



**UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL
DE LOS LLANOS OCCIDENTALES "EZEQUIEL ZAMORA"
VICE-RECTORADO DE PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO SOCIAL
PROGRAMA INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y TECNOLOGÍA
SUBPROGRAMA INGENIERÍA DE PETRÓLEO**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

UNELLEZ Sala de Tesis. Producción Departamento Yacimientos Barinas

AUTOR: Díaz Burgos Suay Anyarit

C.I: 19.620.078

Tutor Académico: Ing. Sharon Escalante.

Barinas, Marzo de 2017.



**UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL
DE LOS LLANOS OCCIDENTALES "EZEQUIEL ZAMORA"
VICE-RECTORADO DE PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO SOCIAL
PROGRAMA INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y TECNOLOGÍA
SUBPROGRAMA INGENIERÍA DE PETRÓLEO**

**MODULO DE DISEÑO DE BOMBEO DE CAVIDAD
PROGRESIVA (BCP), PARA LA VALIDACION DEL PROGRAMA
VALHER V 2.0.**

Trabajo Especial de Grado presentado como requisito parcial para optar por
el título de: Ingeniero de Petróleo.

AUTOR: Díaz Burgos Suay Anyarit

C.I: 19.620.078

Tutor Académico: Ing. Sharon Escalante

Barinas, Marzo de 2017.



**UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL
DE LOS LLANOS OCCIDENTALES "EZEQUIEL ZAMORA"
VICE-RECTORADO DE PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO SOCIAL
PROGRAMA INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y TECNOLOGÍA
SUBPROGRAMA INGENIERÍA DE PETRÓLEO**

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi carácter de Tutor (a) del Trabajo de Especial de Grado presentado por el ciudadano **Suay Anyarit Díaz burgos, C.I. 19.620.078,** para optar al título de **Ingeniero de Petróleo,** considero que este reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Barinas a los _____ días del mes de _____ de

Tutor (a): Ing. Sharon Escalante.

C.I.: 5.683.344.



**UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL
DE LOS LLANOS OCCIDENTALES “EZEQUIEL ZAMORA”
VICE-RECTORADO DE PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO SOCIAL
PROGRAMA INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y TECNOLOGÍA
SUBPROGRAMA INGENIERÍA DE PETRÓLEO**

**MODULO DE DISEÑO DE BOMBEO DE CAVIDAD PROGRESIVA (BCP),
PARA LA VALIDACION DEL PROGRAMA VALHER V 2.0.**

POR AUTOR (ES): Suay Díaz
C.I:19.620.078

Trabajo Especial de Grado aprobado en nombre de la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales “Ezequiel Zamora” por el siguiente jurado, a los _____ días del mes de _____ de _____.

JURADO Francys Contreras
C.I. 16.958.706

JURADO Ing. Renier Antunez
C.I.19.882.047.

TUTOR Ing. Sharon Escalante.
C.I. 5.683.344.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis primeramente **Dios** porque ha estado conmigo en cada paso que doy, guiándome y dándome fortaleza para continuar.

A mi Madre, Hilda Burgos ejemplo de mujer luchadora y quien en cada momento de mi vida me ha brindado su apoyo y ha velado por mi Educación y bienestar.

A mis hijos Nahomy Pérez y Sair Pérez porque gracias a ellos he encontrado la firmeza y voluntad necesaria para continuar con mi carrera.

A mi Prima Zenaida salcedo, a quien considero como una hermana gracias por el apoyo que siempre me has brindado por estar conmigo en todo momento.

A mi esposo José Pérez quien ha sido un pilar muy importante gracias por tu apoyo.

A mis compadres y compañeros de estudio Yeferson Quiroz, y Haidee Rodríguez por brindarme su apoyo incondicional en todo momento, igualmente a mi grupo de estudio Lisbeth Aguirrez, Sonia Gutiérrez Jorge Rivas y Norvid Guillen gracias por su amistad y por su compañía durante toda la carrera.

A mis hermanos Hilda Díaz, María González, Eddy González y Andris González porque de cada uno de ustedes he tenido el impulso necesario para seguir adelante y conseguir mis metas.

Díaz Suay

RECONOCIMIENTO

Primeramente agradecida con **Dios** por ser el guía de mis pasos y por acompañarme siempre en cada momento.

A la Universidad Nacional Experimental de Los Llanos Occidentales “Ezequiel Zamora” UNELLEZ y a los excelentes profesores que la conforman, por darnos la oportunidad de formarnos como profesionales de bien

A mi madre Hilda Burgos por ser unos de los cimientos más importantes juntos con mis hijos en mi carrera.

A mi tutora académica Ing. Sharon Escalante, muchísimas gracias por su colaboración paciencia, sabiduría y sobre todo por su perseverancia y amistad.

A mi tutor industrial Ing. Edgar Valdez gracias por brindar sus conocimientos, por contribución y sobre todo por su disposición.

Díaz Suay

ÍNDICE GENERAL

	pp.
LISTA DE TABLAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: EL Problema.....	3
Planteamiento del Problema.....	3
Objetivos de la Investigación.....	5
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos.....	5
Justificación de la Investigación.....	6
Alcances y Limitaciones.....	7
Alcances.....	7
Limitaciones.....	7
CAPÍTULO II: Marco Contextual	8
Área de la Investigación.....	8
Antecedentes del Estudio.....	8
Marco Teórico.....	9
Sistema de Variables.....	47
Mapa de Variables.....	48
Normativa y Aspectos Legales.....	50
CAPÍTULO III: Marco Metodológico	52
Tipo de Investigación.....	52
Metodología.....	52
Técnicas, Instrumentos y Materiales aplicados en la recolección de datos.....	54
CAPÍTULO IV: Análisis de los Resultados.....	56
Presentación.....	56
CAPÍTULO V: Conclusión y Recomendaciones.....	76
Conclusión.....	76
Recomendaciones.....	77
Referencias Bibliográficas.....	78
Anexos.....	80

LISTA DE TABLAS

	pp.
Tabla 1. Características de las cabillas según su Grado API.....	26
Tabla 2. Nomenclatura de las BCP según el fabricante.....	37
Tabla 3. Estructura General del Programa Valher V 2.0.....	39
Tabla 4. Mapa de Variables.	48
Tabla 5. Comparación de los datos más representativos de cada pozo.....	59
Tabla 6. Pozo ARE-17 Campo Arecuna-Oriente.....	65
Tabla 7. Pozo BN0735A, Campo Boscan-Occidente.....	71
Tabla 8. Pozo CD-38, Campo Cerro Negro-Faja Petrolífera del Orinoco.	72
Tabla 9. Pozo ARE 17 comparación de los programas de diseño.....	73
Tabla 10. Comparación de los programas de diseño.....	74
Tabla 11. Comparación de los programas de diseño.....	75
Tabla 12: Nomenclatura.....	80

LISTA DE FIGURAS

	pp.
Figura 1. Descripción Gráfica de un Sistema de BCP.15.....	15
Figura 2. Geometrías de la Bomba.15.....	15
Figura 3. Corte Longitudinal de un Estator17.....	17
Figura 4. Rotores para Bombas PCP.17.....	18
Figura 5. Niples de Paro.22.....	23
Figura 6. Centralizadores de Cabilla.25.....	26
Figura 7. Evaluación de los Equipos de superficie.31.....	31
Figura 8. Equipos Integrados de Correas y Poleas31.....	32
Figura 9. Diagrama de Flujo de Diseño de BCP.....	57



UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL

DE LOS LLANOS OCCIDENTALES "EZEQUIEL ZAMORA"

VICE-RECTORADO DE PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO SOCIAL

PROGRAMA INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y TECNOLOGÍA

SUBPROGRAMA INGENIERÍA DE PETRÓLEO

**MODULO DE DISEÑO DE BOMBEO DE CAVIDAD PROGRESIVA (BCP),
PARA LA VALIDACION DEL PROGRAMA VALHER V 2.0.**

AUTOR: Suay Díaz

TUTOR (Académico): Ing. Sharon Escalante

Marzo, de 2017

Resumen

La investigación de esta tesis se basa en validar los datos de la herramienta VALHER V2.0 y comprobar si dicha herramienta es óptima y si los datos suministrados en ella son correctos, por tal razón se creara un algoritmo de diseño que será uno de los medios a utilizar para la validación. También se utilizara la herramienta de diseño y simulación BCPI creada por la Filial Intevep. Quien es el brazo tecnológico de Petróleos de Venezuela, cuya orientación estratégica es generar soluciones tecnológicas integrales, con especial énfasis en las actividades de Exploración, Producción, Refinación e Industrialización. Esta comparación se hace con el fin de conocer si el programa VALHER V2.0, es confiable en pozos reales. Es por ello que esta investigación tiene como objetivo general validar el módulo de diseño de BCP de dicho programa. La metodología de trabajo es descriptiva, con un total de población de tres pozos ubicados en distintas regiones del país. Para el área de Oriente se tomó como ejemplo el pozo ARE-17, perteneciente al Campo Arecuna en el estado Anzoátegui, para Occidente el pozo BN735A perteneciente al Campo Boscan en la Costa Oriental del Lago y el pozo CD-38 perteneciente al Campo Cerro Negro ubicado en la Faja Petrolífera del Orinoco. Durante el desarrollo de esta tesis se pudo comprobar que el programa VALHER V2.0 cumple con los objetivos planteados en este trabajo, la cual puede ser utilizado como herramienta educativa en pro de la educación que los estudiantes de ingeniería de Petróleo, para el diseño de bombeo de cavidades progresivas teniendo en cuenta que es un programa en desarrollo; ciertos parámetros presentan variación con respecto a los resultados obtenidos por el algoritmo y la herramienta BCPI.

Descriptores o palabras claves: Validar, Bombas de Cavidad Progresiva, BCPI y logaritmo.

E-mail del autor o autores: Diazsuay@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Venezuela es el país con las mayores reservas de crudo en el mundo, según el proyecto Magna Reserva se estiman en 298000 millones de barriles de crudo lo cual en su mayoría es crudo pesado, uno de los métodos de producción por excelencia para este tipo de crudo es el de Bombeo de Cavidades Progresivas, ya que puede manejar fluidos con altas viscosidades, gas, arenas y por lo general la eficiencia está entre 70 – 98%. Este método de bombeo normalmente tiene la asistencia de software de diseño y simulación desarrollados por empresas extranjeras.

En el 2015 el Ing. Edgar Valdez, creó el programa VALHER V2.0, el cual tiene cinco módulos de selección entre ellos están; Bombeo Mecánico (BMC), Bombeo Electrosumergible (BES), Bombeo Hidráulico Jet (BHJ), Levantamiento Artificial por Gas (Gas Lift) y Bombeo de Cavidad Progresiva (BCP).

En este trabajo especial de grado se propone la creación de un algoritmo para el diseño de (BCP), en base a la tasa deseada y así validar el módulo de BCP del programa VALHER V2.0, teniendo en cuenta la herramienta BCPI (INTEVEP), la cual servirá como referencia para comparar los resultados con el fin de identificar fallas o errores que pueda contener dicho programa.

Esta investigación se encuentra enmarcada en 5 capítulos:

CAPÍTULO I EL PROBLEMA: En este se hace referencia a la problemática planteada, el objetivo general y los objetivos específicos; así como, la justificación, el alcance y las limitaciones de mencionada investigación.

CAPÍTULO II MARCO CONTEXTUAL: está constituido por los Antecedentes de la Investigación, las Bases Teóricas, las Bases Legales que lo sustentan y la Operacionalización de Variables.

CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO: Se describe la Naturaleza de la Investigación, la Población y Muestra, la Técnica de Recolección de Datos seleccionada, la Validez y Confiabilidad del Instrumento así como también, la Metodología para el desarrollo del objeto de aprendizaje.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS: En este capítulo se muestran los resultados obtenidos por medio del desarrollo de cada uno de los objetivos específicos representando esto el cumplimiento del objetivo general.

CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES: Se exponen las conclusiones y recomendaciones referentes al desarrollo de la investigación luego del análisis e interpretación de los datos recopilados a lo largo del proceso de la investigación.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la industria petrolera venezolana, el proyecto Magna Reserva, enmarcado dentro del Plan Siembra Petrolera, ha logrado la cuantificación y la certificación de las reservas de petróleo existentes en la faja petrolífera del Orinoco, las cuales ascienden a 298000 millones de barriles de petróleo en su mayoría crudo pesado que puede ser extraído del subsuelo a través de método de levantamiento artificial.

Entre los métodos de producción para crudo pesado en Venezuela se pueden encontrar bombeo mecánico convencional (BMC) y bombeo de cavidad progresiva (BCP). Ambos necesitan de herramientas de diseño para la selección de los equipos de fondo y de superficie.

El Instituto de Tecnología Venezolana para el Petróleo (INTEVEP), cuenta con una herramienta llamada BCPI, el cual está calificada para el cálculo de diseño y simulación de Bombeo de Cavidades Progresivas. Esta herramienta creada por, INTEVEP se encarga de la evaluación y rendimiento interactivo para sistemas BCP utilizados para producir los pozos de petróleo. El software permite tomar mejores decisiones sobre el diseño del sistema.

Uno de los impedimentos que hay en Venezuela es que los estudiantes de ingeniería de petróleo no tienen acceso a software de diseño de bombeo de cavidades progresivas el cual nos coloca en desventaja cuando llegamos al campo laboral. Ya que no se dispone de ninguna herramienta para la enseñanza de los principios fundamentales de sistemas BCP en nuestras universidades.

El Ing. Edgar Valdés, diseña una herramienta educativa llamada VALHER V2.0 para el análisis nodal de pozos de petróleo y se le han venido incorporando métodos de producción entre ellos BCP

Se quiere comparar el desempeño de la herramienta VALHER V2.0, con la herramienta BCPI (INTEVEP) la cual se toma como referencia por su experiencia en la industria. Para diagnosticar fallas o errores, con el propósito de mejorar la aplicabilidad de la herramienta VALHER V2.0 en pozos reales.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

OBJETIVO GENERAL

Validar el módulo de diseño de bombeo de cavidad progresiva (BCP), del programa VALHER V 2.0.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Generar el algoritmo de diseño con las ecuaciones fundamentales de bombeo de cavidad progresiva (BCP).
2. Ubicar datos de yacimiento, producción y completación de pozos con BCP en áreas emblemáticas de Occidente, Faja Petrolífera del Orinoco y Oriente
3. Comparar las principales variables de diseño de BCP, del programa VALHER V2.0 y BCPI (INTEVEP). .

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo especial de grado se justifica a nivel nacional, por tres pilares fundamentales: Plan Siembra Petrolera, Plan de la Patria y las Líneas Estratégicas de PDVSA.

De acuerdo al Plan de la Patria, Segundo Plan Socialista de Desarrollo Económico y Social de la Nación, la Producción de crudo para el año 2019 será de 6MMBD, y la presente investigación apoyara directamente este logro. En su artículo 1 .2.5.3 “Promover y estimular la investigación científica y el desarrollo tecnológico, con el propósito de asegurar las operaciones medulares de la industria petrolera.

Plan Siembra Petrolera 2005-2030 Apalanca el desarrollo socioeconómico nacional con la finalidad de construir un nuevo modelo de desarrollo económico más justo, equilibrado y sustentable para combatir la pobreza y la exclusión social.

En línea con el Plan Siembra Petrolera, PDVSA cuenta con la iniciativa para el Desarrollo Integral de la Faja Petrolífera del Orinoco

Finalmente, el presente trabajo especial de grado se justifica a nivel estatal ya que profesores y estudiantes de la UNELLEZ recibirán el aprendizaje indispensable en software de diseño y simulación de bombas de cavidad progresivas garantizando la explotación de crudo pesado en la Faja Petrolífera del Orinoco, futuro de nuestro país.

ALCANCES Y LIMITACIONES

ALCANCES

El alcance del presente trabajo especial de grado esta dado a la entrega del algoritmo validado en diseño de BCP, no incluye la validación del programa con datos de campo y sus variables operacionales.

LIMITACIONES

En el presente trabajo especial de grado las limitantes están dadas por varias razones entre ellas se pueden acotar.

El acceso a un software comercial de BCP para los estudiantes de ingeniería de petróleo de la UNELLEZ que puedan manipular como software educativo el cual le dé la asesoría necesaria para el diseño y simulación de bombas de cavidad progresiva.

La disponibilidad de una sala de trabajo en la universidad ya que no se cuenta con las instalaciones necesarias para la manipulación de estos software.

CAPITULO II

MARCO CONTEXTUAL

ÁREA DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se desarrollara en la sala de tesis de grado convenio PDVSA, UNEFA, UNELLEZ. Ubicada en la sede UNELLEZ Barinas.

ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

Diego Monsalve (2012), Título: “Evaluación de los modelos matemáticos utilizados en el diseño de los sistemas de levantamiento artificial de bombeo por cavidades progresivas” Universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenieros Fisicoquímicas.

Crismar Velásquez (2012), Título: “Análisis del comportamiento de producción del sistema de levantamiento artificial bombeo de cavidades progresivas (bcp) de los pozos 1 y 2, mediante el simulador pc-pump, campo Cabimas, Cabimas parroquia Ambrosio Estado Zulia”, cuyo objetivo fue analizar del comportamiento de producción del sistema de levantamiento artificial bombeo de cavidades progresivas (BCP) de los pozos 1 y 2, mediante el simulador PC-PUMP, campo Cabimas, Cabimas parroquia Ambrosio estado Zulia.

Gil María Verónica (2003), Título: “Desarrollo de un Algoritmo numérico para el Diseño y Simulación del Proceso de Producción de Hidrocarburo mediante Sistemas de Bombeo Mecánico, Universidad Central de Venezuela, Caracas-Venezuela

MARCO TEÓRICO

Según Bavaresco (2006) el marco teórico referencial, brinda a la investigación un sistema coordinado y coherente de conceptos y proposiciones que permiten abordar el problema dentro de un ámbito donde éste cobre sentido.

1. Historia.

La Bomba de Cavidades Progresivas (B.C.P.) fue inventada en 1932 por un Ingeniero Aeronáutico Francés llamado René Moineau, quien estableció la empresa llamada PCM POMPES S.A. para la fabricación de la misma. En sus inicios, estas bombas fueron ampliamente utilizadas como bombas de superficie especialmente para el bombeo de mezclas viscosas. Actualmente, el mayor número de bombas de cavidades progresivas instaladas para la extracción de petróleo se encuentran en Canadá.

Las primeras B.C.P. de subsuelo, utilizadas en Canadá fueron instaladas en 1979 en pozos de petróleo con alto contenido de arena y bajas gravedades API (crudos pesados). En la actualidad, se utilizan también en pozos productores de crudos medianos y livianos, especialmente con alto contenido de agua.

En Venezuela, las Bombas de Cavidades Progresivas de subsuelo comenzaron a evaluarse a mediados de los años 80. Los resultados no fueron del todo satisfactorios y esto se debió en gran parte a lo relativamente incipiente de la tecnología en el país y al desconocimiento del alcance y limitaciones del sistema. Hoy en día, se cuenta con instalaciones exitosas en pozos de crudos viscosos; bajos y medianos; y aplicaciones a moderadas profundidades.

Las limitaciones del método continúan siendo la incapacidad de los elastómeros para manejar altas temperaturas, crudos livianos con bajo corte

de agua y alto contenido de aromáticos, medianos a altos volúmenes de gas libre (el gas afecta la bomba de dos maneras, atacándolo directamente y por el calor que se genera al ser sustituido los líquidos por la mezcla gaseosa). De igual manera, desde el punto de vista mecánico las cabillas representan un elemento con una capacidad limitada al esfuerzo combinado al torque y tensión constituyendo algunas veces a ser el equipo que impone la restricción en el diseño del sistema.

Por último, cabe mencionar que estas bombas son muy versátiles excepto en lo referente a su compatibilidad entre modelos y marcas ya que ni los Estatores ni los rotores son intercambiables.

El concepto de las Bombas de Cavidades Progresivas fue desarrollado por René J. Moineau en su tesis basada en “el nuevo capsulismo”, patentando un nuevo concepto para ser aplicado en bombas y dispositivos de transmisión. A fines de los años `20, Rene Moineau desarrolló el concepto para una serie de bombas helicoidales. Una de ellas tomó el nombre con el cual hoy es conocido, Progressing Cavity Pump (PCP). La bomba PCP está constituida por dos piezas longitudinales en forma de hélice, una que gira en contacto permanente dentro de la otra que está fija, formando un engranaje helicoidal.

- ✓ El rotor metálico, es la pieza interna conformada por una sola hélice
- ✓ El estator, la parte externa está constituida por una camisa de acero revestida internamente por un elastómero(goma), moldeado en forma de hélice enfrentadas entre sí, cuyos pasos son el doble del paso de la hélice del rotor.

En 1979, algunos operadores de Canadá, de yacimientos con petróleos viscosos y alto contenido de arena, comenzaron a experimentar con bombas de cavidades progresivas. Muy pronto, las fábricas comenzaron con importantes avances en términos de capacidad, presión de trabajo y tipos de elastómeros. Algunos de los avances logrados y que en la actualidad juegan un papel importante, han extendido su rango de aplicación

que incluyen: - Producción de petróleos pesados y bitúmenes (< 18°API) con cortes de arena hasta un 50 % - Producción de crudos medios(18-30 ° API) con limitaciones en el % de H₂S - Petróleos livianos(>30° API) con limitaciones en aromáticos - Producción de pozos con altos % de agua y altas producciones brutas, asociadas a proyectos avanzados de recuperación secundaria(por inyección de agua) En los últimos años las BCP han experimentado una incremento gradual como un método de extracción artificial común. Sin embargo, las bombas de cavidades progresivas están recién en su infancia si las comparamos con los otros métodos de extracción artificial como las bombas electro sumergible o el bombeo mecánico. Por ejemplo, en la República Argentina, según estadísticas de la Secretaría de Energía (abril de 2008) se encuentran 20,097 pozos activos con sistemas de levantamiento artificial, de las cuales el 13 % pertenece abombas de cavidad progresiva.

2. Aplicaciones del Bombeo por Cavidades Progresivas

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.

Las posibilidades de las bombas de ser utilizadas en pozos de crudos medianos y pesados; de bajas a medianas tasas de producción; instalaciones relativamente profundas; en la producción de crudos arenosos, parafínicos y muy viscosos; pozos verticales, inclinados, altamente desviados y horizontales y pozos con alto contenido de agua, las constituyen en una alternativa técnicamente apropiada para la evaluación del potencial de pozos o como optimización y reducción de costos.

Al sustituir grandes equipos de Bombeo Mecánico, se reduce el

impacto ambiental (ruidos, derrames, entre otros), gastos asociados a consumo energético, optimización (cambios de velocidad de operación), diagnóstico y optimización, adicionalmente, en pozos de crudos viscosos se eliminan los problemas de flotabilidad de cabillas (seno). En el Anexo N° 1, se incluye un trabajo comparativo del método BCP con el convencional (balancín) en cuanto a eficiencia y requerimientos de potencia.

De igual forma, como alternativa a pozos de gas lift, permite liberar capacidad de compresión y gas (sobre todo en pozos con altas producciones de agua) y optimizar la utilización de este último.

En general, el sistema de BCP es una alternativa económica y confiable que resuelve muchos de los problemas presentados por otros métodos de levantamiento artificial y una vez optimizado el sistema, su control y seguimiento es muy sencillo.

3. Generalidades:

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

- Habilidad para producir fluidos altamente viscosos;
- Habilidad para producir con altas concentraciones de arena;
- Habilidad para tolerar altos porcentajes de gas libre (no se bloquea)
- Ausencia de válvulas o partes reciprocantes evitando bloqueo desgaste de las partes móviles;
- Muy buena resistencia a la abrasión;
- Bajos costos de inversión inicial;
- Bajos costos de energía;
- Demanda constante de energía (no hay fluctuaciones en el consumo)

- Simple instalación y operación;
- Bajo mantenimiento;
- Equipos de superficie de pequeñas dimensiones: y
- Bajo nivel de ruido.

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

- Capacidad de desplazamiento real de hasta 2000 Bls/día o 320 m³/día (máximo de 4000 Bls/día o 640 m³/día);
- Capacidad de elevación real de hasta 6000 pies o 1850 metros (máximo de 1050 pies o 3500 metros);
- Resistencia a la temperatura de hasta 280 °F o 138 °C (máxima de 350 °F o 178 °C);
- Alta sensibilidad a los fluidos producidos (los elastómeros pueden hincharse o deteriorarse con el contacto de ciertos fluidos por periodos prolongados de tiempo);
- Opera con bajas capacidades volumétricas cuando se producen cantidades de gas libre considerables evitando una buena lubricación)
- Tendencia del estator a daño considerable cuando la bomba trabaja en seco por períodos de tiempo relativamente cortos;
- Desgaste por contacto entre las varillas de bombeo y la tubería de producción puede tornarse un problema grave en pozos direccionales y horizontales;
- La mayoría de los sistemas requieren la remoción de la tubería de

producción para sustituir la bomba;

- Los sistemas están propensos a altas vibraciones en el caso de operar a altas velocidades requiriendo el uso de anclas de tubería y estabilizadores o centralizadores de varillas de bombeo;
- Poca experiencia en el diseño, instalación y operación del sistema.

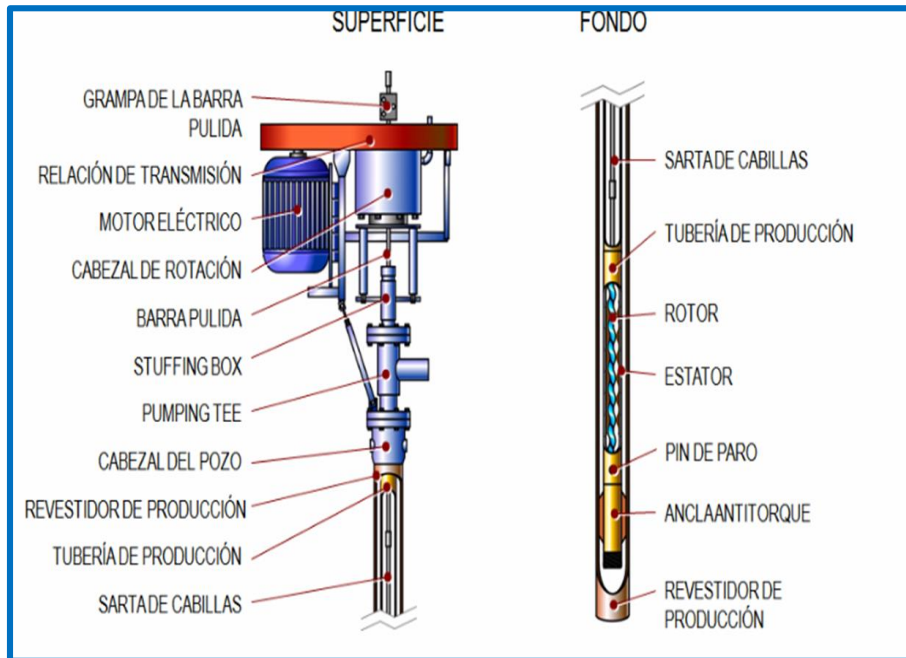
Sin embargo, estas limitaciones están siendo superadas cada día con el desarrollo de nuevos productos y el mejoramiento de los materiales y diseño de los equipos. En su aplicación correcta, los sistemas con bombas de cavidad progresiva proveen el más económico método de levantamiento artificial si se configura y opera apropiadamente. (Ver Figura 1)

4. El Principio de Funcionamiento:

Se basa en que el estator y el rotor no son concéntricos y el movimiento del rotor es combinado, uno rotacional sobre su propio eje y otro rotacional (en dirección opuesta a su propio eje) alrededor el eje del estator. La geometría del conjunto es tal, que forma una serie de cavidades idénticas y separadas entre sí. Cuando el rotor gira en el interior del estator estas cavidades se desplazan axialmente desde el fondo del estator (succión) hasta la descarga, generando de esta manera el bombeo por cavidades progresivas. Debido a que las cavidades están hidráulicamente selladas entre sí, el tipo de bombeo, es de desplazamiento positivo.

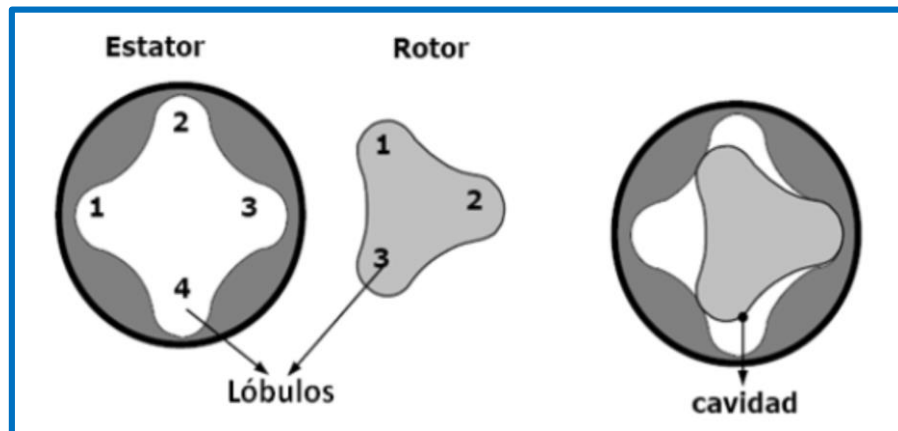
Existen distintas geometrías en bombas BCP, y las mismas están relacionadas directamente con el número de lóbulos del estator y rotor. En las siguientes figuras se puede observar un ejemplo donde podremos definir algunas partes importantes. (Ver Figura 2)

Figura 1: Descripción Gráfica de un Sistema de BCP.



Fuente: petroleobrotherscompany.com.ve

Figura 2: Geometrías de la Bomba.



Fuente: HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas.

Versión 2008 V1

5. Descripción de los Equipos.

5.1. El Estator

Los estatores consisten en tubos de acero con cuerpos de elastómeros pegados internamente. Los elastómeros son internamente torneados como hélices de dos o más lóbulos (depende de la geometría). Para su fabricación, primero se tornea externamente una pieza de metal según la geometría helicoidal deseada, alineándola concéntricamente con el tubo de acero que previamente debe pasar por un proceso de limpieza para aplicarle en su interior una fina capa de adhesivo que permita la unión metal-elastómero.

Para sellar el espacio entre el tubo y el molde se utilizan unos tapones herméticos colocados a ambos extremos del tubo. Posteriormente se procede al vaciado de la mezcla de elastómero a alta presión a través del espacio anular con una temperatura, presión y tasa de inyección controlada, dependientes del tipo de elastómero, de la geometría de la bomba y de la longitud del estator. Con esto se garantiza un vaciado homogéneo. Una vez lleno, el estator pasa a un proceso del vulcanizado para lograr las propiedades finales deseadas para el elastómero.

Finalmente, se extrae el molde interno y se tornean las conexiones según las especificaciones requeridas. Es importante que cada cierta cantidad de estatores fabricados, se tome una muestra de elastómero para verificar que todas sus propiedades mecánicas estén en los rangos permitidos, ya que precisamente el elastómero es el mayor responsable de la calidad del producto final. (Ver Figura 3).

5.2. El Rotor.

El rotor es minuciosamente torneado con acero de alta resistencia obteniéndose externamente una forma helicoidal, ver Fig. 4.

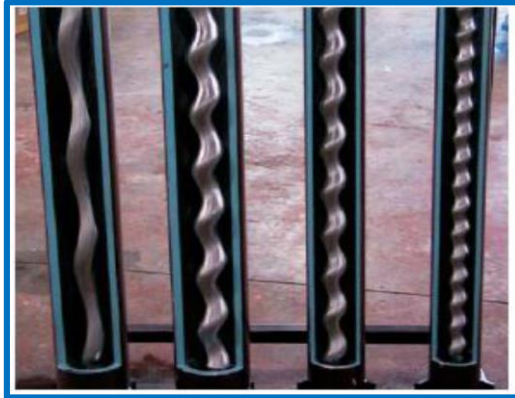
Para resistencia a la abrasión, es recubierto por una fina capa de un material resistente a la abrasión. Aunque materiales como el carburo de tungsteno, carburo de silicio, óxido de titanio y óxido de cromo han sido probados como recubrimiento en el pasado, ninguno de ellos han mostrado tan alta resistencia a la abrasión como el cromo endurecido, siendo éste el material comúnmente usado por los fabricantes de bombas (recientemente, algunos fabricantes han estado evaluando los recubrimientos de boro como solución a aquellas aplicaciones donde la concentración de arena es sumamente alta). (Ver Figura 4)

Figura 3: Corte Longitudinal de un Estator



Fuente: Weatherford

Figura 4: Rotores para Bombas PCP.



Fuente: TDA Supply & Service S.A

5.3. El Elastómero.

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. Aunque no es una pieza de la bomba como tal sino más bien el material con que está hecho uno de los componentes (el estator), su importancia sobre el desempeño de la BCP hace que sea uno de los principales puntos de estudio y desarrollo en este tipo de bomba. Esto se debe a la sensibilidad al ambiente que tienen los materiales elastoméricos.

Según la ASTM, los elastómeros son aquellos materiales que pueden ser deformados hasta dos veces su tamaño original, y luego de retirar la carga, este retornara rápidamente a su tamaño original (Morton 1995, Harper 1992).

Hay muchos tipos de materiales elastómeros, pero los que principalmente se usan en la fabricación de BCP son:

- a. **El Caucho:** Es el elastómero de mayor uso y el más antiguo, sus formulaciones están basadas en isopropeno y/o butadieno. Es el que

mejor combina propiedades mecánica (resistencia mecánica, resistencia a la fatiga, dureza, etc.) con resistencia a ataques químicos. Por ello es el más usado para diversas aplicaciones.

- b. **HNBR “Hydrogenated Nitrile Butadiene Rubber”**: Es resistente al ácido sulfúrico pero no a los aromáticos, posee mayor resistencia a la temperatura que el caucho, pero sus propiedades mecánicas están reducidas a la mitad.
- c. **Fluorocarbono y Perfluorocarbono**: Son elastómeros que resisten ataques térmicos y químicos, pero el proceso de moldeado está restringido a volúmenes pequeños, por lo cual no se usan en la fabricación de estatores muy extensos.
- d. **Clorusulfuro de polietileno**: Son los elastómeros que mejor resisten a la abrasión y al dióxido de carbono, sus propiedades mecánicas son muy parecidas a las del caucho, pero resiste más el agua.

Las condiciones que más afectan a los elastómeros son:

- a. **Disolventes aromáticos**: Los más comunes son el benceno, tolueno y xileno, que por lo general están presentes en crudos livianos. Causan reblandecimiento e hinchamiento del caucho. Por ello en estos casos se usan elastómeros de alto nitrilo, siempre y cuando la temperatura de trabajo no supere los 40 °C y 13 % de aromáticos.
- b. **Ácido Sulfúrico**: Afecta a los elastómeros tornándolos duros y quebradizos. Esto hace que se pierda la capacidad de sello entre las cavidades. Como los aromáticos afectan en forma contraria que el ácido sulfúrico, muchas veces se recurre a inyecciones de disolventes

aromáticos para contrarrestar el efecto del ácido, se necesitan elastómeros bajos en nitrilo.

- c. **Agua:** En presencia de agua todos los elastómeros se hinchan, pero cuando el contenido de nitrilo es menor, el hinchamiento disminuye.
- d. **Temperaturas altas:** En todos los elastómeros el efecto de la temperatura es dramático, ya que disminuye sus propiedades físicas y aumenta la agresividad de los ataques químicos. Por ello no se recomienda el uso de caucho a temperaturas de trabajo mayores de 120 °C y el HBNR hasta 160 °C. Pero aquellos fabricados con *Fluorocarbono-butadieno* tienen un mayor tope de temperatura. Otro problema producto de la temperatura es el cambio de volumen en los elastómeros, a mayor temperatura aumenta el volumen, esto puede hacer que la fuerza de contacto entre el rotor y el estator se excesiva y produzca desgarramiento del material del estator.

Como se ve, los elastómeros limitan mucho el campo de aplicación de una BCP y hace que la selección del elastómero según el fluido de trabajo sea muy importante y un punto crítico en el funcionamiento del equipo. Por ello, muchas veces antes de la selección definitiva del elastómeros, se hacen ensayos de compatibilidad con el fluido de trabajo. Sin embargo cada día se descubren nuevos materiales y nuevos diseños que van mejorando este punto débil de la BCP.

Características Deseables en los Elastómeros.

- Buena resistencia química a los fluidos a transportar.
- Buena resistencia térmica.
- Capacidad de recuperación elástica.

- Adecuadas propiedades mecánicas, especialmente resistencia a la fatiga.

Propiedades Mecánicas Mínimas Requeridas.

- Hinchamiento: del 3 al 7% (máximo).
- Dureza Shore A: 55 a 78 puntos.
- Resistencia Tensil: Mayor a 55 Mpascal.
- Elongación a la ruptura: Mayor al 500%
- Resistencia a la fatiga: Mayor a 55.000 ciclos.
- Resistencia al corte: Mayora 4 Kgrs/mm.

Los cambios más comunes en las propiedades mecánicas de los Elastómeros son: el Hinchamiento, el Endurecimiento y el Reblandecimiento.

- a. *El Hinchamiento* origina una excesiva interferencia y como consecuencia, un torque excesivo en las cabillas y calentamiento (y posible destrucción) del Elastómero. Se debe destacar que un hinchamiento del 3 al 5 % puede ser manejado con rotores de menor diámetro y que algunos fabricantes inclusive garantizan algunos de sus materiales para hinchamientos mayores, no obstante, se debe tener presente que estos elastómeros pudieran ser utilizados siempre y cuando las propiedades mecánicas de los mismos no se vean afectadas más allá de los límites permisibles.
- b. *El Endurecimiento* afecta negativamente a la resiliencia y como consecuencia la eficiencia de la bomba.
- c. *El Reblandecimiento* deteriora la hermeticidad entre las cavidades y por ende la eficiencia de la bomba.

Cada Fabricante posee sus propios desarrollos y por lo general utilizan nomenclaturas propias, no obstante, las bases son Nitrílos, bases Hidrogenadas o Fluorelastómeros. Esta diversidad permite manejar la mayor parte de las condiciones encontradas en los pozos de petróleo y agua.

6. Equipos de subsuelo.

6.1. El Niple de Paro:

Es un tubo de pequeña longitud, el cual se instala bajo el Estator (bombas tubulares) y cuyas funciones principales son:

- Servir de punto tope al rotor cuando se realiza el *Espaciamiento* del mismo.
- Brindar un espacio libre al rotor de manera de permitir la libre elongación de la sarta de cabillas durante la operación del sistema.
- Impedir que el rotor y/o las cabillas lleguen al fondo del pozo en caso de producirse rotura o desconexión de estas últimas.
- Servir de punto de conexión para accesorios tales como Anclas de Gas o Anti-torque, Filtros de Arena, entre otros. (Ver Figura 5)

Figura 5: Niples de Paro.



Fuente: Manual de BCP 2003.

6.2. Niple de Maniobra.

Su utilización es obligatoria. El movimiento excéntrico de la cabeza del rotor junto con el acople de unión a la primera cabilla, describe un círculo de diámetro mayor que su propio diámetro.

El diámetro que permitiría este movimiento es de $D+2E$, donde: “D” es el mayor de los dos diámetros, el de la cabeza del rotor o el diámetro externo del acople. “E” es la excentricidad de la bomba (dato suministrado por el fabricante o distribuidor).

El Niple de maniobra debe contar con un diámetro interno mayor que el resultado obtenido con la expresión $D+2E$. En cuanto a su longitud, la misma deberá ser la suficiente de manera de garantizar que la cabeza del rotor (en condiciones de operación) se encuentre en el interior del dicho Niple. Otra ventaja, es que durante las operaciones (bajada de la completación al pozo) las cuñas, mordazas, llaves de apriete, entre otros; se

colocaran en él, en lugar del cuerpo del estator, evitando así cualquier daño a este último.

6.3. Empacadura.

Es un equipo que se activa mecánica o hidráulicamente y que una vez instalada cierra u obtura completamente el espacio anular entre la tubería de producción y el revestidor. Este equipo se utiliza en completaciones donde la producción se lleve hasta la superficie por el espacio anular. No se recomienda su utilización en pozos con alto contenido de gas libre a nivel de la bomba y cuya completación considere el manejo de los fluidos por la tubería de producción.

6.4. Ancla de Tubería.

Es un dispositivo que fija la tubería de producción al revestidor, limitando el movimiento axial y rotativo de la sarta. A diferencia de una empacadura, no realiza un sello en el espacio anular, permitiendo el libre paso de fluidos a través del anclaje mecánico.

6.5. Ancla de Torque.

Al girar la sarta de cabillas hacia la derecha (vista desde arriba) la fricción entre el rotor y el estator hace que la tubería también tienda a girar hacia la derecha, en el sentido de su desenrosque. Este efecto puede originar la desconexión de la tubería, la utilización de un ancla de torque evita este riesgo. Este equipo se conecta debajo del Niple de paro, se fija al revestidor por medio de cuñas verticales. Al arrancar la bomba el torque generado hace que las cuñas se aferren al revestidor impidiendo el giro del Estator.

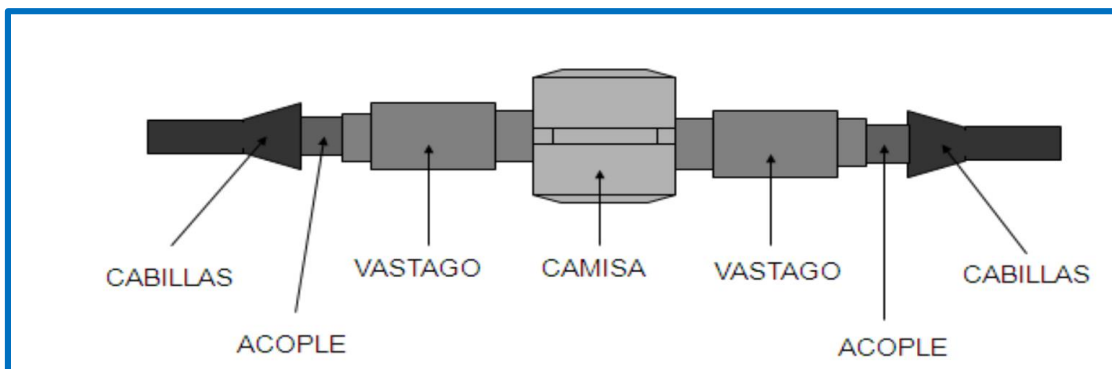
6.6. Anclas de Gas.

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 en su interior. Referirse a los separadores estáticos gas-líquido de fondo de pozo, generalmente la separación gas – líquido ocurre fuera del ancla desviándose el gas al espacio anular entre el revestidor y la tubería de producción y el líquido es enviado a la bomba.

6.7. Centralizadores de Cabillas

Se suelen colocar solo en aquellos pozos con desviaciones o inclinaciones muy profundas. Se utilizan para evitar el roce de estas con las paredes de las tuberías de producción. Actúan como un cojinete y están compuestas de un vástago cuyas roscan en sus extremos son compatibles con las de las cabillas y de una camisa plástica de alta resistencia a la abrasión, a los aromáticos y al H₂S. (Ver Figura 6)

Figura 6: Centralizadores de Cabilla.



Fuente: Weatherdord

Tabla 1: Características de las Cabillas según su Grado API.

Grado API	C	K	D
Especificación del acero según AISI	1536	4621	4142
Composición química (%)			
- Carbono	0.30 – 0.39	0.18 – 0.25	0.38 – 0.45
- Manganeso	1.10 – 1.40	0.60 – 0.80	0.80 – 1.00
- Fósforo	0.04 max.	0.035 max.	0.035 max.
- Sulfuro	0.04 max.	0.035 max.	0.035 max.
- Silicio	0.15 – 0.35	0.15 – 0.35	0.15 – 0.35
- Cromo	Trazas	-	0.80 – 1.0
- Molibdeno	Trazas	0.15 – 0.25	0.15 – 0.25
- Nickel	-	1.65 – 2.00	0.45 max.
Propiedades mecánicas			
- Esfuerzo ultimo a la tensión (Kpsi)	90 - 115	90 - 115	115 - 140
- Esfuerzo min. de fluencia (Kpsi)	60	60	85
- Elongación min. (%)	15	16	10
- Reducción de área min. (%)	45	55	45
Recomendación de uso			
- Carga*	Ligera a mediana	Ligera a mediana	Mediana a pesada
- Profundidad**	Poca a mediana	Poca a mediana	Mediana a profunda
- Corrosión	Poca	Alta	Poca
* Cargas:			
- Ligera: 0 a 25.000 psi			
- Mediana: 25.000 a 35.000 psi			
- Pesada: de 35.000 a 45.000 psi			

Fuente: Ing. NELVIS CHACIN Manual de BCP

Estas cabillas están normalizadas por la API (American Petroleum Engineers) y están diseñadas para soportar las cargas a las que estarán sometidas, tienen una longitud de 25 o 30 pies y el diámetro varía entre ½ y 1 1/2 pulgadas. Las cabillas API se dividen en 3 categorías según el material con que están hecho: Grado “C”; Grado “K”; y Grado “D”. (Ver tabla 1)

6.8. Niple de Drenaje.

Generalmente se utiliza un Niple de drenaje para desalojar el crudo de la tubería de producción en aquellos casos cuando no es posible sacar el rotor de la bomba, por ejemplo, cuando falla la sarta de cabillas y no se puede “pescar” la misma. Es importante no tener crudo en la tubería al momento de sacar la sarta, ya que de otra manera se corre el riesgo de originar derrames de crudo indeseados en la superficie contaminando así el medio ambiente.

La mayoría de los Niple de drenaje se activan aplicando presión interna a la tubería de producción. En el caso de crudo extrapesado, se ha subestimado, en algunos casos, la presión de descarga de la bomba, originando que el sistema de drenaje se active durante la operación, con lo cual es necesario recuperar la tubería.

6.9. Niple “X”.

Con el fin de detectar agujeros o uniones defectuosas en la sarta de tubería, se acostumbra realizar una prueba de presión durante la operación de bajada de la misma. Para realizar esta prueba se puede instalar un Niple de asiento X, sobre el estator de la bomba, en el cual se asienta una válvula fija con pescante, la cual es fácil de recuperar luego de la prueba. Si el pozo presenta problemas de corrosión y la tubería es re-utilizada, es recomendable asentar la válvula en el Niple X e ir probando a medida que se bajan los tubulares, por ejemplo, cada 10 tubos; de esa manera es más fácil detectar y corregir la existencia de algún tubo defectuoso.

7. Equipos de Superficie.

7.1. El Cabezal de Rotación

El cabezal de rotación sirve de soporte para las cargas axiales, como accionamiento electro-mecánico (para algunos modelos), evita o retarda el giro inverso de la sarta de cabillas, aísla los fluidos del pozo del medio ambiente. Las cargas axiales originadas por el peso de la sarta de cabillas sumergida en el fluido del eductor y la producida por el diferencial de presión que levanta la bomba son soportadas a través de rodamientos cónicos ubicados en el cabezal de rotación. Dependiendo del fabricante, pueden encontrarse uno o dos rodamientos actuando en paralelo y distribuyéndose las cargas.

7.2. Motor variadores Mecánicos.

En este sistema el acople entre motor y caja reductora no es directo; en este caso se realiza a través de un conjunto “variador de velocidad” formado por correas y poleas de diámetro variable, el cual cumple con la función de permitir el cambio de velocidad de rotación sin requerir la parada del equipo ni el cambio de componentes.

7.3. Motorreductores.

Generalmente en la práctica el rango de operación de las BCP es de 40 a 350 R.P.M. A los motores eléctricos a una velocidad nominal y fija de aproximadamente 1800 R.P.M. (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 (R.P.M.), 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, y al ofrecer el motorreductor una velocidad constante, es necesario contar con un sistema que permita variar las R.P.M. de la bomba, para realizar esta tarea se utilizan los variadores de frecuencia.

A continuación se presenta a modelo comparativo aplicaciones con Motovariadores (izquierda) y motorreductor (derecha). Estos diseños prevalecen en los pozos instalados con BCP en el occidente del país. (Ver Figura 7)

7.4. Variadores de Frecuencia.

Estos equipos son utilizados en conjunto con los Motorreductores y con los equipos de polea-correa en los cuales la velocidad es constante (a menos que se cambie la caja reductora o la relación de poleas) para brindar la flexibilidad del cambio de velocidad en muy breve tiempo y sin recurrir a modificaciones mecánicas en los equipos.

El Variador de frecuencia rectifica la corriente alterna requerida por el motor y la modula electrónicamente produciendo una señal de salida con frecuencia y voltaje diferente.

Al variar la frecuencia, varía la velocidad de rotación ya que ambas son proporcionales, finalmente al variar la velocidad de operación, varía la producción. La gran ventaja de estos equipos está representada por las funciones que brinda entre ellas se destacan:

- Ajuste de velocidad: Este equipo permite variar la velocidad en un rango más amplio que los demás sistemas y en un tiempo

relativamente muy cortó.

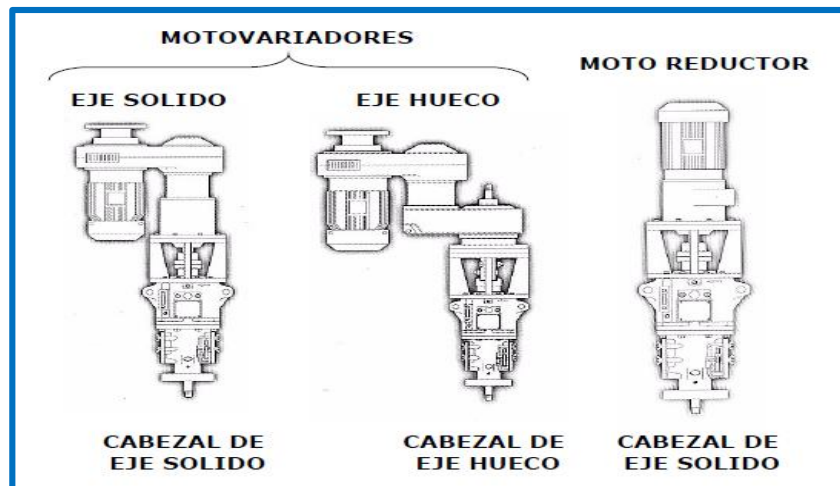
- Ajuste de arranque y parada: Permiten el ajuste de las rampas de arranque y parada reduciendo los picos de corriente y controlando el torque en el sistema.
- Ajuste de torque: Se puede ajustar el torque de arranque para permitir arranque seguro, así mismo pueden mantener el torque a bajas velocidades.
- Entradas / Salidas analógicas y digitales: Estos equipos poseen puertos para señales analógicas y/o digitales de manera de captar alguna variable medida en el pozo o en el cabezal y sobre las cuales se tomar decisiones y acciones a nivel del programa interno del variador de frecuencia o generar una señal de salida.
- Facilita la optimización: La mayoría de las acciones de campo (supervisión y control) se pueden ejecutar de manera remota.
- Se reduce la cantidad de equipos montados sobre el cabezal del pozo.
- Por otra parte, también existen algunas desventajas entre las que se pueden mencionar.
- Fragilidad de los equipos: continúan mejorándose para las exigentes aplicaciones en campo (intemperie, altas temperaturas, humedad, polvo, corrosión, y otros), por lo tanto algunas de las fallas presentadas por los mismos pueden estar asociadas a estos factores ambientales.
- Poca experiencia por parte de los operadores en este tipo de tecnología (esto puede superarse con el adiestramiento adecuado).
- Generación de armónicos que se realimentan en la línea de suministro del fluido eléctrico y que pueden causar daños en los generadores y en las líneas de transmisión.

7.5. Equipos Integrados de Polea y Correa.

Estos equipos son utilizados principalmente en el Oriente del país el fabricante ofrece principalmente cuatro modelos, de equipos de impulsión de poleas y correas para los pozos instalados con BCP, estos son accionados por motores eléctricos, a gas, o por sistemas hidráulicos. Estos cabezales tienen capacidades desde 5,6 hasta 18 Toneladas de carga axial y desde 40 hasta 300 Hp de potencia.

En Venezuela los más utilizados son los cabezales VH-100HP, con el sistema reductor de velocidad es un conjunto de poleas y correas, el eje impulsor es de tipo hueco para permitir el paso de una barra pulida de 1-1/4" o 1-1/2"). El soporte del motor se atornilla a la brida del pozo de manera de transmitir el peso de a la misma, se elimina el esfuerzo de tensión en la "T" de producción y se evita el riesgo de que se desenrosque el cabezal. El eje impulsor hueco está soportado por tres rodamientos de rodillos esféricos de gran capacidad (un rodamiento axial de empuje y dos rodamientos radiales). Todos son de auto alineados y lubricados con aceite. (Ver Figura 8)

Figura 7: Evaluación de los Equipos de Superficie.



Fuente: Manual de BCP 2003.

Figura 8: Equipos Integrados de Correas y Poleas.



Fuente: Ing. NELVIS CHACIN Manual de BCP 2003

8. Clasificación de las Bombas de Cavidades Progresivas.

8.1. Bombas Tubulares:

Este tipo de bombas el estator y el rotor son elementos totalmente independientes el uno del otro. El estator se baja en el pozo conectado a la tubería de producción, debajo de él se conecta el niple de paro, anclas de torque, anclas de gas, etc; y sobre él se instala el niple de maniobra, niples "X", y finalmente la tubería de producción. En cuanto al rotor, este se conecta y se baja al pozo con la sarta de cabillas.

En general esta bomba ofrece mayor capacidad volumétrica, no obstante, para el reemplazo del estator se debe recuperar toda la completación de producción.

8.2. **Bombas tipo Insertable.**

Poco utilizadas en Venezuela, su uso se prevaleció en los pozos de Occidente (Costa Oriental del Lago de Maracaibo). En este tipo de bombas, a pesar de que el estator y el rotor son elementos independientes, ambos son ensamblados de manera de ofrecer un conjunto único el cual se baja en el pozo con la sarta de cabillas hasta conectarse en una zapata o niple de asentamiento instalada previamente en la tubería de producción. Esta bomba tiene el inconveniente de ofrecer bajas tasas de producción (ya que su diámetro está limitado al diámetro interno de la tubería de producción) pero ofrece la versatilidad de que para su remplazo no es necesario recuperar la tubería de producción con el consiguiente ahorro en tiempo, costos y producción diferida.

8.3. **Bombas de Geometría Simple.**

Son aquellas en las cuales el número de lóbulos del rotor es de uno, mientras que el estator es de dos lóbulos (relación 1x2). Son las presentadas en este trabajo

8.4. **Bombas Multilobulares.**

A diferencia de las bombas de geometría simple, las multilobulares ofrecen rotores de 2 o más lóbulos en Estatores de 3 o más (relación 2x3, 3x4, etc.). Estas bombas ofrecen mayores caudales que sus similares de geometría simple.

8.5. **Bombas Multiloculares**

Ofrecen mayores desplazamientos volumétricos lo cual sería una oportunidad para obtener bombas insertables de mayor tasa.

Diversos fabricantes como Kudu, Weatherford, Robbins Myers, Netzsch, ofrecen bombas tipo multilobulares, no obstante para el momento de elaborar este documento, no se cuenta en Venezuela con experiencias exitosas de esta tecnología.

8.6. **Bombas de Alto Caudal.**

Cada fabricante ofrece bombas de alto desplazamiento o alto caudal, el desplazamiento viene dado principalmente por el diámetro de la bomba y la geometría de las cavidades. Hay disponibles comercialmente bombas de 5" modelo 1000TP1700; estas son bombas tipo tubular ("TP") de 1000 m³/día (6300 b/d) @ 500 r.p.m. y 0 head; bombas 22.40-2500 con desplazamientos de hasta 2500 b/d a 500 r.p.m. y 0 head y de 3200 b/d en los modelos CTR.

Se debe recordar que al hablar de desplazamiento se debe considerar el volumen que ocupa el gas en la bomba, así, los 3200 b/d de la última bomba comentada, contemplan petróleo, agua y gas.

8.7. **Bombas de Gran Altura (Head).**

La altura de la bomba es su capacidad para transportar los fluidos desde el fondo del pozo hasta la superficie, lo que se traduce en profundidades de asentamiento de bombas o en diferenciales de presión a vencer.

9. Nomenclatura de las B.C.P. Según los Fabricantes.

En general los fabricantes han desarrollado nomenclaturas que reflejan la capacidad hidráulica de las bombas, presentando por ejemplo el caudal teórico (desplazamiento volumétrico) para 500 (ó 100) R.P.M. y la altura hidráulica (o Head) máximo de operación.

A continuación se presenta la nomenclatura de las bombas de cavidades progresivas de subsuelo para distintos fabricantes. (Ver tabla 2).

Nótese que cada fabricante utiliza su propia nomenclatura, debido a esto, se formó un grupo internacional formado principalmente por fabricantes de BCP quienes trabajaron en la elaboración de las normas ISO WD 15136 que, entre otras cosas, trataron de homologar las especificaciones para las BCP de subsuelo. Algunos fabricantes incluyen en sus catálogos la nomenclatura homologada.

10. Selección de los Equipos (Diseño).

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.

Existe una diversidad de ecuaciones, tablas, nomogramas, 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 ajuste para corregir los resultados obtenidos de las gráficas, no obstante, los mismos arrojan resultados aproximados y en algunas oportunidades dichos factores

no se han desarrollado.

Ejemplo de lo anteriormente expuesto lo representan las curvas de capacidad de las bombas, las cuales fueron diseñadas para fluidos de muy baja viscosidad (agua), consideran fluidos monofásicos (desprecian el gas a manejar por la bomba), los nomogramas para el cálculo de la carga axial en los cabezales no consideran el efecto de los diámetros de las cabillas en la presión ejercida sobre el rotor de la bomba y por ende en la carga axial a soportar por el cabezal, igualmente no se considera geometría del pozo para predecir los puntos de contacto de las cabillas con la tubería de producción.

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 y contar con estadísticas del desempeño de los equipos correctamente diseñados e instalados en el campo; aun así, bajo determinadas condiciones tales como: alta relación gas líquido, crudos muy viscosos, pozos de alto caudal, profundidades considerables de asentamiento de bomba, pozos desviados u horizontales, repercuten en comportamientos complejos desde el punto de vista hidráulico y mecánico, además imposibilitan realizar diversas sensibilidades en tiempos razonables, sobre todo considerando el gran dinamismo de las operaciones petroleras.

Tabla 2: Nomenclatura de las BCP según el Fabricante.

Fabricante	Tipo de Bomba	Ejemplo	Significado
Francés	Geometría Simple	60tp1300	60 = tasa de 60 m ³ /d a 500 rp.m. y 0 head. TP = (bomba tipo tubular) 1300 = altura máxima (Head) en metros de agua.
	Multilobulares	840ML1500	Igual a la anterior, la diferencia está en el tipo de geometría. ML significa "Multi Lobular".
Brasileño	Tubulares	18.40-1500	18 = bomba de 18 etapas o 1800 lpc de diferencial máximo de presión. 35 = diámetro del rotor en milímetros. 1500 = tasa máxima expresada en barriles, a 500 rp.m. y 0 head.
	Insertables	18.35-400IM	Igual a la anterior excepto que esta es una bomba tipo insertable con zapata de anclaje modificada (IM).
Brasileño	CTR Tubular (1)	8-CTR-32	8 = Presión máxima en Mpa. CTR = Bomba de espesor de Elastómero constante. 32 = tasa de 32 m ³ /d a 100 rp.m. y cero head.
	CTR Insertable	8-CTR-32IM	Igual a la anterior excepto que modelo es una bomba CTR tipo insertable con zapata de anclaje modificada (IM).
Norte Americano (USA)	Geometría simple	60N095	60 = 60x10 ² head máximo en pies de agua (6000 pies). 095 = tasa en b/d a 100 rp.m. y 0 head.
Canadá	Geometría simple	40-200	40 = 40x10 ² head máximo en pies de agua (4000 pies). 200 = tasa en b/d a 100 rp.m. y 0 head.

Fuente: Ing. NELVIS CHACIN Manual de BCP 2003.

11. Herramientas Tecnológicas Simuladores

Para solventar lo anteriormente expuesto, se han desarrollado numerosos programas comerciales (software), los cuales incluyen sofisticados y complejos algoritmos de cálculo para predecir comportamientos multifásicos, mecánicos e hidráulicos en el pozo.

12. Programa de diseño de BCP VALHER V2.0

12.1. Estructura General.

La herramienta de simulación VALHER 2.0 se encuentra compuesta por un módulo principal, desde el que se puede acceder a cada uno de los módulos desarrollados a lo largo de la aplicación.

A través de esta se accede por medio de menús desplegables a cada módulo, en la cual el usuario final puede ingresar la data necesaria para hacer la simulación requerida. (Ver Figura 11)

Tabla 3: Estructura General del Programa Valher V 2.0.

Principal	<ul style="list-style-type: none"> - Archivo - Configurar - Ejecutar - Sala de Diseño - Reportes - Ayuda - Salir.
Archivo	<ul style="list-style-type: none"> - Nuevo - Abrir
Configurar	<ul style="list-style-type: none"> - Petróleo (PVT) - Gráficas (PVT) - Afluencia (IPR) - Tubería - Correlaciones de Flujo
Ejecutar	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis Nodal - A N Sensibilidad - Gradiente de Presión
Sala de diseño	<ul style="list-style-type: none"> - Bombeo Mecánico - Bombeo Electrosumergible - Bombeo de Cavidad Progresiva - Bombeo Hidráulico - Levantamiento por Gas - Análisis Nodal
Reportes	<ul style="list-style-type: none"> - Caída de Presión - Propiedades del Fluido
Ayuda	<ul style="list-style-type: none"> - Ayuda - Autor

Fuente: Valdez E.2015.

- a. **Archivo -> Nuevo:** En esta ventana ingresamos el nombre del pozo a ser estudiado. Este genera automáticamente la data completa de un pozo por defecto.

- b. **Archivo -> Abrir:** En esta ventana se ingresa el nombre del pozo previamente creado para ser estudiado.

- c. **Configurar -> Petróleo (PVT):** En esta ventana se ingresan los datos mínimos requeridos para hacer los cálculos relacionados con las propiedades PVT del petróleo gas y agua, allí se puede seleccionar la correlación que mejor se adapte a las condiciones del pozo en estudio. En esta se programan las siguientes correlaciones: Se programan 65 correlaciones numéricas PVT (Sutton, R P para presión y temperatura pseudocríticas de gases naturales, Sarem, Papay, Hall & Yarborough, Brill & Beggs, Dranchuk & Purvis &

Robinson, Dranchuk & Aboukassem y Gopal). Para el cálculo del factor de compresibilidad del gas a través de los ajustes planteados de las curvas de Standing y Katz, Carr & Kobayashi & Burrows y Lee & González & Eakin. Para la viscosidad del Gas, Standing, lasater, Vásquez & Beggs, Glaso, Total, al-Marhoun, Dokla & Osman, Petrosky & Farshad y Kartoatmodjo & Schmidt para la presión de burbuejo. Para Gas disuelto y Factor Volumétrico del petróleo, (Vásquez & Beggs, Petrosky & Farshad, Kartoatmodjo & Schmidt, McCain para la compresibilidad del petróleo, Beal, Beggs & Robinson, Glaso, Egbogah, Kartoatmodjo). Para la viscosidad del petróleo muerto, (Chew&connally, Beggs & Robinson y Kartoatmodjo& Schmidt para petróleo saturado, Beal, Beggs & Robinson y Kartoatmodjo & Schmidt).

- d. **Configurar -> Graficas (PVT):** En esta ventana se obtienen las gráficas de los parámetros Gas en solución, Factor volumétrico, densidad del petróleo y viscosidad del petróleo versus presión.

- e. **Configurar -> Afluencias (IPR):** En esta ventana se tiene acceso a las correlaciones usadas para generar las curvas de afluencias de pozos de gas y petróleo, tanto en pozos verticales como en pozos horizontales. En esta se programaron las siguientes correlaciones: Pozos de completación vertical de petróleo (Darcy, Vogel, Vogel Combinado, Fekovitchs, klins y Majcher, Wiggins y Surkano & Tobing) y estado α IPR`s en pozos de completación horizontal (Joshi, badu y Odeh, Buttler) con datos de reservorios o de pruebas tomadas en campo. Se encuentra en desarrollo tres de pozos verticales de gas (forchheimer, Cullender, Jones blountGlaze y Chase y Alkandari) y para pozos horizontales de gas (akhimionawiggins, Billiter Lee Chase y Chase Steffy).

- f. **Configurar-> Tubería:** En esta ventana se tiene acceso a la configuración mecánica básica del pozo.

- g. **Configurar -> Correlaciones:** En esta ventana se selecciona la correlación de flujo vertical y la correlación de flujo horizontal que mejor se adapte a las condiciones del pozo en estudio. Correlaciones de flujo multifásico en pozos verticales (Poettmann & Carpenter, Baxendell & Thomas, Fancher & Brown, Orkiszewski y Beggs & Brill y Hagedorn Brown).Correlaciones de flujo multifásico en pozos horizontales (Beggs and Brill en desarrollo).

- h. **Ejecutar -> Análisis Nodal:** En esta ventana se ejecuta y se grafican las gráficas de ipr y de vpl del pozo en estudio.

- i. **Ejecutar -> A N Sensibilidades:** En esta ventana se ejecuta y se grafican las gráfica de ipr y simultáneamente varia gráficas de vpl acorde a las sensibilidades seleccionadas.

- j. **Ejecutar -> Gradiente de Presión:** En esta ventana se gráfica la caída presión a lo largo del pozo.

- k. **Sala de Diseño -> Bombeo Mecánico:** En esta se desarrollaron dos secciones, la primera diseño acorde a la práctica recomendada API 11L, y la segunda se desarrolló el análisis acorde a la ecuación de la onda propuesta por Gibbs usando la solución planteada por everitts.

- l. **Sala Diseño -> Bombeo Electrosumergible:** En esta ventana se preseleccionan las bombas electrosumergibles que pueden ser instaladas en el pozo acorde a su configuración mecánica y a la tasa

de producción requerida.

- m. **Sala Diseño -> Bombeo de Cavity Progresiva:** En desarrollo.
- n. **Sala Diseño -> Bombeo Hidráulico:** En desarrollo.
- o. **Sala Diseño -> Levantamiento por Gas:** En desarrollo.
- p. **Reportes -> Análisis Nodal:** Este genera un reporte de las gráficas de análisis nodal en formato pdf para su descarga o impresión.
- q. **Reportes -> Gradiente de Presión:** Este genera un reporte de la gráfica de caída de presión versus profundidad en formato pdf para su descarga o impresión.
- r. **Reportes -> Propiedades del Fluido:** Este genera un reporte de los parámetros de PVT del crudo producido por el pozo.
- s. **Ayuda -> Ayuda:** En esta se aprecia paso a paso el desarrollo de análisis de un pozo por defecto a manera instructiva para que sirva de guía base.
- t. **Ayuda -> Autor:** Información relacionada al autor.
- u. **Salir -> Salir:** En esta al hacer click, nos salimos del pozo en estudio, y queda por defecto un pozo con data genérica.

13. Variables involucradas para el cálculo del algoritmo y Sumario de ecuaciones:

- a. Fuerza hidráulica (Fh): Es la fuerza que transmite la bomba a la sarta de cabilla en su unión producto de la diferencia de presión en el rotor.

$$F_h = \pi \cdot \left(e + \frac{D_R}{2} \right)^2 \cdot \Delta P$$

- b. Potencia hidráulica (Poth): Es la energía transmitida al fluido al desplazarse a través de la diferencia de presión de la bomba.

$$Pot_h = \Delta P \cdot Q_{PT}$$

- c. Torque hidráulico (Th): Es el torque que se transmite como energía al fluido.

$$T_h = C \cdot D \cdot \Delta P$$

- d. Torque por fricción (Tf): Es el torque consumido por la fricción entre el rotor y el estator de la bomba.

$$T_f = 20 \% \text{ DEL } T_h$$

- e. Peso de la sarta (Pcab): Es la fuerza axial producto del peso de la cabilla. Depende del material, del diámetro y del largo de la sarta de cabillas. Se calcula a partir de un factor de peso por unidad de longitud (Wcab) dado por el fabricante de las cabillas.

$$P_{cab} = W_{cab} \cdot L$$

- f. Fuerza de flotación (Ff): Es la fuerza de flotación de la cabilla dentro del fluido producido. La fuerza de flotación de un cuerpo sumergido se calcula como el volumen desplazado de fluido por el peso específico del fluido.

$$F_f = \gamma_f \cdot L \cdot A_{cab}$$

- g. Torque resistivo (Tr): Es la fuerza que ejerce el fluido sobre la cabilla que trata de oponerse al giro de esta, y como se ejerce sobre la superficie de la cabilla en sentido tangencial y contrario al sentido de giro de la cabilla, se transforma en un torque resistivo al giro de la sarta. Para el caso de un eje que gira dentro de una tubería fija lleno

de fluido se calcula como:

$$T_r = \frac{\pi \cdot n \cdot \omega \cdot d_{cab}^2 \cdot d_{tub}^2 \cdot L}{d_{tub}^2 \cdot d_{cab}^2}$$

- h. Fuerza de arrastre (Fa): Es la fuerza el fluido sobre la cabilla que trata de arrastrarlo en su movimiento. La fuerza de arrastre que ejerce un fluido en movimiento sobre un cilindro totalmente sumergido dentro de una tubería se calcula como:

$$F_a = \frac{\pi \cdot d_{cab} \cdot L}{2 \cdot \ln\left(\frac{d_{tub}}{d_{cab}}\right)} \cdot \frac{dP}{dL} \cdot \left(d_{cab} + \frac{d_{cab}^2 - d_{tub}^2}{2 \cdot d_{cab} \cdot \ln\left(\frac{d_{tub}}{d_{cab}}\right)} \right)$$

- i. Fuerza axial máxima (Fz): Es la fuerza total en el sentido axial de la cabilla a la altura del cabezal del pozo.

$$F_z = P_{cab} - F_f - F_a + F_h$$

- j. Torque máximo (Tmax): Es el torque máximo en la cabilla a la altura del cabezal del pozo.

$$T_{max} = T_h + T_r + T_f$$

- k. Esfuerzo normal máximo (Sz): Es el esfuerzo debido a la tensión en la cabilla.

$$S_z = \frac{F_z}{A_{cab}}$$

- l. Esfuerzo cortante máximo (τ_{max}): Es el esfuerzo cortante debido a los torques aplicados en la cabilla.

$$\tau_{max} = \frac{16 \cdot T_{max}}{\pi \cdot d_{cab}^3}$$

- m. Esfuerzo principal máximo según Von Mises.

$$S_1 = \sqrt{S_z^2 + 3 \cdot \tau_{max}^2}$$

- n. Potencia total requerida en el cabezal del pozo (Pot).

$$Pot = T_{max} \cdot \frac{n \cdot \pi}{30}$$

14. Parámetros de desempeño de la BCP

- a. Desplazamiento. (D): Es el volumen teórico desplazado por cada revolución del rotor. Experimentalmente puede ser hallado como el volumen desplazado por la bomba por cada revolución cuando la presión a la succión y a la descarga es igual. Este parámetro solo depende de las dimensiones de sus componentes.
- b. Caudal teórico (Q_{teo}): Es el desplazamiento volumétrico por unidad de tiempo de la bomba y se calcula como el producto del desplazamiento por la velocidad de giro de la bomba.
- c. Capacidad: La capacidad (Q): es el volumen desplazado real por unidad de tiempo que entrega la bomba a las condiciones de operación. La capacidad es igual al caudal teórico menos el escurrimiento.
- d. Escurrimiento(S): Es la cantidad de fluido que se escapa de las cavidades a través de las holguras internas de la bomba por unidad de tiempo y tiene un importante efecto sobre la eficiencia de la BCP. Se calcula como la diferencia algebraica entre el caudal teórico y la capacidad.
- e. Eficiencia volumétrica: Es la relación entre la capacidad real y el caudal teórico de esta. Es un buen indicador del comportamiento de la bomba
Diferencia de presión: La diferencia de presión (DP): es la diferencia algebraica entre la presión de Succión y la presión de descarga de la bomba
- f. Factor de uso (FS): Es la relación entre el diferencial de presión de la

bomba en operación y el diferencial de presión máximo recomendado por el fabricante

- g. Diferencial de presión nominal: Si el factor de uso es mayor o igual que uno indica que se está operando la bomba dentro de lo recomendado por el fabricante y el escurrimiento puede estar dentro de valores aceptables, sin embargo, si el factor de uso es muy alto indica que la bomba está sobredimensionada para ese sistema. Si el factor de uso es menor que uno, indica que la bomba está funcionando para un diferencial de presión para el cual no fue diseñado y el escurrimiento puede alcanzar valores inadmisibles. En estos casos se debería cambiar la bomba por una de más etapas que pueda dar más fácilmente el diferencial de presión requerido por el sistema.
- h. Desplazamiento: Es el volumen teórico desplazado por cada revolución del rotor. Experimentalmente puede ser hallado como el volumen desplazado por la bomba por cada revolución cuando la presión a la succión y a la descarga es igual. Este parámetro solo depende de las dimensiones de sus componentes.
- i. Caudal teórico (Q_{teo}): Es el desplazamiento volumétrico por unidad de tiempo de la bomba y se calcula como el producto del desplazamiento por la velocidad de giro de la bomba:
- j. Capacidad: Es el volumen desplazado real por unidad de tiempo que entrega la bomba a las condiciones de operación. La capacidad es igual al caudal Teórico menos el escurrimiento.

SISTEMA DE VARIABLES

Hernández, (2003), la definen como la “propiedad que tiene una variación que puede medirse u observarse”, (p.144). Para Sabino (1992), son “característica o casualidad de la realidad que es susceptible de asumir diferentes valores”. A demás, se definen las variables:

Variables independientes. Para Igartua y Humanes (2004), son las que el “investigador utiliza para ver en qué medida cambia la variable dependiente”.

Variables dependientes. Igartua y Humanes (2004), la definen como “aquellas que el investigador pretende investigar y explicar”.

SISTEMA DE VARIABLES

Variable independiente. Ecuaciones Fundamentales para el Diseño de Bombeo de Cavidad Progresiva.

Variable dependiente. Algoritmo de Diseño de BCP para el Programa VALHER V 2.0.

MAPA DE VARIABLES.

Tabla 4. Mapa de Variables.

Objetivo General: Validar el módulo de diseño de bombeo de cavidad progresiva (BCP), del programa Valher v 2.0

Objetivos Específicos	Variable	Definición Operacional	Indicadores
Generar el algoritmo de diseño con las ecuaciones fundamentales de bombeo de cavidad progresiva (BCP).	Algoritmo de diseño de BCP	Un algoritmo es un conjunto finito de instrucciones cuyo fin es realizar una tarea; el cual debe también ser preciso y determinístico Significa que el resultado debe depender estrictamente de los datos suministrados, en este caso datos de BCP.	<ul style="list-style-type: none"> • longitud del paso • capacidad de desplazamiento • Tasa de Flujo • Torque de Fricción
Ubicar datos de yacimiento, producción y completación de pozos con BCP en áreas emblemáticas de Occidente, Faja Petrolífera del Orinoco y Oriente.	Base de Datos de pozos con BCP	Dentro de las áreas occidente, faja y oriente se localizaran datos de pozos que sirva como ejemplo para construir una tabla donde se especifique las diferentes propiedades del yacimiento, el cual son fundamentales para un impecable resultados de los datos.	<ul style="list-style-type: none"> • Presión • caudal • profundidades • temperatura • viscosidad
Comparar las principales variables	Diseño de BCP	El diseño está comprendido en el cálculo de todas las variables de diseños de BCP,	<ul style="list-style-type: none"> • Valher • BCPI

de diseño de BCP, del programa Valher V2.0 y BCPI (INTVEP)		para obtener un resultado que va ser usado como indicador de confianza para la herramienta VALHER V2.0.	
--	--	---	--

Fuente: Díaz S. 2016

NORMATIVA Y ASPECTOS LEGALES.

En esta parte se explica los fundamentos legales que sujetan la actual investigación.

La Constitución de la República Bolivariana de Venezuela declara en el artículo 12 la siguiente cita.

Los yacimientos mineros y de hidrocarburos, cualquiera que sea su naturaleza, existentes en el territorio nacional, bajo el lecho del mar territorial, en la zona económica exclusiva y en la plataforma continental, pertenecen a la República, son bienes del dominio público y, por tanto, inalienables e imprescriptibles. Las costas marinas son bienes del dominio público.

La ley Orgánica de Hidrocarburo también hace su afinidad en la sección primera del capítulo II, de las actividades relativas a los hidrocarburos.

Artículo 5: Las actividades reguladas por esta Ley estarán dirigidas a fomentar el desarrollo integral, orgánico y sostenido del país, atendiendo al uso racional del recurso y a la preservación del ambiente. A tal fin se promoverá el fortalecimiento del sector productivo nacional y la transformación en el país de materias primas provenientes de los hidrocarburos, así como la incorporación de tecnologías avanzadas. Los ingresos que en razón de los hidrocarburos reciba la Nación propenderán a financiar la salud, la educación, la formación de fondos de estabilización macroeconómica y a la inversión productiva, de manera que se logre una apropiada vinculación del petróleo con la economía nacional, todo ello en función del bienestar del pueblo.

Plan Siembra Petrolera 2005-2030.

Apalancar el desarrollo socioeconómico nacional con la finalidad de construir un nuevo modelo de desarrollo económico más justo, equilibrado y sustentable para combatir la pobreza y la exclusión social.

En línea con el plan siembra petrolera PDVSA cuenta con la iniciativa para el desarrollo integral de la Faja Petrolífera del Orinoco.

Plan de la Patria 2013-2019,

1.2.5.1. Fortalecer las acciones emprendidas para el control efectivo de las actividades conexas estratégicas de la industria petrolera.

1.2.5.3. Promover y estimular la investigación científica y el desarrollo tecnológico con el propósito de asegurar las operaciones medulares de la industria petrolera.

Arias (2006) explica el marco metodológico como el “Conjunto de pasos, técnicas y procedimientos que se emplean para formular y resolver problemas”. Este método se basa en la formulación de hipótesis las cuales pueden ser confirmadas o descartadas por medios de investigaciones relacionadas al problema.

TIPO DE INVESTIGACIÓN

Conforme a los objetivos que se estiman cumplir en el presente trabajo, la investigación pertenece al tipo descriptivo, según Arias (2004:28), define los estudios tipo descriptivo, como aquellos “que permiten obtener minuciosos datos sobre los fenómenos que se investigan, usando técnicas e instrumentos predeterminados para ofrecer una visión aproximada de la realidad”.

Es descriptiva, debido a que se propone conocer el diseño de una BCP, de acuerdo con los objetivos planteados y de esta manera ampliar y reforzar la herramienta VALHER 2.0. La técnica aplicada en este propósito es el cotejo de programas y software de diseño que tienen los mismos objetivos.

METODOLOGÍA

En cuanto a la metodología a seguir con respecto al trabajo de investigación, de acuerdo a UPEL (2001), establece que la investigación corresponde a la modalidad de proyecto especial como los trabajos que

llevan a creaciones tangibles, susceptibles de ser utilizados como soluciones a problemas demostrados, apoyado a su vez de una investigación tipo documental. Está vinculada al tema en estudio debido a que se requirió la necesidad de crear una tabla de datos que tuviera similitud con los programas y software de diseño con las cuales se hizo la comparación de la herramienta VALHER 2.0. Se generó el algoritmo de diseño disponiendo de las ecuaciones fundamentales de diseño para BCP, se situaron datos de yacimientos, producción, y completación de pozos con BCP, todo esto con el propósito de obtener las principales variables de diseños de BCP, del programa VALHER 2.0 Y El software BCPI (INTEVEP)

POBLACIÓN Y MUESTRA.

“La población se define como la totalidad del fenómeno a estudiar donde las unidades de población posee una característica común, la cual se estudia y da origen a los datos de una investigación”. Tamayo, T (1997, p.114). Es por ello que en la presente investigación, se maneja el término de población corresponde a los tres (3) pozos en estudio, cabe mencionar que el tutor académico fue el facilitador de la población en estudio.

La muestra es la representación de la población. Para efecto de esta investigación, y de acuerdo a lo que plantea Sixto Hernández, en su Estadística Aplicada a la Educación, dice que: “cuando un universo o población está conformada por 30 individuos o menos, este universo es igual a la población”.

Es por ello que cumpliendo con esto se tomó como muestra tres (3) pozos cada uno perteneciente a áreas específicas de Venezuela dando cumplimiento a los objetivos planteados en esta tesis. Para el área de Oriente se tomó como ejemplo el pozo ARE-17, perteneciente al Campo

Arecuna en el estado Anzoátegui, para Occidente el pozo BN735A perteneciente al Campo Boscan en la Costa Oriental del Lago y el pozo CD-38 perteneciente al Campo Cerro Negro ubicado en la Faja Petrolífera del Orinoco.

TÉCNICAS, INSTRUMENTOS Y MATERIALES APLICADOS EN LA RECOLECCIÓN DE DATOS.

De acuerdo con Arias F. (2006) afirma, que las técnicas de recolección de datos “Comprenden procedimientos y actividades que le permiten al investigador obtener la información necesaria para dar respuestas a sus preguntas de investigación” (p. 67).

Debido a que se buscó validar los datos de la herramienta Valher V2.0, mediante al algoritmo propuesto y la herramienta BCPI (INTEVEP) para confirmar si los datos de dicha herramienta son confiables para la selección de bombas BCP, es por ello que la técnica utilizada es de observación directa por lo cual según Tamayo y Tamayo (1997) explica que “la observación directa es aquella en la cual el investigador puede observar y recoger datos mediante su propia observación” (p. 122).

Para la ejecución del algoritmo los instrumentos de recolección de datos son los siguientes:

- Revisión bibliográfica: Libros, manuales y tesis.
- Páginas web: fue de gran ayuda para aclarar dudas durante el desarrollo del tema.

- Software: BCPI (INTEVEP) Y VALHER V2.0, fueron las herramientas de mayor importancia ya que me ayudaron a validar el programa en estudio.
- Entrevistas personalizadas: Reuniones con el tutor industrial y académico para recibir la orientación adecuada para realizar el algoritmo de diseño y las corridas de los programas.

CAPITULO IV

ANALISIS DE LOS RESULTADOS

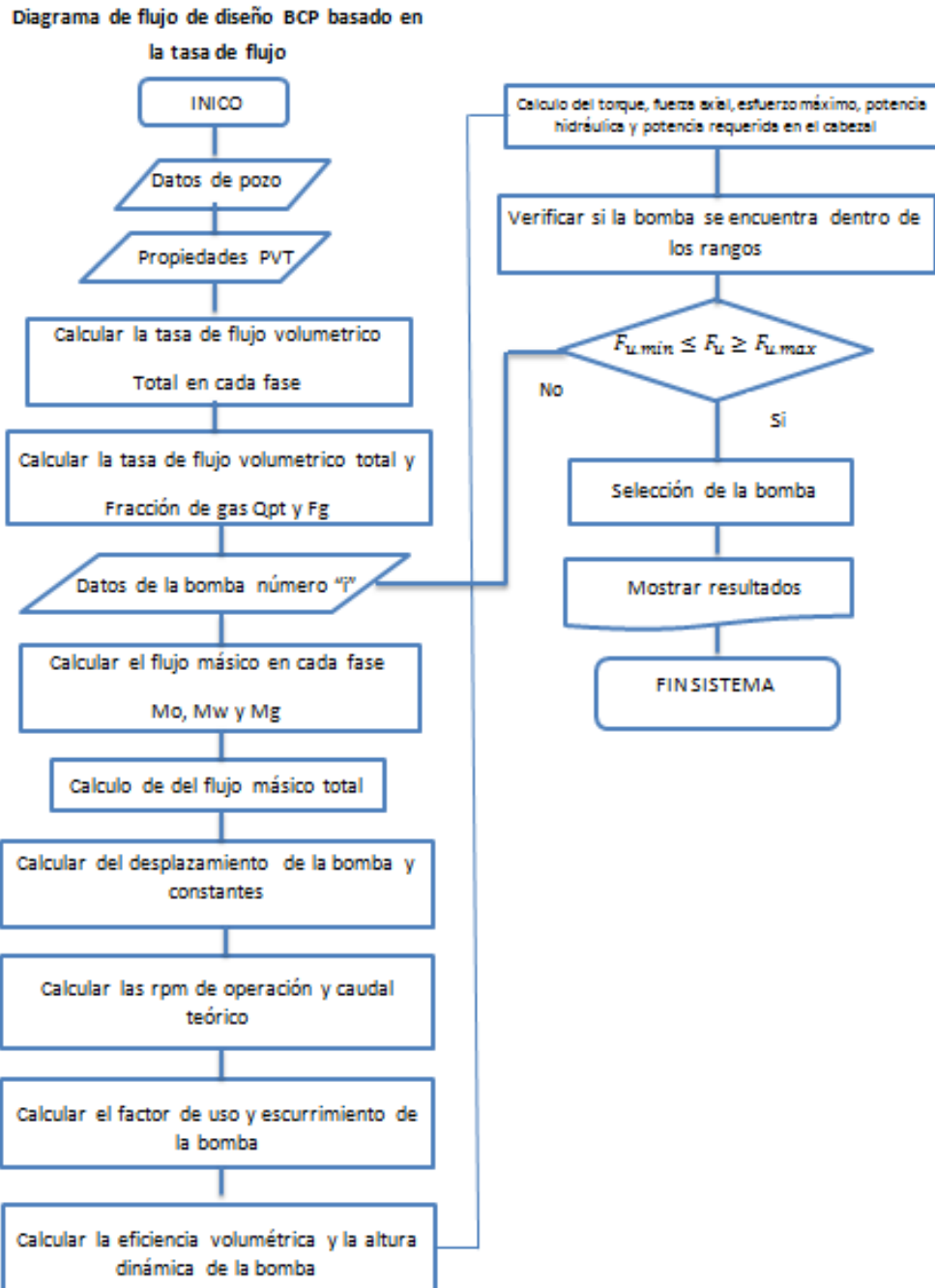
En este capítulo se validan los criterios para alcanzar los objetivos planteados de acuerdo a cuatro secciones:

1. Se plantea el algoritmo de diseño tomando en cuentas las ecuaciones fundamentales para validar el programa.
2. Se presentan una comparación de los datos más importantes de los tres pozos para establecer sus diferencias.
3. Se aplica el algoritmo a los tres modelos de pozos, tomando como caso único para el cálculo tipo el pozo ARE-17 perteneciente al campo ARECUNA en el estado Anzoátegui.
4. Finalmente se realizan las corridas en la herramienta BCPI y VALHER V 2.0 para obtener los resultados que servirán de comparación con el algoritmo y así poder validar la herramienta en estudio.

El módulo de diseño propuesto en el algoritmo se basa en la tasa deseada y se usa para conocer que bombas son adecuadas para el sistema, siendo variable las RPM de operación. Para saber que bombas son adecuadas se simulan todas la BCP disponibles en la base de datos de acuerdo al algoritmo, calculando las RPM requeridas para producir la tasa deseada y otros parámetros de operación, y luego, dependiendo de los siguientes rangos de operación:

- a. Factor de uso $\min \leq$ Factor de uso \geq Factor de uso max
- b. Fracción de gas \leq Fracción de gas max
- c. Diámetro de la tubería MIN < Diámetro de la tubería

Diagrama de flujo de diseño de BCP basado en la tasa deseada



Fuente: Díaz S.

Procedimiento del algoritmo BCP

Se seleccionan que bombas son adecuadas para usarse en el sistema.

Comenzando el algoritmo se realizan los cálculos de las propiedades PVT entre las cuales están B_o , B_g , B_w , R_s , p_o , p_w y p_g ya que se necesitan como dato principal para el cálculo de la tasa de flujo volumétrica en cada fase, y así obtener una tasa de flujo total. Después se calcula la fracción de gas en la entrada de la bomba, de igual manera se calcula el flujo másico en cada fase y el total a través de la bomba. Una vez calculado estos parámetros comenzamos con el desplazamiento de la bomba el cual se utilizara para el cálculo de las RPM de operación y el caudal teórico, asimismo se calculara el diferencial de presión nominal para obtener el valor del factor de uso de la bomba, en cuanto tenga el valor de caudal teórico ya se puede calcular el escurrimiento, para después calcular la eficiencia volumétrica y la altura dinámica de la bomba.

Para este algoritmo también se tomara en cuenta las variables de torque potencia y esfuerzos en la cabilla.

La sarta de cabillas es un componente muy importante en Bombas de Cavidad Progresiva ya que este debe ser apto para sostener la carga axial y transferir el torque necesario a la bomba en el fondo del pozo. Si la carga axial y el torque producen un esfuerzo combinado que excede el límite de fluencia del material de la cabilla ocurrirá una falla en el sistema completo. Es por ello que debe ser tomado en cuenta durante el diseño de un sistema con BCP. Este algoritmo calcula el esfuerzo máximo del material según la teoría del esfuerzo máximo de Von Mises, la potencia requerida en superficie y la potencia hidráulica que da la bomba. Se toma en cuenta el efecto de la viscosidad del fluido que rodea a la cabilla y el efecto en el gradiente de presión debido a los acoples de las cabillas. Sin embargo, se hacen las siguientes suposiciones:

- Se considera la sarta de cabillas como un cuerpo rígido no deformable.
- La sarta de cabillas permanece centrada dentro de la tubería de producción, es decir, no se considera posibles puntos de roce con la tubería de producción.
- Toda la cabilla cuelga verticalmente del cabezal del pozo.
- No se toma en cuenta el peso del rotor de la bomba.
- No se toman en cuenta esfuerzos de origen térmicos.
- El esfuerzo máximo es calculado justo antes del cojinete axial del cabezal del pozo, es decir, no se toman en cuenta el efecto de este cojinete ni del equipo de Superficie.

Tabla 5: Comparación de los Datos más Representativos de Cada Pozo.

	Pozo 1 ARE -17	Pozo 2 BN0735A	Pozo 3 CD_38
Campo	Arecuna Oriente)	Boscan Occidente	Cerro Negro Faja
Tasa de diseño (BFPD)	591	120	800
Velocidad de la bomba (rpm)	179	102	500
Profundidad del pozo TVD (pies)	3838	3400	3300
Gravedad API	9,7	20	8.0
Temperatura Fondo de pozo (°F)	160	160	133
Índice de Productividad BPD/psi	1,27	0,08	2,7

Fuente: Díaz S.

La tabla 4, presenta un resumen de los datos más importantes de los pozos seleccionados. Como se puede observar las tasas de diseño fluctúan entre 100 y 800 BFPD. Estas tasas son típicas para las aplicaciones en los campos venezolanos. En lo que respecta a la velocidad de la BCP se tienen valores de diseño entre 100 y 500 rpm sin embargo es importante destacar que esta última velocidad resulta alta para aplicaciones de campo donde generalmente el valor es inferior a 200 rpm para garantizar un mayor tiempo de vida (“runlife”) de la bomba. Esto se debe a que el índice de productividad es alto en comparación con los otros dos modelos que mantienen sus RPM en un rango aceptable, la gravedad °API se mantiene en un rango de 10-20 lo que demuestra que se está trabajando con crudo pesado y la profundidad TVD está entre los rangos aceptables para bombas BCP menores a 4000 pies. La tabla 5, 7 y 9 presentan en detalle cada uno de los datos de yacimiento, completación y producción de estos pozos.

Ecuaciones fundamentales para el diseño de BCP en base a la tasa deseada.

Cálculo de las propiedades PVT en cada una de las fases en condiciones de presión y temperatura a la entrada de la bomba.

$$R_s = \gamma_g \cdot \left\{ \left[\left(\frac{P(pca)}{18.2} \right) + 1.4 \right] \times 10^{0.0125 \text{ API} - 0.00091 \cdot T(^{\circ}\text{F})} \right\}^{1.2048} \quad PCN / BN \quad (Ecu. 1)$$

$$B_o = 0.9759 + 0.00012 \left\{ R_s \cdot \sqrt{\frac{\gamma_g}{\gamma_o}} + 1.25 \cdot T(^{\circ}\text{F}) \right\} \quad BY$$

/BN (Ecu. 2)

$$Z = \left\{ 1 + \left[\frac{344400 \cdot (Plpca) \cdot 10^{1.785 \cdot \gamma_g}}{T(^{\circ}\text{R})^{3.825}} \right] \right\}^{-1} \quad (Ecu. 3)$$

$$\rho_o = \frac{62.4 \cdot \gamma_o + 0.0764 \cdot \gamma_g \cdot Rs/5.615}{B_o} \quad LBS/PIE \quad (Ecu. 4)$$

Calcular a condiciones de entrada de la bomba la tasa de flujo volumétrica de cada fase.

$$Q_{o_{PT}} = Q_{o_{st}} \cdot B_o \quad BPD \quad (Ecu. 5)$$

$$Q_{w_{PT}} = Q_{w_{st}} \cdot B_w \quad BPD \quad (Ecu. 6)$$

$$Q_{g_{PT}} = (Q_{o_{st}} \cdot (GOR - Rs) - Q_{w_{st}} \cdot R_{sw}) \cdot B_g \cdot (1 - Efic_{sep}) \cdot 0,178108 \quad BPD \quad (Ecu. 7)$$

Calcular a condiciones de entrada de la bomba la tasa de flujo volumétrica total y la fracción de gas.

$$Q_{PT} = Q_{o_{PT}} + Q_{w_{PT}} + Q_{g_{PT}} \quad BPD \quad (Ecu. 8)$$

$$F_g = \frac{Q_{g_{PT}}}{Q_{o_{PT}} + Q_{w_{PT}}} \quad \% \quad (Ecu. 9)$$

Calcular del flujo másico a través de la bomba.

$$M_o = Q_{o_{PT}} \cdot \rho_o \cdot 5,614 \quad LB/D \quad (Ecu. 10)$$

$$M_w = Q_{w_{PT}} \cdot \rho_w \cdot 5,614 \quad LB/D \quad (Ecu. 11)$$

$$M_g = Q_{g_{PT}} \cdot \rho_g \cdot 5,614 \quad LB/D \quad (Ecu. 12)$$

Cálculo del Desplazamiento de la bomba.

$$D = 4 \cdot E \cdot Dr \cdot Paso \cdot 9,057327E - 6 \quad BD/RPM \quad (Ecu. 13)$$

Cálculo de la constante "a" de la curva de la bomba.

$$a = \frac{Q_{max@500rpm} - Q_{min@500rpm}}{(DP_{max@500rpm} \cdot 0,433099)^2} \quad B/D/PSI^2 \quad (Ecu. 14)$$

Cálculo de las RPM de operación de la bomba y el caudal teórico.

$$n = \frac{Q_{PT} + a \cdot DP^2}{D} \quad RPM \quad (Ecu. 15)$$

$$Q_{teo} = D \cdot n \quad \text{BPD (Ecu. 16)}$$

Cálculo del Diferencial de Presión nominal y factor de uso de la bomba.

$$DP_{nom} = \sqrt{\frac{Q_{teo} \cdot 0,2}{a}} \quad \text{PSI (Ecu. 17)}$$

$$FU = \frac{DP_{nom}}{DP} \quad \text{(Ecu. 18)}$$

Cálculo del escurrimiento de la bomba.

$$S = Q_{teo} - Q_{PT} \quad \text{BPD (Ecu. 19)}$$

Cálculo de la eficiencia volumétrica de la bomba.

$$Efic_{vol} = \frac{Q_{PT}}{Q_{teo}} \quad \text{(Ecu. 20)}$$

Cálculo de la altura dinámica de la bomba.

$$H = DP \cdot 2,3089407 \quad \text{PIES DE AGUA (Ecu. 21)}$$

Calcular el peso de la cabilla.

$$P_{cab} = W_{cab} \cdot L \quad \text{LBF (Ecu. 22)}$$

Cálculo del Torque Hidráulico.

$$T_h = C \cdot D \cdot \Delta P \quad \text{LBF - PIE (Ecu. 23)}$$

Cálculo del Torque por Fricción.

$$T_f = 20 \% \text{ DEL } T_h \quad \text{LBF} - \text{PIE} \quad (\text{Ecu. 24})$$

Cálculo del Torque Resistivo.

$$T_r = \frac{\pi \cdot n \cdot \omega \cdot d_{cab}^2 \cdot d_{tub}^2 \cdot L}{d_{tub}^2 \cdot d_{cab}^2} \quad \text{LBF} - \text{PIE} \quad (\text{Ecu. 25})$$

Cálculo del Torque Máximo.

$$T_{max} = T_h + T_r + T_f \quad \text{LBF} - \text{PIE} \quad (\text{Ecu. 26})$$

Cálculo del Esfuerzo Máximo de la Cabilla.

$$S_z = \frac{F_z}{A_{cab}} \quad \text{K} - \text{PSI O KG/CM}^2 (\text{Ecu. 27})$$

Cálculo de la Fuerza Axial Máxima.

$$F_z = P_{cab} - F_f - F_a + F_h \quad \text{LBF} \quad (\text{Ecu. 28})$$

Cálculo de la Potencia Hidráulica.

$$Pot_h = \Delta P \cdot Q_{pt} \quad \text{HP} \quad (\text{Ecu. 29})$$

Cálculo de la Potencia requerida en el Cabezal.

$$Pot = T_{max} \cdot \frac{n \cdot \pi}{30} \quad \text{HP} \quad (\text{Ecu. 30})$$

Fuerza hidráulica (Fh):

$$F_h = \pi \cdot \left(e + \frac{D_R}{2} \right)^2 \cdot \Delta P \quad \text{LBS} \quad (\text{Ecu. 31})$$

Fuerza de flotación (Ff):

$$F_f = \gamma_f \cdot L \cdot A_{cab} \quad \text{LBS} \quad (\text{Ecu. 32})$$

Fuerza de arrastre (F_a):

$$F_a = \frac{\pi \cdot d_{cab} \cdot L}{2 \cdot \ln\left(\frac{d_{tub}}{d_{cab}}\right)} \cdot \frac{dP}{dL} \cdot \left(d_{cab} + \frac{d_{cab}^2 - d_{tub}^2}{2 \cdot d_{cab} \cdot \ln\left(\frac{d_{tub}}{d_{cab}}\right)} \right) \text{ LBS} \quad (Ecu. 33)$$

Como se dijo anteriormente se tomaron tres modelos de pozos cada uno pertenecientes a áreas emblemáticas de Venezuela, tomando como caso único para el cálculo tipo el pozo ARE-17 perteneciente al campo ARECUNA en el estado Anzoátegui. De igual manera se mostrara las tablas de datos de cada pozo.

CASO I

Tabla 6: Pozo ARE-17 Campo Arecuna-Oriente.

Datos De Identificación			
Nombre Del Pozo:		ARE-17	
Campo:		Arecuna- Estado Anzoátegui.	
Datos De Del Pozo			
Litología:		Areniscas	
Angulo De Inclinación (Deg):		90°	
Profundidad De Perforación(Pies):		3838	
Profundidad De Asentamiento (Pies)		3400	
Datos Del Yacimiento			
Presión Estática(Psi)		1198	
Ip (Bpd/Psi):		1.269	
Presión De Burbuja (Psi):		925	
Rgp⊗Pcn/Bn):			
Pwf (Psi):		1198	
Nivel Del Fluido Dinámico. (Pies).		1417	
Viscosidad En El Yacimiento (Cp)		630	
Efic Separación (%):		50	
Corte De Agua (%):		11.7	
Salinidad		-	
Propiedades Del Fluido			
Gravedad Del Crudo °API		9.7	
Temperatura En El Cabezal (°F):		100	
Gravedad Del Gas:		0.67	
Temperatura En Las Perf. (°F):		160	
Control De Agua Y Arena		No Posee.	
Contenido De H ₂ s Y Co ₂		No Posee	
Condiciones De Operación			
Tasa De Fluido (Bpd)		591	
Sumergencia Minina (Pies):		200	
Presión En El Separador (Psi)		50	
Presión En El Cabezal (Psi)		100	
Datos De La Bomba			
Prof De La Bomba (Pies):		3400	
Modelo:		Bmw Tp-350-3200	
Valoración De Presión		-	
Detalles De La Unidad		-	
Diámetro Del Rotor(Mm)		44.306	
Excentricidad. (Mm)		11.077	
Paso Del Estator.(Mm)		196.849	
Datos De Completación			
Longitud En La Línea De Flujo (Pies):		3990	
Diámetro Inter. En La Línea De Flujo(Pulg)		6.065	
Tubería			
Sarta De Tubería:	Tramo: 1	Longitud (Pies) 3400	Diámetro (In) 4 1/2
Sarta De Cabillas	Tramo: 1	Longitud (Pies) 3400	Diámetro (In) 1 1/4
Acople	Normal		
Cabilla Grado:	K		

Fuente: Díaz S. (2017).
Desarrollo del algoritmo parte I.

Diseño en base a la tasa deseada.

1. Calculo de las propiedades PVT en cada una de las fases en condiciones de presión y temperatura a la entrada de la bomba.

$$R_s = 0.67 \cdot \left\{ \left[\left(\frac{793 \text{ lpca}}{18.2} \right) + 1.4 \right] \times 10^{0.0125 \cdot 9.7 \text{ API} - 0.00091 \cdot 153(^{\circ}\text{F})} \right\}^{1.2048}$$

$$R_s = 61.38 \frac{PCN}{BN}$$

$$B_o = 0.9759 + 0.00012 \left\{ 60.38 \frac{PCN}{BN} \cdot \sqrt{\frac{0.67}{1.002}} + 1.25 \cdot 153(^{\circ}\text{F}) \right\} = 1.06 \frac{BY}{BN}$$

$$Z = \left\{ 1 + \left[\frac{344400 \cdot (793 \text{ lpca}) \cdot 10^{1.785 \cdot 0.67}}{613(^{\circ}\text{R})^{3.825}} \right] \right\}^{-1} = 0.914 (ADIM)$$

$$\rho_o = \frac{62.4 \cdot 1.002 + 0.0764 \cdot 0.67 \cdot 61.38 \frac{PCN}{BN} / 5.615}{1.06} = 59.37 \text{ LBS/PC}$$

$$B_g = 0.00503 \cdot 0.914 \cdot 613(^{\circ}\text{R}) / 793(\text{lpca}) = 0.00067 \text{ LBS/PC}$$

$$\rho_g = 2.7 \cdot 0.67 \cdot \frac{793(\text{lpca})}{0.914 \cdot 613(^{\circ}\text{R})} = 2.56 \text{ LBS/PC}$$

2. Calcular a condiciones de entrada de la bomba la tasa de flujo volumétrica de cada fase.

$$Q_{o_{PT}} = 428 \text{ BPD} \cdot 1.06 \text{ BY/BN} = 455 \text{ B/D}$$

$$Q_{w_{PT}} = 58 \text{ BLS} \cdot 1.018 = 58 \text{ B/D}$$

$$Q_{g_{PT}} = \left(428 \text{ BLS} \cdot \left(650 \frac{\text{SCF}}{\text{STB}} - 61.38 \frac{\text{PCN}}{\text{BN}} \right) - 58 \frac{\text{B}}{\text{D}} \cdot 6 \frac{\text{PCN}}{\text{BN}} \right) \cdot 0.00067 \frac{\text{BLS}}{\text{PCN}} \cdot (1 - 0.60) \cdot 0.178108 = 80 \text{ BPD}$$

3. Calcular a condiciones de entrada de la bomba la tasa de flujo volumétrica total y la fracción de gas.

$$Q_{PT} = 455 \text{ BPD} + 58 \text{ BPD} + 80 \text{ BPD} = 593 \text{ BPD}$$

$$F_g = \frac{80 \text{ BPD}}{455 \text{ BPD} + 58 \text{ BPD}} = 15.54 \text{ (\%)}$$

4. Calcular del flujo másico a través de la bomba.

$$M_o = 455 \text{ BPD} \cdot 59.37 \cdot 5,614 = 1.52 \cdot 10^5 \text{ LBS/D}$$

$$M_w = 58 \text{ BPD} \cdot 61.6 \cdot 5,614 = 2.00 \cdot 10^4 \text{ LBS/D}$$

$$M_g = 80 \text{ BPD} \cdot 2.56 \frac{\text{LBS}}{\text{PC}} \cdot 5,614 = 1.15 \cdot 10^3 \text{ LBS/D}$$

$$M = 1.52 \cdot 10^5 \text{ LBS/D} + 2.00 \cdot 10^4 \text{ LBS/D} + 1.15 \cdot 10^3 \text{ LBS/D}$$

$$M = 1.73 \cdot 10^5 \text{ LBS/D}$$

5. Cálculo del Desplazamiento de la bomba.

$$D = 4 \cdot 11.077 \text{ mm} \cdot 44.306 \text{ mm} \cdot 196.849 \cdot 9,057327 \cdot E - 6$$

6. Cálculo de la constante “a” de la curva de la bomba.

$$a = \frac{1750 \text{ BD}_{@500\text{rpm}} - 1400 \text{ BD}_{@500\text{rpm}}}{(3200 \text{ PIES DE AGUA}_{@500\text{rpm}} \cdot 0,433099)^2} = 1,822 \cdot 10^{-4} \text{ B/D/PSI}^2$$

7. Cálculo de las RPM de operación de la bomba y el caudal teórico.

$$\eta = \frac{593 + 1,822 \cdot 10^{-4} \text{ B/D/psi}^2 \cdot 451^2}{3,50 \text{ B/D/RPM}} = 180 \text{ RPM}$$

$$Q_{teo} = 3,50 \frac{\text{BPD}}{\text{RPM}} \cdot 180 \text{ RPM} = 630 \text{ BPD}$$

8. Cálculo del DP nominal y factor de uso de la bomba.

$$DP_{nom} = \sqrt{\frac{630 \cdot 0,2}{1,822 \cdot 10^{-4} \text{ B/D/psi}^2}} = 831 \text{ PSI}$$

$$FU = \frac{831 \text{ PSI}}{451 \text{ PSI}} = 1,84$$

9. Cálculo del escurrimiento de la bomba.

$$S = 630 \text{ BPD} - 593 \text{ BPD} = 37,06 \text{ BPD}$$

10. Cálculo de la eficiencia volumétrica de la bomba.

$$Efic_{vol} = \frac{593 \text{ BPD}}{630 \text{ BPD}} = 94,11 \%$$

11. Cálculo de la altura dinámica de la bomba.

$$H = 451 \text{ PSI} \cdot 2,3089407 = 1041 \text{ pies de agua}$$

12. Cálculo del peso de la sarta.

$$P_{cab} = 3.676LBF - PIE \cdot 3400 PIES = 12498.4 LBF$$

13. Cálculo del Torque Hidráulico.

$$T_h = 0.0894 \cdot 3.50 \frac{BPD}{RPM} \cdot 451 PSI = 141LBF - PIE$$

14. Cálculo del Torque por Fricción.

$$T_f = 20 \% \text{ del } T_h = 28.2 LBF - PIE$$

15. Cálculo del Torque Resistivo.

$$T_r = \frac{\pi \cdot 180 RPM \cdot 3.676 LBF - PIE \cdot 0.104^2 PIES \cdot 0.329^2 PIES \cdot 3400 PIES}{0.329^2 PIES \cdot 0.104^2 PIES}$$
$$T_r = 1419 LBF - PIE$$

16. Cálculo del Torque Máximo.

$$T_{max} = 141 LBF - PIE + 28.2 LBF - PIE + 1419 LBF - PIE$$

$$T_{max} = 1588 LBF - PIE$$

17. Cálculo del Esfuerzo Máximo de la Cabilla.

$$S_z = \frac{12317 LBF}{8.52 \cdot 10^{-3} PIES^2} = 1445657.27 LBF/PIES^2$$
$$S_z = 1445226.52 \frac{LBF}{PIES^2} * \frac{1}{144} = 100369Psi$$

18. Cálculo de la Fuerza Axial Máxima.

$$F_z = 12498.4 \text{ LBF} - 1720 \text{ LBF} - (-1466 \text{ LBF}) + 72.97 \text{ LBF} = 12317 \text{ LBF}$$

19. Cálculo de la Potencia Hidráulica.

$$Pot_h = 451 \text{ PSI} \cdot 593 \text{ BPD} \cdot (9.36 \cdot 10^{-3}) = 2501 \text{ LBF} - \text{PIE/SEG}$$

$$Pot_h = \frac{2501 \text{ LBF} - \text{PIE/SEG}}{550} = 3.54 \text{ HP}$$

20. Cálculo de la Potencia requerida en el Cabezal.

$$Pot = 1588 \text{ LBF} - \text{PIE} \cdot \frac{180 \text{ RPM} \cdot \pi}{30} = 29993 \text{ LBF} - \text{PIE}$$

$$Pot = 29993 / 550 = 54.39 \text{ HP}$$

CASO II

Tabla 7: Pozo BN0735A, Campo Boscan-Occidente

Datos De Identificación			
Nombre Del Pozo:		BN-0735A	
Campo:		Col. Campo Boscan.	
Datos De Del Pozo			
Litología:		Arenas Boscan Superior	
Angulo De Inclinación (Deg):		90°	
Profundidad De Perforación (Ft):		3400	
Profundidad De Asentamiento (Ft)		3200	
Datos Del Yacimiento			
Presión Estática (Psi)		1600	
Ip (Bpd/Psi):		0.369	
Presión De Burbuja (Psi):		40	
Rgp:		50	
Pwf (Psi):		61	
Nivel Del Fluido Dinámico:		3000	
Viscosidad En El Yacimiento (Cp)		150	
Efic Separación (%):		60	
Corte De Agua (%):		20	
Salinidad		-	
Propiedades Del Fluido			
Gravedad Del Crudo °API		20	
Temperatura En El Cabezal (°F):		100	
Gravedad Del Gas:		0.70	
Temperatura En Las Perf. (°F):		160	
Control De Agua Y Arena		No Posee.	
Contenido De H ₂ S Y Co ₂		No Posee	
Condiciones De Operación			
Tasa De Fluido (Bpd)		120	
Sumergencia Minina (Pies):		600	
Presión En El Separador (Psi)		100	
Presión En El Cabezal (Psi)		100	
Datos De La Bomba			
Prof De La Bomba (Pies):		3180	
Modelo:		Kudu 120 Tp 2000	
Valoración De Presión		-	
Detalles De La Unidad		-	
Datos De Completación			
Longitud En La Línea De Flujo (Pies):			
Diámetro Inter. En La Línea De Flujo			
Tubería			
Sarta De Tubería:	Tramo: 1	Longitud (Pies) 3200	Diámetro (In) 2 3/8
Sarta De Cabillas	Tramo: 1	Longitud (Pies) 3200	Diámetro (In) 5/8
Acople	Normal		
Cabilla Grado:	D		

Fuente: Díaz S. (2017).

CASO III

Tabla 8: Pozo CD-38, Campo Cerro Negro-Faja Petrolífera del Orinoco.

Datos De Identificación			
Nombre Del Pozo:		CD-38	
Campo:		Cerro Negro.- Faja Del Orinoco	
Datos De Del Pozo			
Litología:		Arenas No Consolidadas Con Lutitas Intercaladas	
Angulo De Inclinación (Deg):		90°	
Profundidad De Perforación(Ft):		3300	
Profundidad De Asentamiento (Ft)		300	
Datos Del Yacimiento			
Presión Estática(Psi)		1126	
Ip (Bpd/Psi):		2.7	
Presión De Burbuja (Psi):		780	
Rgp:		300	
Pwf (Psi):			
Nivel Del Fluido Dinámico:			
Viscosidad En El Yacimiento (Cp)		5000	
Efic Separación (%):		60	
Corte De Agua (%):		5	
Salinidad		-	
Propiedades Del Fluido			
Gravedad Del Crudo °API		8	
Temperatura En El Cabezal (°F):		100	
Gravedad Del Gas:		0.71	
Temperatura En Las Perf. (°F):		133	
Control De Agua Y Arena		No Posee.	
Contenido De H ₂ S Y Co ₂		No Posee	
Condiciones De Operación			
Tasa De Fluido (Bpd)		1200	
Sumergencia Minina (Pies):		600	
Presión En El Separador (Psi)		100	
Presión En El Cabezal (Psi)		120	
Datos De La Bomba			
Prof De La Bomba (Pies):		300	
Modelo:		-	
Valoración De Presión		-	
Detalles De La Unidad			
Datos De Completación			
Longitud En La Línea De Flujo (Pies):			
Diámetro Inter. En La Línea De Flujo			
Tubería			
Sarta De Tubería:	Tramo: 1	Longitud (Pies) 3200	Diámetro (In) 5 1/2
Sarta De Cabillas	Tramo: 1	Longitud (Pies) 3200	Diámetro (In) 1 1/4
Acople	Normal		
Cabilla Grado:	D		

Fuente: Díaz S. (2017).

Análisis comparativo del algoritmo y los programas de diseño de BCP.

Tabla 9: Pozo ARE 17 comparación de los programas de diseño

Parámetros	Calculo Tipo	VALHER.V. 2.0	BCPIINTEVEP	% Error
Bomba BCP	350-3200	350-3200	350-3200	
Qo teórico(BPD)	630	632	595	6.21
Rpm de operación(rpm)	180	179,54	180	0.55
Factor de uso (adim)	1.95	1.87	7.34	74.5
Eficiencia Volumétrica (%)	94.71	94,26	94,52	0.27
Escurrecimiento(BPD)	37	36	35	2.85
Presión de succión, psi	793	729	771	5.44
Presión de descarga, psi	1219	1089	1207	9.77
Potencia Hidráulica(HP)	4.55	6.52	4.67	39.61
Esfuerzo máximo (psi)	10.036	-----	14.790	-----

Fuente: Díaz S. (2017).

Para los cálculos en el algoritmo y los programas se usó la bomba BMW-350-3200, se observó que para el caudal teórico arrojó un porcentaje de error absoluto de 6.25 el cual es aceptable, para los rpm se muestra más estrecho el margen de error siendo 0.55% el cual quiere decir que en los tres

caso la velocidad de operación en la bomba es casi la misma en el caso de la eficiencia volumétrica, el escurrimiento, la presión de succión, la presión de descarga y el esfuerzo máximo también se puede decir que hubo similitud en los resultado. A Excepción del factor de uso y la potencia hidráulica quienes mostraron comportamientos diferentes. Esto se puede deber a que el diferencial de presión requerido para el cálculo del factor de uso es un valor relativo.

Pozo CD-38 comparación de los programas de diseño

Tabla 10: Comparación de los programas de diseño

Parámetros	Valher.V.2.0	Bcpi INTEVEP	% Error
Bomba BCP	340-5000MXLP	340-5000MXLP	
Qo teórico (BPD)	1698	1695	0.15
Rpm de operación(rpm)	499	499.	0.0
Factor de uso(adim)	10.64	24.52	56.60
Eficiencia Volumétrica (%)	99.82	99.82	0
Escurrimiento(BPD)	3	3	0
Presión de succión, psi	498	533	6.56
Presión de descarga, psi	703	739	4.87
Potencia Hidráulica(HP)	5.33	5.88	9.35
Fuerza Axial (lbf)	-1765	1881	6.16
Esfuerzo máximo (psi)	-----	259362	-----

Fuente: Díaz S. (2017).

Para el pozo CD-38, se usó la bomba Rotalift 340-5000 MXL, la cual presento un promedio de error el caudal de 0 15 % el cual es muy satisfactorio, una velocidad de operación en la bomba sin margen de error, sin embargo el error, para el caso de potencia hidráulica se puede observar que fue reducido en comparación con el pozo anterior. Para los otros parámetros también se maneja un margen de error reducido en comparación

con el factor de uso que sigue siendo muy diferente, se puede notar que la fuerza axial también se muestra desigual esto se debe a que no se contaba con algunos datos de la bomba y del pozo por lo que se tuvieron que asumir.

Pozo BN0735A .Comparación de los programas de diseño.

Tabla 11: Comparación de los programas de diseño

Parámetros	Valher.V.2.0	Bcpi INTEVEP	% Error
Bomba BCP	120TP2000	120TP2000	
Qo teórico (BPD)	161	152	5.92
Rpm de operación(rpm)	102	102.6	0.58
Factor de uso (adim)	1.88	17.96	89.53
Eficiencia Volumétrica (%)	94.37	98.35	4.04
Escurrecimiento(BPD)	9.05	2.56	253
Presión de succión, psi	-324	108	400
Presión de descarga, psi	956	475	101
Potencia Hidráulica(HP)	0.83	0.97	14.43
Fuerza Axial (lbf)	- 2374	4380	154
Esfuerzo máximo (psi)	---	25.80	-----

Fuente: Díaz S. (2017).

En el pozo BN0735A, se usó la bomba EMIP/KUDU120 TP 2000, la cual emitió un caudal teórico y una velocidad de operación muy similar la potencia hidráulica y la eficiencia volumétrica también tuvieron comportamientos muy similares, pero en el caso del factor de uso, el escurrecimiento, la presión de succión, la presión de descarga y la fuerza axial los resultados tuvieron una diferencia a gran escala, al igual que en el caso anterior esto se debe a que no se cuenta con la data completa del pozo y la bomba y al asumir los datos se incrementa el margen de error.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Dando cumplimiento a los objetivos planteados en este TEG se generó el algoritmo de diseño de bombeo de cavidad progresiva tomando en cuenta las ecuaciones fundamentales Para los cálculos en base a la tasa deseada.

Se ubicaron datos de yacimientos, producción y completación de pozos de BCP en distintas regiones del país. Para el área de Oriente se tomó como ejemplo el pozo ARE-17, perteneciente al Campo Arecuna en el estado Anzoátegui, para Occidente el pozo BN0735A perteneciente al Campo Boscan en la Costa Oriental del Lago y el pozo CD-38 perteneciente al Campo Cerro Negro ubicado en la Faja Petrolífera del Orinoco. De la cual el caso tipo fue el pozo ARE-17 perteneciente al campo Arecuna,

Se planteó el algoritmo en base a la tasa deseada, y se verificaron todas las ecuaciones hidráulicas y mecánicas en cuanto a los sistemas de unidades. Cabe destacar que los tres pozos fueron sometidos a cálculos de propiedades PVT, cálculos Hidráulicos y Mecánicos

Se hizo la comparación de las principales variables con el programa VALHER V2.0 y BCPI, de las cuales se encontró similitud entre ambos programas, a excepción de algunos parámetros, tal es el caso del pozo ARE-17, el cual muestra una gran diferencia en los resultados del factor de uso y la potencia hidráulica, esto se debe a que el valor asumido para el diferencial de presión requerido por la bomba es un valor relativo. En el caso del pozo bn0735a y cd-38, se mostró analogía en la mayoría de los parámetros si embargo su diversidad se encuentra en el factor de uso, fuerza axial y escurrimiento, esto se debe a que no se cuenta con una data completa del

pozo y la bomba y en algunos casos se asume o se omite el valor dando como resultado valores erróneos en la corrida.

RECOMENDACIONES

Iniciar las búsquedas de bases de datos de bombas BCP con el fabricante a fin de disponer de los parámetros geométricos fundamentales tales como excentricidad, paso del estator y diámetro del rotor.

Iniciar un estudio que se encargue de la definición de calor específico del agua gas y petróleo.

Elaborar un programa en nuestra universidad (UNELLEZ) a partir de este algoritmo para contar con un software educativo propio.

Culminar el diseño de Bombas de Cavidades Progresivas basado en revoluciones por minuto (RPM).

Investigar sobre la variable Factor de Uso ya que afecta el desempeño del diseño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, F. (2006). El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica (5ª edición). Caracas: Episteme
- Gonzales D. y Hernández R. (2013). Instructivo para realizar informe de pasantía y trabajo especial de grado (TEG) del sub-proyecto prácticas profesionales de la carrera de ingeniería de petróleo, UNELLEZ, Barinas.
- Ing. Nelvy Chacín. (2003) Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnóstico, Análisis de Fallay Trouble Shooting
- Marcelo Hirschfeldt (2008). Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas Por Marcelo Hirschfeldt. OilProduction.
- Msc. Ricardo Maggiolo. (2008) Optimización de la producción mediante Análisis Nodal. (ESP OIL internacional training group)
- Carios Garcias (1998) Análisis Estadístico para Bombas de Cavidad Progresivas instaladas en el distrito San Tome. INTEVEP.
- Pardey Pocaterra. (1997) Metodología de Selección de Elastómeros para estatores BCP. INTEVEP.
- ING. Wladimiro Kovalchuk (2010). Optimización de Sistemas de Producción. (MannyRon Consultores, C.A).
- C-FER TECHNOLOGIES. (1999 PC-PUMP. An interactive design-evaluation tool for progressing cavity pumping system version 2.55.

Emil j. Burcik. (1979) Properties of Petroleum Reservoir Fluids.

Universidad Pedagógica Experimental Libertador (UPEL) (2006). Manual de trabajo de grado de Especialización, Maestría y Tesis, fondo editorial de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador.

Programa de la Patria. (2013- 2019). Gaceta oficial N° 6.118. Extraordinario, Diciembre, 04, 2013.

Ley de Hidrocarburos. Gaceta Oficial N° 37.323. Caracas, Venezuela.

Constitución de la República Bolivariana de Venezuela. (1999). Gaceta oficial N° 36.860.

Emilio Mariño Maraven (1990): principio de bombeo mecánico- especificaciones de la tubería de producción

Sara Sánchez (1999): Producción de Hidrocarburos-Propiedades PVT.

Tabla 12: Nomenclatura.

Tabla de Nomenclatura		
Abreviatura	Significado	Unidad
Acab	Área de la Cabilla	PIE ²
°API	Gravedad API	°API
Bg	Factor Volumétrico del Gas	BN/PCN
Bw	Factor Volumétrico del Agua	BY/BN
Bo	Factor Volumétrico del Petróleo	BY/BN
D	Desplazamiento de la Bomba	BPD/RPM
Dcab	Diámetro de la Cabilla	PIE
DPmax	Diferencial de Presión máxima	PSI
DPnom	Diferencial de Presión Nominal	PSI
DPreq	Diferencial de Presión Requerida	PSI
Dr	Diámetro del Rotor	mm
Dt	Diferencial de Temperatura	°F
Dtub	Diámetro de la Tubería	PIE
E	Excentricidad	mm
Efic vol	Eficiencia del Volumen de la Bomba	%
Fa	Fuerza de Arrastre	LBF
Ff	Fuerza de Flotación	LBF
Fmax	Fuerza Axial Máxima	LBF
Fg	Fracción de Gas	%
Fu	Factor de Uso	adim
Fh	Fuerza Hidráulica	LBS
H	Altura Dinámica de la Bomba	PIE
IP	Índice de Productividad	BPD/PSI
L	Longitud	PIE
M	Flujo Másico Total	LBS/DIA
Mg	Flujo Másico del Gas	LBS/DIA
Mw	Flujo Másico del Agua	LBS/DIA
Mo	Flujo Másico del Petróleo	LBS/DIA
n	Revoluciones por minuto de Operación	RPM
Paso	Paso del Estator	mm
Pb	Presión de Burbuja	PSIA
Ph	Potencia Hidráulica	Hp
Pot	Potencia requerida en el Cabezal	Hp
Qgpt	Tasa de Flujo Volumétrico del Gas	BPD
Qmax	Caudal Máximo	BPD
Qmin	Caudal Mínimo	BPD
Qopt	Tasa del Flujo Volumétrica del Petróleo	BPD
Qpt	Tasa del Flujo Volumétrica Total	BPD
Qwpt	Tasa del Flujo Volumétrica del Agua	BPD
Qteo	Caudal Teórico	BPD
Rs	Solubilidad del Gas	PCN/BN

Rsw	Solubilidad del agua	PCN/BN
RGP	Relación Gas Petróleo	PCN/BN
S	Escurrimiento de la Bomba	BPD
Smax	Esfuerzo Máximo de la Cabilla	KPSI
Tfric	Torque por Fricción	LBF/PIES
Th	Torque por Fricción	LBF/PIES
Tmax	Torque Máximo	LBF/PIES
Tr	Torque Resistivo	LBF/PIES
Ttotal	Torque Total	LBF/PIES

Fuente: Díaz S. (2017).

ANEXOS:

Anexo 1: Corrida BCPI Pozo ARE-17.

```
"DATOS:"
" POZO: ", "ARE-17C1", "FECHA: ", "03-06-2017"
" IP (bpd/psi): ", 1.269000053405762, "IP (mcpd/bar): ", 2.893320121765136
" PROF PERFORA (ft): ", 3838, "PROF PERFORA (mts): ", 1170.121951219512
" ANG INCLINACION (°): ", 0
" CORTE DE AGUA (‰): ", 11.69999986886978
" R G P (scf/b): ", 650
" EFIC SEPARACION (‰): ", 50
" VISCOSIDAD CABEZAL (cp): ", 2000
" VISCOSIDAD YACIMIENTO (cp): ", 630
" GRAVE CRUDO (°API): ", 9.699999809265137
" GRAVE GAS : ", .6700000166893005
" PROF BOMBA (pies): ", 3400
" PRESION ESTATICA (psi): ", 1198
" P DE BURBUJEO (psi): ", 925
" P DE SEPARADOR (psi): ", 50
" P DE DESCARGA (psi): ", 100
" T DE CABEZAL (°F): ", 100
" T EN LAS PERF (°F): ", 160
" SUMERG MINIMA (pies): ", 200
" P ANULAR CABZ (psi): ", 0
" BOMBA: ", "BMW", "350-3200"
"***** SARTA DE TUBERIA *****"
"TRAMO N°", 1, "LONGITUD (pies): ", 3400, "DIAMETRO (in): ", "4-1/2"
"EL FLUJO DE CRUDO ES POR: ", "LA TUBERIA DE PRODUCCION"
"***** SARTA DE CABILLAS *****"
"TRAMO N°##", 1, "LONGITUD (pies): ", 3400, "DIAMETRO (plg): ", "1 1/4"
", ACOPLA: ", " (NORMAL)"
"CABILLAS GRADO: ", "K"
"=====
"RESULTADOS:"
" T EN LA BOMBA (°F): ", 153.1526794433594
" NIVEL DINAMICO (pies): ", 1467.047729492188
" SUMERGENCIA (pies): ", 1932.952270507812
" DP fricc eductor (psi): ", 183.4449462890625
" DP fricci en linea (psi): ", 24.81462860107422
" Q(petról)EN SUPERFI (bnpd): ", 363.7608642578125
" Q(liq) SUPERFICIE (bnpd): ", 411.9602011086329
" Q(liq + gas)EN BOMBA (bpd): ", 595.7557983398438
" Q de AGUA EN SUPERF (bpd): ", 48.19934463500977
" Q DILUENTE SUPERF (bpd): ", 0
" ESCURRIMIENTO (bpd): ", 34.54486083984375
" FRACCION DE LIQUIDO (‰): ", 82.9282283782959
" EFICIENCIA VOLUMETRICA(‰): ", 94.51930205700506
" FACTOR DE USO (‰): ", 7.346457211477158
" VELOCIDAD DEL ROTOR (rpm): ", 180.0859069824219
" PRESION DE CABEZAL (psi): ", 124.814567565918
" DELTA P EN LA BOMBA (psi): ", 435.5841064453125
" PRESION DE SUCCION (psi): ", 771.2381591796875
" PRESION DE DESCARGA (psi): ", 1206.822265625
" TORQUE TOTAL b pie: ", 136.1808319091797
" POTENCIA EN EJE (hp): ", 4.669506549835205
" F AXIAL CABEZAL (lbf): ", 16205.4462890625
" ESPACIAMIENTO (plg): ", 2.224879503250122
" CONDICION LIMITANTE : ", ""
" ESFUERZOS MAXIMOS EN CADA TRAMO DE CABILLAS"
" ", " LONGITUD ", " DIAMETRO ", "ESFUERZO VON MISES"
" TRAMO N°", " (pies) ", " (plg) ", " (Kpsi) ", " (Kg/cm2) "
" ----- ", " ----- ", " ----- ", "-----"
1, 3400, "1 1/4", 15.128021484375, 1063.630843308374
```

Fuente: BCPI (INTEVEP).2017

Anexo 2: Corrida BCPI Pozo BN0735A.

```

DATOS:"
" POZO: ", "BN0735AC1", "FECHA: ", "03-06-2017"
" IP (bpd/psi):", 7.900000363588333E-002, "IP (mcpd/bar):", .180120008289814
" PROF PERFORA (ft):", 3400, "PROF PERFORA (mts):", 1036.585365853659
" ANG INCLINACION (°):", 90
" CORTE DE AGUA (%):", 20.00000029802322
" R G P (scf/b):", 50
" EFIC SEPARACION (%):", 60
" VISCOSIDAD CABEZAL (cp):", 1000
" VISCOSIDAD YACIMIENTO (cp):", 150
" GRAVE CRUDO (°API):", 20
" GRAVE GAS :", .699999988079071
" PROF BOMBA (pies):", 3180
" PRESION ESTATICA (psi):", 1600
" P DE BURBUJEO (psi):", 40
" P DE SEPARADOR (psi):", 100
" P DE DESCARGA (psi):", 100
" T DE CABEZAL (°F):", 100
" T EN LAS PERF (°F)", 160
" SUMERG MINIMA (pies):", 200
" P ANULAR CABZ (psi):", 100
" BOMBA: ", "EMIP/KUDU", "120TP2000"
"***** SARTA DE TUBERIA *****"
"TRAMO N°", 1, "LONGITUD (pies):", 3180, "DIAMETRO (in):", "2-3/8"
"EL FLUJO DE CRUDO ES POR:", "LA TUBERIA DE PRODUCCION"
"***** SARTA DE CABILLAS *****"
"TRAMO N°##", 1, "LONGITUD (pies):", 3180, "DIAMETRO (plg):", "5/8"
", ACOPLE: ", " (NORMAL)"
"CABILLAS GRADO:", "D"
=====
"RESULTADOS:"
" T EN LA BOMBA (°F):", 156.1176452636719
" NIVEL DINAMICO (pies):", 3015.040771484375
" SUMERGENCIA (pies):", 164.959228515625
" DP fricc eductor (psi):", 374.4978637695312
" DP fricci en linea (psi):", 8824740052223206
" Q(petról)EN SUPERFI (bnpd):", 117.8702926635742
" Q(liq) SUPERFICIE (bnpd):", 147.3378636339625
" Q(liq+gas)EN BOMBA (bpd):", 152.3714904785156
" Q de AGUA EN SUPERF (bpd):", 29.46757316589355
" Q DILUENTE SUPERF (bpd):", 0
" ESCURRIMIENTO (bpd):", 2.558914184570312
" FRACCION DE LIQUIDO (%):", 100
" EFICIENCIA VOLUMETRICA (%):", 98.34834325762791
" FACTOR DE USO (%):", 17.96276511670962
" VELOCIDAD DEL ROTOR (rpm):", 102.6029205322266
" PRESION DE CABEZAL (psi):", 100.882453918457
" DELTA P EN LA BOMBA (psi):", 367.4267272949219
" PRESION DE SUCCION (psi):", 107.9535522460938
" PRESION DE DESCARGA (psi):", 475.3802795410156
" TORQUE TOTAL b pie:", 49.55912017822266
" POTENCIA EN EJE (hp):", .9681855440139771
" F AXIAL CABEZAL (lbf):", 4379.81201171875
" ESPACIAMIENTO (plg):", 4.394929885864258
" CONDICION LIMITANTE : ", " SUMERGENCIA MINIMA"
" ESFUERZOS MAXIMOS EN CADA TRAMO DE CABILLAS"
" ", " LONGITUD ", " DIAMETRO ", "ESFUERZO VON MISES"
" TRAMO N°", " (pies) ", " (plg) ", " (Kpsi) ", " (Kg/cm2) "
" ----- ", " ----- ", " ----- ", " ----- "
1, 3180, "5/8", 25.7979921875, 1813.822132285734

```

Fuente: BCPI (INTEVEP).2017

Anexo 3: Corrida BCPI Pozo CD-38.

```

|DATOS:"
" POZO: ", "CD38-C1          ", "FECHA: ", "03-06-2017"
" IP (bpd/psi):", 2.700000047683716, "IP (mcpd/bar):", 6.156000108718872
"PROF PERFORA (ft):", 90, "PROF PERFORA (mts):", 27.4390243902439
"ANG INCLINACION (°):", 90
" CORTE DE AGUA (%):", 5.000000074505806
" R G P (scf/b):", 86
" EFIC SEPARACION (%):", 50
" VISCOSIDAD CABEZAL (cp):", 48000
" VISCOSIDAD YACIMIENTO (cp):", 5000
" GRAVE CRUDO (°API):", 8
" GRAVE GAS          : ", .7099999785423279
" PROF BOMBA (pies):", 300
" PRESION ESTATICA (psi):", 1126
" P DE BURBUJEO (psi):", 780
" P DE SEPARADOR (psi):", 100
" P DE DESCARGA (psi):", 120
" T DE CABEZAL (°F):", 100
" T EN LAS PERF (°F)", 133
" SUMERG MINIMA (pies):", 200
" P ANULAR CABZ (psi):", 100
" BOMBA: ", "ROTALIFT", "340-5000MXL"
"***** SARTA DE TUBERIA *****"
"TRAMO N°", 1, "LONGITUD (pies):", 300, "DIAMETRO (in):", "5-1/2"
"EL FLUJO DE CRUDO ES POR:", "LA TUBERIA DE PRODUCCION"
"***** SARTA DE CABILLAS *****"
"TRAMO N°##", 1, "LONGITUD (pies):", 300, "DIAMETRO (plg):", "1 1/4"
", ACOPLA: ", " (NORMAL)"
"CABILLAS GRADO:", "D"
"-----"
"RESULTADOS:"
" T EN LA BOMBA          (°F):", 210
" NIVEL DINAMICO        (pies):", 0
" SUMERGENCIA           (pies):", 300
" DP fricc eductor      (psi):", 134.2529907226562
" DP fricci en linea    (psi):", 484.7780456542969
" Q (petról)EN SUPERFI (bnpd):", 1504.046875
" Q (liq) SUPERFICIE    (bnpd):", 1583.207256708738
" Q (liq+ gas)EN BOMBA (bpd):", 1695.094360351562
" Q de AGUA EN SUPERF   (bpd):", 79.16036224365234
" Q DILUENTE SUPERF     (bpd):", 0
" ESCURRIMIENTO         (bpd):", 3.0106201171875
" FRACCION DE LIQUIDO   (%):", 100
" EFICIENCIA VOLUMETRICA(%):", 99.82270713787582
" FACTOR DE USO         (%):", 24.52735734491357
" VELOCIDAD DEL ROTOR   (rpm):", 499.442626953125
" PRESION DE CABEZAL    (psi):", 604.7780151367188
" DELTA P EN LA BOMBA   (psi):", 203.85400390625
" PRESION DE SUCCION    (psi):", 535.177001953125
" PRESION DE DESCARGA   (psi):", 739.031005859375
" TORQUE TOTAL          b pie):", 61.91188812255859
" POTENCIA EN EJE       (hp):", 5.88755464553833
" F AXIAL CABEZAL      (lbf): ", 1880.731201171875
" ESPACIAMIENTO        (plg):", 6.140691787004471E-002
" CONDICION LIMITANTE : ", " RPM MAX. DE LA BOMBA"
" ESFUERZOS MAXIMOS EN CADA TRAMO DE CABILLAS"
"
"      ", " LONGITUD ", " DIAMETRO ", "ESFUERZO VON MISES"
" TRAMO N°", " (pies) ", " (plg) ", " (Kpsi) ", " (Kg/cm2) "
" ----- ", " ----- ", " ----- ", " ----- "
1, 300, "1 1/4", 3.68890869140625, 259.3622084937249

```

Fuente: BCPI (INTEVEP).2017

Anexo 4: Corrida VALHER V2.0 Pozo ARE-17.

VALHER 2,0					
Modulo Bombeo de Cabidad progresiva					
Datos de la Bomba					
Pozo	ARE-17				
IP	1,26	BD/PSI	FW	11,7	%
RGP	50	Scf/BBL	EFICIENCIA	94,25	%
VISCOSIDAD	630	cps	API	9,7	%
D Bomba	3,52	BPB/RPM	ASENT	3400	FT
PWS	1198	PSI	PB	9,25	PSI
P Desc	1088	PSI	Ph	6,52	HP
P SEP	50	PSI	Th	191	LBF-PIE
T Bomba	160	F	S	36,3	BPD
Sarta de tuberia de produccion					
Longitud	3400	FT	ID	4 1/2	in
Sarta de cabillas					
Longitud	3400	FT	ID	1 1/4	in
Grado	k		Acople	Normal	

Fuente: VALHER V2.0 2017

Anexo 5: Corrida VALHER V2.0 Pozo BN0735A

VALHER 2,0			
Modulo Bombeo de Cabidad progresiva			
Datos de la Bomba			
Pozo	<input type="text" value="BN0735"/>		
IP	<input type="text" value="7,9"/> BD/PSI	FW	<input type="text" value="20"/> %
RGP	<input type="text" value="50"/> Scf/BBL	EFICIENCIA	<input type="text" value="94,37"/> %
VISCOSIDAD	<input type="text" value="150"/> cps	API	<input type="text" value="20"/> %
D Bomba	<input type="text" value="1,579"/> BPB/RPM	ASENT	<input type="text" value="3180"/> FT
PWS	<input type="text" value="1600"/> PSI	PB	<input type="text" value="40"/> PSI
P Desc	<input type="text" value="956"/> PSI	Ph	<input type="text" value="0,83"/> HP
P SEP	<input type="text" value="100"/> PSI	Th	<input type="text" value="191"/> LBF-PIE
T Bomba	<input type="text" value="160"/> F	S	<input type="text" value="36,3"/> BPD
Sarta de tuberia de produccion			
Longitud	<input type="text" value="3180"/> FT	ID	<input type="text" value="2 3/8"/> in
Sarta de cabillas			
Longitud	<input type="text" value="3180"/> FT	ID	<input type="text" value="5/8"/> in
Grado	<input type="text" value="d"/>	Acople	<input type="text" value="Normal"/>

Fuente: VALHER V2.0 2017

Anexo 6: Corrida VALHER V2.0 Pozo CD-38.

VALHER 2,0			
Modulo Bombeo de Cabidad progresiva			
Datos de la Bomba			
Pozo	<input type="text" value="CD-38"/>		
IP	<input type="text" value="2,7"/> BD/PSI	FW	<input type="text" value="5"/> %
RGP	<input type="text" value="86"/> Scf/BBL	EFICIENCIA	<input type="text" value="99,82"/> %
VISCOSIDAD	<input type="text" value="5000"/> cps	API	<input type="text" value="8"/> %
D Bomba	<input type="text" value="3,396"/> BPB/RPM	ASENT	<input type="text" value="300"/> FT
PWS	<input type="text" value="1126"/> PSI	PB	<input type="text" value="780"/> PSI
P Desc	<input type="text" value="703"/> PSI	Ph	<input type="text" value="4,35"/> HP
P SEP	<input type="text" value="100"/> PSI	Th	<input type="text" value="56,07"/> LBF-PIE
T Bomba	<input type="text" value="133"/> F	S	<input type="text" value="3"/> BPD
Sarta de tuberia de produccion			
Longitud	<input type="text" value="300"/> FT	ID	<input type="text" value="5 1/2"/> in
Sarta de cabillas			
Longitud	<input type="text" value="300"/> FT	ID	<input type="text" value="1 1/4"/> in
Grado	<input type="text" value="d"/>	Acople	<input type="text" value="Normal"/>

Fuente: VALHER V2.0 2017