,49
LH-006	2,0	1,8	18,0	1184,38	36,96	1239,34
LH-010	1,2	1,0	17,0	627,41	13,50	657,91
LH-011	2,0	1,8	17,0	636,99	13,52	667,51
LH-013	1,9	1,2	27,0	803,27	22,84	853,12
LH-014ST	48,2	0,1	46,0	1177,63	25,23	1248,86
LH-016	82,5	0,1	55,0	1340,98	28,32	1424,31
LH-018	1,5	1,0	75	1106,14	23,85	1204,99
LH - 20	1,0	0,8	90	1041,90	18,00	1149,91
LH - 22	13,5	1,0	42	1326,32	30,13	1398,45
LH - 23	26,0	0,1	87	1188,15	20,60	1295,76
LH - 25	55,9	0,1	83	1501,81	37,72	1622,52

LH - 27	30,9	6,0	26	1368,49	14,56	1409,04
LH - 28	97,9	0,1	86	1665,95	41,12	1793,08
LH - 31	9,1	3,5	42	1724,21	41,73	1807,95
LH - 33	4,0	1,0	25	1787,93	30,81	1843,74

Tabla 15. Capacidad de levantamiento Campo La Hocha Mes Noviembre.

La información que se presenta a continuación fue obtenida a partir de estados mecánicos y potenciales con el mayor % de arena de los pozos activos del campo La Hocha.

Pozo	Diámetro Tubing (in)	Velocidad Crítica (ft/seg)	% Arena	Q máx. (Prod). (Bls/Día)	Q Crítica (Bls/Día)	Q Inyec. (Bls/Día)
LH-004	2,992	0,15	0,5	5	112,70	0
LH-006	2,67	0,4	6,0	180,9	239,3	58,4
LH-010	2,992	0,3	1,5	14,2	225,40	211,2
LH-011	2,992	0,4	7,0	25,8	300,5	274,7
LH-013	2,75	0,4	3,0	32	253,9	221,9
LH-014ST	2,992	0,15	0,2	104	112,7	0
LH-016	2,992	0,15	0,3	56,8	112,7	0
LH-018	2,99	0,15	0,5	9,1	112,5	0
LH - 20	2,992	0,3	2,0	51	225,4	174,4
LH - 22	2,75	0,3	5,0	52,6	190,4	137,8
LH - 23	2,99	0,3	1,5	154,8	225,1	70,3
LH - 25	2,67	0,3	1,8	135	179,5	44,5
LH - 27	3,68	0,4	15,0	451,8	454,6	2,8
LH - 28	2,67	0,4	2,5	160	239,3	79,3
LH - 31	2,67	0,4	3,5	50	239,3	189,3
LH - 33	2,99	0,4	2,2	46	300,1	254,1

Tabla 16. . Capacidad desplazamiento Campo La Hocha. Máximo porcentaje de arena desde el 2013.

Pozo	BSW	% Arena	THP (Psi)	P. Hidrostática	P. fricción (PSI)	P Descarga (Psi)
LH-004	1,0	0,5	300,0	1072,22	20,0	1392,2
LH-006	6,0	6,0	20,0	1269,53	37,0	1326,5
LH-010	1,5	1,5	20,0	632,80	13,5	666,3
LH-011	7,0	7,0	15,0	693,69	13,5	722,2
LH-013	3,0	3,0	10,0	828,07	22,8	860,9
LH-014ST	50,0	0,2	50,0	1180,50	25,2	1255,5
LH-016	12,0	0,3	55,0	1306,47	56,5	1418,0
LH-018	2,0	0,5	15	1096,99	23,9	1135,8
LH - 20	2,0	2,0	13	1063,61	18,0	1094,6
LH - 22	5,0	5,0	15	1411,09	30,1	1456,2
LH - 23	16,0	1,5	15	1211,48	20,6	1247,0
LH - 25	33,3	1,8	45	1530,61	37,7	1613,2
LH - 27	63,0	15,0	30	1984,10	14,6	2028,6
LH - 28	15,0	2,5	30	1673,78	124,0	1827,8
LH - 31	12,5	3,5	42	1724,21	41,7	1807,9
LH - 33	9,1	2,2	10	1822,91	30,8	1863,7

Tabla 17. Capacidad de levantamiento Campo La Hocha. Máximo porcentaje de arena desde el 2013.

5. CONCLUSIONES

- Las diferencias entre las velocidades críticas de la arena de La Hocha y la arena natural se debe a que esta última estaba totalmente seca mientras que la arena de La Hocha tiene trazas de hidrocarburos, por lo cual su comportamiento se asemeja al comportamiento real de la arena.
- Se clasificó la arena del campo la Hocha de acuerdo a la curva granulométrica y sus características, como una arena mal graduada, es decir uniforme, que cuenta con un 92% de arenas finas y limos, según la clasificación ASTM.
- La velocidad crítica de la arena está en función principalmente del tamaño de las partículas de la arena, teniendo estas y el fluido las propiedades constantes, es decir la misma densidad, viscosidad. Se evidenció que la concentración tiene un efecto poco significativo y a medida que la concentración aumenta, la velocidad tiende a ser constante.
- El diseño del desplazamiento nominal de la bomba PCP, tiene en cuenta el cálculo del caudal crítico y este a su vez depende de la velocidad crítica, que es calculada en función del tamaño de partícula y la concentración.
- Se encontró que la velocidad crítica de las partículas de arena de mayor diámetro (1,19 mm) a mayor concentración es 0.4 ft/seg, por consiguiente para asegurar el arrastre y producción de partículas a concentraciones mayores al 2% se debe diseñar de acuerdo a este, el cual permite definir el caudal de Diseño (Nominal de la bomba).
- De acuerdo a la granulometría en conjunto con la prueba de asentamiento, la de las arenas del campo la Hocha, se puede definir que la velocidad crítica de los limos está por debajo de 0,15 ft/s y las arenas oscilan entre 0,2 a 0,4 ft/s.

- El porcentaje de arena juega un papel importante para el cálculo de la densidad equivalente del fluido y permite definir la presión de descarga de la bomba PCP a condiciones de pozo.
- La inyección de crudo limpio vía anular se realiza para diluir los sólidos en fondo y permitir operar el sistema de levantamiento por encima de la velocidad crítica de asentamiento de la partícula, logrando mantener el sistema dentro de las condiciones de diseño y mejorando el Run Life del pozo.
- El campo La Hocha presenta un comportamiento dinámico a través del tiempo que requiere un seguimiento continuo en el aporte de sólidos que genera cambios permanentes en la velocidad crítica, y por consiguiente ajustes en las condiciones de inyección y operación del sistema PCP.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar granulometrías más detalladas a cada pozo para determinar la velocidad crítica ajustando el modelo de inyección y operación para cada uno de ellos.
- Realizar estudios más detallados del transporte de partículas en flujos multifásicos.
- Elaborar un software que permita calcular las condiciones actuales de operación y predecir el comportamiento del pozo en función de sus variables y condiciones críticas.

7. BIBLIOGRAFIA

- L. Jiménez Carreño, R. Rincón Rojas, Weatherford Colombia Ltd.; J.A. Trujillo, Hocol; Insertion Problems in Tandem Progressing Cavity (PC) Pumps, Solving this on a Decision Tree; SPE 165055; Mayo, 2013.
- Montevieros, Mariano, Echevarria, Lucas, Pluspetrol S.A.; Briozzo, Maria, Weatherford Internacional de Argentina; Benefits Of PCP Charge Pumps Applied To Sand Producing Reservoirs; SPE 105077; mayo, 2013.
- Trujillo, Juan Carlos; Meza, Iván; Cabrera, Luis Eduardo; Triviño, Carlos; Hocol S.A.; BOMBAS PCP DE PRECARGA PARA MANEJO DE ARENA EN EL CAMPO LA HOCHA; XI Congreso Colombiano de Petróleo y gas; Octubre, 2005.
- Fang, Guogui; An Experimental Study of Free Settling of Cuttings in Newtonian and Non-Newtonian Drillings Fluids: Drag Coefficient and Settling Velocity; SPE 26125; Noviembre, 1992
- Chacín, Nelvy; BOMBEO DE CAVIDAD PROGRESIVA: OPERACIONES, DIAGNÓSTICO, ANÁLISIS DE OPERACIONES Y TROUBLE SHOOTING TROUBLE SHOOTING; ESP Oil International Training Group; 2003.
- Ciulla, Francesco; PRINCIPIOS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS CON BCP; 1999.
- Esquivel Ortega, Salvador; Tesis: SISTEMA DE BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS APLICADO A POZOS DESVIADOS; Trabajo de grado

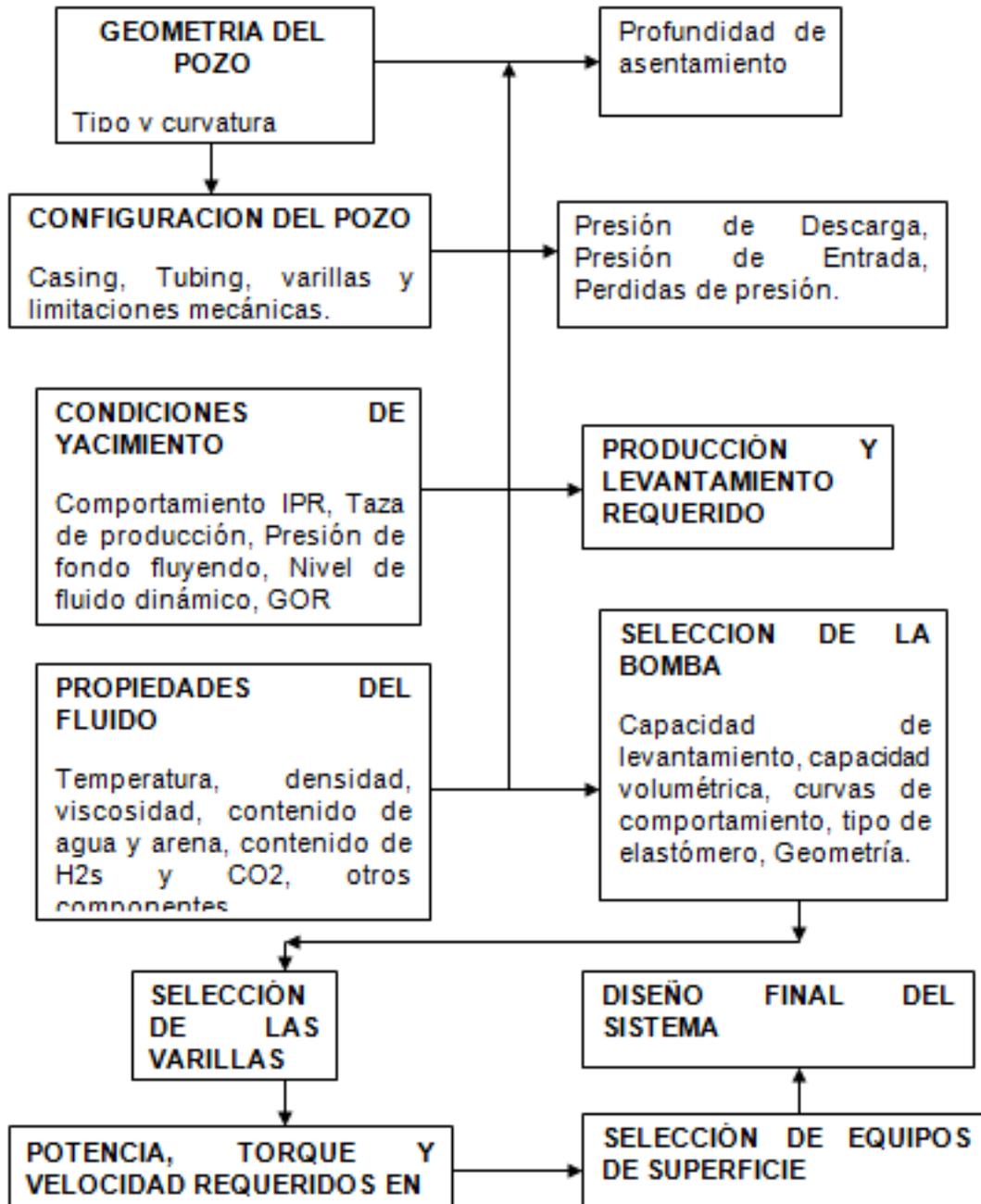
Ingeniero de Petróleos; México D.F.; Universidad Nacional Autónoma de México; 2009.

- Hirschfeldt, Marcelo; MANUAL DE BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS; OilProduction.net Versión 2008, V1.
- Jiménez Díaz, Giovanni; Tesis: ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN Y MODELO ESTRUCTURAL BASADO EN DATOS PALEOMAGNETICOS Y CINEMÁTICOS EN EL SECTOR SUR DEL VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA (ANTICLINAL DE LA HOCHA); Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos; Bogotá D.C.; Universidad Nacional de Colombia; Departamento de Geociencias; 2008.
- Martínez, Jairo; Cruz, Ediberto; Trujillo, Jaime Andrés; Falla Jorge; Ortiz, Jairo; Díaz, Oscar; Castaño, Ricardo; IMPLEMENTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL: REDUCCIÓN DEL ÍNDICE DE FALLAS, CAMPO LA HOCHA, COLOMBIA; [Diapositivas]; HOCOL S.A.; 2013.
- Monsalve Duarte, Diego; Tesis: EVALUACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS; Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos, Bucaramanga; Universidad Industrial de Santander; Departamento de Ingeniería Fisicoquímicas;2012.
- Oviedo Claros, Jairo; Tesis: HERRAMIENTA DE APLICACIÓN PARA EL DISEÑO DE BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESIVAS CON ENFASIS EN EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE BOMBEO; Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos; Neiva, Huila; Universidad Surcolombiana; Departamento de Ingeniería; 2005.

- Ramírez Amado, Laura Juliana; EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO POR CAVIDADES PROGRESIVAS PARA CRUDOS PESADOS EN LOS CAMPOS TECA Y NARE; Universidad Industrial de Santander; 2006.
- Weatherford; The “Fat Boy” series of PC pumps; Enero; 2006
- Weatherford; Desempeño bombas Fat Boy campo La Hocha; Diciembre; 2013
- Weatherford; COMPREHENSIVE PCP SOLUTIONS; Folleto, 2012
- <http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo4.pdf>
- http://petrowiki.org/Alternate_PCP_system_configurations

ANEXOS

ANEXO A: *Flujograma para un diseño apropiado de sistema con bombas de cavidades progresivas*



Fuente: *Introducción al Diseño de Sistemas PCP con PC-PUMP de C-FER.*

ANEXO B. Comparación bombas "Fat Boy" Vs. Bombas Convencionales

Pump Model	Cavity Opening % Increase	Cross Sectional View*	Rotor Pitch View*
7	83		
8			
13	35		
15			
22	44		
23			
32	79		
35			
52	55		
56			

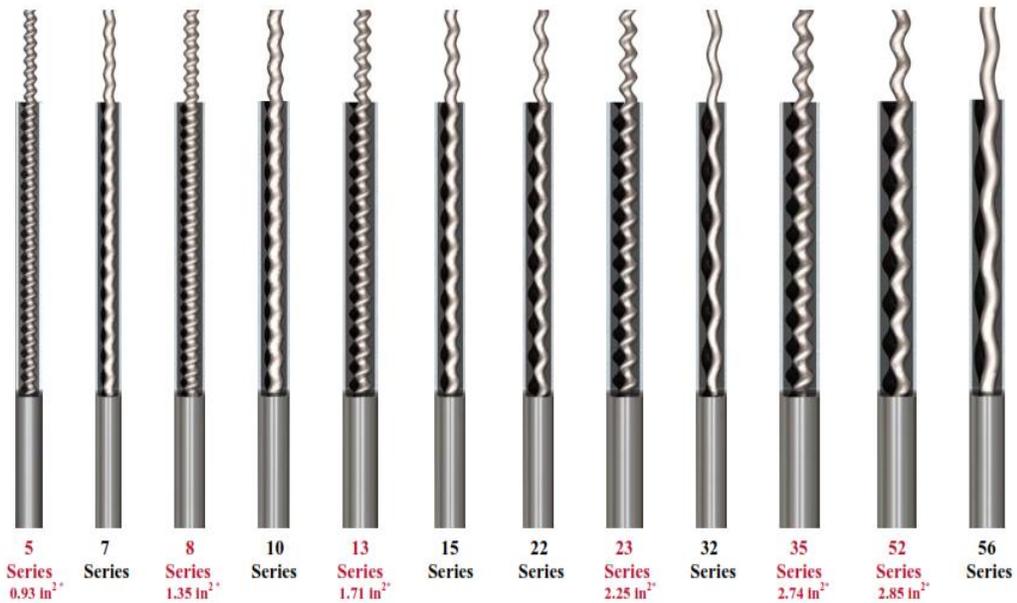
Compared to the Conventional pumps the Fat Boy Series has an increased pump cavity cross-sectional area, more aggressive rotor pitch angle and decreased pitch length.

Benefits of using the "Fat Boy" compared to the "Conventional"

- *Improved movement of heavy oil and sand
- *Shorter pump length
- * Improved ability to pump large particles
- *Effective in wells with low bottomhole pressures

Fuente: Weatherford Colombia Limited.

Comparison – "Fat Boy" Pumps versus "Conventional" Pumps



Fuente: Weatherford Colombia Limited

ANEXO C. Granulometría de la arena de La Hocha hecha en campo.

MALLA	Diametro (mm)	Peso retenido [g]	Metálicos en la muestra (%)	(%)	CARACTERISTICA
20	0,840	3,0291	1,06	48,36	Arena gruesa
30	0,590	11,6391			
40	0,420	16,2044			
50	0,297	8,3366			
70	0,210	8,1676			
100	0,149	8,9532	0,10	39,53	Arena fina
140	0,105	13,2544			
170	0,088	16,5202			
200	0,074	9,294	0,00	12,12	Limo
325	0,044	2,2535			
Colector	---	0,323			

FECHA DE RECOLECCION	16-nov-15	ORIGEN	CAMPO LA HOCHA
FECHA DE ANALISIS	19-nov-15	LUGAR DE RECOLECCION	FONDO DE POZO LH-34 (4287-4336 ft)
		CANTIDAD RECOLECTADA	10 kg
		MUESTRA ANALIZADA	99,98 gr

DESCRIPCION DE LA MUESTRA :	ESTADO: GRANULAR
	COLOR : AMARILLO
	OLOR: CARACTERISTICO
	CONSISTENCIA: GRANULAR FINA
	OTROS: CON TRAZAS DE HIDROCARBUROS

DENSIDAD (gr/ml) :	1,5
HUMEDAD (%):	5,3

REGISTRO FOTOGRAFICO		
Tamiz No.20	Tamiz No.70	Tamiz No.200
Tamiz No.30	Tamiz No.100	Tamiz No. 325
Tamiz No.40	Tamiz No. 140	Colector
Tamiz No.50	Tamiz No. 170	

CONCLUSIONES Se analizó el depósito con densidad de 1,49 g/ml, 5,3% de Humedad, observando compuestos metálicos que representa el 1,2% de la muestra total, en el análisis granulométrico se obtuvo 48,36% de arena gruesa, 39,53% de arena fina y 12,12% de Limo.

Antek S.A.S garantiza la conformidad de los resultados aquí reportados, de acuerdo a las especificaciones establecidas en el contrato C15-0004

REALIZÓ: Jhon Trujillo
Antek S.A.S

Fuente: Hocol S.A.

ANEXO D. Registro fotográfico prueba granulométrica de la arena

- Cuarteado de la muestra de arena seca.



- Tamizado de la muestra de arena



- Mezclado homogéneo de la arena

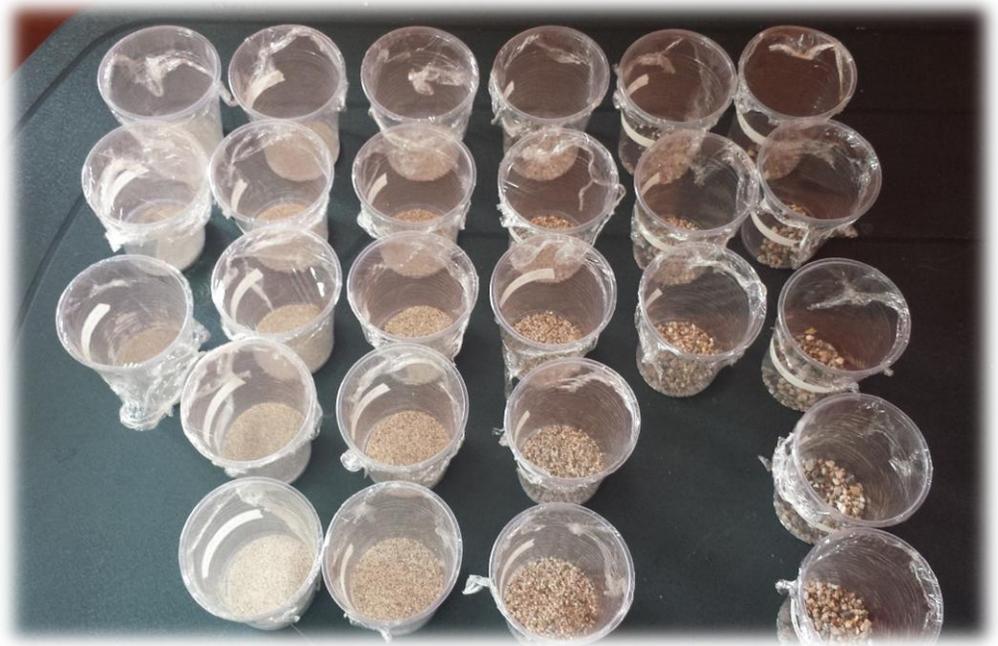


ANEXO E. Registro fotográfico de la prueba de asentamiento

- Tubo transparente de acrílico graduado.



- Muestras de arena previamente pesadas y seleccionadas



- Partículas que no alcanzaron a llegar al fondo por lo quedaron suspendidas en el tubo de acrílico



- Comportamiento de arena fina dentro del tubo con agua

