

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE MEJORA AL SISTEMA PCP USANDO MOTOR  
HIDRAULICO DE FONDO**

**ERWIN CHAPARRO FONSECA  
DIANA MECÓN PINZON**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA  
2014**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE MEJORA AL SISTEMA PCP USANDO MOTOR  
HIDRAULICO DE FONDO**

**ERWIN CHAPARRO FONSECA  
DIANA MECÓN PINZON**

Monografía como requisito parcial para optar el título de especialistas en producción  
de hidrocarburos.

**DIRECTOR**

**Ing. Fernando Calvete**

Ing. de Petróleos

Docente UIS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA  
2014**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>1. PRINCIPIO MOINEAU (SISTEMAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO).</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1. SISTEMA CONVENCIONAL BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESIVAS</b> .....	<b>15</b>
1.1.1 COMPONENTES DEL SISTEMA PCP.....	17
1.1.1.1 EQUIPO DE SUBSUELO.....	17
1.1.1.2 EQUIPO DE SUPERFICIE.....	21
1.1.2 PRINCIPIOS BASICOS BOMBAS PCP.....	22
1.1.2.1 GEOMETRIA DE BOMBAS PCP.....	24
1.1.2.2 CAPACIDAD DE LEVANTAMIENTO.....	25
1.1.2.3 CAUDAL TEORICO, REAL Y DE DESPLAZAMIENTO.....	26
1.1.3 TORQUE Y POTENCIA BOMBAS PCP.....	28
<b>1.2. MOTORES HIDRAULICOS DE PERFORACION.</b> .....	<b>28</b>
1.2.1. COMPONENTES DEL MOTOR HIDRAULICO DE PERFORACION .	29
1.2.1.1. VALVULA DE DESCARGA.....	29
1.2.1.2. DISPOSITIVO DE SEGURIDAD.....	30
1.2.1.3. SECCION DE FUERZA.....	31
1.2.1.4. SECCION ACOPLADORA.....	32
1.2.1.5. SECCION DE COJINETES.....	33
1.2.2. CONSIDERACIONES DE SELECCIÓN.....	34
1.2.3. CURVAS DE DESEMPEÑO DEL MOTOR DE PERFORACION.....	34
<b>2. VIABILIDAD TECNICA DEL SISTEMA HIDRO-PCP.</b> .....	<b>37</b>
<b>2.1. TORQUE DE LA BOMBAS PCP (T BOMBA)</b> .....	<b>37</b>
2.1.1. TORQUE HIDRAULICO.....	37
2.1.2. TORQUE DE FRICCION.....	38
<b>2.2. VELOCIDAD DE OPERACIÓN BOMBAS PCP</b> .....	<b>39</b>
<b>2.3. TORQUE Y RPM DE LOS MOTORES HIDRAULICOS DE FONDO</b> .....	<b>40</b>
<b>2.4. MECANISMO DE ACOUPLE MOTOR HIDRAULICO-BOMBA PCP</b> .....	<b>42</b>
<b>3. SISTEMA HIDRO-PCP</b> .....	<b>44</b>
<b>3.1. EQUIPO DE SUBSUELO HIDRO-PCP</b> .....	<b>44</b>
3.1.1. SECCION DE MOTOR HIDRAULICO .....	44
3.1.1.1. VALVULA DE DESCARGA.....	44
3.1.1.2. MOTOR HIDRAULICO.....	45
3.1.1.3. NIPLE DE RETORNO.....	45
3.1.2. SECCION DE COJINETES Y SELLO MECANICO .....	46
3.1.2.1. ACOPLADORAS SUPERIOR E INFERIOR.....	46
3.1.2.2. COJINETES Y SELLO MECANICO.....	47
3.1.3. SECCION DE BOMBA DE CAVIDAD PROGRESIVA .....	47
3.1.3.1. NIPLE DE DESCARGA.....	47

3.1.3.2. BOMBA DE CAVIDADES PROGRESIVAS .....	48
3.1.3.3. EMPAQUE ANULAR.....	48
3.1.3.4. PIN DE PARO.....	48
3.1.3.5. ANCLA ANTITORQUE.....	49
3.1.3.6. TUBERIA DE COLA.....	49
<b>3.2. EQUIPO DE SUPERFICIE HIDRO-PCP .....</b>	<b>49</b>
3.2.1. SISTEMA DE BOMBEO.....	50
3.2.2. MANIFOLD DE CONTROL.....	51
3.2.3. SEPARADOR Y TANQUE DE ALMACENAMIENTO.....	51
3.2.4. FLUIDO MOTRIZ .....	52
<b>4. CONFIGURACIONES DEL SISTEMA HIDRO-PCP. ....</b>	<b>53</b>
<b>4.1. SISTEMAS CERRADOS .....</b>	<b>54</b>
4.1.1. SARTA DUAL PARALELA SIN VENDEO DE GAS POR ANULAR.....	54
4.1.2. SARTA DUAL ANULAR SIN VENDEO DE GAS Y PRODUCCION ANULAR .....	55
4.1.3. SARTA DUAL ANULAR SIN VENDEO DE GAS Y PRODUCCION TUBULAR .....	56
4.1.4. SARTA TRIPLE CON VENDEO DE GAS ANULAR.....	57
<b>4.2. SISTEMAS ABIERTOS .....</b>	<b>58</b>
4.2.1. SARTA DUAL PARALELA CON VENDEO DE GAS ANULAR .....	59
4.2.2. SARTA DUAL ANULAR CON VENDEO DE GAS ANULAR .....	60
4.2.3. SARTA SENCILLA CON PRODUCCION ANULAR.....	61
<b>4.3. CALCULOS DE DISEÑO SISTEMA HIDRO-PCP. ....</b>	<b>62</b>
4.3.1. CAPACIDAD DE LEVANTAMIENTO BOMBA PCP.....	63
4.3.2. CALCULO DIFERENCIAL PRESION A TRAVES DE BOMBA PCP ..	63
4.3.3. CALCULO TORQUE REQUERIDO BOMBA PCP.....	66
4.3.4. DETERMINACION DE POTENCIA Y VELOCIDAD DE BOMBA PCP	66
4.3.5. CALCULO PRESION DIFERENCIAL DE MOTOR Y CAUDAL DE FLUIDO MOTRIZ.....	67
4.3.6. CALCULO DE PRESION DE OPERACIÓN EN SUPERFICIE. ....	69
4.3.7. CALCULO DE POTENCIA DE MOTOR DE SUPERFICIE. ....	71
<b>5. CAMPOS Y POZOS CANDIDADOS PARA INSTALAR HIDRO-PCP EN COLOMBIA. ....</b>	<b>72</b>
<b>5.1. PROFUNDIDAD DE OPERACION:.....</b>	<b>72</b>
<b>5.2. VOLUMEN DE PRODUCCION:.....</b>	<b>72</b>
<b>5.3. DESVIACION DEL POZO:.....</b>	<b>72</b>
<b>5.4. TIPO DE FLUIDOS PRODUCIDOS: .....</b>	<b>73</b>
<b>5.5. CAMPOS CANDIDATOS DE APLICACION SISTEMA HIDRO-PCP: ...</b>	<b>74</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>78</b>
<b>7. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>80</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>81</b>

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Comparación de eficiencia para sistemas de levantamiento artificial .....	<b>15</b>
<b>Figura 2</b> Componentes del equipo de subsuelo sistema PCP.....	<b>18</b>
<b>Figura 3</b> Parámetros de configuración bomba PCP .....	<b>19</b>
<b>Figura 4</b> Descripción del rotor de bomba PCP. ....	<b>20</b>
<b>Figura 5</b> Equipo de superficie sistema PCP .....	<b>21</b>
<b>Figura 6</b> Curvas Hipocicloides H1 y H2 (Geometría PCP 3:4).....	<b>22</b>
<b>Figura 7.</b> Envolventes de las hipocicloides H1 y H2 (geometría PCP 3:4).....	<b>23</b>
<b>Figura 8</b> Geometrías de bombas PCP. ....	<b>24</b>
<b>Figura 9</b> Válvula de descarga equipo de fondo .....	<b>30</b>
<b>Figura 10</b> Motor hidráulico primario de fondo. ....	<b>31</b>
<b>Figura 11</b> Sección transversal de motor configuración 5:6. ....	<b>32</b>
<b>Figura 12</b> Ensamble de sección acopladora.....	<b>32</b>
<b>Figura 13</b> Ensamble de sección de cojinetes .....	<b>33</b>
<b>Figura 14</b> Curva de desempeño Motor hidráulico velocidad vs Presión diferencial	<b>35</b>
<b>Figura 15</b> Curva de desempeño Motor hidráulico Potencia vs Presión diferencial..	<b>36</b>
<b>Figura 16</b> Curva de desempeño Motor hidráulico Torque vs Presión diferencial ....	<b>36</b>
<b>Figura 17</b> Torque de la bomba PCP a diferentes velocidades y cargas de presión	<b>38</b>
<b>Figura 18</b> Torque de la bomba PCP a 200rpm y diferentes cortes de agua. ....	<b>39</b>
<b>Figura 19</b> Esquema BHA bomba Hidro-PCP.....	<b>42</b>
<b>Figura 20</b> Válvula de descarga.....	<b>45</b>
<b>Figura 21</b> Motor hidráulico con estator de pared uniforme. Flujo motriz de retorno.	<b>46</b>
<b>Figura 22</b> Sección de transmisión (acopladoras, cojinetes y sello mecánico.....	<b>47</b>
<b>Figura 23</b> Bomba de cavidades progresivas .....	<b>48</b>
<b>Figura 24</b> Pin de paro, Ancla anti torque y tubería de cola. ....	<b>49</b>
<b>Figura 25</b> Equipo de superficie sistema Hidro-PCP. Sistema cerrado .....	<b>50</b>
<b>Figura 26</b> Equipo de superficie sistema Hidro-PCP. Sistema abierto .....	<b>51</b>
<b>Figura 27</b> Configuraciones sistema hidro PCP.....	<b>53</b>
<b>Figura 28</b> Hidro PCP, Sarta dual paralela sin venteo de gas por anular .....	<b>55</b>
<b>Figura 29</b> Hidro-PCP, Sarta dual anular sin venteo de gas y producción anular.....	<b>56</b>

<b>Figura 30</b>	Hidro-PCP, Sarta dual anular sin venteo de gas y producción tubular....	<b>57</b>
<b>Figura 31</b>	Hidro-PCP, Sarta triple con venteo de gas anular.....	<b>58</b>
<b>Figura 32</b>	Hidro-PCP, Sarta dual paralela con venteo de gas anular.....	<b>59</b>
<b>Figura 33</b>	Hidro-PCP, Sarta dual anular con venteo de gas anular .....	<b>60</b>
<b>Figura 34</b>	Hidro-PCP, Sarta sencilla con producción anula .....	<b>61</b>
<b>Figura 35</b>	Esquema de presiones sistema Hidro-PCP.....	<b>64</b>
<b>Figura 36</b>	Curva de desempeño motor hidráulico Torque vs presión diferencial ....	<b>68</b>
<b>Figura 37</b>	Curva de desempeño motor hidráulico Velocidad vs presión diferencial	<b>68</b>
<b>Figura 38</b>	Curva de desempeño motor hidráulico Potencia vs presión diferencial ..	<b>69</b>
<b>Figura 39</b>	Distribución de campos por cuenca sedimentarias.....	<b>74</b>
<b>Figura 40</b>	Distribución de producción por cuenca sedimentaria .....	<b>75</b>
<b>Figura 41</b>	Distribución de Campos por tasa de producción .....	<b>76</b>
<b>Figura 42</b>	Distribución de Campos por tipo de crudo llanos orientales .....	<b>76</b>

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Rangos de aplicación del sistema PCP .....	<b>16</b>
<b>Tabla 2.</b> Parámetros operativos de motores hidráulicos convencionales. ....	<b>41</b>
<b>Tabla 3</b> Resumen motores hidráulicos NOV disponibles .....	<b>41</b>
<b>Tabla 4</b> Rangos de aplicación del sistema Hidro-PCP .....	<b>73</b>

## RESUMEN

### TITULO: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE MEJORA AL SISTEMA PCP USANDO MOTOR HIDRAULICO DE FONDO\*

#### Autores:

CHAPARRO FONSECA, ERWIN  
MECON PINZON, DIANA ROCIO\*\*

#### Palabras Claves:

**PCP:** Progressive Cavite Pump. Bomba de desplazamiento positivo de cavidades progresivas.

**Motor hidráulico de fondo:** Motor compuesto por ensamble helicoidal de rotor-estator que permite ser instalado en fondo de pozos de petróleo y que mediante un fluido motriz o lodo de perforación genera velocidad angular (rpm), toque y potencia.

**Varillas:** Sarta rígida que en el sistema PCP convencional transmite el torque y rotación desde superficie hasta fondo de pozo.

**Alta desviación:** En relación al grado de desviación o inclinación del pozo con relación al eje vertical del mismo. Se considera alta desviación a inclinaciones superiores al 15°/100ft.

#### Descripción:

El sistema de levantamiento artificial PCP fue diseñado para condiciones de exigencia media, lo que requiere una mejora para ampliar los rangos de su aplicación. Los motores hidráulicos de fondo pueden ser una solución efectiva que maximice las bondades del sistema de cavidades progresivas, el reemplazo de las varillas por potencia hidráulica permiten la instalación del sistema PCP en pozos de alta desviación, la eliminación del peso de la sarta en los cabezales de pozo posibilitan la instalación a mayores profundidades y la velocidad de operación que está directamente relacionada con el caudal del fluido motriz pueden significar mayores tasas de producción. Con lo anterior, el sistema PCP sufre una importante mejora que amplía los rangos de aplicación.

Una determinación de los valores de torque, potencia y velocidad tanto de las bombas PCP como de los motores hidráulicos de perforación es necesaria para afianzar la viabilidad técnica de los equipos actuales en un ensamble que permite mejorar el sistema PCP.

Un estudio estadístico de los campos productores de petróleo en Colombia permite analizar de manera global el porcentaje de aplicabilidad del sistema hidro-PCP en Colombia, especialmente en la cuenca de los llanos orientales, donde actualmente se extra el 80% de la producción total nacional. La cual demuestra las mejoras del sistema convencional dado el reemplazo de la sarta de varillas con los problemas y limitaciones que ello significa.

---

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de fisicoquímicas. Especialización en producción de hidrocarburos, Director: Fernando E Calvete González.

## ABSTRACT

### TITLE: FEASIBILITY STUDY TO IMPROVE THE SYSTEM PCP USING ENGINE HYDRAULIC\*

#### Authors:

CHAPARRO FONSECA, ERWIN  
MECON PINZON, DIANA ROCIO \*\*

#### Keywords:

**PCP:** Progressive Pump Cavite. Positive displacement pump progressive cavity.

**Hydraulic downhole motor:** Motor assembly composed of helical rotor-stator allows installation in downhole oil and using a drive fluid or drilling mud. It generates angular speed (rpm), torque and power.

**Rod:** Rod String in the conventional system transmits torque and rotation from surface to downhole.

**Upper deviation:** In relation to the degree of deviation or hole inclination relative to the vertical axis. High deviation at higher inclinations 15 ° / 100ft is considered.

#### Description:

The PCP artificial lift system was designed for average demand conditions, which requires an upgrade to expand the range of its application. The hydraulic downhole motors can be an effective solution that maximizes the benefits of progressive cavity system, replacement of hydraulic power rods allow the installation of the PCP system highly deviated wells, eliminating string weight on the heads enables installation pit deeper, where the operating speed is directly related to the driving fluid flow may mean higher production rates. With the above, the PCP system suffers a significant improvement extending application ranges.

A determination of the values of torque, power and speed both PCP pumps and hydraulic drill motors is necessary to strengthen the technical feasibility of existing equipment in an ensemble that improves the PCP system.

A statistical study of the producing oil fields in Colombia to analyze globally the percentage of applicability of hydro-PCP system in Colombia, especially in the basin of the eastern plains, where currently 80% bonus of the total domestic production. Which shows the improvements of the conventional system since replacing the rod string with the problems and limitations that means.

---

\* Work Degree

\*\* Faculty of physicochemical. Specializing in production of hydrocarbons, Director: Fernando Gonzalez E Calvete.

## INTRODUCCIÓN

Los requerimientos energéticos actuales, la disminución de reservas de hidrocarburos y la carencia de nuevos descubrimientos, demandan de industria del petróleo a explorar en condiciones cada vez más adversas y a desarrollar tecnologías que permitan la explotación bajo estas nuevas condiciones. El sistema de levantamiento artificial PCP fue diseñado para condiciones de exigencia media, lo que requiere una mejora para ampliar los rangos de su aplicación. Los motores hidráulicos de fondo pueden ser una solución efectiva que maximice las bondades del sistema de cavidades progresivas, el reemplazo de las varillas por potencia hidráulica permiten la instalación del sistema PCP en pozos de alta desviación, la eliminación del peso de la sarta en los cabezales de pozo posibilitan la instalación a mayores profundidades y la velocidad de operación que está directamente relacionada con el caudal del fluido de potencia pueden significar mayores tasas de producción. Con lo anterior, el sistema PCP sufre una importante mejora que amplía los rangos de aplicación.

El sistema de levantamiento artificial de bombas PCP es uno de los más eficientes volumétricamente, sencillos y adecuados para la extracción de crudos pesados y Extrapesados dada la alta viscosidad de los fluidos. La configuración geométrica y variables geométricas del conjunto estator-rotor, determinan el caudal de desplazamiento de la bomba y la capacidad de levantamiento dada por la cantidad de etapas y grado de ajuste rotor-estator. Una revisión cualitativa de los parámetros de potencia, torque y velocidad obtenidos con el motor hidráulico convencionalmente usado en perforación puede ser una solución eficaz a los problemas presentados con la sarta de varillas del sistema PCP convencional y ampliar los rangos de aplicación del sistema.

Una determinación de los valores de torque, potencia y velocidad tanto de las bombas PCP como de los motores hidráulicos de perforación es necesaria para afianzar la viabilidad técnica de los equipos actuales en un ensamble que permite mejorar el sistema PCP. Las gráficas de comportamiento de los motores de fondo permiten generar rangos de aplicación del motor con la modificación de variables de superficie tales como caudal y presión de inyección del fluido motriz.

El sistema hidro-PCP emplea un fluido motriz que transmite la energía desde superficie mediante potencia hidráulica. Dicho fluido puede ser conducido mediante un circuito cerrado o abierto, donde cada configuración presenta sus bondades y limitantes. La configuración de ambos tipos depende de las condiciones mecánicas de los pozos, tipo de completamiento y pueden ser adecuadas acorde al pozo y las condiciones o características de los fluidos a producir.

El sistema hidro-PCP al igual que los sistemas de levantamiento artificial convencionales cuenta con un procedimiento de diseño que debe ser determinada para el sistema propuesto. Similar a los ALS convencionales, es importante el diseño mecánico y diámetro del casing del pozo de aplicación. El caudal a producir y la profundidad de instalación o levantamiento requerido son parámetros básicos requeridos para el diseño. Conocer los fluidos y la configuración adecuada permiten determinar el caudal y presión del fluido motriz requeridos para la operación.

Un estudio estadístico de los campos productores de petróleo en Colombia permite analizar de manera global el porcentaje de aplicabilidad del sistema hidro-PCP en Colombia, especialmente en la cuenca de los llanos orientales, donde actualmente se extrae el 80% de la producción total nacional. La cual demuestra las mejoras del sistema convencional dado el reemplazo de la sarta de varillas con los problemas y limitaciones que ello significa.

## 1. PRINCIPIO MOINEAU (SISTEMAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO).

El concepto de bombas de cavidades progresivas se desarrolló a finales de los años 20 por el Francés René J Moineau el cual pretendía diseñar un compresor rotativo y en su intento diseño un mecanismo giratorio que es utilizado para las variaciones de la presión de un fluido, que se conoce como capsulim. En la década de los 30' obtuvo la patente de la bomba de cavidades progresivas y en 1932 creó su compañía llamada "*Pompes Compresseurs Mecanique*" en asociación con Gevelot company. Luego esta licencia fue otorgada a otras industrias de bombas más pequeñas.

En un principio, la tecnología de bombas de cavidades progresivas fue aplicada en sistemas de transmisión para industrias de alimentos, papel, agricultura, etc. Pero solo hasta la década de los 50 se da su primera aplicación con fines petroleros, cuando se desarrollan los primeros motores hidráulicos con mecanismo de doble rotor helicoidal para la perforación de pozos direccionales. En la década de los 70 se realizaron esfuerzos importantes en la búsqueda de la implementación del principio de Moineau en sistemas de producción de petróleo.

Desde 1957, Rusia estudió la oportunidad de usar el principio de Moineau en sistemas de perforación y producción de petróleo. En la década de los setenta ellos usaron las bombas de Moineau para la producción in situ de aceites pasados, las cuales eran rotadas por un motor eléctrico sumergible de 4 polos girando a 1450 RPM bajo 50 Hz de frecuencia.

En 1979, industrias Canadienses implementaron las bombas de cavidades progresivas en campos de crudo pesado y de alto corte de arena. Una vez obtuvieron excelentes resultados, se desarrollaron sistemas completos de subsuelo y superficie. En los años subsiguientes, la gama de productos se amplió y la comercialización de las bombas de cavidades progresivas se expandió a nivel mundial.

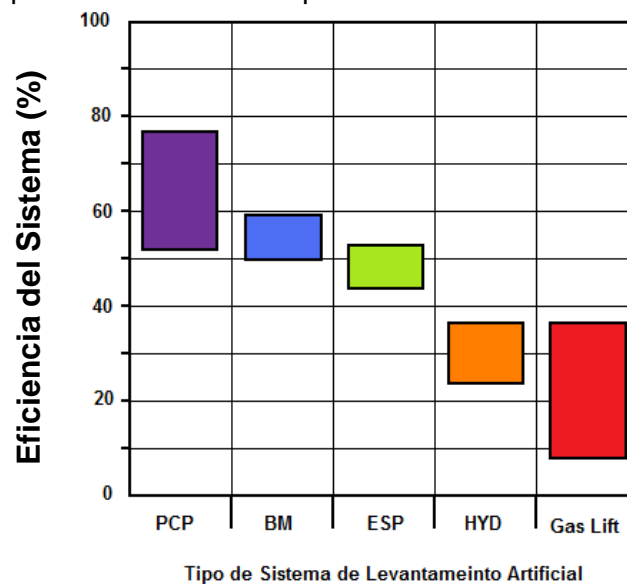
En 1985, el instituto Francés del petróleo y la PCM, corren la primera bomba de Moineau en un pozo operado por la operadora TOTAL, la cual era operada desde superficie por medio de sarta de varillas. Esta es sencilla, económica y apropiada para todos los ambientes.

En las últimas tres décadas, las bombas de cavidades progresivas han experimentado un desarrollo gradual como un método de levantamiento artificial. Hoy en día se avanza en sistemas híbridos que realzan las bondades del sistema PCP con mejoras importantes como varilla continua, rotador de tubería, motores de fondo, entre otros.

### 1.1. SISTEMA CONVENCIONAL BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESIVAS

Las bombas de cavidades progresivas son bombas de desplazamiento positivo conformadas principalmente por un estator de elastómero sintético pegado internamente a un tubo de acero, el cual se instala en pozo conectado a la tubería de producción y un rotor helicoidal que está conectado al final de una sarta de varillas. La rotación de esta sarta de varillas se da desde superficie por medio del accionamiento de una fuente externa. El movimiento giratorio del rotor dentro del estator fijo, permite el desplazamiento del fluido en dirección ascendente.

Figura 1. Comparación de eficiencia para sistemas de levantamiento artificial



Fuente: Modificado de CUILLA, F. Principios fundamentales para diseño de sistemas con bombas PCP.

El sistema de levantamiento artificial con bombas de cavidades progresivas tiene ventajas importantes con respecto a otros sistemas de producción de petróleo. Como se muestra en la figura 1, la principal ventaja está asociada a la alta eficiencia, que en algunos casos llega a superar el 80%. Otras ventajas del sistema de levantamiento artificial 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.

Las principales desventajas de los sistemas PCP son:

- Baja capacidad real de desplazamiento.
- Restricción en la temperatura.
- Alta sensibilidad del elastómero a los fluidos producidos.
- Requiere sumergencia permanente.
- Desgaste por contacto entre las varillas de bombeo y tubing.
- Normalmente requiere equipo para trabajos de workover o Well services.
- Bajas velocidades de operación

Estas limitaciones están siendo superadas cada día con el desarrollo de nuevos productos y el mejoramiento de los materiales y diseño de los equipos.

Tabla 1. Rangos de aplicación del sistema PCP

CARACTERISTICA	RANGO TIPICO	MAXIMO
Profundidad de Operación	(1000 - 5000)ft (TVD)	9000 ft (TVD)
Volumen de Operación	(5 - 2500) BFPD	5000 BFPD
Temperatura de Operación	(75 - 170) °F	300 °F
Desviación de Pozo	N/A	Dog-Leg (15°/100 ft)
Manejo de Corrosión	Excelente	
Manejo de Gas	Bueno	
Manejo de Sólidos	Excelente	
Densidad de Fluido	Por debajo de 45°API	
Tipo de Fluido	Fluidos Dulces	
Servicio y Reparación	Requiere equipo de Workover	
Tipo de Movimiento Principal	Motor Eléctrico o de combustión interna	
Aplicación Off-shore	Excelente	
Eficiencia del Sistema	50 - 70 %	90%

Fuente: Progressing Cavity Pump manual, general information, Version 1.0, Weatherford Artificial Lift Systems, 1999

El sistema de levantamiento artificial por bombas de cavidades progresivas, posee ciertos rangos de operación que son de gran importancia a la hora de diseñar la aplicación a determinado pozo o campo.

En la Tabla 1. Podemos observar que la aplicación de sistemas de levantamiento artificial con bombas de cavidades progresivas está enmarcada dentro de yacimientos someros, de baja presión, de baja producción y para fluidos sin contenido de aromáticos o corrosivos como H<sub>2</sub>S y/o CO<sub>2</sub>.

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.

### **1.1.1 COMPONENTES DEL SISTEMA PCP**

Existen diferentes compañías proveedores de sistemas de levantamiento con bombas de cavidades progresivas como Netzsch, Kudu y Weatherford, entre las cuales puede existir variación en las configuraciones del sistema. Sin embargo, existen componentes principales tanto de sub-suelo como de superficie característicos del sistema.

#### **1.1.1.1 EQUIPO DE SUBSUELO**

El equipo de subsuelo o también llamado equipo de fondo está compuesto principalmente por la bomba de cavidades progresivas, accesorios, rotor y sarta de varilla.

En la figura 2 se observa el ensamblaje de fondo del sistema convencional de bombas de cavidades progresivas, donde desde superficie se acciona el equipo de fondo mediante una sarta de varillas.

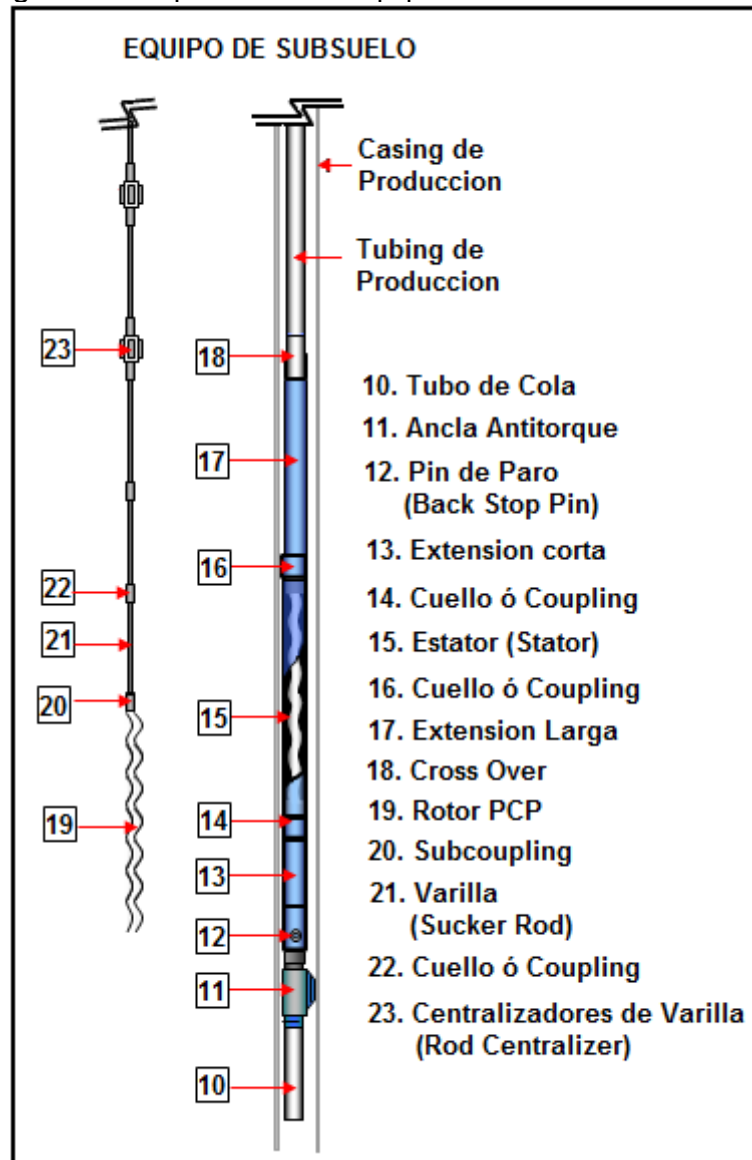
**Ancla Anti-torque:** El ancla anti-torque es una de las partes más importantes dentro del equipo de subsuelo del sistema de bombas de cavidades progresivas ya que este evita o previene que la bomba y/o la tubería de producción se desajuste o se desconecte debido al torque establecido entre la fuerza interna que ejerce el rotor sobre el estator por su movimiento en sentido horario.

**Pin de Paro:** El pin de paro es indispensable en la sarta de producción de las bombas de cavidades progresivas ya que su función principal es servir como referencia para el espaciado del rotor dentro del estator y determinar la posición del rotor durante la instalación de la bomba de cavidades progresivas.

Adicionalmente impide que la sarta rotor-varillas caiga a fondo de pozo cuando hay rotura de varillas.

**Tubo de Cola:** El tubo de cola o separador de gas permite llevar la punta de la sarta de producción ser ubicada por debajo de los perforados inferiores y así el gas que se produce entre el anular y el líquido por la sarta de producción, no provoquen problemas en el elastómero como lo son hinchamiento, endurecimiento, desgarramientos etc. También funciona como tubo guía durante la instalación de la bomba en subsuelo.

Figura 2 Componentes del equipo de subsuelo sistema PCP.



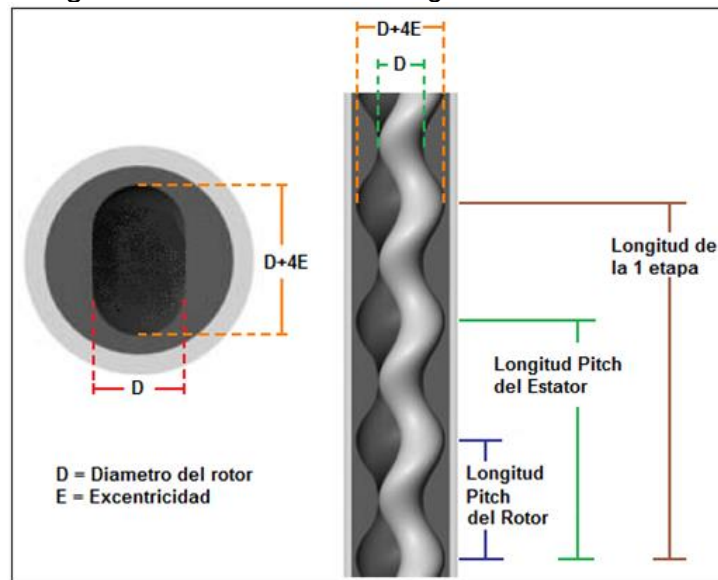
Fuente: CHAPARRO, E. Efecto del corte de agua y la viscosidad del fluido de producción en la eficiencia volumétrica de las bombas de cavidades progresivas.

**Extensión corta:** La extensión corta dentro del equipo de subsuelo cumple la función de un Pup Joint que permite espaciar el rotor con el fin de que su extremo coincida con el extremo inferior del estator

**Estator:** Los estatores son tubos de acero con cuerpos de elastómeros (o caucho) pegados internamente y torneados como hélices de dos o más lóbulos (dependiendo de la geometría). Para el caso de una geometría 2:1, el elastómero interno de un estator se caracteriza por 3 parámetros que son:

- Ancho mínimo de la sección transversal =  $D$
- Ancho máximo de la sección transversal =  $D+4E$
- Longitud Pitch del Estator (PS) =  $2 \times Pr$

Figura 3 Parámetros de configuración bomba PCP



Fuente: CHAPARRO, E. Efecto del corte de agua y la viscosidad del fluido de producción en la eficiencia volumétrica de las bombas de cavidades progresivas.

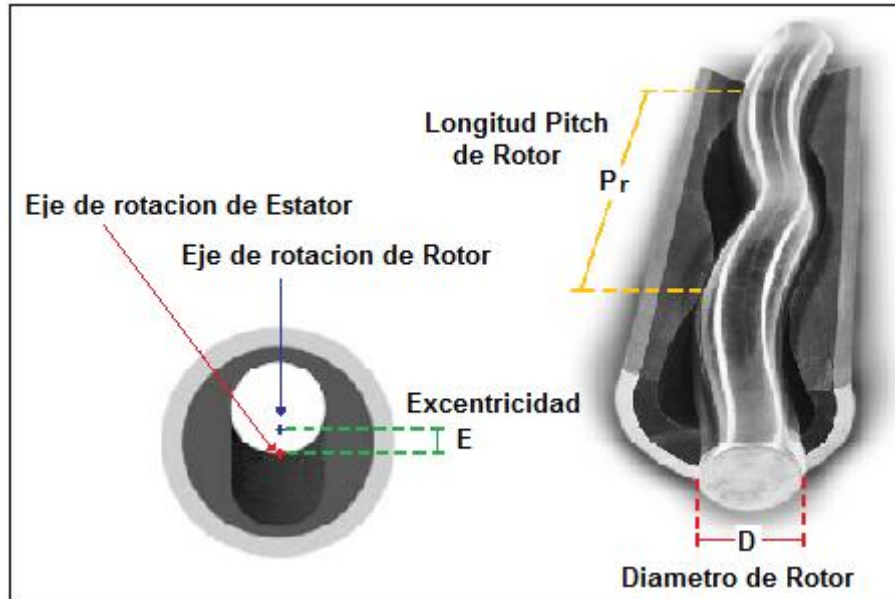
Los Elastómeros son la base del sistema PCP en el que está moldeado el perfil de doble hélice del estator. De su correcta determinación y su interferencia con el rotor depende en gran medida la vida útil de la PCP.

Los elastómeros poseen ciertas propiedades como lo son: Dureza, resistencia a la tensión, elongación, elasticidad, resistencia a la abrasión y el desgarre, fatiga y resistencia por fractura por flexión, resistencia al calor, los líquidos y gases.

**Rotor:** El rotor dentro de las bombas de cavidades progresivas tiene como función principal es crear dentro del estator líneas de sello (rotor-elastómero) y así formar

cavidades las cuales desplazan el fluido de una forma ascendente durante el movimiento del rotor en sentido horario. Este tiene forma de hélice múltiple o simple y esta provee conexión a la sarta de bombeo.

Figura 4 Descripción del rotor de bomba PCP.



Fuente: CHAPARRO, E. Efecto del corte de agua y la viscosidad del fluido de producción en la eficiencia volumétrica de las bombas de cavidades progresivas.

Procesos para el diseño, fabricación, validación y designación de bombas BCP se encuentran descritos en la norma ISO 15136-1:2009. Para efectos de aplicación de este documento y del sistema de bombeo solo es necesario resaltar la identificación requerida para rotor y estator.

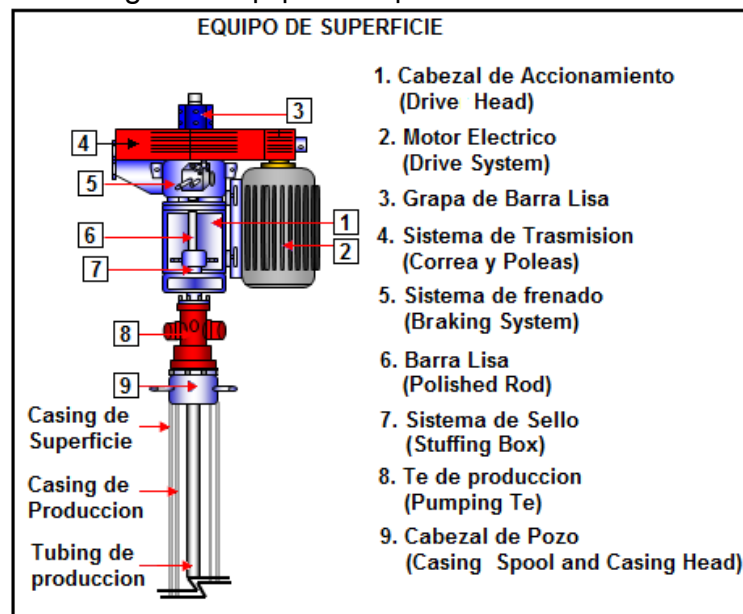
El estator debe estar identificado con ISO- vvv-hhhh-eee marcado a máximo un metro del extremo; y el rotor con ISO-vvv-hhhh-rrr marcado en la cabeza del mismo. Las letras vvv especifican el desplazamiento de la bomba en m<sup>3</sup>/100rpm, las letras hhhh especifican la capacidad de levantamiento en metros de agua, eee especifica el código del elastómero, y rrr especifica el código del tamaño del rotor

**Sarta de Varilla:** La sarta de varillas pueden ser de varillas convencionales, varillas huecas o continuas, las varillas huecas o convencionales pueden estar unidas por cuellos o couplings, su función primordial es transmitir la potencia (torque desde el fondo (rotor) hasta el cabezal en superficie del pozo, los torques permisibles están regidos por el cuerpo de la varilla la cual permite disminuir la dimensión de la unión sin perjudicar la resistencia al torque del sistema de producción. Las varillas huecas permiten la inyección de fluidos para tratamientos químicos o dilución.

### 1.1.1.2 EQUIPO DE SUPERFICIE.

El equipo de superficie de las bombas de cavidades progresivas es seleccionado de acuerdo a las capacidades de potencia del equipo de subsuelo.

Figura 5 Equipo de superficie sistema PCP



Fuente: CHAPARRO, E. Efecto del corte de agua y la viscosidad del fluido de producción en la eficiencia volumétrica de las bombas de cavidades progresivas.

Este equipo de superficie soporta la carga axial de la sarta de producción, transmisión del torque requerido, la rotación de la sarta de bombeo a la velocidad requerida y prevenir fugas del fluido producido. El equipo de superficie posee los siguientes componentes:

**Cabezal de rotación:** El cabezal de rotación se encuentra ubicado por encima de la Te de producción en la cabeza de pozo, este equipo es el que une el motor a la sarta de bombeo y una de las funciones primordiales del cabezal de rotación es sostener la sarta de varilla y la carga axial que estas generan. Existen varios tipos de cabezales de rotación como lo son: Cabezales de eje sólido, Cabezales de eje hueco, Cabezales con caja reductora, cabezales directos y cabezales hidráulicos.

**Tren de Potencia:** El tren de potencia en los equipos de superficie es el elemento que permite como función primordial transmitir el torque de rotación existente desde el motor hasta la barra lisa o el eje del cabezal mediante un conjunto de correas, poleas y engranajes, el proveedor o fabricante de la bomba de cavidades progresivas el tipo y cantidad de correas necesarias según el torque máximo de operación del cabezal de rotación.

**Motor:** En los sistemas de levantamiento artificial por cavidades progresivas posee un motor que es un equipo de superficie que genera el movimiento giratorio del sistema, existen tres tipos de motores más utilizados.

Los Motores eléctricos son los de mayor aplicación debido a su eficiencia de operación para su funcionamiento este utiliza un variador de frecuencia, una de las ventajas de estos motores eléctricos es el bajo consumo de energía y costos de mantenimiento y es muy fácil su operación.

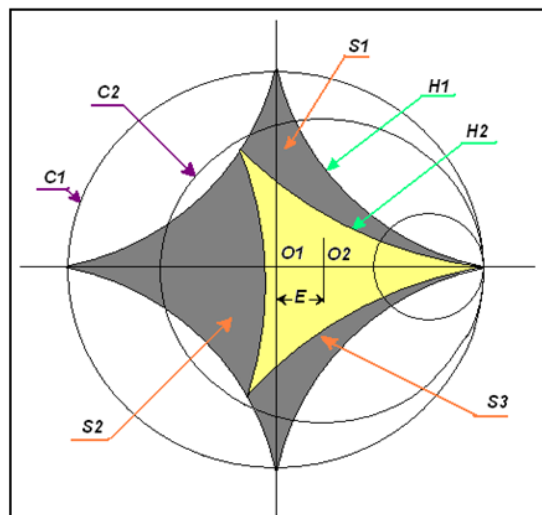
El Motor Hidráulico es alimentado por una bomba hidráulica de desplazamiento positivo, estos motores trabajan con gas natural, gasolina o diesel, su operación es manual pero requiere altos costos de mantenimiento y su eficiencia es menor que la de los motores eléctricos.

Motor de combustión interna su aplicación es exclusiva para lugares donde no existe facilidades eléctricas, estos tienen características y configuraciones diferentes y varían según fabricante, para su selección se requiere la curva de desempeño del motor para así verificar y su otorgar la potencia necesaria para la bomba.

### 1.1.2 PRINCIPIOS BASICOS BOMBAS PCP.

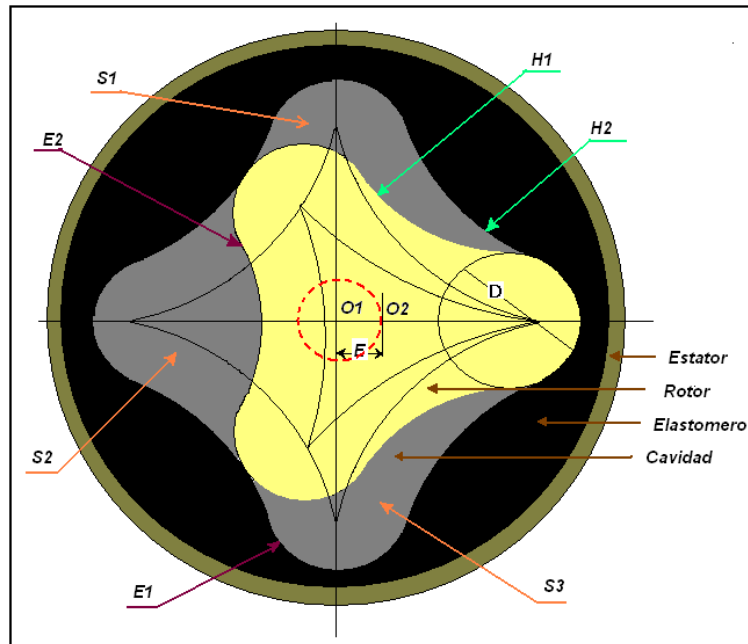
Como se observa en la figura 6, la hipocicloide **H1** con  $n$  dientes (4 para el caso de la figura 1,6) cuya base es el círculo **C1** (**O1**, **R1**) está conectada a la hipocicloide **H2** con  $(n-1)$  dientes (3 para el caso de la figura 1,6), cuya base es el círculo **C2** (**O2**, **R2**) por la relación  $R_2/R_1=(n-1)/n$ . Estas dos curvas generan dos engranes, uno dentro del otro.

Figura 6 Curvas Hipocicloides H1 y H2 (Geometría PCP 3:4)



Fuente: Modificado de CUILLA, F. Principios fundamentales de diseño de sistemas con bombas PCP.

Figura 7. Envoltentes de las hipocicloides H1 y H2 (geometría PCP 3:4)



Fuente: Modificado de CUILLA, F. Principios fundamentales de diseño de sistemas con bombas PCP.

Como se muestra en la figura 1.7, estando la hipocicloide **H1** fija, cuando **H2** gira con una dirección determinada, su centro **O2** dibuja en dirección opuesta un círculo de centro **O1** y de radio **O1O2** tal que:

$$O2O1 = E = \text{Excentricidad}$$

Durante este movimiento los vértices de **H2** están siempre en contacto con **H1** y entre las hipocicloides se forman superficies cerradas **S1**, **S2** y **S3** de área variable cuya sumatoria (**S1 + S2 + S3**) permanece siempre constante.

Para cumplir la segunda condición, las envoltentes **E1** y **E2** rotan longitudinalmente sobre helicoides tridimensionales, cuya relación de altura entre crestas (paso) será igual a la relación de lóbulos entre ambas piezas.

Con éste desplazamiento helicoidal las superficies **S1**, **S2** y **S3** se convierten en volúmenes lenticulares definidos por los espacios vacíos entre ambos engranes, haciendo de esta forma posible las “cavidades cerradas”

La línea continua de contacto entre el rotor y el estator es lo que se conoce como “línea de sello” y su eficiencia dependerá de la presión diferencial existente entre las dos cavidades consecutivas separadas por dicha línea.

### 1.1.2.1 GEOMETRIA DE BOMBAS PCP.

La geometría de las bombas de cavidades progresivas se define por el número de lóbulos o hélices que posee el rotor y por el número de lóbulos o hélices del estator. Cada rotación del rotor produce dos cavidades de fluido.

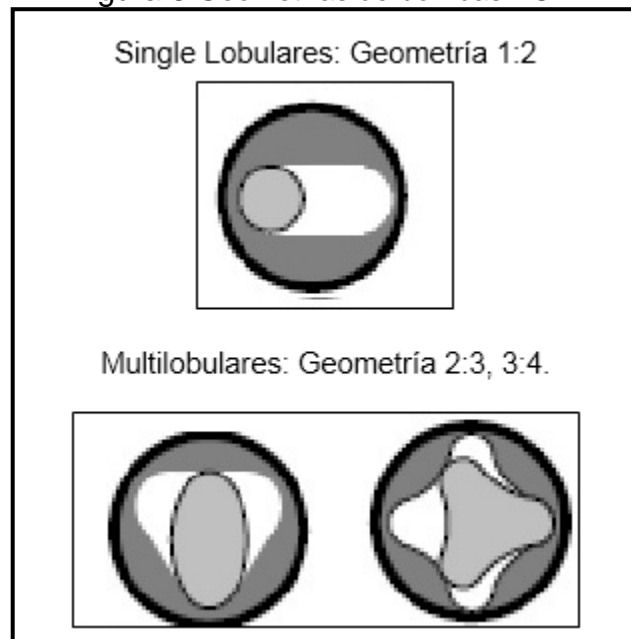
El rotor y el estator constituyen longitudinalmente dos engranajes helicoidales. Su geometría permite la formación de dos o más cavidades separadas, lenticulares y en forma espiral. Su presión incrementa en forma lineal desde la succión hasta la descarga.

El área y la velocidad de rotación son constantes y el caudal siempre va a ser uniforme. Esta acción puede asemejarse a la de un pistón moviéndose sobre un cilindro de longitud infinita. El caudal es directamente proporcional al desplazamiento y a la velocidad de rotación.

Un sistema de bombas de cavidades progresivas para que cumpla con la capacidad de vencer la presión debe tener en cuenta las líneas de sello hidráulico que se forma entre el estator y el rotor.

Existen diferentes geometrías en las bombas de cavidades progresivas y estas dependen del número de lóbulos del estator y el rotor. Estos se clasifican en:

Figura 8 Geometrías de bombas PCP.



Fuente: Modificado de CUILLA, F. Principios fundamentales para diseño de sistemas con bombas PCP.

**Longitud de paso:** La longitud de paso se refiere a la distancia que existe entre dos crestas consecutivas pertenecientes al rotor. En el engranaje helicoidal ( $L_r$ ) es el número de lóbulos de la hélice del rotor, el paso del rotor como ( $P_r$ ) y el paso del estator como ( $P_s$ ), la relación de paso entre el rotor y el estator esta dado como:

En una bomba con geometría 1:2:

$$P_s = 2P_r \quad \text{EC (1.1)}$$

Para una bomba multilobulos, donde ( $L_r$ ) es el número de lóbulos:

$$P_s = \frac{L_r + 1}{L_r} \times P_r \quad \text{EC (1.2)}$$

**Diámetros y Excentricidad:**

El espesor de la hélice del rotor se denomina diámetro menor del rotor y se simboliza ( $d_r$ ). El diámetro de la hélice del rotor es el diámetro mayor ( $D_r$ ). El espesor de la hélice doble que se encuentra en el estator es el diámetro menor del estator ( $d_s$ ) y el diámetro de la misma es el diámetro mayor del estator ( $D_s$ ).

La excentricidad es la distancia entre el eje central del rotor y el eje central del estator y se simboliza con la letra ( $e$ ). El diámetro del rotor medido de cresta a cresta (diámetro mayor) se simboliza como ( $d_r + 2e$ ). En consecuencia las distancias internas del estator serán:  $d_r$  y ( $d_r + 4E$ ).

**Cavidad Cerrada:** Son los volúmenes lenticulares o espirales que se encuentran ubicados en los espacios vacíos entre el estator y el rotor, este volumen se debe a la hélice adicional que posee el estator. La longitud de la cavidad es igual a la longitud de paso del estator.

$$N_c = L_r \left( \frac{H_s}{P_r} - 1 \right) \quad \text{EC (1.3)}$$

Dónde:  $L_r$ : es el número de lóbulos del rotor.

$H_r$ : es la longitud del estator.

$P_r$ : es la longitud del paso del rotor.

**1.1.2.2 CAPACIDAD DE LEVANTAMIENTO.**

En las bombas de cavidades progresivas se genera una presión diferencial que causa la filtración o deslizamiento del fluido a través de los sellos que se generan entre el rotor y el estator que abarca las cavidades de mayor hasta las cavidades menor presión. El deslizamiento de fluido genera un gradiente de presión en la

bomba este depende de la composición del fluido, cuando estos son incomprensibles tendrán un comportamiento lineal, pero cuando son comprensibles como los hidrocarburos estos tendrán un comportamiento exponencial.

La presión que se desarrolla dentro de la bomba de cavidades progresivas depende de dos factores:

- Número de líneas de sellos o etapas.
- Comprensión o interferencia entre el estator y el rotor.

La mayor comprensión entre el estator y rotor se logra variando el diámetro nominal del rotor. La expansión del elastómero durante el proceso hace que la interferencia aumente esto hay que tener muy en cuenta en el momento de elegir el rotor y el estator. Esta expansión del elastómero puede suceder debido a una expansión térmica o una expansión química. El número de veces que las líneas de sellos se repite define el número de etapas de la bomba, y cada una de estas etapas está diseñada para soportar un presión diferencial estipulada, entre más etapas contenga la bomba mayor es la capacidad para vencer la presión diferencial.

Durante la operación de la bomba de cavidades progresivas no se debe exceder las recomendaciones del fabricante debido a que una alta tasa de deslizamiento del fluido de producción puede producir una mayor deformación de los lóbulos del elastómero.

### 1.1.2.3 CAUDAL TEORICO, REAL Y DE DESPLAZAMIENTO.

La capacidad de desplazamiento de una bomba de cavidades progresivas se define como el volumen de fluido producido por la bomba por cada rotación del rotor. Cada vez que la bomba gira va creando acción de bombeo desde la succión hasta la descarga.

Cuando se completa una revolución por el rotor, el volumen contenido entre el estator y rotor es desplazado en el momento del paso del estator. El área transversal total permanece constante a lo largo de la bomba y se desplaza sin pulsaciones.

El volumen se calcula:

$$q_{th} = 0,1485 * A_c * P_s * n_r \quad \text{EC (1.4)}$$

$q_{th}$  = Desplazamiento en bfpd/rpm.

$A_c$  = Área transversal de la cavidad de la bomba en pulg<sup>2</sup>

$P_s$  = Paso de estator en pulgadas.

$n_r$  = Numero de hélices del rotor.

La sección transversal de una bomba de cavidades progresivas puede variar sus dimensiones dependiendo de la empresa fabricante, exposición al fluido y temperatura de operación. El desplazamiento de la bomba debe ser calculado dependiendo de las dimensiones del estator a temperatura ambiente.

Para bombas 1:2

$$q_{th} = 0,594 * e * d_r * p_s \quad \text{EC (1.5)}$$

$q_{th}$  = Desplazamiento de la bomba bfpd/rpm

$e$  = Excentricidad

$d_r$  = Diámetro menor del rotor

$p_s$  = Paso del estator

Para la bomba 2:3:

$$q_{th} = 0,297 * P_s * \frac{\pi(d_r + 2n_r e + 2e)^2 (2n_r + 1)}{4(n_r + 2)^2} \quad \text{EC (1.6)}$$

Durante la operación de la bomba a cierta presión diferencial a través de ella, la cantidad del fluido se desliza a través de las líneas de sello entre el rotor y el estator, causando una reducción en la tasa de flujo. Como consecuencia, la tasa del flujo real de la bomba se calcula así:

$$Q_{real} = Q_{teorico} - Q_{slip} \quad \text{EC (1.7)}$$

$Q_{Real}$  = Flujo real (Bls/día)

$Q_{Teórico}$  = Flujo teórico (Bls/día)

$Q_{Slip}$  = Deslizamiento (Bls/día)

El deslizamiento en una bomba de cavidades progresivas se relaciona con el ajuste entre el estator y el rotor, viscosidad de fluido, presión diferencial etc.

**Caudal Teórico:** Cuando no hay presencia de gas libre dentro de las cavidades del estator y con presión diferencial de cero, la rata de flujo de la bomba es directamente proporcional a la velocidad de rotación y al desplazamiento.

$$q_c = N * q_{th} \quad \text{EC (1.8)}$$

$q_c$  = rata de flujo

$N$  = Velocidad de bombeo rpm

$q_{th}$  = desplazamiento de la bomba en bfpd/rpm

### 1.1.3 TORQUE Y POTENCIA BOMBAS PCP.

La rotación al rotor desde superficie a través de la varilla de bombeo provoca el movimiento de fluido deslizándose por las cavidades. La energía requerida para girar y mover el fluido es suministrada a la bomba en forma de torque, el cual tiene la siguiente expresión:

$$\text{Torque} = K * \text{Potencia} / N \quad \text{EC (1.9)}$$

K= Constante de pasaje de unidades

Potencia= Potencia suministrada

N= Velocidad de operación

El torque está compuesto de la siguiente forma:

$$\text{Torque total} = \text{Torque hidráulico} + \text{Torque de fricción} + \text{Torque resistivo} \quad \text{EC (1.10)}$$

Torque Resistivo= Fricción entre varillas y Tubing.

Torque de Fricción= Fricción entre rotor y estator.

La potencia requerida para suministrar el torque total al sistema será función de este torque y de la velocidad de operación, siendo determinada por:

$$P_{\text{Bomba}} = K * T_{\text{Total}} * N \quad \text{EC (1.11)}$$

$P_{\text{Bomba}}$  = Potencia requerida por la bomba Hp

$T_{\text{Total}}$  = torque total de la bomba lb\*ft

N = Velocidad de operación RPM

K = Constante  $1,91 \times 10^{-4}$

### 1.2. MOTORES HIDRAULICOS DE PERFORACION.

Teniendo en cuenta el principio desarrollado por René Moineau. Se afirma que un rotor helicoidal con uno o más lóbulos giran excéntricamente dentro de un estator que contiene uno o más lóbulos que el rotor. El flujo de éste fluido transmite la potencia que permite el montaje para girar la broca.

El motor de desplazamiento positivo (PDM) ha evolucionado como el método primario del control direccional. Los PDM son herramientas de perforación accionadas por el fluido de perforación que giran la broca independientemente de la rotación de la sarta de perforación.

El poder de un PDM es generado por un rotor y un estator cuyo principio es basado en la geometría descrita por Moineau (1932). El rotor y estator tienen lóbulos helicoidales que engranan para formar cavidades helicoidales selladas.

El flujo del fluido de perforación que pasa por estas cavidades hace que el rotor gire. El estator, que siempre tiene un lóbulo más que el rotor, es moldeado con caucho dentro del tubo del motor.

El rotor posee un movimiento giratorio que va alrededor de su propio eje, este se encuentra unido a un conector flexible o articulado que transmite el momento de torsión. Estas dos secciones se encuentran unidas por un tubo ajustable con el cual se puede graduar el motor, usualmente de 0 a 3 grados, con el cual se le da la curvatura al pozo de acuerdo a los requerimientos del trabajo direccional. El momento de torsión es transmitido a la broca a través de un conjunto de rodamientos que es albergado en cojinetes que permiten la distribución y transmisión de cargas axiales (peso de la broca) y las cargas laterales (peso de la tubería) a la broca.

Los motores de fondo presentan velocidades de salida desde 100 a 300 rpm generalmente, al proporcionar suficiente momento de torsión para accionar brocas tan agresivas como la tipo policristalina (PDC). La velocidad es casi linealmente proporcional a la rata de flujo, y ese momento de torque es proporcional a la caída de presión generada (presión diferencial).

### **1.2.1. COMPONENTES DEL MOTOR HIDRAULICO DE PERFORACION**

Estos motores de desplazamiento positivo funcionan haciendo pasar los fluidos de perforación y estos son empujados hacia la sarta. Este fluido se desplaza por todas las cavidades del motor y la presión que se bombea el fluido causa el movimiento del rotor y a su vez el troqué es transmitido a la broca.

El motor posee los siguientes componentes:

- Válvula de descarga (o Crossover Sub)
- Dispositivo de seguridad (opcional)
- Sección de poder (motor)
- Ensamble de la Acopladora (excentricidad)
- Ensamble de los cojinetes (carga axial y lateral)

#### **1.2.1.1. VALVULA DE DESCARGA**

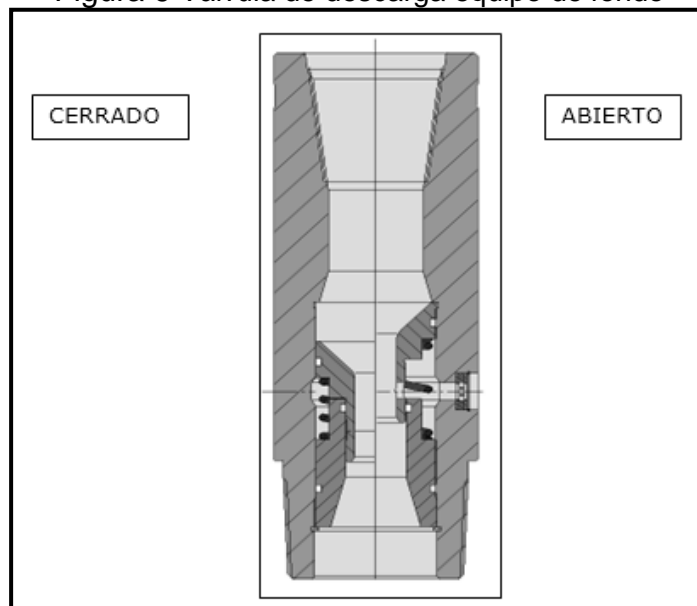
Normalmente es utilizado en un motor, la conexión crossover para conectar el motor y la sarta de perforación. Con estos motores si se quiere se utiliza una válvula de

descarga la cual puede ser utilizada en lugar de una conexión crossover. Esta válvula de descarga permite que la sarta se llene con el fluido desde el espacio anular mientras se está corriendo en el pozo (viaje descendente) y a su vez le permite drenar fluido hacia el anular cuando la sarta sale del pozo (viaje ascendente).

Esta válvula de descarga utiliza un pistón de resorte para cerrar los puertos separando la parte interna de la herramienta del espacio anular. En el momento en que el fluido de perforación no se encuentra circulando el resorte sostiene el pistón en la parte superior. Esto permite que el fluido que está siendo desplazado entre o salga de la sarta a través de los puertos y atraviese el motor.

Cuando las bombas son encendidas para desplazar fluido, la circulación del líquido forma una pequeña caída de presión alrededor del pistón, al igual que una fuerza en el pistón y el resorte. La presión y la fuerza se incrementan a medida que la velocidad del fluido es mayor. Cuando la velocidad del líquido alcanza su punto mínimo, necesita sobrepasar la fuerza del resorte sosteniendo el pistón hacia arriba y la válvula de descarga se cierra. El líquido fluye a través del motor, dándole movimiento a la broca.

Figura 9 Válvula de descarga equipo de fondo



Fuente: Cavo drilling Motors, Manual de operaciones del motor, 4ta edición

#### 1.2.1.2. DISPOSITIVO DE SEGURIDAD

Los motores de perforación direccional cuentan con un dispositivo de seguridad el cual es un componente opcional que posee el motor y cuya función es proveer la

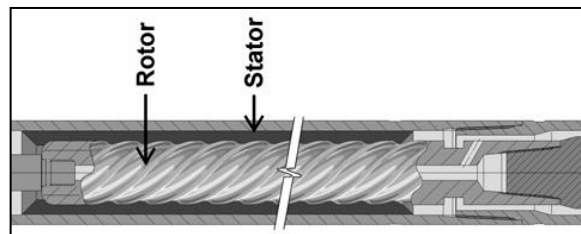
habilidad de remover componentes del motor, incluyendo el rotor y el ensamble inferior en el remoto caso de una falla en la conexión del motor. Este es utilizado la mayoría de veces en un motor cuando las conexiones de la herramienta están expuestas a carga excesiva para aplicaciones extremas en perforación. Este dispositivo de seguridad ofrece prevención de posibles operaciones de pesca en el pozo. Este dispositivo de seguridad se proporciona por el fabricante en la mayoría de tamaños del motor.

### 1.2.1.3. SECCION DE FUERZA.

La sección de fuerza dentro del motor es la parte del motor que convierte la energía hidráulica en energía mecánica (rpm y torque), que resulta del movimiento de la broca.

La sección de fuerza está compuesta de dos partes, el rotor y el estator. Estos dos componentes forman un sello continuo a lo largo de sus puntos de contacto. El rotor es una aleación de acero con un patrón helicoidal (Múltiples lóbulos). Este es cromado para reducir el desgaste, fricción, y corrosión. Existen otros tipos de revestimiento estos son utilizados dependiendo de la aplicación específica o ambiente en el que el motor sea utilizado. El rotor puede tener inyectores y agujeros axiales provisionales para que el líquido pase y extienda el alcance de la rata de flujo.

Figura 10 Motor hidráulico primario de fondo.



Fuente: Cavo drilling Motors, Manual de operaciones del motor, 4ta edición

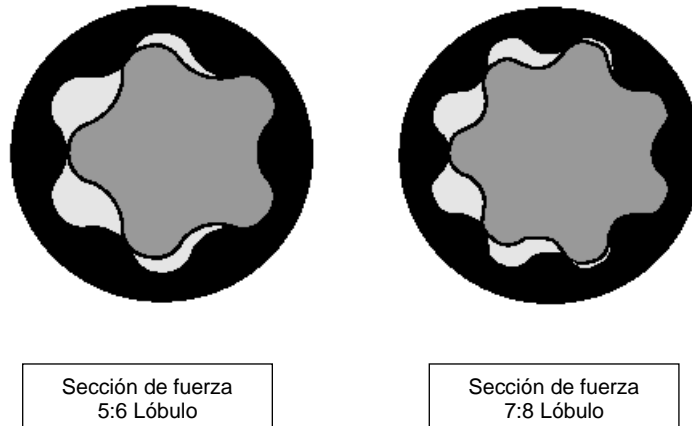
El estator es una línea tubular de acero con un componente de elastómero que es delineado con un patrón helicoidal que va unido al rotor. Tenemos una variedad de elastómeros dependiendo del tipo de fluido y la temperatura del fondo del pozo.

La sección de poder de este motor está diseñada para proveer varios rangos de velocidad. Estos diferentes tipos de velocidad pueden ser logrados con la variación de la relación del lóbulo del estator/rotor y del hundimiento de un eje de pliegue.

Generalmente a mayor cantidad de lóbulos hay mayor troque y baja velocidad, mientras que a menor número de lóbulos hay menor troque y mayor velocidad. El número de lóbulos del estator siempre excede el número de lóbulos del elastómero

por uno. Por lo tanto, la nominación para la relación del lóbulo del estator/rotor es la siguiente: 5:6, 7:8, 9:10 etc.

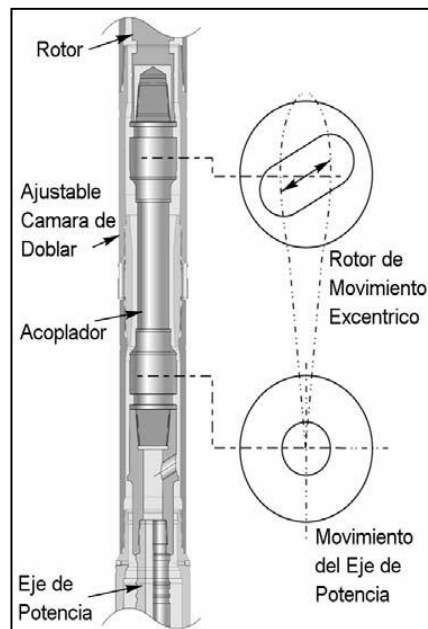
Figura 11 Sección transversal de motor configuración 5:6.



Fuente: Cavo drilling Motors, Manual de operaciones del motor, 4ta edición

#### 1.2.1.4. SECCION ACOPLADORA.

Figura 12 Ensamble de sección acopladora



Fuente: Cavo drilling Motors, Manual de operaciones del motor, 4ta edición

El ensamble de la acopladora está sujeta a la parte inferior del rotor y transmite troqué rotacional y velocidad al eje de transmisión y a la broca. El ensamble de la acopladora convierte el movimiento excéntrico del rotor en movimiento concéntrico del eje de transmisión.

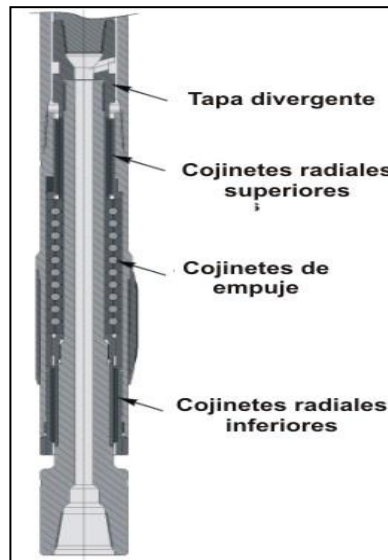
Adicionalmente, la acopladora flexible permite la ubicación de un punto de doblez en su caja externa para motores estirales. Los ángulos de la caja de doblez son de 0 a 3 grados en la mayoría de los casos y pueden ser fijos o ajustables en la torre de perforación.

#### 1.2.1.5. SECCION DE COJINETES.

El ensamble de los cojinetes soporta el eje de transmisión del motor, el cuál transmite empuje y poder rotacional para la broca. Los parámetros de perforación como peso de la broca, velocidad de circulación y presión de caída de la broca, afectan el ensamble de los cojinetes directamente. Normalmente se emplean dos tipos de cojinetes, radiales y de empuje.

Comúnmente se utiliza un diseño de múltiples esferas apiladas para los cojinetes de empuje. Este tipo de cojinete soporta la fuerza descendente que resulta del peso de la broca y la carga de la combinación del empuje hidráulico y el peso de las cargas de los componentes internos. El soporte de los cojines radiales, sostienen la carga radial en el eje de la transmisión y regula el fluido de perforación a través del ensamble de los cojinetes. Este líquido enfría y lubrica los cojinetes radiales y de empuje. En los cojinetes radiales es comúnmente utilizado baldosas de carburo de tungsteno para un desempeño máximo y una resistencia superior al desgaste radial.

Figura 13 Ensamble de sección de cojinetes



Fuente: Cavo drilling Motors, Manual de operaciones del motor, 4ta edición

### 1.2.2. CONSIDERACIONES DE SELECCIÓN.

La propuesta para una operación de perforación puede ser muy compleja y requiere planeación detallada y un número de factores deben ser tomados en consideración al seleccionar el motor.

- La aplicación particular del motor es la primera consideración.
  - ✓ Perforación Direccional
  - ✓ Perforación Horizontal
  - ✓ Perforación Direccional “Crossing”
  - ✓ Funcionamiento de perforación vertical.
  - ✓ Perforación con revestimiento
  - ✓ Perforación con aire
  - ✓ Repaso/ apertura del pozo/ repaso más ancho
  - ✓ Prevención de desgaste para el revestimiento.
  
- Tipo de broca
- Velocidad
- Troque
- Peso de la Broca
- Presión de caída de la Broca
- Rata de flujo / Velocidad anular requerida para limpiar el pozo
- Tipo de fluido (componentes)
- Circulación de la temperatura en el fondo del pozo
- Tamaño del pozo
- Especificaciones tubulares
- Ubicación del estabilizador
- Descripción del pozo.
- Ubicación

### 1.2.3. CURVAS DE DESEMPEÑO DEL MOTOR DE PERFORACION.

En la actualidad existen diversas compañías y marcas que suministran motores de fondo a nivel mundial. Sin embargo la característica más condicional de estos equipos está ligada al tamaño o diámetro externo del motor. Entre los más comunes se encuentran:

- |            |          |
|------------|----------|
| • 1-11/16” | • 3-3/4” |
| • 2-1/16”  | • 4-3/4” |
| • 2-7/8”   | • 5-1/2” |
| • 3-1/8”   | • 6-1/2” |
| • 3-1/2”   | • 6-3/4” |

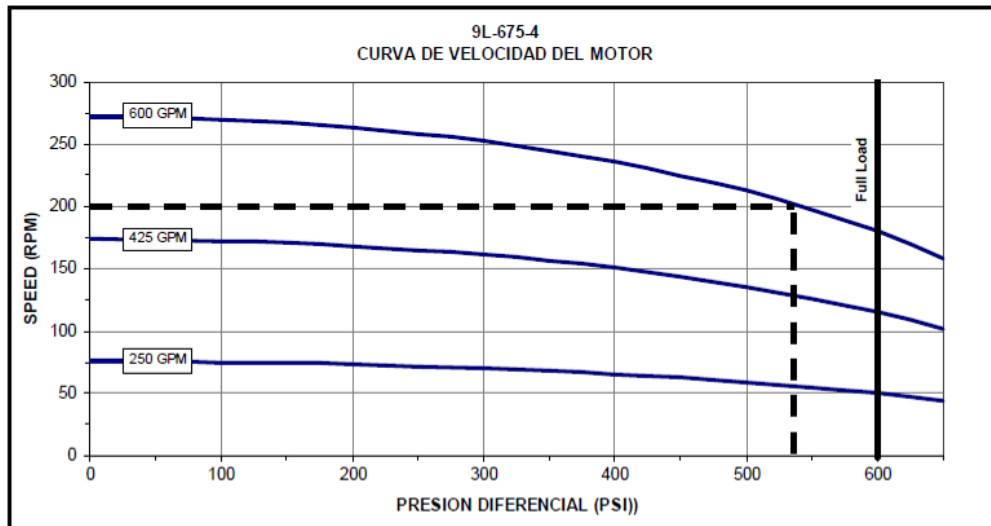
- 7-3/4"
- 8-1/2"
- 9-5/8"
- 11-1/4"

Para cada diámetro se puede disponer de diferentes configuraciones con sus respectivas curvas de desempeño y tablas de predicción. Para lo cual las diferentes compañías emplean descripciones numéricas de sus modelos que incluyen diámetro, número de lóbulos de rotor o estator, número de etapas, entre otras características.

Las curvas de desempeño de un motor es dado dependiendo del tamaño de cada motor. Una curva de velocidad, una curva de poder y una curva de rotación son suministradas. Las curvas de desempeño son dadas como función de la presión diferencial empleada a través del motor de perforación. La condición de la carga completa es también indicada en las curvas trazadas.

Las siguientes graficas corresponden a un motor marca Cavo modelo 9L-675-4 (9 lóbulos, de 6-3/4" de diámetro y 4 etapas). Indicando una operación a 600GPM y una presión diferencial de 530 psi.

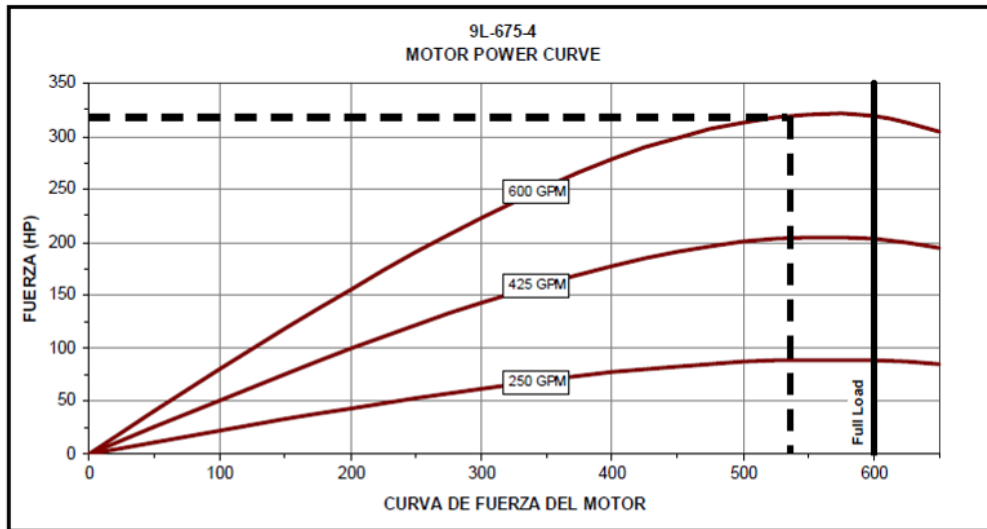
Figura 14 Curva de desempeño Motor hidráulico velocidad vs Presión diferencial



Fuente: Cavo drilling Motors, Manual de operaciones del motor, 4ta edición

En la Figura 14 se observa que a una tasa de flujo de 600GPM y 530 psi de presión diferencial, el motor imprime una rotación estimada de 200rpm.

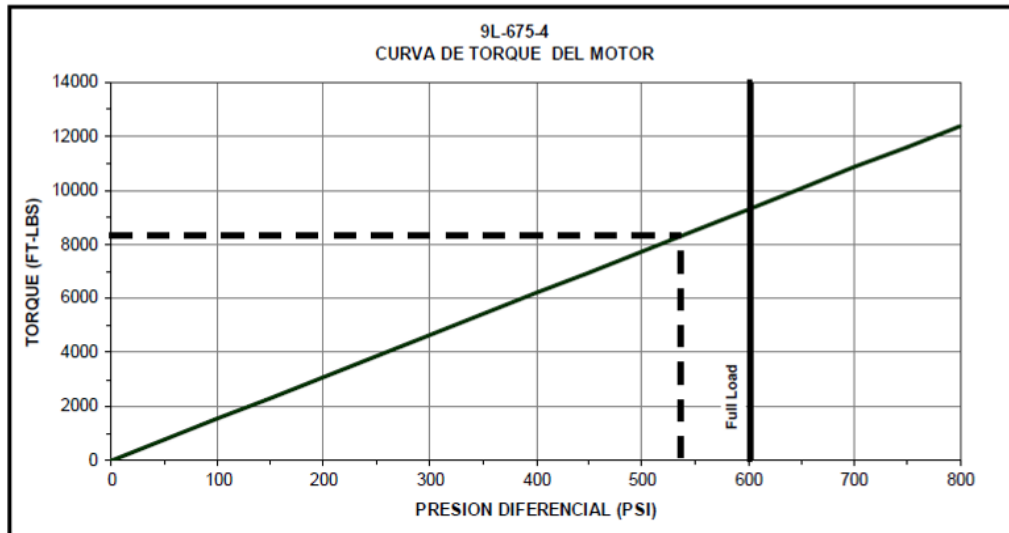
Figura 15 Curva de desempeño Motor hidráulico Potencia vs Presión diferencial



Fuente: Cavo drilling Motors, Manual de operaciones del motor, 4ta edición

En la Figura 15 se observa que a una tasa de flujo de 600GPM y 530 psi de presión diferencial, el motor desarrolla una potencia estimada de 320 HP.

Figura 16 Curva de desempeño Motor hidráulico Torque vs Presión diferencial



Fuente: Cavo drilling Motors, Manual de operaciones del motor, 4ta edición

En la Figura 16 se observa que a una tasa de flujo de 600GPM y 530 psi de presión diferencial, el motor desarrolla un torque estimado de 8500 ft-lb.

Las curvas de desempeño varían unas de otras según las especificaciones que tenga el motor dependiendo de la empresa fabricante y sus diseños.

## 2. VIABILIDAD TECNICA DEL SISTEMA HIDRO-PCP.

La viabilidad técnicas del uso de los motores hidráulicos de fondo en el sistema de levantamiento artificial PCP convencional está fundamentada en la revisión de la demanda de torque y rpm requeridas por el sistema PCP teniendo en cuenta las modificaciones correspondientes como la eliminación de la sarta de varillas y la demanda de torque y rpm disponibles o desarrollados en los motores hidráulicos de fondo. Si las capacidades demandadas y ofertadas son similares, basta con un esquema de ensamble de fondo y de superficie para poder declarar que existe la viabilidad técnica del sistema hidro-PCP.

### 2.1. TORQUE DE LA BOMBAS PCP (T bomba)

A través del toque se trasmite la energía o potencia requerida por la bomba para su funcionamiento. Como se expuso en el numeral 1.1.3, el torque total requerido por el sistema PCP convencional está compuesto de la siguiente forma:

$$\text{Torque total} = \text{Torque hidráulico} + \text{Torque de fricción} + \text{Torque resistivo} \quad \text{EC (2.1)}$$

Torque hidráulico = Para mover el fluido venciendo el  $\Delta P$  de la bomba.

Torque Resistivo = Fricción entre varillas y Tubing.

Torque de Fricción = Fricción entre rotor y estator.

A diferencia del sistema PCP convencional que transmite el torque desde un motor en superficie mediante una sarta de varillas, el sistema hidro-PCP no emplea sarta de varillas debido a que su potencia es suministrada con un motor de fondo. Por lo tanto el componente de torque resistivo no hace parte de la ecuación.

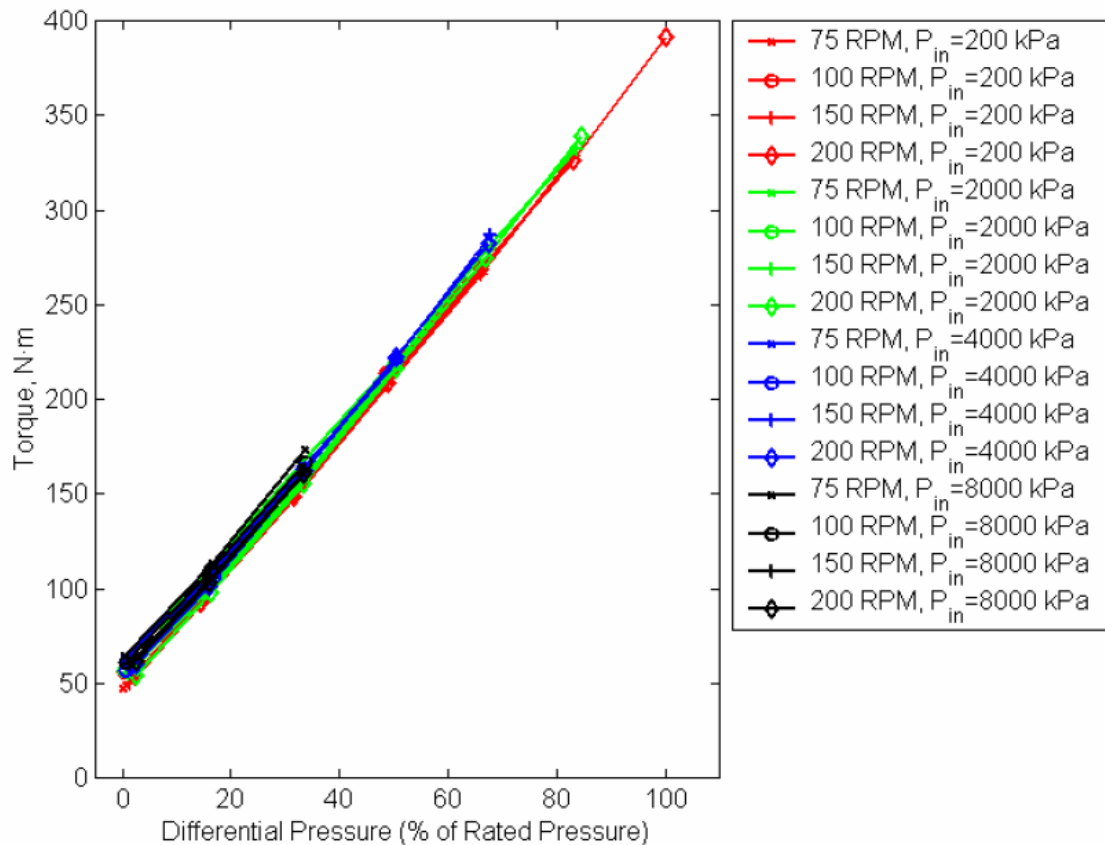
El componente de fricción representa el torque requerido para vencer la fricción mecánica entre el rotor y el estator. El componente hidráulico representa el torque requerido para mover el fluido venciendo la presión diferencial a través de la bomba. De modo que el torque requerido por una bomba PCP esta descrito en la siguiente ecuación:

$$T_{\text{bomba}} = T_{\text{hidráulico}} + T_{\text{fricción}} \quad \text{EC (2.2)}$$

#### 2.1.1. TORQUE HIDRAULICO

De igual forma el torque hidráulico en aplicaciones monofásicas está directamente relacionado con la presión diferencial, caudal y la velocidad de operación, como se muestra en el siguiente grafico

Figura 17 Torque de la bomba PCP a diferentes velocidades y cargas de presión



SKOCZYLAS, Paul. PCP Hydraulic Torque in Multiphase Conditions. CFER TEC.

$$T_{\text{hidráulico}} = C * Q_{\text{teórico}} * \Delta P / \text{RPM} \quad \text{EC (2.3)}$$

$T_{\text{hidráulico}}$  = Torque hidráulico (lb-ft)

$Q_{\text{teórico}}$  = Caudal o desplazamiento teórico (BFPD)

$\Delta P$  = Presión diferencial (psi)

RPM = Velocidad de operación (rpm)

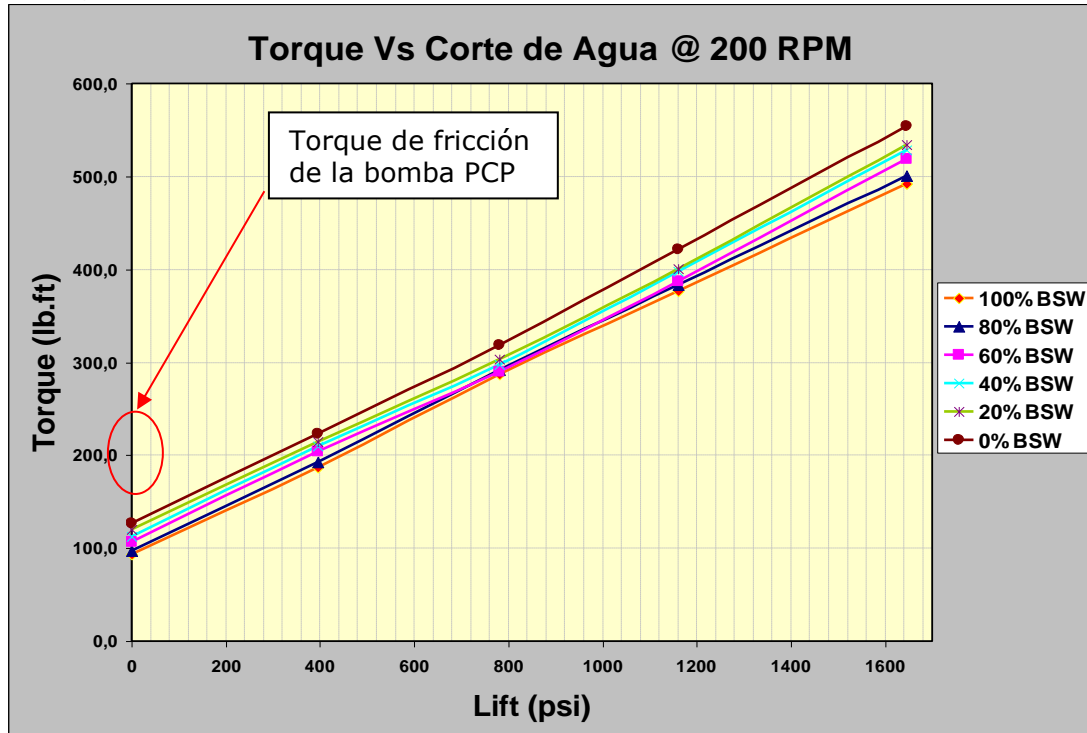
C = Constante acorde a unidades de variables. 0,0897 (lb-ft\*rpm / BFPD\*psi)

### 2.1.2. TORQUE DE FRICCIÓN.

El torque de fricción puede variar sustancialmente entre diferentes modelos de la bomba. Muchos factores pueden afectar significativamente el torque de fricción de la bomba en operación, tales como la lubricidad del fluido, el ajuste de interferencia final debido a hinchamiento y/o expansión térmica, propiedades del elastómero, grado de desalineamiento entre las etapas resultado de manufactura, longitud de la bomba, etc. Por lo tanto no existe una ecuación que permita determinar su valor.

Para tal propósito se realizan pruebas de comportamiento o desempeño (performance) para cada bomba específica a una presión diferencial de 0 psi.

Figura 18 Torque de la bomba PCP a 200rpm y diferentes cortes de agua.



Fuente: CHAPARRO, Erwin. Efecto del corte de agua y la viscosidad del fluido de producción en la eficiencia volumétrica de las bombas de cavidades progresivas. Universidad Industrial de Santander, 2008.

## 2.2. VELOCIDAD DE OPERACIÓN BOMBAS PCP.

La velocidad de operación normal de las bombas de cavidades progresivas está limitada en la actualidad por la resistencia de sus componentes, en especial del elastómero. Normalmente se opera a velocidades en rangos desde 80rpm a 300rpm. Sin embargo existen aplicaciones de hasta 500rpm. Lo que afecta el tiempo de vida útil de la bomba.

La velocidad de operación está directamente relacionada con la tasa de producción debido a que el desplazamiento de la bomba es una relación directa de las rpm de operación. De modo que se ajusta la velocidad de operación con el fin de obtener las tasas de flujo deseadas.

El fenómeno de deslizamiento causado por la presión diferencial existente entre las etapas de la bomba puede verse disminuido a altas velocidades y significativo a bajas velocidades. De igual forma es recomendable operar a altas velocidades con

presencia de líquidos de baja viscosidad y a baja velocidad para aquellos de alta viscosidad como crudos pesados y Extrapesados.

La presencia de arena y de gas libre en los fluidos de producción es sin duda un parámetro fundamental a tener en cuenta al momento de decidir la velocidad de operación del sistema.

En términos generales, las velocidades requeridas en el sistema PCP deben ir desde 80 a 400 rpm.

### **2.3. TORQUE Y RPM DE LOS MOTORES HIDRAULICOS DE FONDO.**

Las capacidades de torque, potencia desarrollada y velocidad de los motores hidráulicos de fondo dependen de características propias como:

- **Configuración:** (Nº lóbulos Rotor/ Estator)
- **Diámetro:** (Capacidad de potencia y flujo requerido)
- **Nº Etapas:** (Capacidad de presión diferencial y potencia desarrollada)
- **Tecnología:** Diferentes tecnologías pueden aumentar capacidades de los motores en relación a caudales, presiones y potencia.

Los motores hidráulicos de fondo actualmente empleados en las operaciones de perforación están disponibles para diferentes marcas, configuraciones, tamaños y aplicaciones requeridas. Algunas compañías que suministran estos equipos son NOV, Toro DownHole Tools, CAVO, entre otros, la determinación de las capacidades de cada motor están representadas en las curvas de desempeño de cada equipo disponibles en los catálogos de las diferentes compañías de servicios.

En los catálogos disponibles de estas compañías demuestran que los motores tienen diámetros que van desde 1-11/16" hasta 11-1/4". Sin embargo para efectos de ser empleados en sistemas de levantamiento, los diámetros deben ser inferiores para poder ser corridos dentro de los casing de producción.

En la Tabla 2. Se muestra una tabla resumen de los motores disponibles de la compañía NOV en la que se observa diferentes configuraciones para diferentes diámetros de motor. En la siguiente tabla se muestran los valores mínimos, máximos y promedios de las características obtenidas en los motores desde 1-11/16" hasta 11-1/4".

Tabla 2. Parámetros operativos de motores hidráulicos convencionales.

Diámetro de motor	Max Caudal (gpm)			Max Velocidad (rpm)			Max ΔP (psi)			Max Torque (lb-ft)		
	Menor	Prom	Mayor	Menor	Prom	Mayor	Menor	Prom	Mayor	Menor	Prom	Mayor
1-11/16"	45	45	45	582	582	582	730	730	730	122	122	122
2-1/8"	50	50	50	515	515	515	870	870	870	184	184	184
2-7/8"	80	108	125	372	421	470	505	735	1020	315	420	516
3-1/8"	140	140	140	252	252	252	460	460	460	660	660	660
3-3/8"	120	120	120	188	298	408	460	605	750	570	676	782
3-3/4"	160	168	200	89	173	250	295	466	725	918	1144	1314
4-3/4"	250	261	300	79	212	516	280	658	1135	1218	2206	3500
5"	350	350	350	302	302	302	860	1026	1215	2372	2922	3500
6-1/4"	400	440	500	82	170	276	425	684	1070	2784	4515	6340
6-1/2"	500	500	500	145	340	535	480	542	605	1296	2785	4274

Tabla 3 Resumen motores hidráulicos NOV disponibles

MOTOR HANDBOOK, 10th Edition

### Motor Performance Summary

Size	Lobes	Stages	Maximum Flow Rate	Maximum Bit Speed	Rev / Unit Volume	Standard Max Differential Pressure	Torque @ Max Pressure				
			(gpm)	(lpm)	(RPM)	(rev/gal)	(rev/L)	(psi)	(kPa)	(lb-ft)	(N-m)
<b>Coiled Tubing Power Sections</b>											
1 11/16"	5/6	5.0	45	170	582	12.9	3.4	730	5,030	122	170
2 1/8"	5/6	6.0	50	190	515	11.3	2.7	870	6,000	184	250
2 7/8"	5/6	3.5	120	450	372	3.10	0.82	505	3,480	315	430
2 7/8"	5/6	4.7	125	470	470	3.76	0.99	680	4,690	431	580
2 7/8"	5/6	7.0	80	300	422	5.28	1.39	1,020	7,030	516	700
3 1/8"	7/8	3.0	140	530	252	1.80	0.48	460	3,170	660	890
<b>Monoflo Power Sections</b>											
3 3/8"	4/5	5.0	120	450	408	3.40	0.90	750	5,170	570	770
3 3/8"	7/8	3.0	120	450	188	1.56	0.41	460	3,170	782	1,060
3 3/4"	4/5	3.5	160	610	250	1.56	0.41	520	3,590	918	1,240
3 3/4"	5/6	5.0	160	610	242	1.51	0.40	725	5,000	1,055	1,430
3 3/4"	6/7	3.0	200	760	160	0.80	0.21	440	3,030	1,314	1,780
3 3/4"	7/8	2.0	160	610	89	0.56	0.15	295	2,030	1,311	1,780
3 3/4"	7/8	2.3	160	610	122	0.76	0.20	350	2,410	1,124	1,520
4 3/4"	2/3	8.0	260	980	516	1.99	0.53	1,135	7,830	1,428	1,940
4 3/4"	4/5	3.5	250	950	267	1.07	0.28	520	3,590	1,218	1,650
4 3/4"	4/5	6.0	250	950	253	1.01	0.27	840	5,790	2,011	2,730
4 3/4"	4/5	6.3	250	950	253	1.01	0.27	955	6,580	2,286	3,100
4 3/4"	5/6	8.3	300	1,140	326	1.09	0.29	1,190	8,200	3,207	4,350
4 3/4"	7/8	2.0	250	950	80	0.32	0.08	280	1,930	1,806	2,450
4 3/4"	7/8	2.2	250	950	137	0.55	0.15	335	2,310	1,479	2,010
4 3/4"	7/8	2.6	300	1,140	79	0.27	0.07	390	2,690	3,500	4,750
4 3/4"	7/8	2.9	250	950	83	0.33	0.09	405	2,790	2,791	3,780
4 3/4"	7/8	3.8	250	950	131	0.52	0.14	535	3,690	2,332	3,160
5"	6/7	6.0	350	1,320	303	0.87	0.23	860	5,930	2,372	3,220
5"	6/7	7.0	350	1,320	302	0.86	0.23	1,005	6,930	2,895	3,930
5"	6/7	8.0	350	1,320	302	0.86	0.23	1,215	8,380	3,500	4,750
6 1/4"	4/5	7.5	400	1,510	276	0.69	0.18	1,070	7,380	4,065	5,510
6 1/4"	5/6	5.5	500	1,890	232	0.46	0.12	800	5,520	4,675	6,340
6 1/4"	7/8	2.8	400	1,510	131	0.33	0.09	425	2,930	2,784	3,770
6 1/4"	7/8	2.9	500	1,890	82	0.16	0.04	425	2,930	6,277	8,510
6 1/4"	7/8	4.8	400	1,510	131	0.33	0.09	700	4,830	4,773	6,470
6 1/2"	1/2	4.0	500	1,890	535	1.07	0.28	480	3,310	1,296	1,760

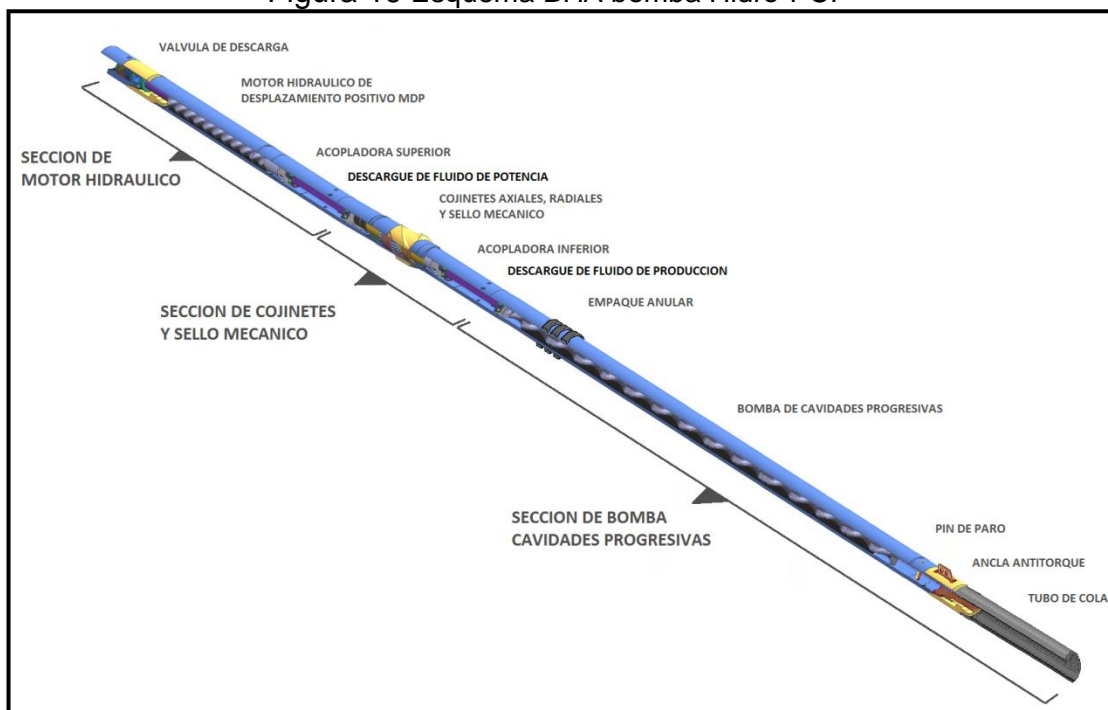
Fuente: Catalogo de motores de perforación. NOV

Como se observa en la tabla 3, los motores hidráulicos de fondo desarrollan características de velocidad y toque adecuados y ajustados a las demandas por las bombas PCP. Por lo tanto es factible usar estos motores en el sistema de levantamiento artificial de bombas de cavidades progresivas. Se debe seleccionar el equipo adecuado acorde a la bomba PCP a ser instalada y a la aplicación a fin de determinar los parámetros operativos requeridos en el motor para el correcto funcionamiento de la bomba PCP.

#### 2.4. MECANISMO DE ACOPLE MOTOR HIDRAULICO-BOMBA PCP.

Para un ensamble mecánico de una bomba PCP con motor hidráulico de fondo, es necesario analizar las fuerzas involucradas y el flujo de fluidos involucrados en el sistema.

Figura 19 Esquema BHA bomba Hidro-PCP



El ensamble de fondo del sistema hidro-PCP. Está constituido por tres secciones. La sección de motor hidráulico que transforma la potencia hidráulica del fluido motriz en potencia mecánica mediante torque y velocidad angular. La sección de cojinetes y sello mecánico transforma el movimiento excéntrico del rotor correspondiente al motor hidráulico en concéntrico de modo que puede ser empleado un sello mecánico que impide la mezcla de fluido de potencia con el fluido de producción, pero permite el movimiento rotacional que transmite la rotación del rotor de la bomba de cavidades progresivas. Esta sección contiene cojinetes para carga axial y carga radial que permiten sostener la carga axial de los rotores y los fluidos. En la

parte inferior se encuentra una segunda sección acopladora que convierte el movimiento rotacional concéntrico transmitido del motor en movimiento excéntrico para el rotor de la bomba PCP. La sección inferior está compuesta por una bomba de cavidades progresivas que es su parte exterior contiene un empaque mecánico que se sienta en el casing de producción permitiendo que el fluido de producción bombeado por la PCP fluya por el espacio anular hasta superficie.

### **3. SISTEMA HIDRO-PCP**

El sistema hidro-PCP está compuesto por un equipo de superficie que emplea un fluido de potencia almacenado en superficie que es bombeado a determinado caudal y presión a través de una tubería de producción transmitiendo la potencia mediante el fluido hasta el equipo de subsuelo, donde un motor hidráulico convierte la potencia hidráulica en mecánica expresada en rotación y torque. Una vez el fluido motriz pasa a través del motor de fondo, retorna a superficie para ser almacenado y bombeado nuevamente, creando un circuito cerrado. El motor de fondo transmite el movimiento de rotación a través de un eje hasta la bomba de cavidades progresivas que imprime energía al fluido de formación y lo desplaza hasta la superficie para ser tratado.

#### **3.1. EQUIPO DE SUBSUELO HIDRO-PCP**

El equipo de subsuelo se instala en pozo dentro de casing de producción y está compuesto por la sección de motor hidráulico, la sección de cojinetes y sello mecánico y la sección de bomba de cavidades progresivas.

##### **3.1.1. SECCION DE MOTOR HIDRAULICO**

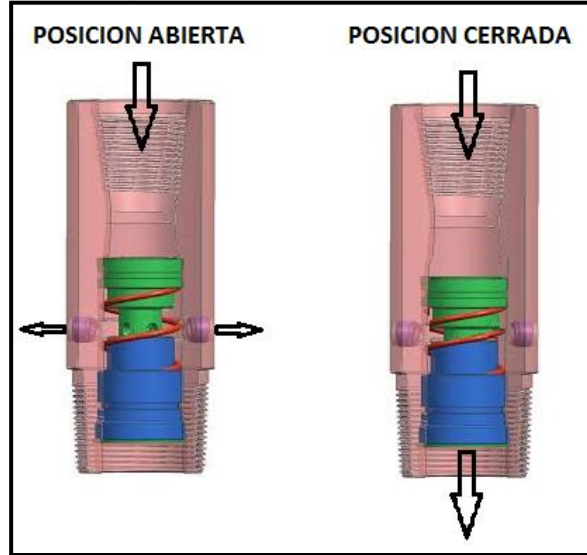
La sección de motor hidráulico está compuesta por una válvula de descarga, un motor de desplazamiento positivo compuesto de estator-rotor y un niple de retornos que contiene orificios que permiten el flujo de fluido hacia el espacio anular o hacia una segunda tubería de producción que retorne el fluido motriz a superficie mediante un circuito cerrado.

###### **3.1.1.1. VALVULA DE DESCARGA**

La válvula de descarga es un dispositivo a manera de niplecilla compuesta internamente por un elemento desplazante. En su parte inferior un resorte mantiene el elemento en posición abierta, donde tiene comunicación hidráulica con el espacio anular.

Durante la operación, la presión de bombeo supera la fuerza ejercida sobre el resorte y desplaza el elemento a la parte inferior donde las boquillas son tapadas u obstruidas por el cuerpo de la válvula. Impidiendo así la comunicación con el anular y dirigiendo el fluido motriz hacia el rotor del motor hidráulico.

Figura 20 Válvula de descarga



Fuente: Modificado de [www.steelmakingmachine.es](http://www.steelmakingmachine.es)

La válvula de descarga permite comunicación tubular con anular durante running y pulling del sistema de completamiento, lo cual es necesario para mantener balanceadas las columnas hidrostáticas y para evitar sacar tubería con fluidos dentro. Durante el inicio y detención del bombeo de fluido motriz, la válvula permanece abierta, por lo tanto la nivelación de las columnas es casi inmediata y se evita el back spin presente en el sistema PCP convencional.

### 3.1.1.2. MOTOR HIDRAULICO.

El motor hidráulico es un ensamble de estator-rotor que forman cavidades selladas por medio de las cuales el fluido motriz fluye a determinada presión diferencial generando torque y ciertas rpm acorde al caudal bombeado y la capacidad volumétrica de cada cavidad. Los motores son multilobulares y acorde a los requerimientos de diámetro, torque y velocidad pueden ser seleccionados de las cartas de desempeño de cada proveedor.

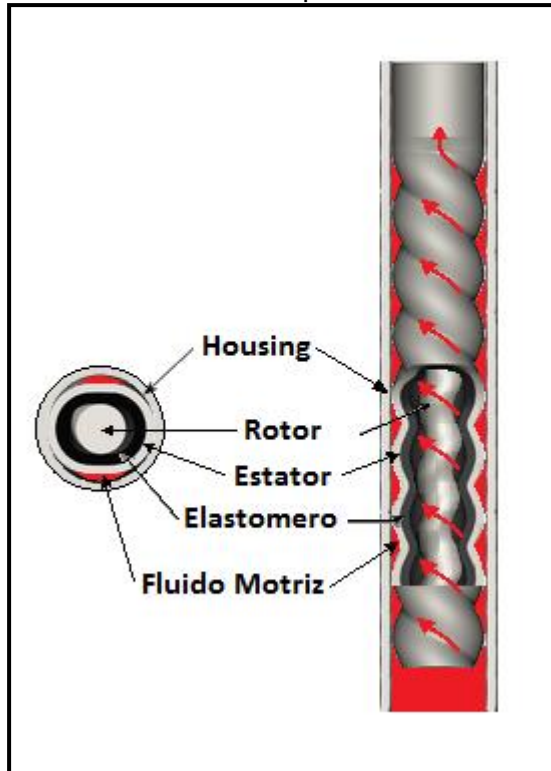
### 3.1.1.3. NIPLE DE RETORNO.

El niple de retorno es un elemento que permite que el fluido motriz después de atravesar el motor hidráulico sea retornado a superficie mediante una tubería independiente en caso de circuito cerrado o por el espacio anular, caso en el cual se mezcla con los fluidos de producción bombeados por la bomba PCP.

Cuando el fluido motriz desee ser retornado por una tubería independiente, es necesario que el estator del motor de fondo sea de pared uniforme (espesor) permitiendo en su parte exterior unas cavidades por donde el fluido retorna sin

mezclarse con el fluido de producción. De esta forma se mantiene un circuito cerrado para el fluido motriz.

Figura 21 Motor hidráulico con estator de pared uniforme. Flujo motriz de retorno.



### 3.1.2. SECCION DE COJINETES Y SELLO MECANICO

La sección de acopladoras, cojinetes y sello mecánico constituye la sección intermedia del equipo de fondo del sistema Hidro-PCP, sus funciones principales son:

1. Transmitir el movimiento rotacional generado en el motor hidráulico a través de un eje hasta la bomba PCP.
2. Sostener las cargas axiales y radiales del equipo de fondo.
3. Impedir la comunicación de fluido motriz con el fluido de producción.

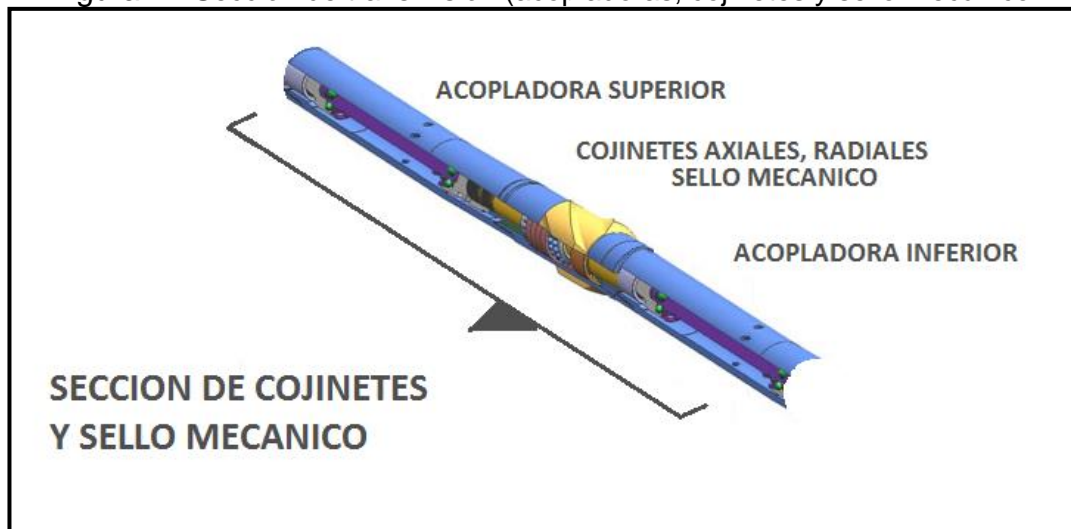
#### 3.1.2.1. ACOPLADORAS SUPERIOR E INFERIOR.

La sección de cojinetes y sello mecánico es muy importante para la correcta operación del sistema hidro-PCP. Esta sección está compuesta por una acopladora superior que convierte el movimiento excéntrico del rotor del motor en concéntrico y una acopladora inferior que revierte el movimiento concéntrico en excéntrico.

### 3.1.2.2. COJINETES Y SELLO MECANICO

En medio de las acopladoras se instalan cojinetes para esfuerzos radiales compuesto por anillos de tungsteno y para esfuerzos axiales compuesto de esferas que permiten soportar el esfuerzo axial producido por el peso de los rotores tanto del motor como de la bomba PCP, en el sistema convencional PCP este esfuerzo es soportado por el cabezal de superficie y transmitido a través de la sarta de varillas que mantienen el rotor suspendido (espaciado).

Figura 22 Sección de transmisión (acopladoras, cojinetes y sello mecánico)



En la mitad de la sección de cojinetes se instala un sello mecánico que permite el movimiento rotacional concéntrico del eje central e impide el flujo de fluidos entre el motor hidráulico y la bomba de cavidades progresivas.

### 3.1.3. SECCION DE BOMBA DE CAVIDAD PROGRESIVA

La sección de bombeo de fluido está conformada por una bomba de cavidades progresivas (Estator-Rotor), un empaque anular, un pin de paro, ancla anti-torque y tubería de cola. La función principal de la sección de bombeo es imprimir la energía suficiente al fluido de formación para fluir hasta superficie hacia las facilidades de producción.

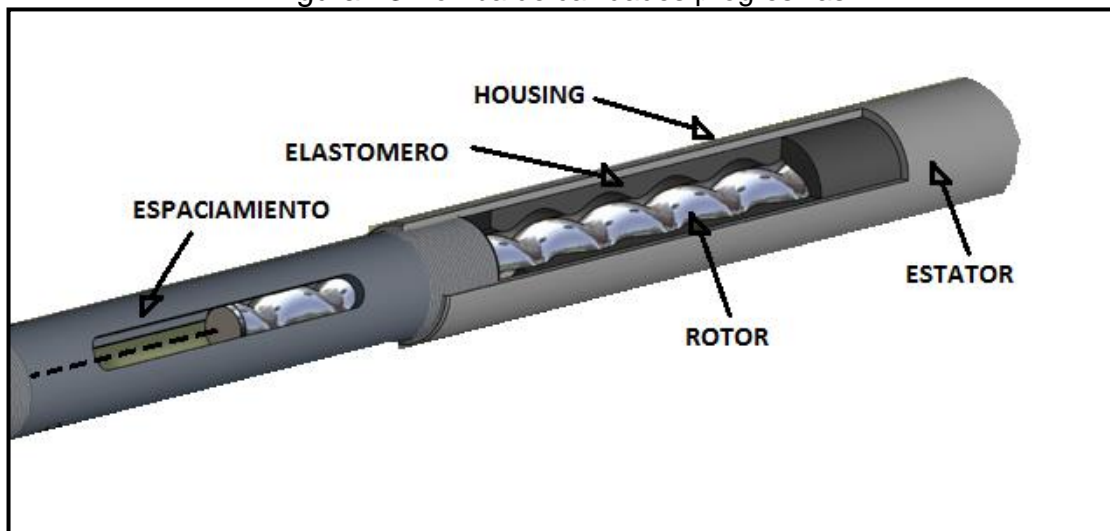
#### 3.1.3.1. NIPLE DE DESCARGA

El niple de descarga es una extensión tubular instalada en la parte superior de la bomba PCP que contiene agujeros que permiten el flujo de los fluidos de producción bombeados por la PCP. En su interior alberga la acopladora inferior que sostiene el rotor.

### 3.1.3.2. BOMBA DE CAVIDADES PROGRESIVAS

Las bombas de cavidades progresivas al igual que el motor hidráulico, están conformadas por un estator y un rotor. Aunque pueden ser multilobulares, frecuentemente son mono lobular. Su selección depende de la profundidad de instalación que está directamente relacionada con la presión de levantamiento o presión de descarga disponible de la bomba y del caudal o rango del caudal a producir teniendo en cuenta la posibilidad de variación con la velocidad o rpm de operación.

Figura 23 Bomba de cavidades progresivas



Fuente: Modificado ZAMBRANO Gerardo. Bombeo por cavidades progresivas PCP.

### 3.1.3.3. EMPAQUE ANULAR

El empaque anular Permite que el fluido de producción que se encuentra por debajo del empaque, una vez pase por la bomba de cavidades progresivas el fluido sale nuevamente hacia el espacio anular para fluir hasta superficie e impedir que el fluido sea recirculado.

### 3.1.3.4. PIN DE PARO

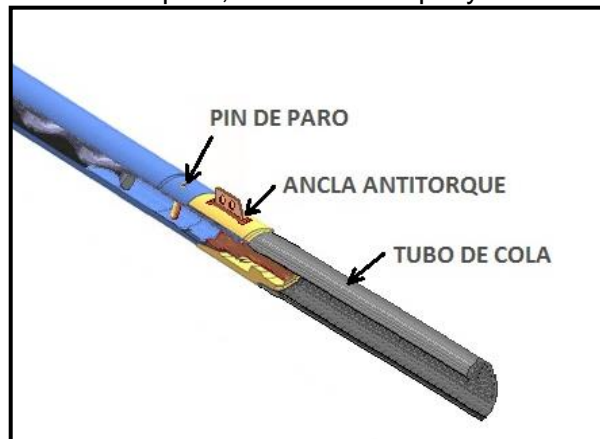
El pin de paro es un accesorio instalado en la parte inferior de la bomba PCP que en el sistema convencional sirve como referencia para realizar el espaciado requerido por el rotor para ser correctamente instalado. En el sistema Hidro PCP, el rotor es instalado previamente espaciado y sostenido por la sección de cojinetes. En este nuevo sistema el pin de paro tiene la función de evitar que el rotor vaya a fondo del pozo cuando existe una falla o ruptura en el eje que transmite el movimiento

rotacional del motor a la bomba. Permitiendo así que durante el pulling el rotor sea llevado a superficie junto con el estator.

### 3.1.3.5. ANCLA ANTITORQUE

El ancla anti-torque está instalada justo debajo del pin de paro y su función principal es evitar el desacople del BHA de la bomba PCP debido a que el movimiento interno del rotor ejerce una fuerza sobre el estator en sentido anti-horario facilitando el desenroscado del estator.

Figura 24 Pin de paro, Ancla anti torque y tubería de cola.



### 3.1.3.6. TUBERIA DE COLA

La tubería de cola está instalada en la parte inferior del equipo de superficie, su función principal es permitir una separación inicial en caso de existir una presencia de sólidos en los fluidos de formación. Permite una extensión del equipo de fondo hasta una profundidad mayor y protege el BHA durante el running y pulling de las herramientas.

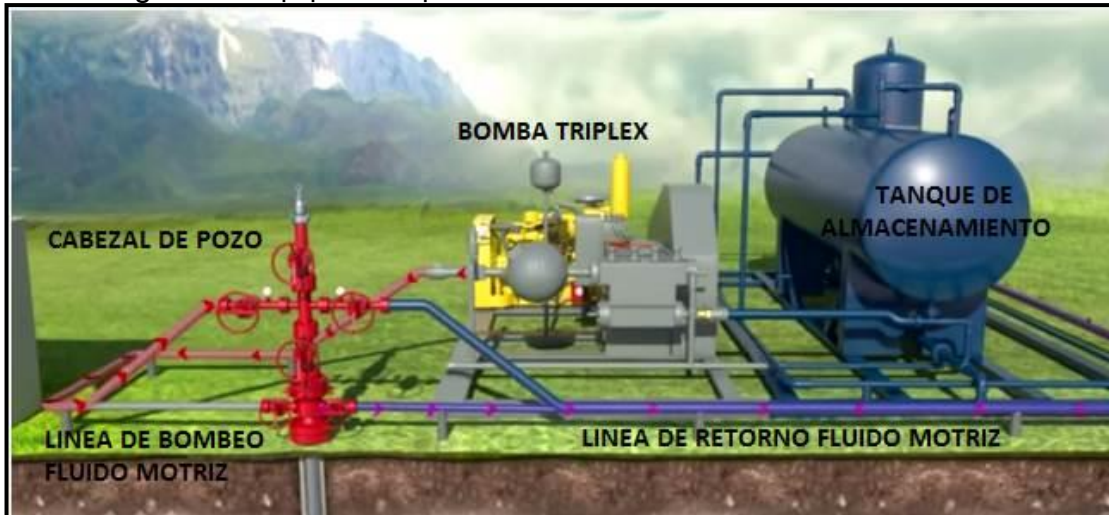
## 3.2. EQUIPO DE SUPERFICIE HIDRO-PCP

El sistema Hidro-PCP en superficie es muy similar o igual al sistema de levantamiento artificial hidráulico. El cual se compone de una unidad de bombeo y un sistema de recuperación y almacenamiento de fluido motriz.

En bombeo hidráulico, aceite crudo (o agua) es tomado desde el fondo del tanque de almacenamiento y alimenta las bombas triplex. El fluido de potencia, ahora bajo la presión suministrada por las bombas es controlado por válvulas y puede ser distribuido a una o más cabezas de pozo. El fluido de potencia pasa a través de las válvulas de cabeza de pozo y dirigido hacia abajo al motor hidráulico de subsuelo. El

fluido de potencia retorna a superficie, es recuperado, tratado y es conducido a los tanques de almacenamiento.

Figura 25 Equipo de superficie sistema Hidro-PCP. Sistema cerrado



Fuente: WEATHERFORD, Hydraulic lift Systems – Piston Pump. [On-line] [Calgary- Canadá] marzo 20. 2014. [citado 20 Sep. 2014]. Disponible en internet <[http://www.youtube.com/watch?v=disCB-8um7M&list=UUSs7W\\_CeRA5E7QE0Jmerb5w](http://www.youtube.com/watch?v=disCB-8um7M&list=UUSs7W_CeRA5E7QE0Jmerb5w)>

### 3.2.1. SISTEMA DE BOMBEO.

El sistema de bombeo del fluido motriz, está constituido de una línea de flujo en baja presión que succiona del tanque de almacenamiento y eleva la presión del fluido y lo direcciona a través de líneas de alta presión hasta cabeza de pozo y desde allí al motor de fondo.

Las unidades de bombeo están compuestas por un motor (combustión o eléctrico) acoplado a una bomba. Las más comúnmente usadas son triplex de desplazamiento positivo y son diseñadas específicamente para el servicio de fluido motriz o también llamado de potencia. Estos equipos por lo general son suministrados por los mismos fabricantes de las bombas de fondo de pozo. Para el servicio de estas bombas de alta presión que usualmente tienen pistones y camisas que trabajan metal-metal y válvulas tipo bola, componentes que requieren poco mantenimiento. Para las unidades de bombeo de agua, pistones y camisas con empaques son usados generalmente. Los accesorios auxiliares requeridos incluyen una válvula de alivio, manómetros e interruptores de seguridad.

Las líneas de descarga de las válvulas de alivio y la válvula de control de contrapresión no deberán ser conectadas directamente a la línea de succión de la bomba, sino que debe ser conectada a una línea separada que regresa al tanque motriz. La razón para esto es que cuando el aceite, aun aceite muerto, es tomado

repentinamente desde una alta presión a una baja presión, algo de gas en solución se liberará y este gas causaría una pérdida de eficiencia volumétrica y una operación pobre si se permite entrar a la bomba de superficie.

### 3.2.2. MANIFOLD DE CONTROL

Su función es permitir la distribución del fluido motriz hacia cada pozo. Los “manifold o distribuidores” tienen las válvulas que controlan la presión y el caudal de fluido motriz hacia cada pozo de acuerdo a lo requerido por cada uno de ellos.

### 3.2.3. SEPARADOR Y TANQUE DE ALMACENAMIENTO

En los sistemas hidráulicos convencionales se emplea agua como fluido motriz, en superficie un separador permite la separación primaria de agua y petróleo crudo (líquido-gas) el cual es enviado a las facilidades de producción. El agua recuperada es direccionada a un tanque de almacenamiento, donde con tratamiento químico se garantizan las propiedades requeridas para volver a ser usada en el sistema motriz.

En la Figura 26 se puede observar el tanque de fluido motriz cuya función es almacenar el fluido y darle cabeza de succión a las bombas de superficie, para evitar que estas caviten además de permitir que dicho fluido sea bombeado libre de gas y de sólidos a las bombas de superficie y al equipo de subsuelo.

Figura 26 Equipo de superficie sistema Hidro-PCP. Sistema abierto



Fuente: Modificado de SERTECPET, Bombeo hidráulico. [On-line] [Bogotá-Colombia] Agosto 15. 2010. [citado 21 Sep. 2014]. Disponible en internet <<http://www.youtube.com/watch?v=WEYn911WbCw>>

#### **3.2.4. FLUIDO MOTRIZ**

En el sistema Hidro-PCP al igual que en el sistema de levantamiento hidráulico el fluido motriz puede ser direccionado a través de un circuito cerrado que permite emplear un determinado volumen constante en la operación del sistema. En dicho caso el fluido motriz empleado tiene características propias como refrigerante, lubricante y está libre de impurezas y sólidos “limpio”.

También es posible el uso de un sistema motriz (agua o crudo) que pueda ser mezclado con los fluidos de producción, caso en el cual se requiere de un abastecimiento constante de fluido de potencia o de un sistema de recuperación y tratamiento de fluido de potencia.

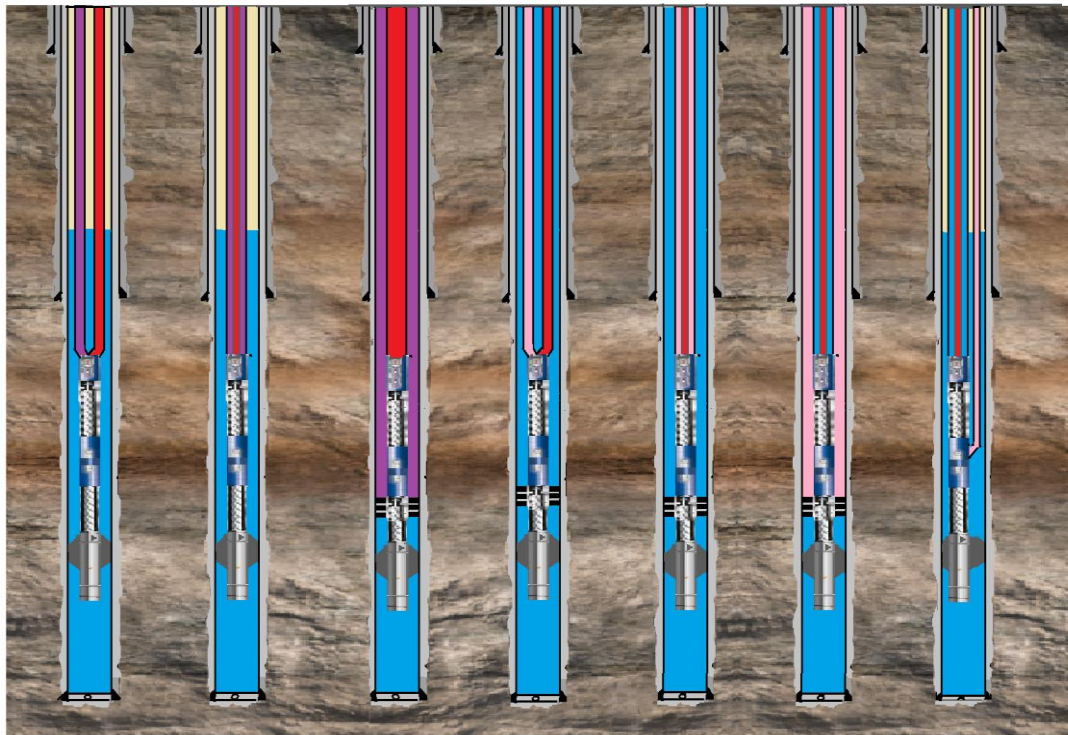
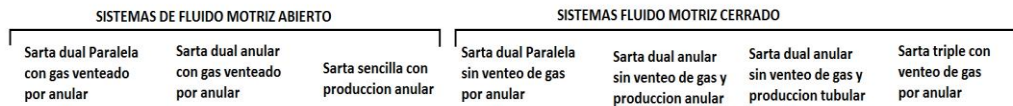
Para el sistema Hidro-PCP y en caso de extracción de crudos pesados y extra-pesados, el fluido motriz puede ser un diluyente que permita disminuir la viscosidad del fluido producido desde fondo de pozo, permitiendo aumentar la producción del pozo.

#### 4. CONFIGURACIONES DEL SISTEMA HIDRO-PCP.

El sistema hidro-PCP puede presentar diferentes configuraciones en su equipo o forma de completamiento de acuerdo al sistema que se desee para el manejo de los fluidos de producción y fluido motriz. Específicamente se puede operar con un tipo de circuito para el fluido motriz (abierto o cerrado) y cada configuración permite ventilar o no el gas de producción por el espacio anular del pozo dependiendo del número de sargas instaladas o posibles en el pozo.

En la figura 27 se observan las posibles configuraciones tanto para circuito cerrado como abierto y cada completamiento para cada caso.

Figura 27 Configuraciones sistema hidro PCP



#### **4.1. SISTEMAS CERRADOS**

El sistema cerrado permite que el fluido de potencia circule a través de un circuito cerrado que permite mantener un volumen casi constante en el sistema, cuyas pérdidas son mínimas y no existe mezcla o reacciones químicas entre el fluido de potencia o motriz y el fluido de producción. Lo anterior permite mantener más limpio, y garantiza un mayor tiempo de vida del motor de fondo dado que es más sencillo realizar pruebas de compatibilidad entre el fluido motriz y el elastómero a las condiciones de fondo o de profundidad de instalación del sistema.

Adicionalmente un sistema cerrado facilita la cuantificación de calidad y cantidad de petróleo producido. De igual forma se requiere de menos equipos de superficie facilitando la operación y reduciendo costos de mantenimiento.

Dentro de los sistemas Hidro-PCP cerrados encontramos los siguientes:

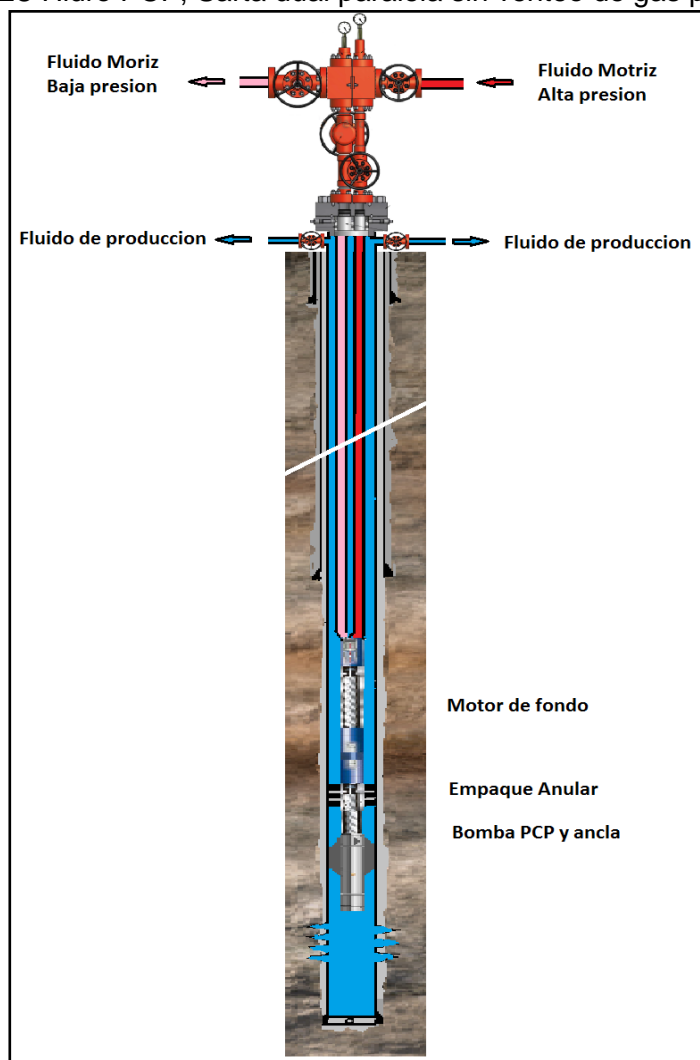
- Sarta dual paralela sin venteo de gas anular.
- Sarta dual anular sin venteo de gas y producción anular.
- Sarta dual anular sin venteo de gas y producción tubular.
- Sarta triple con venteo de gas anular.

##### **4.1.1. SARTA DUAL PARALELA SIN VENDEO DE GAS POR ANULAR**

Consiste en un completamiento compuesto por 2 sargas por medio de las cuales se transporta el fluido motriz en sentido descendente desde superficie hasta el motor de fondo a alta presión, atraviesa el motor hidráulico por las cavidades formadas entre estator y rotor para finalmente retornar de forma ascendente mediante otra sarta independiente.

En esta configuración se requiere de un empaque que aisle el espacio anular por la parte inferior y superior de la bomba PCP de esta forma el fluido de formación que ingresa a la bomba PCP se transporta mediante cavidades que incrementan la presión progresivamente desde la succión por la parte inferior de la bombas hasta la descarga por la parte superior. Dicha presión debe ser suficiente para vencer la columna hidrostática y las pérdidas de presión durante el ascenso del fluido hasta superficie por el espacio anular entre el casing de producción y las sargas de fluido motriz

Figura 28 Hidro PCP, Sarta dual paralela sin venteo de gas por anular

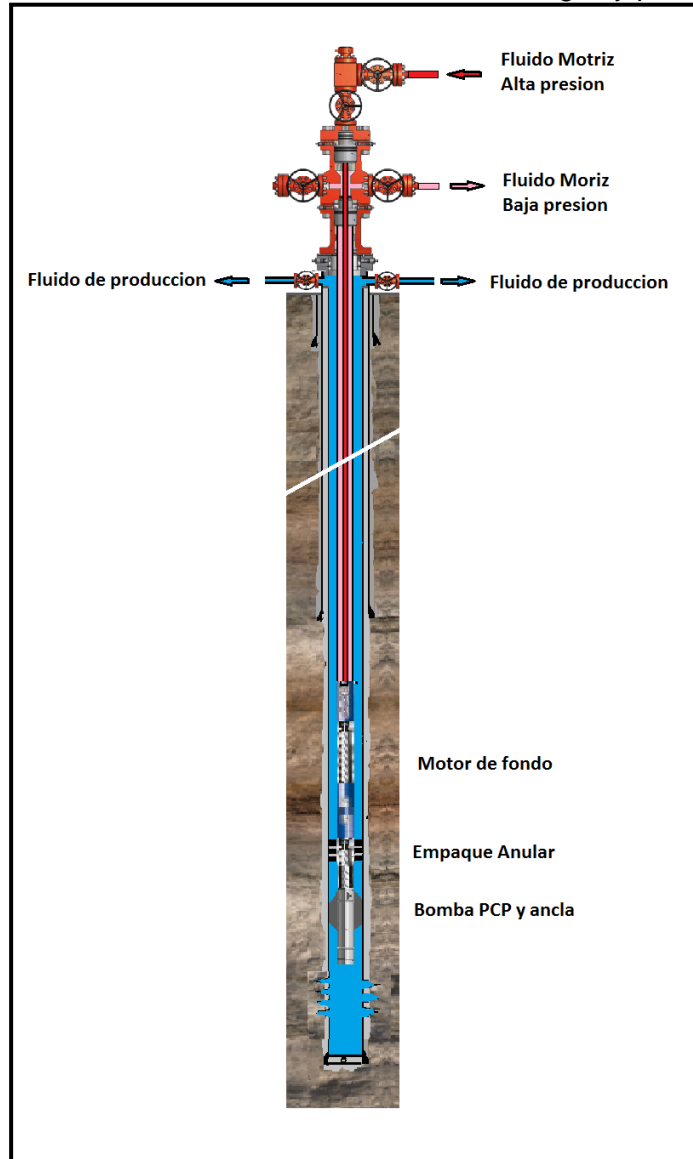


#### 4.1.2. SARTA DUAL ANULAR SIN VENDEO DE GAS Y PRODUCCION ANULAR

De igual manera este completamiento consta de 2 sarta por medio de las cuales se transporta el fluido motriz, en esta configuración la sarta que transporta el fluido motriz de alta presión está instalada dentro de la sarta que retorna el fluido motriz. De esta forma se hace más fácil su instalación y/o desinstalación.

La configuración requiere de un empaque anular al nivel de la bomba que impida la recirculación del fluido de producción una vez sea bombeado por la PCP. El fluido será producido por el espacio anular entre el casing de producción y la sarta de mayor diámetro del fluido motriz.

Figura 29 Hidro-PCP, Sarta dual anular sin venteo de gas y producción anular

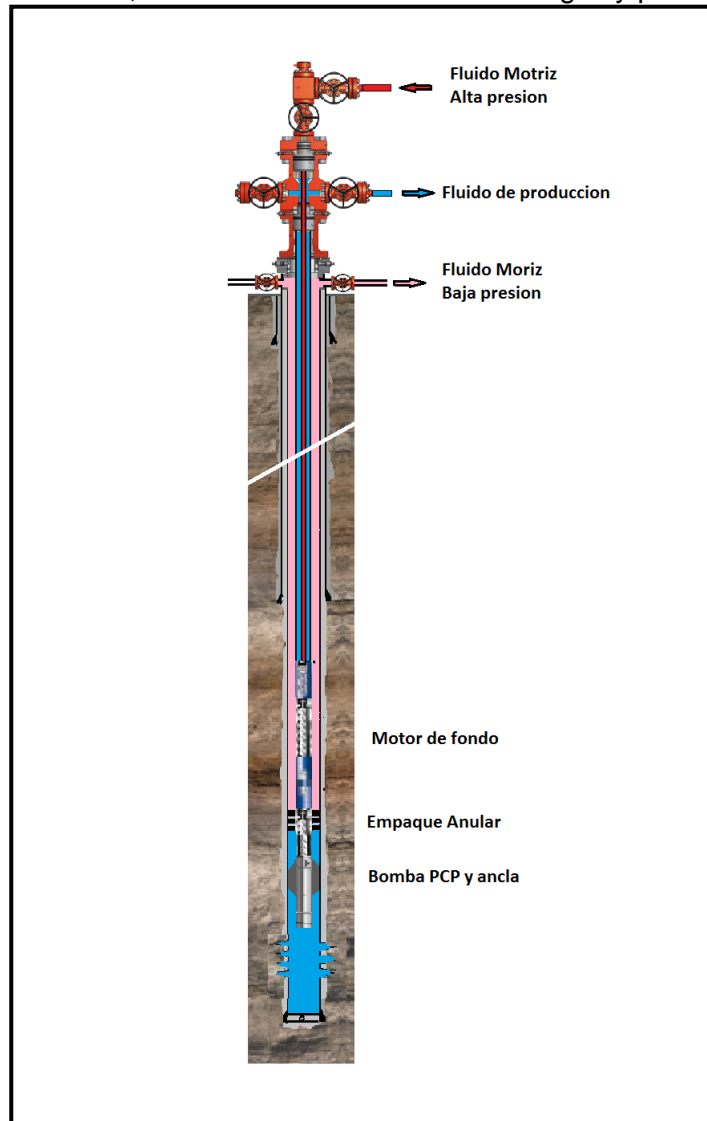


#### 4.1.3. SARTA DUAL ANULAR SIN VENTEO DE GAS Y PRODUCCION TUBULAR

Esta configuración del sistema Hidro-PCP tiene la misma conformación y ensamble de la anterior expuesto tanto en superficie como en fondo, la diferencia radica en el uso de cada sarta. En este caso el fluido motriz retorna por el espacio anular entre el casing y la sarta de producción de mayor diámetro y el fluido de producción fluye por el espacio anular entre la sarta de fluido motriz de alta presión y la tubería de producción.

Alguna ventaja del sistema es que permite proteger el casing en caso de fluidos de producción muy sucios o con alta presencia de arena. Una menor presión de bombeo debido a menores pérdidas de presión del fluido motriz pero mayor volumen en el circuito cerrado.

Figura 30 Hidro-PCP, Sarta dual anular sin venteo de gas y producción tubular

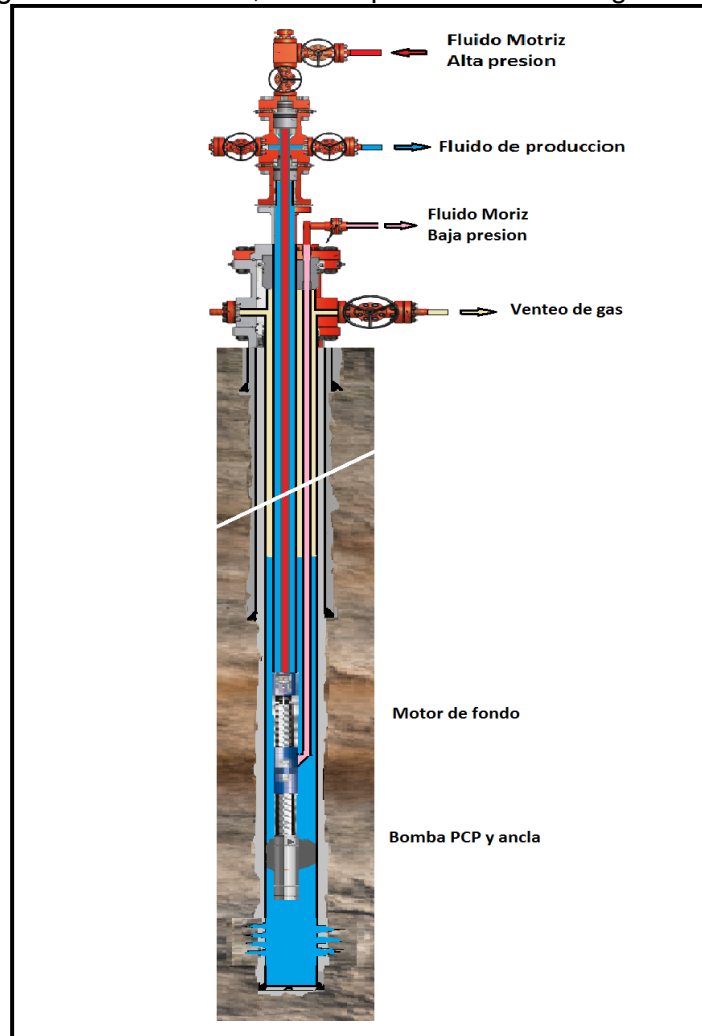


#### 4.1.4. SARTA TRIPLE CON VENTEO DE GAS ANULAR

La configuración del sistema Hidro-PCP con sarta triple permite adicional a mantener un circuito cerrado para el fluido de potencia o motriz, el poder ventear el gas producido en el pozo por el espacio anular conformado entre el casing de producción y las sarta de producción, lo cual es muy necesario para aplicaciones cuyo GOR sea mayor a 500 scf/stb. La gran limitante de esta configuración está

representada en el diámetro del casing requerido para la instalación de las sartas. En cuyo caso el menor diámetro es de 9-5/8" y requiere de equipos de completamiento especiales para la instalación.

Figura 31 Hidro-PCP, Sarta triple con venteo de gas anular.



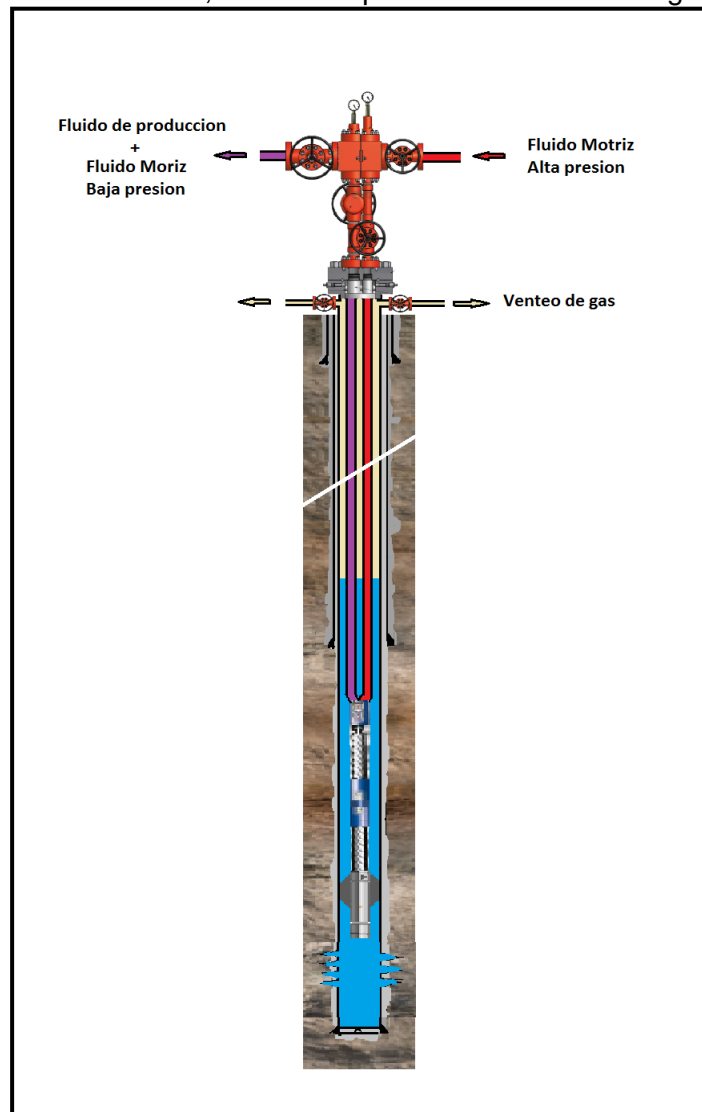
## 4.2. SISTEMAS ABIERTOS

Los sistemas Hidro-PCP con circuito de fluido motriz abierto, permiten que el fluido de potencia se mezcle con los fluidos de formación bombeados por la bomba PCP. De esta forma es necesario implementar equipos de superficie que permitan recuperar y restaurar el fluido motriz. El fluido de potencia o motriz normalmente usado es el agua que mediante un separador de superficie puede recuperar el agua y mediante tratamiento químico retirar impurezas como sólidos, aceites y demás para su reutilización.

Para el caso de crudos pesados y Extrapesados, puede ser una ventaja si se emplean aceites livianos o diluyentes como fluidos motrices, dado que debido a la mezcla en fondo puede ayudar a mejorar la producción y disminuir perdidas de presión por la disminución en la gravedad específica y viscosidad del fluido de formación. El sistema abierto tiene como principal ventaja un menor requerimiento de sarta de completamiento y por ente una mayor facilidad de implementación, mantenimiento y operación. Adicionalmente una mayor factibilidad de poder ventear el gas de producción por el espacio anular.

#### 4.2.1. SARTA DUAL PARALELA CON VENTEO DE GAS ANULAR

Figura 32 Hidro-PCP, Sarta dual paralela con venteo de gas anular



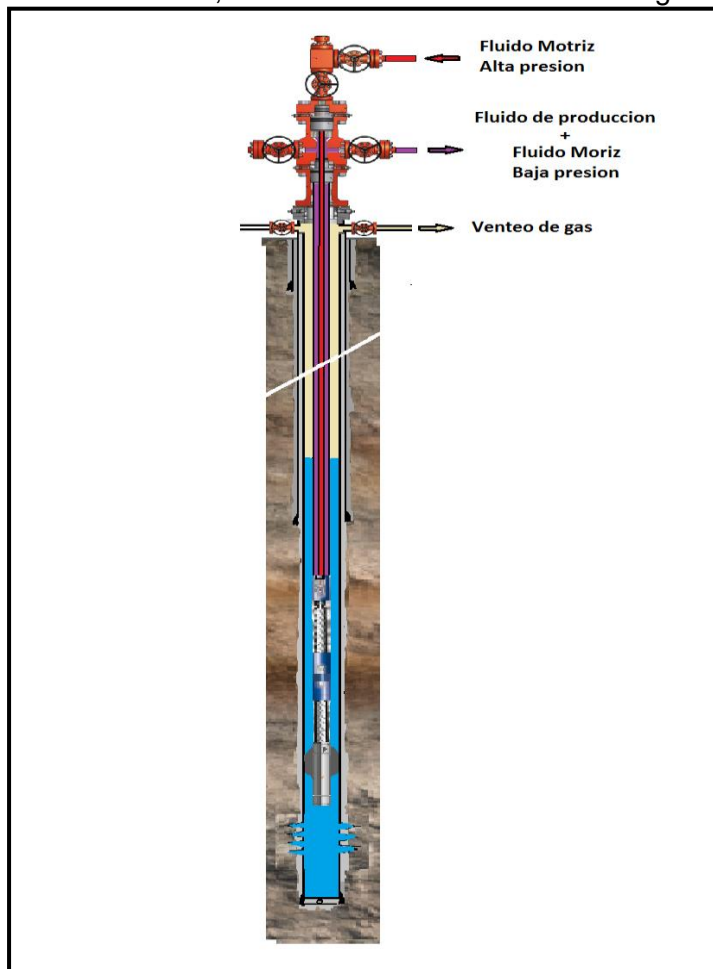
La configuración de sarta dual en paralelo para un sistema abierto consiste en la utilización de una de las sargas para el envío desde superficie del fluido de potencia de alta presión hasta el motor hidráulico, donde una vez pasa por el motor, es mezclado con el fluido bombeado de la bomba PCP y la mezcla es llevada a superficie mediante la segunda sarga, la cual normalmente es de mayor diámetro.

Este completamiento no requiere de empaque anular y por lo tanto el gas de formación que pueda ser liberado será venteado por el espacio anular. Lo que hace de la configuración ideal para aplicaciones con presencia de gas.

Mantener el espacio anular sin empaque permite realizar registros sonolog que garanticen la sumergencia de la bomba PCP evitando así el daño del elastómero y manteniendo una presión mínima de succión a la bomba.

#### 4.2.2. SARTA DUAL ANULAR CON VENTEO DE GAS ANULAR

Figura 33Hidro-PCP, Sarta dual anular con venteo de gas anular

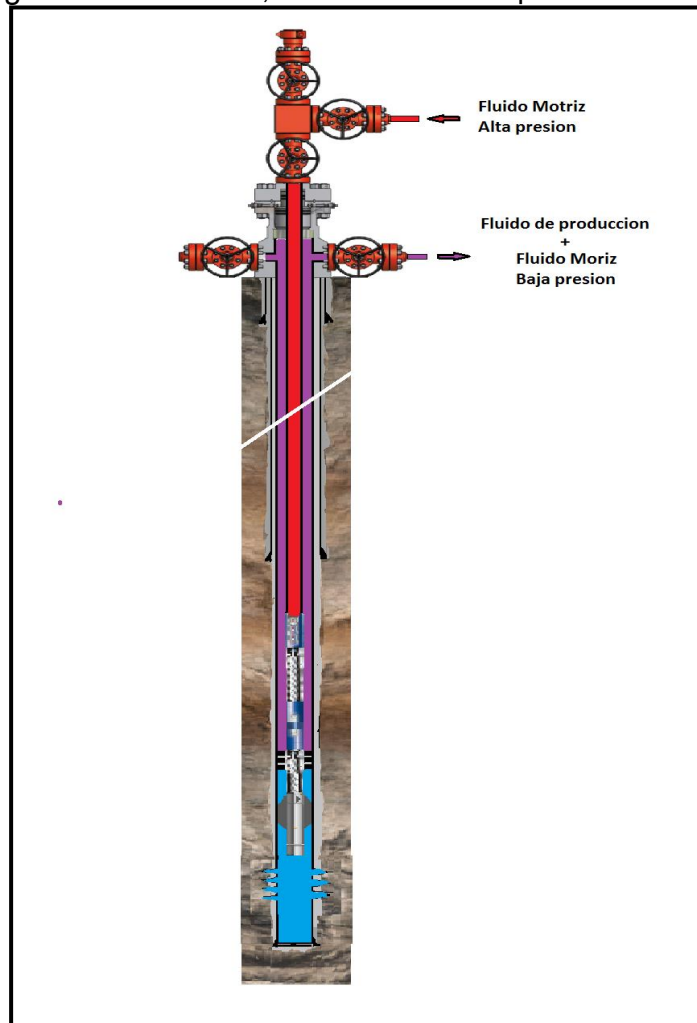


La configuración de sarta anular mantiene la misma forma de operación de la configuración anterior, la diferencia radica en la configuración de las sartas. En esta la sarta de inyección de fluido motriz está instalada dentro de la sarta de producción que retorna la mezcla de fluidos motriz y de formación. De esta forma el gas puede ser venteado por el espacio anular.

Esta configuración no requiere de empaque anular y la instalación de las sartas anulares facilita la instalación. Como se mencionó antes, permite controlar las condiciones de sumergencia del equipo de fondo.

#### 4.2.3. SARTA SENCILLA CON PRODUCCION ANULAR.

Figura 34 Hidro-PCP, Sarta sencilla con producción anular



Como su nombre lo indica es la configuración más sencilla para la instalación del sistema Hidro-PCP tanto en su instalación como en su operación. Especial para

pozos con diámetros restringidos, sin embargo tiene algunas desventajas como la necesidad de instalar un empaque anular que impida la comunicación hidráulica y mantener diferencial de presiones entre succión y descarga de bomba PCP, lo que impide el venteo anular del gas y requiere que el gas de formación sea manejado por la bomba.

Debido a la instalación del empaque anular es recomendable instalar la bomba PCP a una profundidad mayor al intervalo de producción a fin de garantizar una sumergencia permanente.

#### **4.3. CALCULOS DE DISEÑO SISTEMA HIDRO-PCP.**

Para el diseño del sistema Hidro-PCP es necesario determinar torques, presiones y caudales acorde a los requerimientos de cada aplicación. De modo secuencia los pasos de diseño sugeridos son los siguientes:

1. De acuerdo al diámetro del casing de producción del pozo definir la configuración Hidro-PCP que será usada, tipo de circuito para fluido motriz (abierto o cerrado). Lo que permite reducir el rango de bombas y motores hidráulicos de fondo posibles de instalar.
2. Determinar la capacidad de levantamiento requerida de la bomba PCP basado en la profundidad a la cual va a ser instalada la bomba. Ver sección 4.3.1.
3. Definida la capacidad de levantamiento requerida y el caudal de producción deseado se selecciona la bomba PCP a ser instalada.
4. Basado en información de pozo (Caudal, bsw, API, IPR, Profundidad perforados, profundidad intake, THP, diámetro de tubería, etc.) determinar el diferencial de presión a través de la bomba PCP. Ver sección 4.3.2.
5. Calcular el torque requerido por la bomba PCP en función de la velocidad de operación. Ver sección 4.3.3.
6. Calcular la potencia requerida por la bomba y sección de cojinetes que debe ser suministrada por el motor hidráulico de fondo. Ver sección 4.3.4.
7. Con los datos de diámetros de casing, potencia, velocidad y torque requeridos seleccionar en catálogos el motor hidráulico requerido para la aplicación.

8. Mediante las gráficas de desempeño del motor, determinar el diferencial de presión y el caudal de fluido motriz requerido para generar el torque, potencia y velocidad requerida por la bomba PCP. Ver sección 4.3.5.
9. Con el diferencial de presión a través del motor hidráulico e información adicional (completamiento y parámetros de fluido motriz), determinar la presión de operación requerida en superficie para el sistema de bombeo. Ver sección 4.3.6.
10. Determinar el equipo de superficie requerido para el sistema teniendo en cuenta el caudal de fluido motriz y presión de operación.
11. Calcular la potencia mínima requerida del motor de superficie (eléctrico o de combustión interna). Ver sección 4.3.7.

#### **4.3.1. CAPACIDAD DE LEVANTAMIENTO BOMBA PCP**

La capacidad de levantamiento requerido en una aplicación corresponde a la presión de superficie comúnmente conocida como THP sumado a la presión hidrostática del fluido de producción y las pérdidas de presión debido al flujo del fluido expresada en ft de agua. Para tal propósito puede ser usada la siguiente expresión matemática.

$$P_L = (THP + 0,433 \cdot \gamma_m \cdot D_P - P_f) / 0,433 \quad \text{EC (4.1)}$$

$P_L$  = Presión de levantamiento. (Ft de H<sub>2</sub>O)

THP= Tubing Head Pressure. (psi)

$\gamma_m$  = Gravedad específica de fluido de producción.

$D_P$  = Profundidad de bomba PCP. (ft)

$P_f$  = Pérdidas de presión por fricción. (psi)

Como se describió en la sección 1.1.1.1. Según la identificación que debe tener las bombas PCP reglamentado en la norma ISO 15136-1:2009. El segundo término de la identificación indica la capacidad de levantamiento en metros de agua.

#### **4.3.2. CALCULO DIFERENCIAL PRESION A TRAVES DE BOMBA PCP**

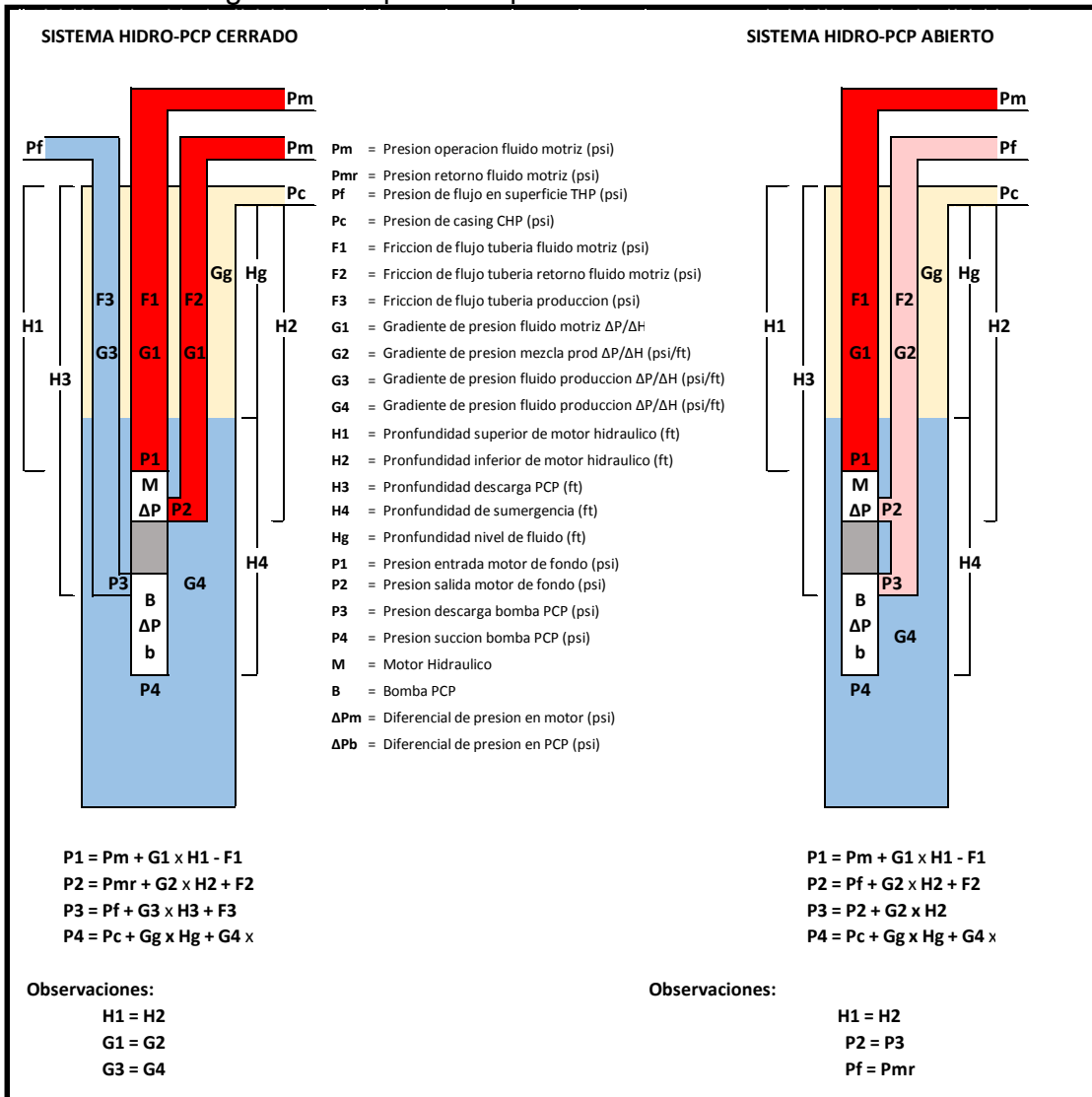
En la Figura 35 se muestra de manera esquemática los parámetros requeridos a tener en cuenta en el sistema Hidro-PCP tanto para sistemas de circuito abierto como cerrado.

Las presiones de superficie son registradas mediante manómetros, los gradientes de fluidos están directamente relacionados con la densidad de los fluidos. Para el

caso de mezcla de fluidos, la propiedad adecuada para realizar un promedio ponderado es la gravedad específica. Las profundidades son conocidas mediante tally de completamiento y registros sonolog para determinar el nivel de fluido y sumergencia.

Para las configuraciones cuya completamiento incluye un empaque anular es preciso determinar la presión de succión a la bomba PCP mediante la presión de fondo fluyente (Pwf) menos la presión hidrostática desde mitad de perforados hasta la profundidad de instalación de la bomba PCP.

Figura 35 Esquema de presiones sistema Hidro-PCP.



Para determinar la presión diferencial a través de la bomba PCP basta con determinar la expresión matemática para P3-P4.

**Para sistema cerrado:**

$$P_3 = P_f + G_3 \cdot H_3 + F_3$$

$$P_4 = P_c + G_g \cdot H_g + G_4 \cdot H_4$$

La expresión  $P_c + G_g \cdot H_g$  normalmente es despreciable, especialmente en pozos de poco aporte de gas, por lo que  $P_4$  puede ser expresada como  $P_4 = G_4 \cdot H_4$

Determinando  $\Delta P_b = P_3 - P_4$

$$\Delta P_b = P_f + G_3 \cdot H_3 + F_3 - (G_4 \cdot H_4)$$

$$\Delta P_b = P_f + G_3 \cdot H_3 + F_3 - G_4 \cdot H_4$$

Como se observa en la figura 35,  $G_3 = G_4$  y  $H_3 - H_4$  corresponde al nivel de fluido dinámico, por lo que la ecuación puede expresarse de la siguiente forma:

$$\Delta P_b = P_f + G_3 \cdot (H_3 - H_4) + F_3$$

En términos de campo la expresión:  $P_f = \text{THP}$  y  $H_3 - H_4 = \text{Nd}$

$$\Delta P_b = \text{THP} + G_3 \cdot (\text{Nd}) + F_3 \quad \text{EC (4.2)}$$

$\Delta P_b$  = Presión diferencial a través de la bomba PCP (psi)

THP = Tubing Head Pressure (psi)

$G_3$  = Gradiente hidrostático (psi/ft)

Nd = Nivel dinámico de fluido (ft)

F3 = Perdidas de presión por fricción (psi/ft)

**Para sistema abierto:**

$$P_3 = P_f + G_2 \cdot H_3 + F_2$$

$$P_4 = P_c + G_g \cdot H_g + G_4 \cdot H_4$$

La expresión  $P_c + G_g \cdot H_g$  normalmente es despreciable, especialmente en pozos de poco aporte de gas, por lo que  $P_4$  puede ser expresada como  $P_4 = G_4 \cdot H_4$

Determinando  $\Delta P_b = P_3 - P_4$

$$\Delta P_b = P_f + G_2 \cdot H_3 + F_2 - (G_4 \cdot H_4)$$

$$\Delta P_b = P_f + G_2 \cdot H_3 + F_2 - G_4 \cdot H_4$$

En términos de campo la expresión:  $P_f = \text{THP}$ ,  $H_3 =$  profundidad de bomba PCP y  $H_4 =$  altura de Sumergencia.

$$\Delta P_b = \text{THP} + G_2 \cdot \text{Db} + F_2 - G_4 \cdot \text{Ns} \quad \text{EC (4.3)}$$

$\Delta P_b$  = Presión diferencial a través de la bomba PCP (psi)

THP = Tubing Head Pressure (psi)

- $G_2$  = Gradiente hidrostático tubería producción (psi/ft)
- $G_4$  = Gradiente hidrostático fluido de formación (psi/ft)
- $Db$  = Profundidad de sentamiento de bomba PCP (ft)
- $Ns$  = Nivel de sumergencia de bomba (ft)
- $F_2$  = Perdidas de presión por fricción en tubería de producción (psi/ft)

#### 4.3.3. CALCULO TORQUE REQUERIDO BOMBA PCP

Para determinar el torque requerido por el sistema basta con sumar el torque de fricción de la bomba, el torque hidráulico debido al levantamiento del fluido.

$$T_{Total} = T_{bomba} + T_{fricción} \quad EC (4.4)$$

Recordando la expresión de torque hidráulico:

$$T_{Total} = (C * Q_{teórico} * \Delta P / RPM) + T_{fricción} \quad EC (4.5)$$

- $T_{Total}$  = Torque total (lb-ft)
- $T_{hidráulico}$  = Torque hidráulico (lb-ft)
- $T_{fricción}$  = Torque de fricción bomba PCP (lb-ft)
- $Q_{teórico}$  = Caudal o desplazamiento teórico (BFPD)
- $\Delta P$  = Presión diferencial a través de la bomba PCP (psi)
- $RPM$  = Velocidad de operación (rpm)
- $C$  = Constante acorde a unidades de variables.  $0,0897(\text{lb-ft} * \text{rpm} / \text{BFPD} * \text{psi})$

Como se expresó en el capítulo 1 de este libro, el torque de fricción de las bombas PCP es determinado mediante una prueba de desempeño de la bomba en un banco de pruebas.

La carga axial soportada en la sección de cojinetes da lugar a la generación de un esfuerzo combinado denominado esfuerzo de efectivo de Von Mises ( $\sigma_e$ ).

#### 4.3.4. DETERMINACION DE POTENCIA Y VELOCIDAD DE BOMBA PCP

Para determinar la velocidad de operación requerida en la bomba PCP es necesario conocer la capacidad de desplazamiento de la bomba PCP seleccionada que está relacionada en los catálogos de los fabricantes y en la demarcación de las bombas acorde a la norma ISO 15136-1:2009. La cual es expresada en términos de volumen/rpm.

Para obtener la velocidad de operación requerida del sistema, se divide el caudal deseado para la producción del pozo en aplicación en el desplazamiento real de la

bomba PCP, el cual relaciona la eficiencia volumétrica de la bomba a la presión diferencial a la que será sometida.

$$N = Q_{\text{deseado}} / q_{th} * \text{Eff} \quad \text{EC (4.6)}$$

N = Velocidad de operación requerida por la bomba PCP (rpm)

$Q_{\text{deseado}}$  = Caudal de producción deseado (bfpd)

$q_{th}$  = Desplazamiento teórico de la bomba PCP (bfpd/rpm)

Eff = Eficiencia volumétrica de la bomba PCP a la presión diferencial (%)

La potencia requerida para suministrar el torque total al sistema será función de este torque y de la velocidad de operación, siendo determinada por:

$$HP_{\text{Bomba}} = K * T_{\text{Total}} * N \quad \text{EC (4.7)}$$

$HP_{\text{Bomba}}$  = Potencia requerida por la bomba (Hp)

$T_{\text{Total}}$  = torque total de la bomba (lb\*ft)

N = Velocidad de operación (RPM)

K = Constante  $1,91 \times 10^{-4}$

#### 4.3.5. CALCULO PRESION DIFERENCIAL DE MOTOR Y CAUDAL DE FLUIDO MOTRIZ

Una vez conocidos la velocidad de operación requerida (N), el torque y potencia demandados por la bomba PCP, se debe seleccionar el motor hidráulico de fondo mediante los catálogos de los fabricantes teniendo en cuenta el diámetro de casing donde será instalado. En las gráficas del motor seleccionado se determina la presión diferencial y el caudal de flujo motriz requeridos.

En la gráfica de motor hidráulico que relaciona torque vs presión diferencial, entrando por el eje “y” se determina la presión diferencial requerida para generar el torque requerido.

Una vez conocido el diferencial de presión, se revisan las gráficas de potencia y velocidad vs presión diferencia para determinar el caudal de fluido motriz adecuado para la velocidad N requerida.

Para ejemplificar lo anterior, asumamos que hemos desarrollado los pasos y cálculos anteriores con los siguientes resultados:

Torque requerido: 500 lb-ft

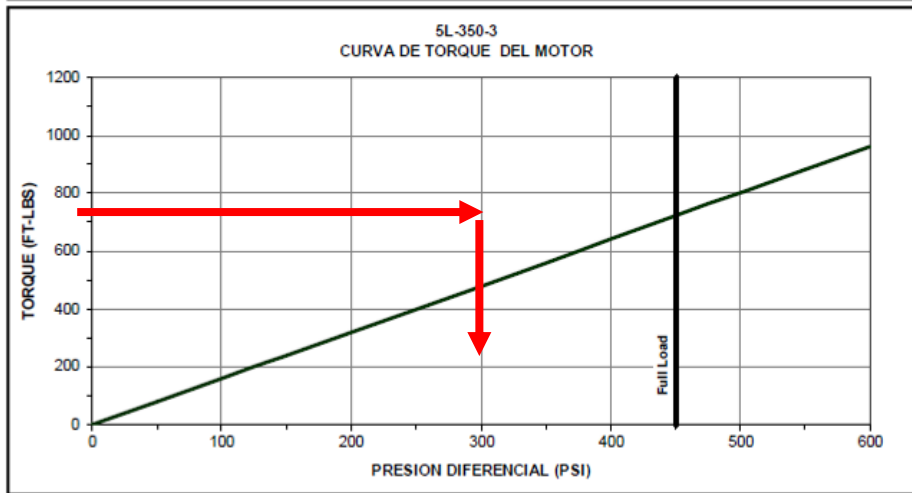
Velocidad requerida: 215 rpm

Potencia requerida: 20 Hp

Para lo cual seleccionamos el motor 5L-350-3. Cuya nomenclatura indica que es una configuración multilobular 5:6, de diámetro 3,5" y 3 etapas. El diámetro es acorde para una instalación cuyo casing de producción es de 7"

De modo que en entramos por el torque requerido de 500 lb-ft y determinamos el diferencial del motor hidráulico.

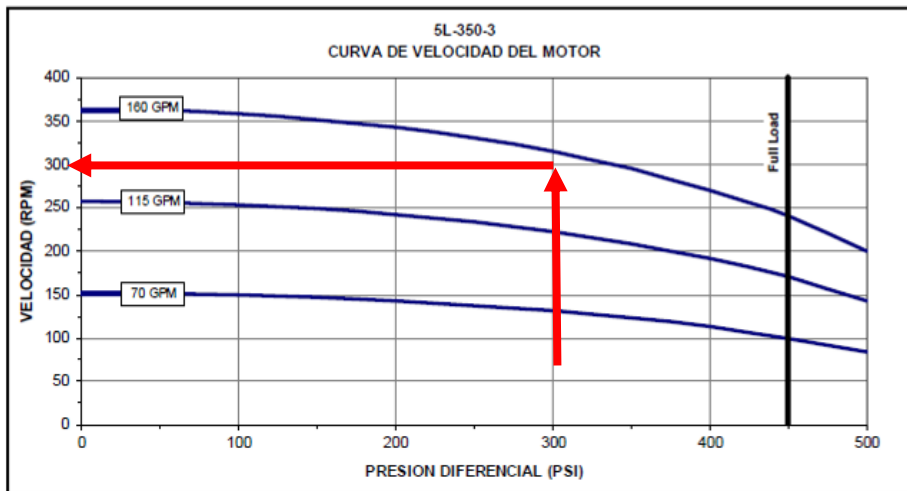
Figura 36 Curva de desempeño motor hidráulico Torque vs presión diferencial



Fuente: Cavo drilling Motors, Manual de operaciones del motor, 4ta edición

Mediante la gráfica se determina que es necesario operar el motor hidráulico con una presión diferencial de 300 psi. Posteriormente observamos en las gráficas del motor cual es el caudal de fluido motriz requerido para la velocidad indicada.

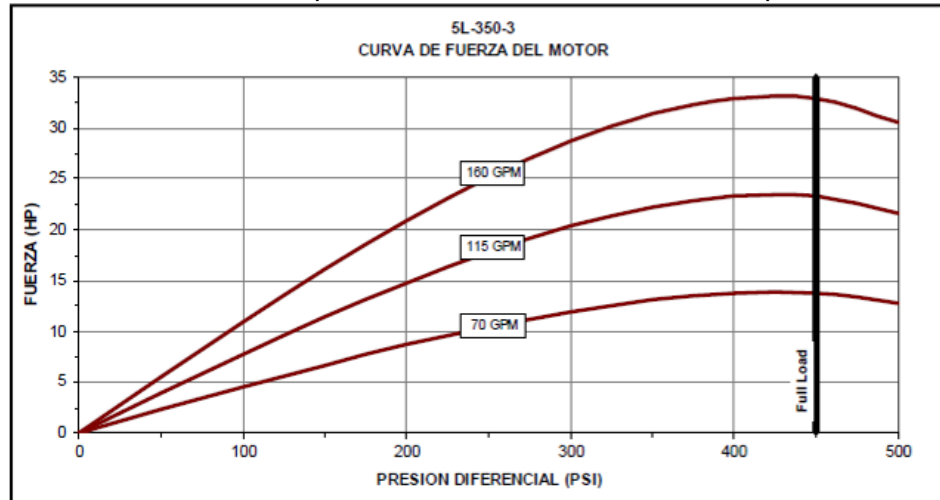
Figura 37 Curva de desempeño motor hidráulico Velocidad vs presión diferencial



Fuente: Cavo drilling Motors, Manual de operaciones del motor, 4ta edición

Para que el motor hidráulico de fondo genere una velocidad de 215 rpm, es necesario que a través de él transite un flujo constante de 115 gpm de fluido motriz, lo que equivale a un caudal diario de 3942 bfpd.

Figura 38 Curva de desempeño motor hidráulico Potencia vs presión diferencial



Fuente: Cavo drilling Motors, Manual de operaciones del motor, 4ta edición

En la gráfica de potencia podemos corroborar que el motor desarrolla los Hp requeridos para el funcionamiento del sistema PCP.

#### 4.3.6. CALCULO DE PRESION DE OPERACIÓN EN SUPERFICIE.

Una vez seleccionado el equipo de sub-suelo del sistema hidro-PCP. Es necesario calcular la presión de bombeo necesaria en el sistema de fluido motriz. Para lo cual se realizan las siguientes ecuaciones basadas en la Figura 35.

Para determinar la presión diferencial a través del motor de fondo basta con determinar la expresión matemática para P1-P2.

**Para sistema cerrado:**

$$P_1 = P_m + G_1 \cdot H_1 - F_1$$

$$P_2 = P_{mr} + G_2 \cdot H_2 + F_2$$

Determinando  $\Delta P_m = P_1 - P_2$

$$\Delta P_m = P_m + G_1 \cdot H_1 - F_1 - (P_{mr} + G_2 \cdot H_2 + F_2)$$

Algunas consideraciones válidas que simplifican la expresión es asumir que la profundidad del motor es igual o muy similar debido a la longitud del motor en relación a la profundidad de instalación del motor.  $H_1 = H_2$ , de igual forma en un

circuito cerrado el fluido de las dos sartas es el mismo por lo que su gradiente hidrostático también lo es.  $G_1 = G_2$ . De modo que la ecuación se re-organiza de la siguiente manera.

$$\begin{aligned}\Delta P_m &= P_m + G_1 \cdot H_1 - F_1 - (P_{mr} + G_1 \cdot H_1 + F_2) \\ \Delta P_m &= P_m + G_1 \cdot H_1 - F_1 - P_{mr} - G_1 \cdot H_1 - F_2 \\ \Delta P_m &= P_m - F_1 - P_{mr} - F_2\end{aligned}$$

Resolviendo la ecuación para determinar  $P_m$ . Tenemos que:

$$P_m = \Delta P_m + P_{mr} + F_1 + F_2 \quad \text{EC (4.8)}$$

$P_m$  = Presión de inyección de fluido motriz en superficie (psi)  
 $\Delta P_m$  = Diferencial de presión a través de motor de fondo (psi)  
 $P_{mr}$  = Presión de retorno en superficie de fluido motriz (psi)  
 $F_1$  = Perdidas de fricción en tubería de superficie a fondo (psi)  
 $F_2$  = Perdidas de fricción en tubería de fondo a superficie (psi)

**Para sistema abierto:**

$$\begin{aligned}P_1 &= P_m + G_1 \cdot H_1 - F_1 \\ P_2 &= P_f + G_2 \cdot H_2 + F_2\end{aligned}$$

Determinando  $\Delta P_m = P_1 - P_2$

$$\Delta P_m = P_m + G_1 \cdot H_1 - F_1 - (P_f + G_2 \cdot H_2 + F_2)$$

Algunas consideraciones validas que simplifican la expresión es asumir que la profundidad del motor es igual o muy similar debido a la longitud del motor en relación a la profundidad de instalación del motor.  $H_1 = H_2$ , debido a la mezcla de fluido de potencia con el fluido de producción los gradientes hidrostáticos no son iguales.  $G_1 \neq G_2$ . De modo que la ecuación se re-organiza de la siguiente manera.

$$\Delta P_m = P_m + G_1 \cdot H_1 - F_1 - (P_f + G_2 \cdot H_1 + F_2)$$

Re-organizando la expresión:

$$\begin{aligned}\Delta P_m &= P_m + G_1 \cdot H_1 - F_1 - P_f - G_2 \cdot H_1 - F_2 \\ \Delta P_m &= P_m + H_1 \cdot (G_1 - G_2) - F_1 - P_f - F_2\end{aligned}$$

Resolviendo la ecuación para determinar  $P_m$ . Tenemos que:

$$P_m = \Delta P_m + P_f + H_1 \cdot (G_2 - G_1) + F_1 + F_2 \quad \text{EC (4.9)}$$

$P_m$  = Presión de inyección de fluido motriz en superficie (psi)  
 $\Delta P_m$  = Diferencial de presión a través de motor de fondo (psi)  
 $P_f$  = Presión retorno en superficie de mezcla fluido motriz y producción (psi)  
 $G_1$  = Gradiente hidrostático de fluido motriz (psi/ft)  
 $G_2$  = Gradiente hidrostático de mezcla fluido motriz y producción (psi/ft)  
 $H_1$  = Profundidad de instalación de motor hidráulico de fondo (ft)  
 $F_1$  = Perdidas de fricción en tubería de superficie a fondo (psi)  
 $F_2$  = Perdidas de fricción en tubería de fondo a superficie (psi)

#### 4.3.7. CALCULO DE POTENCIA DE MOTOR DE SUPERFICIE.

Una vez conocido el caudal de fluido motriz y la presión de superficie requerida para el correcto funcionamiento de equipo de subsuelo, es necesario instalar una bomba de desplazamiento positivo que aumente la presión del fluido y lo bombee a fondo de pozo. Normalmente son empleadas bombas triplex para dicho propósito. Se debe seleccionar un diámetro de camisas adecuado para el caudal y presión máxima de operación.

El accionamiento de la bomba triplex está dado por un motor primario que puede ser eléctrico o de combustión interna dependiendo de las facilidades existentes en el campo donde se instale el sistema Hidro-PCP. Para tal equipo se debe determinar la potencia mínima requerida mediante la siguiente expresión, la cual tiene en cuenta la eficiencia del equipo de bombeo, lo que puede asumirse en un rango de 80%-90% para el caso de las bombas triplex. Y la eficiencia del motor primario que está en el orden de 60%-80% en el caso de motores de combustión interna y del 85%-95% en motores eléctricos.

$$HP_m = K * Q * P * Eff_b * Eff_m \quad EC (4.10)$$

$HP_m$  = Potencia requerida del motor de superficie (Hp)  
 $Q$  = Caudal de fluido motriz (bfpd)  
 $P$  = Presión de bombeo en superficie (psi)  
 $Eff_b$  = Eficiencia de la bomba de superficie (%)  
 $Eff_m$  = Eficiencia de motor primario (%)

## **5. CAMPOS Y POZOS CANDIDADOS PARA INSTALAR HIDRO-PCP EN COLOMBIA.**

El sistema hidro-PCP representa una solución de ingeniería de producción en diversos campos del territorio Colombiano dado que su aplicación elimina o reduce algunas limitaciones del sistema PCP convencional de igual forma que amplía rangos de aplicación como profundidad, desviación de pozos, velocidades de operación, entre otros. Por tal razón es importante realizar una comparación básica de los rangos de aplicación del sistema PCP expuesta en la Tabla 1. Y la modificación de los mismos con el sistema Hidro-PCP.

### **5.1. PROFUNDIDAD DE OPERACION:**

La implementación del Sistema hidro-PCP permite ampliar los rangos de profundidad de instalación siempre y cuando los gradientes geotérmicos sean normales o las temperaturas de fondo no sean muy elevadas, lo que afectaría significativamente el desempeño y la vida útil de los elastómeros. De modo que la implementación del sistema Hidro PCP puede darse hasta en profundidades de 12000 ft.

### **5.2. VOLUMEN DE PRODUCCION:**

La utilización de motores hidráulicos de fondo en combinación con el sistema PCP, permiten desarrollar velocidades de hasta 500rpm. Lo que en bombas de alto desplazamiento se ve reflejado en altas tasas de producción que pueden llegar al orden de 6000 BFPD. Sin embargo es importante tener en cuenta que una velocidad óptima que no afecte de manera significativa la vida útil de la bomba PCP es de 250rpm.

### **5.3. DESVIACION DEL POZO:**

En el sistema PCP convencional, la existencia de una sarta de varillas representaba una limitación importante al sistema dado que las fuerzas de contacto generan problemas operacionales con la continua ruptura de varillas o de la tubería de producción. Por tal motivo los pozos desviados incrementan este inconveniente al punto de limitar su aplicación a pozos verticales o pozos de baja desviación.

Para el sistema hidro-PCP el reemplazo de la sarta de varillas por el fluido motriz elimina las cargas de contacto y por ende puede ser implementado en pozos de alta desviación o incluso en pozos horizontales.

#### 5.4. TIPO DE FLUIDOS PRODUCIDOS:

El sistema PCP convencional es ideal para la producción de crudos pesados y/o Extrapesados debido a que la alta viscosidad de estos crudos representa una dificultad y limitación para otros sistemas de levantamiento artificial. De igual forma los crudos livianos que contienen aromáticos y bencenos representan una dificultad dado la sensibilidad del elastómero presente en los estatores. El sistema hidro-PCP no presenta ventaja en relación a este parámetro de aplicación dado que sus componentes de fondo están constituidos de igual manera que los convencionales. De modo que el sistema no es aconsejable para crudos livianos, crudos aromáticos o bencénicos.

En el caso particular de crudos Extrapesados con fluido motriz abierto puede generarse una ventaja importante el mezclar el fluido motriz si se emplea como diluyente del fluido de producción. De esta forma el fluido motriz realiza una segunda función al diluir el crudo extra-pesado en fondo, disminuyendo viscosidad y densidad del fluido de producción. La siguiente tabla presenta los rangos de aplicación del sistema hidro-PCP.

Tabla 4 Rangos de aplicación del sistema Hidro-PCP

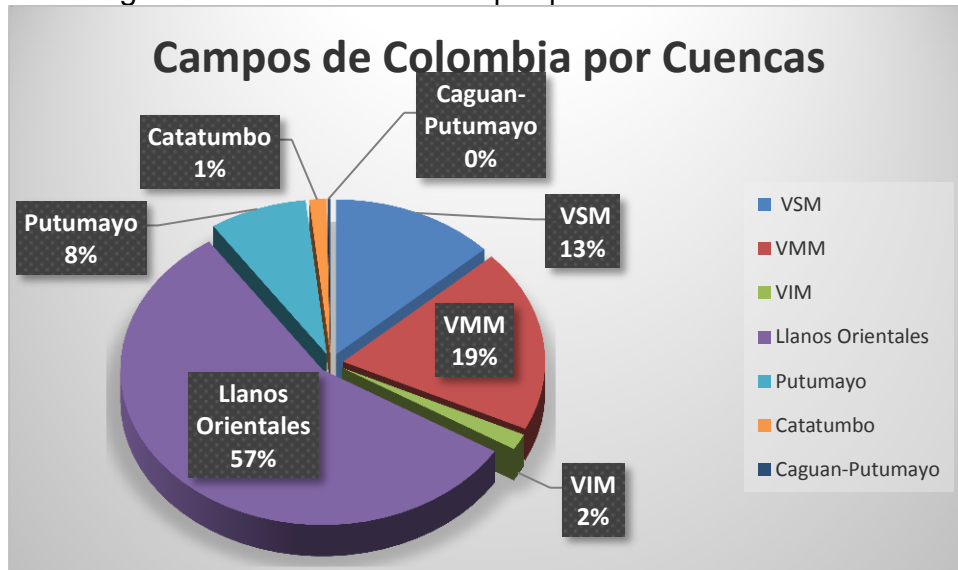
CARACTERISTICA	RANGO TIPICO	MAXIMO
Profundidad de Operación	(1000 - 9000)ft (TVD)	12000 ft (TVD)
Volumen de Operación	(5 - 2500) BFPD	6000 BFPD
Temperatura de Operación	(75 - 170) °F	300 °F
Desviación de Pozo	(0° - 90°)	Sin Limitación
Manejo de Corrosión	Excelente	
Manejo de Gas	Regular	
Manejo de Sólidos	Excelente	
Densidad de Fluido	Por debajo de 40°API	
Tipo de Fluido	Fluidos Dulces	
Servicio y Reparación	Requiere equipo de Workover	
Tipo de Movimiento Principal	Motor Hidráulico en fondo	
Aplicación Off-shore	Bueno	
Eficiencia del Sistema	50 - 70 %	90%

### 5.5. CAMPOS CANDIDATOS DE APLICACION SISTEMA HIDRO-PCP:

Una base de datos de 358 campos de petróleo de Colombia, provista por la agencia nacional de hidrocarburos (ANH) permite realizar un análisis global de la factibilidad de implementación del sistema Hidro PCP como sistema de levantamiento artificial teniendo en cuenta la clase o tipo de crudo producido y la tasa de producción diaria promedio. Otros parámetros como profundidad de pozo o desviación no son tenidas en cuenta en el análisis debido a que no representan una limitación para el sistema Hidro-PCP.

En la figura 39 se observa la distribución de 358 campos de petróleo en las diferentes cuencas sedimentarias del territorio Colombiano, donde se observa que el 57% de los campos están ubicados en la cuenta de los llanos orientales.

Figura 39 Distribución de campos por cuenca sedimentarias



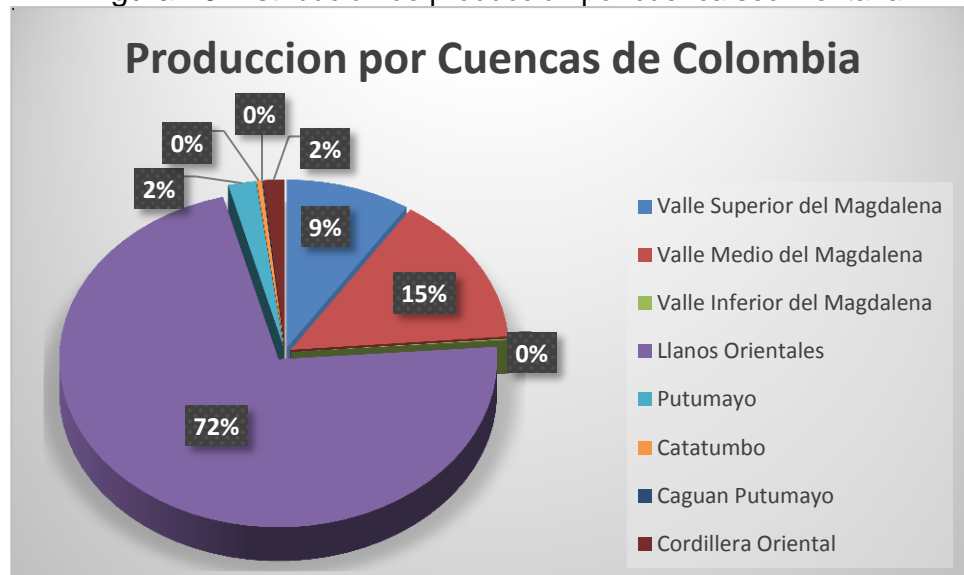
Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, 2012 producción BEM Base de datos Diciembre [CD-ROM] 2012. [Bogotá- Colombia] Enero 15, 2013. [Citado el 26 Sep 2014]. Disponible en epis, acipet.

La figura 40 muestra la distribución de producción por cuencas sedimentarias del territorio colombiano. Donde se observa que el 72% de la producción total del país es extraída de la cuenca de llanos orientales. Lo cual representa coherencia con la figura 39 y por lo cual se puede concluir que la cuenca de llanos orientales tiene gran potencial petrolífero, adicional a una gran extensión de terreno.

Por lo anterior centraremos el análisis de factibilidad de implementar el sistema Hidro PCP en la cuenca de llanos orientales, no sin dejar de lado cuentas importantes para la producción de petróleo y donde se encuentra gran número de

pozos de petróleo como la cuenta del Valle Superior y medio del Magdalena. Donde importantes campos que actualmente utilizan como sistema de levantamiento artificial Bombeo mecánico y bombas PCP convencionales puede ser re-evaluados mediante el sistema hidro-PCP. Caso específico de campos como Guando, Cira-Infantas, Mangos, Hocha, entre otros. Y campos de producción de crudo pesado como Casabe, Jazmín, Teca, Gala, Girasol, los Ángeles, Moriche, Palagua, under-river, entre otros.

Figura 40 Distribución de producción por cuenca sedimentaria



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, 2012 producción BEM Base de datos Diciembre [CD-ROM] 2012. [Bogotá- Colombia] Enero 15, 2013. [Citado el 26 Sep 2014]. Disponible en epis, acipet.

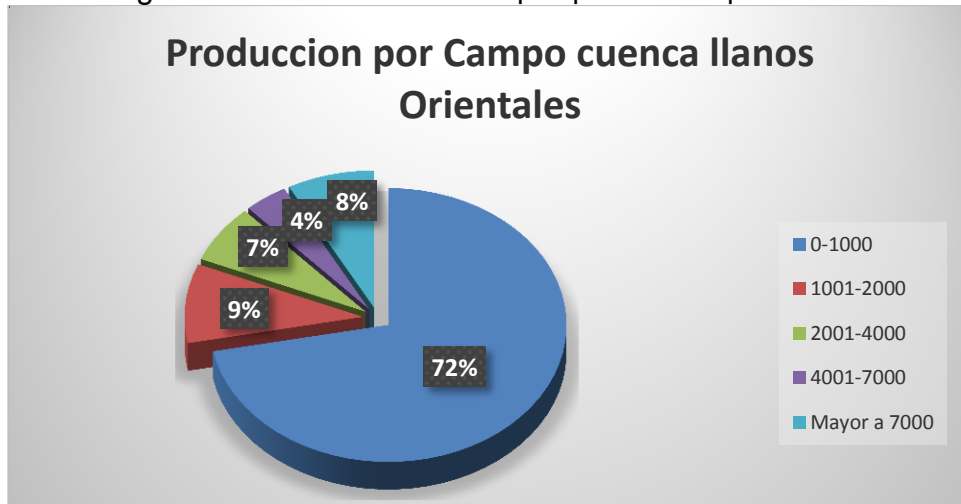
En la cuenca de llanos orientales se analizó una base de datos compuesta por 192 campos productores de petróleo. Dentro de los cuales se encuentran los campos de mayor producción de crudo a nivel nacional como es el caso de campo Rubiales, Caño limón, Apiay, Castilla, Chichimene, Quifa, Cupiagua, entre otros.

En la figura 41 se observa la distribución de los campos de acuerdo a la producción promedio diaria. Mediante la cual se observa que el 72% de los campos tienen una producción inferior a los 1000bopd. Lo que es ideal para el sistema Hidro-PCP dado que las bombas PCP característicamente disponen de un desplazamiento similar al proporcionado por los equipos de bombeo mecánico, los cuales emplean sartas de varillas, lo que limitan su aplicación en términos de profundidad y desviación.

Desplazamientos típicos de las bombas PCP a una velocidad promedio de 150-250rpm (velocidades óptimas) pueden manejar producciones de hasta 1000BFPD sin inconvenientes y manteniendo extensos tiempos de vida útil a los equipos. La

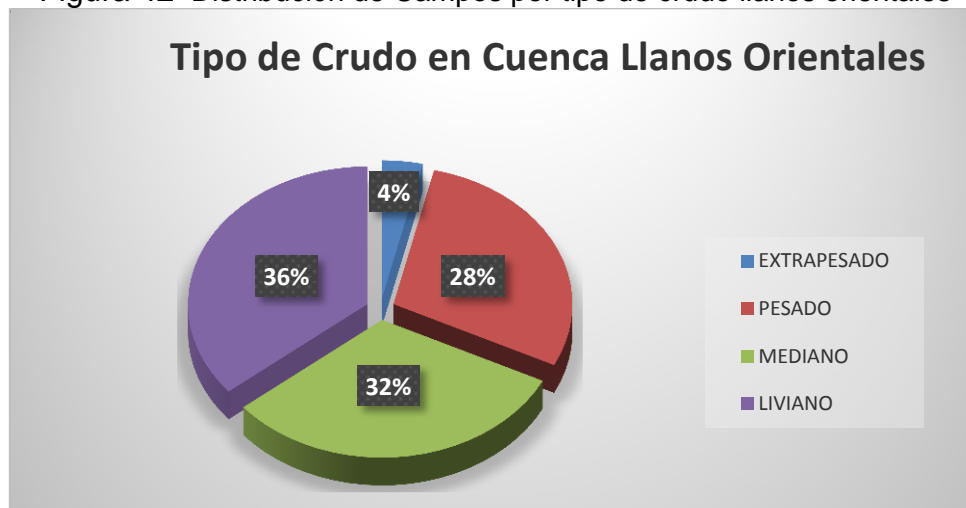
figura 41 demuestra el gran potencial y avance tecnológico desarrollado en el mejoramiento del sistema PCP usando motores hidráulicos de fondo dado que eliminan su limitación en términos de profundidad y desviación. Campos como Rubiales para los cuales un bajo API sugiere dilución, pueden hallar una mejora en términos de producción si se emplea el diluyente como fluido motriz abierto en el sistema Hidro-PCP obteniendo una dilución desde fondo de pozo, minimizando viscosidad de fluidos y facilitando el tratamiento de los mismos en superficie.

Figura 41 Distribución de Campos por tasa de producción



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, 2012 producción BEM Base de datos Diciembre [CD-ROM] 2012. [Bogotá- Colombia] Enero 15, 2013. [Citado el 26 Sep 2014]. Disponible en epis, acipet.

Figura 42 Distribución de Campos por tipo de crudo llanos orientales



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, 2012 producción BEM Base de datos Diciembre [CD-ROM] 2012. [Bogotá- Colombia] Enero 15, 2013. [Citado el 26 Sep 2014]. Disponible en epis, acipet.

En la figura 42 se muestra la distribución por tipo de crudos producido en la cuenta de los llanos orientales. Donde se observa una distribución casi homogénea de los crudos livianos, medianos y pesados con una menor proporción para Extrapesados. En relación al sistema Hidro-PCP aunque no represente una limitación al sistema, no es aconsejable su implementación en crudos livianos dado las altas relaciones de GOR y la disminución de eficiencia volumétrica de las bombas PCP por el escurrimiento y los problemas de compatibilidad de fluidos con los componentes elastómeros de equipo de subsuelo.

Sin embargo la proporción de crudos Extrapesados, pesados y medianos equivale a un 64% de los campos de la cuenca de los llanos orientales colombianos, por lo que las posibilidades y factibilidad del sistema Hidro-PCP son realmente altas e importantes para la producción petrolera.

## 6. CONCLUSIONES

1. El sistema de levantamiento artificial de bombas de cavidades progresivas es ideal para la producción de fluidos viscosos como los normalmente encontrados en los crudos pesados y extra pesados. Sin embargo la sarta de varillas es sin duda una limitante significativa en términos de profundidad y pozos desviados u horizontales.
2. Los Motores Hidráulicos de fondo usados convencionalmente en las operaciones de perforación proveen el torque, velocidad y potencia requerida por el equipo de fondo de las bombas PCP. Lo que hace factible técnicamente la utilización de estos equipos en la mejora del sistema de levantamiento artificial de cavidades progresivas.
3. La mejora del sistema PCP convencional con motores de hidráulicos de fondo requieren de un ensamble mecánico que permita transmitir el torque, potencia y velocidad generada en el motor hacia la bomba de cavidades progresivas mediante la sección de secciones acopladoras, cojinetes y sello mecánico.
4. La sección de transmisión está compuesta por acopladoras que convierten el movimiento excéntrico de los rotores en movimientos concéntricos, donde se instalan los cojinetes que soportan las cargas axiales y radiales generadas por el peso de los rotores.
5. El sistema Hidro-PCP representa una solución ingenieril a las limitaciones del sistema PCP convencional dado que la potencia requerida en el equipo de fondo es transmitida mediante fluido motriz desde superficie. Lo que elimina las limitaciones de profundidad y grado de desviación de los pozos donde sea instalado.
6. Las velocidades de operación del sistema Hidro-PCP son generadas en proporción al caudal bombeado de fluido motriz y a las configuraciones y desplazamientos de fabricación del motor de fondo empleado.

7. El torque generado por el motor hidráulico de fondo está relacionado de manera proporcional a la presión de bombeo del fluido motriz. Las cuales pueden ser ajustadas mediante curvas de desempeño de cada motor, las cuales son suministradas por diferentes proveedores.
8. El equipo de superficie del sistema Hidro-PCP es exactamente igual a los empleados en el sistema hidráulico convencional. Donde existe un sistema de recuperación del fluido motriz, tanque de almacenamiento y acondicionamiento del fluido, Un equipo de bombeo en conjunto con un motor primario imprimen la energía requerida al fluido. El cual mediante potencia hidráulica acciona el motor de fondo generando potencia, torque y velocidad.
9. El sistema Hidro-PCP al igual que el sistema hidráulico convencional presenta la posibilidad de operar con un sistema de fluido motriz abierto o cerrado. En el sistema abierto el fluido motriz es mezclado con el fluido de producción, lo que requiere de un equipo de recuperación de superficie. Y cerrado en el cual el fluido motriz no se mezcla con fluidos de formación, en el cual el sistema de superficie es más sencillo y mantiene un volumen de fluido motriz constante.
10. El sistema Hidro-PCP mejoran algunos rangos de aplicación del sistema PCP convencional. Un estudio estadístico de los campos Colombianos permite concluir que las posibilidades de aplicación del sistema Hidro-PCP a nivel Colombia es alrededor de 72%. Lo que significa una gran oportunidad comercial del sistema.
11. El sistema Hidro-PCP abierto permite una ventaja operativa en la producción de crudos pesados y Extrapesados si se emplea como fluido motriz un líquido diluyente que en fondo de pozo mediante mezcla permita la reducción de la viscosidad de los fluidos, minimizando perdidas por fricción y facilitando tanto la extracción como el tratamiento de fluidos de formación.

## 7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda profundizar en el estudio de la factibilidad del sistema Hidro-PCP que permita llevar a cabo la construcción de planos de los equipos requeridos en el sistema y la fabricación para la implementación.
- Realizar un análisis económico del sistema hidro-PCP para reforzar la viabilidad del sistema frente a otros sistemas convencionales como hidráulico, electrosumergible y bombeo mecánico, manteniendo en comparación los rangos comunes de aplicación.
- Llevar a cabo la etapa constructiva del equipo de fondo e implementar el sistema en pozos pilotos que permitan comprobar la funcionalidad y evaluar el desempeño del sistema. Detectando fallas y mejoras del sistema con miras a ampliar el run life de los equipos.
- Realizar acercamientos con empresas que hayan desarrollado tecnologías similares a la hidro-PCP con el fin de potencializar el sistema basado en lecciones aprendidas e intercambio tecnológico.

## BIBLIOGRAFÍA

- Basics in Progressing Cavity Pumping Systems Course. PCP Training Program, Weatherford Artificial Lift Systems International. Bogotá-Colombia, 18-20 Abril 2007.
- BECERRA M Oscar y MENA, María E. Integrated Análisis for PCP Systems. Petrobras Energía S.A. – Universidad Simón Bolívar. Buenos Aires-Argentina. 15-18 Abril, 2007.
- CHOLET, Henri. Progressing Cavity Pumps. Instituto Francés Del Petróleo. Editions Technip. Paris-Francia, 1997.
- CUILLA, Francisco. Principios fundamentales para diseño de sistemas con bombas de cavidad progresiva. Weatherford Artificial Lift Systems. Alberta-Canadá, 1999.
- Dunn L, J and Matthews C, M. PC Pumping Systems: Design, Operation and performance optimization. Centre for Engineering Research Inc, 1994.
- Dunn L, J and Matthews C, M. Progressing Cavity Pumping System applications in heavy oil production. Paper SPE 30271, Junio 19-21, 1995.
- Dunn L, J. Experimental investigation of high volume viscous fluid progressing cavity pumping. SPE PCP ATW 2004.
- FERNANDEZ, D Pedro. Mecánica de fluidos. Departamento de ingeniería eléctrica y energética. Universidad de Cantabria
- GIANGIACOMO, Leo A y Hill David R. Optimizing pumping well Efficiency with smart fluid level controller technology. Extreme Petroleum Technology – Hi-Tech Oil Company. SPE 52210. Oklahoma 28-31 Marzo, 1999.
- MORITA, N y BOYD, P.A. Typical sand production problems: Case studies and strategies for sand control. SPE 22739 Members. Conoco Inc, Dallas 1991.

- Progressing Cavity Pump manual, general information, Version 1.0, Weatherford Artificial Lift Systems, 1999.
- SAVETH, K. J y KLEIN, S. T. The progressing cavity Pump: Principle and Capabilities. Paper SPE 18873, Society of Petroleum Engineers Inc, 1989.
- TRUJILLO J, Sonia y REMOLINA M, Raúl. Trazabilidad de las mediciones de viscosidad. Centro Nacional de metrología. Simposio de metrología 25-27 Octubre 2006.
- <http://www.widman.biz/Seleccion/Viscosidad/viscosidad.html>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia>