



UNIVERSIDAD DE MATANZAS "CAMILO CIENFUEGOS"
FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

**Diseño de un sistema de bombeo de cavidades
progresivas para el pozo VD 702.**

**Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en Perforación
de pozos de petróleo y producción de petróleo.**

Mención: Producción de petróleo.

Autor: Ing. Milay Villalonga Rodríguez

Matanzas

2015



UNIVERSIDAD DE MATANZAS "CAMILO CIENFUEGOS"
FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

**Diseño de un sistema de bombeo de cavidades
progresivas para el pozo VD 702.**

**Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en Perforación
de pozos de petróleo y producción de petróleo.**

Mención: Producción de petróleo

Autor: Ing. Milay Villalonga Rodríguez

Tutor: Esp. Didier Rivero Rizo

Matanzas

2015

Declaración de autoridad



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Milay Villalonga Rodríguez declaro que soy el único autor del presente trabajo y autorizo a la Universidad de Matanzas y al Centro Politécnico del Petróleo a hacer el uso que estime pertinente con la información que aparece en el mismo siempre y cuando se respete nuestra autoría.

Milay Villalonga Rodríguez

Nombre y Apellidos.

Firma

Dedicatoria



DEDICATORIA.

A mi esposo Ariel. A mis hijos Diego y Dianela.

Agradecimientos



AGRADECIMIENTOS.

A mi esposo Ariel por todo su amor, apoyo y dedicación.

A mi mamá por estar siempre a mi lado, por su apoyo y cariño.

A mi tía Baby, mi ángel de la guarda.

A mis compañeros del Petrolero XIV, tarde pero seguro.

Al colectivo del CC-7.

A todos GRACIAS.



RESUMEN

El presente trabajo se realiza en la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro, específicamente en el pozo VD 702 del Centro Colector # 7 con el objetivo de diseñar un sistema de levantamiento artificial de bombeo por cavidades progresivas capaz de obtener la misma producción actual del pozo con porcentos de carga aceptables en cada uno de sus elementos.

La recopilación de los datos de producción y completamiento actual del pozo, así como los recursos existentes en los almacenes de la EPEPC constituyen el punto de partida para el diseño del sistema de bombeo por cavidades progresivas, el cual se valida tomando como base la metodología descrita por Hirschfeldt (2008), permitiendo evaluar los elementos: % de carga axial en el varillón, % de carga axial en la cabilla, % de carga axial en la unidad de fuerza, % de carga tangencial en el varillón, % de carga tangencial en la cabilla, % de carga tangencial en el motor.

Después de aplicar la metodología y hacer un análisis de los resultados se concluye que el cambio de sistema de levantamiento artificial en el pozo VD 702, de bombeo mecánico convencional a bombeo por cavidades progresivas, permite mantener la producción actual del pozo con porcentos de cargas que no sobrepasan los límites aceptables para cada uno de sus elementos según sus características de diseño.



SUMMARY

This investigation is made in Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro, specifically in VD 702 well of the Collector Center # 7. The main objective of this work is to design a progressive cavity pumping artificial lifting system capable of obtaining the current well production rate with acceptable load percentages in each of its elements.

The compilation of production data and the current well completion as well as the EPEPC existing resources in warehouse are the start line of the design of progressive cavity pumping artificial lifting system. The validation of this design is based on the methodology described by Hirschfeldt (2008), which allows the evaluation of the following elements: polish rod axial load %, rod axial load %, drive axial load %, polish rod tangential load %, rod tangential load % and tangential load % in the electric motor.

After analyzing the results, the conclusion is that the change of artificial lifting system in VD 702 well from conventional mechanic pumping to progressive cavity pumping allows to keep well current production rate whit load percentages that do not surpass the acceptable limits for each elements according to design specification.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. Análisis bibliográfico:	4
1.1 Principios de producción de petróleo.	4
1.1.1 Recorrido de los fluidos en el sistema.....	5
1.1.2 Parámetros más importantes en el proceso de producción de los pozos petroleros.	6
1.2 Métodos de explotación de pozos petroleros.	7
1.2.1 Surgencia natural.....	7
1.2.2 Levantamiento artificial.	8
1.2.3 Levantamiento artificial por gas o Gas Lift.....	9
1.2.4 Bombeo electro-sumergible.	10
1.2.5 Bombeo mecánico (BM).	11
1.2.6 Bombeo de cavidad progresiva (BCP).	14
1.3 Historia del bombeo por cavidades progresivas.....	14
1.4 Funcionamiento del bombeo por cavidades progresivas.....	15
1.5 Diseño del sistema de bombeo por cavidades progresivas.....	19
1.5.1 Definición del comportamiento de la afluencia del pozo.....	19
1.5.2 Selección de la bomba y su profundidad.....	20
1.5.3 Sarta de cabillas.....	21
1.5.4 Torque y potencia requerida por el sistema.....	21
1.5.5 Carga axial del sistema.....	22
1.5.6 Consideraciones generales para el diseño de sistemas de BCP.....	22
1.6 Conclusiones parciales.	25
CAPÍTULO 2. Diseño metodológico.....	26
2.1 Caracterización del objeto de estudio.....	26
2.1.1 Situación actual del pozo VD 702.....	26
2.2 Estrategia de la investigación.....	27
2.2.1 Recopilación de datos actuales del pozo.	28
2.2.2 Elementos para el diseño por BCP.	29
2.2.3 Validación del diseño BCP.	31

Índice



2.2.4 Cálculo del impacto económico del cambio de BMC a BCP.....	37
2.3 Conclusiones parciales.....	37
CAPÍTULO 3. Análisis de los resultados.....	38
3.1 Recopilación de datos del VD 702.....	38
3.2 Completamiento del pozo VD 702 para bombeo por cavidades progresivas.....	39
3.2.1 Profundidad de la bomba.....	39
3.2.2 Selección de la bomba.....	40
3.2.3 Selección de la sarta de cabillas y tubería.....	41
3.2.4 Selección del equipamiento en superficie.....	42
3.2.5 Resumen del completamiento del pozo VD 702.....	42
3.3 Validación del completamiento de BCP para el pozo VD 702.....	44
3.3.1 Cálculo de la presión de descarga de la bomba de cavidad progresiva del pozo VD 702.....	44
3.3.2 Evaluación de la bomba del VD 702.....	46
3.3.3 Cálculo del torque en el varillón del VD 702.....	47
3.3.4 Cálculo del peso total de la sarta del VD 702.....	48
3.3.5 Cálculo de tensiones combinadas en el varillón del VD 702.....	48
3.3.6 Cálculo de tensiones combinadas en la cabilla del VD 702.....	49
3.3.7 Cálculo del % de carga axial en varillón del VD 702.....	50
3.3.8 Cálculo del % de carga axial en la cabilla del VD 702.....	50
3.3.9 Cálculo del % de carga axial en la unidad de fuerza del VD 702.....	51
3.3.10 Cálculo del % de carga tangencial en el varillón del VD 702.....	51
3.3.11 Cálculo de la carga tangencial en la cabilla del VD 702.....	51
3.3.12 Par del motor del VD 702.....	52
3.3.13 Resumen de la validación del sistema de BCP en el pozo VD 702.....	52
3.4 Impacto económico del cambio de BMC a BCP.....	53
3.5 Conclusiones parciales.....	54
CONCLUSIONES.....	56
RECOMENDACIONES.....	57
BIBLIOGRAFÍA.....	58
ANEXOS.....	60



INTRODUCCIÓN

Las características de la producción de los yacimientos de la franja de crudos pesados del norte de Cuba presentan particulares que no abundan en la industria petrolera mundial debido a las dificultades que implica su explotación. La geología insular, bajas presiones y temperatura del yacimiento, empuje por gas, altos cortes de agua, crudos de altas viscosidades y densidades, altos contenidos de gases altamente corrosivos y nocivos para la salud humana son algunos de los retos que enfrentan los técnicos de la industria petrolera cubana, además y no por último menos importante, del innegable impacto negativo del bloqueo económico impuesto al país por Estados Unidos, nación que domina la mayor parte de las compañías petroleras del mundo, limitando la asimilación de tecnologías y el acceso a muchos de los recursos necesarios para la producción.

Sin embargo, como para cualquier estado, la energía es un problema de primer orden y de esta forma lo enfrenta la dirección del país, lo que ha llevado a suplir la demanda nacional de crudo para la generación eléctrica hasta el 50% con producción nacional. De tal forma, conscientes de la responsabilidad, los técnicos de la Empresa de Perforación y Extracción del Centro (EPEPC) buscan incansablemente soluciones a los problemas que afectan la producción de petróleo y gas.

Dentro de tales problemas se encuentran las altas cargas que generan la alta viscosidad del crudo y los cada vez más bajos niveles dinámicos de los pozos del Yacimiento Varadero con varios años de explotación. El pozo VD 702 del Centro Colector # 7 de la EPEPC es una muestra de ello, motivando la presente investigación

Situación Problemática:

El sistema de levantamiento artificial de Bombeo Mecánico Convencional (BMC) en el pozo VD 702 se encuentra trabajando con porcentajes de carga que exceden los límites aceptables de sus elementos.

Antecedentes:

La EPEPC no cuenta con SOFTWARE de diseño de Bombeo por Cavidades Progresivas (BCP) debido al alto costo de las licencias en el mercado y para enfrentar problemas como



Introducción

estos se tiene como variantes confiar el diseño a alguna compañía extranjera como han sido en su momento la canadiense *Sherritt* o la brasileña *Netzsch*.

Problema Científico:

¿Al cambiar el sistema de levantamiento artificial de bombeo mecánico convencional a bombeo por cavidades progresivas en el pozo VD 702 se podrá obtener la misma producción actual con porcentos de carga de cada uno de sus elementos dentro de los límites aceptables?

Hipótesis:

Si se diseña un sistema de levantamiento artificial de BCP se podrá obtener la misma producción actual del pozo VD 702 con porcentos de carga de cada uno de sus elementos dentro de los límites aceptables.

Objetivo General:

Diseñar un sistema de levantamiento artificial de Bombeo por Cavidades Progresivas en el pozo VD 702 capaz de obtener la misma producción actual del pozo con porcentos de carga de cada uno de sus elementos dentro de los límites aceptables.

Objetivos Específicos:

- Realizar una revisión bibliográfica para valorar el estado del arte del diseño del sistema de levantamiento artificial de bombeo por cavidades progresivas.
- Diseñar un sistema de levantamiento artificial de bombeo por cavidades progresivas en el pozo VD 702 tomando como base los recursos existentes en el almacén de la empresa y sus características técnicas brindadas por los fabricantes.
- Validar la capacidad del sistema de levantamiento artificial de bombeo por cavidades progresivas en el pozo VD 702 capaz de obtener la misma producción actual del pozo con porcentos de carga de cada uno de sus elementos dentro de los límites aceptables.
- Calcular el impacto económico que representa para la Empresa de Perforación y Extracción del Centro el cambio de sistema de levantamiento artificial de bombeo mecánico convencional a bombeo por cavidades progresivas.

Variable Independiente:

Diseño un sistema de levantamiento artificial de bombeo por cavidades progresivas en el pozo VD 702 capaz de obtener la misma producción actual del pozo.



Introducción

Variable Dependiente:

Porcentos de carga en los elementos del sistema de levantamiento artificial de bombeo por cavidades progresivas en el pozo VD 702 dentro de los límites aceptables.

Estructura del Trabajo: El desarrollo de esta Investigación constará de tres capítulos:

Capítulo I: Marco teórico. En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica sobre los principales temas relacionados con el objeto de estudio.

Capítulo II: Diseño Metodológico. En este capítulo se define el objeto de estudio y se elabora un diagrama de flujo que establece los pasos a seguir para el diseño y validación del sistema de bombeo de cavidades progresivas para el pozo VD 702.

Capítulo III: Análisis de los resultados. En este capítulo se valida el diseño por la metodología (Hirschfeldt, 2008) sobre la base de la obtención de porcentos de carga adecuados para mantener la actual producción del pozo y se muestran los resultados obtenidos.



CAPÍTULO 1. Análisis bibliográfico:

1.1 Principios de producción de petróleo.

El proceso de producción en un pozo de petróleo, comprende el recorrido de los fluidos desde el radio externo de drenaje en el yacimiento hasta el separador de producción en la estación de flujo (Guo y Lyon, 2007). En la Figura 1.1 se muestra el sistema completo con cuatro componentes claramente identificados: yacimiento, completación, pozo, y línea de flujo superficial (Maggiolo, 2008).

Existe una presión de partida de los fluidos en dicho proceso que es la presión estática del yacimiento (P_{ws}) y una presión final o de entrega que es la presión del separador en la estación de flujo (P_{sep}).

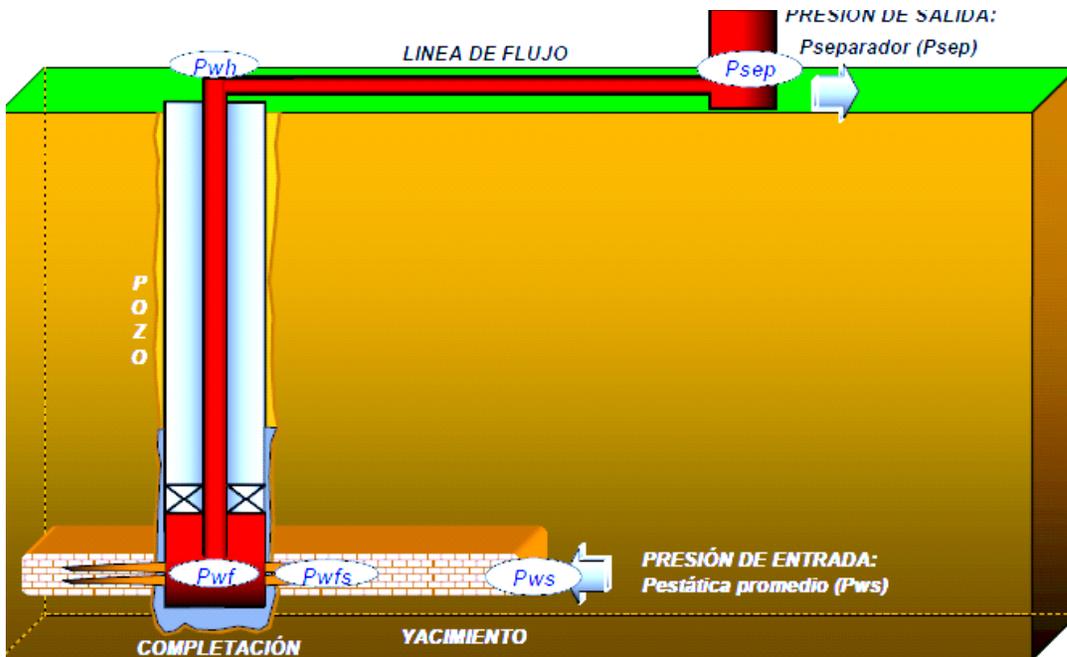


Figura 1.1: Sistema de producción en un pozo petrolero (Maggiolo, 2008).



Capítulo I: Análisis bibliográfico

1.1.1 Recorrido de los fluidos en el sistema

- Transporte en el yacimiento: El movimiento de los fluidos comienza en el radio de drenaje del pozo donde la presión es P_{ws} , viaja a través del medio poroso hasta llegar a la cara de la arena o radio del hoyo, donde la presión es P_{wfs} o presión en la cara del pozo. En este módulo el fluido pierde energía en la medida que el medio sea de baja capacidad de flujo, presente restricciones en la cercanías del hoyo y el fluido ofrezca resistencia al flujo. Mientras mas grande sea el hoyo mayor será el área de comunicación entre el yacimiento y el pozo aumentando el índice de productividad del pozo. La perforación de pozos horizontales aumenta sustancialmente el índice de productividad del pozo.
- Transporte en las perforaciones: Los fluidos aportados por el yacimiento atraviesan la completación que puede ser un revestidor de producción cementado y perforado, normalmente utilizado en formaciones consolidadas, o un empaque con grava, normalmente utilizado en formaciones poco consolidadas para el control de arena. En el primer caso la pérdida de energía se debe a la sobrecompactación o trituración de la zona alrededor del túnel perforado y a la longitud de penetración de la perforación; en el segundo caso la pérdida de energía se debe a la poca área expuesta a flujo. Al atravesar la completación los fluidos entran al fondo del pozo (P_{wf}).
- Transporte en el pozo: Ya dentro del pozo los fluidos ascienden a través de la tubería de producción venciendo la fuerza de gravedad y la fricción con las paredes internas de la tubería. Llegan al cabezal del pozo (P_{wh}).
- Transporte en la línea de flujo superficial: Al salir del pozo si existe un reductor de flujo en el cabezal ocurre una caída brusca de presión que dependerá fuertemente del diámetro del orificio del reductor, a la descarga del reductor la presión es la presión de la línea de flujo (P_{lf}), luego atraviesa la línea de flujo superficial llegando al separador en la estación de flujo, con una presión igual a la presión del separador (P_{sep}), donde se separa la mayor parte del gas del petróleo.



Capítulo I: Análisis bibliográfico

1.1.2 Parámetros más importantes en el proceso de producción de los pozos petroleros.

Diferencial de presión: Para que pueda existir flujo de fluidos desde la formación hacia el pozo, es necesario que la presión de formación o estática (P_{ws}) sea mayor que la de fondo con el pozo produciendo o presión fluyente (P_{wf}). La diferencia entre estas es lo que se conoce como diferencial de presión formación – pozo ($P_{ws} - P_{wf}$). A $P_{wf} = 0$, se obtendría la tasa máxima de producción del pozo, de igual manera, para una tasa de cero producción, la presión de fondo sería igual a la presión estática del yacimiento (Chacín, 2003).

Nivel Estático (NE): es la altura de la columna de fluidos que balancea la presión del yacimiento en un pozo que produce por levantamiento artificial, es decir, un pozo donde el yacimiento no tiene suficiente energía para vencer las presiones desde el fondo hasta el separador de la estación. Conociendo el gradiente de los fluidos del pozo es fácil calcular esta presión de yacimiento luego de capturar el NE.

Nivel Dinámico (ND): es la altura de los fluidos en el anular del pozo una vez que la tasa de producción se ha estabilizado.

Sumergencia: es la altura de la columna de fluidos en el anular cuya base es la profundidad de la bomba y el tope es el ND. La sumergencia es uno de los parámetros especialmente importante cuando se estudia o diseña una instalación (Partidas, 2003).

Relación Gas Petróleo: Al encontrarse el fluido bajo condiciones de altas temperaturas y elevadas presiones en el yacimiento posee un determinado % de gas disuelto, el cual al formar una sola fase con el crudo disminuye su viscosidad y este es capaz de fluir con más facilidad, cuando se produce el crudo, se pone de manifiesto una producción inevitable de gas (el disuelto en el crudo) y al valor de cantidad de m^3 de gas/ m^3 de petróleo se le llama Relación Gas – Petróleo (RGP) (también se determina en % de gas disuelto); pero a medida que se extrae el crudo, el reservorio pierde energía (disminuye la presión en el yacimiento) y puede descender hasta el punto donde comienza a separarse el gas del petróleo. En yacimientos con varios años de explotación se pone de manifiesto que la presión de saturación coincide con la presión del yacimiento. La magnitud de la presión de saturación depende de las propiedades del petróleo y el gas. Un petróleo menos viscoso se favorece con una mayor RGP.

Capítulo I: Análisis bibliográfico



BSW: El porcentaje de BSW del caudal de producción, no es más que la relación existente de residuos sólidos y agua en emulsión o mezclados con petróleo que produce el pozo.

1.2 Métodos de explotación de pozos petroleros.

Existen dos formas fundamentales de extraer el petróleo del yacimiento: una por surgencia natural y la otra por levantamiento artificial.

1.2.1 Surgencia natural.

Este método de extracción es el más económico y menos complicado que se pueda utilizar, ya que el petróleo surge naturalmente con la energía propia de la capa la cual es capaz de levantar la columna de petróleo desde el fondo hasta la superficie y la mano del hombre interviene menos que en los otros métodos existentes.

El empuje del petróleo hacia los pozos se efectúa por la presión natural que tiene el yacimiento. En la práctica se ha constatado que este empuje se puede derivar de la presencia de un casquete de gas libre que yace encima del petróleo; de un volumen de gas disuelto en el petróleo; de un volumen de agua dinámica subyacente o de empuje por gravedad. Generalmente se da el caso de que uno de estos mecanismos es dominante y la posible presencia de otro podría actuar como ayuda a dicho mecanismo dominante (Berger, 1992; Chalet, 2000).

La figura 1.2 muestra el comportamiento de las curvas de presión contra caudal tanto en la entrega del yacimiento como en la demanda del completamiento. El punto de intersección de ambas curvas es el nodo que usualmente se coloca en el fondo del pozo cuando se desea realizar un balance de energía para evaluar el comportamiento de los sistemas de levantamiento. Como se observa ambas curvas se interceptan, lo que significa que para las propiedades del fluido, reservorio y completamiento actual el pozo es capaz de producir por surgencia natural un caudal $Q_{oil 1}$.

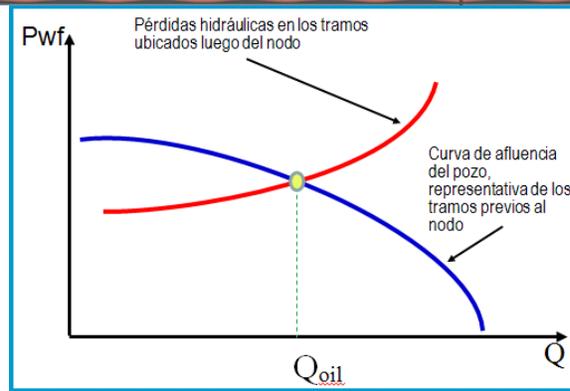


Figura 1.2: Pozo capaz de producir por surgencia natural. Elaboración propia.

1.2.2 Levantamiento artificial.

Cuando la energía natural que empuja a los fluidos deja de ser suficiente como para llevarlos hasta la superficie, se recurre a métodos artificiales para continuar extrayendo el petróleo (Cajigal, 2005).

La Figura 1.3 representa el comportamiento de un pozo incapaz de fluir de modo natural y por lo tanto es necesario utilizar métodos de levantamiento artificial, además para producir un caudal $Q_{oil,2}$ es necesario que dicho método de levantamiento artificial incremente la presión en un valor ΔP o diferencia de presión entre la capa y el fondo del pozo.

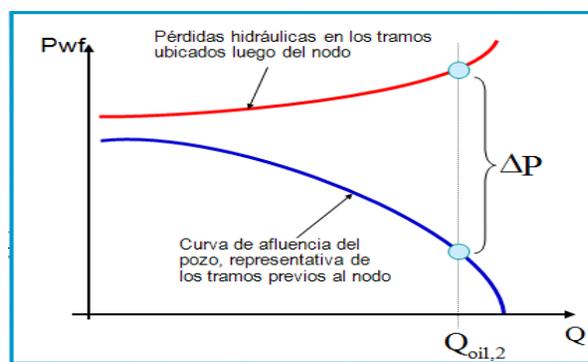


Figura 1.3: Pozo que necesita utilizar métodos de levantamiento artificial. Elaboración propia.



Capítulo I: Análisis bibliográfico

Con el levantamiento artificial comienza la fase más costosa de la explotación de un yacimiento.

Los principales métodos de levantamiento artificial son los siguientes:

- Levantamiento artificial por gas o *Gas Lift*.
- Bombeo de cavidad progresiva.
- Bombeo electro-sumergible.
- Bombeo mecánico.

Existen otros métodos de elevación artificial pero que se aplican solo en pozos longevos con bajo nivel de fluido. Estos son la explotación mediante el uso de compresores y del sistema de *Swab* (Barberi, 1998; T.E.W, 2006).

1.2.3 Levantamiento artificial por gas o Gas Lift.

Este método de levantamiento artificial consiste en la inyección continua de gas a alta presión en la columna de crudo con el objetivo de disminuir la densidad del fluido y reducir el peso de la columna hidrostática sobre la formación, obteniéndose así un diferencial de presión entre el yacimiento y el pozo que permite que el pozo fluya adecuadamente. El gas también puede inyectarse a intervalos regulares para desplazar los fluidos hacia la superficie en forma de tapones de líquido. La inyección se hace en varios sitios de la tubería a través de válvulas reguladas que abren y cierran al gas automáticamente. Este procedimiento se suele comenzar a aplicar antes de que la producción natural cese completamente (T.E.W, 2006).

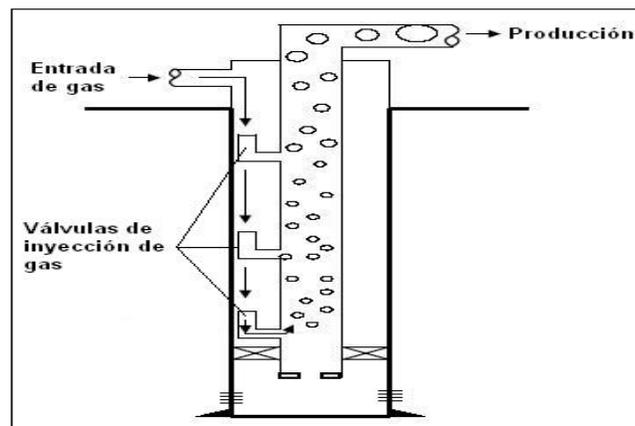


Figura 1.4: Levantamiento artificial por gas (Cajigal, 2005).



Capítulo I: Análisis bibliográfico

Los yacimientos cubanos no contienen reservas suficientes de gas para implementar este sistema de levantamiento que además necesita de grandes inversiones en instalaciones de superficie.

1.2.4 Bombeo electro-sumergible.

Este método se aplica cuando se desea producir grandes volúmenes de fluido, en pozos medianamente profundos y con grandes potenciales. El sistema consiste en una bomba centrífuga de etapas múltiples, impulsada por un motor eléctrico de subsuelo que está conectado a una instalación eléctrica de superficie por medio de un cable eléctrico (Barberi, 1998; Samir, 2009).

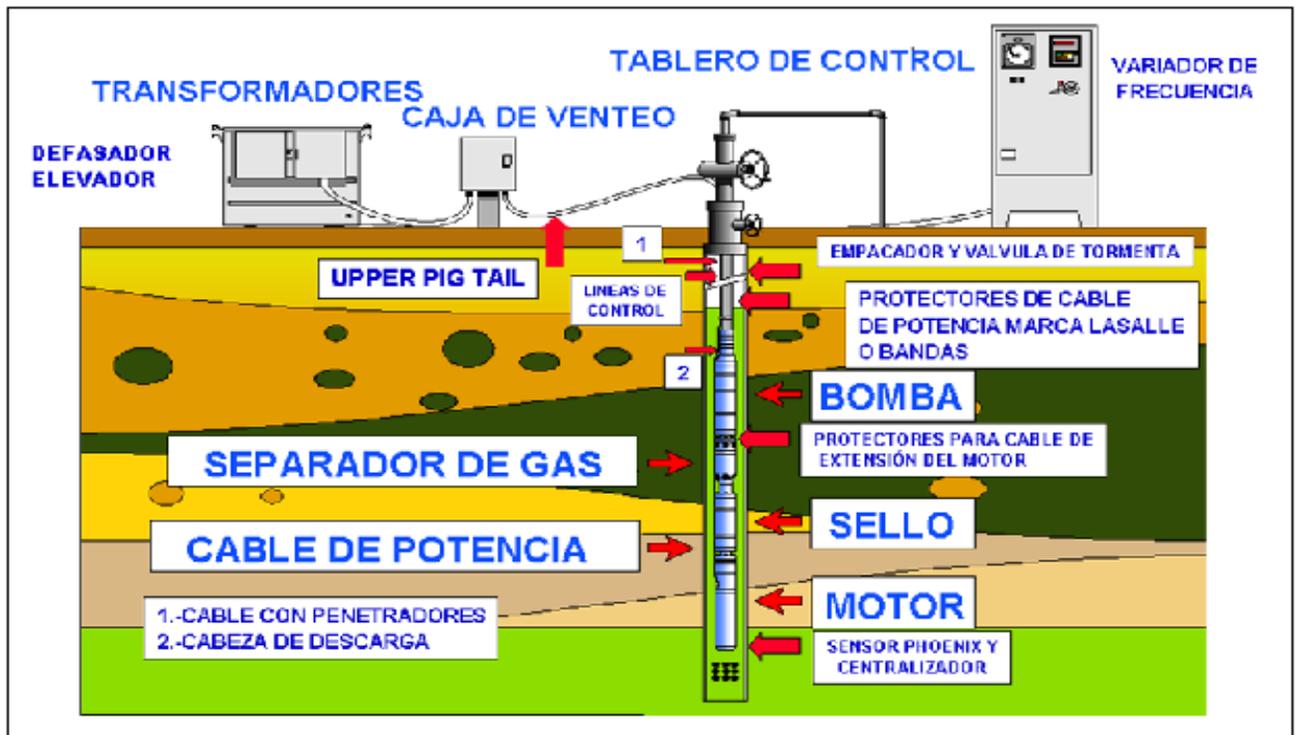


Figura 1.5: Sistema de levantamiento artificial BES (Cajjal, 2005).

El Sistema de bombeo Electro-sumergible se ha introducido en dos pozos del Yacimiento Varadero con el objetivo de resolver los problemas que generan la alta viscosidad del crudo y los bajos niveles dinámicos de los pozos. Sin embargo los resultados no han cumplido con las expectativas del departamento técnico debido al relativamente corto tiempo de producción del



Capítulo I: Análisis bibliográfico

Sistema de Levantamiento antes del fallo de cualquiera de sus elementos respecto a sus altos precios de adquisición y operación. Esto está motivado porque los productores de esta tecnología no han desarrollado modelos específicamente adaptados a las características de los crudos pesados, lo que lo hace muy vulnerable esta tecnología ante los escenarios críticos de los yacimientos cubanos.

1.2.5 Bombeo mecánico (BM).

El sistema bombeo mecánico (BM) es el método de levantamiento artificial más usado en el país. Tiene su mayor aplicación en la producción de crudos pesados y extra pesados. Consiste en una bomba vertical colocada en la parte inferior de la tubería, accionada por varillas de bombeo de acero que corren dentro de la tubería movidas por un balancín ubicado en la superficie, al cual se le transmite un movimiento de vaivén por medio de la biela y la manivela, las que se accionan a través de una caja reductora movida por un motor eléctrico. Este sistema se divide en dos partes:

- Equipamiento de superficie.
- Equipamiento de fondo.

Equipamiento de superficie.

Los componentes principales del equipamiento de superficie son (Rodríguez, 2007):

- Estructura: su función es servir como miembro rígido o soporte a los demás componentes de la unidad de bombeo; está compuesta por el poste maestro, el balancín, la cabeza del balancín, el cojinete compensador y bielas a los lados.
- Apoyos estructurales: de estos depende el buen funcionamiento de la unidad.
- Reductor: convierte alta velocidad y baja energía de torque en baja velocidad y alta energía de torque. La reducción de velocidad se logra por un engranaje doble helicoidal en la mayoría de los casos.
- Transmisión: Transmite el movimiento del motor eléctrico al reductor mediante un engranaje por correas tipo V generalmente.

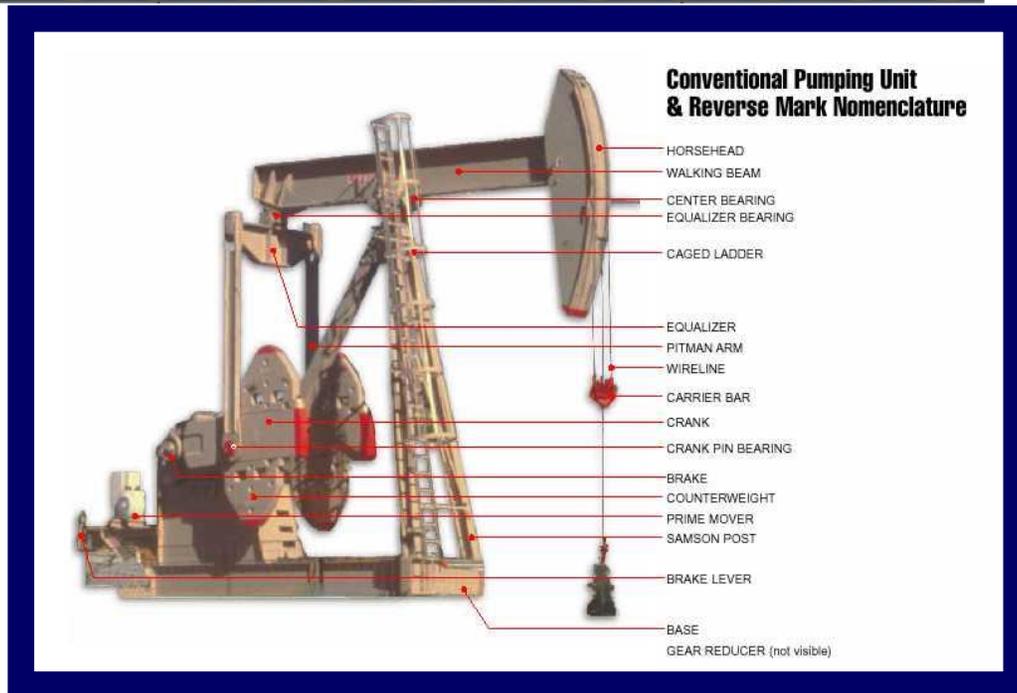


Figura 1.6: Estructura de superficie del Sistema de bombeo mecánico convencional. (Cajigal, 2005).

Nomenclatura de las unidades de bombeo mecánico.

Según las especificaciones API 11E las series de las unidades de bombeo mecánicas deben ajustarse al formato descrito en la Figura 1.8.

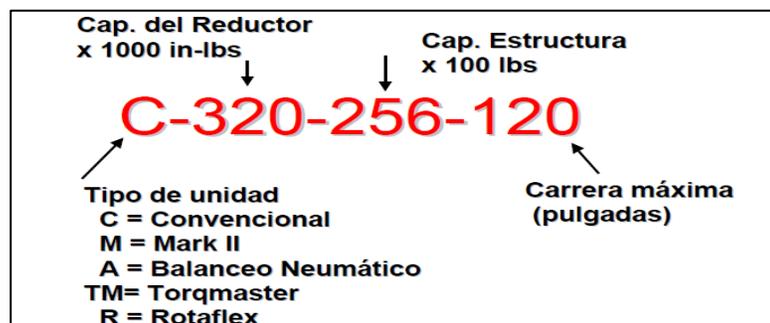


Figura 1.7: Series de las unidades de bombeo artificial según API (Svinos, 2005).

Equipamiento de fondo

- Tubería de producción: La tubería de producción es un elemento común para todos los sistemas de levantamiento artificial y tiene el objetivo de crear una tubería

Capítulo I: Análisis bibliográfico



independiente de menor diámetro que permita el bombeo de los fluidos hasta la superficie.

- **Bomba de Subsuelo:** Bomba compuesta de un barril y un pistón con válvulas de bola, una estacionaria en el barril y otra viajera en el pistón que accionan mediante la expansión y compresión del fluido (Figura 1.8). La válvula fija permite que el petróleo entre al cilindro de la bomba. En la carrera descendente de las varillas, la válvula fija se cierra y se abre la válvula viajera para que el petróleo pase de la bomba a la tubería de producción. En la carrera ascendente, la válvula viajera se cierra para mover hacia la superficie el petróleo que está en la tubería y la válvula fija permite que entre petróleo a la bomba. La repetición continua del movimiento ascendente y descendente (emboladas) mantiene el flujo hacia la superficie (Svinos, 2005).

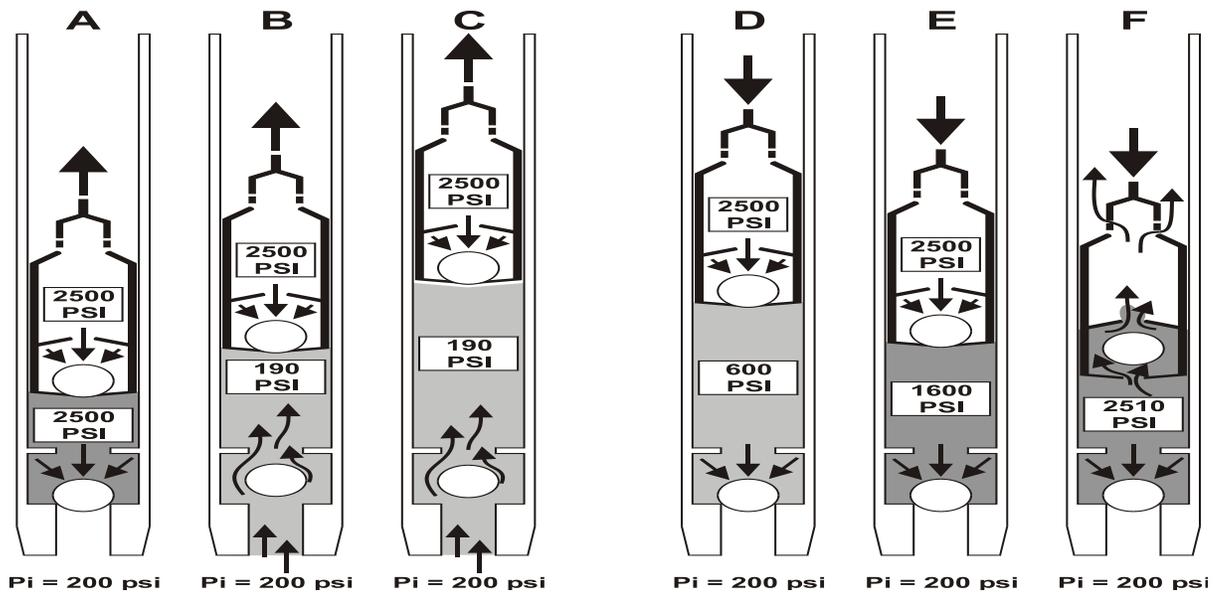


Figura 1.8: Funcionamiento de la bomba de pistón (Svinos, 2005).

Este sistema de levantamiento fue el primero de los introducidos en Cuba, esto hace que sea una tecnología ampliamente dominada por las empresas petroleras del país, sin embargo con la construcción de pozos inclinados y horizontales, así como los bajos niveles dinámicos de los pozos de los yacimientos cubanos disminuye su capacidad de producción, limitada por las altas cargas generadas en cada uno de sus elementos, como son los altos torques en los reductores, fatiga de la sarta de cabillas y continuos fallos en correas, bigotes, etc. Esta



Capítulo I: Análisis bibliográfico

situación ha motivado el proceso de asimilación del bombeo por cavidades progresivas como alternativa para resolver estos problemas.

1.2.6 Bombeo de cavidad progresiva (BCP).

El sistema de bombeo por cavidades progresivas debe ser la primera opción a considerar en la explotación de pozos productores de petróleo por su relativa baja inversión inicial; bajos costos de transporte, instalación, operación y mantenimiento; bajo impacto visual, muy bajos niveles de ruido y mínimos requerimientos de espacio físico tanto en el pozo como en almacén (Saveth, 2010). Además desde el punto de vista técnico este sistema de levantamiento se adapta perfectamente a las características de los pozos petroleros cubanos porque puede operar a bajas velocidades, permite manejar sólidos en suspensión y cortes de agua, crudos de mediana y baja gravedad API, además opera en pozos verticales, inclinados, altamente desviados y horizontales (PCIS, 2003).

La principal limitante del bombeo por cavidades progresivas en el país es el bajo nivel dinámico que presentan muchos de los pozos, lo que genera altas cargas sobre los elementos del sistema, además de las características del crudo cubano con alta densidad y viscosidad. Estos aspectos representan un reto para los diseños de BCP y constituye el objetivo fundamental del presente trabajo, por lo que a continuación se aborda el tema con mayor profundidad.

1.3 Historia del bombeo por cavidades progresivas.

René Moineau, un ingeniero aeronáutico francés, inventó la bomba de cavidad progresiva (PCP por sus siglas en inglés) y registró su patente en los Estados Unidos en 1932. Fundó la compañía *PCM Pompes SA* en Francia que hoy en día sigue siendo líder en la fabricación de bombas de cavidades progresivas con más de 70 años de experiencia.

La compañía HUSKY OIL instaló una PCP en un pozo de campo de *Lloydminsteren* 1966 con un motor sumergible. Trabajó muy bien y secó el pozo en 15 minutos y quemó la bomba. HUSKY patentó la idea de usar un reductor planetario entre el motor y la bomba pero nunca la desarrolló.

Capítulo I: Análisis bibliográfico



Compañías petroleras rusas comenzaron a usar bombas de cavidad progresivas en los años 60 con motores eléctricos sumergibles. Ellos desarrollaron motores de 8 polos para el interior del pozo que tenían una velocidad sincrónica de 750 rpm a 50 Hz, variables con variadores de frecuencia.

Un ingeniero llamado Becker comenzó a desarrollar bombas de cavidad progresiva en Long Beach, California a finales de 1940. El desarrolló unidades de fuerza con sistema de cabillas para pozos someros. Sin embargo esta aplicación no se extendió debido a su limitado alcance (Beauquin, Boireau y Lemay, 2006).

1.4 Funcionamiento del bombeo por cavidades progresivas.

En el sistema convencional BCP (Figura 1.9), la potencia requerida por la bomba, es transmitida a la sarta de cabillas de bombeo por el cabezal, localizado en superficie, típicamente un sistema está compuesto por:

- Cabezal y motor.
- Sarta de cabillas.
- Bomba de cavidades progresivas.
- Accesorios (ancla de torque, anclas de *tubing*, centralizadores de barras).

A grandes rasgos, la bomba de cavidades progresivas (BCP) está compuesta por el rotor y el estator. El rotor es accionado desde la superficie por un sistema impulsor que transmite el movimiento rotativo a la sarta de cabillas la cual, a su vez, se encuentra conectada al rotor. El estator es el componente estático de la bomba y muchos de ellos contienen un polímero de alto peso molecular con la capacidad de deformación y recuperación elástica llamado elastómero (Chacín, 2003). También se fabrican los estatores de metal para pozos de bajos cortes de agua y alta acidez de los fluidos. (Gamboa, Olivet, Iglesias y González, 2008; Robbins and Myers, 2009).

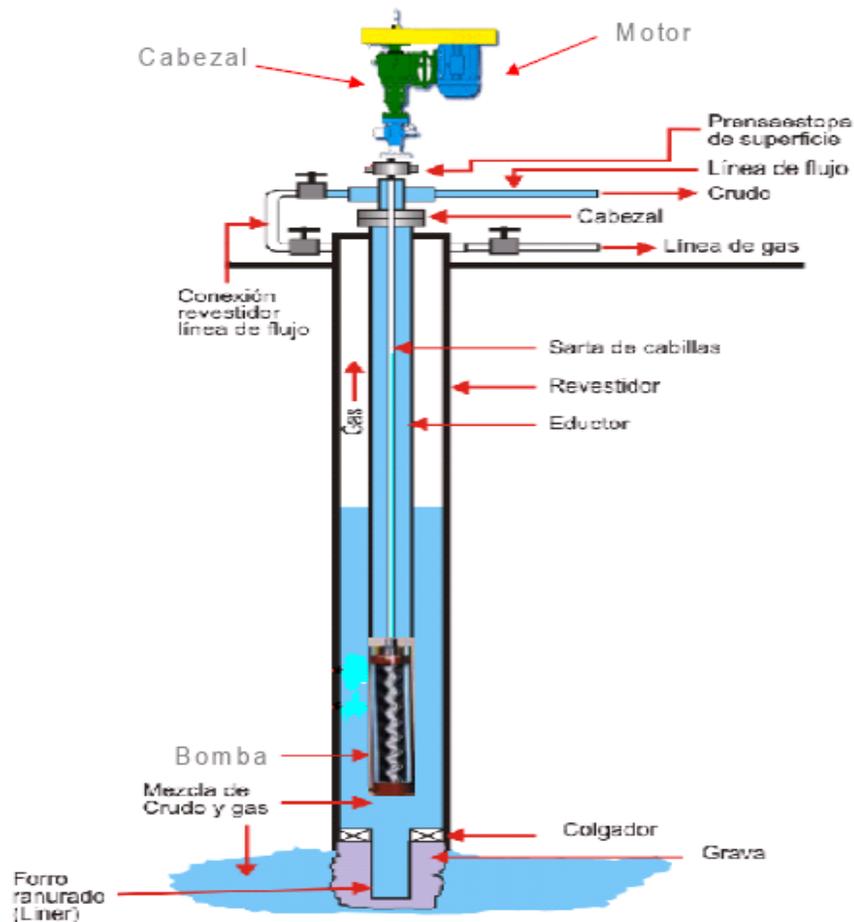


Figura 1.9: Esquema del completamiento con bomba de cavidades progresivas (Gasse de Carvalho, Milani de Rossil, 2008).

El elastómero constituye el elemento más “delicado” de la bomba de cavidades progresivas y de su adecuada selección depende en una gran medida el éxito o fracaso de esta aplicación. El elastómero reviste internamente al estator y en si es un polímero de alto peso molecular con la propiedad de deformarse y recuperarse elásticamente, esta propiedad se conoce como resiliencia o memoria, y es la que hace posible que se produzca la interferencia entre el rotor y el estator la cual determina la hermeticidad entre cavidades contiguas y en consecuencia la eficiencia de la bomba (bombeo). Los elastómeros deben presentar resistencia química para manejar los fluidos producidos y excelentes propiedades mecánicas para resistir los esfuerzos y la abrasión. Los elastómeros más utilizados en la aplicación BCP, poseen base Nitrílica



Capítulo I: Análisis bibliográfico

(convencionales), Hidrogenación Catalítica (Elastómeros Hidrogenados) o Fluoelelastómeros (Chacín, 2003).

Una vez que el conjunto estator-rotor se coloca a la profundidad programada, la unión de ambos forma cavidades definidas y selladas herméticamente. La sarta de cabillas hace girar, en el sentido de las agujas del reloj, al rotor sobre su propio eje, y este girará paralelamente sobre el eje del estator y permitirá la formación de cavidades cerradas, (delimitadas por una línea de interferencia entre el rotor y el estator), que ascenderán helicoidalmente a través de la tubería de producción desde el subsuelo hasta la descarga de la bomba (Vetter y Wirth, 1995).

El movimiento giratorio es generado en superficie por accionamiento electro mecánico y transmitido al rotor a través de la sarta de cabillas. El caudal es directamente proporcional a la velocidad de rotación. Por ello la bomba puede ajustarse a la afluencia del pozo para obtener producciones óptimas (Conoco y Noonan, 2009). El barrido constante de la línea de sellaje entre el estator y el rotor evita la acumulación de sólidos dentro de la bomba. El gas y los sólidos que entren en la bomba pueden pasar por la bomba sin causar obstrucciones o bloqueos. Se cuenta con diversos arreglos de materiales y geometría, sin embargo de las más utilizadas en la Industria Petrolera está la de un rotor metálico de un lóbulo en un estator con un material elástico (Elastómero) de dos lóbulos. La Figura 1.10 muestra una sección transversal de una bomba de cavidades progresivas. Debido a que las cavidades están hidráulicamente selladas entre sí, el tipo de bombeo es de desplazamiento positivo (Guo y Lyon, 2007).



Figura 1.10: Desplazamiento del fluido a través de la bomba (Hirschfeldt, 2008).

Capítulo I: Análisis bibliográfico



En la sarta de cabillas se encuentran además los acoples de cabillas y (opcionalmente) los Centralizadores de cabillas, los cuales se utilizan para prevenir el roce excesivo entre los acoples y la tubería de producción en pozos con marcadas desviaciones (“pata de perro” o “doglegs”), con ángulos de inclinación muy grande o en pozos horizontales. Debajo de la BCP se coloca el niple de paro, el cual sirve para espaciar el rotor con respecto al estator. Opcionalmente y si se requiere, al niple de paro puede conectarse un Ancla de gas, una empacadura, un filtro de arena, un ancla anti-torque, etc. (Berger, 1992; Chacín, 2003).

Genéricamente los cabezales son requeridos en sistemas convencionales de bombeo PCP para transferir potencia desde el motor a la bomba en forma de fuerza tangencial o momento torsor, la cual es manejada por la sarta de barras de bombeo (Gasse de Carvalho y Milani de Rossil, 2008). Además deben cumplir con otras funciones tales como:

- Proveer acción de sellado entre la boca de pozo y el vástago.
- Soportar la carga axial determinada por la acción de bombeo.

Los cabezales estándar son: Verticales o Angulares, con eje hueco o sólido. Todos disponen o de un freno mecánico para controlar el giro inverso o de un sistema hidráulico el cual permite la liberación gradual de la energía (Netzsch, 2005) Generalmente en la práctica el rango de operación de las BCP es de 40 a 350 rpm (revoluciones/min). Al girar los motores eléctricos a una velocidad nominal y fija de aproximadamente de 1800 rpm (Motores de 4 polos), es necesario contar con una caja reductora de una relación de transmisión adecuada para llevar la velocidad angular del motor a velocidades más cercanas a la requerida por la bomba, además de ser el elemento que suministrará el torque exigido por el sistema. En cuanto al cambio de velocidad de operación de la bomba, la optimización de la producción y la declinación en la vida productiva de un pozo, hacen que se requiera de ajustes de esta variable; por lo tanto al ofrecer el moto-reductor una velocidad constante, es necesario contar con un sistema que permita variar las rpm de la bomba, para realizar esta tarea se utilizan los variadores de frecuencia.



Capítulo I: Análisis bibliográfico

1.5 Diseño del sistema de bombeo por cavidades progresivas.

Antes de comenzar a diseñar un método de producción, es de suma importancia contar con todos los datos necesarios para ello y los mismos deben de ser del todo confiables a fin de garantizar el diseño adecuado, en este punto hay que destacar que no existe una solución (o diseño único) y que la misma depende de diversos factores técnico económicos incluyendo las políticas de explotación del yacimiento (Chacín, 2003).

Existe una diversidad de ecuaciones, tablas, nomogramas, etc., para el diseño o selección de los equipos; no obstante, muchos de estos recursos fueron elaborados bajo determinadas suposiciones, las cuales no siempre reflejan la realidad del campo. En algunas oportunidades se cuenta con factores de seguridad o ajuste para corregir los resultados que se obtienen de las gráficas, no obstante, los mismos arrojan resultados aproximados y en algunas oportunidades dichos factores no se han desarrollado (Gasse de Carvalho y Milani de Rossil, 2008).

Un diseño manual puede ser desarrollado como una aproximación y solo debe ser realizado de esta manera luego de tener un conocimiento completo de todos los factores o variables que intervienen en la dinámica del sistema pozo-completación.

Para solventar lo anteriormente expuesto, se han desarrollado numerosos programas comerciales de computo (software), los cuales incluyen sofisticados y complejos algoritmos de cálculo para predecir comportamientos multifásicos, mecánicos e hidráulicos en el pozo. Estas herramientas de cálculo son propiedad de importantes empresas petroleras que invierten grandes cantidades de dinero en la investigación y por tanto las licencias de operación son vendidas a precios muy altos, dificultando su adquisición para organizaciones más pequeñas como el caso de la petrolera cubana CUPET.

1.5.1 Definición del comportamiento de la afluencia del pozo.

Las características de producción de un pozo están representadas por su relación de comportamiento de flujo, comúnmente expresadas por medio de gráficas conocidas como curvas de afluencia.

Estas curvas dependen del comportamiento de variables del yacimiento como permeabilidad, dimensiones además de la presión, temperatura, gravedades específicas de los fluidos que contiene.



Capítulo I: Análisis bibliográfico

La Figura 1.11 muestra la afluencia típica de pozos en yacimientos saturados por la expresión desarrollada por *Vogel* (Maggiolo, 2008) donde se puede apreciar índices de productividad variables para diferentes caudales de producción.

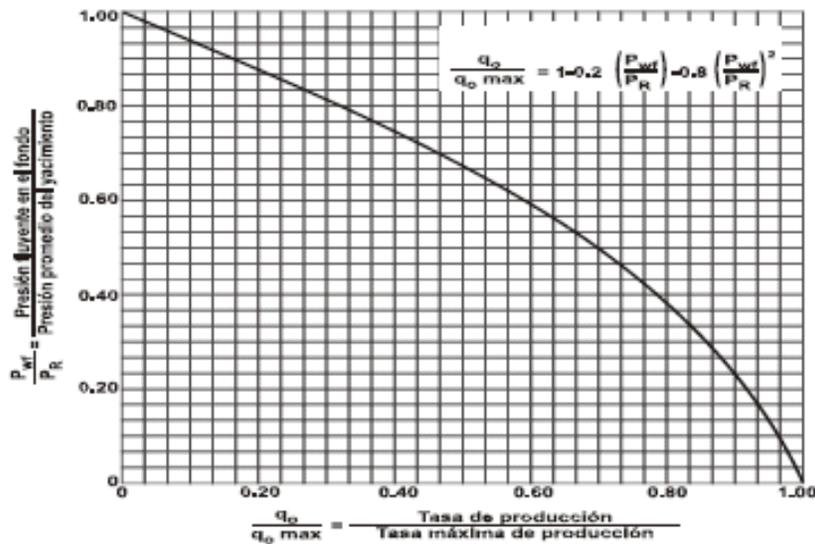


Figura 1.11: Curva de afluencia de para yacimientos saturados (Maggiolo, 2008).

Básicamente la información más importante brindada por el comportamiento de la afluencia del pozo es que permite conocer cuál es la capacidad de aporte del yacimiento por cada unidad de presión de diferencia entre la presión del yacimiento y el fondo del pozo. En la mayoría de los casos los ingenieros de yacimiento determinan cuál es la posición óptima en la curva donde se debe explotar el pozo.

1.5.2 Selección de la bomba y su profundidad.

Para la selección de la bomba se hace necesario conocer el comportamiento de afluencia del pozo, específicamente cuál es la tasa de producción deseada del pozo. Además es importante conocer la relación existente entre los diferentes caudales del pozo y sus niveles dinámicos del fluido.

Conociendo estas variables y utilizando las curvas tipo de las bombas (suministradas por los fabricantes) donde se muestra el comportamiento del caudal respecto a la presión de descarga (Figura 1.12), donde la eficiencia volumétrica de la bomba tiende a disminuir con la presión

Capítulo I: Análisis bibliográfico



diferencial (Hirschfeldt, 2005), se puede determinar la velocidad de operación y la profundidad a que será colocada teniendo en cuenta la sumergencia mínima deseada.

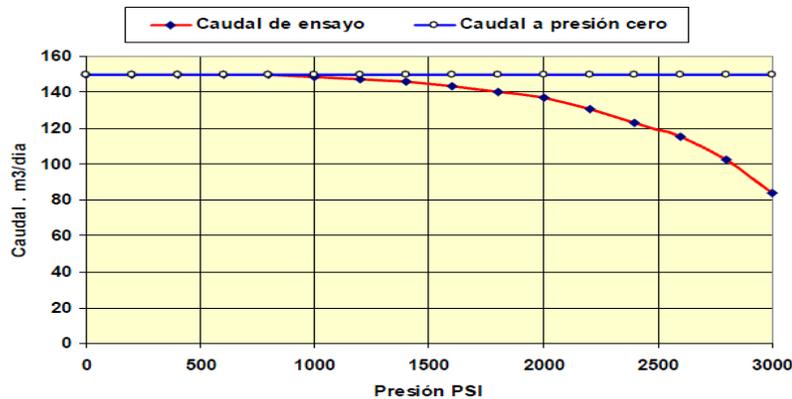


Figura 1.12: Curva de capacidad de un bomba de cavidad progresiva. (Netzsch, 2005)

1.5.3 Sarta de cabillas.

Es necesario conocer el torque requerido y las cargas axiales a soportar por la sarta de cabillas para determinar los diámetros y grados de acero de las cabillas.

En la práctica sucede que el primer aspecto a considerar para el diseño de la sarta de cabillas es el diámetro de la tubería, es esta la principal limitante por la necesidad de tener la mayor área resultante posible entre tubería y cabillas para facilitar el paso del fluido desde la bomba a la superficie. Sin embargo luego de fijados el resto de los elementos del sistema se procede al cálculo de los esfuerzos generados y las pérdidas hidráulicas para compararlos con las especificaciones brindadas por los fabricantes de las cabillas.

1.5.4 Torque y potencia requerida por el sistema.

El torque del sistema está compuesto de dos elementos: el torque hidráulico, el cual es la fuerza necesaria para levantar el fluido y es función del desplazamiento de la bomba y de la altura hidráulica y el torque debido a la fricción de la sarta de cabillas girando en el fluido y friccionándose contra las paredes de la tubería de producción, este es función de la velocidad de rotación, el diámetro y longitud de la sarta de cabillas (profundidad de la bomba), el área del espacio anular entre las cabillas y la tubería de producción. En el caso de fluidos de baja



Capítulo I: Análisis bibliográfico

viscosidad el torque por fricción entre fluido cabillas es despreciable pero para los crudos de alta viscosidad como los producidos en Cuba es importante la utilización de factores de seguridad que permitan la estimar los valores de torque requerido.

Una vez determinado el torque requerido por el sistema y conociendo el estimado de la velocidad de la bomba se puede determinar la potencia necesaria a generar en superficie por la unidad de fuerza.

Los porcentos de torque y potencia deben ser evaluados para cada elemento del sistema respecto a sus capacidades para validar el diseño al tiempo que se utilizan factores de seguridad que compensen la incertidumbre del diseño. Este indicador en el presente trabajo se aborda como carga tangencial.

1.5.5 Carga axial del sistema.

La carga axial es la suma de dos componentes: el peso aparente de la sarta de cabillas en el fluido, el cual es función de la longitud de la sarta (profundidad de la bomba) y el diámetro (o el peso lineal) de las cabillas; así como el peso ejercido en el rotor por la altura hidráulica que depende de la altura hidráulica o presión de descarga y la serie de la bomba (en área neta entre las cabillas y el rotor). La altura hidráulica ejerce su presión en el rotor de la BCP, como lo hace en el pistón de la bomba mecánica. El peso aparente de la sarta de cabillas varía levemente según el peso específico del fluido (P.C.I.S, 2003).

De forma análoga al torque y la potencia la influencia de la carga axial deberá ser evaluada en la sarta de cabillas y en la unidad de fuerza según las especificaciones de los fabricantes de los diferentes elementos. Se recomienda el uso de factores de seguridad para proteger el diseño de la incertidumbre generada por las estimaciones de algunas variables.

1.5.6 Consideraciones generales para el diseño de sistemas de BCP.

Por último, se muestran una serie de consideraciones a tener en cuenta durante el diseño de un sistema BCP.

- Disponer del registro (o perfil) del pozo es importante para determinar los gradientes de presión y la capacidad de levantamiento de la bomba. Esta información también afecta otras



Capítulo I: Análisis bibliográfico

decisiones, tales como la posición de asentamiento de la bomba, y la colocación de centralizadores de cabilla.

- Conocer el completamiento mecánico del pozo es muy importante para determinar la colocación de la bomba o del ancla de gas, sobre todo en aquellos pozos con forro ranurado y empaque con grava.
- La historia de producción de arena del pozo es un elemento de decisión importante al momento de determinar la profundidad de colocación de la bomba. Por ejemplo, en un pozo completado en una zona con historia de alta producción de arena, es conveniente colocar la bomba a menor profundidad (sobre el tope de las arenas productoras) y probablemente colocar una cola o tubo de barro más largo.
- En general, entre más baja se coloque la bomba más alto es el caudal que se podrá alcanzar, pues es posible lograr menores presiones de fondo fluyente, y probablemente una mejor eficiencia volumétrica. Sin embargo al bajar la bomba se puede incrementar la arena manejada por el sistema, la cual aumentará el nivel de abrasión, perjudicando así la vida útil de los equipos de subsuelo.
- En caso de no contar con una medición de la presión de cabezal, es necesario conocer la geometría de la línea de flujo para estimar los cambios de presión entre la estación y el cabezal por elevación y las pérdidas por fricción.
- Las curvas de catálogo son representaciones del comportamiento promedio de las bombas utilizando generalmente agua (viscosidad de 1 cP) y un rotor estándar, es recomendable ensayar en un banco de pruebas la bomba, una vez adquirida esta, con el rotor seleccionado y construir la curva real comparándola con la del catálogo; esto es importante tanto antes de instalar la bomba en el pozo, como parte del protocolo de pruebas una vez recuperada la misma para determinar su posible reutilización.
- Al momento de diseñar la sarta de cabillas es posible emplear sartas ahusadas (sartas que comprendan tramos de diámetros diferentes), pero en general la componente mayor del esfuerzo soportado por la cabilla se debe al torque producido en la bomba, por lo tanto la mejora que se observa en el tramo superior, al reducir el peso de la sarta, no compensa la reducción de resistencia asociada a la reducción de diámetro del tramo inferior. En crudos de alta viscosidad, el área de flujo entre los acoples de cabilla y la tubería de producción puede



Capítulo I: Análisis bibliográfico

ser crítica. Nótese que si se sobredimensiona el diámetro de las cabillas, también se reduce el espacio anular entre los acoples y la tubería, lo cual produce un aumento de la presión de descarga de la bomba y por lo tanto un aumento del torque hidráulico. En casos donde las pérdidas por fricción sean relevantes es aconsejable acoples reducidos (*Slim hole couplings*) o cabillas continuas.

- La eficiencia volumétrica de las BCP, al igual que la de otros tipos de bombas, es afectada de manera significativa por la presencia de gas libre. Es por ello que en los casos donde se espera tener fracciones de gas significativas a la entrada de la bomba, se recomienda invertir esfuerzos en la separación de gas.
- Las propiedades físico químicas del crudo y el gas son de gran importancia para determinar la concentración de aquellos componentes que atacan los elastómeros: en el líquido son los aromáticos y asfáltenos y en el gas el CO₂ y el H₂O.
- En el caso particular de crudos pesados y extra pesados, muchas veces se presenta el fenómeno de la espumosis del crudo, mediante la cual el gas se encuentra disperso en forma de pequeñas burbujas dentro del crudo, confiriéndole al fluido una movilidad muy por encima de lo esperado para las altas viscosidades de este crudo y una densidad bastante menor a la del líquido. Lo contrario ocurre con la formación de emulsiones, en cuyo caso las caídas de presión suelen estar muy por encima de las correspondientes a la viscosidad del crudo.
- Para realizar una correcta selección del moto-reductor, es necesario contar con el torque requerido en superficie a la máxima velocidad de bombeo esperada. Este torque depende del tipo de bomba, el diferencial de presión en la misma y del roce de las cabillas con el fluido en el eductor. Una vez conocido el torque, se selecciona la caja reductora cuya relación de transmisión permita obtener la máxima velocidad de rotación esperada para la sarta. Seguidamente se verifica que el torque máximo de la caja reductora sea mayor al requerido en un 10 ó 20%.
- No existe una solución única para un diseño BCP, la idea es elegir la más adecuada dependiendo de las políticas o criterios que se manejen tales como mayor producción, rentabilidad, estandarización, soporte del suplidor de los equipos (asesoría post venta).



1.6 Conclusiones parciales.

1. El sistema de bombeo por cavidades progresivas debe ser la primera opción a considerar en la explotación de pozos productores de petróleo por su relativa baja inversión inicial; bajos costos de transporte, instalación, operación y mantenimiento; bajo impacto visual, muy bajos niveles de ruido y mínimos requerimientos de espacio físico tanto en el pozo como en almacén.
2. Desde el punto de vista técnico el BCP se adapta perfectamente a las características de los pozos petroleros cubanos porque puede operar a bajas velocidades, permite manejar sólidos en suspensión y cortes de agua, crudos de mediana y baja gravedad API, además opera en pozos verticales, inclinados, altamente desviados y horizontales.
3. El principal reto del diseño de un sistema de levantamiento artificial de Bombeo por Cavidades Progresivas en los pozos con niveles bajos y fluidos con alta densidad y viscosidad como los existentes en los yacimientos cubanos es, operar con cargas dentro de los límites permitidos.
4. El diseño manual de un sistema de BCP puede ser desarrollado como una aproximación y solo debe ser realizado de esta manera luego de tener un conocimiento completo de todos los factores o variables que intervienen en la dinámica del sistema pozo-completación.
5. Existen varios software de cálculo para realizar diseños de BCP pero son propiedad de importantes empresas petroleras que invierten grandes cantidades de dinero en la investigación y por tanto las licencias de operación son vendidas a precios muy altos, dificultando su adquisición para organizaciones más pequeñas como el caso de la petrolera cubana CUPET.



CAPÍTULO 2. Diseño metodológico

2.1 Caracterización del objeto de estudio.

El Centro Colector No. 7 ubicado en el Ramal Oeste del Yacimiento Varadero perteneciente a la Empresa de Perforación y Extracción del Centro (EPEPC) fue construido debido al creciente desarrollo de la producción de petróleo en esta zona y como parte de la política de la Empresa de crear un sistema hermético de recolección de petróleo y gas; comenzando sus actividades en el mes de mayo del año 2000.

El Centro cuenta con un fondo de explotación de 17 pozos, de ellos 14 son explotados en convenio con la compañía canadiense *Sherritt*, 3 son operados solamente por la EPEPC, uno de los cuales es el pozo VD 702 el cual tiene el mayor potencial de producción de los tres pero se encuentra limitado por las cargas en los diferentes elementos de su Sistema de levantamiento artificial actual.

2.1.1 Situación actual del pozo VD 702.

El pozo VD 702 tiene como método de levantamiento artificial el bombeo mecánico convencional (BMC). La serie de la unidad de bombeo según la nomenclatura API es 640-305-168 del fabricante canadiense AMSCOT, la que se encuentra trabajando con porcentos de carga que superan sus capacidades de diseño como lo muestra la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Porciento de carga de la unidad de BMC del VD 702.

Elemento	Carga máxima por diseño	Carga actual	Porciento de carga
Estructura	30 500 lb	32 940 lb	108%
Reductor	640 000 lb*in	710 400 lb*in	111%

Este hecho constituye un riesgo de fallo para los elementos de la unidad de bombeo representando costos elevados en reposición e instalación así como las pérdidas por toneladas de petróleo dejadas de producir. Por tales motivos el presente trabajo tiene como objetivo



Capítulo II: Diseño metodológico

diseñar el sistema de levantamiento artificial por cavidades progresivas que sea capaz de obtener los mismos caudales producción del pozo con porcentos de carga aceptables en cada uno de sus elementos.

2.2 Estrategia de la investigación.

A modo de guía para el presente trabajo se elabora un diagrama de flujo (Figura 2.1) que refleje el algoritmo de análisis a seguir para el diseño y validación del sistema de bombeo por cavidades progresivas para el pozo VD 702 que sea capaz de trabajar con porcentos de carga adecuados en cada uno de sus elementos al tiempo que mantiene su producción actual.

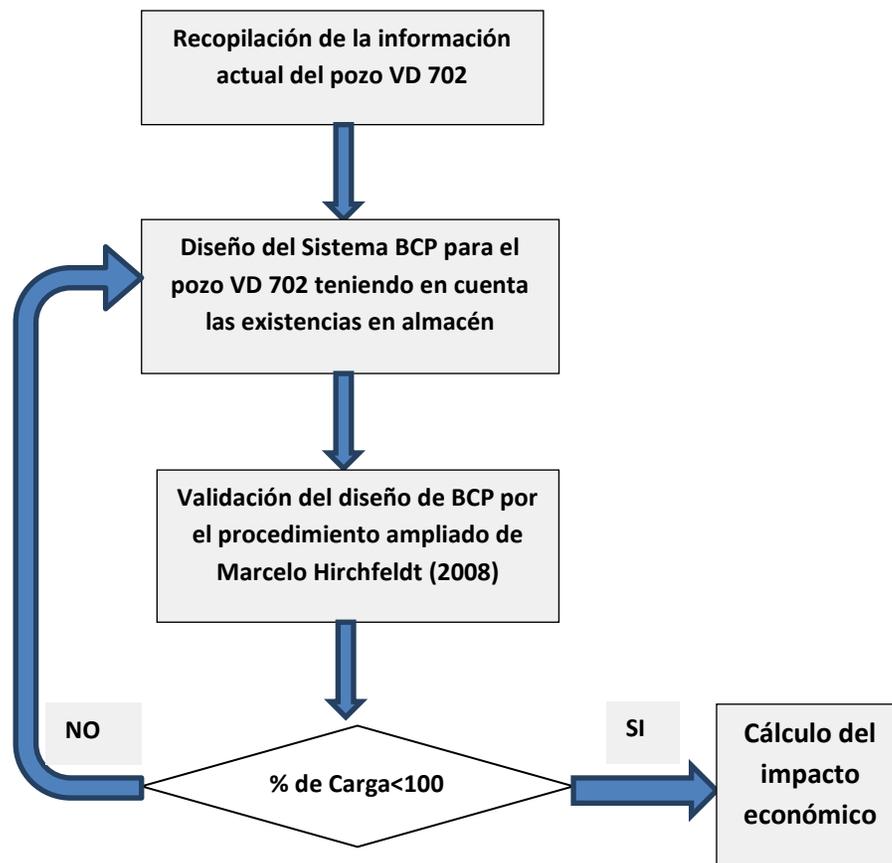


Figura 2.1: Diagrama de flujo de la investigación.

Capítulo II: Diseño metodológico



2.2.1 Recopilación de datos actuales del pozo.

El primer paso para cambiar el sistema de levantamiento artificial de un pozo en producción es conocer los datos de producción y completamiento actual del mismo. Dicha información se agrupa de la siguiente forma:

Datos de completamiento actual:

- Diámetro de la tubería de producción
- Diámetro de las cabillas
- Diámetro del varillón
- Diámetro del *casing*
- Grado de acero de las cabillas
- Grado de acero del varillón
- Profundidad de la bomba

Datos de producción actual:

- Caudal de fluido
- Caudal de gas
- BSW
- Nivel Dinámico
- Viscosidad del fluido a condiciones de fondo
- Densidad del fluido
- Presión en *tubing*
- Presión en *casing*
- Presión de fondo fluyente
- Presión de capa

Los datos actuales del pozo VD 702 produciendo con BMC (desde enero hasta agosto de 2014) se obtienen de los reportes de producción y del resultado de las investigaciones realizadas al pozo por el departamento de Yacimientos, así como de los documentos técnicos



Capítulo II: Diseño metodológico

de perforación y reparación de pozos almacenados en la Torre G (servidor donde se recoge la información compartida por toda la Empresa).

No se cuenta con la densidad del fluido dentro del *tubing*, pues con fluidos multi-fásicos debe determinarse mediante modelación con alto nivel de complejidad. Sin embargo para fase de diseño se asume la densidad del agua por ser crítica en cuanto al manejo de las cargas y presiones hidrostáticas.

En el caso de la viscosidad de fondo el departamento de Yacimiento de la Empresa utiliza herramientas de modelación como el software WINPRO para estimar su comportamiento a las condiciones de presión y temperatura del fondo fluyente del pozo a partir de los datos obtenidos en superficie.

2.2.2 Elementos para el diseño por BCP.

El cambio de sistema de levantamiento artificial de bombeo mecánico convencional a bombeo por cavidades progresivas implica el cambio del completamiento del pozo. A continuación se muestran las variables a definir.

Datos de completamiento para BCP:

- Profundidad total del pozo
- Grados de inclinación
- Diámetro del *casing*
- Diámetro de la tubería de producción
- Diámetro de las cabillas
- Cantidad de cabillas
- Diámetro del varillón
- Grado de acero de las cabillas
- Grado de acero del varillón
- Profundidad de la bomba
- Peso específico de la cabilla
- Fabricante de la bomba
- Resistencia mínima a la tensión del varillón

Capítulo II: Diseño metodológico



- Resistencia mínima a la tensión de la cabilla
- Tipo de bomba
- *Head* de la bomba o presión de descarga expresada en metros de columna de agua
- Caudal teórico de la bomba
- Diámetro del rotor de la bomba
- Fabricante de la unidad de fuerza
- Clasificación de la unidad de fuerza
- Carga máxima de diseño de la unidad de fuerza
- Diámetro de la polea del varillón
- Diámetro de la polea del motor
- RPM nominal del motor
- Potencia nominal del motor

Este diseño se realiza sobre la base de la experiencia adquirida en el uso de esta tecnología y los resultados que se obtienen en su implementación en los campos petroleros cubanos, así como las existencias en los almacenes de la Empresa de Perforación y Extracción del Centro, con el objetivo de diseñar un sistema de levantamiento artificial por BCP capaz de manejar las cargas generadas para la actual tasa de producción del pozo, apoyándose en los materiales y/o manuales de disponibles de los diferentes elementos que componen el sistema de bombeo por cavidades progresivas.

Para la selección de la bomba se utilizaron dos condiciones fundamentales:

1. Presión de descarga de la bomba según la clasificación, brindada por el fabricante, expresada en metros de columna de agua debe ser mayor que la profundidad de anclaje a la que será situada la bomba según el diseño.
2. La velocidad de operación de la bomba para el caudal esperado debe estar en el rango de 100 a 200 revoluciones por minuto. Para esto se utiliza el caudal teórico de la bomba, que no es más que la razón lineal existente entre caudal y velocidad de rotación de la bomba donde no se incluye el efecto de la presión de descarga, o sea, conociendo el caudal teórico a 100 rpm y presión 0 (dato presente en la nomenclatura de la propia bomba) se puede determinar las rpm necesarias para obtener cualquier otro caudal manteniendo la misma relación entre caudal y velocidad de operación.



2.2.3 Validación del diseño BCP.

Para la validación del completamiento para BCP se tomó como base la metodología descrita por Marcelo Hirschfeldt en su Manual de bombeo de cavidades progresivas (2008) con algunas modificaciones con el objetivo de buscar mayor profundidad en el análisis.

Dicha metodología cuenta con una serie de pasos que permiten evaluar la capacidad del sistema para manejar las cargas generadas para obtener un determinado caudal de producción teniendo en cuenta las características del fluido y las características de diseño de los elementos del completamiento del pozo. Los elementos a evaluar son:

- ✓ % de carga axial en el varillón.
- ✓ % de carga axial en la cabilla.
- ✓ % de carga axial en la unidad de fuerza.
- ✓ % de carga tangencial en el varillón.
- ✓ % de carga tangencial en la cabilla.
- ✓ % de carga tangencial en el motor.

1. Altura dinámica de la bomba.

La presión sobre la bomba o presión de descarga depende de la presión hidrostática del fluido además las pérdidas de carga generadas por la fricción del líquido con las cabillas y con la tubería tanto en el pozo como en las líneas de superficie. En la mayoría de los manuales de bombas de cavidad progresiva esta presión es expresada en metros de columna de agua y es conocida como *Head*.

$$P_{descarga} = P_{hidr} + P_{fric} + P_t$$

$$P_{hidr} = \frac{ND * \rho}{10}$$

$$P_{fric} = K_{fric} * H_{bomba} * \mu$$

Dónde:

P_t -presión en *tubing* (kg/cm^2).



Capítulo II: Diseño metodológico

P_{fric} -pérdidas por fricción (kg/cm^2).

P_{hidr} -presión hidrostática (kg/cm^2).

D_{cabilla} -diámetro de la cabilla (in).

D_{tubing} -diámetro del *tubing* (in).

K_{fric} -coeficiente de fricción fluido-sarta-tubería

H_{bomba} -profundidad de la bomba (m).

ND-nivel dinámico (m).

μ -viscosidad del fluido a condiciones de fondo (cP).

ρ -densidad del fluido (g/cm^3)

P_{descarga} -presión sobre la bomba (kg/cm^2).

2. Selección de la bomba.

En la selección de la bomba se tendrá en cuenta un aspecto decisivo en la correcta explotación del pozo petrolero como es la capacidad de bombeo: una adecuada selección de la bomba permite extraer los caudales deseados del pozo con velocidades de operación no tan cercanas al máximo recomendado por el fabricante como forma de alargar su vida útil.

Para la velocidad de operación de la bomba se utilizará las gráficas de *Head* (presión de descarga de la bomba expresada en metros de columna de agua) y caudal suministradas por el fabricante de modo que se pueda obtener la velocidad de operación de la bomba o revoluciones por minuto.

Datos:

P_{descarga} -presión sobre la bomba (kg/cm^2).

Q-caudal esperado (m^3/d).

Gráficas de comportamiento de la bomba.

3. Cálculo del torque.

Para el cálculo del torque se determina la potencia hidráulica, que no es más que la potencia que es necesaria suministrarle a la bomba para obtener un determinado caudal en superficie teniendo en cuenta la altura sobre la bomba, utilizando las gráficas de comportamiento de las bombas de cavidad progresivas mencionadas en el epígrafe anterior.



Capítulo II: Diseño metodológico

Una vez calculada la potencia hidráulica y la velocidad de operación de la bomba se calcula el torque necesitado por el sistema en el varillón utilizando un factor de seguridad que comprenda la fricción entre cabillas y fluido (por ser el caso de fluidos de alta viscosidad), así como las fricciones entre cabillas y tubería (por ser este un pozo desviado).

$$\text{Torque} = \left[5252 * \frac{\text{Pot}_{\text{Hidráulica}}}{\text{rpm} * \text{FS}_{\text{Fricción}}} \right]$$

Dónde:

rpm- revoluciones por minuto de la sarta o velocidad de operación de la bomba.

Torque-torque de la sarta (lb*ft).

FS_{Fricción} – factor de seguridad por fricción que considere el efecto de la fricción de las cabillas-fluido por concepto de alta viscosidad y cabillas-tubería en los pozos desviados.

4. Cálculo del peso total de la sarta.

El peso total de la sarta o carga axial, está determinado por el peso generado por el diferencial de presión y por el peso de la sarta flotando en el fluido.

$$\text{Peso}_{\text{total}} = \text{Peso}_{\text{sarta}} + \text{Peso}_{\Delta P}$$

$$\text{Peso}_{\text{sarta}} = \text{Peso}_{\text{cabilla}} * F_{\text{Flotabilidad}} * H_{\text{bomba}}$$

$$\text{Peso}_{\Delta P} = A_{\text{Efect}} * P_{\text{descarga}}$$

$$A_{\text{Efect}} = \left(\left[\frac{D_{\text{Rotor}}}{2} \right]^2 - \left[\frac{D_{\text{Cabilla}}}{2} \right]^2 \right) * 3.14$$

$$F_{\text{Flotabilidad}} = 1 - \left[\rho / \left(\frac{\text{Peso}_{\text{cabilla}} * 10}{\left(\frac{D_{\text{Cabilla}}}{2} \right)^2 * 3.14} \right) \right]$$

Donde:

Peso_{cabilla}-peso específico de la cabilla en el aire (kg/m).

Peso_{sarta}-Peso de la sarta (kg).

D_{Cabilla}-diámetro de la cabilla (cm).

D_{Rotor}-diámetro del rotor de la bomba (cm).



Capítulo II: Diseño metodológico

A_{Efect} -área efectiva entre rotor-cabilla (cm^2).

$Peso_{\Delta P}$ -peso por diferencial de presión (kg).

$Peso_{total}$ -peso axial total (kg).

$F_{Flotabilidad}$ -Factor de flotabilidad del acero en el fluido.

5. Cálculo de tensiones combinadas.

Las tensiones combinadas son el resultado de la aplicación de la fuerza generada por las cargas axiales sobre el área de la sección transversal de la sarta, además de las tensiones generadas por el momento de torsión propio del BCP, por tanto es necesario calcular por separado las tensiones soportadas por el varillón y cabillas cuando el diámetro de su sección transversal difieran.

$$TC = \sqrt{\sigma^2 + 4 * \tau^2}$$

$$\sigma = \frac{Peso_{total}}{A_{varillón/cabilla}}$$

$$\tau = \frac{Mt * 100}{Mr}$$

$$A_{varillón/cabilla} = \left[\frac{D_{varillón/cabilla}}{2} \right]^2 * 3.14$$

$$Jp = \frac{D_{varillón/cabilla}^4 * 3.14}{32}$$

$$Mr = \frac{Jp}{\frac{D_{varillón/cabilla}}{2}}$$

$$Mt = Torque * 0.1382552$$

Donde:

$D_{varillón/cabilla}$ -diámetro de varillón/cabilla (cm).

$A_{varillón/cabilla}$ -área de varillón/cabilla (cm^2).

Jp -momento de inercia polar (cm^4).



Capítulo II: Diseño metodológico

Mr-módulo resistente polar (cm^3).

σ -tensión a la tracción (kg/cm^2).

τ -tensión a la torsión (kg/cm^2).

Mt-momento torsor ($\text{kg}\cdot\text{m}$).

TC-tensión combinada de varillón/cabilla (kg/cm^2).

6. Cálculo del % de carga axial en varillón y cabillas.

El porcentaje de carga axial es la expresión de las tensiones de trabajo de la sarta respecto a la resistencia mínima a la tensión según sus especificaciones, teniendo en cuenta un factor de seguridad recomendado por el fabricante. El cambio de diámetro y composición del acero obliga a que se analicen varillón y cabillas por separado.

$$\% \text{ de Carga axial} = \frac{TC_{\text{varillón/cabilla}}}{TD_{\text{tensión}_{\text{varillón/cabilla}}} * FS} * 100$$

Donde:

$TD_{\text{tensión}_{\text{varillón/cabilla}}}$ -resistencia mínima a la tensión de varillón/cabilla (kg/cm^2).

FS-factor de seguridad recomendado por el fabricante.

7. Cálculo del % de carga en la unidad de fuerza.

Es la relación expresada en porcentaje entre las cargas de trabajo o cargas axiales y los límites de carga por diseño de los *Drive Head* o unidad de fuerza.

$$\% \text{ de Carga de la Unidad de Fuerza} = \frac{Peso_{\text{total}}}{CD_{u/f}} * 100$$

Donde:

$CD_{u/f}$ -carga de diseño de la unidad de fuerza.



Capítulo II: Diseño metodológico

8. Cálculo del % de carga tangencial.

Son los porcentos de torque soportados por la sarta respecto a su torque de diseño teniendo en cuenta el factor de seguridad recomendado por el fabricante. La diferencias entre las características, como se había explicado anteriormente, entre varillón y cabillas implica un análisis independiente.

$$\% \text{ de Carga tangencial}_{\text{varillón/cabilla}} = \frac{\text{Torque}}{TD_{\text{torsión}_{\text{varillón/cabilla}}} * FS} * 100$$

Donde:

$TD_{\text{torsión}_{\text{varillón/cabilla}}}$ -resistencia máxima a la torsión de varillón/cabilla (kg/cm^2).

FS-factor de seguridad recomendado por el fabricante.

9. Cálculo del Par Motor.

El Par Motor es la relación, expresado en porcentaje, entre el torque en condiciones de operación en el motor y su torque máximo según sus características nominales.

$$ParM = \frac{\frac{\text{Torque}}{R}}{\text{TorqueMaxM}} * 100$$

$$\text{TorqueMaxM} = 5252 * \frac{\text{PotNomM}}{\text{rpmNomM}}$$

$$R = \frac{D_{\text{polea-sarta}}}{D_{\text{polea-motor}}}$$

Donde:

$D_{\text{polea-motor}}$ -diámetro de la polea del motor (cm).

$D_{\text{polea-sarta}}$ -diámetro de polea de la sarta (cm).

R-relación de transmisión.

PotNomM-potencia nominal del motor (hp).



Capítulo II: Diseño metodológico

rpmNomM- revoluciones por minuto nominales del motor (hp).

TorqueMaxM-torque máximo del motor (lb*ft).

ParM-par motor (%)

2.2.4 Cálculo del impacto económico del cambio de BMC a BCP.

El impacto económico del cambio de bombeo mecánico convencional a bombeo de cavidades progresivas se basa fundamentalmente en los costos de reposición de los elementos del BMC en caso de fallo debido a los altos porcentos de carga soportados actualmente y los costos de instalación del sistema de BCP, pues el diseño se realiza para mantener la tasa de producción actual del pozo. Por tanto no se evalúan las posibilidades de optimización que brinda un sistema de bombeo con porcentos de carga más bajos, así como tampoco se tiene en cuenta el tiempo entre fallo para el sistema de levantamiento artificial actual del pozo. De modo que la expresión utilizada para dicho análisis es la siguiente:

$$\text{Impacto Económico} = \text{Costo de Instalación de BCP} - \text{Costo de Fallo de BMC}$$

2.3 Conclusiones parciales.

1. El diseño inicial se realiza sobre la base de las existencias en almacén y la experiencia adquirida en la implementación de esta tecnología en los campos petroleros cubanos, con el objetivo de diseñar un sistema de levantamiento artificial por BCP capaz de manejar las cargas generadas para la actual tasa de producción del pozo.
2. La metodología modificada de (Hirchfeldt, 2008) cuenta con una serie de pasos que permiten evaluar la capacidad del sistema para manejar las cargas generadas obteniendo un determinado caudal de producción teniendo en cuenta las características del fluido y el completamiento del pozo.
3. El impacto económico del cambio de bombeo mecánico convencional a bombeo de cavidades progresivas se basa fundamentalmente en los costos de reposición de los elementos del BMC en caso de fallo debido a los altos porcentos de carga soportados actualmente y los costos de instalación del sistema de BCP-



CAPÍTULO 3. Análisis de los resultados.

El presente capítulo muestra los resultados del diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo de cavidades progresivas para el pozo VD 702, tomando como punto de partida las existencias en los almacenes de la Empresa en el momento de la investigación. Luego se valida el diseño por la metodología (Hirschfeldt, 2008) sobre la base de la obtención de porcentajes de carga adecuados para mantener la actual producción del pozo.

3.1 Recopilación de datos del VD 702.

Los datos de producción del pozo VD 702 produciendo con bombeo mecánico convencional en el periodo comprendido entre enero y agosto de 2014 son presentados en la siguiente tabla:

Tabla 3.1: Datos de producción actual del pozo VD 702.

Datos		Unidad
Caudal de fluido	30	m ³ /d
Caudal de gas	75	m ³ / m ³
BSW	0	%
Nivel Dinámico	700	m
Viscosidad del fluido a condiciones de fondo	380	cP
Densidad del fluido	1	gr/cm ²
Presión en <i>tubing</i>	5	kg/cm ²
Presión en <i>casing</i>	5	kg/cm ²
Presión de fondo fluyente	75	kg/cm ²
Presión de capa	91	kg/cm ²

La Tabla 3.2 muestra los datos del completamiento actual del pozo VD 702 según se refleja en la base de datos de la empresa:

Capítulo III: Análisis de los resultados.



Tabla 3.2: Completamiento actual del pozo VD 702.

Datos		Unidad
Unidad de Bombeo	AMSCOT 640	-
Diámetro de la tubería de producción	88.9	mm
Diámetro de las cabillas (cala regular)	25.4	mm
Diámetro del varillón	38.1	mm
Diámetro del <i>casing</i>	6 5/8	in
Grado de acero de las cabillas	97	-
Grado de acero del varillón	4140 Alloy	-
Profundidad de la bomba	1400	m

Es importante destacar que aunque el grado de acero de las cabillas es 97 (alta resistencia) son del tipo *Sucker Rod*, lo que significa que son diseñadas para el bombeo mecánico.

3.2 Completamiento del pozo VD 702 para bombeo por cavidades progresivas.

Para determinar el completamiento del pozo VD 702 con bombeo por cavidades progresivas se utiliza la base de datos del sistema de almacenes de la empresa (SISENCO) al momento de la investigación.

3.2.1 Profundidad de la bomba.

Para mantener los parámetros de producción actuales del pozo la ubicación de la BCP será la misma profundidad actual de 1400 m para lograr un diferencial de presión en el fondo cercano al actual, pues el grado de inclinación del pozo en este punto teniendo en cuenta la inclinometría del pozo no sobrepasa los 20°, para un máximo de 45° según lo recomendado en la bibliografía consultada para bombas de cavidad progresiva.



Capítulo III: Análisis de los resultados.

3.2.2 Selección de la bomba.

Para determinar cuál es el tipo de bomba a utilizar se tienen en cuenta los modelos disponibles en almacén de los dos proveedores actuales de la EPEP-C. La Tabla 3.3 muestra cuales son los principales parámetros de las bombas disponibles en almacén.

Tabla 3.3: Bombas de cavidad progresiva existentes en almacén.

Fabricante	Clasificación	Caudal @ 100 rpm y presión 0 (m ³ /d)	Altura máxima de la bomba (m)	Velocidad de Operación (rpm) para 30 m ³ /d de caudal teórico	Metal o Elastomérica
Netzsch	NTZ 400-150STM140	140	1550	22	Metal
Netzsch	NTZ 500-150STM100	100	1550	30	Metal
Netzsch	NTZ 400-150STM68	68	1550	44	Metal
KUDU	KUDU 400TP1800	80	1800	38	Elastomérica
KUDU	KUDU 120TP2000	24	2000	125	Elastomérica

Como se puede observar todas las bombas son de alturas que sobrepasan la profundidad de anclaje de la bomba por lo que en este aspecto todas son elegibles.

Por otra parte las características del fluido del pozo VD 702 con un % BSW de 0 son ideales para el uso de la bomba tipo metal-metal diseñadas específicamente para fluidos de alta viscosidad y mucho más resistentes a los factores corrosivos. Sin embargo los tres modelos disponibles presentan caudales muy grandes y para los 30 m³ de producción deseada del pozo sus velocidades de operación se encuentran fuera del rango establecido en el epígrafe 2.2.2. De tal forma la bomba seleccionada fue la **KUDU 120TP2000** debido a que cumple con los requisitos de altura necesarios y es la que presenta velocidad de operación de 125 rpm, adecuada para caudal esperado de 30 m³/día.

Es importante destacar que el elastómetro de las bombas KUDU adquiridas por la EPEP-C es de Nitrilo tipo 159 que son los de mejor comportamiento para los yacimientos Varadero.

Como se aprecia en el Anexo # 1 la longitud total de la bomba es de 6.57m con 37 etapas y el rotor tiene un diámetro de 52 mm.



Capítulo III: Análisis de los resultados.

3.2.3 Selección de la sarta de cabillas y tubería.

Atendiendo a que el bombeo de cavidades progresivas impone a la sarta de cabillas la torsión además de la tensión es necesario cambiar el tipo de cabillas de las actuales *Sucker Rod* grado 97 de 25.4 mm del fabricante canadiense *Norris* con cala *Regular* a cabillas de igual grado y diámetro pero *Drive Rod* con cala *Slim Hole*, especialmente diseñadas para el bombeo de cavidades progresivas, lo cual brinda la oportunidad de aprovechar la tubería de 88.9 mm existente en el pozo y así abaratar los costos. La principal diferencia de estos dos tipos de cabillas está en la cantidad de *rounds* o hilos de rosca del pin (más largo para las *Drive Rod*) y el tipo de cala *Slim hole* que al tener menor diámetro resulta en menores pérdidas de presión del fluido en su paso entre las cabillas y tubería.

La disponibilidad de *Drive Rod* en el almacén según lo consultado en el sistema de almacenes de la Empresa es solo del fabricante Chino *Highland*. Este fabricante se rige por la norma API 11B *Specification for Sucker Rod* por tanto las características mecánicas requeridas del grado 97 son iguales que el grado HL, como lo muestra el Certificado de Manufactura emitido por *Highland* (Anexo # 2).

De tal forma las cabillas a utilizar serán *Drive Rod* de 25.4 mm grado HL, cala *Slim Hole* y sus especificaciones son: resistencia a la tensión 9843 kg/cm^2 (Anexo # 2). En el caso de la resistencia a la torsión y el peso en el aire de las cabillas al no poder encontrar ningún documento propio de *Highland* que lo acredite se asumen los valores correspondientes al grado 97 del fabricante *Norris* (Anexo # 3) donde: el torque máximo es de 1200 lb*ft y el peso de la cabilla es 4.32 kg/m .

Otro elemento importante de la sarta es el varillón, el cual será utilizado el mismo que tiene el pozo actualmente con grado de acero *Alloy 4140* de 38.1 mm de diámetro del fabricante *Norris* y sus características mecánicas son: resistencia a la tensión 8788 Kg/cm^2 , resistencia a la torsión 2800 lb*ft (Anexo # 3).

El pozo tiene una bomba una bomba inglesa *Quinn* 82.5 mm a una profundidad de 1400 metros bajo la boca del pozo con 150 tubos de 88.9 mm, los cuales serán reutilizados para la el sistema BCP. Además dentro del material tubular debe incluirse una herramienta anti-torque de 88.9 mm X 6 5/8 in marca *Tech-West* disponible en el almacén, para evitar la rotación de la bomba.



Capítulo III: Análisis de los resultados.

Resumiendo: serán necesarias 183 cabillas de *Drive Rod* grado HL de 1'' cala *Slim Hole* y una herramienta anti-torque de 88.9 mm X 6 5/8 in marca *Tech-West*.

3.2.4 Selección del equipamiento en superficie.

Las unidades de fuerza disponibles en almacén con sus respectivos motores se muestran en la tabla 3.4:

Tabla 3.4: Unidades de fuerza existentes en almacén.

Fabricante	Clasificación	Carga máxima (kg)	Relación de transmisión	Potencia del motor (hp)	rpm del motor
Netzsch	NDH 075DH 33-MBD	15 000	4.44:1	75	1185
KUDU	VH 100 HP 18T	18 000	3.20:1	100	1180

Atendiendo a las altas cargas axiales y alto torque esperados debido a la profundidad de la bomba y al diferencial de presión a desarrollar por la bomba se decide utilizar la unidad de fuerza VH 100 HP 18T (Anexo # 4) por tener mayor carga máxima o carga axial.

Otro elemento importante en un sistema de BCP lo constituye el Variador de Frecuencia (VFD por sus siglas en inglés). Este dispositivo eléctrico tiene infinidad de aplicaciones pero fundamentalmente en los campos petroleros cubanos su uso se concentra en regular la velocidad de rotación de la bomba y proteger motor y/o cabillas de altas cargas y por tanto su uso es casi imprescindible. La existencia en almacén en los momentos en que se realiza la investigación es del *VFD POWER ELECTRONICS SD 700* ampliamente extendido en aplicaciones de bombeo de cavidades progresivas en el país.

3.2.5 Resumen del completamiento del pozo VD 702.

A modo de resumen la Tabla 3.5 muestra los principales elementos del completamiento para Bombeo por Cavidades Progresivas en el pozo VD 702.

Capítulo III: Análisis de los resultados.



Tabla 3.5: Elementos del Completamiento de BCP en el pozo VD 702.

Datos		Unidad
Profundidad total del pozo	2490	m
Grados de inclinación	20	grados
Diámetro del casing	168.27	mm
Diámetro de la tubería de producción	88.9	mm
Cantidad de tubos 88.9''	150	u
Cantidad de cabillas (cala <i>Slim Hole</i>)	183	u
Diámetro de las cabillas	25.4	mm
Diámetro del varillón	38.1	mm
Grado de acero de las cabillas	HL	grado
Grado de acero del varillón	Alloy4140	-
Peso de las cabillas 25.4 mm	4.32	kg/m
Resistencia mínima a la Tensión del Varillón	8788	kg/cm ²
Resistencia mínima a la Tensión de la Cabilla	9843	kg/cm ²
Torque máximo Varillón	2800	lb*ft
Torque máximo Cabilla	1200	lb*ft
Fabricante de la bomba	KUDU	
Tipo de bomba	120TP2000	-
Head de la bomba	2000	m
Caudal teórico de la bomba @ 100rpm, 0 presión	24	m ³ /d
Diámetro del rotor de la bomba	2.04	in
Fabricante de la unidad de fuerza	KUDU	-
Clasificación de la unidad de fuerza	VH 100 HP 18T	-
Carga máxima de diseño de la unidad de fuerza	18000	kg
Diámetro de la polea del varillón	80	cm
Diámetro de la polea del motor	25	cm
RPM nominal del motor	1180	-
Potencia nominal del motor	100	hp
VFD POWER ELECTRONICS SD 700	-	-



Capítulo III: Análisis de los resultados.

3.3 Validación del completamiento de BCP para el pozo VD 702.

Utilizando la metodología (Hirschfeldt, 2008) descrita en el Capítulo II y los datos del diseño de bombeo de cavidades progresivas del pozo VD 702 reflejados en el epígrafe 3.2.5, se realiza la validación teórica del diseño del sistema de levantamiento artificial para cumplir con las condiciones básicas de mantener los niveles de producción actuales al tiempo que opera bajo porcentos de carga adecuados en cada uno de sus elementos y así prolongar su vida útil.

3.3.1 Cálculo de la presión de descarga de la bomba de cavidad progresiva del pozo VD 702.

Se mantendrá la tasa de producción actual con bombeo mecánico convencional y por tanto el nivel dinámico será el mismo, lo que significa que el pozo se mantendrá produciendo en un mismo punto de la curva de afluencia. Otro aspecto importante es la densidad del fluido dentro de la tubería de producción, asumiéndose como se ha explicado anteriormente la densidad del agua, se obtiene:

Tabla 3.6 Cálculo de la presión hidrostática.

Nivel Dinámico (m)	Densidad (g/cm ³)	Presión hidrostática (kg/cm ²)
700	1	70

Las presiones generadas por las pérdidas de carga dentro de la tubería dependen del diámetro de la tubería y cabillas, la viscosidad del fluido, profundidad de la bomba de cavidades progresivas y la tasa de producción deseada (ver epígrafes 3.1 y 3.2.1). Con estos datos se puede estimar el coeficiente de fricción según (Netsch, 2003) como lo muestra la figura 3.1.

Capítulo III: Análisis de los resultados.

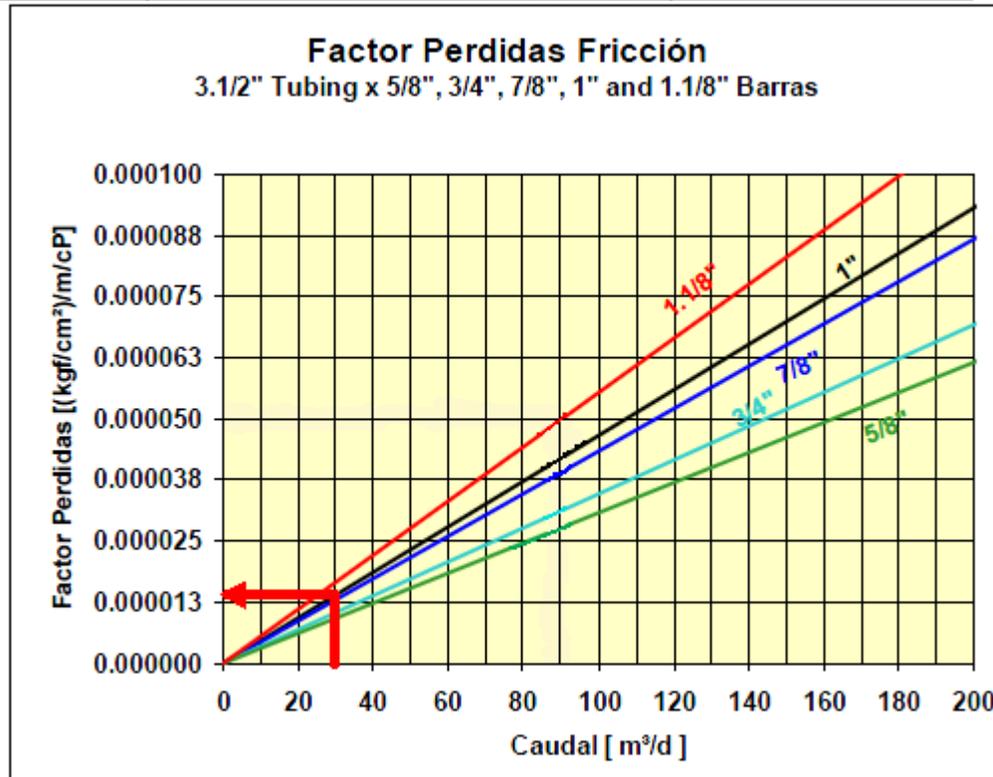


Figura 3.1: Factor de pérdidas de fricción. (Netsch, 2003)

Donde las pérdidas de presión por fricción son:

Tabla 3.7 Cálculo de las pérdidas de presión por fricción.

Factor de fricción	Profundidad de la bomba (m)	Viscosidad a condiciones de fondo (cP)	Pérdidas de presión por fricción (kg/cm ²)
0.000014	1400	380	7.45

De modo que la presión sobre la bomba será:

Tabla 3.8 Cálculo de la presión de descarga.

Presión Hidrostática(kg/cm ²)	Pérdidas de Presión por Fricción (kg/cm ²)	Presión en casing (kg/cm ²)	Presión de descarga de la bomba (kg/cm ²)
70	7.45	5	82.45



Capítulo III: Análisis de los resultados.

La bomba de cavidad progresiva a instalar en el pozo VD 702 debe trabajar con una presión de descarga de 82.45 kg/cm^2 o lo que es lo mismo que 820 metros de columna de agua.

3.3.2 Evaluación de la bomba del VD 702.

Para la evaluación de la bomba propuesta para el pozo VD 702 se utiliza el Manual PCM Moineau Oilfield de 2008 brindado por el fabricante (Figura 3.2).

En este punto conociendo la presión de descarga de la bomba y el caudal esperado se puede estimar la velocidad de operación de la bomba KUDU 120TP2000.

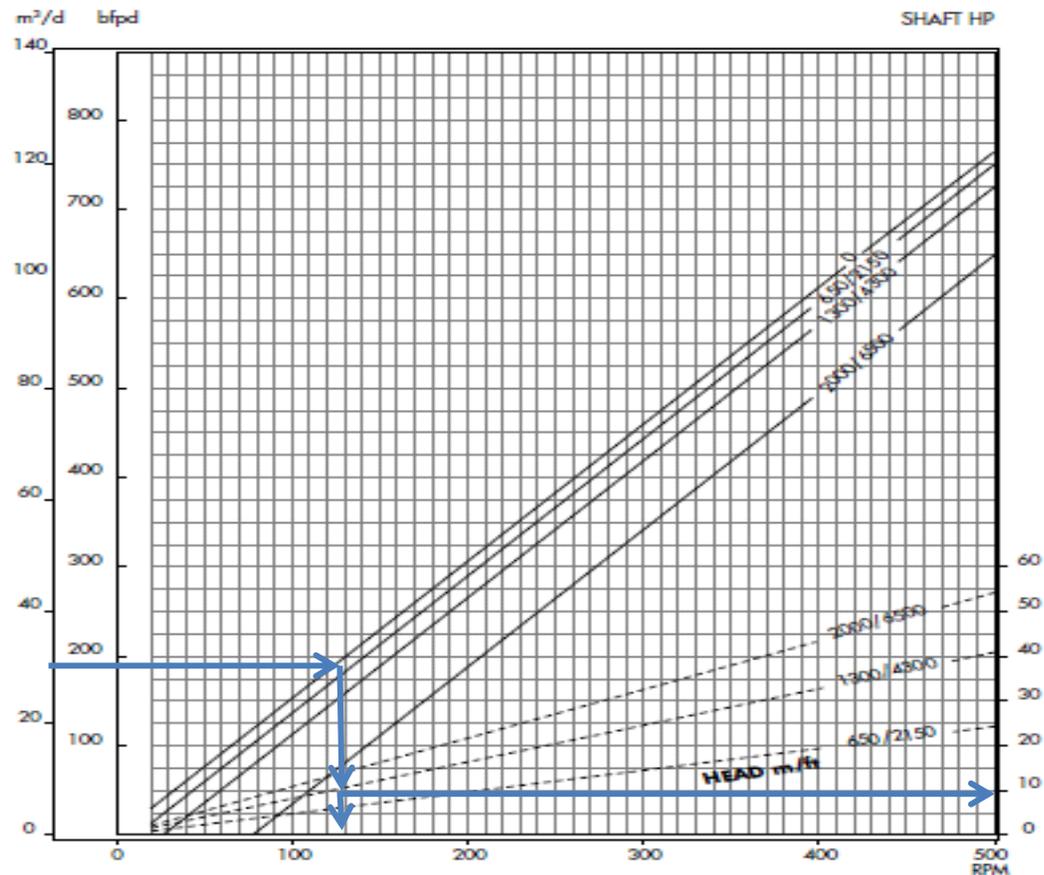


Figura 3.2: Gráfica de comportamiento de la bomba KUDU 120TP2000. (PCM Moineau Oilfield, 2008).



Capítulo III: Análisis de los resultados.

Como puede apreciarse la bomba del fabricante canadiense KUDU120TP2000 para un caudal esperado de $30 \text{ m}^3/\text{día}$ según la Figura 3.2 operará a **140 rpm** de un máximo de 500 rpm lo que garantiza su vida útil.

3.3.3 Cálculo del torque en el varillón del VD 702.

También de la Figura 3.2 se puede obtener la potencia hidráulica estimada en **9 hp**. Por tanto, conociendo las rpm de la bomba para lograr el caudal actual del pozo en superficie se puede calcular el torque que debe recibir el varillón.

Como se explica anteriormente debido al torque generado por las fricciones entre cabillas-tubería y cabillas-fluido es necesario utilizar un factor de seguridad por fricción el cual puede ser ajustado a partir de las experiencias de campo. La presente investigación no tiene precedentes que aborden este tema para las condiciones del crudo de en el país, así como la falta de herramientas de modelación que permitan una estimación más fundamentada se fijará un factor de seguridad por fricción de 0.5.

Tabla 3.9 Cálculo de la presión de descarga.

Potencia (hp)	rpm	Factor de Seguridad por fricción	Torque (lbf*ft)
9	140	0.5	675.26

El torque estimado que recibe el varillón del pozo VD 702 es de 675 lb*ft asumiendo un factor de seguridad arbitrario, se recomienda su evaluación una vez que se tengan los datos “duros” durante la explotación del pozo. Es decir una vez puesto el sistema en explotación el variador de frecuencia mostrará los valores reales de torque del sistema, datos que permitirán estimar con mayor precisión cuanto representa las fricciones entre cabillas, fluido y tubería de producción de los valores de torque totales.



Capítulo III: Análisis de los resultados.

3.3.4 Cálculo del peso total de la sarta del VD 702.

Los esfuerzos axiales se calculan teniendo en cuenta el peso de la sarta sumergida en el fluido y el efecto de la presión sobre el área resultante entre rotor y cabillas, de tal forma se tiene:

Tabla 3.10 Cálculo del peso de la sarta en el fluido.

Factor de Flotabilidad	Peso de la Sarta en el Aire (kg/m)	Profundidad de la bomba (m)	Peso de la Sarta en el fluido (kg)
0.88	4.32	1400	5328.87

Por otra parte el diferencial de presión presente en la descarga de la bomba unido al área resultante entre rotor y cabillas generan un mayor peso de la sarta:

Tabla 3.11 Cálculo del peso de la sarta por diferencial de presión.

Área de la sección transversal del rotor (cm ²)	Área de la sección transversal de la cabilla (cm ²)	Presión de descarga de la bomba (kg/cm ²)	Peso de la Sarta por diferencial de presión (kg)
21.06	5.06	82.45	1320.02

La suma del peso de la sarta flotando en el fluido de la tubería de producción y el peso generado por la proyección del diferencial de presión generado por la bomba sobre el área resultante entre la sección transversal de la cabilla y el rotor se estima en **6649.03 kg**. Evidenciando la necesidad de evaluar el impacto sobre el peso total de la sarta de dos parámetros fundamentales en la producción con sistemas de bombeo por cavidades progresivas, como son: nivel dinámico y diferencial de presión de la bomba.

3.3.5 Cálculo de tensiones combinadas en el varillón del VD 702.

El cálculo de la tensión combinando las fuerzas axiales y de torsión se realiza de la siguiente forma:



Capítulo III: Análisis de los resultados.

Tabla 3.12 Cálculo de las tensiones combinadas para el varillón.

Términos	Valores
Momento torsor (kg*m)	93.36
Momento de inercia polar (cm ⁴)	20.68
Módulo resistente polar (cm ³)	10.85
Tensión a la torsión (kg/cm ²)	860.13
Área del varillón (cm ²)	11.4
Tensión a la tracción (kg/cm ²)	583.5
Tensión combinada de varillón (kg/cm ²)	1816.63

Como se puede apreciar el momento aplicado al varillón incrementa sustancialmente las tensiones de trabajo, por lo que es un factor importante para el diseño.

3.3.6 Cálculo de tensiones combinadas en la cabilla del VD 702.

De forma análoga al epígrafe anterior pero para el diámetro de la cabilla se obtiene:

Tabla 3.13 Cálculo de las tensiones combinadas para la cabilla.

Términos	Valores
Momento torsor (kg*m)	93.36
Momento de inercia polar (cm ⁴)	4.08
Módulo resistente polar (cm ³)	3.22
Tensión a la torsión (kg/cm ²)	2902.95
Área de la cabilla (cm ²)	5.06
Tensión a la tracción (kg/cm ²)	1312.87
Tensión combinada de varillón (kg/cm ²)	5952.49

Las tensiones a soportar por la cabilla son significativamente mayores a las del varillón debido a la diferencia de diámetro existente entre ellos.



Capítulo III: Análisis de los resultados.

3.3.7 Cálculo del % de carga axial en varillón del VD 702.

Según el grado de acero del varillón y la carga axial combinada el porcentaje de carga por tensión es:

Tabla 3.14 Cálculo del porcentaje de carga en el varillón.

Tensión combinada de varillón (kg/cm ²)	Resistencia mínima a la tensión de varillón(kg/cm ²)	factor de seguridad recomendado por el fabricante	Carga axial en el varillón (%)
1816	8788	0.8	25.84

Aunque no se conoce el fabricante del varillón actual del pozo VD 702 es probable que sea *Alberta Oil Tools* (Canadá) o *Highland* (China) y ambos recomiendan utilizar 0.8 como factor de seguridad para todas sus especificaciones mecánicas.

El 25.84% significa que en cuanto a la carga axial el varillón de acero 4140 *Alloy* de diámetro 38.1 mm es completamente capaz de soportar las condiciones de trabajo del sistema de bombeo de cavidades progresivas.

3.3.8 Cálculo del % de carga axial en la cabilla del VD 702.

De forma análoga para la cabilla el porcentaje de carga axial es:

Tabla 3.15 Cálculo del porcentaje de carga en la cabilla.

Tensión combinada de la cabilla(kg/cm ²)	Resistencia mínima a la tensión la cabilla (kg/cm ²)	factor de seguridad recomendado por el fabricante	Carga axial en la cabilla (%)
5942	9843	0.8	75.59

El porcentaje de carga de 75.59 ofrece confianza en el manejo de las cargas axiales en la cabilla si consideramos que los cálculos se realizan con un factor de seguridad de 0.8.

Capítulo III: Análisis de los resultados.



3.3.9 Cálculo del % de carga axial en la unidad de fuerza del VD 702.

Según el límite de carga axial a soportar por la unidad de fuerza el porcentaje de carga en condiciones de operación será:

Tabla 3.16 Cálculo del porcentaje de carga en la unidad de fuerza.

Peso total de la sarta (kg)	Carga de diseño de la unidad de fuerza(kg)	Carga en la unidad de fuerza (%)
6649.03	18000	36.94

Con porcentos de carga bajos como lo es el 36.94% sobre la unidad de fuerza sus rodamientos (principal elemento sobre el que actúa el peso de la sarta) alarga su vida útil.

3.3.10 Cálculo del % de carga tangencial en el varillón del VD 702.

Para el análisis se utiliza el torque requerido y el torque máximo por diseño obteniéndose:

Tabla 3.17 Cálculo del porcentaje de torque en el varillón.

Torque sobre el varillón(lb*ft)	Resistencia a la torsión del varillón (lb*ft)	factor de seguridad recomendado por el fabricante	Carga tangencial en el varillón (%)
675.26	2800	0.8	30.15

El torque esperado en el varillón del pozo VD 702 con sistema de levantamiento artificial de bombeo por cavidades progresivas no sobrepasa su capacidad de diseño.

3.3.11 Cálculo de la carga tangencial en la cabilla del VD 702.

Para la cabilla cambia la resistencia máxima a la torsión por lo que el porcentaje de carga es:

Tabla 3.18 Cálculo del porcentaje de torque en la cabilla.



Capítulo III: Análisis de los resultados.

Torque sobre la cabilla (lb*ft)	Resistencia a la torsión de la cabilla (lb*ft)	factor de seguridad recomendado por el fabricante	Carga tangencial en la cabilla (%)
675.26	1200	0.8	70.34

El torque que recibe la cabilla protegida con un factor de seguridad de 0.8 es de 70.34% por lo que se mantiene dentro de los límites aceptables.

3.3.12 Par del motor del VD 702.

Para calcular el par motor lo primero es conocer cuál es el torque máximo del motor teniendo en cuenta los datos nominales:

Tabla 3.19 Cálculo del torque máximo del motor.

Potencia nominal del motor (hp)	rpm nominal del motor (lb*ft)	Torque máximo del motor (lb*ft)
100	1180	445

Este es el valor máximo de torque que puede entregar el motor, en algunas bibliografías conocido como torque nominal.

Luego se calcula el torque real a partir del torque esperado en el varillón y la relación de transmisión entre las poleas del motor y el varillón:

Tabla 3.20 Cálculo del par motor.

Relación de transmisión	Torque del motor en condiciones de operación (lb*ft)	Torque máximo del motor (lb*ft)	Par motor (%)
3.20	211.02	445	47.41

El par motor se encuentra dentro de los límites establecidos, permitiendo su operación con buen aprovechamiento de su vida útil.

3.3.13 Resumen de la validación del sistema de BCP en el pozo VD 702.

Como puede apreciarse en el Tabla 3.21 los elementos evaluados según la metodología de (Hirchfeldt, 2008) presentan porcentos de carga adecuados, por lo se concluye que **el cambio**



Capítulo III: Análisis de los resultados.

de sistema de levantamiento artificial en el pozo VD 702, de Bombeo Mecánico Convencional a Bombeo por Cavidades Progresivas, permite mantener la producción actual con porcentos de cargas que no sobrepasan los límites aceptables para cada uno de sus elementos según sus características de diseño.

Tabla 3.21: Porcientos de carga en el sistema de BCP

ELEMENTOS DEL SISTEMA BCP	PORCIENTO DE CARGA
Carga axial en el varillón.	25.84
Carga axial en la cabilla.	75.59
Carga axial en la unidad de fuerza.	36.94
Carga tangencial en el varillón.	30.15
Carga tangencial en la cabilla.	70.34
Carga tangencial en el motor.	47.41

3.4 Impacto económico del cambio de BMC a BCP.

El principal impacto económico del cambio de sistema de levantamiento artificial es evitar el fallo de la unidad de bombeo mecánico por exceso de carga en sus elementos, al tiempo que se obtiene la misma producción del pozo. Asumiendo la frecuencia de fallo de la unidad de bombeo mecánico en una vez al año, se impone describir los costos de la instalación del sistema de bombeo por cavidades progresivas (Tabla 3.22) y los costos de fallo del sistema de bombeo mecánico convencional (Tabla 3.23). En dicho análisis no se incluyen los costos por toneladas dejadas de producir porque aunque el cambio de sistema de levantamiento no debe exceder los 5 días, es complicado estimar cuanto tiempo se afectaría el pozo si se avería la estructura o el reductor de la unidad de BMC, AMPSCOT 640, instalada en el VD 702 cuando no existen unidades para reponer; situación que en la mayoría de las ocasiones se resuelve tomando la unidad de bombeo de otro pozo que se encuentre en conservación o incluso sacrificando su producción.

El cambio de sistema de levantamiento se realiza con un equipo de intervención (SERVIRIG). Además se utiliza la misma tubería del pozo y se agregan otros componentes propios del



Capítulo III: Análisis de los resultados.

bombeo por cavidades progresivas como: ancla de torque, variador de frecuencia, unidad de fuerza y cabillas de rotación.

Tabla 3.22: Costos de instalación de BCP

Costos de Instalación del BCP	Cantidad	Valor Unitario	Monto
Alquiler de SERVIRIG (equipo de intervención).	5 días	180	900
Ancla de torque	1	4261	4261
Cabillas Drive Rod de 1" G HL	183	15.3	2800
Unidad de Fuerza (incluye motor)	1	7630	7630
Bomba	1	4244	4244
Variador de Frecuencia.	1	3040	3040
TOTAL			\$22 875

Tabla 3.23: Costos de fallo del BMC.

Costos de fallo del BMC	Cantidad	Valor Unitario	Monto
Reductor	1	32 877	32 877
Estructura	1	58 338	58 338
			\$91 215

Como se puede observar el cambio de sistema de levantamiento artificial de BMC a BCP representa un ahorro de \$ 68 340 para la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro por concepto de prevención de fallo.

3.5 Conclusiones parciales.

1. Las características del fluido del pozo VD 702 con un % BSW de 0 son ideales para el uso de la bomba tipo Metal-Metal. Sin embargo los tres modelos disponibles presentan caudales muy grandes para los 30 m³ de producción deseada del pozo.



Capítulo III: Análisis de los resultados.

2. La bomba seleccionada para el pozo VD 702 es la **KUDU 120TP2000** debido a que cumple con los requisitos de altura necesarios y es la que presenta velocidad de operación de 125 rpm, adecuada para caudal esperado de 30 m³/día.
3. Para el completamiento subterráneo del pozo serán necesarias 183 cabillas de *Drive Rod* grado HL de 1'' cala *Slim Hole* y una herramienta anti-torque de 88.9 mm X 6 5/8 in marca *Tech-West*.
4. Atendiendo a las altas cargas axiales y alto torque esperados debido a la profundidad de la bomba y al diferencial de presión a desarrollar por la bomba se decide utilizar la unidad de fuerza VH 100 HP 18T por tener mayor carga máxima o carga axial.
5. El varillón de acero 4140 *Alloy* de diámetro 38.1 mm es completamente capaz de soportar las condiciones de trabajo del sistema de bombeo de cavidades progresivas.
6. El porcentaje de carga de 75.59 ofrece confianza en el manejo de las cargas axiales en la cabilla si consideramos que los cálculos se realizan con un factor de seguridad de 0.8.
7. Con porcentos de carga bajos como lo es el 36.94% sobre la unidad de fuerza sus rodamientos (principal elemento sobre el que actúa el peso de la sarta) alarga su vida útil.
8. El torque esperado en el varillón del pozo VD 702 con sistema de levantamiento artificial de bombeo por cavidades progresivas no sobrepasa su capacidad de diseño.
9. El torque que recibe la cabilla protegida con un factor de seguridad de 0.8 es de 70.34% por lo que se mantiene dentro de los límites aceptables.
10. El par motor se encuentra dentro de los límites establecidos, permitiendo su operación con buen aprovechamiento de su vida útil.
11. El cambio de sistema de levantamiento artificial de bombeo mecánico convencional a bombeo por cavidades progresivas representa \$ **68 340** de ahorro para la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro por concepto de prevención de fal

Conclusiones.



CONCLUSIONES

1. El cambio de sistema de levantamiento artificial en el pozo VD 702, de Bombeo Mecánico Convencional a Bombeo por Cavidades Progresivas, permite mantener la producción actual con porcentajes de cargas que no sobrepasan los límites aceptables para cada uno de sus elementos según sus características de diseño.
2. La bomba seleccionada para el pozo VD 702 es la KUDU 120TP2000 debido a que cumple con los requisitos de altura necesarios y es la que presenta velocidad de operación de 125 rpm, adecuada para caudal esperado de 30 m³/día.
3. Atendiendo a las altas cargas axiales y alto torque esperados debido a la profundidad de la bomba y al diferencial de presión a desarrollar por la bomba se decide utilizar la unidad de fuerza VH 100 HP 18T por tener mayor carga máxima o carga axial.
4. Para el completamiento subterráneo del pozo serán necesarias 183 cabillas de *Drive Rod* grado HL de 1'' cala Slim Hole y una herramienta anti-torque de 88.9 mm X 6 5/8 in marca Tech-West.
5. El varillón de acero 4140 *Alloy* de diámetro 38.1 mm es completamente capaz de soportar las condiciones de trabajo del sistema de bombeo de cavidades progresivas.
6. El cambio de sistema de levantamiento artificial de bombeo mecánico convencional a bombeo por cavidades progresivas representa \$ **68 340** de ahorro para la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro por concepto de prevención de fallo.

Recomendaciones.



RECOMENDACIONES

1. Informar al departamento de tecnología de la EPEPC los resultados de esta investigación para coordinar la sustitución del sistema de bombeo en el pozo VD 702.
2. Al término de la vida útil de la bomba KUDU 120TP2000 reponer por otra con similares características de caudal y altura pero del tipo Metal-Metal.
3. Una vez puesto en marcha el sistema de bombeo por cavidades progresivas en el pozo VD 702, conociendo los datos reales de torque en el varillón ajustar el factor de seguridad por fricción entre cabillas-tubería y cabillas-fluido.



BIBLIOGRAFÍA

1. BARBERI, E. 1998. Pozo ilustrado, Caracas.
2. BEAUQUIN, J.,BOIREAU C. y LEMAY L. *Development Status of a Metal Progressing Cavity Pump for Heavy-Oil and Hot-Production Wells*. 2006.
3. BERGER, B.1992. *Modern Petroleum*, USA.
4. CAJIGAL, A. 2005. Manual de producción de petróleo y gas, La Habana.
5. CHACÍN, N. 2003. Manual de Bombeo de Cavidad Progresiva, Venezuela.
6. CHALET, H., 2000. *Well Productivity and Well Production Practical Hand book*. Paris.
7. CONOCO P. y NOONAN S. *The Progressing Cavity Pump Operating Envelope: You Cannot Expand What You Don't Understand*. 2009.
8. GAMBOA, J.,OLIVET, A., IGLESIAS, J. y GONZÁLEZ, P.2008. *Understanding the performanceof a progressive cavity pump with a metallic stator*, Venezuela.
9. GARCÍAJ., ALONSOV. y CRUZ L. Metodología y Técnicas para La investigación Científica. 2000.
10. GASSE DE CARVALHO, P. y MILANI DE ROSSII, N. *Bombeio de Cavidades Progressivas*. 2008.
11. GUO, B. y LYON,W.*Petroleum_Production_Engineering*. 2007.
12. HIRSCHFELDT, M. 2005. Introducción al sistema de bombas de cavidades progresivas, Argentina.
13. HIRSCHFELDT, M. 2008. Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas.
14. MAGGIOLO, R. 2008. Optimización de la Producción mediante Análisis Nodal.
15. NETZSCH OILFIELD PRODUCTS. 2005. *PCP System Manual*.
16. PCM MOINEAU OILFIELD. 2008. Manual.
17. PROTEX COMPLETE INTEGRATED SOLUTIONS. 2003. *Progressive Cavity Pump Manual*.
18. R & M Energy Systems, a Unit of Robbins and Myers Inc., “Progressing Cavity (PC) Pump Design Optimization for Abrasive Applications”, 2009.



Bibliografía.

19. RODRÍGUEZ, R.2007. Propuestas de optimización en los pozos con mayores posibilidades del Centro Colector # 4, Varadero.
20. SAMIR, M. *Different Application of Artificial Lift Methods in Heavy Oil Reservoir below 12 API*. 2009.
21. SVINOS, J. Manual de Bombeo mecánico. Optimización de Bombeo Mecánico. 2005.
22. T.E.W.2006. Fundamentos de producción y mantenimiento de pozos petroleros, México.
23. VETTER, G., WIRTH, W. 1995. Understand Progressing Cavity Pumps Characteristics and Avoid Abrasive Wear, Houston.
24. PARTIDAS, H. 2003. Bombeo Mecánico: Optimización, Diagnóstico y Operación, Venezuela.

Anexos.



ANEXOS

Anexo # 1: Especificaciones de la bomba Kudu 120TP2000.



17 rue Ernest Laval - BP 35 - 92173 Vanves Cedex France
 Tel (33) 1 41 08 15 15 - Telex 634 129 F - Fax (33) 1 41 08 15 99
<http://www.pcm-pompes.com> Email: oil@pcm-pompes.com

PCM MOINEAU OILFIELD

Specifications 120 TP 2000

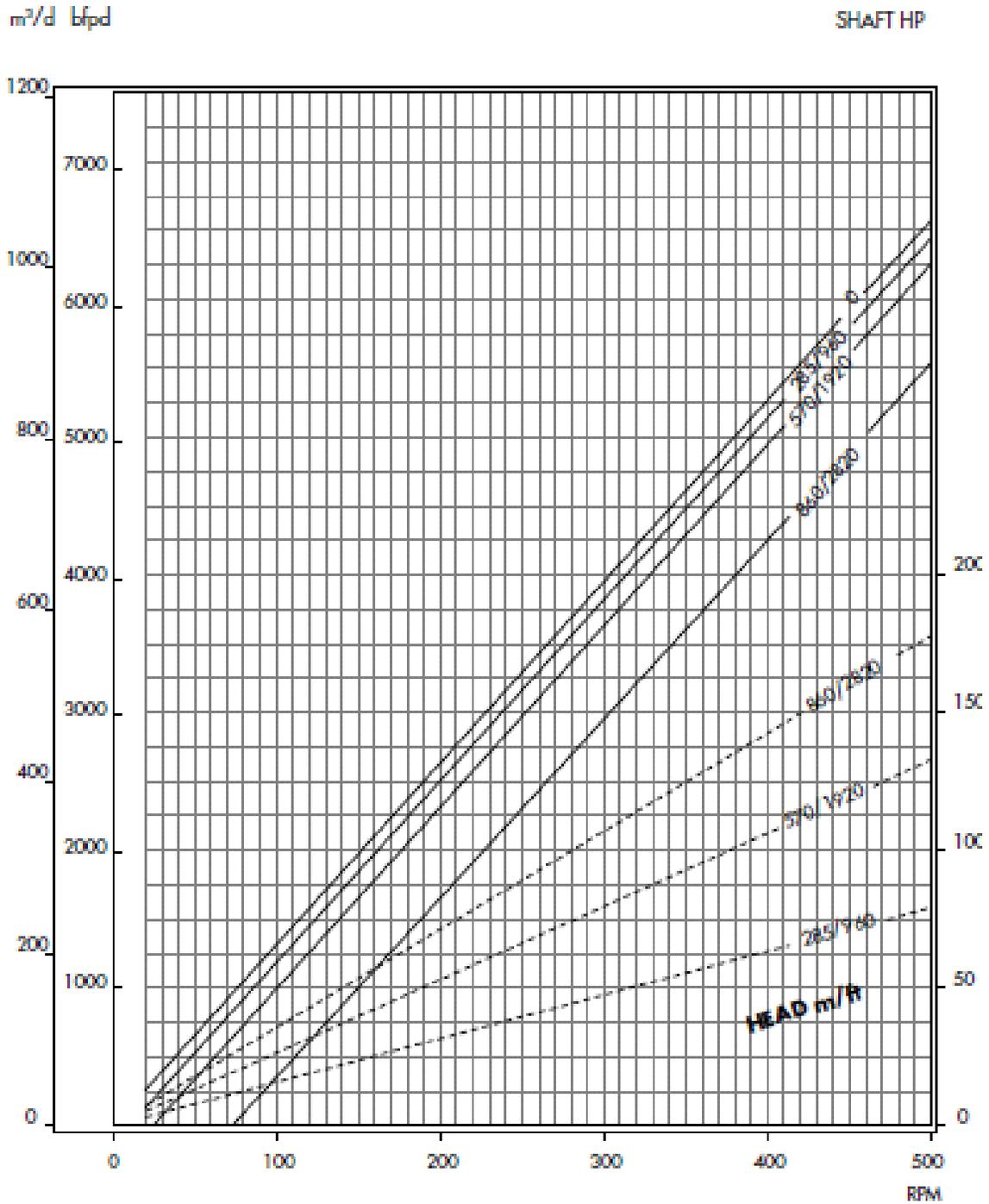
ISO 120/20

ROTOR			PUMP ASSEMBLY		
TOTAL LENGTH	6.570 m	21'6.7"	Nb OF STAGES (2)	37	
LENGTH OF HELIX	6.380 m	20'11.18"	HEAD CAPABILITY	2000 m	6600 ft
CREST TO CREST DIAM (1)	51.0 mm	2.01"	DISPLACEMENT	170 cc	
HEAD DIAM (1)	52.0 mm	2.05"	CAPACITY PER RPM	0.244 m3/d	1.53 bpd
THREAD	1 3/8"API	1" rod	VOLUME AT 500 RPM	122 m3/d	767 bpd
			O.D.	108 mm	4.25"
STATOR			STOP BUSHING		
Nb OF ELEMENTS	3		STAND-OFF LENGTH	0.3 m	1 ft
LENGTH	6.100 m	20'0.2"			
O.D.	108 mm	4.25"			
THREADS	3"1/2 EUE male				

(1) Largest of the two is rotor O.D.

(2) Stage defined as equivalent to one pitch length of stator

Anexos.



Tomado de: Fragmentos del catálogo de bombas de cavidad progresivas de PCM (Compañía propietaria del *CopyRight* cedido a la compañía Kudu por *Leasing*).



Anexos.

Anexo # 2: Certificado de Manufactura de Cabillas Drive Rod Grado HL de HIGHLAND



胜利油田高原油设备有限责任公司
SHENGLI OIL FIELD HIGHLAND PETROLEUM EQUIPMENT CO., LTD

Specification for Cuba

Manufacturer's Mill Test Certificate

Drive Rods

Specification: API Spec 11B (27 Edition, 2010)

Products are in accordance with the requirements of technical specification

Product Name	Standard	Grade	Sucker rod Material	Coupling Material	Country of origin	Ship to	Qty	Contract No.	
drive rod		HL(eq.N97)	35CrMoA	35CrMoA	China				
Chemical Analysis	Chemical element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
	Drive rod	0.32~0.40	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	≤0.30	0.15~0.25	≤0.025	≤0.035
	Coupling	0.32~0.40	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	≤0.30	0.15~0.25	≤0.025	≤0.035
Mechanical Test	Tensile strength (Mpa)	Yield strength (Mpa)		Broken Elongation(%)		Area reduction(%)		Coupling hardness (HRA)	
	966 1195	≥793		≥10		≥45		60 ~ 66	
Remarks	1. Coupling Class: HL. 2. The material 35CrMoA equivalent to AISI4135 or similar.								

Notas:

- En círculos rojos la similitud del grado de acero HL con el grado 97 fabricado por varios productores de cabillas como es el caso de los fabricantes canadienses de gran presencia en Cuba *Alberta Oil Tools* y *Norris*.
- La resistencia mínima a la tensión es de 966 mPa=9843 kg/cm²



Anexos.

Anexo # 3: Especificaciones para cabillas y varillón según el fabricante *Norris* de *Alberta Oil Tool*.

Cabillas:

All torque values are ft. lbs.

Rod Size	Grade D Carbon (54)	Grade D Alloy (78)	Grade D Special Alloy (75)	Special Service (96)	Special Service (97)
3/4"	430	460	470	500	500
7/8"	675	735	750	800	800
1"	1,010	1,100	1,110	1,200	1,200
*1" with 7/8" modified pins	N.A.	1,100	1,110	1,200	1,200
1 1/8"	N.A.	1,570	N.A.	N.A.	1,700
*1-1/4" with 1" modified pins	N.A.	2,000	2,100	2,500	2,500
*1 1/2" with 1 1/8" modified pins	N.A.	3,000	3,150	3,750	3,750
*1 1/4" with 1 1/8" modified pins	N.A.	2,000	2,100	2,500	2,500

Varillón:

All torque values are ft. lbs.

Rod Size	Piston (C1045)	Norloy (8620)	431 SS	4140 Alloy	4140 Special
1 1/4" with 3/4" pin	1,500	1,500	1,500	1,500	-
1 1/4" with 7/8" pin	1,800	1,800	1,800	1,800	-
1 1/2" with 1" pin	2,800	2,800	2,800	2,800	-
1 1/2" Upset	-	-	-	-	3,750

• To maximize rod fatigue life, AOT recommends using a .8 safety factor.

Peso específico de las cabillas.

Sinker Bar Weight, Lbs. Per Ft.

7/8" sucker rods = 2.2 **1" sucker rods = 2.9** 1 1/4" bar stock = 4.2
 1 1/2" bar stock = 6.0 1 5/8" bar stock = 7.2 1 3/4" bar stock = 8.2

Tomado de: *Norris Products, Alberta Oil Tool*; "Specifications of Norris Steel Sucker Rods & Drive Rods".

Anexos.



Anexo # 4: Elementos del Sistema de Bombeo por Cavidades Progresivas

Unidad de Fuerza: KUDU VH 100HP 18T

Ancla de Torque: Cam-Loc



Variador de Frecuencia: Power Electronic SD 700

