

**DISEÑO DE UN MODELO A ESCALA LABORATORIO DE UN SISTEMA DE
LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL CON BOMBA PCP**

**DANIEL ANDRÉS PEREZ GONZALEZ
ÁNGELA MARÍA SAAVEDRA NARANJO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, D.C
2019**

**DISEÑO DE UN MODELO A ESCALA LABORATORIO DE UN SISTEMA DE
LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL CON BOMBA PCP**

**DANIEL ANDRÉS PEREZ GONZALEZ
ÁNGELA MARÍA SAAVEDRA NARANJO**

**Proyecto integral de grado para optar el título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**Director:
Juan David Rengifo
Ingeniero de Petróleos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, D.C
2019**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing. Angie Tatiana Ortega
Jurado 1

Ing. Edinson Enrique Jiménez
Jurado 2

Bogotá D.C., mayo de 2019.

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería de Petróleos

Ing. JUAN CARLOS RODRIGUEZ ESPARZA

Las Directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios o ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Dedico este gran logro obtenido a Dios por darme sabiduría, capacidad, y los medios necesarios para lograr culminar con éxito esta meta.

A mis padres por su amor, sus consejos, sus oraciones, su tiempo de espera y apoyo. A ellos infinitas gracias.

A toda mi familia, quienes de una u otra forma me apoyaron y creyeron en mis capacidades de superación.

ÁNGELA SAAVEDRA.

DEDICATORIA

A Dios por darme vida, salud y conocimiento para poder cumplir este proyecto.

A mis padres Carlos Pérez y Sandra González, por su amor, apoyo incondicional, comprensión, dedicación e inculcarme los valores necesarios para formarme como persona y profesional, todos mis logros son gracias a ustedes.

A mi hermana María Alejandra por considerarme su ejemplo a seguir y llenarme de motivación para salir adelante cumpliendo mis metas propuestas.

A mi familia, mi ejemplo a seguir, quienes siempre me apoyan y motivan a cumplir mis propósitos sin importar las adversidades que se presenten. Gracias por inculcarme que el sacrificio de hoy es el éxito del mañana.

DANIEL ANDRES PÉREZ GONZALEZ.

AGRADECIMIENTOS

A nuestra Universidad, la gloriosa Universidad de América por brindarnos una educación de excelencia formándonos como las mejores personas y profesionales brindándonos las herramientas para afrontar las necesidades de la industria.

Al ingeniero John Mariscal, por su apoyo incondicional, tiempo, consejos y facilitándonos herramientas para la culminación de nuestro anhelado trabajo de grado.

Al Ingeniero Miguel Ruiz, por su tiempo, orientación y colaboración en el desarrollo y culminación de este trabajo.

A la Ingeniera Adriangela Chiquinquirá Romero, por su valiosa e importante colaboración aportándonos sus conocimientos y tiempo en la realización de este trabajo de grado.

A la empresa NETZSCH, por abrirnos sus puertas y facilitarnos la bomba PCP utilizada en el proyecto.

A todas aquellas personas que de una u otra forma hicieron parte del éxito de esta investigación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	23
OBJETIVOS	24
1.GENERALIDADES DE LA BOMBA PCP	25
1.1 RESEÑA HISTÓRICA	25
1.2 APLICACIONES DE LA BOMBA PCP	26
1.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	26
1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SISTEMA	27
1.5 COMPONENTES DEL SISTEMA PCP	29
1.5.1 Equipo de superficie	29
1.5.1.1 Motor	29
1.5.1.2 Moto reductor	30
1.5.1.3 Variador de frecuencia	30
1.5.1.4 Cabezal de rotación	32
1.5.1.5 Sistema de transmisión	34
1.5.1.6 Barra pulida	35
1.5.1.7 Sistema de freno	36
1.5.2 EQUIPO DE SUBSUELO	36
1.5.2.1 Sarta de varillas	36
1.5.2.2 Tubería de producción	38
1.5.2.3 Bomba	38
1.5.2.4 Separador de gas	41
1.5.2.5 Rotor	41
1.5.2.6 Estator	42
1.5.2.7 Elastómero	43
1.5.2.8 Niple de paro	45
1.5.2.9 Ancla de torsión	45
1.5.2.10 Niple espaciador	46
1.6 FLUIDOS QUE MANEJA LA BOMBA PCP	47
1.6.1 Crudo liviano	47
1.6.2 Crudo mediano	47
1.6.3 Crudo pesado	47
1.6.4 Crudo extrapesado	48
1.7 CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESIVAS	48
1.7.1 Según su instalación	49
1.7.1.1 Bombas tubulares	49
1.7.1.2 Bombas tipo insertable	49
1.7.2 Según se geometría	49
1.7.2.1 Bombas geometría simple	49

1.7.2.2 Bombas Multilobulares	49
1.7.3 Bombas de alto caudal	50
1.7.4 Bombas de gran altura	50
1.8 NOMENCLATURA SEGÚN EL FABRICANTE	50
1.9 CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS DE LAS BOMBAS PCP	51
1.9.1 Desplazamiento volumétrico o caudal	51
1.9.2 Altura de descarga (head)	52
1.10 SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS	53
1.11 INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS	55
1.11.1 Equipos de subsuelo	56
1.11.1.1 Conexión del niple de paro	56
1.11.1.2 Bajar tubería de producción	56
1.11.1.3 Conexión del rotor a la sarta de varillas	56
1.11.1.4 Bajar la sarta de varillas	57
1.11.1.5 Espaciamiento del rotor	57
1.11.2 EQUIPOS DE SUPERFICIE	59
1.11.2.1 Instalación del cabezal de rotación	59
1.11.2.2 Instalación del motorreductor	59
1.11.2.3 Instalación del sistema motriz	60
1.12 PUESTA EN MARCHA	61
1.13 PROCEDIMIENTO DE PARE (SHUT-DOWN)	63
1.14 MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS	63
1.15 FABRICANTES/ DISTRIBUIDORES DE EQUIPOS PCP	64
2. FALLAS PRESENTES EN EL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBA PCP	65
2.1 MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE EQUIPOS PCP	65
2.1.1 Equipos nuevos	65
2.1.1.1 Rotores	65
2.1.1.2 Estatores	65
2.1.2 Equipos usados	66
2.1.2.1 Rotores	66
2.1.2.2 Estatores	66
2.2 FALLAS GENERALES EN UN SISTEMA PCP	66
2.3 FALLAS PRESENTES EN ROTOR Y ELASTOMERO	70
2.3.1 Fallas presentes en el rotor	70
2.3.2 Fallas presentes en el elastómero	72
3. DISEÑO DE POZO A ESCALA CON UNA FORMACIÓN PRODUCTORA	74
3.1 DESCRIPCIÓN DEL YACIMIENTO	74
3.1.1 Descripción de la formación productora	76
3.1.2 Descripción de la roca sello	80
3.2 PROPIEDADES DEL FLUIDO SELECCIONADO A PRODUCIR	80
3.2.1 Propiedades del aceite seleccionado como fluido de producción	81

3.2.2 Propiedades del agua seleccionada como fluido de producción	
83	
4. DISEÑAR SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL A ESCALA CON BOMBA DE CAVIDADES PROGRESIVAS	84
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA BOMBA PCP UTILIZADA EN EL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL A ESCALA	84
4.2 DISEÑO DE HERRAMIENTAS DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL A ESCALA EN SUPERFICIE	87
4.2.1 Cálculo de la presión sobre la bomba (TDH)	87
4.2.2 Cálculo de potencia consumida	88
4.2.3 Cálculo del torque	88
4.2.4 Cálculo de esfuerzos axiales	91
4.2.5 Cálculo de tensiones combinadas	
92	
4.3 SELECCIÓN DE EQUIPOS DE SUPERFICIE	92
4.4 SELECCIÓN DE EQUIPOS EN FONDO	94
4.5 DISEÑO DE SISTEMA PCP (FLUJOGRAMA)	97
5. CONSTRUCCIÓN DE POZO Y SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL CON BOMBA PCP	98
5.1 CONSTRUCCIÓN DEL POZO	98
5.2 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL CON BOMBA PCP	100
6. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL CON BOMBA PCP A ESCALA LABORATORIO CON EL FLUIDO SELECCIONADO A DIFERENTES BS&W	110
6.1 CALCULO DE PARÁMETROS DE LA BOMBA PCP A ESCALA LABORATORIO CON FLUIDOS A DISTINTOS BS&W	110
6.1.1 Fluido 100% aceite 20w50	112
6.1.2 Fluido 100% agua	114
6.1.3 Fluido con BS&W 70	115
6.1.4 fluido con bs&w 50	116
6.1.5 Análisis de resultados obtenidos de la bomba PCP con diferentes fluidos	
117	
6.2 DETERMINACION DE LA EFICIENCIA VOLUMETRICA DE LA BOMBA	118
6.2.1 Fluido 100% agua	119
6.2.2 Fluido 100% aceite 20W50	119
6.2.3 Fluido con BS&W 70	120
6.2.4 Fluido con BS&W 50	120
6.2.5 Análisis de resultados obtenidos de la eficiencia volumétrica de la bomba PCP con diferentes fluidos	121
7.CONCLUSIONES	122

8.RECOMENDACIONES

123

BIBLIOGRAFÍA

124

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Ventajas y desventajas	27
Cuadro 2. Bombas PCP	50
Cuadro 3. Fabricantes/ distribuidores de equipos PCP	64
Cuadro 4. Fallas sistema PCP	67
Cuadro 5. Fallas presentes en el rotor	70
Cuadro 6. Fallas presentes en el elastómero	72

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Clasificación de las varillas bajo las normas de API	37
Tabla 2. Características de las varillas API	37
Tabla 3. Nomenclatura según el fabricante	51
Tabla 4. Torques recomendados para tuberías de producción	56
Tabla 5. Características fluido a producir	81
Tabla 6. Nuevos valores de densidad y gravedad API	82
Tabla 7. Características del agua	83
Tabla 8. Ficha técnica niple galvanizado	103
Tabla 9. Ficha técnica de la unión de 2"	104
Tabla 10. Ficha técnica de la T de flujo	106
Tabla 11. Características motor 1 Hp	107
Tabla 12. Fluido 100% aceite 20W50	113
Tabla 13. Fluido 100% agua	114
Tabla 14. Fluido con BS&W 70	115
Tabla 15. Fluido con BS&W 50	116
Tabla 16. Fluido 100% agua	119
Tabla 17. Fluido 100% aceite	120
Tabla 18. Fluido con BS&W 70	120
Tabla 19. Fluido con BS&W 50	120

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Grafica 1. Comportamiento de la bomba PCP a escala laboratorio operando con fluido 100% aceite	113
Grafica 2. Comportamiento de la bomba PCP a escala laboratorio operando con 100% agua	114
Grafica 3. Comportamiento de la bomba PCP a escala laboratorio operando con un fluido de BS&W 70	115
Grafica 4. Comportamiento de la bomba PCP a escala laboratorio operando con un fluido de BS&W 50	116
Grafica 5. Comportamiento del torque de la bomba PCP a escala laboratorio	117

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Motor	29
Figura 2. Moto reductor	30
Figura 3. Variador de frecuencia	31
Figura 4. Cabezal con motor eléctrico	33
Figura 5. Cabezal vertical	34
Figura 6. Cabezal angular	34
Figura 7. Diseño de sistema de transmisión	35
Figura 8. Sarta de varillas	36
Figura 9. Tubería de producción	38
Figura 10. Ejemplo de lóbulos del rotor y el estator	39
Figura 11. Bomba simple	40
Figura 12. Bombas Multilobulares	40
Figura 13. Nomenclatura de las bombas PCP	41
Figura 14. Rotor	42
Figura 15. Estator	43
Figura 16. Elastómero	44
Figura 17. Niple de paro	45
Figura 18. Ancla Ex calibre	46
Figura 19. Ancla Torqstopper II	46
Figura 20. Niple espaciador	47
Figura 21. Clasificación de las bombas PCP	48
Figura 22. Bombas Multilobulares	49
Figura 23. Programa para selección de equipos PCP	54
Figura 24. Espaciamiento del rotor	58
Figura 25. Completación con correas y poleas	61
Figura 26. Representación tridimensional del yacimiento	75
Figura 27. Sistema pozo-yacimiento	75
Figura 28. Representación tridimensional del pozo	76
Figura 29. Columna estratigráfica de los llanos orientales	79
Figura 30. Ficha técnica de la bomba PCP	86
Figura 31. Diseño motor y cabezal de rotación	93
Figura 32. Polea 6"	94
Figura 33. Polea 2"	94
Figura 34. Eje calibrado	96
Figura 35. Diseño del sistema PCP	96
Figura 36. Flujograma diseño sistema PCP	97
Figura 37. Representación tridimensional del yacimiento	98
Figura 38. Representación tridimensional del pozo	99
Figura 39. Formaciones	100
Figura 40. Retenedor	101
Figura 41. Eje calibrado ajustado al retenedor	101

Figura 42. Cabezal de rotación	102
Figura 43. Niple galvanizado	103
Figura 44. Unión de 2"	104
Figura 45. Ensamblaje bomba PCP	105
Figura 46. T de flujo	105
Figura 47. Guarda poleas	106
Figura 48. Motor 1 Hp	107
Figura 49. Facilidad de producción	108
Figura 50. Registros 1/2"	109
Figura 51. Variador de frecuencia	109

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Densidad de los fluidos BS&W	82
Ecuación 2. Gravedad API	82
Ecuación 3. Presión de nivel	87
Ecuación 4. Potencia hidráulica	88
Ecuación 5. Potencia consumida	88
Ecuación 6. Cálculo del torque	89
Ecuación 7. Torque total	89
Ecuación 8. Caudal teórico de la bomba	89
Ecuación 9. Caudal teórico	90
Ecuación 10. Calculo de las RPM de operación	90
Ecuación 11. Esfuerzo axial por peso de la varilla	91
Ecuación 12. Esfuerzo axial por presión diferencial	91
Ecuación 13. Tensiones combinadas	92
Ecuación 14. Capacidad volumétrica de la tubería	95
Ecuación 15. Volumen tubería	95
Ecuación 16. Potencia	111
Ecuación 17. Potencia de voltamperio a Hp	111
Ecuación 18. Velocidad del motor	111
Ecuación 19. Velocidad de la bomba	111
Ecuación 20. Torque	112
Ecuación 21. Caudal teórico	112
Ecuación 22. Caudal real	118
Ecuación 23. Eficiencia	119

LISTA DE ABREVIATURAS

%: porcentaje

°F: grados Fahrenheit.

API: American Petroleum Institute.

BCP: Bomba de cavidades progresivas.

HP: Caballos de fuerza.

Kg: kilogramo.

L: litros

PCM: Pompes Compresseurs Mecanique.

PCP: Progressive Cavity Pump.

Q: tasa de producción (caudal).

RPM: revoluciones por minuto.

GLOSARIO

AMPERIMETRO: es un dispositivo que permite diagnosticar posibles problemas en el equipo subsuperficial, registra la corriente eléctrica que consume el motor.

BACKSPIN: controla la rotación inversa del rotor. La varilla que conecta el motor a la bomba tiene tensión rotacional mientras está funcionando, cuando el motor está parado esta tensión se desenrolla rápidamente. Esta rápida liberación de energía debe ser controlada para evitar daños en la varilla.

BOMBA PCP: bomba de desplazamiento positivo compuesta por un rotor móvil y un estator estacionario recubierto internamente por un elastómero.

ELASTÓMERO: caucho natural más otros compuestos que tienen la particularidad de ser estirado un mínimo de dos veces su longitud y recuperar inmediatamente su dimensión original.

FORMACIÓN: secuencia de rocas, generalmente de características semejantes, en cuanto a litología, fósiles y edad. Algunas formaciones tienen gran extensión territorial.

INTERFERENCIA: compresión entre rotor y estator.

LOBULOS: es la parte cóncavo y convexo del estator y el rotor respectivamente.

LUTITA: roca formada por la consolidación de partículas finas, arcillas de color gris oscuro, a veces verdoso.

POTENCIA: es la cantidad de trabajo realizado durante un intervalo de tiempo, se puede medir en Hp o kilovatios.

ROCA MADRE: este tipo de roca que generalmente es lutita o caliza, son ricas en materia orgánica, que al estar en contacto con altas temperaturas puede generar gas o petróleo.

ROCA RESERVORIO: roca que contiene un depósito mineral, petróleo o agua, con permeabilidad y porosidad.

ROCA SELLO: este tipo de roca que generalmente son lutitas, sal o anhidritas son prácticamente impermeables, ellas forman un tipo de barrera alrededor de la roca yacimiento, para evitar así que los fluidos migren a superficie. Su permeabilidad para que sea capaz de retener los fluidos oscila entre 10^{-6} y 10^{-8} darcies.

STUFING BOX: permite que el empaque anular se comprima alrededor de una varilla o eje reciproco para formar un sello, evitando que el fluido proveniente del pozo se desvíe del tanque de almacenamiento del campo.

T DE FLUJO: permite conectar tuberías de presión para el flujo de aguas residuales. Permite conectar tuberías a través del cuerpo de las mismas para unir tuberías que se mueven en direcciones no paralelas. Específicamente, la tubería T permite conectar tuberías que se proyectan en ángulo recto hacia la tubería central.

TORQUE: fuerza necesaria que actúa sobre un objeto para hacerlo girar.

TUBING: ultima tubería instalada en el pozo, tubería de producción.

UN PASO: longitud requerida por la bomba para crear un efecto de acción de bombeo.

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UN MODELO A ESCALA LABORATORIO DE UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL CON BOMBA PCP.

DESCRIPCIÓN: Inicialmente se realizó la descripción de las generalidades del sistema PCP, sus ventajas y desventajas, equipos utilizados en fondo y en superficie e instalación de los mismos, fabricantes de bombas PCP, y otros factores importantes del sistema. Posteriormente se identificaron y describieron las fallas presentes en las bombas PCP, sus posibles causas y las acciones recomendadas a realizar cuando estas se presentan en el sistema. Seguido de esto se realizó el diseño del pozo con ayuda del programa de dibujo AutoCad 2016, el cual se fundamentó en tres componentes principales, tipo de roca almacén la cual actuará de formación productora, tipo de roca sello y el tipo de fluido almacenado. De igual manera se diseñó el sistema PCP a escala en el programa de dibujo AutoCad 2016 basándose en las características de la bomba suministrada por la empresa NETZSCH, la cual tiene por nombre NM008*3S.

Seguido a esto se inició con el cálculo de los parámetros necesarios para la selección y fabricación de cada una de las partes que conforman el sistema de levantamiento artificial a escala. Posteriormente se realizó la construcción del pozo y del sistema PCP con ayuda de un tornero, en base a los diseños realizados en AutoCad 2016. Finalmente se dio inicio a la puesta en marcha del sistema, evaluando su óptimo funcionamiento a partir de un análisis mediante gráficas del comportamiento de las variables torque, frecuencia, velocidad y caudal con fluidos a diferentes BS&W y a distintas velocidades, para hallar así la eficiencia volumétrica de fábrica a la cual viene dada la bomba PCP.

PALABRAS CLAVES

- Sistema de levantamiento artificial.
- Bomba PCP.
- Diseño a escala.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de levantamiento artificial son el primer recurso en caso de que el yacimiento no tenga la suficiente presión y por lo tanto la energía necesaria para subir los fluidos que este contiene desde el fondo a superficie. Por esto, se han diseñado una serie de sistemas que faciliten y permitan que los fluidos allí atrapados se puedan extraer con mayor facilidad para una posterior disposición según lo que se requiera.

Entre los equipos empleados por las operadoras se encuentra el sistema de cavidades progresivas. Este equipo aún joven con respecto a los anteriormente implementados en la industria petrolera se ha convertido en una opción muy atractiva debido a sus bajos costos de operación y mantenimiento, además de sus amplias aplicaciones y su alto manejo de contenido de sólidos.

El diseño del sistema de levantamiento artificial con bomba PCP se realiza con el fin de incentivar a los estudiantes a diseñar y construir sistemas de levantamiento artificial que sirvan tanto como a los involucrados en el proyecto como a todas aquellas personas que estén interesadas en hacer parte de la industria, o que le puedan encontrar alguna utilidad al equipo mediante su operación. El diseño no está enfocado en evaluar el costo del equipo y sus materiales, simplemente se limita al diseño y construcción del sistema para así se realicen evaluaciones y análisis por parte de la persona que en el momento la opere en el programa de ingeniería de petróleos de la Fundación Universidad de América.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Elaborar una bomba PCP a escala laboratorio como material didáctico de aprendizaje.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir el sistema de levantamiento artificial por bomba de cavidades progresivas.
2. Identificar las fallas que se presentan en un sistema de levantamiento artificial con bombas de cavidades progresivas.
3. Diseñar pozo a escala con una formación productora.
4. Diseñar sistema de levantamiento artificial a escala con bomba de cavidades progresivas.
5. Construir pozo y sistema de levantamiento artificial con bomba PCP.
6. Realizar prueba del sistema de levantamiento artificial con los fluidos seleccionados a diferentes BS&W.
7. Evaluar el funcionamiento del modelo a escala laboratorio del sistema de levantamiento.

1. GENERALIDADES DE LA BOMBA PCP

En la industria petrolera es fundamental mantener niveles óptimos de producción, para ello es necesario instalar sistemas artificiales que permitan mantenerla o maximizarla, esto es necesario debido a que extracción va disminuyendo resultado de la declinación natural del yacimiento. El sistema de bombeo de cavidades progresivas es uno de los mejores en el manejo de sólidos y crudos pesados, además su eficiencia total es de las más altas en cuanto a sistemas artificiales se refiere.

En este capítulo se describe el principio de funcionamiento de la bomba PCP, las ventajas y desventajas que este sistema presenta, cada uno de sus componentes tanto en fondo como en superficie, los fluidos que esta maneja y así mismo la clasificación de las bombas PCP y su nomenclatura.

1.1 RESEÑA HISTÓRICA

El origen de la bomba de cavidades progresivas proviene del llamado “tornillo sin fin”, el cual hizo parte de uno de los tantos inventos del físico y matemático Arquímedes, inventó que en sus inicios se implementó como un sistema que permitía la captación de agua de la sentina de los barcos y posteriormente para elevar agua, harina o grano.¹

El concepto que se conoce hoy en día de la bomba de cavidades progresivas como sistema de levantamiento artificial, fue desarrollado “a fines de los años '20 por Rene Moineau quien estipulo el concepto para una serie de bombas helicoidales”², el cual está incluido en su tesis que lleva por nombre el nuevo capsulismo en donde se establecen las bases de esta bomba. El 13 de mayo de 1930, logra aplicar para su primera patente un nuevo concepto en máquinas mecánicas; aplicables para bombas, motores y dispositivos de transmisión, hecho que le permite formar en 1932 la compañía “Pompes Compresseurs Mecanique” (PCM) junto a su socio Gevelot Compañy. Durante los siguientes 20 años esta compañía fue la única fabricante de bombas PCP hasta el momento en que se decide vender la licencia de fabricación.³

En lo que corresponde a la industria petrolera su primera aplicación data a mediados de la década de 1950, momento en el que se elaboraron los primeros motores hidráulicos con mecanismo de doble rotor helicoidal para ser empleados en el área de perforación de pozos direccionales, llegando hasta el año de 1970 en donde se

¹ INGENIERIA. Programa para el diseño del PCP. Enero, 2011.

² HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

³ INGENIERIA. Programa para el diseño del PCP. Enero, 2011.

realizaron esfuerzos considerables para poder desempeñarse como sistema de levantamiento artificial en pozos productores de hidrocarburos.⁴

En Canadá algunas operadoras de crudo pesado, cuyos pozos presentaban fluidos con alto corte de arena, empezaron a experimentar con BCP (Bomba de cavidades progresivas) en el año de 1979⁵. Después de conseguir resultados exitosos en estas exigentes aplicaciones, el desarrollo de sistemas completos de fondo y superficie fue creciendo rápidamente.

En los últimos años las PCP han tenido un 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.⁶

1.2 APLICACIONES DE LA BOMBA PCP

Este sistema debería ser una de las primeras opciones a considerar, cuando en los pozos productores se decide implementar un sistema de levantamiento artificial, ya que este tiene una inversión inicial relativamente baja, bajos niveles de ruido, fácil transporte, entre otras ventajas que son nombradas más adelante.

Las bombas PCP tienen la capacidad de ser instaladas en pozos productores de crudos medianos y pesados, son instalaciones relativamente profundas, con suficiencia para trabajar en óptimas condiciones en la producción de crudos arenosos, parafínicos y muy viscosos; pozos con alto contenido de agua, altamente desviados, verticales, horizontales e inclinados, por lo anterior se recomienda este sistema de levantamiento artificial para la evaluación del potencial de pozos o como optimización de los mismos.

1.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

La bomba de cavidades progresivas (PCP por sus siglas en inglés “Progressive Cavity Pump”), como sistema de levantamiento artificial está diseñada para levantar los fluidos de pozo a superficie, logrando así que la producción petrolera aumente.

La bomba PCP es una bomba de desplazamiento positivo constituida por dos piezas longitudinales en forma de hélice, una de ellas es un rotor metálico móvil de n hélices, el rotor gira dentro de la segunda pieza llamada estator, el cual está revestido por un elastómero de $n+1$ hélices.

⁴ INGENIERIA. Programa para el diseño del PCP. Enero, 2011.

⁵ INGENIERIA. Programa para el diseño del PCP. Enero, 2011.

⁶ HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008. p 2.

Cuando se es accionada la bomba, el rotor gira dentro del estator generando unas cavidades que se desplazan axialmente, estas cavidades se van llenando del fluido para posteriormente descargarlo con una presión mayor, que permita elevar los fluidos hasta superficie.

El movimiento que se genera en el rotor es ocasionado por una sarta de varillas, la cual transmite un movimiento rotacional desde un motor ubicado en superficie, el cual regula la velocidad de la rotación.

1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SISTEMA

El sistema de levantamiento artificial por bomba PCP, tiene características que la hace ventajosa con respecto a otros sistemas de levantamiento artificial, una de sus más importantes ventajas es su alta eficiencia, ya que está entre un 50 y 60%. De igual manera tiene unas desventajas respecto a los otros métodos de levantamiento, la más destacada es la capacidad de desplazamiento y levantamiento de la bomba, así como la compatibilidad de los elastómeros con algunos fluidos producidos, en especial los que tienen contenidos de aromáticos.

A pesar de esto, estas limitaciones que presenta el sistema se están superando cada día, con la mejora en los materiales y el diseño de los equipos. En su aplicación correcta, el sistema de cavidades progresivas otorga el método de levantamiento artificial más económico si es configurado y operado apropiadamente.

En el **Cuadro 1** se muestran las ventajas y desventajas que presentan el sistema de levantamiento artificial con bomba PCP.

Cuadro 1. Ventajas y desventajas

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Habilidad para producir fluidos altamente viscosos.	Capacidad de desplazamiento real de hasta 2000 Bls/día o 320 m3/día (máximo de 4000 Bls/día o 640 m3/día).
Habilidad para producir con altas concentraciones de arena.	Capacidad de elevación real de hasta 6000 pies o 1850 metros (máximo de 1050 pies o 3500 metros).
Habilidad para tolerar altos porcentajes de gas libre (no se bloquea).	Resistencia a la temperatura de hasta 280 °F o 138 °C (máxima de 350 °F o 178 °C).
Ausencia de válvulas o partes reciprocantes evitando bloqueo o desgaste de las partes móviles.	
Muy buena resistencia a la abrasión; por Bajos costos de inversión inicial.	

Cuadro 1. (Continuación)

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Bajos costos de energía.</p> <p>Demanda constante de energía (no hay fluctuaciones en el consumo).</p> <p>Simple instalación y operación; por bajo mantenimiento.</p> <p>Equipos de superficie de pequeñas dimensiones.</p> <p>Bajo nivel de ruido.</p>	<p>Alta sensibilidad a los fluidos producidos (los elastómeros pueden hincharse o deteriorarse con el contacto de ciertos fluidos por periodos prolongados de tiempo).</p> <p>Opera con bajas capacidades volumétricas cuando se producen cantidades de gas libre considerables evitando una buena lubricación).</p> <p>Tendencia del estator a daño considerable cuando la bomba trabaja en seco por periodos de tiempo relativamente cortos.</p> <p>Desgaste por contacto entre las varillas de bombeo y la tubería de producción puede tornarse un problema grave en pozos direccionales y horizontales.</p> <p>La mayoría de los sistemas requieren la remoción de la tubería de producción para sustituir la bomba.</p> <p>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.</p> <p>Poca experiencia en el diseño, instalación y operación del sistema.</p>

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008. p 4. Modificada por los autores 2019.

1.5 COMPONENTES DEL SISTEMA PCP

El sistema de levantamiento artificial por bomba de cavidades progresivas está constituido por diferentes componentes tanto en fondo como en superficie, la integración de estos equipos es indispensable, ya que cada uno de ellos realiza una función esencial para la óptima ejecución del sistema, logrando así las condiciones deseadas de operación que permitan llevar el fluido de fondo a superficie.

1.5.1 Equipo de superficie.

1.5.1.1 Motor. Proporciona la energía necesaria para el movimiento mecánico de la sarta de varillas, accionando la bomba y permitiendo así la producción de los fluidos del pozo. En casi todos los sistemas PCP se utilizan motores eléctricos y en ocasiones motores de combustión interna, en lugares donde no es fácil acceder al servicio de energía eléctrica.

Dado que el Sistema PCP, en general, trabaja con baja velocidad, la selección de la unidad motriz incluye especificar un método para reducir la velocidad del motor o un motor de baja velocidad. Las transmisiones con correas o bandas y poleas son aceptables para reducir la velocidad del motor. Otra opción, es el empleo de un reductor de velocidad, estos son, sistemas de engranajes que permiten que los motores funcionen a diferentes velocidades para los que fueron diseñados.⁷

La **Figura 1** corresponde a un motor eléctrico utilizado en sistemas PCP.

Figura 1. Motor.



Fuente.

HIRSCHFELDT,
Marcelo. Manual de
bombeo por cavidades
progresivas. Versión
2008V1. Junio 2008.

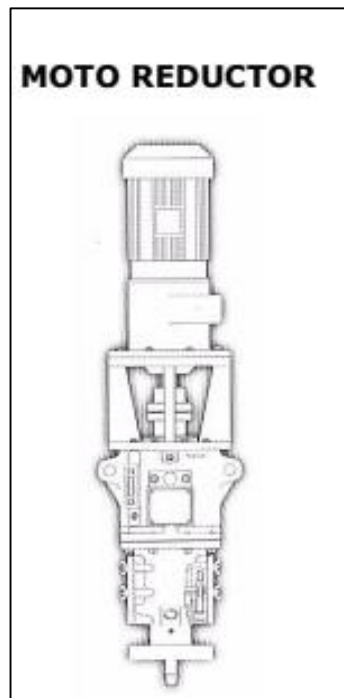
⁷ ESQUIVEL, Salvador. Sistema de bombeo por cavidades progresivas aplicado a pozos desviados. México D.F. Septiembre 2009.

1.5.1.2 Moto reductor. Estos equipos permiten llevar la velocidad angular del motor a velocidades más cercanas a la requerida por la bomba y de igual manera suministran el torque necesario para el óptimo funcionamiento del sistema.

Para realizar una correcta selección del moto reductor, es necesario determinar, con la mayor precisión posible, el torque requerido en superficie a la máxima velocidad de rotación esperada. Este torque depende del tipo de bomba y su diferencial de presión, el torque resistivo que se debe básicamente al roce de las varillas con el tubing y el torque hidráulico el cual está en función de la presión de boca de pozo, presión por pérdida de carga y presión diferencial.

En la **Figura 2** se aprecia un ejemplo de moto reductor utilizado en sistemas PCP.

Figura 2. Moto reductor.



Fuente. CHACÍN, Nely.
Bombeo de cavidad
progresiva:
Operaciones,
Diagnostico, Análisis de
falla y Trouble Shooting
El tigre, Venezuela.
Septiembre 2013.

1.5.1.3 Variador de frecuencia. Equipo eléctrico-electrónico que permite el

arranque del motor, variar su frecuencia natural, obteniendo como resultado una disminución en la velocidad del motor, controlar el backspin y dar una forma de apagado seguro del sistema PCP. Al poder variar la frecuencia, es posible obtener un incremento en el caudal y el levantamiento de la bomba, optimizando la producción⁸. Estos equipos se utilizan en conjunto con los sistemas mecánicos que tengan los cabezales de PCP.

La **Figura 3** muestra un variador de frecuencia instalado en un campo petrolero..

Figura 3. Variador de frecuencia.



Fuente. TDA. Diseño, Diagnostico, Optimización, Instalación y análisis de fallas de sistemas PCP. Universidad Industrial de Santander. 24 y 25 de febrero 2012. Pg. 34.

Por lo general, casi todos los variadores de frecuencia tienen en común las siguientes protecciones eléctricas:

- Sobrecarga (sobrecorriente).
- Subcarga, sobre y bajo voltaje.
- Cortocircuito entre fase y fase, fase a neutro, las fases y tierra, en las salidas del variador y de las fuentes internas, en las salidas/entradas analógicas y digitales.
- Fallo o pérdida de fase, falla interna.
- Sobretemperatura del motor y del variador.
- Sobre torque por rotor del motor bloqueado o atascamiento de los equipos de subsuelo.

⁸ LÓPEZ, Jaime y SÁMANO, Crispín. Nuevos desarrollos en el bombeo de cavidades progresivas para la optimización de la producción de pozos de aceite. Tesis. México D.F mayo 2011.

- Límites programables de velocidad (mínimo y máximo), límites de torque y rearmes automáticos.

Poseen pantallas de cristal líquido (LCD) por sus siglas en inglés Liquid Cristal Display, con iluminación nocturna con panel (o consola) desmontable. En estas pantallas se pueden leer las siguientes variables de operación: Frecuencia de entrada y salida (Hz), velocidad de la bomba en (R.P.M) corriente de salida (Amp), tensión en el bus de corriente continua en Voltios, potencia activa (HP o Kw), torque (Nw-mts o lbs-pie), tensión a la entrada y a la salida del variador (Voltios). Registro y presentación de los últimos acontecimientos; (indicando en algunos equipos) fecha y hora de ocurrencia de las mismas, tiempo de servicio de la puesta en operación del variador, temperatura del variador y del motor y energía total consumida (Kw acumulados)⁹.

Estos equipos cuentan con varias ventajas y desventajas, como lo son:

a. Ventajas

- Permite el ajuste del torque de arranque del sistema, rompiendo la inercia estática y dinámica que este presenta, evitando el alto consumo que tiene el motor al momento de su arranque, permitiendo así que el sistema arranque de una forma segura desde su estado inicial hasta el momento al que se llegue a una producción estable y segura.
- Cuando se realizan arranques y paradas permite controlar el troque del sistema y reduce los picos de corriente.
- Este equipo permite de manera rápida variar la velocidad y en un rango mayor a los otros sistemas.

b. Desventajas

- Son equipos muy frágiles, los cuales se pueden ver afectados por las exigencias del ambiente del campo.
- No todos los trabajadores tienen la experiencia para operar estos equipos tecnológicos.

1.5.1.4 Cabezal de rotación. Equipo de accionamiento mecánico, el cual proporciona sello en la superficie para evitar la filtración de fluidos del pozo, soporta la carga axial del sistema y el efecto del mecanismo de frenado. Así mismo transfiere la energía necesaria para mover la sarta de varillas.

El cabezal de rotación cumple con cuatro importantes funciones:

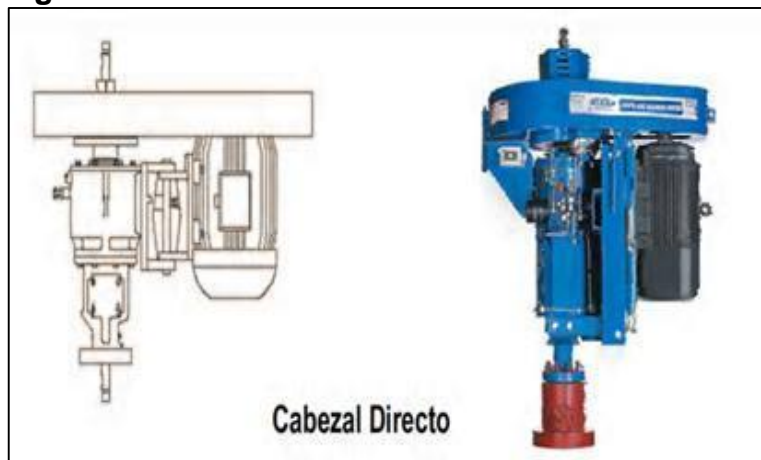
⁹ CARRILLO, Jiménez Carlos Raúl. Análisis de fallas de los elastómeros en bombas de cavidad progresiva por efectos de gases ácidos en la producción. Venezuela. Julio 2009.

- Soporte para las cargas axiales que se generan por el peso de la sarta de varillas y la carga que es generada por el diferencial de presión que levanta la bomba es soportada por rodamientos cónicos ubicados en el cabezal de rotación.
- El cabezal de rotación debe soportar el accionamiento electro-mecánico.
- Debe aislar los fluidos presentes en el pozo del medio ambiente, esto se hace a través de un conjunto de sellos que aíslan el eje de rotación del cabezal de producción.
- Evitar el giro inverso de la sarta de varillas, ya que este puede generar daños en equipos como lo son la caja reductora del moto reductor, en el motor eléctrico y de igual manera puede generar que las varillas se desajusten.

El cabezal de rotación puede tener varios arreglos, como lo son:

- Cabezal con motor eléctrico.** La **Figura 4** muestra un cabezal con motor eléctrico, el cual transmite la energía a través del roce entre sus poleas y correas.

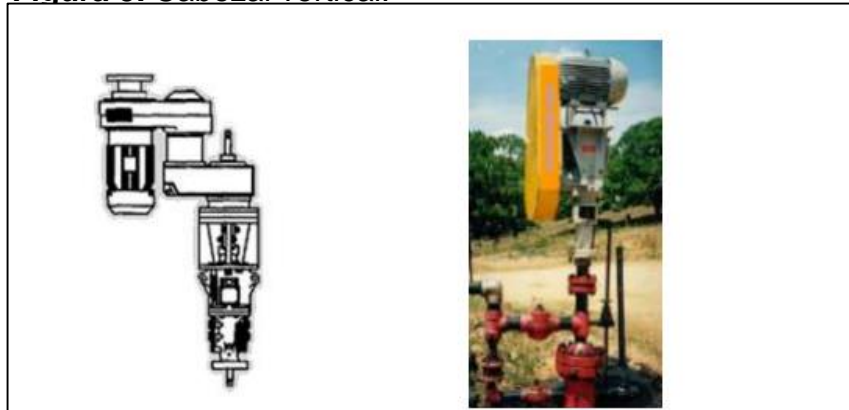
Figura 4. Cabezal con motor eléctrico.



Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

- Cabezal vertical con sistema mecánico de reducción de flujo variable de velocidad.** En la **Figura 5** se aprecia un ejemplo de este tipo de cabezal instalado en campo.

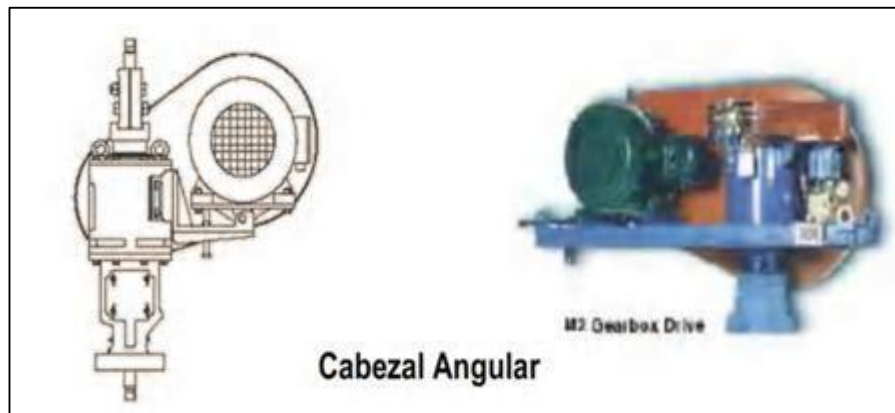
Figura 5. Cabezal vertical.



Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

- c. **Cabezal angular.** En este tipo de cabezal la contra rotación (back-spin) está controlada por un freno a disco automático y de accionamiento hidráulico. Ver **Figura 6.**

Figura 6. Cabezal angular.



Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

1.5.1.5 Sistema de transmisión. Transmite la potencia del motor hasta el cabezal de rotación, permite convertir el movimiento giratorio horizontal de la flecha del motor en un movimiento vertical sobre la varilla pulida.

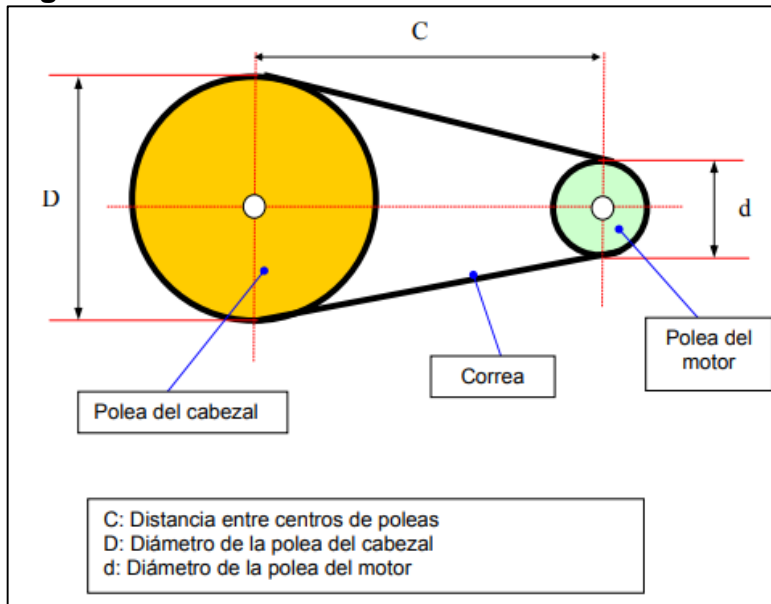
Existen tres tipos de sistema que permiten esto:

- Sistema con poleas y correas.
- Sistema de transmisión a engranajes.
- Sistema de transmisión hidráulica.

En la mayoría de las aplicaciones donde es necesario operar sistemas a velocidades menores de 150 RPM¹⁰, es usual utilizar cabezales con caja reductora interna (de engranaje) con un sistema alternativo de transmisión, como correas y poleas. Esto se hace con el fin de no forzar al motor a trabajar a muy bajas RPM, lo que traería como resultado la falla del mismo a corto plazo debido a la insuficiente disipación de calor.

a. La **Figura 7** explica los criterios para el óptimo diseño del sistema de transmisión.

Figura 7. Diseño de sistema de transmisión.



Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

El movimiento rotacional de la varilla que permite una óptima operación de la bomba PCP es generada por medio de la energía torsional que se produce por el roce entre poleas y correas. La energía se transfiere al accionar el motor a través de la polea conductora (Polea del motor) a la polea conducida (Polea del cabezal) .

1.5.1.6 Barra pulida. Permite la conexión entre la caja de engranes y la sarta de

¹⁰ HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

varillas.

1.5.1.7 Sistema de freno. El frenado que requiere el sistema es una de las funciones principales del cabezal, ya que cuando un sistema PCP está en operación, una cantidad significativa de energía se acumula en forma de torsión sobre la varilla.

Este sistema tiene la capacidad requerida para manejar conjuntos de alta potencia con bombas de gran dimensión.

1.5.2 Equipo de subsuelo.

1.5.2.1 Sarta de varillas. La **Figura 8** es un ejemplo de varillas utilizadas en campo, esta transmite el movimiento giratorio desde superficie hasta el rotor de la bomba. Su diseño permite soportar las cargas mecánicas e hidráulicas presentes en el sistema.

Figura 8. Sarta de varillas.



Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Las varillas se clasifican en dos tipos de acuerdo a la normatividad American Petroleum Institute (API).

- a. **Varillas de bombeo que cumplen las normas API.** Este tipo de varilla se clasifica según su material de fabricación. Se tienen tres tipos C, D y K, a continuación, en las **Tablas 1 y 2**, se muestran sus torques máximos y sus características:

Tabla 1. Clasificación de las varillas bajo las normas de API

Grado Ambiente Acero	C No corrosivo 1530 M	K Corrosivo 4621 M	D No corrosivo 1530 M	D aleación No corrosivo 4142 M	D especial Corrosivo 4320 M	D 4330 No corrosivo 4330M
5/8"	140	140	200	200	200	200
3/4"	240	240	340	340	340	340
7/8"	380	380	540	540	540	540
7/8" piñón 1"	380	380	540	540	540	540
1"	570	570				

Fuente: Tenaris. Products for Progressive Cavity Pumping. 2010. Modificado por los autores 2019.

Tabla 2. Características de las varillas API

Diámetro API (pg)	Área (pg^2)	Peso en el aire (lb/pie)	Cte. De elasticidad ($pg/lb/pie$)	Longitud (pie)
5/8	0.307	1.13	1.270×10^{-6}	25 o 30
3/8	0.442	1.63	0.883×10^{-6}	25 o 30
7/8	0.601	2.2	0.649×10^{-6}	25 o 30
1	0.785	2.88	0.497×10^{-6}	25 o 30
1 1/8	0.994	3.67	0.343×10^{-6}	25 o 30

Fuente: Tenaris. Products for Progressive Cavity Pumping. 2010. Modificado por los autores 2019.

b. Varillas de bombeo que no cumplen con las normas API.

- Varilla Electra: son de acero de gran resistencia, son utilizadas en pozos donde las varillas convencionales API presentan fallas.
- Varilla continua COROD: varillas que no cuentan con cuellos ni pasadores y su diámetro es de $\frac{1}{6}$ [Pg].
- Varilla de fibra de vidrio: es una varilla que por su bajo peso reduce las cargas y el consumo de energía en los equipos de superficie, y reduce fallas por corrosión. De igual manera permite la instalación de la bomba a mayores profundidades, incrementando así la producción.

La selección del tipo de sarta de varilla a utilizar se basa en el torque del arreglo de tuberías.

1.5.2.2 Tubería de producción. Serie de tubos que permite el desplazamiento de los fluidos desde el fondo del pozo hasta superficie. (**Ver Figura 9**).

Figura 9. Tubería de producción.



Fuente. CYLEX, El proveedor de las tuberías, Bogotá. 2018.

1.5.2.3 Bomba. Su función principal es incrementar la presión de los fluidos presentes en el pozo, para llevarlos de fondo a superficie, con la presión suficiente en la cabeza del pozo.

Las bombas utilizadas en los sistemas PCP son de desplazamiento positivo de tipo rotorio.

El principio teórico de la bomba de cavidades progresivas parte de dos condiciones necesarias para obtener las cavidades cerradas: a) el rotor debe tener un diente o lóbulo menos que el estator y cada lóbulo del rotor debe estar siempre en contacto con la superficie interna del estator; b) el estator y el rotor, constituyen longitudinalmente dos engranes helicoidales¹¹.

Las bombas PCP se clasifican según su instalación o geometría.

a. Según su instalación

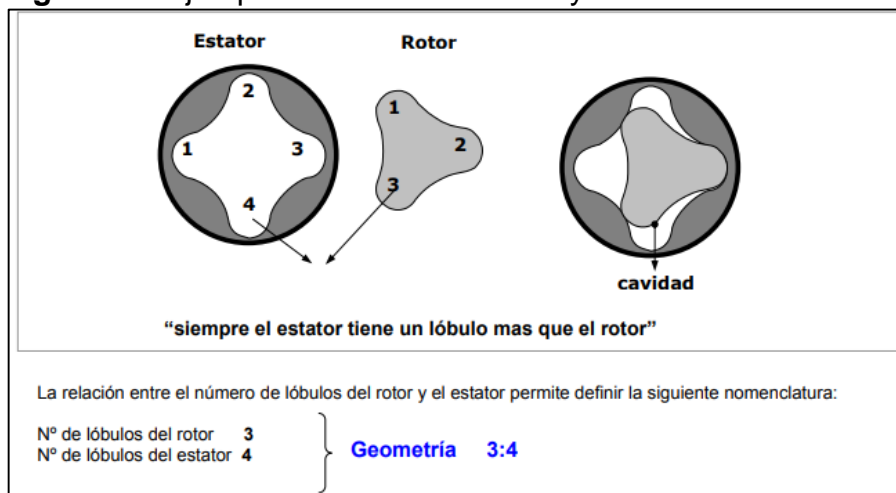
- **Configuración tubular:** También conocida como sistema PCP convencional, en esta configuración primero se instala el estator con la sarta de tubería de producción, y posteriormente el rotor, el cual es bajado con la conexión de varillas. Esta conexión de varillas con el rotor permite transmitir el movimiento giratorio requerido para el levantamiento de los fluidos a superficie.

¹¹ ESQUIVEL, Salvador. Sistema de bombeo por cavidades progresivas aplicado a pozos desviados. [Tesis]. México D.F. septiembre 2009.

- **Configuración insertable:** La diferencia de esta configuración con la tubular, es que, el equipo es ensamblado en superficie y es bajado por la sarta de varillas por dentro de la tubería de producción, disminuyendo así los tiempos de instalación y los costos de esta.
- b. **Según su geometría.** La geometría de la bomba PCP está relacionada directamente con el número de lóbulos del rotor y el estator.

La **Figura 10** explica mediante un ejemplo la relación entre el número de lóbulos del rotor y el estator.

Figura 10. Ejemplo de lóbulos del rotor y el estator.



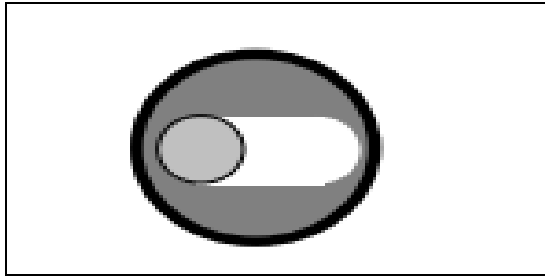
Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Esta relación clasifica a las bombas PCP en dos grupos:

- **Simples.** En este tipo de bombas el número de lóbulos del rotor es 1, mientras que el del estator es de 2 lóbulos. Geometría: 1:2.

La **Figura 11** muestra un corte de una bomba simple, la cual permite apreciar de manera clara su número de lóbulos.

Figura 11. Bomba simple.

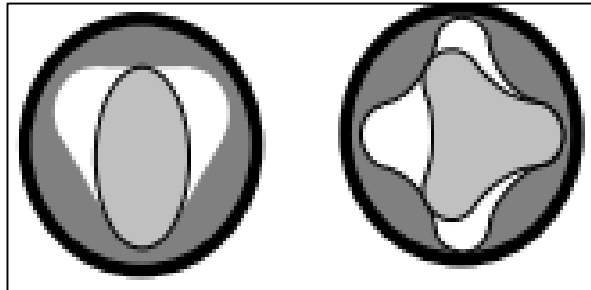


Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo.
Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

- **Multilobulares.** Este tipo de bombas cuenta con rotores de dos o más lóbulos y estatores con tres o más lóbulos, lo que les permite ofrecer un mayor caudal. Geometría: 2:3, 3:4, etc.

La **Figura 12** muestra un corte de bombas Multilobulares, las cuales permiten apreciar de manera clara su número de lóbulos.

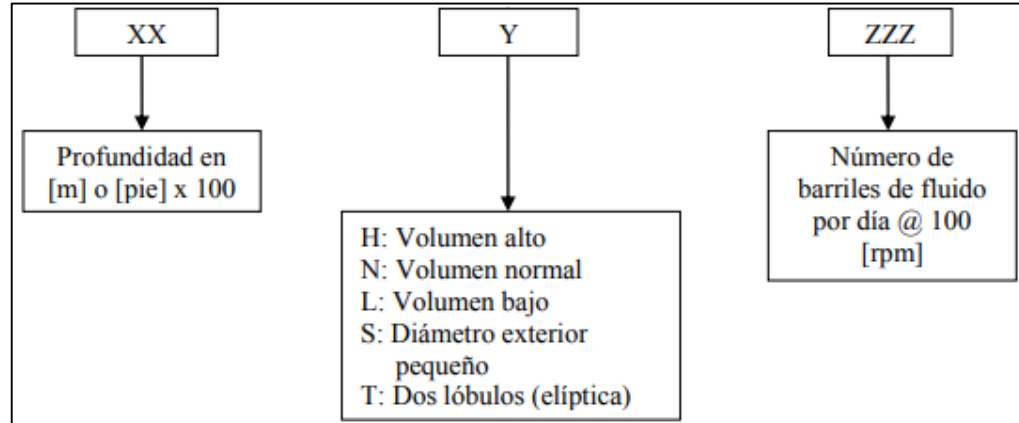
Figura 12. Bombas Multilobulares.



Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo.
Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

La **Figura 13** muestra la denominación según el modelo de la bomba y la relación de rendimiento.

Figura 13. Nomenclatura de las bombas PCP.



Fuente. LÓPEZ, Jaime y SÁMANO, Crispín. Nuevos desarrollos en el bombeo de cavidades progresivas para la optimización de la producción de pozos de aceite. Tesis. México D.F mayo 2011.

1.5.2.4 Separador de gas. Algunos tipos de Bombas, como la bomba PCP se ven afectas por la presencia de gas libre en su interior, para evitar que el gas ingrese a las bombas, se instala un separador de gas, la separación del gas-liquido sucede fuera del ancla de gas, “desviándose el gas al espacio anular entre el revestidor y la tubería de producción y el líquido es enviado a la bomba, sin embargo, los separadores de gas no son 100% eficientes por lo que una porción del mismo es arrastrado a su interior y de allí a la bomba, adicionalmente dentro del separador, por los diferenciales de presión que allí se originan, ocurren separaciones adicionales de gas el cual también es conducida a la bomba; algunos diseños consideran el desalojo de este gas al espacio anular revestidor - eductor”.¹²

1.5.2.5 Rotor. Es la única pieza movable en la bomba (girado por las varillas). Este consiste en una pieza interna conformada por una sola hélice externa con un área de sección transversal redondeada, fabricada de acero al cromo para darle una mayor resistencia a la abrasión. Su función principal es girar de modo excéntrico dentro del estator, creando cavidades que progresan de forma ascendente y lograr de esta manera bombear el fluido.

Estos son fabricados a partir de una barra cilíndrica de acero en un torno especial. Luego de ser mecanizado se recubre con una capa de un material duro. Generalmente se trata de un recubrimiento con un proceso electroquímico de

¹² CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013.

cromado.¹³ El diámetro de estos varia y así mismo el espesor de cromado que los recubre, permitiendo así un óptimo ajuste de la interferencia.

En la **Figura 14** se presenta ejemplo de un rotor.

Figura 14. Rotor.



Fuente. ALIBABA.COM PCP bomba de tornillo piezas de repuesto Barra de acoplamiento, estator, rotor, varilla roscada, arbusto varilla de bombeo. 2018.

1.5.2.6 Estator. Generalmente se encuentra conectado a la tubería de producción, su parte externa está conformada por una camisa de acero revestida internamente por un elastómero sintético, siendo una hélice doble interna moldeada. El estator cuenta con una barra horizontal en la parte superior para sostener el rotor y a su vez es el punto de espaciado del mismo.

El proceso de fabricación del estator consiste en la inyección del elastómero al tubo. Primero se recubre la superficie interna del estator con un adhesivo y después se inyecta el polímero a alta presión y temperatura entre la camisa de acero y el núcleo, el cual es similar a un rotor de dos lóbulos.¹⁴

En la **Figura 15** se presentan ejemplos de distintos estatores. Cada uno de ellos diseñado con el fin de satisfacer los requerimientos que presente el yacimiento que se desee producir.

¹³CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013.

¹⁴ LÓPEZ, Jaime y SAMANO, Crispín. Nuevos desarrollos en el bombeo de cavidades progresivas para la optimización de la producción de pozos de aceite. Tesis. México D.F mayo 2011.

Figura 15. Estator.



Fuente. ALIBABA.COM PCP bomba de tornillo piezas de repuesto Barra de acoplamiento, estator, rotor, varilla roscada, arbusto varilla de bombeo. 2018.

1.5.2.7 Elastómero. Es una goma en espiral en el cual se encuentra moldeado el perfil de doble hélice del estator (Ver **Figura 16**). El elastómero tiene la capacidad de ser estirado dos veces su longitud y recobrar inmediatamente su longitud original.

Se tienen una serie de características para una selección óptima del elastómero, de acuerdo a las condiciones del pozo:

- Elasticidad: es la fuerza que se requiere por unidad de superficie para estirar una unidad de longitud.
- Dureza: es la fuerza necesaria para deformar la superficie del estator.
- Permeabilidad: para prevenir la descompresión explosiva en pozos de gas libre en la succión de la bomba.
- Resiliencia: velocidad para lograr volver a su forma original y poder sellar nuevamente las cavidades.
- Resistencia al corte: es la fuerza que se requiere para lograr cortar la muestra en condiciones ASTM (American Society for Testing and Materials).
- Resistencia a la abrasión.

A continuación, se describen las características de algunos elastómeros disponibles en el mercado.

- a. Elastómero 159.** Es un co-polimero butadieno-acrilonitrilo con 45% de Nitrilo (es un caucho). Su distribuidor (y fabricante) lo utiliza como estándar para comparación de la solidez y resistencia química de los Elastómeros, así como

también para definir los rangos de temperatura en las especificaciones de los rotores.

Se utiliza corrientemente en fluidos que contienen hasta 6% de H₂S y 3% de aromáticos. A 30 °C (86 °F) resiste hasta 6% de aromáticos. La temperatura de servicio alcanza 120 °C (248 °F), la resistencia a la abrasión es buena hasta 40 °C (104 °F). Tiene excelentes módulos de corte y desgarramiento. Una de sus mayores ventajas es su resistencia a la descompresión explosiva.¹⁵

b. Elastómero 199. Es un co-polimero butadieno-acrilonitrilo con 50% de nitrilo. Su resistencia a los aromáticos es buena, se ha utilizado con éxito en fluidos con 13% de aromáticos a 40 °C (104 °F). Su resistencia a la abrasión es baja. El módulo de corte es excelente y su resistencia a la temperatura es levemente mejor a la del 159.¹⁶

c. Elastómero 198. Un butadieno-acrilonitrilo hidrogenado (no es un caucho). Este Elastómero fue desarrollado para obtener una mayor resistencia al H₂S y a mayor temperatura que la del caucho. La resistencia a la abrasión es buena. El módulo de corte es excelente. La resistencia a los aromáticos no es tan buena como la de los Elastómeros tipo caucho. La temperatura máxima de servicio recomendada es de 160 °C (320 °F), sin embargo, sigue siendo probado al respecto.¹⁷

Figura 16. Elastómero.



Fuente. CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting El tigre, Venezuela. Septiembre 2013.

¹⁵ CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. P 24.

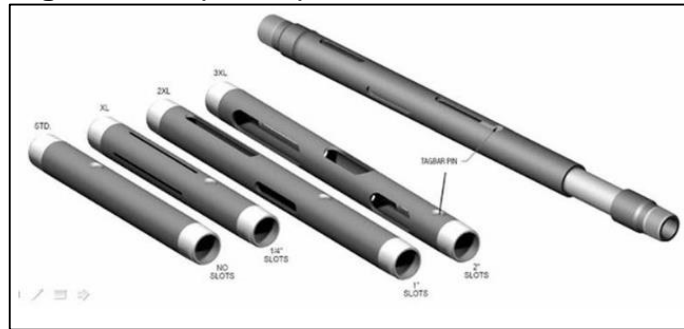
¹⁶ CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. P 25.

¹⁷ CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. P 25.

1.5.2.8 Niple de paro. Tubo de pequeña longitud que va roscado en el extremo inferior del estator, sus funciones principales son, ser el punto de tope al rotor cuando ocurre su espaciamento, evitar que el motor y/o las varillas lleguen al fondo del pozo en caso de que estas últimas se desconecten.

Los niples de paro más comunes son de rosca doble (**Ver Figura 17**), con una rosca hembra en su extremo superior, la cual va roscada al estator y en su extremo inferior se encuentra una rosca macho de la misma medida, la cual permite instalar debajo el ancla de torque o cualquier otro elemento.

Figura 17. Niple de paro.



Fuente. Weatherford. Curso básico para técnicos PCP. Pág. 47.

1.5.2.9 Ancla de torsión. Se conecta debajo del niple de paro y se fija a la tubería de revestimiento mediante cuñas verticales, las cuales impiden el giro del estator cuando se arranca la bomba. Su función es evitar el desprendimiento del tubing cuando se gira la sarta en el sentido de las agujas del reloj y las vibraciones generadas por el giro de la hélice del rotor dentro del estator.

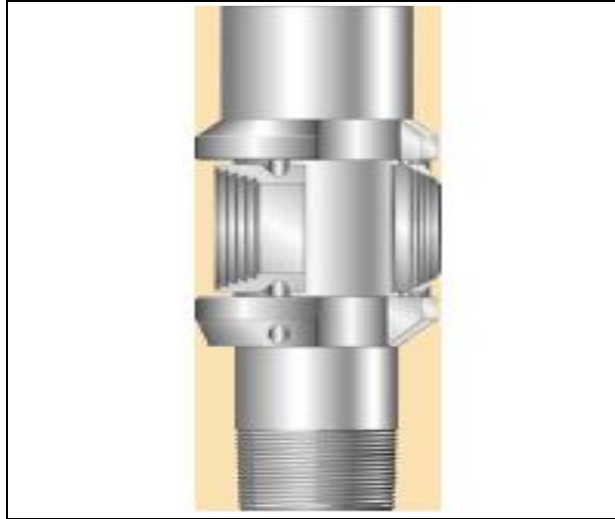
En la industria petrolera se cuentan con diferentes tipos de anclas de torsión, a continuación, se hablará de las características de dos de ellas.

a. Características ancla modelo Ex calibre (Ver Figura 18):

- Contacto con el revestimiento en tres puntos.¹⁸
- Cuenta con resortes que permiten prolongar el tiempo de vida y resistencia a la corrosión.

¹⁸ Weatherford. Curso básico para técnicos PCP. p 46.

Figura 18. Ancla Ex calibre.

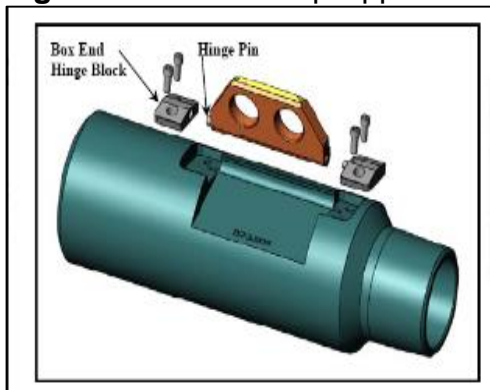


Fuente. Weatherford. Curso básico para técnicos PCP. Pág. 46.

b. Características ancla modelo Torqstopper II (**Ver Figura 19**):

- Tiene un solo punto de contacto con el revestimiento.
- Slim hole.

Figura 19. Ancla Torqstopper II.

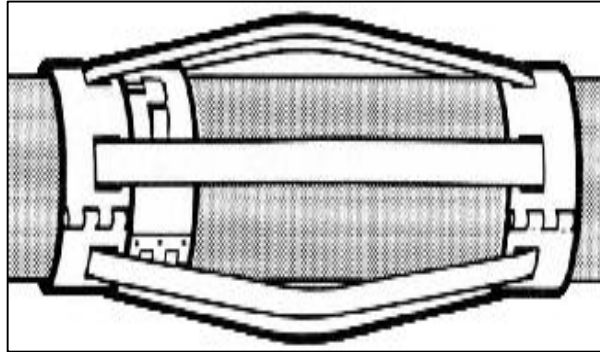


Fuente. Weatherford. Curso básico para técnicos PCP. Pág. 46.

1.5.2.10 Niple espaciador. Su función es permitir el movimiento excéntrico de la cabeza del rotor cuando el diámetro del tubing no lo permite.

En la **Figura 20** se observa un Niple espaciador ajustado al sistema.

Figura 20. Niple espaciador.



Fuente. RONALDO PADILLA CORNEJO
Bombeo por cavidades progresivas.

1.6 FLUIDOS QUE MANEJA LA BOMBA PCP

El sistema de levantamiento artificial con bomba PCP proporciona un mecanismo el cual tiene como ventaja dejarse operar en pozos que presenten una producción de fluidos muy viscosos. Otra de las ventajas más importantes de la PCP con respecto a la clase de fluidos que esta puede bombear de fondo a superficie es que tolera una alta producción de sólidos en cualquier tipo de crudo que se piense extraer; esta podría ser la razón fundamental para que sea seleccionada como la alternativa técnico-económica más apropiada para la explotación en pozos que presenten esta condición. Además de lo dicho anteriormente también cabe destacar que esta bomba puede manejar hasta un 100% de corte de agua y puede operar satisfactoriamente con presencia de gas. Entre los tipos de crudos que este sistema de levantamiento puede manejar tenemos:

1.6.1 Crudo liviano. Es el tipo de crudo más fácil de extraer y transportar debido a que tiene un grado API mayor a 31,1 y está compuesto por una gran cantidad de hidrocarburos con bajo peso molecular. Con este tipo de crudo se busca una mayor obtención de combustible como diésel, gasolina y queroseno.

1.6.2 Crudo mediano. Cuenta con un grado API entre 29,9-22 y una concentración mediana de hidrocarburos con bajo peso molecular, permitiendo así su fácil transporte y la obtención de combustibles y materias primas para polímeros y parafinas.

1.6.3 Crudo pesado. Es un crudo complicado de transportar debido a que su grado API está entre 21.9-10 y cuenta con una gran cantidad de hidrocarburos de mediano peso molecular, gracias a este tipo de crudo se obtiene la mayor cantidad de parafinas, combustibles, polímeros y aceite.

1.6.4 Crudo extrapesado. Tipo de crudo que tiene un API menor o igual a 10 grados, el cual tiene una menor concentración de hidrocarburos con menor peso molecular, lo que implica que este sea difícil de extraer y transportar.

1.7 CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESIVAS

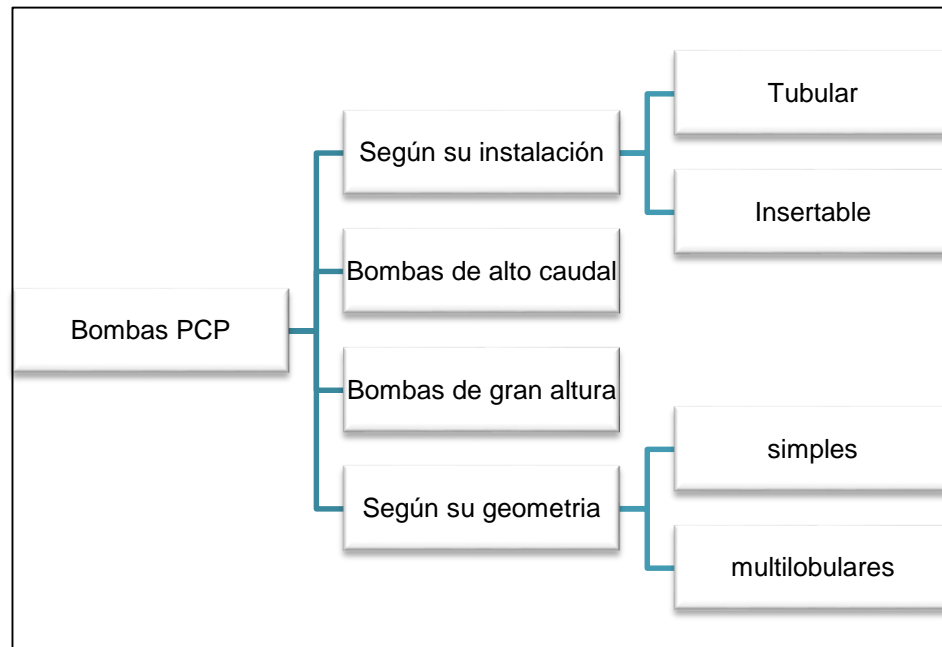
Existen dos tipos de bombas de cavidades progresivas, cada uno de estas con distintos criterios que distinguen la una de la otra.

En primer lugar, se tienen las bombas industriales, las cuales pueden llegar a desempeñarse en procedimientos como el procesamiento de alimentos, en el agro, en plantas de tratamientos de agua, entre muchas otras.

Como segunda clasificación se encuentran las bombas de cavidades progresivas para aplicaciones petroleras, las cuales se emplean en la industria para la extracción de crudo de fondo a superficie, para la recuperación de fluidos de perforación y en la transferencia de fluidos ácidos.

Para lo que compete a este trabajo se describirán a continuación únicamente las bombas de cavidades progresivas destinadas a extracción de petróleo y gas, las cuales tienen la siguiente clasificación (**Ver Figura 21**):

Figura 21. Clasificación de las bombas PCP.



Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008. Modificado

1.7.1 Según su instalación.

1.7.1.1 Bombas tubulares. Para este tipo de bombas el rotor es completamente independiente del estator. El rotor es conectado a la sarta de cabillas y bajado a pozo. Con respecto al estator este se conecta a la tubería de producción y es bajado a pozo. Este tipo de bomba tiene la ventaja de manejar una mayor capacidad volumétrica, no obstante, tiene la considerable desventaja de estar obligada a extraer todo su completamiento de producción al momento en que se requiera reemplazar el estator.

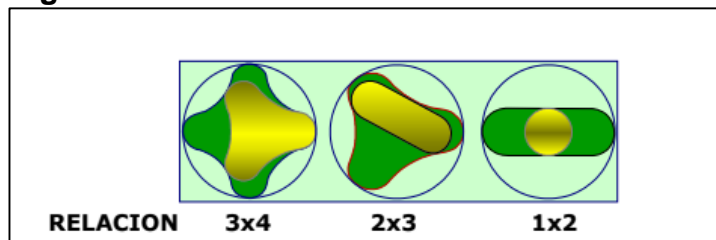
1.7.1.2 Bombas tipo insertable. En este tipo de bombas, aun así, sean elementos independientes el estator y el rotor, ambos son ensamblados como un conjunto único el cual es bajado a pozo mediante la sarta de cabillas hasta el punto en que se conecta en la zapata o con un niple de asentamiento el cual es instalado previamente en la tubería de producción. Al estar limitado el diámetro al interno de la tubería de producción esta bomba tiene el inconveniente de manejar bajas tasas de producción, pero a su vez ofrece el beneficio de no tener que extraer toda la tubería de producción en dado caso que se deba reemplazar, por lo que se ahorraría en tiempo y costos.

1.7.2 Según se geometría.

1.7.2.1 Bombas geometría simple. Este tipo de bombas tienen relación 1x2, lo que quiere decir que el rotor tiene un solo lóbulo, mientras que el estator dos.

1.7.2.2 Bombas Multilobulares. Este tipo de bomba (Ver Figura 22) al tener mayor número de lóbulos ofrece la ventaja de manejar caudales más elevados con respecto a las de geometría simple. Adicional a esto si se considera el mismo diámetro, las Multilobulares pueden desplazar una mayor capacidad volumétrica, lo que da cabida a obtener bombas insertables de mayor tasa.

Figura 22. Bombas Multilobulares.



Fuente. CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013.

1.7.3 Bombas de alto caudal. Estas dependen netamente del fabricante, ya que cada uno ofrece bombas con alto caudal o alto desplazamiento, el cual viene dado por el diámetro de la bomba y la geometría de las cavidades.

1.7.4 Bombas de gran altura. Este tipo de bombas presentan rotores con valles y crestas más cercanas, las cuales tienen un mayor número de etapas por unidad de longitud y, en consecuencia, mayor altura de descarga.

En el **Cuadro 2** se nombran las características más importantes de los tipos de bombas PCP.

Cuadro 2. Bombas PCP

TUBULAR	INSERTABLE	SIMPLE	MULTILOBULAR
Mayor capacidad volumétrica.	Maneja bajas tasas de producción.	Maneja menor capacidad volumétrica que las Multilobulares.	Maneja caudales más elevados con respecto a las de geometría simple.
Se tienen que extraer todo su completamiento de producción para reemplazar el estator.	No se tiene que extraer toda la tubería de producción para reemplazar el estator, se tiene un ahorro en tiempo y costos.	Tienen relación 1x2 del número de lóbulos.	Sus rotores son de dos o más lóbulos y estatores con tres o más lóbulos.

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008. Modificado por los autores 2019.

1.8 NOMENCLATURA SEGÚN EL FABRICANTE

A continuación, en la **Tabla 3**, se presenta la nomenclatura de algunos fabricantes de bombas PCP de subsuelo en el mundo.

Tabla 3. Nomenclatura según el fabricante.

FABRICANTE	TIPO DE BOMBA	EJEMPLO	SIGNIFICADO
Estados unidos (USA)	Geometría simple	60N095	095= tasa en barril por día (bpd) a 100rpm y 0 head. 60= $60 * 10^2$ head máximo en pies de agua.
Francés	Geometría simple	60TP1300	1300=head máximo en metros de agua. TP= Tubing Pump (bomba tubular). 60= tasa de $60m^3/d$ a 500 rpm y 0 head.
	multilobulares	840ML1500	Las especificaciones son iguales a la nomenclatura anterior, solo varía en que ML es MultiLobular.
Canadá	Geometría simple	40-200	200= tasa en barriles por día (bpd) a 100 rpm y 0 head. 40= $40 * 10^2$ head máximo en pies de agua.
Brasileño	Tubulares	18.35-1500	1500= tasa máxima en barriles por día (bpd) a 500 rpm y 0 head. 35= diámetro del rotor en milímetros. 18= 1800 lpc de diferencial máximo de presión o bomba de 18 etapas.
	insertables	18.35-400IM	Las especificaciones son iguales a la nomenclatura anterior, varía en que esta es una bomba (IM) de tipo insertable con zapata de anclaje modificada.

Fuente. CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. pág. 63. Modificado por los autores 2019.

1.9 CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS DE LAS BOMBAS PCP

Las bombas PCP tienen dos características principales, estas son:

1.9.1 Desplazamiento volumétrico o caudal. Capacidad que tiene una bomba para desplazar cierto volumen de fluido en un lapso de tiempo. Este valor generalmente se expresa en unidades de barriles de fluido por día o metros cúbicos de fluido por día a determinadas rpm y head.

En forma unitaria, el desplazamiento es el volumen generado por la bomba a cero altura por una revolución completa del rotor.¹⁹

Uno de los criterios es que por una vuelta de rotor el fluido avanza una distancia igual al paso de la bomba o lo que es lo mismo, la longitud de una cavidad (la definición del paso de la bomba, varía de un fabricante a otro).²⁰

1.9.2 Altura de descarga (head). Capacidad que tiene una bomba PCP para vencer la presión hidrostática y poder llevar los fluidos de fondo a superficie. Este valor se puede expresar de dos maneras, como presión con unidades como Lpc, bares, etc.; o como altura de fluido con unidades como mts, pies, etc.

Este valor está en función del número de etapas con el cual cuenta la bomba. Por etapa se entiende como la longitud mínima que debe tener una bomba para que esta pueda bombear el fluido; la longitud de una etapa es igual a la longitud de una cavidad.

Cada etapa genera una presión diferencial en sus extremos, entre una cavidad y la siguiente de modo que la presión diferencial se incrementa de una etapa a la siguiente dentro de la bomba; por esta razón, la presión (o altura) de descarga es proporcional al número de etapas.²¹

De igual manera hay factores como la velocidad de operación y el head que afectan el óptimo funcionamiento de la bomba, generando consecuencias en la eficiencia volumétrica o desempeño de la misma.

Por otra parte, el desplazamiento y la capacidad para transportar los fluidos de fondo a superficie, están directamente asociados con la interferencia, la cual se define como “la diferencia entre el diámetro del rotor y el diámetro menor de la cavidad del estator, esta garantiza que exista el sello entre las cavidades que permite la acción de bombeo”²².

Así mismo, las bombas PCP pueden presentar un fenómeno que es conocido como escurrimiento o resbalamiento, esto ocurre cuando la bomba es sometida a un diferencial de presión entre su succión y su descarga, en este momento el fluido intenta romper el sello existente entre las cavidades para regresar a las cavidades

¹⁹ CHACÍN, Nely. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. P 50.

²⁰ CHACÍN, Nely. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. P 50.

²¹ CHACÍN, Nely. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. P 52.

²² CHACÍN, Nely. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. P 54.

anteriores. El resbalamiento está en función de la interferencia de la bomba cuando esta se encuentra en operación, viscosidad del fluido y del diferencial de presión presente en la bomba.

Finalmente cabe destacar que una baja interferencia originaría un alto escurrimiento, pero una interferencia de operación excesiva producirá un torque de fricción muy alto que podría conducir eventualmente a la destrucción del estator (elastómero)²³.

1.10 SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS

En principio, para que se logre un óptimo diseño de un método de producción es necesario que se cuente con datos de entrada sumamente confiables con el fin de garantizar un diseño apropiado. Es necesario aclarar que no existe un diseño único y que este además depende de muchos factores técnico-económicos incluyendo los requerimientos del yacimiento en el que se va a implementar dicho sistema.

Para el diseño o selección de equipos existen diversos tipos de ecuaciones, tablas, nomogramas, etc; los cuales en su momento fueron elaborados con base en una serie de suposiciones, las cuales no siempre evidencian las características del campo. Para ciertos casos se cuenta con factores de corrección que permiten ajustar los resultados obtenidos de las gráficas, aun así, estos arrojan resultados lo más aproximados posibles, es decir, aun no se ha logrado que estos sean completamente exactos.

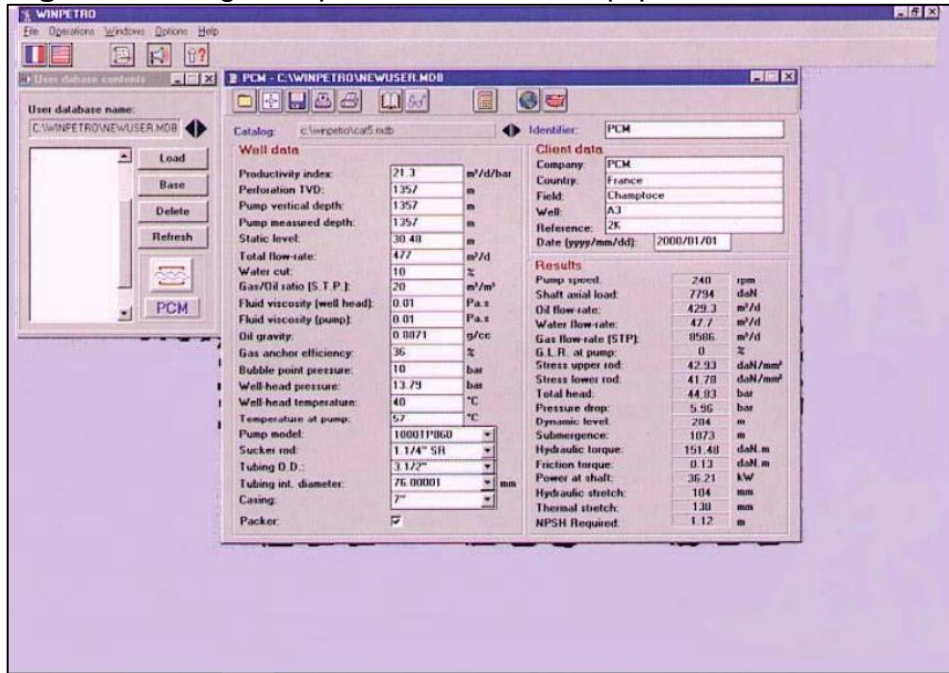
Únicamente después de que se tenga un amplio y claro conocimiento de los factores y variables que hacen parte del sistema pozo-Completación, contando con estadísticas de respaldo sobre el desempeño correcto de equipos diseñados y ya operando en campo es que se puede llegar al desarrollo de un diseño manual de una PCP a modo de aproximación. No obstante, bajo ciertas condiciones es posible que el comportamiento del sistema varíe desde el punto de vista hidráulico y mecánico, esto debido al constante dinamismo presente en operaciones petroleras; tales condiciones podrían ser: alta relación gas líquido, presencia de crudos altamente viscosos, pozos de alto caudal, pozos desviados, entre otros.

Con el fin de sobrellevar lo dicho anteriormente, se elaboraron diferentes softwares que incluyen una serie de algoritmos matemáticos con el fin de tratar de predecir presentes y futuros comportamientos multifásicos, mecánicos e hidráulicos que ayuden a darle explicación al comportamiento del pozo.

²³ CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. P 55.

A continuación, la **Figura 23** muestra una tabulación con datos de entrada que requeriría normalmente uno de este software, los cuales le ayudarían al programa a predecir el comportamiento del yacimiento.

Figura 23. Programa para selección de equipos PCP.



Fuente. CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013.

Cabe aclarar que antes de usar estos tipos de programas, los cuales se sabe que son los más eficaces y precisos a la hora de realizar el diseño de un sistema con bomba de cavidades progresivas, se debe tener un conocimiento sobre un conjunto de parámetros entre los cuales se incluyen datos a profundidad del yacimiento, características de los fluidos que este contenga y datos mecánicos del pozo y superficie.

Para una adecuada selección de cada una de las herramientas que componen el sistema PCP en subsuelo se necesita tener en cuentas las siguientes recomendaciones:

- Selección y profundidad de la bomba: para la selección adecuada de la bomba se deben conocer datos como presiones estáticas y fluyentes del yacimiento, el caudal máximo al cual se va a producir y presión de burbuja. Se construye la curva de índice de productividad, en la cual, la tasa máxima se calcula asignándole el valor de 0 a la presión estática del pozo; no obstante, en casos

prácticos la tasa más alta que se podría obtener depende de la profundidad de asentamiento y sumergencia de la bomba. Es de suma importancia realizar el cálculo de gas libre (barriles diarios) y el corte de agua, ambos a la profundidad de asentamiento de la bomba. El caudal total que esta manejará será la sumatoria de las tasas de los 3 fluidos a producir, en este caso petróleo, agua y gas.

- Seguido de calcular estas variables y tomando como referencia las curvas tipo de las bombas suministradas previamente por los fabricantes, se puede determinar la velocidad de operación y los requerimientos de potencia en el eje de impulsión. Conociendo esto se determinan los grados de inclinación y diámetros a implementar en cabillas, tuberías de producción y demás equipos de subsuelo y superficie; entre los cuales se incluye el cabezal de rotación y el motor con su respectivo variador el cual será el que brindará la energía del sistema.
- Torque requerido por el sistema y diámetro de la sarta de varillas: El torque del sistema se compone de torque hidráulico y el torque por fricción. El primero es la fuerza que se requiere para elevar el fluido, esta se da en función al desplazamiento de la bomba y su altura hidráulica. En lo que respecta al torque generado por la fricción de la sarta de varillas girando en el fluido, se da en función de la velocidad de rotación, su diámetro y longitud, así como el espacio anular entre las varillas y la tubería de producción.
- Para el diseño de la sarta de varillas, se debe tener en cuenta el componente mayor del esfuerzo soportado por la cabilla el cual es el torque que se produce en la bomba. Si se llega a presentar un sobredimensionamiento en el diámetro de las varillas, tendrá como consecuencia que se reduzca el diámetro anular entre los acoples y tubería, lo que produce un aumento en la presión de descarga en la bomba y por lo tanto un aumento del torque hidráulico.
- Para una adecuada selección del motor-reductor, es preciso calcular el torque requerido en superficie a la velocidad máxima esperada del bombeo. El torque dependerá del tipo de bomba instalada, el diferencial de presión que presenta y el roce de las varillas con el fluido producido. Una vez conocido, se selecciona la correcta caja reductora cuya relación de transmisión permita obtener la máxima velocidad de rotación esperada para la sarta.

1.11 INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS

El sistema de levantamiento artificial con bomba PCP está compuesto por dos secciones, de subsuelo y superficie, las cuales requieren de un perfecto ensamblaje para su óptimo funcionamiento. A continuación, se describe la forma correcta de instalación de cada una de las partes que componen el sistema.

1.11.1 Equipos de subsuelo.

1.11.1.1 Conexión del niple de paro. Algunos fabricantes de bombas PCP tienen incorporado en el estator el niple de paro, pero hay otros fabricantes que cuentan con estos equipos por separado, cuando es así el operador decide en cuál de los dos extremos del estator es donde será conectado el niple de paro.

El niple es conectado directamente al estator y en su otro extremo (abajo) se pueden roscar ancla de gas, filtros de arena, etc.

1.11.1.2 Bajar tubería de producción. Toda es bajada al pozo apretando fuerte las juntas. Estas deben ser muy bien apretadas para evitar que el movimiento giratorio del rotor pueda llegar a generar una reacción en el estator, la cual tiende a desconectar la tubería. A continuación, en la **Tabla 4** se muestran torques óptimos para diferentes tuberías.

Tabla 4. Torques recomendados para tuberías de producción

DIÁMETRO	GRADO	PESO (Lbs/pie)	TORQUE OPTIMO (Lbs/pie)	TORQUE MAXIMO (Lbs/pie)
2-3/8"	J-55	4,70	1290	1610
	C-75	4,70	1700	2130
	C-75	5,95	2120	2650
	N-80	4,70	1800	2250
	N-80	5,95	2240	2800
2-7/8"	J-55	6,50	1650	2060
	C-75	6,50	2170	2710
	C-75	8,70	2850	3560
	N-80	6,50	2300	2880
	N-80	8,70	3020	3780
3-1/2"	J-55	9,30	2280	2850
	C-75	9,30	3010	3760
	C-75	12,95	4040	5050
	N-80	9,30	3200	4000
	N-80	12,70	4290	5360
4"	J-55	11,0	2560	3200
	C-75	11,0	3390	4240
4-1/2"	J-55	12,75	2860	3180

Fuente. CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013.

1.11.1.3 Conexión del rotor a la sarta de varillas. Al rotor se le rosca un niple de varilla, este debe estar totalmente recto, a 2-4 pies al rotor apretándolo lo más fuerte posible. Se recomienda engrasar el rotor antes de ser bajado, para

facilitar su inserción en el estator.

1.11.1.4 Bajar la sarta de varillas. Estas se deben bajar al pozo lo más apretado posible.

1.11.1.5 Espaciamiento del rotor. Para ofrecer un factor de seguridad donde se garantice que se va a aprovechar toda la longitud del estator y se puedan formar todas las cavidades de la bomba, es necesario que la longitud del rotor sea ligeramente mayor que la del estator.

El espaciamiento del rotor es la distancia necesaria entre el pasador del niple de paro y el extremo inferior del rotor, para garantizar la formación de todas las etapas posibles y evitar el contacto del rotor con el niple de paro en condiciones de operación. Para calcular esta separación (S) se debe considerar la elongación que ha de experimentar la sarta de cabillas en condiciones dinámicas, esta elongación se debe al esfuerzo axial que actúa sobre la sarta generado por la carga debida al diferencial de presión que levanta la bomba; además se suma la elongación térmica, producto de la temperatura a lo largo del pozo.²⁴

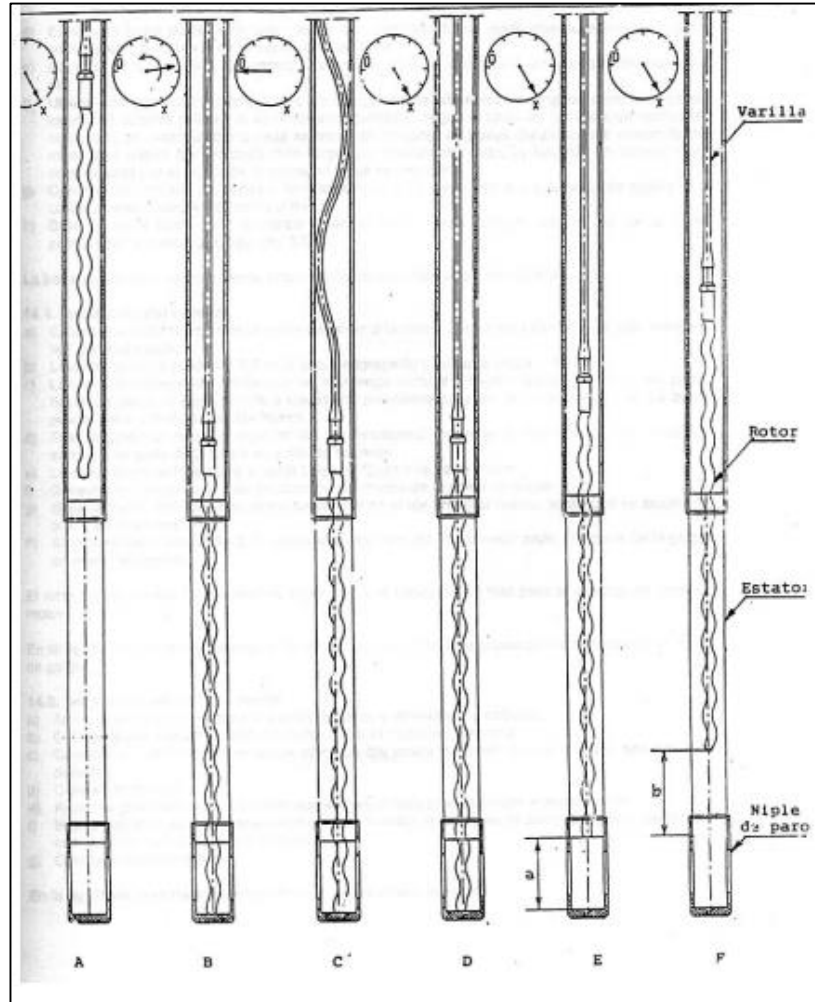
Este valor se puede calcular a través de programas comerciales o puede ser suministrado por el fabricante por medio de nomogramas y tablas.

Operacionalmente este proceso es realizado de la siguiente manera:

- Se inicia a bajar la sarta de varillas apretando cada una de sus conexiones.
- Se debe tomar el peso total de la sarta, antes de que la última de las varillas sea bajada al pozo, este peso es la suma del peso de las varillas más el bloque viajero.
- Cuando el rotor inicia a ingresar en el estator el indicador de peso inicia a tener cambios, la sarta de varilla inicia a girar lentamente en sentido horario.
- Se debe continuar bajando la sarta de varillas hasta que el elevador quede libre como se muestra en la **Figura 24** en la sección B y C, en este momento solo se debe estar registrando el peso del bloque viajero.

²⁴ CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. P 88.

Figura 24. Espaciamiento del rotor.



Fuente. CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013.

- Se debe realizar una marca sobre la varilla al ras de la Te de producción, este se conoce como punto muerto, esta marca se observa en la sección E con el nombre de a.
- Se inicia a subir el encabillado hasta que se indique el peso de la sarta de varillas más el bloque viajero, como se observa en la sección B. a partir de este momento la sarta de varillas se encuentra en tensión y el rotor se ha separado del pasador de niple de paro, allí se marca el punto b.
- A partir del punto b se debe levantar las varillas hasta la distancia S. en este punto el rotor se encuentra correctamente espaciado.

1.11.2 Equipos de superficie.

1.11.2.1 Instalación del cabezal de rotación. Para esta instalación es muy importante seguir al pie de la letra las normas de seguridad, ya que realizar esta operación es muy riesgo debido a la manipulación de cargas elevadas y a la alta presión en el cabezal del pozo.

A continuación, se dará un paso a paso a seguir para la instalación del cabezal de rotación:

- Se debe levantar el eje del cabezal por los anillos de sujeción con guayas.
- El paso a seguir es conectar el eje del cabezal para ajustar las varillas a este, este procedimiento se realiza utilizando llaves manuales y extensiones.
- Se debe elevar el cabezal de rotación para retirar el elevador de varillas.
- Lo siguiente es fijar el cabezal a la brida sobre la T de producción, se deben apretar fuertemente los pernos.
- Se debe ajustar el mecanismo antiretorno y se procede al llenado de la tubería de producción para la prueba de presión.
- Si es cabezal es lubricado por aceite, se debe retirar el tapón ciego y colocar en su lugar el tapón de venteo, el cual permite que los gases sean liberados y los sellos se mantengan en buen estado.²⁵
- Ajustar el/los tornillos de los prensaestopas para poder realizar la prueba de presión, dando el mismo ajuste a cada uno de ellos. Una vez terminada la prueba de presión se deben liberar un poco para permitir la lubricación del eje con los líquidos provenientes del pozo.²⁶

1.11.2.2 Instalación del moto reductor. La instalación de este se ejecuta cuando ya se ha culminado la prueba de presión.

A continuación, se dará un paso a paso a seguir para la instalación del moto reductor:

- El primer paso a realizar es desahogar la presión presente en la tubería de producción.
- Se debe colocar el medio acople.
- El paso a seguir es ubicar el aro espaciador sobre el cabezal de rotación.
- Se debe levantar el motorreductor utilizando guayas.
- El motor eléctrico debe quedar perpendicular a las líneas de superficie y del lado opuesto a donde se encuentra la máquina de servicios de pozos.

²⁵ CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. P 92.

²⁶ CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. P 92.

- El sentido de rotación del motor debe ser el de las agujas del reloj, se debe tomar nota del variador de frecuencia de los parámetros de operación en vacío, como lo son, frecuencia, velocidad, voltaje, etc. Cuando estas variables son tomadas, se debe apagar el equipo.
- El paso a seguir es ajustar el acople mecánico, penetrando todos sus dientes en toda la extensión, la separación entre acople y acople debe ser de solo tres milímetros.
- Se debe arrancar el sistema para comprobar que la hermeticidad es la correcta, “para lo cual el sistema deberá ser capaz de presurizar las líneas de producción”²⁷. Cuando la prueba se dé por terminada se debe desahogar la presión.
- Al finalizar la prueba se debe colocar el tapón de venteo a la caja reductora, el pozo inicia a bombear.
- Finalmente se debe incrementar paulatinamente la velocidad con el sistema en marcha hasta alcanzar la indicada en el programa de instalación, esta velocidad generalmente es menor a la del diseño.

1.11.2.3 Instalación del sistema motriz.

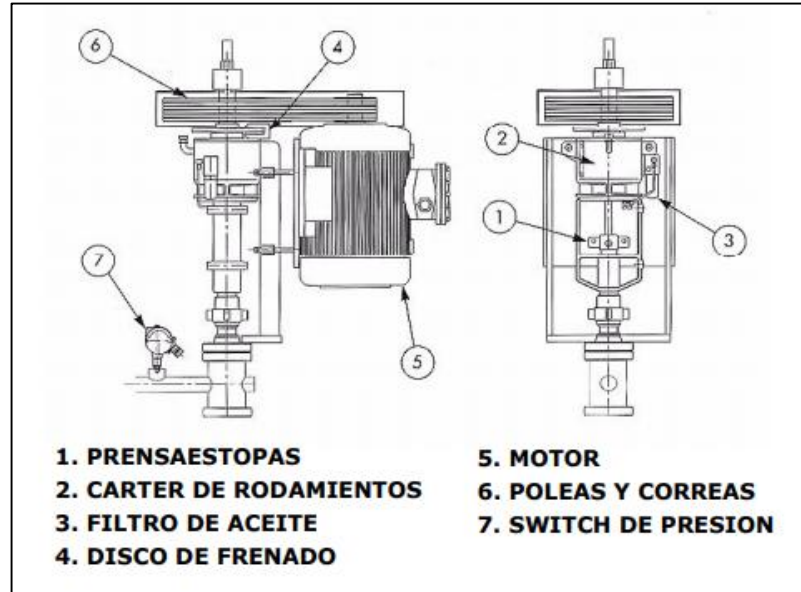
Una vez se cuenta con un motor, se procede a hacer los cálculos necesarios para una adecuada selección de las poleas y finalmente, se inicia la instalación.

- Se debe armar el soporte del motor en la brida del pozo y atornillarlo al cabezal.
- El paso posterior es ubicar la plancha de fijación del motor y fijar este en la misma.
- Lo siguiente a realizar es conectar el cable de alimentación eléctrica del motor.
- Se deben ubicar las poleas.
- Ambas poleas se deben encontrar al mismo nivel, para lograr esto se debe ajustar la altura del motor.
- Se instalan y ajustan las correas mediante los tornillos del gato en la placa de fijación del motor, de esta manera se logra la tensión requerida.
- Se instala el guarda poleas.

La **Figura 25** muestra las partes que componen un sistema motriz completado con correas y poleas.

²⁷ CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. P 93-94.

Figura 25. Completación con correas y poleas.



Fuente. CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013.

1.12 PUESTA EN MARCHA

Justo después de que se tenga una previa y buena instalación de equipos en superficie es imprescindible que se haga una revisión de frenos, retardadores o preventores de giro inverso para así verificar que estos fueron debidamente ajustados. Para una detención deseada en la marcha del equipo es recomendable que la velocidad sea reducida a la mínima permitida por el sistema instalado, esto con el fin de que se garantice que el arranque posterior a dicha detención del sistema sea a la mínima velocidad posible y disminuyendo la probabilidad de que se presente algún tipo de riesgo.

Cuando se dispone al encendido del sistema, es necesario cerciorarse del hecho de que no existan válvulas cerradas a lo largo de la línea de producción del pozo a producir.

El caso considerado como más grave es el de apagado del sistema por fallas eléctricas, puesto que al ponerse en marcha el sistema arrancarían a plena velocidad y a máxima carga ya que las líneas se encuentran llenas y el nivel de fluido bajo en el pozo, lo que genera que el sistema requiera de cierta cantidad de potencia para vencer dicha columna de fluido y la inercia del mismo que se presenta en el eductor y la línea de flujo.

Los equipos como arrancadores suaves y variadores de frecuencia poseen la facultad de programar una rampa de arranque al motor eléctrico, lo que permiten reducir el pico del torque y corriente en la puesta en marcha, logrando de esta manera proteger tanto los componentes eléctricos como mecánicos del sistema.

Al momento de puesta en marcha es necesario que se midan y registren las variables de operación y control, estas forman parte de la información que posteriormente se requerirán para un adecuado diagnóstico y optimización del sistema. Actualmente con el aumento significativo de los variadores de frecuencia en este sistema de levantamiento artificial, se facilita aún más las mediciones de todas estas variables.

Las variables a medir son las siguientes:

- Velocidad de rotación (RPM)
- Frecuencia (Hz)
- Velocidad del motor (rpm)
- Intensidad de la corriente (Amp)
- Tensión de la red (Volt.)
- Tensión de la salida (Volt.)
- Torque (lb-pie)
- Potencia (Kv o Hp)
- Temperatura en el variador de frecuencia (°C o °F)
- Presión en el cabezal del pozo (lpc)

La información anterior se registra en formatos que se anexaran en el expediente del pozo en conjunto con las curvas de la bomba instaladas, etc.

Luego de que se tiene el registro de estos parámetros y después de una verificación de las condiciones de las líneas de flujo, se procede con el arranque; para lo que se hace necesario acoplar el accionamiento a la carga y arrancar en baja velocidad el sistema. Es indispensable que se arranque a baja velocidad de rotación y permitir que el pozo-sistema se estabilice por sí mismo antes de proceder a optimizarlo.

Durante los primeros días de producción se sugiere una visita periódica al pozo para tomar lectura de las variables de operación, para así poder observar el comportamiento del sistema. Además de esto dependiendo de los fluidos producidos y de la temperatura en fondo se debe mirar la relación con el hinchamiento del elastómero; al generarse hinchamiento de este es posible que la eficiencia volumétrica de la bomba sea más baja, ocasionando así que las medidas de torque, potencia, presiones de superficie y la producción propiamente dicha sean relativamente bajas.

Dado el momento en el que se estabilice el sistema “yacimiento-pozo-equipo de levantamiento artificial” se procederá con el proceso de optimización. Durante esta

fase se esperan incrementos en la producción, disminución en la sumergencia de la bomba, incrementos en el torque, en la presión del cabezal y en la potencia requerida.

1.13 PROCEDIMIENTO DE PARE (SHUT-DOWN)

- Se realiza inspección visual del cabezal para verificar ruidos inusuales o problemas.
- Asegurar al personal de servicio en la locación, ya que puede ocurrir un giro inverso descontrolado y los puede lastimar.
- Se debe parar el sistema desde el panel y si se dispone de un variador de velocidad, este debe reducir la velocidad gradualmente hasta detener el equipo.
- Después de detenido el equipo se debe asegurar que no se tenga energía almacenada en el sistema, y luego proceda a inspeccionar visualmente el equipo.

1.14 MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS

Una de las ventajas considerables de los sistemas de levantamiento artificial con bomba PCP es la de requerir poco mantenimiento.

Equipos de subsuelo como estator y rotor, no requieren ningún tipo de mantenimiento, simplemente estos después de un tiempo en operación y al disminuir su eficiencia, se procede a reemplazarlos. No obstante, la bomba recuperada después de un respectivo proceso de pesca, podría ser reutilizada, parcial o totalmente dependiendo del requerimiento que presente; así, el rotor podría ser reutilizado con otro estator o de igual manera el estator se podría reutilizar con otro rotor.

En lo que respecta a la superficie, el mantenimiento se limita exclusivamente con el suministro de grasa o aceite de lubricación a los rodamientos del cabezal y la caja reductora; estos equipos requieren de lubricación periódica según los procedimientos de cada fabricante, aun mas considerando que no cuentan con un indicador de nivel.

Para los sistemas con rodamientos bañados en aceite, se debe cumplir generalmente con los siguientes requerimientos:

- Reemplazo del aceite luego de cumplido el primer mes de operación.
- Luego del primer cambio de aceite se realiza periódicamente un cambio pasados de tres a seis meses (recomendado por el fabricante).
- Entre cada cambio de aceite el operador debe medir constantemente el nivel y en caso de ser necesario añadirle al equipo.

Es de suma importancia asegurarse de que la grasa o el aceite que se esté utilizando cuenten con las propiedades necesarias según el ambiente en el que estará operando el equipo.

A pesar de que el cambio de aceite este estipulado para luego de un mes de operación, es necesario verificar las propiedades del lubricante con el que el fabricante despacho los equipos, ya que estas podrían ser distintas a las requeridas por las normativas en nuestro país, y si este es el caso, el reemplazo del aceite debe realizarse preferiblemente antes de la puesta en marcha del equipo o en un tiempo menor al de un mes. Se considera como la mejor alternativa informarse previamente sobre el aceite que requiere el equipo y exigir al fabricante que lo despache según los requerimientos ambientales al lugar en el que será instalado para operar.

En cuanto a los prensaestopas, al momento en el cual se verifica el lubricante, se deben inspeccionar estos, si se encuentra con una fuga excesiva, se aprietan los empaques realizando un ajuste en la tapa y si esta persiste, se procede a reemplazarlos.

1.15 FABRICANTES/ DISTRIBUIDORES DE EQUIPOS PCP

A continuación, en el **Cuadro 3** se nombran algunos fabricantes y/o distribuidores de equipos PCP en el mercado.

Cuadro 3. Fabricantes/ distribuidores de equipos PCP

Bombas	Cabezales	Moto reductores	variadores
WEATHERFORD	WEATHERFORD	ABB	ABB
KUDU (PCM)	KUDU (PCM)	US MOTORS	TELEMECANIQ UE
NETZSCH	NETZSCH	FLENDER	NORTHLANDER
MOYNO	MOYNO		DANFONSS
BMW	BMW		TOSHIBA
TARBY	TARBY		TB WOODS
GRIFFIN	GRIFFIN		MAGNETEK
BORNEMANN	BORNEMANN		SCHNEIDER

Fuente. Elaboración propia basada en, CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. P 93-130.

Probablemente algunos de estos equipos ya no se encuentren disponibles en el mercado o su fabricante haya cambiado.

2. FALLAS PRESENTES EN EL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBA PCP

El sistema de levantamiento artificial por bomba de cavidades progresivas bajo una correcta selección y monitorio de los equipos es sencillo de instalar y de preservar, permitiendo así, que se facilite la prevención de la generación de una posible falla en la vida productiva del sistema.

En el siguiente capítulo se describen algunos problemas que se pueden presentar en los equipos de los sistemas PCP, las posibles causas que los generan y las acciones recomendadas a realizar para dar solución a estas posibles fallas. Así mismo se habla del manejo y almacenamiento correcto que se le debe dar a este sistema de levantamiento para preservarlo y poder recuperar equipos usados.

2.1 MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE EQUIPOS PCP

La parte del equipo PCP más vulnerable a sufrir daños es el estator, específicamente el elastómero, por ello aprovechar piezas que no se ven afectadas como el rotor y niple de paro de bombas descartadas por daños en el elastómero, tienen como beneficio directo, una disminución en los costos de operación.

A continuación, se mencionan técnicas para el almacenamiento y manejo de equipos PCP nuevos y usados.

2.1.1 Equipos nuevos.

2.1.1.1 Rotores.

- Se debe tener precaución al transportarlos y manipularlos evitando que su superficie cromada sea golpeada.
- Cuando estos vayan a ser almacenados, se debe tener en cuenta que sea un lugar fresco y a la sombra, así mismo se deben guardar en su funda protectora con los guardas roscos de fábrica.
- Estos deben ser almacenados de manera horizontal evitando cualquier tipo de flexión.
- Cuando sean trasladados a pozo en vehículo, deben ir de manera horizontal sin que sus extremos sobresalgan de este.

2.1.1.2 Estatores.

- Cuando sean trasladados a pozo se debe utilizar el equipo más apropiado para su transporte, evitando que sus extremos sobresalgan de este.
- Su almacenamiento se debe realizar en ambientes frescos y a la sombra.

- Al igual que los rotores deben ser almacenados de manera horizontal evitando cualquier esfuerzo transversal que pueda deformarlo.
- Sus extremos deben mantenerse protegidos con los guardas roscos de fábrica.
- Prevenir que los estatores entren en contacto con sustancias o solventes los cuales puedan generar daño a los elastómeros por ataques químicos.

2.1.2 Equipos usados.

2.1.2.1 Rotores.

- Los rotores que no presenten flexión y aún tengan su recubrimiento en buen estado, se proceden almacenar; sino es así, se evalúa si se pueden reparar o no.
- Cuando este sea recuperado del pozo, se procede a lavarlo con gasoil u otro solvente.
- Su rosca debe ser cepillada y limpiada, para posteriormente ser protegida con una guarda rosca.
- Cuando el rotor se encuentre totalmente limpio y seco, este debe ser protegido con tela marcada con pintura o etiquetas en donde se especifique su modelo, medida, origen y marca.

2.1.2.2 Estatores.

- Al igual que los rotores, sus roscas deben ser cepilladas y limpiadas, para posteriormente ser protegidas con guarda roscas.
- Aquellos estatores que no presenten daños en su elastómero serán llevados a banco de prueba y así verificar su estado, para posteriormente ser almacenado.
- Así como los rotores, estos deben ser marcados con pintura o etiquetas, en donde se especifique modelo, origen y marca del estator.
- Cuando el estator sea recuperado del pozo, su parte exterior debe ser lavada con solvente, evitando que este tenga contacto con el elastómero.

2.2 FALLAS GENERALES EN UN SISTEMA PCP

Las empresas colombianas para mejorar su factor de recobro en algunos campos han adoptado la metodología EOR y a partir del desarrollo de campos con crudos pesados, se ha ido aumentando la implementación de los sistemas PCP.

Debido a la globalización y a la competencia que representa el mercado del petróleo en Colombia, las empresas se ven obligadas a buscar nuevas tecnologías y conceptos para la mejora continua del sistema PCP. En la **Cuadro 4** se explican algunas fallas, sus causas y la acción recomendada para remediarlas.

Cuadro 4. Fallas sistema PCP

Problema	Causa probable	Acción recomendada
Caudal intermitente. Consumo más alto del esperado	El rotor se puede encontrar aprisionado por sólidos. Exceso de temperatura o ataque químico. De igual manera puede estar mal espaciado.	Cuando los sólidos están presentes se debe levantar el rotor y lavar el estator. Para temperatura se debe medir en fondo, para ataque químico realizar análisis químico del fluido. Si hay un mal espaciamiento se debe levantar rotor y hacer un re-espacie.
Bajo caudal y baja eficiencia volumétrica	Presencia de alto GOR. El rotor no se encuentra totalmente insertado. El estator se puede encontrar gastado. Pérdida en la tubería. La presión de descarga de la bomba es inferior a la necesaria.	Utilizar algún tipo de ancla de gas. Verificar y corregir el espaciado. Sacar la bomba, revisar y si lo encuentra necesario, reemplazarla. Se debe buscar el tubing roto y cambiar la unión. Se debe verificar por cálculo la altura de elevación necesaria. Cambiar la bomba si es necesario.
Pérdida de velocidad y sin producción	Rotor mal espaciado. Elastómero hinchado. Se presenta alta interferencia entre rotor y estator.	Si hay un mal espaciamiento se debe levantar rotor y hacer un re-espaciado. Cuando se hincha el elastómero se debe sacar la bomba y verificar la temperatura en fondo. Para una alta interferencia se recomienda reemplazar la bomba para otra capacidad de caudal y presión con un distinto ajuste de compresión.

Cuadro 4. (Continuación).

Problema	Causa probable	Acción recomendada
pozo sin producción y motor apagado	Falla de energía eléctrica. Inversión en las fases. Motor quemado.	Verificar el suministro de energía eléctrica. Se debe verificar el sincronismo de fases. Se debe desmontar el motor y chequear si el cabezal se puede rotor, si rota se debe montar un nuevo motor, de lo contrario revisar los demás sistemas.
El motor se encuentra en marcha, pero no hay rotación en el eje de salida de la caja reductora. Sin producción	Caja reductora se encuentra dañada. Se pueden presentar las correas de transmisión dañadas. De igual manera se puede encontrar la polea suelta.	Cambiar la caja reductora y verificar por qué se produjo el daño. Cambiar correas y verificar el consumo de energía que se está teniendo. Se debe cambiar la polea y el chaveto y verificar que queden en óptimas condiciones.
El pozo no levanta presión, pero todo el equipo de superficie se encuentra funcionando. Sin producción.	Se pueden presentar daños en a nivel de completamiento. De igual manera la Válvula check de conexión entre anular y eductor se pueden encontrar invertida o dañada.	Dirigirse a la tabla de los equipos de subsuelo y ver su diagnóstico. Verificar su integridad para saber si existe o no recirculación.
El pozo levanta poca presión, los equipos funcionan bien y se presenta baja producción.	Se puede presentar fuga en la tubería de producción. Problemas con el pozo. De igual manera se puede presentar filtración en la válvula check de conexión entre línea de producción y revestidor.	Detectar dicha fuga y corregirla de inmediato. Revisar las tablas de diagnóstico de los equipos de subsuelo. Se debe verificar la integridad de la válvula y si es necesario reemplazar.

Cuadro 4. (Continuación).

Problema	Causa probable	Acción recomendada
Velocidad normal y sin producción	<p>Rotor y estator dañado.</p> <p>Hay rotación contraria.</p> <p>El rotor no se encuentra insertado en el estator</p> <p>Tubing desenroscado o cortado.</p>	<p>Revisar presión y cambiar partes si es necesario.</p> <p>Verificar la rotación y re-arranque.</p> <p>Se deben verificar las medidas de instalación y re-espacie.</p> <p>Se debe verificar el espaciado. Sacar la sarta de varillas y el Tubing para reparar.</p>
La corriente es mayor de la esperada, se para motor eléctrico.	<p>Hinchamiento en el estator por ataque químico o temperatura.</p> <p>Se encuentra el rotor bloqueado dentro del estator por arena.</p> <p>Baja potencia del motor para su uso.</p> <p>Se presenta falla en la línea de alimentación</p>	<p>Revisar si es adecuado el elastómero seleccionado.</p> <p>Ir circulando el pozo para intentar limpiar.</p> <p>Cambiar a motor adecuado para la aplicación.</p> <p>Se debe verificar las fases en la línea y re-arrancar el sistema.</p>
Se presenta bajo nivel de aceite en un corto periodo de tiempo	<p>El sistema de sello se encuentra dañado o mal ajustado.</p> <p>De igual manera se puede tener suelto el tapón de drenaje.</p>	<p>Se debe verificar el sello, corregir si es necesario y completar hasta el nivel óptimo de aceite.</p> <p>Reapretar el tapón.</p>
Se tiene una excesiva presión en cabeza, los equipos están funcionando correctamente y se tiene baja producción.	<p>Se puede tener una obstrucción en la línea de producción o en el múltiple.</p>	<p>Verificar la línea de producción y el múltiple, corregir la falla de inmediato.</p>



Fuente. Elaboración propia basada en, HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008. Y NETZSCH. Manual de sistemas PCP. 8. Revisión. Noviembre 2008.

2.3 FALLAS PRESENTES EN ROTOR Y ELASTOMERO



Los sistemas PCP en ocasiones presentan fallas que pueden reducir la producción del pozo o en ciertos casos cortar su flujo en su totalidad. Debido a que el reemplazo total de la bomba puede llegar a ser muy costoso, lo más rentable y práctico es identificar el tipo de falla que esta presenta y corregir el daño según el requerimiento que está presente. Identificar la causa probable de la falla no es sencillo, no obstante, una vez recuperados el rotor y el estator, una adecuada inspección puede ayudar en gran medida a dilucidar el problema presente en el sistema y de esta manera ejecutar la acción recomendada para remediarlo.

2.3.1 Fallas presentes en el rotor. (Ver Cuadro 5).

Cuadro 5. Fallas presentes en el rotor

Problema	Causa probable	Acción recomendada
<p>Cromado saltado, sin afectar el material base.</p> 	<p>Se produce generalmente en la zona externa del estator (parte superior del rotor), se puede presentar por el ataque del fluido al cromo.</p>	<p>No afecta el rendimiento de la bomba, pero se debe considerar el rediseño.</p>
<p>Se presenta desgaste metal-metal.</p> 	<p>Este desgaste se presenta generalmente en la parte superior del rotor ya que se presenta rozamiento con el niple espaciador o en la parte inferior del rotor por rozamiento con el niple de paro</p>	<p>Se recomienda cambiar el rotor antes de que la falla sea severa.</p>






Cuadro 5. (Continuación).

Problema	Causa probable	Acción recomendada
<p>Abrasión, se presenta desgaste en la superficie cromada del rotor.</p> 	<p>Se tiene desgaste por las altas velocidades que se manejan al girar o por presencia de fluidos abrasivos.</p>	<p>Se recomienda cromar el rotor para poder utilizarlo nuevamente. Así mismo se puede utilizar una bomba de mayor capacidad.</p>
<p>Se presenta un ataque ácido.</p> 	<p>Este daño se produce cuando el cromo es atacado por el ácido, la gravedad del daño depende de la temperatura, velocidad y presión.</p>	<p>Se recomienda circular el pozo para poder retirar cualquier ácido presente y llevar a cabo la instalación de la bomba.</p>



Fuente. Elaboración propia basada en, HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

2.3.2 Fallas presentes en el elastómero. (Ver Cuadro 6).

Cuadro 6. Fallas presentes en el elastómero

Problema	Causa problema	Acción recomendada
<p>Abrasión.</p> 	<p>Es un desgaste normal.</p> <p>Al operar a alta velocidad o al manejar sólidos, se puede generar aceleración de la falla.</p>	<p>Reducir velocidad y utilizar bombas con mayor desplazamiento.</p>
<p>Ataque químico.</p> 	<p>Es causado por la presencia de aromáticos o de crudos livianos, generando que la goma se suavice.</p>	<p>Se debe seleccionar el elastómero adecuado.</p>
<p>Arrastre por alta presión.</p> 	<p>Las partículas sólidas que son arrastradas por el fluido deforman y perforan la goma.</p>	<p>Considerar la instalación de filtros o sobrediseño.</p>
<p>Alta temperatura.</p> 	<p>Cuando la bomba se encuentra operando sin fluido o en presencia de mucho gas, al operar en ambientes de alta temperatura.</p>	<p>Se debe controlar el nivel de fluido o utilizar el elastómero adecuado.</p>
<p>Influencia mecánica.</p> 	<p>Al momento de que la bomba trabaja en presencia de rocas u otras partículas extrañas y las bombea.</p>	<p>Utilizar filtros a la entrada de la bomba o sobrediseño.</p>
<p>Presión excesiva.</p> 	<p>En el pozo se presentan altas presiones hidrostáticas. Daño generado por taponamientos y fricción.</p>	<p>Se debe revisar el diseño del pozo y si se presentan taponamientos, estos deben ser eliminados.</p>

Cuadro 6. (Continuación).

Problema	Causa probable	Acción recomendada
<p>Histéresis.</p> 	<p>El elastómero se somete a una alta presión.</p> <p>Se presenta alta temperatura.</p> <p>Se tiene una alta interferencia entre estator y rotor por hinchamiento del elastómero.</p>	<p>Se debe seleccionar elastómero con un menor contenido de Acrilo-Nitrilo para evitar la histéresis.</p> <p>Buscar y seleccionar la mejor combinación rotor-estator para evitar la interferencia.</p>
<p>Elastómero despegado.</p> 	<p>Se relaciona generalmente a error de fábrica, debido a falta de pegamento en el interior del housing.</p> <p>Se presenta a causa de las condiciones de fondo del pozo y de las características del fluido producido</p>	<p>Se debe comunicar al fabricante para analizar si es falla de fabricación.</p> <p>Se debe analizar el fluido y las condiciones de fondo para identificar si la bomba se adapta o no a estos requerimientos.</p>

Fuente. Elaboración propia basada en, CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013. Pág. 119.

3. DISEÑO DE POZO A ESCALA CON UNA FORMACIÓN PRODUCTORA

En este capítulo se abarcará todo lo referente al diseño del pozo y a la arena que se utilizará para la construcción de la formación productora; la cual contendrá el hidrocarburo a producirse por medio de la bomba a escala laboratorio.

El diseño del pozo a escala a ser fabricado se fundamenta en tres componentes principales, tipo de roca almacén la cual actuará de formación productora, tipo de roca sello y el tipo de fluido almacenado; el primer término entendiéndose como una unidad geológica con volumen limitado la cual debe contar con una porosidad y una permeabilidad suficiente que permita y facilite el almacenamiento y paso del hidrocarburo a través de ella. Cabe aclarar que para el presente proyecto solo compete la descripción de las rocas almacén y sello ya que una de estas será la formación de la cual la bomba succiona el fluido de interés y la otra será la que actúe en forma de sello para evitar que este se escape a una zona de la cual no pueda ser extraído.

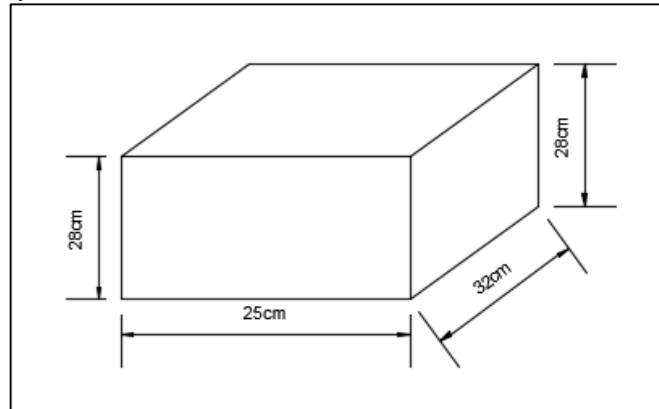
3.1 DESCRIPCIÓN DEL YACIMIENTO

Para la interacción del sistema pozo-yacimiento se construyeron dos recipientes, en donde uno de ellos simulara el yacimiento en su totalidad y el otro actuara como pozo perforado el cual se estipulo para ser operado a hueco abierto al ser constituido por una formación tan somera y compacta.

El diseño del sistema se realizó en el programa AutoCad 2016 debido a la facilidad que este presenta para el manejo de gráficos en dos dimensiones y su práctica modelación en tres dimensiones, además de su versátil manejo de escalas de los objetos.

Para el yacimiento se tomó el modelo ideal en forma de prisma rectangular, ya que este permite realizar las futuras medidas respectivas de volumen de reservorio, porosidad y además de esto facilita el hecho calcular los espesores que presentan las formaciones presentes. Se diseñó un recipiente con tres caras hechas en madera, estas constituyen las dos laterales y la trasera. Lo que respecta a la cara frontal se diseñó en vidrio lo suficientemente resistente como para soportar la presión que se generara con la puesta en marcha de la bomba para poder extraer el fluido de la formación de interés; esto con el fin de que el estudiante o personada interesada en ver el funcionamiento de la bomba pueda observar el comportamiento del fluido antes y después de accionar el sistema de levantamiento artificial a escala con bomba PCP. (**Ver Figura 26**).

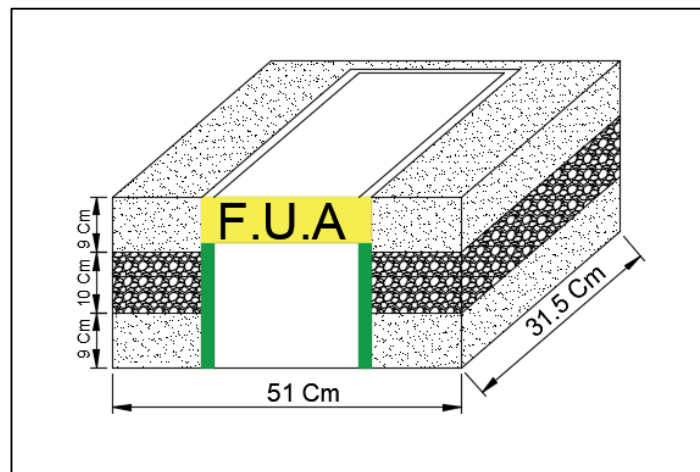
Figura 26. Representación tridimensional del yacimiento, realizado en AutoCad 2016.



Fuente. Elaboración propia.

El yacimiento tiene un volumen total de $19.071,75\text{cm}^3$, constituido por tres capas, siendo dos de estas de arcilla, respectivamente las inferior y superior, las cuales actúan como roca sello y tienen un espesor de 0.2952 pies (9 cm). Además de esto posee una capa intermedia de arena, esta contiene nuestro fluido de interés y es considerada como nuestra roca almacenadora, diseñada con un espesor de 0.33 pies (10 cm). (Ver Figura 27).

Figura 27. Sistema pozo-yacimiento, realizado en AutoCad 2016.



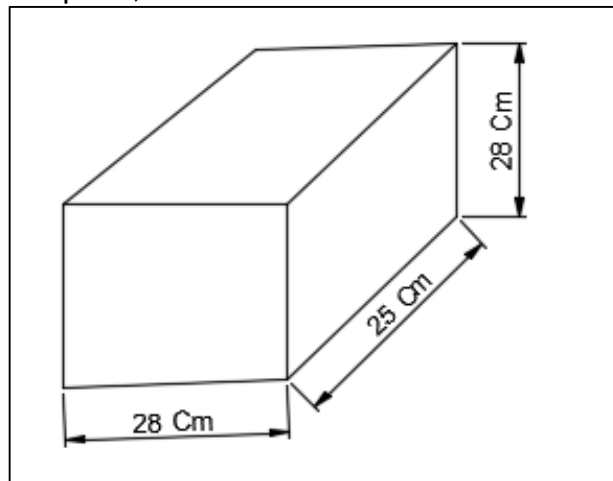
Fuente. Elaboración propia.

Se tendrán dos fluidos atrapados en la roca almacenadora; aceite y agua. El tipo de aceite seleccionado es 20W50. Para el presente proyecto dicho fluido será recirculado luego de llegar al tanque en superficie el cual constituye nuestra última facilidad de producción; una vez se almacene allí el fluido, por medio de la apertura de unas válvulas y bajo el efecto de gravedad se dispondrá a hacer el retorno a la

formación pasando a través de unas mangueras, para así volver a iniciar con el ciclo de operación.

Por otro lado, el segundo recipiente diseñado completamente a base de vidrio para fines prácticos de que se pueda observar el fluido y su comportamiento bajo efectos de operación de la bomba, emula como se dijo anteriormente un hueco abierto previamente perforado, el cual tiene un espesor de 28 cm. A este pozo se le realizó el respectivo cañoneo, siendo el hueco generado después del proceso el lugar por donde la bomba procederá a succionar el fluido presente en la formación almacén; dicho procedimiento se ejecutó antes del ensamblaje completo del cajón fabricado en vidrio para así evitar un quiebre en cualquiera de las caras laterales o frontales del diseño. (**Ver Figura 28**).

Figura 28. Representación tridimensional del pozo, realizado en AutoCad 2016.



Fuente. Elaboración propia

3.1.1 Descripción de la formación productora. La arena que actuara como formación productora en el sistema a escala fue extraída del pozo Coren-19, el cual se encuentra ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales a 120 Km al este de Yopal y a 2 Km al sureste del Campo Corocora. El campo Coren cuenta con cuatro pozos perforados, de los cuales el Coren-19 es considerado como el mejor productor del campo. La arena fue seleccionada por el director del proyecto debido a que se tiene acceso a muestras anteriormente extraídas del pozo mencionado con la respectiva información obtenida en pruebas de laboratorio.

En el momento en que se realizó la perforación del pozo Coren-19 se inició a registrar desde 3990 pies donde se encontraron las Formaciones Guayabo, León Shale y Carbonera con sus respectivas unidades C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7. Es preciso aclarar que de la formación de interés, Carbonera, más específicamente de la unidad C5, se extrajo la arena a utilizar como formación productora y de la cual

la bomba a escala succionara los fluidos que esta contenga. Para la selección de esta arena se tuvo en cuenta, además de su facilidad de obtención, que contara con las características de una roca almacenadora común, es decir, con una porosidad y una permeabilidad necesaria como para que existiera un fácil almacenamiento y paso de fluido a través de sus poros, lo que le facilite a la bomba una extracción sencilla del fluido que esta contenga.

Esta unidad es compuesta principalmente por arenas con leves intercalaciones de arcillolita, lutita y limolita. Hacia el tope, arena cuarzosa, translúcido, hialino, menor blanco translúcido, localmente amarillo translúcido, grano de muy fino a fino localmente gruesa subangular a subredondeado, subesférico, pobre selección. Trazas de manifestación de hidrocarburos, de color marrón claro, en puntos; 20% de fluorescencia natural; corte moderadamente rápido, débil a moderadamente fuerte, en nubes de color blanco azulado, anillo a la luz ultravioleta de color amarillo verdoso claro, anillo a la luz natural no visible. Muy pobre manifestación de hidrocarburos.²⁸

Arenisca, cuarzosa, blanca friable, blocosa, homogénea. Cuarzo, translúcido, blanco lechoso, hialino, grano de muy fino a fino, subangular, subesférico, menor subredondeado buena selección, matriz calcárea con láminas de carbón y fragmentos líticos, con pobre porosidad visual. Trazas -10% de manifestación de aceite, de color marrón claro, en puntos; 20% en parches amarillo dorado, pálido, débil, de fluorescencia natural; corte moderadamente rápido, débil a moderadamente fuerte, en nubes, de color blanco azulado; anillo a la luz ultravioleta de color amarillo verdoso claro; anillo a la luz natural no visible. Muy pobre manifestación de hidrocarburos.²⁹

La arcillolita es predominantemente gris claro, menor gris verdoso claro, menor blanco, rojo moderado, muy suave, moderadamente firme; sublaminar; menor subblocosa; limosa, con inclusiones de material carbonosa y piritita, soluble, algo pegajosa y no calcárea.³⁰

La lutita es de color gris oliva, gris verdoso, gris claro, firme, sublaminar, astillosa, físil, homogénea, micácea, localmente con inclusiones de piritita y glauconita, no calcárea.³¹

²⁸ RINCÓN, Lenin. RINCÓN, Javier. Contrato de Asociación Corocora "A-1" Llanos Orientales Colombia. Perenco Colombia Limited. Julio 2018.

²⁹ RINCÓN, Lenin. RINCÓN, Javier. Contrato de Asociación Corocora "A-1" Llanos Orientales Colombia. Perenco Colombia Limited. Julio 2018.

³⁰ RINCÓN, Lenin. RINCÓN, Javier. Contrato de Asociación Corocora "A-1" Llanos Orientales Colombia. Perenco Colombia Limited. Julio 2018.

³¹ RINCÓN, Lenin. RINCÓN, Javier. Contrato de Asociación Corocora "A-1" Llanos Orientales Colombia. Perenco Colombia Limited. Julio 2018.

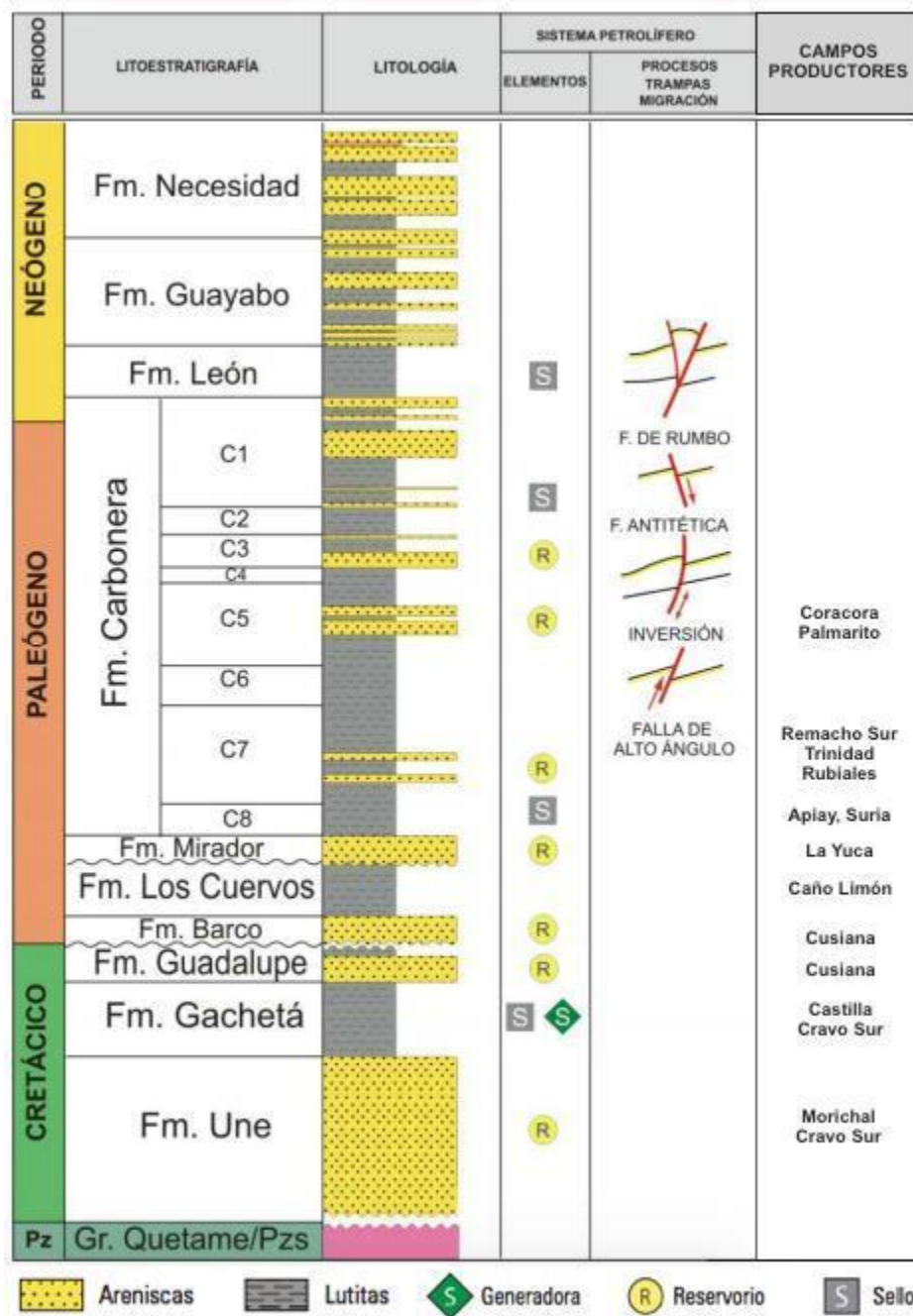
La limolita presente es de color marrón claro, menor gris claro, marrón rojizo, blocoso, friable a suave, homogénea con láminas de carbón y pirita, no calcárea.

Lo anterior permite conocer a fondo las características geológicas de la arena seleccionada, así mismo se sabe que esta arena cuenta con una porosidad de un 28%, saturación de agua de 55%, una saturación de petróleo residual de 35% y un volumen shale de 22%.

La producción del pozo Coren-19 se limita únicamente a dos fluidos los cuales son petróleo y agua; partiendo de esto se tomó como base para la producción de la bomba a escala laboratorio dos tipos de fluidos los cuales serán aceite y agua respectivamente.

A continuación, en la **Figura 29** se presenta la columna estratigráfica de los llanos orientales, donde se encuentra presente la formación carbonera con cada una de sus unidades; en ella se muestra la deposición de los sedimentos desde el neógeno hasta el cretácico.

Figura 29. Columna estratigráfica de los llanos orientales.



Fuente. RINCÓN, Lenin. RINCÓN, Javier. Contrato de Asociación Corocora “A-1” Llanos Orientales Colombia. Perenco Colombia Limited. Julio 2018.

3.1.2 Descripción de la roca sello. Para que una trampa tenga integridad debe estar cubierta por un sello efectivo. Cualquier roca puede actuar como un sello siempre y cuando sea impermeable.³² Los sellos suelen ser porosos y, de hecho, pueden estar saturados de petróleo, pero no deben permitir la migración vertical del petróleo desde la trampa.

La arcilla presente en este yacimiento se compone de un grupo de minerales aluminio-silicatos formados por la meteorización de rocas feldespáticas, como el granito. El grano es de tamaño microscópico y con forma de escamas, esto hace que la superficie de agregación sea mucho mayor que su espesor, lo que permite un gran almacenamiento de agua por adherencia, dando plasticidad a la arcilla.³³

La estructura laminar de esta arcilla permite un fácil almacenamiento de agua en el espacio inter laminar, formando así agregados difíciles de romper. La combinación de la arcilla con la materia orgánica presente en el suelo y algunos óxidos minerales contribuye a la estabilidad estructural necesaria para resistir los efectos mecánicos destructivos. De igual manera se conoce que esta arcilla se produjo a partir de un depósito de arcilla arrastrada por corrientes de agua, viento, agentes atmosféricos y gravedad, en la época en que se produjo la meteorización y por alteraciones hidrotermales.

3.2 PROPIEDADES DEL FLUIDO SELECCIONADO A PRODUCIR

Se planeó la operación con dos fluidos con viscosidades y propiedades muy diferentes, permitiendo así que se refleje una diferencia considerable en la operación de la bomba. Se decidió utilizar aceite 20W50 y agua como los fluidos a producir; esto por la facilidad de acceso y a la gran cantidad de información que se tiene sobre estos dos líquidos.

Para fines prácticos se manejarán dos fluidos distintos previamente estipulados por los autores del proyecto; el primero con un BS&W de 70 y el segundo con un BS&W de 50. El cambio del BS&W del aceite se realiza con el fin de que se evidencie una variación en la respuesta de operación de la bomba, puesto que al agregar agua al aceite se cambiarán propiedades ponderantes para el comportamiento operativo del sistema como lo son viscosidad, densidad y gravedad API del fluido a desplazar.

Previo de la puesta en marcha de la bomba se prepara la mezcla de fluido con BS&W de 70 disponiendo de las cantidades adecuadas en un recipiente para posteriormente añadirlo al pozo y así proceder con el accionar de la bomba. Finalmente, luego de operar por un tiempo determinado la bomba y después de

³² DOWNEY, M.A. Hydrocarbon seal rocks. AAPG Mem. 60. 1994. Pág. 159-164.

³³ ZEA OSORIO, Norma Lissette. Caracterización de las arcillas para la fabricación de ladrillos artesanales. Tesis. Guatemala. Noviembre 2005. Pág. 27. Modificado por los autores 2019.

medir los parámetros que se deseen calcular, además, teniendo claro la cantidad de aceite y agua que están presentes en el sistema de levantamiento artificial a escala, se procede a apagar la bomba para que de esta forma el operador pueda añadir la cantidad de agua necesaria a la formación productora con el fin de que este logre alcanzar un BS&W de 50, el cual, según la delimitación, será el segundo fluido de prueba en la operación de la bomba.

3.2.1 Propiedades del aceite seleccionado como fluido de producción. Como primer fluido a producir se seleccionaron dos aceites con diferentes características, que permitan observar y verificar el funcionamiento óptimo del sistema PCP. Cabe aclarar que estos fluidos no son una emulsión, sino que lo componen dos fases. A continuación, se explican las características de estos.

En la **Tabla 5** se describen las características más importantes del fluido de producción.

Tabla 5. Características fluido a producir.

Característica	
Grado SAE	20W50
Gravedad, API	27.4
Gravedad específica	0.890
Viscosidad @ 100°C, cSt (ASTM D445)	18.1
Viscosidad @ 40°C, cSt, (ASTM D445)	162
Viscosidad agua @ 40°C, kg/(m*s)	0.000653
Índice de viscosidad	124
Punto de fluidez. °C	-33
Punto de inflamación, °C, (ASTM D92)	220
Densidad @ 60°F,kg/l, (ASTM D4052) BS&W 70	0.91546 kg/l
Densidad @ 60°F,kg/l, (ASTM D4052) BS&W 50	0.9391 kg/l
Gravedad específica BS&W 70	0.9171
Gravedad específica BS&W 50	0.9407

Fuente. Elaboración propia.

Al preparar la mezcla del fluido a diferentes BS&W sus propiedades como densidad y gravedad API presentan una variación. A continuación, en la **Tabla 6** se muestran los nuevos valores de densidad y API.

Tabla 6. Nuevos valores de densidad y gravedad API

Fluido	Gravedad API	Densidad
Aceite con BS&W 70	22.79	0.91546 kg/l
Aceite con BS&W 50	18.91	0.9391 kg/l

Fuente. Elaboración propia.

Ecuación 1. Densidad de los fluidos BS&W.

$$\rho = (\rho_1 * \%1 + \rho_2 * \%2)$$

Fuente. Elaboración propia.

Donde

ρ : densidad

ρ_1 : densidad del fluido uno

ρ_2 : densidad del fluido dos

$\%1$: porcentaje del fluido uno

$\%2$: porcentaje del fluido dos

$$\rho_1 = (0.880 * 0.7) + (0,9982 * 0.3)$$

$$\rho_1 = 0,91546 \text{ kg/l}$$

$$\rho_2 = (0.880 * 0.5) + (0,9982 * 0.5)$$

$$\rho_2 = 0.9391 \text{ kg/l}$$

Ecuación 2. Gravedad API.

$$API = \left(\frac{141.5}{GE} - 131.5 \right)$$

Fuente. SCHLUMBERGER. Oilfield Glossary. 2019.

Donde

API: gravedad API

GE: gravedad específica del fluido

$$API1 = \left(\frac{141.5}{0.9171} - 131.5 \right)$$

$$API1 = 22.79$$

$$API2 = \left(\frac{141.5}{0.9407} - 131.5 \right)$$

$$API2 = 18.91$$

3.2.2 Propiedades del agua seleccionada como fluido de producción. Esta sustancia se encuentra en el pozo en estado completamente líquido. Con el fin de que el fluido no presente diluido ningún tipo de sustancia química que pueda ocasionar una posible afectación al elastómero, se utilizó agua pura previamente tratada. (Ver tabla 7).

Tabla 7. Características del agua

Característica	
Viscosidad agua @ 40°C, kg/(m*s)	0.000653
Densidad	0.9982 kg/l
Calor específico	4.180 J/kg/°C
Calor latente	539 Kcal/kg

Fuente. Elaboración propia.

4. DISEÑAR SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL A ESCALA CON BOMBA DE CAVIDADES PROGRESIVAS

Para el diseño del sistema de levantamiento a escala con bomba de cavidades progresivas, se contó con una bomba PCP real, donada por la empresa NETZSCH.

Al tener la facilidad de contar con una PCP, se pudo llegar a calcular los parámetros necesarios para la selección y fabricación de cada una de las partes que conforman el sistema de levantamiento artificial a escala.

Cabe aclarar que en el transcurso del desarrollo del presente capítulo se describirá específicamente la bomba donada por la empresa NETZSCH. Debido a que la donación solo consta de estator y rotor, este capítulo también contendrá el paso a paso detallado de la manera en cómo se llegó a la selección completa de las herramientas que componen el sistema de levantamiento artificial en fondo y superficie.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA BOMBA PCP UTILIZADA EN EL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL A ESCALA

La bomba PCP implementada en el proyecto es de marca NETZSCH; dicha bomba es de tipo inmersión, utilizada en forma vertical específicamente cuando el petróleo posee viscosidades tan altas como para que las bombas horizontales no puedan succionar de manera óptima y adecuada el fluido de interés.

La bomba que se utilizara cumple con los requerimientos que tendría el sistema de levantamiento artificial a escala, pensando en el caudal, torque requerido y la facilidad de diseño de herramientas en fondo y superficie que complementarían la bomba para así ensamblar un sistema lo más parecido posible a los implementados en campos petroleros, de una manera rentable y práctica.

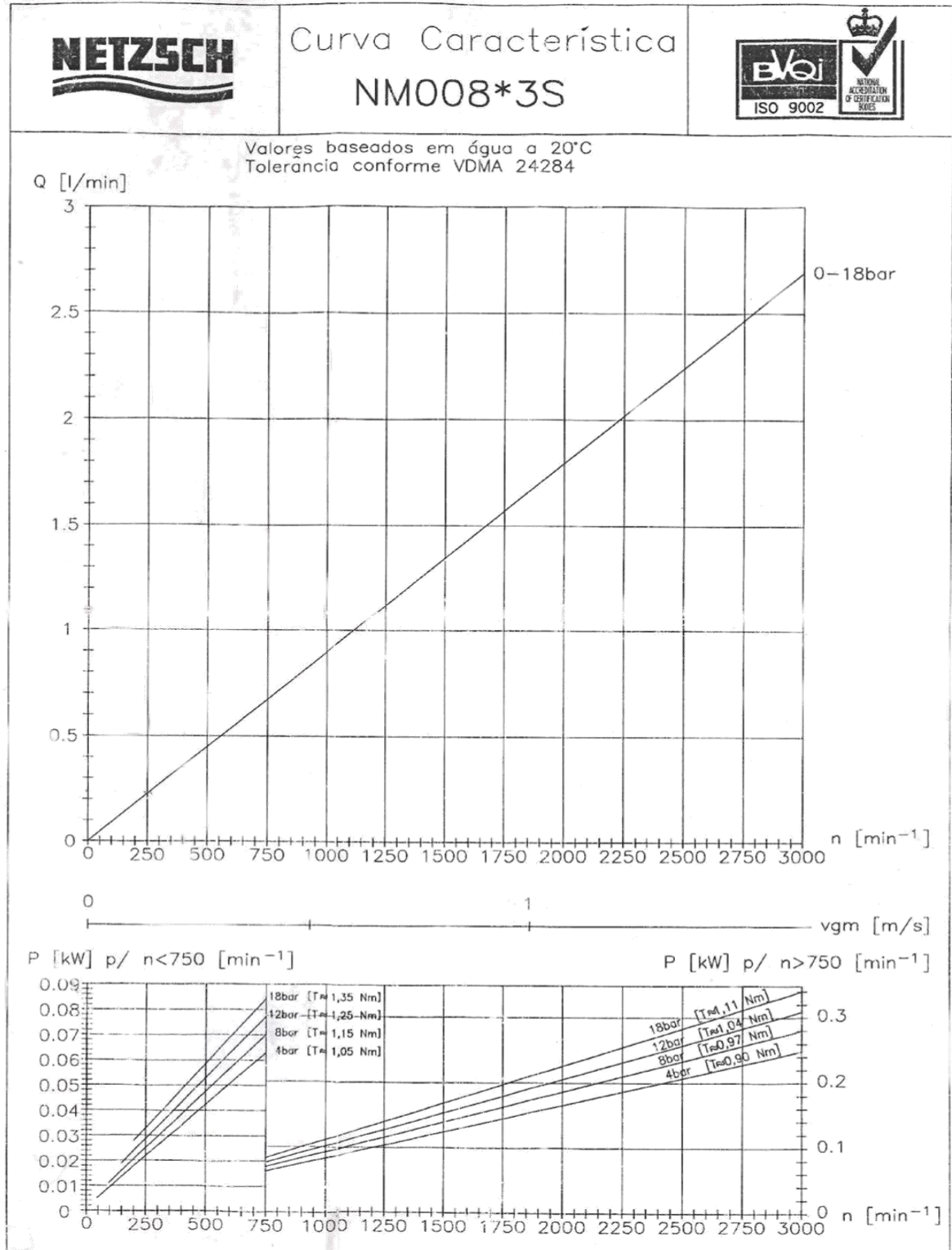
La bomba cuenta con las siguientes ventajas:

- Insensibles al contenido de arena en el fluido.
- Bombea con escasas pulsaciones.
- Alta capacidad de succión.
- Alta estabilidad de presión.
- Gran exactitud de dosificación.
- Operan de manera óptima con alto contenido de agua en el petróleo.
- Seguridad operativa fiable con aceites de alta viscosidad.
- Sirve para sustancias con grandes cargas de sólidos.

La bomba suministrada es una NM008*3S; es de tres etapas de simple l6bulo, en donde el estator est6 compuesto por un elast6mero 286 de alto contenido de acrilonitrilo especial para manejar fluidos viscosos y agua en cantidades de hasta 90% BS&W y un GOR de hasta 500 SCF/STB. En cuanto al rotor, es de tama1o P8 que se ajusta a las condiciones iniciales de operaci6n y ofrece estabilidad en la operaci6n continuada.

De acuerdo con las caracter6sticas del elast6mero suministrado se recomienda operar hasta una temperatura de 200°F y -4 °F, as6 mismo soporta una carga de rotura de 1713 lbs/in. Este tipo de bomba puede llegar a obtener un caudal de hasta 0,45 L/min bajo una presi6n de 18 bar y funcionando a una velocidad de hasta 500 RPM/min. Los datos anteriores y el comportamiento del torque, de acuerdo con la presi6n de descarga, se obtuvieron de la ficha t6cnica de la bomba (**Ver Figura 30**), tambi6n suministrada por la empresa.

Figura 30. Ficha técnica de la bomba PCP.



Fuente. Netzsch 2019.

4.2 DISEÑO DE HERRAMIENTAS DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL A ESCALA EN SUPERFICIE

Para la construcción de un sistema PCP se deben conocer los parámetros de operación mínimos necesarios para accionar las herramientas de subsuelo y así mismo se deben dimensionar correctamente para proveer la energía requerida por el sistema.

Estas herramientas deben ser capaces de girar la varilla a la velocidad requerida, prevenir la fuga de fluidos por el stuffing box y permitir el torque requerido en la varilla.

4.2.1 Cálculo de la presión sobre la bomba (TDH). Esta presión está dada por los siguientes términos:

a. **P_{bdp}**= presión de boca de pozo, se considera la presión atmosférica 0.070307 kg/cm²

b. **Presión de nivel**= nivel dinámico en kg/cm²

Ecuación 3. Presión de nivel.

$$P. \text{ nivel (kg/cm}^2) = \frac{\text{nivel (m)} * \rho(\text{g/cm}^3)}{10}$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde

Nivel: nivel dinámico (m)

ρ : Densidad (g/cm³)

$$P. \text{ nivel (kg/cm}^2) = \frac{0.05\text{m} * 0.9982 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{10}$$

$$P. \text{ nivel (kg/cm}^2) = 0.004991$$

c. **Presión por fricción.** Es aquella perdida de carga debido al rozamiento que existe entre el tubing y varilla, en este caso la pérdida se considera despreciable debido a que la distancia de fondo a superficie es muy pequeña (40cm) y no existe contacto.

Para el cálculo de la presión total se deben sumar los valores de presión de boca de pozo y la presión de nivel, como se muestra a continuación.

$$\text{Presión total (kg/cm}^2\text{)} = 0.070307 + 0.004991 = 0.075298$$

4.2.2 Cálculo de potencia consumida.

- Potencia hidráulica:

Ecuación 4. Potencia hidráulica.

$$\text{(HHp)} = \text{caudal } m^3/\text{día} * \text{presión } kg/cm^2 * 0.0014$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde

Presión: presión total hallada en la sección 4.2.1.

- Potencia consumida:

Ecuación 5. Potencia consumida.

$$\text{(Hp)} = \text{HHp}/\eta$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde

HHp: potencia hidráulica

η : Rendimiento energético

Donde η es el rendimiento energético (potencia teórica/potencia suministrada). En el caso de las bombas PCP el rendimiento se considera entre 0.6 y 0.7, para el diseño de la bomba se consideró de 0.6.

$$\text{Hhp} = 1.68(m^3/\text{día}) * 0.075298(kg/cm^2) * 0.0014$$

$$\text{Hhp} = 0.000177100896$$

$$\text{Hhp} = 0.000303601536/0.6 = 0.00029516816\text{Hp}$$

4.2.3 Cálculo del torque. Al transmitir la rotación al rotor desde superficie a través de las varillas de bombeo, la potencia necesaria para elevar el fluido me genera un torque resistivo el cual tiene la siguiente expresión:

Ecuación 6. Cálculo del torque.

$$T = K * potencia/N$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde:

T: Torque

K: constante de pasaje de unidades

Potencia: potencia suministrada

N: velocidad de operación

El torque requerido es hallado de la siguiente manera:

Ecuación 7. Torque total.

$$T_{total} = \text{torque hidraulico} + \text{torque fricción} + \text{torque resistivo}$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde

T_{total}: Torque total

Para calcular el torque requerido en superficie se debe conocer a cuántas RPM deberá estar girando el rotor.

Con la **Ecuación 8** se calcula la constante volumétrica o caudal teórico de la bomba.

Ecuación 8. Caudal teórico de la bomba.

$$Q = V * N = V * RPM$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde

Q: caudal (m³/dia)

V: constante volumétrica (m³/día/RPM)

N: velocidad de operación

$$V = \frac{2 \text{ l/min} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} * \frac{1440 \text{ min}}{\text{día}}}{2250 \text{ RPM}} = 0.00128 \frac{\text{m}^3}{\text{día}/\text{RPM}} = \frac{0.00805183 \frac{\text{Bbl}}{\text{día}}}{\text{RPM}}$$

$$= 0.000888 \text{ l/min}/\text{RPM}$$

Se conoce la constante volumétrica, que es $V = 0.00805183 \text{ Bbl/día/RPM}$

Ecuación 9. Caudal teórico.

$$Q(\text{m}^3/\text{día}) = V * \text{RPM} * \text{efic}$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde:

Q: caudal ($\text{m}^3/\text{día}$)

V: constante volumétrica ($\text{m}^3/\text{día}/\text{RPM}$)

Efic: eficiencia volumétrica

Para determinar las RPM de operación estimadas:

Ecuación 10. Calculo de las RPM de operación.

$$\text{RPM} = Q(\text{m}^3/\text{día})/V/\% \text{efic}/100$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde

Q: caudal ($\text{m}^3/\text{día}$)

V: constante volumétrica

% efic: porcentaje de eficiencia volumétrica

$$\text{RPM} = 1.68 (\text{m}^3/\text{día})/0.00128/0.9$$

$$\text{RPM} = 1458.333$$

Volviendo a la **Ecuación 6.**

Ecuación 6.

$$T = K * Hp/RPM$$

Donde:

T: torque

K: 726.1149 para torque en kg*m

$$T = 726.1149 * 0.00029516816Hp/1458.333RPM$$

$$T = 0.000146966403 \text{ kg * m}$$

4.2.4 Cálculo de esfuerzos axiales. La longitud de la varilla presente en el sistema PCP es tan pequeña, que los esfuerzos axiales son completamente despreciables.

A continuación, se explica el procedimiento del cálculo de esfuerzos axiales, en caso de que estén presentes.

La carga axial que soporta las varillas de bombeo consta de dos componentes principales:

a. Debido al peso de las varillas (F1):

Ecuación 11. Esfuerzo axial por peso de la varilla.

$$F1 = \text{longitud (m)} * \text{peso de la varilla (kg/m)}$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

b. Debido a la presión sobre la bomba (presión diferencial) (F2): para el cálculo se debe considerar el efecto de la presión sobre la proyección efectiva del rotor de la bomba.

Ecuación 12. Esfuerzo axial por presión diferencial.

$$F2 = \text{presión total} * \text{área efectiva}$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde:

Área efectiva = área proyectada del rotor – área de la varilla de bombeo

Presión total: presión hallada en la sección 4.2.1.

Los esfuerzos axiales son igual a **F1+F2**

4.2.5 Cálculo de tensiones combinadas. Debido a que la fuerza axial es despreciable y la longitud de la varilla es muy corta, este cálculo también se asume como despreciable.

A continuación, se explica el procedimiento del cálculo de tensiones combinadas, si estas están presentes.

Para calcular las tensiones combinadas se debe tener conocimiento de las componentes:

- a. Axial (tensión a la tracción): σ
- b. Tangencial (tensión a la torsión): T

Definiciones:

σ : tensión a la tracción= F/área de la barra

t: tensión a la torsión= M. torsor/Wt

M.torsor: torque calculado

Wt: módulo de resistencia polar= $Jp/\text{radio de barra}$

Jp: momento de inercia polar= $\pi * d^4/32$ (para una barra cilíndrica maciza)

Ecuación 13. Tensiones combinadas.

$$\text{Tensión combinada} = \sqrt{(\sigma^2 + 4 * t^2)}$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo.
Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

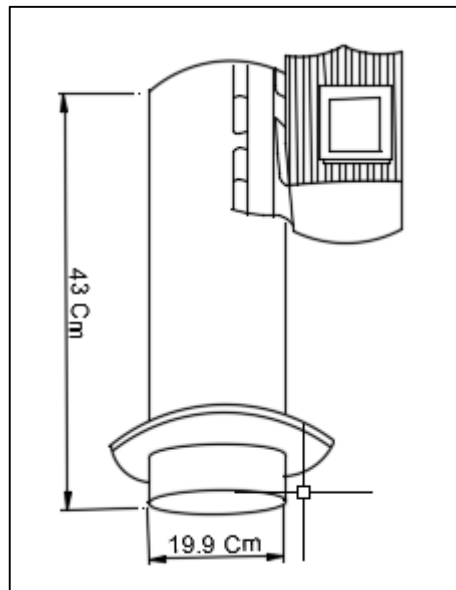
4.3 SELECCIÓN DE EQUIPOS DE SUPERFICIE

a. Para el motor, se selección de 1 Hp, debido a:

- Se quería garantizar la disponibilidad de torque y rpm para el sistema
- El tamaño del motor permite que el sistema quede con un peso tal que facilite su movilización.

- Se seleccionó con las mínimas RPM posibles, con el fin de tener los diámetros de poleas más pequeños.
- Disponibilidad en el mercado.

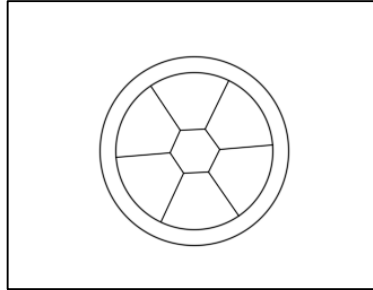
Figura 31. Diseño motor y cabezal de rotación realizado en AutoCad 2016.



Fuente. Elaboración propia.

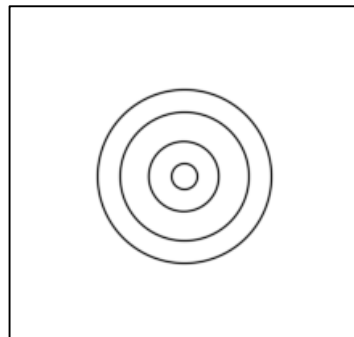
- b. El diámetro de las poleas es de 6" la polea conducida y 2" la polea conductora; estos se seleccionaron de acuerdo a las máximas RPM que puede tener la bomba, con el motor en marcha a su velocidad nominal.
- Velocidad nominal motor= 3750
 - Diámetro polea conducida= 6"
 - Diámetro polea conductora= 2"
 - Relación de poleas= 3:1
 - Velocidad nominal de la bomba= $3750/3 = 1250 \text{ RPM}$.La velocidad nominal de la bomba se puede disminuir por medio del variador, lo que conlleva a que la bomba tenga un menor desplazamiento y se ajuste a las condiciones de operación.

Figura 32. Polea 6", realizado en AutoCad 2016.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 33. Polea 2", realizado en AutoCad 2016.



Fuente. Elaboración propia

4.4 SELECCIÓN DE EQUIPOS EN FONDO

- a. Se seleccionó una tubería que cumpliera dos requerimientos; presentar una buena área de flujo y a su vez poder soportar una presión de estallido de por lo menos 1.5 veces por encima de la máxima presión de descarga que tiene la bomba (261 PSI). Por disponibilidad en el mercado se tomaron como tubing dos nipples galvanizados; el primero con una longitud de 18 cm y 2" de diámetro externo y el segundo una sección con 10 cm de longitud y 2" de diámetro. Ambas secciones de tubería fueron ensambladas a través de unión de 2" de diámetro y 5 cm de longitud.

A continuación, se calcula la capacidad de volumen de fluido que puede circular a través del tubing:

- **Barril por pie:**

Ecuación 14. Capacidad volumétrica de la tubería.

$$\text{ID}(\text{pulg})^2/1029.4$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

$$=0.200131^2/1029.4 = 3.8908507e^{-5}$$

- **Volumen:**

Ecuación 15. Volumen tubería.

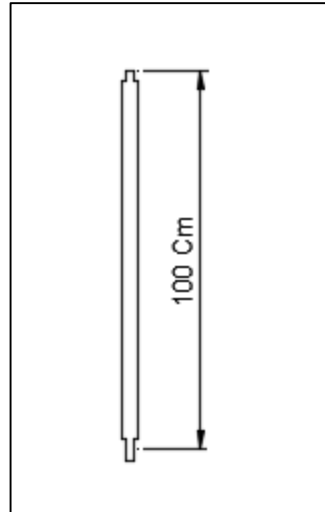
$$\text{volumen} = (\text{barril por pie}) * \text{longitud de la tubería (pies)}$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

$$=3.8908507e^{-5} * 3.28084 = 1.276525e^{-4}\text{Bbl} = 0.000002029513 \text{ L}$$

- b.** De acuerdo a las exigencias de torque se seleccionó una varilla con eje calibrado galvanizado de 19mm, debido a:
- Disponibilidad en el mercado.
 - Este tipo de varilla no va a sufrir estiramientos, ni entorchamiento.
 - Al ser un eje calibrado, asegura que el diámetro sea igual en toda su longitud.

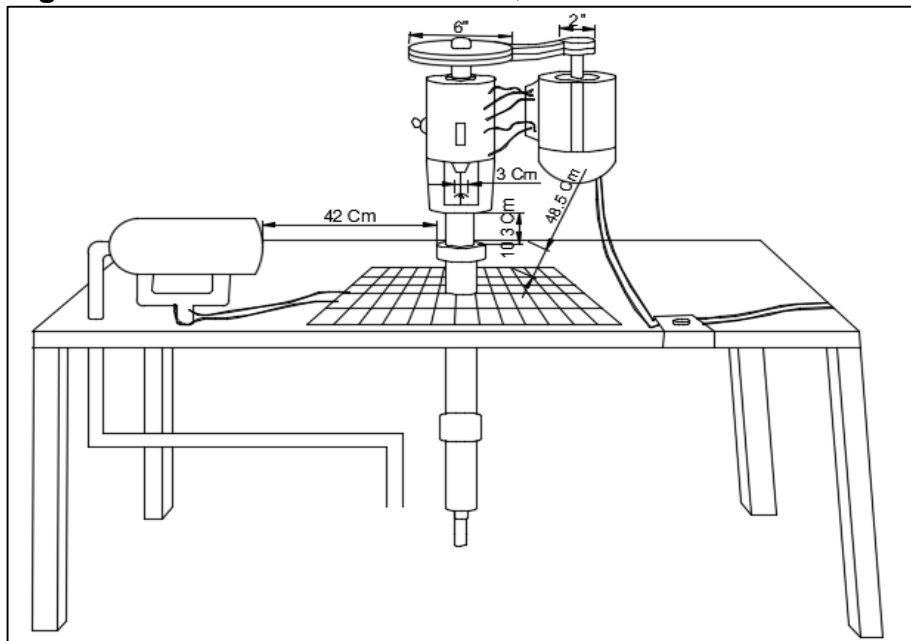
Figura 34. Eje calibrado, realizado en AutoCad 2016.



Fuente. Elaboración propia

En la **Figura 35** se observa el diseño del sistema PCP realizado en el programa de dibujo AutoCad 2016.

Figura 35. Diseño del sistema PCP, realizado en AutoCad 2016.

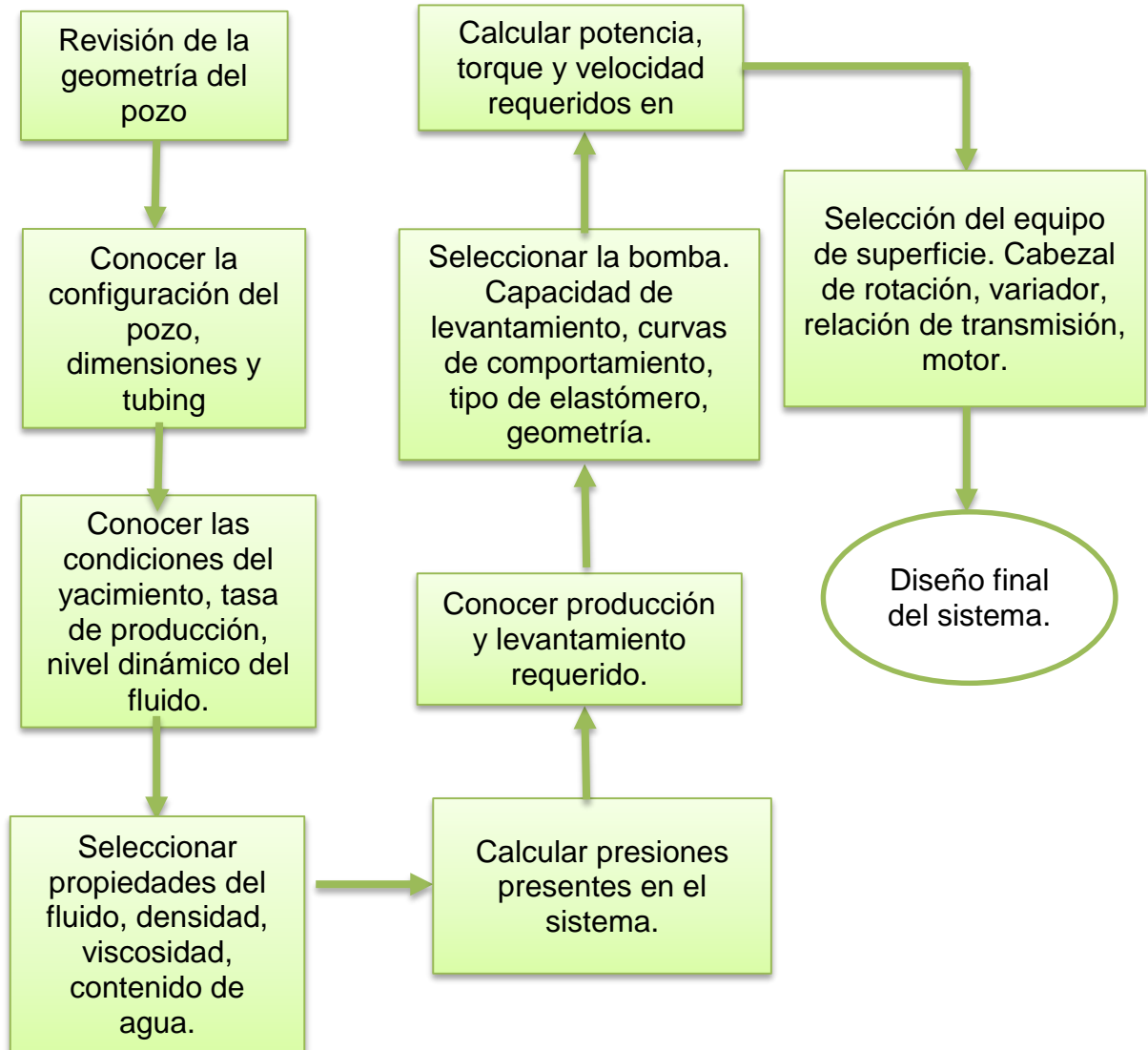


Fuente. Elaboración propia.

4.5 DISEÑO DE SISTEMA PCP (FLUJOGRAMA)

Para la elaboración de un sistema a escala laboratorio se requiere de una planeación estructurada que servirá de guía al momento de elaborar el proyecto. A continuación, en la **Figura 36**, se describe el proceso seguido para el diseño del sistema a construir.

Figura 36. Flujoograma diseño sistema PCP.



Fuente. Elaboración propia.

5. CONSTRUCCIÓN DE POZO Y SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL CON BOMBA PCP

En este capítulo se describe, con base en un diseño elaborado con el programa de dibujo AutoCad 2016, el paso a paso del procedimiento que facilitó la construcción del modelo del pozo y el sistema PCP, el cual permitió individualizar cada uno de los componentes del sistema y el rol que estos cumplen.

5.1 CONSTRUCCIÓN DEL POZO

Para la construcción del pozo se partió de la longitud de la bomba, la cual tiene 15.3 cm de largo y esta ensamblada a una tubería de 33 cm de longitud, requiriendo así, que el pozo tenga una profundidad de 29.5 cm, lo que permite que la bomba esté sumergida en el fluido, evitando posibles daños.

Una vez que es perforado el pozo y se alcanza la zona de producción de hidrocarburos, se procede a completar. Debido a las estructuras presentes en el pozo se determinó que no se correría revestimiento, ni se realizaría el procedimiento de cementación, ya que la formación es bastante consolidada.

A continuación, se describe el paso a paso de la construcción del pozo a escala con base en el diseño realizado en el programa de dibujo AutoCad 2016.

- El primer paso fue la construcción de la representación tridimensional del paralelepípedo de mayor volumen (**Ver Figura 37**), el cual cuenta con tres caras de lámina MDF de 1 cm de espesor fabricadas en una carpintería y una cara frontal hecha de vidrio resistente a fluidos, esta puede ser retirada si es necesario.

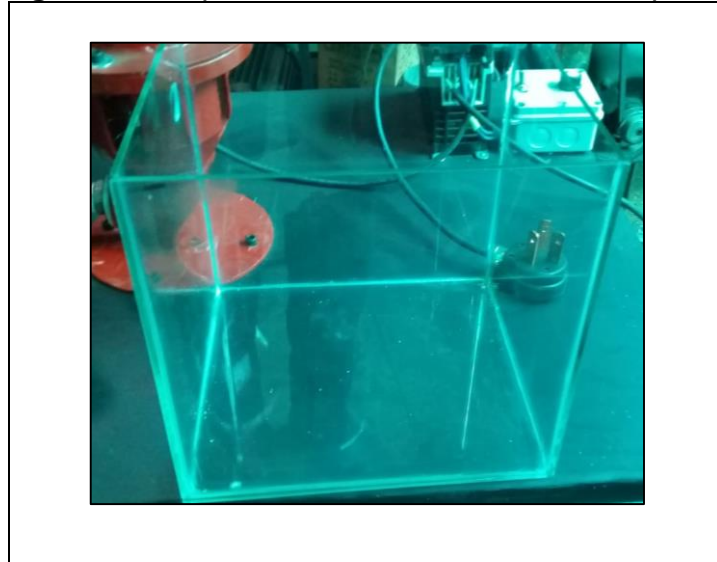
Figura 37. Representación tridimensional del yacimiento.



Fuente. Elaboración propia.

- En segunda instancia se adquiere la representación tridimensional de menor volumen (**Ver Figura 38**), la cual contendrá inicialmente el fluido. Sus cuatro caras están fabricadas en vidrio con el fin de facilitar que el observador aprecie el nivel de líquido presente a medida que la bomba se encuentra en funcionamiento.

Figura 38. Representación tridimensional del pozo.



Fuente. Elaboración propia.

- Para facilitar la estructuración del yacimiento se ubicó el cajón de menor volumen en la parte central del más grande como se observa en la **Figura 39**, formando dos espacios de 9.5 cm a cada uno de sus laterales donde se ubicarán las formaciones que componen el reservorio con su respectivo espesor ya estipulado en el capítulo tres. Cada una de las capas presentes se comprimieron manualmente a medida que se iba realizando su depósito.

Figura 39. Formaciones.



Fuente. Elaboración propia.

5.2 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL CON BOMBA PCP

Con base en el diseño realizado en el programa de dibujo AutoCad 2016 se dio inicio a la construcción del sistema PCP. Cada uno de los componentes del sistema de levantamiento artificial a escala fue fabricado en un torno con metal galvanizado y posteriormente pintados con pintura anticorrosiva.

La instalación fue realizada a un sistema motriz operado con dos poleas que generan la transmisión de la energía torsional de la conductora a la conducida por medio del rozamiento que surge entre correas y poleas.

A continuación, se explica el paso a paso la construcción del sistema PCP:

- La construcción del sistema PCP se inició con la selección de la varilla de 19 mm (eje calibrado). La parte superior fue desbastada a 16 mm para acoplarla a la polea de 6" tipo A fabricada en el torno. Posteriormente se ajustó el eje sobre los rodamientos, la bomba y el retenedor; este último evita que el fluido migre fuera de la T de flujo.

Figura 40. Retenedor.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 41. Eje calibrado ajustado al retenedor.



Fuente. Elaboración propia.

- Se acopló el cabezal de rotación, con la varilla ya en su interior, a la T de flujo, mediante un flange que permite ver el movimiento del eje calibrado. El acoplamiento de estos equipos se realizó con tornillería de 5/16" grado 5 (resistencia) tipo Bristol.

Figura 42. Cabezal de rotación.



Fuente. Elaboración propia.

- A continuación, se procede con la construcción en el torno de una mesa que servirá de soporte para los equipos de superficie. Una vez finalizada, se inició con la conexión de la tubería de producción al cabezal de rotación.
- Las dos secciones de tubería son de Niple galvanizado con diámetro externo de 2", (**Ver Figura 43**). las cuales fueron acopladas por medio de una unión de 2". (**Ver Figura 44**).

Figura 43. Niple galvanizado.



Fuente. CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre 2013.

A continuación, en la **Tabla 8** se describe la ficha técnica del niple galvanizado:

Tabla 8. Ficha técnica niple galvanizado

Material	Fierro galvanizado
Temperatura máxima de trabajo	90°C
Diámetro nominal	2"
Tipo	Niple
Color	Plateado
Presión máxima de trabajo	400 PSI
Recomendaciones de uso	Es recomendable usar cinta de teflón

Fuente. Elaboración propia.

Figura 44. Unión de 2”.



Fuente. Elaboración propia.

A continuación, en la **Tabla 9** se describe la ficha técnica de la unión:

Tabla 9. Ficha técnica de la unión de 2”.

Tipo	Galvanizados
Características	Unión, de alta resistencia a la oxidación, agua fría y caliente, compacto
Material	Acero galvanizado
Diámetro	2”
Color	Plateado
Longitud	5 cm

Fuente. Elaboración propia.

- El ensamblaje de la bomba PCP se realizó a la última sección de la tubería de producción (**Ver figura 45**). El fluido que esta succione atravesara la tubería de producción hasta llegar a superficie en donde por medio de una T de flujo como se muestra en la **Figura 46**, se dirigirá a un tanque el cual representa la última facilidad de producción del sistema; en esta última sección se almacenara el fluido en superficie.

Figura 45. Ensamblaje bomba PCP.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 46. T de flujo.



Fuente. Elaboración propia.

A continuación, en la **Tabla 10** se describen la ficha técnica de la T de flujo:

Tabla 10. Ficha técnica de la T de flujo

Características	Resistente a la corrosión, al impacto y a altas presiones
Diámetro	1/2"
Tipo	Galvanizado
Material	Metal galvanizado
Color	plateado
Longitud	10 cm

Fuente. Elaboración propia.

- En lo que concierne al cabezal de rotación, se diseñó y fabricó un guarda poleas con lámina calibre 18 con el fin de garantizar la protección a las poleas y seguridad al observador. De la misma manera, la parte superior cuenta con una malla protectora que permite observar el movimiento de las poleas.

Luego de instalado el motor eléctrico, se alinearon y ajustaron las poleas y se tensó la correa. (**Ver Figura 47**).

Figura 47. Guarda poleas.



Fuente. Autores 2019.

- Se acopló el motor de 1 Hp marca “Tongbo” con tornillos 5/16” grado 5 (resistencia) tipo Bristol a la polea de 2” tipo A, fabricada en el torno. (**Ver figura 48**).

Figura 48. Motor 1 Hp.



Fuente. Elaboración propia.

En la **Tabla 11** se describen las características del motor utilizado en la construcción del sistema PCP:

Tabla 11. Características motor 1 Hp

Nombre del producto	Motor asincrónico trifásico serie Y Y-801-2 0.75 Kw/ 1Hp
N° de modelo	Y-801-2 0.75 Kw/ 1Hp
Solicitud	Industrial
Número de estator	Tres fases
Especies	Y, serie Y2 trifásica
Estructura del rotor	Jaula de ardilla
Protección de la carcasa	Tipo cerrado
Tensión nominal	380 V o cualquier voltaje entre 220 V-760V
Frecuencia nominal	60 Hz
RPM	3560
Número de polos	2
Modo de inicio	Arranque de frecuencia variable
Marca	Tongbo
Paquete de transporte	Caja de cartón/ caja de madera
Origen	Fujian, China

Fuente. Elaboración propia.

- La sección final del sistema es un tanque fabricado en el torno con capacidad de almacenamiento de 20 litros construido con lamina de calibre 20 el cual actúa como facilidad de producción; allí llegará y se almacenará el fluido producido por

la bomba PCP a escala laboratorio. Dicho tanque cuenta con dos entradas previamente diseñadas que servirán de conexión para la T de flujo la cual trasportara el fluido producido. (**Ver Figura 49**). Así mismo se diseñaron dos salidas que permitan el retorno del fluido al sistema pozo-yacimiento donde se acoplaron mangueras para alta presión con diámetro externo de 5/8" fabricadas de material plástico transparente con mallas, cada una con sus respectivos registros de 1/2" de bronce con palanca amarilla. (**Ver Figura 50**).

Figura 49. Facilidad de producción.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 50. Registros ½”.



Fuente. Elaboración propia.

- Seguidamente se adquiere e instala el variador de velocidad adecuado para las condiciones del sistema PCP. El variador seleccionado fue un AC Control Techniques, Commander SK, Emerson, debido a que estos ofrecen amplios rangos de potencia y voltaje, control de motor high performance, fácil programación y uso, capacidad de ampliación de I/O, tamaño compacto, diseño robusto para un servicio confiable y de largo tiempo.

Figura 51. Variador de frecuencia.



Fuente. Elaboración propia.

6. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL CON BOMBA PCP A ESCALA LABORATORIO CON EL FLUIDO SELECCIONADO A DIFERENTES BS&W

En este capítulo se evaluará, a partir del fluido seleccionado a diferentes BS&W, el funcionamiento y eficiencia de la bomba PCP, comparando las condiciones teóricas y de laboratorio.

En principio se puso en marcha el sistema únicamente con agua en su interior con el fin de probar el funcionamiento y la eficiencia con la que venía la bomba de fábrica. Después de verificar que estaba condiciones óptimas de operación se dispuso a retirar el agua del sistema y a agregar dos galones de aceite 20W50 el cual ya había sido previamente seleccionado para medir cada uno de los parámetros estipulados en la delimitación por medio de los cuales se evaluaría el funcionamiento de la bomba PCP a escala.

Luego de haberse evaluado la bomba bajo los parámetros anteriores y sabiendo el volumen de aceite presente en el sistema, se procedió a añadir agua a volúmenes específicos con el fin de controlar el BS&W del fluido producido; se pone en marcha nuevamente la bomba con el fin de obtener los datos que permitan hacer los cálculos necesarios para los fluidos que tienen propiedades diferentes, con lo que se espera demostrar un comportamiento operativo distinto en el sistema y con base en esto permitirá sacar las conclusiones respectivas.

Para la obtención de los datos requeridos se procede con el encendido de la bomba, posterior a esto se modifica la frecuencia por medio del variador, lo cual tiene como consecuencia una modificación en las RPM del motor. Por cada revolución la bomba desplaza una cantidad de fluido constante, de esta manera es posible calcular el caudal producido durante un periodo específico de tiempo.

Los datos a medir son:

- **Frecuencia:** este dato se lee del visor del variador y es requerido para calcular las RPM efectivas del motor.
- **Corriente:** parámetro obtenido a través del uso de un amperímetro para poder determinar el torque del sistema.
- **Tiempo:** este valor es medido durante la operación a diferentes RPM para obtener el caudal real y con esto calcular la eficiencia.

6.1 CALCULO DE PARÁMETROS DE LA BOMBA PCP A ESCALA LABORATORIO CON FLUIDOS A DISTINTOS BS&W

Los parámetros que se evaluaron para cuantificar las condiciones operativas de la bomba son:

- **Potencia:** se calcula multiplicando el voltaje suministrado por la corriente consumida.

Ecuación 16. Potencia.

$$\text{potencia} = \text{corriente} * \text{frecuencia}$$

Fuente. Elaboración propia.

Donde
Potencia (voltamperio)
Corriente (Amp)
Frecuencia (Hz)

Ecuación 17. Potencia de voltamperio a Hp.

$$\text{potencia(Hp)} = \text{potencia voltamperio} / 1000 / 746$$

Fuente. Elaboración propia.

- **Velocidad del motor y la bomba (rpm):** al conocer la frecuencia a la que opera el motor a través de la siguiente formula se puede calcular las RPM.

Ecuación 18. Velocidad del motor.

$$\text{RPM motor} = 120 * \text{frecuencia} / \text{número de lobulos}$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde
Frecuencia (Hz)
Número de lóbulos: el motor tiene 2 lóbulos

Ecuación 19. Velocidad de la bomba.

$$\text{RPM bomba} = \text{RPM motor} * \text{relación de poleas}$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde
Relación de poleas: 6/2

- **Torque:** se calcula dividiendo la potencia consumida sobre las RPM.

Ecuación 20. Torque.

$$T = \frac{5252 * potencia (Hp)}{RPM motor}$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde
T: torque

- **Caudal teórico:** a una eficiencia del 100% la constante volumétrica de fábrica de la bomba es de 0.000888 l/min RPM, por ende el caudal teórico sería la multiplicación de la constante por cada RPM a la cual se trabajó la bomba ($RPM * 0.000888$).

Ecuación 21. Caudal teórico.

$$Q_{teorico} = RPM bomba * C$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde
Qteórico: caudal teórico
C: constante volumétrica de fábrica de la bomba

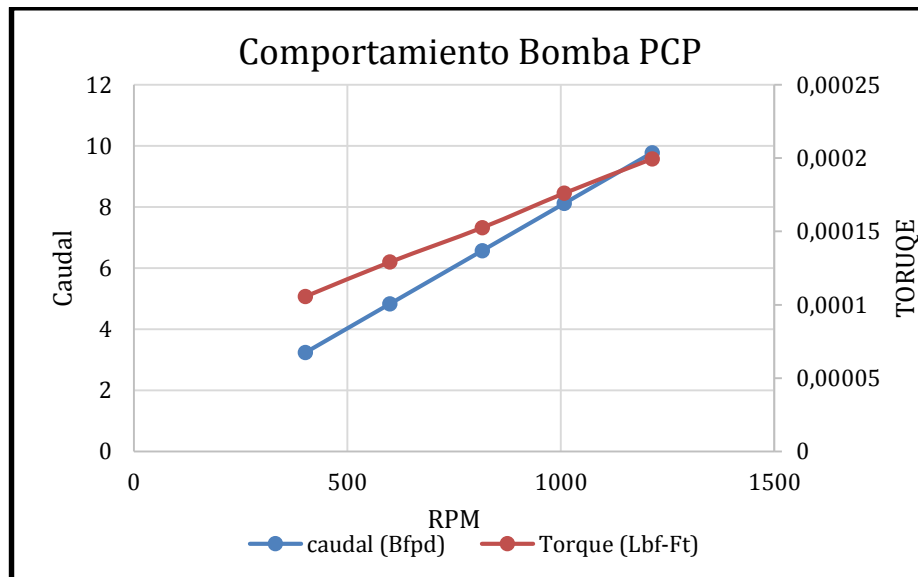
6.1.1 Fluido 100% aceite 20w50. A continuación, en la **Tabla 12** se muestran los datos registrados y los cálculos. La **Grafica 1** relaciona el comportamiento de las variables caudal vs RPM y torque vs RPM, cuando la bomba está operando con un fluido 100%aceite 20W50.

Tabla 12. Fluido 100% aceite 20W50

Frecuencia (Hz)	Voltaje (V)	Corriente (Amp)	Potencia (Voltampereio)	Potencia (Hp)	RPM (motor)	Torque (Lbf-ft)	RPM(bomba)	Caudal (Bpd)
20.1	220	0.90	198	0.000265416	1206	0.001155856	402	3.236502
30	220	1.1	242	0.000324397	1800	0.000946518	600	4.8306
40.8	220	1.3	286	0.000383378	2448	0.000822509	816	6.569616
50.4	220	1.5	330	0.000442359	3024	0.000768277	1008	8.115408
60.7	220	1.7	374	0.00050134	3642	0.000722965	1214	9.773914

Fuente. Elaboración propia.

Grafica 1. Comportamiento de la bomba PCP a escala laboratorio operando con fluido 100% aceite.



Fuente. Elaboración propia.

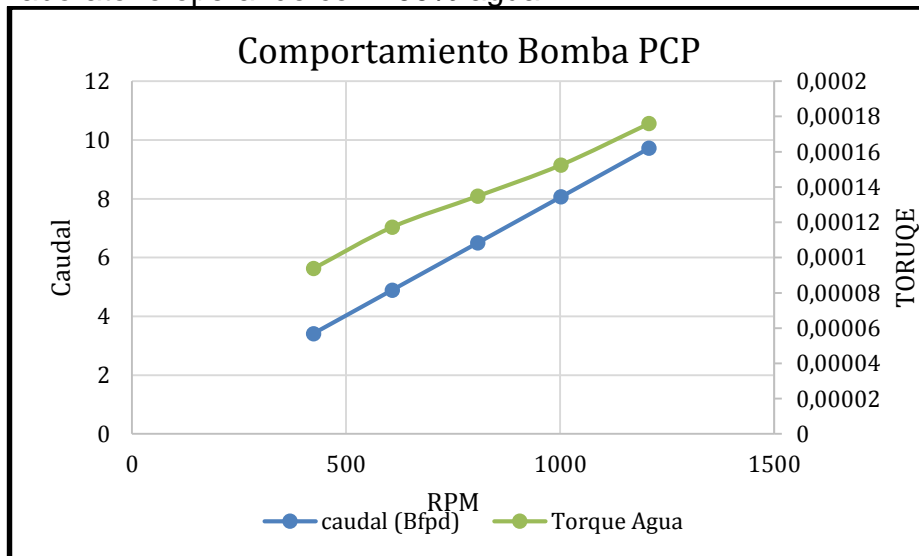
6.1.2 Fluido 100% agua. En la **Tabla 13** se muestran los datos registrados y los cálculos realizados. De igual manera en la Grafica 2 se relaciona el comportamiento de las variables caudal vs RPM y torque vs RPM, cuando la bomba se encuentra operando con un fluido 100% agua.

Tabla 13. Fluido 100% agua

Frecuencia (Hz)	Voltaje (V)	Corriente (Amp)	Potencia (Voltamperio)	Potencia (Hp)	RPM (motor)	Torque (Lbf-ft)	RPM(bomba)	Caudal (Bpd)
21.2	220	0.8	176	0.000235925	1272	0.000974118	424	3.413624
30.4	220	1	220	0.000294906	1824	0.000849149	608	4.895008
40.4	220	1.15	253	0.000339142	2424	0.000734808	808	6.505208
50.1	220	1.3	286	0.000383378	3006	0.000669827	1002	8.067102
60.4	220	1.5	330	0.000442359	3624	0.000641079	1208	9.725608

Fuente. Elaboración propia.

Grafica 2. Comportamiento de la bomba PCP a escala laboratorio operando con 100% agua.



Fuente. Elaboración propia.

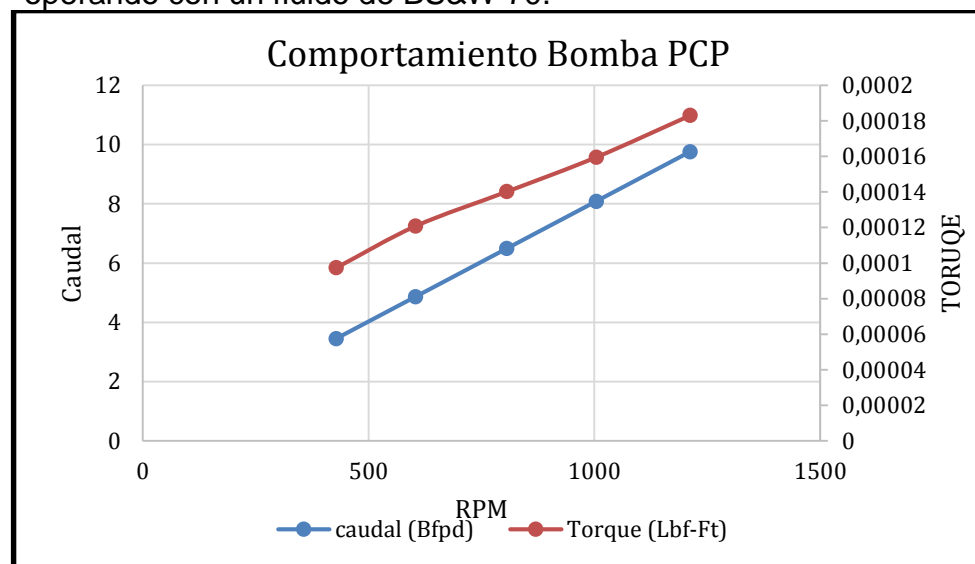
6.1.3 Fluido con BS&W 70. A continuación, en la **Tabla 14** se presentan los datos registrados para el fluido con BS&W 70 y los cálculos registrados. Así mismo en la Grafica 3 se relaciona el comportamiento de las variables caudal vs RPM y torque vs RPM cuando la bomba se encuentra en accionamiento con un fluido con BS&W 70.

Tabla 14. Fluido con BS&W 70

Frecuencia (Hz)	Volta je (V)	Corriente (Amp)	Potencia (Voltampereio)	Potencia (Hp)	RPM (motor)	Torque (Lbf-ft)	RPM(bomba)	Caudal (Bpd)
21.4	220	0.83	182.6	0.000244772	1284	0.001001202	428	3.445828
30.2	220	1.03	226.6	0.000303753	1812	0.000880415	604	4.862804
40.3	220	1.20	262.9	0.000352413	2418	0.000765456	806	6.489106
50.2	220	1.36	299.2	0.000401072	3012	0.000699347	1004	8.083204
60.6	220	1.56	343.2	0.000460054	3636	0.000664522	1212	9.757812

Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3. Comportamiento de la bomba PCP a escala laboratorio operando con un fluido de BS&W 70.



Fuente. Elaboración propia.

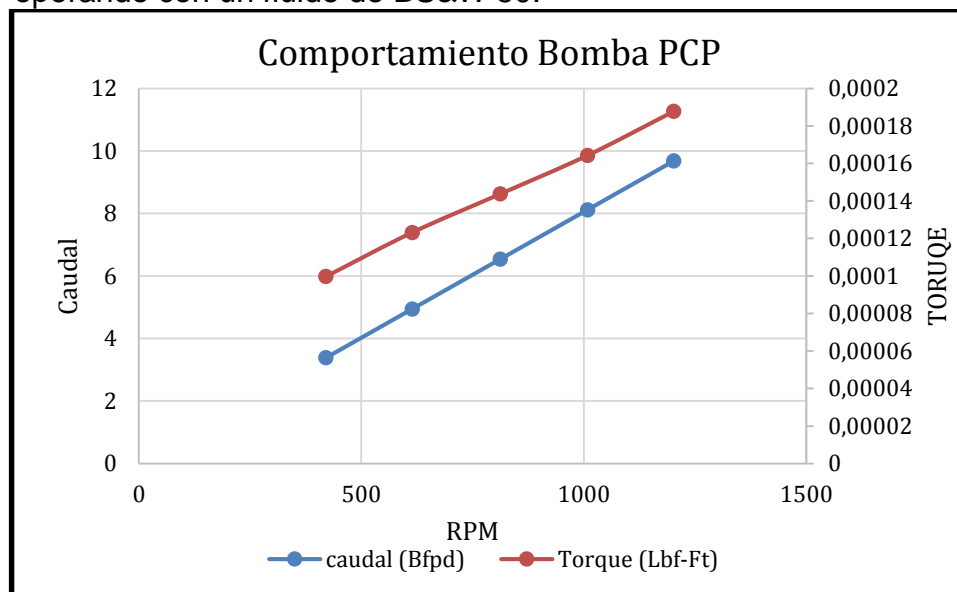
6.1.4 FLUIDO CON BS&W 50. A continuación en la **Tabla 15** se muestran los datos registrados a diferentes frecuencias y los cálculos realizados. De igual manera en la **Grafica 4** se relaciona el comportamiento de las variables caudal vs RPM y torque vs RPM, cuando la bomba trabaja con un fluido con BS&W 50.

Tabla 15. Fluido con BS&W 50

Frecuencia (Hz)	Voltaje (V)	Corriente (Amp)	Potencia (Voltamp erio)	Potencia (Hp)	RPM (motor)	Torque (Lbf-ft)	RPM(bomba)	Caudal (Bpd)
21	220	0.85	187	0.00025067	1260	0.001044857	420	3.38142
30.7	220	1.1	242	0.000324397	1842	0.000924936	614	4.943314
40.6	220	1.25	275	0.000368633	2436	0.00079477	812	6.537412
50.4	220	1.4	308	0.000412869	3024	0.000717059	1008	8.115408
60.1	220	1.6	352	0.00047185	3606	0.000687231	1202	9.677302

Fuente. Elaboración propia.

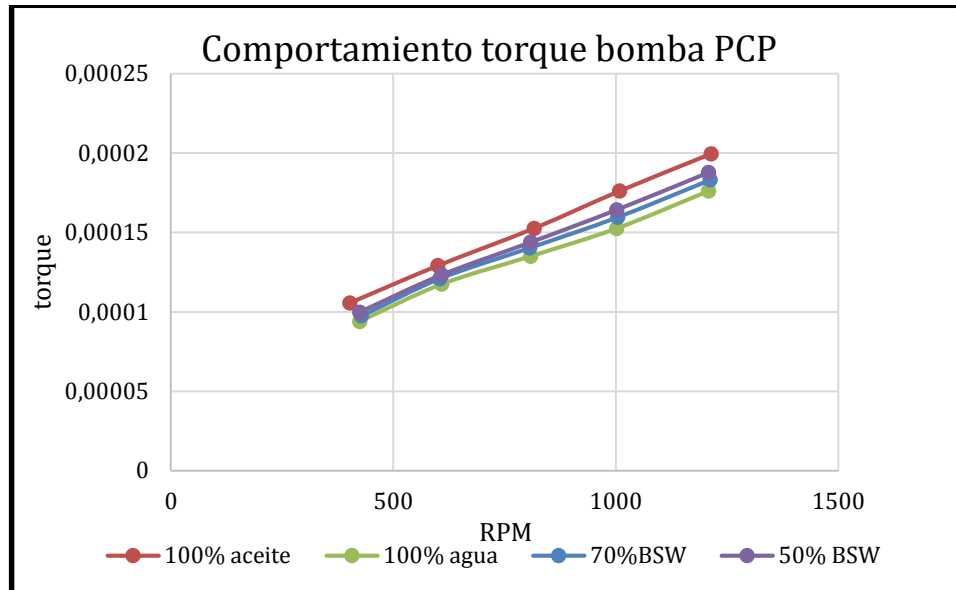
Grafica 4. Comportamiento de la bomba PCP a escala laboratorio operando con un fluido de BS&W 50.



Fuente. Elaboración propia.

A continuación, en la **Gráfica 5** se muestra el comportamiento del torque de la bomba PCP con los distintos fluidos con que trabajo.

Grafica 5. Comportamiento del torque de la bomba PCP a escala laboratorio.



Fuente. Elaboración propia.

6.1.5 Análisis de resultados obtenidos de la bomba PCP con diferentes fluidos. Las gráficas presentes en este capítulo muestran el torque de operación dependiendo de las RPM a las cuales esté operando el sistema. Se evidencia una tendencia general a disminuir el torque al aumentar las RPM, presentando el comportamiento óptimo de un sistema PCP. Esto se presenta debido a que al aumentar las RPM se tiene un menor contacto por fricción entre el rotor, el estator y el fluido que va pasando a través de ellos. Así mismo se tiene menor escurrimiento del aceite que pasa por la bomba.

Al momento en que la bomba opera con fluido 100% aceite 20W50 el valor del torque es superior con respecto a los otros fluidos debido a que este genera una mayor resistencia a fluir y por consiguiente le exige a la bomba mayor potencia para desplazar su columna de fluido.

Al agregarle periódicamente agua al fluido 100% aceite para alcanzar los BS&W deseados de 70 y posteriormente 50 se genera una disminución en el torque del sistema puesto que el agua disminuye la viscosidad del fluido presente en el pozo. De igual manera se genera menor fricción con la bomba, forjando una disminución directa en el torque.

6.2 DETERMINACION DE LA EFICIENCIA VOLUMETRICA DE LA BOMBA

Todas las bombas PCP son fabricadas con una eficiencia volumétrica que depende del fluido al cual serán los elastómeros, de tal forma que a medida que cuando estos alcanzan su máximo hinchamiento la bomba llega a una eficiencia volumétrica establecida, en este caso, en este caso se requiere que la bomba tenga una eficiencia del 90%. Con el fin de comprobar las características volumétricas con las que salió de fabrica la bomba NETZCH NM008*3S se compararon los caudales reales con los teóricos para así conocer la eficiencia con la cual arranco la operación la bomba PCP. La toma de los caudales se realizó de manera manual, tomando el tiempo que tardaba la bomba a diferentes RPM en succionar 3.5 litros.

Estos valores se calcularon de la siguiente manera:

- **Volumen:** el volumen de fluido contenido en el pozo es debido a la figura de un prisma rectangular el cual tiene 25 cm de ancho* 28 de largo, dando que por cada cm de altura se desplazan 0.7 litros de fluido. Para hallar el caudal se tomó como referencia una distancia de 5 cm, por lo que, según lo anterior, la bomba deberá desplazar un volumen de 3.5 litros a unas RPM constantes durante un periodo determinado de tiempo que será registrado.
- **Caudal real:** este se determinó tomando el tiempo que tardaba la bomba en desplazar el volumen de fluido establecido a unas RPM constantes ($\frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}}$). Para las siguientes y sucesivas pruebas se tomó el mismo volumen (3.5 litros) y se aumentan estrictamente las RPM manteniéndose constante durante el tiempo.

Ecuación 22. Caudal real.

$$Q_{real} = V/t$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde

Qreal: caudal real (l/min)

V: volumen (l)

t: tiempo (minutos)

- **Eficiencia:** se calcula dividiendo el caudal real sobre el caudal teórico multiplicado por 100.

Ecuación 23. Eficiencia.

$$efic = Q_{real}/Q_{teorico}$$

Fuente. HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008.

Donde

Q_{real}: caudal real (l/min)

Q_{teórico}: caudal teórico (l/min)

Efic: eficiencia (%)

6.2.1 Fluido 100% agua. La **Tabla 16** muestra los valores calculados cuando el sistema se encuentra en accionamiento con un fluido 100% agua, para este caso la bomba trabaja con máxima eficiencia de 68% a 808 RPM.

Tabla 16. Fluido 100% agua

RPM	Tiempo (min)	Volumen (l)	Caudal real(l/min)	Caudal teórico(l/min)	Eficiencia %
424	14	3.5	0.25	0.376512	66%
608	10	3.5	0.35	0.539904	65%
808	7.2	3.5	0.48611111	0.717504	68%
1002	6.2	3.5	0.56451613	0.889776	63%
1208	4.9	3.5	0.71428571	1.072704	67%

Fuente. Elaboración propia.

6.2.2 Fluido 100% aceite 20W50. La **Tabla 17** muestra el comportamiento del sistema cuando este se encuentra en accionamiento con un fluido 100% aceite 20W50, en este caso la bomba trabaja con máxima eficiencia de 71% a 816 RPM.

Tabla 17. Fluido 100% aceite

RPM	Tiempo (min)	Volumen (l)	Caudal real(l/min)	Caudal teórico(l/min)	Eficiencia %
402	14.5	3.5	0.24137931	0.356976	68%
600	9.4	3.5	0.37234043	0.5328	70%
816	6.8	3.5	0.51470588	0.724608	71%
1008	6.3	3.5	0.55555556	0.895104	62%
1214	4.8	3.5	0.72916667	1.078032	68%

Fuente. Elaboración propia.

6.2.3 Fluido con BS&W 70. El comportamiento del sistema con un fluido con BS&W 70 se observa en la **Tabla 18**, obteniendo una máxima eficiencia de la bomba del 74% a 428 RPM.

Tabla 18. Fluido con BS&W 70

RPM	Tiempo (min)	Volumen (l)	Caudal real(l/min)	Caudal teórico(l/min)	Eficiencia %
428	12.5	3.5	0.28	0.380064	74%
604	10.3	3.5	0.33980583	0.536352	63%
806	6.9	3.5	0.50724638	0.715728	71%
1004	5.7	3.5	0.61403509	0.891552	69%
1212	4.9	3.5	0.71428571	1.076256	66%

Fuente. Elaboración propia.

6.2.4 Fluido con BS&W 50. En la **Tabla 19** se observan los valores calculados cuando el sistema estaba en accionamiento con un fluido con BS&W 50, para este caso la bomba trabajo con máxima eficiencia del 74% a 812 RPM.

Tabla 19. Fluido con BS&W 50

RPM	Tiempo (min)	Volumen (l)	Caudal real(l/min)	Caudal teórico(l/min)	Eficiencia %
420	13	3.5	0.26923077	0.37296	72%
614	9.5	3.5	0.36842105	0.545232	68%
812	6.6	3.5	0.53030303	0.721056	74%
1008	5.9	3.5	0.59322034	0.895104	66%
1202	4.6	3.5	0.76086957	1.067376	71%

Fuente. Elaboración propia.

6.2.5 Análisis de resultados obtenidos de la eficiencia volumétrica de la bomba PCP con diferentes fluidos. Los cuatro fluidos utilizados en la experimentación se manejaron a RPM cercanas para observar el comportamiento y funcionamiento óptimo de la bomba. Se determinó con base en la experimentación que el caudal del fluido aumenta directamente proporcional con respecto al incremento de las RPM de la bomba por medio del variador de frecuencia. Según lo anterior, se concluye que si lo que se quiere es una rápida extracción del fluido, el procedimiento a seguir es aumentar periódicamente las RPM de la bomba hasta alcanzar el caudal deseado de bombeo.

El promedio de eficiencia calculado a través de las pruebas realizadas es de 68.25%, lo que demuestra que la bomba de fábrica viene con una eficiencia menor a la esperada; lo anterior es con el fin de que a medida que la bomba se ponga en marcha y opere, el elastómero sufra un hinchamiento periódico cada vez que entre en contacto con los fluidos producidos, permitiendo un mayor acople al rotor y por consiguiente, lograr alcanzar la eficiencia volumétrica deseada (90%).

7. CONCLUSIONES

- Al probar la bomba a distintas RPM se puede concluir que viene con una eficiencia de fábrica entre un rango de 65-75%, lo cual es muy beneficioso para la finalidad del proyecto puesto que se busca que la Universidad de América le saque el mayor provecho posible al sistema a escala laboratorio. Dicha bomba aumentara su eficiencia con el tiempo a medida que se ponga en marcha y opere.
- Para una adecuada selección de poleas con respecto a un motor específico se debe tener en cuenta las RPM a las cuales tendrá que operar la bomba para lograr succionar el fluido de interés y llevar a las facilidades de producción el caudal requerido. En lo que respecta este proyecto se seleccionaron unas poleas con una relación de 3:1 con el objetivo de disminuir las 3750 RPM a las que pueda llegar el motor en marcha a velocidad nominal y reducirlas a las 1250 RPM, siendo esta la máxima frecuencia a la que puede operar la bomba.
- El rango de operación de la bomba se debe mantener entre 15-60 Hz dado que si se opera fuera de este rango el motor se puede quemar.
- De acuerdo con la experimentación se concluye que la viscosidad es un factor ponderante para el manejo de fluidos por medio de una bomba PCP. Gracias a los cálculos realizados con fluidos que presentaban diferentes viscosidades, los resultados obtenidos demuestran que a mayor viscosidad el sistema necesita de mayor torque para desplazar la columna de fluido que este contiene.
- Debido a la baja viscosidad que presenta el agua, la cual genera poco sello hidráulico, el sistema al ponerse en marcha con dicho fluido presentó fugas en el stuffing box y en válvulas de entrada al tanque, lo cual demuestra que el sistema construido a escala emula a uno real en todas sus condiciones de operación, haciendo que se presenten situaciones muy similares a las acaecidas en los sistemas instalados en pozos petroleros.
- Al probar en un inicio la bomba con aceite e irle añadiendo agua para alcanzar un BS&W deseado quedo en evidencia que el torque del sistema disminuye a medida que se bombean fluidos menos viscosos. Además de esto, también se reflejó que a medida que se aumenta la frecuencia del motor, disminuye el torque del sistema.
- Al operar la bomba PCP a escala laboratorio por un periodo determinado de tiempo a las mismas RPM se confirma que es de desplazamiento positivo ya que al observar los resultados obtenidos se pudo comprobar que esta desplaza un volumen de fluido constante.

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda instalar medidores de protección al motor para alta temperatura, alto torque y sobre/bajo amperaje, para prevenir daños prematuros en el sistema.
- Implementar un control de nivel en el tanque para visualizar la entrada y salida de fluidos.
- Implementar una válvula que permita realizar el drenaje en fondo.
- Se recomienda instalar un manómetro y un amperímetro para un fácil registro de las variables.
- Se recomienda evaluar la bomba con fluidos que presenten diferentes temperaturas para evaluar el comportamiento de la bomba, principalmente el del elastómero.
- Se recomienda diluir sustancias químicas al agua para evaluar el comportamiento operativo del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de falla y Trouble Shooting. El tigre, Venezuela. Septiembre, 2013.

HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio, 2008.

INGENIERIA. Programa para el diseño del PCP. Enero, 2011.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

R.A.R MILLS (KUDU INDUSTRIES INC), R. GAYMARD (KUDU INDUSTRIES INC). New Applications for Wellbore Progressing Cavity Pumps. SPE-35541-MS. 1996.

REYES LOPEZ, Jaime y CRISPIN VENECEZ, Sámano. Nuevos desarrollos en el bombeo de cavidades progresivas para la optimización de la producción de pozos de aceite. Tesis Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. Mayo, 2011.

TDA SUPPLY & SERVICE S.A. Diseño, Diagnostico, Optimización, Instalación y Análisis de fallas de sistemas PCP. Universidad Industrial de Santander. 24 y 25 de febrero, 2012.