

**ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO
ARTIFICIAL PCP METAL-METAL IMPLEMENTADO EN UN CAMPO DEL
VALLE DEL MAGDALENA MEDIO**

CARLOS ORLEY GIL AMAYA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2021

**ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO
ARTIFICIAL PCP METAL-METAL IMPLEMENTADO EN UN CAMPO DEL
VALLE DEL MAGDALENA MEDIO**

CARLOS ORLEY GIL AMAYA

**Monografía presentada como requisito para optar el título de Especialista en
Producción de Hidrocarburos**

Director

SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO
Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2021

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de estar con vida y enseñarme los caminos correctos para poder alcanzar esta nueva meta.

*A mi madre **LUCEINA AMAYA RINCON** por brindarme todo el apoyo incondicional y por todas las motivaciones para alcanzar un logro más en mi vida.
Todo lo que soy hoy, te lo debo a ti. Te Amo*

CARLOS ORLEY GIL AMAYA

AGRADECIMIENTOS

A Dayana Bustos por inspirarme a seguir adelante con la monografía y por darme los mejores ánimos en los días más oscuros

Al Ingeniero Samuel Fernando Muñoz Navarro por dirigir mi monografía y por sus aportes realizados.

A la prestigiosa Universidad Industrial de Santander por contar con los más altos índices de calidad en educación y formación profesional.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos y por todos los docentes que hacen parte de ella, gracias a cada uno por los aportes profesionales que hicieron a lo largo de nuestra formación profesional.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL.....	17
1.1 RESEÑA HISTORICA.....	17
1.2. BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS (PCP)	19
1.2.1. Equipos de Superficie.	21
1.2.2. Equipos de Subsuelo.	25
1.2.3. Ventajas y Desventajas del Sistema PCP Convencional.	33
1.3. BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESIVAS METAL-METAL (AMPCP).....	35
1.3.1. Ventajas de las bombas PCP Metal-Metal.....	38
1.3.2. Desventajas de las bombas PCP Metal-Metal	38
1.4. RANGO DE OPERACIÓN DE UNA BOMBA PCP METAL-METAL.....	39
1.5. PRINCIPIO DE HIDROFORMADO	40
1.6 PRINCIPIO DE OPERACIÓN	40
1.7. EQUIPOS DE SUPERFICIE	41
1.7.1. Cabezal de Rotación.....	41
1.7.2. Sello preventor de fugas.	41
1.7.3. Válvulas preventoras.....	41
1.7.4. Variador de frecuencia.	42
1.7.5. Monitor del desempeño de la bomba.	42
1.8. EQUIPOS DE SUBSUELO	42
1.8.1. Centralizador metálico resistente a altas temperaturas.	42
1.8.2. Bujías de paro.....	43
1.8.3. Anclas anti-vibración/anti-torque.....	43
1.9. PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN (AMPCP).....	44

2. CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL PCP METAL-METAL PARA EL CAMPO DE ESTUDIO A PARTIR DE UNA MATRIZ DE SELECCIÓN	45
3. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CAVIDADES PROGRESIVAS METAL-METAL EN EL CAMPO DE ESTUDIO.....	51
3.1. HISTORIAL DE PRODUCCIÓN DEL POZO A-1 CON PCP CONVENCIONAL	52
3.2. HISTORIAL DE PRODUCCIÓN DEL POZO A-1 CON PCP METAL-METAL.....	57
3.3. HISTORIAL DE PRODUCCIÓN DEL POZO A-2 CON PCP CONVENCIONAL	62
3.4. HISTORIAL DE PRODUCCIÓN DEL POZO A-2 CON PCP METAL-METAL.....	67
4. CÁLCULOS DE PÉRDIDAS ASOCIADAS AL ESCURRIMIENTO DE LA BOMBA PCP METAL-METAL MEDIANTE EL SIMULADOR PC-PUMP	72
4.1. CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR ESCURRIMIENTO DE LA BOMBA PCP METAL-METAL EN EL POZO A-1 MEDIANTE EL SIMULADOR PC-PUMP	76
4.1.1. Análisis del Resultado Simulado y los Datos Reales en Campo del Pozo A-1.....	81
4.2. CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR ESCURRIMIENTO DE LA BOMBA PCP METAL-METAL EN EL POZO A-2 MEDIANTE EL SIMULADOR PC-PUMP	82
4.2.1 Análisis del Resultado Simulado y los Datos Reales en Campo del Pozo A-2.....	87
5. ANÁLISIS FINANCIERO.....	88
5.1 INVERSION INICIAL.....	89
5.2 FLUJO NETO DE EFECTIVO.....	89
5.3 REGALÍAS	90
5.4 INDICADORES FINANCIEROS	91
5.4.1 Valor Presente Neto (VPN).....	92
5.4.2 Tasa Interna de Retorno (TIR).....	93
5.4.3. Tiempo de Recuperación de la Inversión (PAYBACK).....	93
5.4.4. Payback Simple.....	94

5.4.5. Payback Ajustado.	94
6. ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CAVIDADES PROGRESIVAS METAL-METAL	95
6.1. ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DEL POZO A-1	96
6.1.1. Ingresos.	96
6.1.2. Egresos.	101
6.1.3. Cálculo de Indicadores Financieros.	110
6.1.4. Resumen Financieros para el Pozo A-1.....	112
6.1.5. Selección del Sistema Económicamente Viable.	114
6.2. ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DEL POZO A-2	114
6.2.1. Ingresos.	115
6.2.2. Egresos.	119
6.2.3. Cálculos De Indicadores Financieros.....	128
6.2.4. Resumen Financiero para el Pozo A-2..	131
6.2.5. Selección del Sistema Económicamente Viable.	132
7. CONCLUSIONES	133
8. RECOMENDACIONES	134
BIBLIOGRAFIA.....	135
ANEXOS.....	138

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema PCP Convencional.....	20
Figura 2. Componentes de equipos de superficie.....	21
Figura 3. Cabezal de Rotación.....	22
Figura 4. Motor Eléctrico.....	23
Figura 5. BOP de Varilla.....	24
Figura 6. Variador de Frecuencia.....	25
Figura 7. Equipos de subsuelo del sistema PCP convencional.....	26
Figura 8. Rotor y Estator.....	27
Figura 9. Sarta de Varilla.....	28
Figura 10. Niple de Paro.....	29
Figura 11. Ancla de Torque.....	30
Figura 12. Centralizadores de Varilla.....	30
Figura 13. Elastómero.....	33
Figura 14. Sistema PCP Metal-Metal instalada en campo con inyección de vapor.....	36
Figura 15. Bosquejo estator-rotor de una PCP Metal-Metal.....	37
Figura 16. Rango de operación de bombas PCP Metal-Metal Vulcain™ (PCM).....	39
Figura 17. Estator de bomba PCP Vulcain™ – PCM.....	40
Figura 18. Cabezal de rotación para PCP Metal-Metal.....	41
Figura 19. BOP para PCP Metal-Metal.....	42
Figura 20. Centralizador metálico resistente a altas temperaturas.....	42
Figura 21. Ancla antitorque para bomba PCP Metal-Metal.....	43
Figura 22. Ensamblaje de superficie y fondo de PCP Vulcain™ (PCM).....	43
Figura 23. Procedimiento para la instalación de las bombas Metal-Metal.....	44
Figura 24. Procedimiento para la evaluación de la tecnología PCP Metal-Metal.....	52

Figura 25. Estado mecánico del pozo A-1	53
Figura 26. Gráfica de producción trimestral del pozo A-1 durante 6 años	55
Figura 27. Intervenciones de Well Services por fallas operacionales del pozo A-1	56
Figura 28. Gráfica y Cuadro de producción trimestral del pozo A-1 con PCP metal- metal.	59
Figura 29. Comparación de producción trimestral con tecnología PCP Metal-Metal vs Convencional del pozo A-1.....	61
Figura 30. Estado mecánico del pozo A-2	63
Figura 31. Producción Trimestral del Pozo A-2 durante 6 años.....	65
Figura 32. Intervenciones de Well Services por Fallas Operacionales del Pozo A-2	66
Figura 33. Cuadro de Producción Trimestral del Pozo A-2 con PCP Metal-Metal.	69
Figura 34. Comparación de Producción Trimestral con Tecnología PCP Metal- Metal vs Convencional del Pozo A-2	70
Figura 35. Eficiencia Volumétrica vs Presión Diferencial en Función en el Número de Etapas de la Bomba.....	73
Figura 36. Eficiencia Volumétrica Vs Presión Diferencial en Función de la Viscosidad	74
Figura 37. Eficiencia Volumétrica Vs Presión Diferencial en Función del Ajuste del Rotor y Estator	75
Figura 38. Información del Pozo A-1 para Ajustarlo al Simulador.....	76
Figura 39. Resultados de Simulación del Pozo A-1	80
Figura 40. Información del Pozo A-2 para Ajustarlo al Simulador.....	82
Figura 41. Resultados de Simulación del Pozo A-2	86
Figura 42. Grafica del Flujo Neto Efectivo	90

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Ventajas y desventajas del sistema PCP convencional	34
Cuadro 2. Matriz para la selección del sistema de levantamiento artificial en el campo A.....	46
Cuadro 3. Screening para la aplicación de bomba PCP Meta-Metal	49
Cuadro 4. Propiedades básicas de los pozos candidatos a evaluar	50
Cuadro 5. Producción Trimestral del pozo A-1	54
Cuadro 6. Datos para el diseño de la bomba PCP metal-metal en el pozo A-1	58
Cuadro 7. Comparación de barriles de petróleo producido con tecnología PCP metal-metal Vs convencional	62
Cuadro 8. Producción Trimestral del pozo A-2	64
Cuadro 9. Datos para el diseño de la bomba PCP metal-metal en el pozo A-2.....	68
Cuadro 10. Comparación de Barriles de Petróleo Producido con Tecnología PCP Metal-Metal Vs Convencional	71
Cuadro 11. Comparación de los datos Simulador y Reales en Campo del Pozo A-1	81
Cuadro 12. Comparación de los Datos Simulador y Reales en Campo del Pozo A-2.....	87
Cuadro 13. Cálculos de Regalías por Producción de Hidrocarburos en Colombia	91
Cuadro 14. Ajustes del precio de venta del crudo en el Campo A.....	97
Cuadro 15. Ganancia de crudo con la PCP en el pozo A-1	98
Cuadro 16. Producción Neta del Pozo A-1 del Sistema PCP Metal-Metal y Convencional Descontando Regalías	100
Cuadro 17. Ingresos Totales por Producción de Crudo Descontando Regalías..	101

Cuadro 18. Ingreso Total Neto de la Compañía Descontando el Impuesto del 32% Correspondiente al año 2020.....	103
Cuadro 19. Costos Asociados al Lifting Cost para el Pozo A-1	104
Cuadro 20. Costos Asociados a los MMBTU Inyectados al Pozo A-1	105
Cuadro 21. Flujo de Caja Neta de la Tecnología PCP Metal-Metal y PCP Convencional	106
Cuadro 22. Costos de Inversión Inicial para la Tecnología PCP Metal-Metal y Convencional.	108
Cuadro 23. Resumen de los Indicadores Financieros de cada Tecnología en el Pozo A-1	113
Cuadro 24. Indicadores Financieros Varios Precios Internacionales del Crudo ..	113
Cuadro 25. Ajustes del Precio de Venta del Crudo en el Campo A	115
Cuadro 26. Ganancia de Crudo con la PCP en el Pozo A-2.....	116
Cuadro 27. Producción Neta del Pozo A-2 del Sistema PCP Metal-Metal y Convencional Descontando Regalías.....	118
Cuadro 28. Ingresos Totales por Producción de Crudo Descontando Regalías..	119
Cuadro 29. Ingreso Total Neto de la Compañía Descontando el Impuesto del 32% Correspondiente al Año 2020.	121
Cuadro 30. Costos Asociados al Lifting Cost para el Pozo A-2	122
Cuadro 31. Costos Asociados a los MMBTU Inyectados al Pozo A-2	123
Cuadro 32. Flujo de Caja Neta de la Tecnología PCP Metal-Metal y PCP Convencional	124
Cuadro 33. Costos de Inversión Inicial de las Bombas PCP Metal-Metal y Convencional del Pozo A-2.....	126
Cuadro 34. Resumen de los Indicadores Financieros de cada Tecnología en el Pozo A-2	131
Cuadro 35. Indicadores Financieros Varios Precios Internacionales del Crudo ..	131

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Flujo Neto Efectivo	90
Ecuación 2. Valor Presente Neto (VPN)	92
Ecuación 3. Tasa Interna de Retorno (TIR)	93
Ecuación 4. Payback Simple	94
Ecuación 5. Payback Ajustado.....	94
Ecuación 6. Cálculos para Ingresos del Proyecto.....	95
Ecuación 7. Calculo para el volumen de regalías para el pozo A-1	98
Ecuación 8. Cálculos de la producción neta de barriles para la empresa operadora.	99
Ecuación 9. Calculo para el Total de Ingresos en Dólares	100
Ecuación 10. Calculo para el Descuento de Renta de las Ganancias Netas del Pozo A-1	102
Ecuación 11. Calculo para la Relación Beneficio-Costo	111
Ecuación 12. Calculo para el Volumen de Regalías para el Pozo A-2.....	116
Ecuación 13. Cálculos de la Producción neta de Barriles para la Empresa Operadora.....	117
Ecuación 14. Calculo para el Total de Ingresos en Dólares	118
Ecuación 15. Calculo para el Descuento de Renta de las Ganancias Netas del Pozo A-2	120
Ecuación 16. Calculo para la Relación Beneficio-Costo	129

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Procedimiento de Instalación de Bombas PCP.....	138

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL PCP METAL-METAL IMPLEMENTADO EN UN CAMPO DEL VALLE DEL MAGDALENA MEDIO.*

AUTORES: CARLOS ORLEY GIL AMAYA**

PALABRAS CLAVES: PCP Metal-Metal, Estator Metálico, Bomba de cavidades progresivas metálicas, Pozos Horizontales.

DESCRIPCIÓN:

Cuando se inicia la producción de un pozo, la presión del yacimiento declina con el pasar de los días, por lo cual se hace necesario la implementación de un sistema de levantamiento artificial (SLA) el cual pueda aportar la presión necesaria para que los fluidos lleguen a superficie. Por ende, para la selección del sistema apropiado, se deben tener las propiedades del yacimiento y de los fluidos para garantizar la producción del pozo y evitar los problemas operacionales durante el funcionamiento del sistema de bombeo. Para este estudio se realizó un análisis técnico-económico del sistema de levantamiento artificial PCP Metal-Metal, donde se reflejó la viabilidad de esta tecnología en pozos con altos porcentaje de sólidos y arenas. Las bombas convencionales de estos pozos estaban presentando un runlife inferiores a los 30 días, por lo cual fue necesario la implementación de estatores metálicos con el fin de reducir estos problemas operacionales y a la vez aumentar la producción de crudo del campo de estudio.

En el análisis realizado del sistema PCP metal-metal se pudo observar un aumento en la producción del crudo en los pozos donde se implementó esta tecnología y se logró la reducción de fallas operacionales como: fallas por agentes abrasivos, fallas por deformaciones del estator y fallas debido a las altas temperatura del yacimiento después de haber realizado su ciclo de inyección. Por lo cual el caso de estudio es económicamente factible y viable para los pozos del campo donde se implementó esta tecnología.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Producción de Hidrocarburos. Director: Samuel Fernando Muñoz Navarro, Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL-ECONOMIC ANALYSIS OF THE PCP METAL-METAL ARTIFICIAL LIFTING SYSTEM IMPLEMENTED IN A FIELD OF THE MIDDLE MAGDALENA VALLEY. *

AUTHOR: CARLOS ORLEY GIL AMAYA**

KEYWORDS: Metal-Metal PCP, Metallic Stator, Metallic progressive cavity pump, Horizontal Wells.

DESCRIPTION

When the production of a well begins, the pressure of the reservoir declines with the passing of days, for which it is necessary to implement an artificial lift system (SLA) which can provide the necessary pressure for the fluids to arrive to surface. Therefore, for the selection of the appropriate system, one must have the properties of the reservoir and the fluids to guarantee the production of the well and avoid operational problems during the operation of the pumping system. For this study, a technical-economic analysis of the PCP Metal-Metal artificial lift system was carried out, where the viability of this technology in wells with a high percentage of solids and sands was reflected. The pumps in these wells were presenting a run-life of less than 30 days, for which it was necessary to implement metallic stators in order to reduce these operational problems and at the same time increase the crude production of the study field.

In the analysis of the metal-metal PCP system, an increase in crude oil production was observed in the wells where this technology was implemented and the reduction of operational failures such as: failures due to abrasive agents, failures due to stator deformations and failures was achieved. due to the high temperature of the reservoir after having carried out its injection cycle. Therefore, the case study is economically feasible and viable for the wells in the field where this technology was implemented.

* Degree Project

**Physicochemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Specialization in Hydrocarbon Production. Director: Samuel Fernando Muñoz Navarro, Master in Hydrocarbon Engineering

INTRODUCCIÓN

La demanda energética en Colombia ha encaminado a muchas compañías operadoras en la obligación de extraer crudo manteniendo las políticas ambientales y sociales de la nación, en la cual ha sido un verdadero reto para el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías con el fin de minorar los costos operacionales y obtener una mayor producción de petróleo.

En el Valle Medio del Magdalena se presentan diferentes campos petroleros con un gran tiempo de vida productiva, por el cual se ha declinado su producción debido a los diferentes métodos de extracción y a los métodos de recobro por lo cual se observa en las plantas de tratamiento mayor cantidad de arenas debido al debilitamiento de la matriz de la roca generadora. Debido a estos problemas operacionales varias empresas de servicios de sistemas de levantamiento artificial han realizado modificaciones a los sistemas convencionales en el cual se destaca el del PCP Metal-Metal el cual ha tenido un gran auge en aquellos pozos donde el contenido de arena es mayor y opera sin ningún problema a pozos con altas temperaturas de yacimiento.

Por lo anterior, las empresas operadoras se han visto en la necesidad de investigar e incursionar en tecnologías enfocadas en el mejoramiento y eficiencia de la producción de los pozos, en el cual se reflejaron resultados positivos donde se implementó la tecnología PCP Metal-Metal y tuvo un aumento en la producción de crudo, reducción de fallas operacionales, como fallas en el estator, fallas por desgastes del rotor y estator y la recuperación de la inversión en corto periodo de tiempo. Con el fin de mostrar la innovación de esta nueva tecnología y mirar la factibilidad de aplicarla en otros pozos del campo de estudio.

1. SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

Un sistema de levantamiento artificial (SLA) es un método externo que aporta la energía necesaria a la formación productora para llevar el crudo desde la formación a superficie a una determinada tasa de bombeo según las condiciones de operación de este y del yacimiento. Por ende, en el presente capítulo se explicará el sistema de levantamiento artificial de cavidades progresivas (PCP) y el PCP Metal-Metal con la finalidad de conocer sus principales funciones y aplicaciones en el campo de estudio.

1.1 RESEÑA HISTORICA

El concepto de las bombas de cavidad progresiva fue desarrollado a finales de los años 20 por el Sr. René J. Moineau. Nacido en Francia en 1887, Moineau mostró grandiosas cualidades intelectuales e inventivas desde temprana edad. Después de participar en una carrera de hidroplanos en 1913 (la cual ganó en una de sus etapas) mostro interés en el desarrollo de un compresor de aire de alta capacidad para los cual cursó estudios en la universidad de Paris hasta lograr su grado de Doctor de la Facultad de Ciencias en 1930 con su tesis basada en “*el nuevo capsulismo*”. Con esto, Moineau logra aplicar para su primera patente el 13 de Mayo de 1930, con un nuevo concepto en máquinas mecánicas aplicable para bombas, motores y dispositivos de transmisión. Ese mismo año, muestra su nueva bomba “Moineau” hecha de cartón en la “Exhibición Internacional de Inventores”.

En 1932, René Moineau forma la compañía “Pompes Compresseurs Mécanique” (PCM) en asociación con Gévelot Company, fungiendo como presidente fundador y domiciliado en la población de Vanves, Francia. En 1936, las patentes son vendidas

bajo acuerdos de licencia a diversas compañías internacionales entre las que se destacan *Mono Pumps Ltda* de Inglaterra y *Robbins and Myers* de los Estados Unidos. Además, se lograron acuerdos de fabricación con compañías en Alemania, China, Brasil y Canadá¹.

En sus inicios, la tecnología de cavidades progresivas fue dedicada para el desarrollo de sistemas de transmisión y bombas de transferencia para aplicaciones industriales (alimentos, papel, agricultura, petróleo, etc.). Para la industria petrolera, la primera aplicación data de los mediados de los años 50, cuando se desarrollaban los primeros motores hidráulicos con mecanismo de doble rotor helicoidal para ser utilizados en la perforación de pozos direccionales. Sin embargo, con excepción de algunas pruebas clandestinas, no fue sino hasta finales de los años 70 cuando se realizaron esfuerzos considerables para utilizarlas como método de levantamiento artificial para pozos productores de hidrocarburos.

En 1979, algunas operadoras canadienses de crudo pesado cuyos pozos producían fluidos con un alto corte de arena, empezaron a experimentar con PCP. Una vez que las pruebas en estas exigentes aplicaciones fueron exitosas, el desarrollo de sistemas completos de fondo y superficie aumentó rápidamente. En los años sucesivos, la gama de productos empezó a comercializarse y la frecuencia de utilización incremento considerablemente en los campos de crudo pesado de Canadá. Al mismo tiempo, los fabricantes empezaron a evolucionar en términos de lograr mayores capacidades volumétricas y de levantamiento, así como elastómeros de mejor resistencia a aplicaciones exigentes².

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

¹ CIULLA, Francesco; En: Principios Fundamentales para Diseño de Sistemas de Bombas de Cavidades Progresiva, Weatherford Artificial Lift Systems.; 2003.

² Ibid.

Producción de petróleos pesados y bitumen (< 18 °API) con cortes de arena hasta un 50%.

- Producción de crudos medios (18-30 °API) con limitaciones en el % de H₂S.
- Petróleos livianos (>30 °API) con limitaciones en aromáticos.
- Producción de pozos con altos % de agua y altas producciones brutas, asociadas a proyectos avanzados de recuperación secundaria (por inyección de agua).

1.2. BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS (PCP)

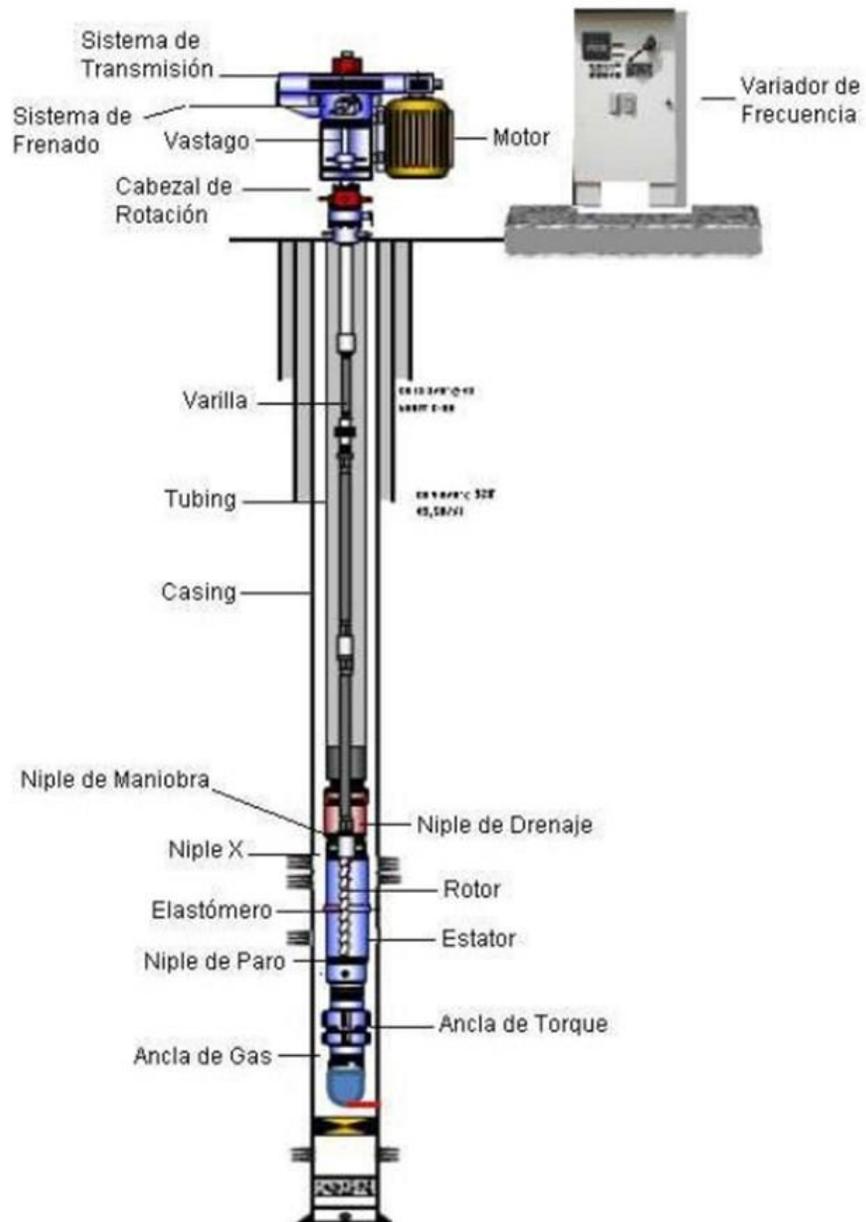
Las bombas de cavidades progresivas (*Progressive Cavity Pump* - PCP) son bombas de desplazamiento positivo que se componen de un rotor de acero helicoidal dentro de un elastómero sintético, que se encuentra unido internamente a un tubo de acero (estator). El estator se instala en el pozo conectándolo al fondo de la tubería de producción. Por otro lado, el rotor se encuentra conectado al final de la sarta de varillas. La rotación de esta sarta desde superficie por accionamiento de una fuente de energía permite que el rotor gire dentro del estator fijo, permitiendo que las cavidades progresen haciendo que el fluido se desplace verticalmente hasta superficie³. Los equipos de superficie, de distintas capacidades y dimensiones, se seleccionan en función de los requerimientos que exige cada sistema. En la figura 1 se muestra un sistema PCP convencional.

En la actualidad existen diversas compañías proveedores de sistemas de levantamiento con bombas de cavidades progresivas como Netzsch, Kudu y Weatherford, PCM, entre otras; las cuales puede encontrarse con variaciones en las configuraciones del sistema. Sin embargo, existen componentes principales

³ Ibid.

tanto de subsuelo y superficie característicos del sistema. A continuación, se describen los componentes de este tipo de bombas.

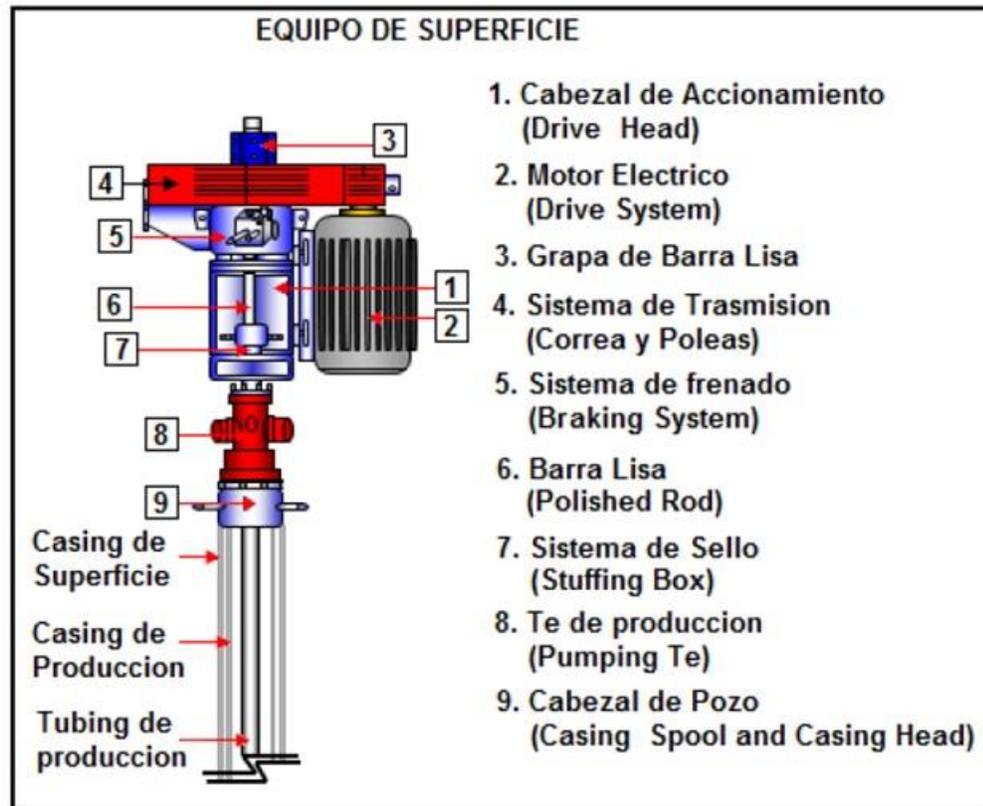
Figura 1. Sistema PCP Convencional



Fuente: Modificado de ORTEGA, Daniel et al. Lecciones Aprendidas y Mejores Prácticas en Campos Colombianos. Canadá 2010.

1.2.1. Equipos de Superficie. Los equipos de superficie son los encargados de soportar la carga axial de la sarta de producción, la transmisión del torque requerido, la rotación de la sarta de bombeo a la velocidad requerida y prevenir fugas del fluido producido. Ver figura 2.

Figura 2. Componentes de Equipos de Superficie



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

El equipo de superficie posee un papel principal en el funcionamiento de este sistema, ya que se encarga de aportar la energía al mecanismo para poder realizar el movimiento de la sarta de varilla desde superficie a fondo. El equipo de superficie está conformado por los siguientes componentes:

- **Cabezal de Rotación:** Este es un equipo de accionamiento mecánico instalado en la superficie directamente sobre la cabeza de pozo. Consiste en un sistema de rodamientos o cojinetes que soportan la carga axial del sistema, un sistema de freno (mecánico o hidráulico) que puede estar integrado a la estructura del cabezal o ser un dispositivo externo, y un ensamblaje de instalación que incluye el sistema de empaque para evitar la filtración de fluidos a través de las conexiones de superficie. Ver figura 3.

Figura 3. Cabezal de Rotación



Fuente: WEATHERFORD. Módulo 1: Programa de entrenamiento en BCP. Bombas de cavidades progresivas (Componentes del sistema) Pág. 52. 2019.

- **Motor Eléctrico:** Este tiene como función accionar el cabezal giratorio a través de poleas y engranajes, su ventaja es el bajo mantenimiento; mayor eficiencia; bajo consumo de energía; fácil operación y bajo ruido; su desventaja es el alto costo de operación si el área no está electrificada; la velocidad variable solo se logra

cambiando el índice de polea, cambiando el número de polos del motor u utilizando dispositivos electrónicos de control de velocidad (VDF)⁴. Ver figura 4.

Figura 4. Motor Eléctrico



Fuente: WEATHERFORD. Módulo 1: Programa de entrenamiento en BCP. Bombas de cavidades progresivas (Componentes del sistema). 2019. Pág. 67.

- **BOP de Varilla:** es un equipo que mediante sellos obturan el espacio alrededor de la sarta de varillas, brinda protección adicional al momento de realizar cambio de empaquetaduras. Ver figura 5.

⁴ WEATHERFORD. Módulo 1: Programa de entrenamiento en BCP. Bombas de cavidades progresivas (Componentes del sistema). 2019. Pág. 67.

Figura 5. BOP de Varilla



Fuente: WEATHERFORD. Módulo 1: Programa de entrenamiento en BCP. Bombas de cavidades progresivas (Componentes del sistema). 2015. Pág. 69.

- **Variador de Frecuencia:** Provee protección mecánico - eléctrica y control local o remoto del sistema PCP. Ver figura 6. Este también presta los siguientes beneficios:
 - ✓ Presta un ajuste infinito de la velocidad de operación sin necesidad de cambiar poleas o cajas reductoras.
 - ✓ Puede ajustar la velocidad de operación en función de variaciones en las exigencias de torque.
 - ✓ Algunos modelos tienen capacidad de control del backspin.
 - ✓ Puede controlar el sistema en función de sensores de fondo/superficie (señales externas al VFD) y/o variables de operación internas a este (corriente, voltaje, etc.) "lazos de control".
 - ✓ Comunicación bidireccional a distancia (SCADA)

Figura 6. Variador de Frecuencia



Fuente: WEATHERFORD. Módulo 1: Programa de entrenamiento en BCP. Bombas de cavidades progresivas (Componentes del sistema). 2015. Pág. 71.

1.2.2. Equipos de Subsuelo. Los equipos de subsuelos son los elementos que se encargan de llevar el crudo desde la cara de la formación hasta la superficie y están compuesto por una sarta de tubería y varillas, estator, rotor, anclas y otros componentes, como se muestra en la figura 7.

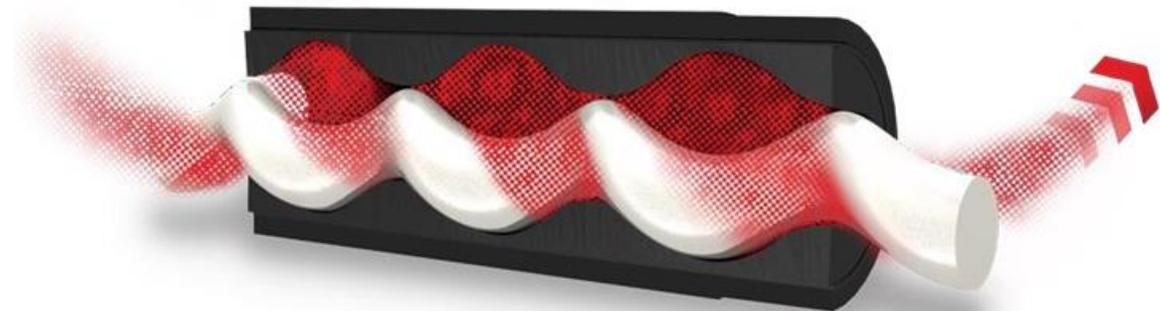
Figura 7. Equipos de Subsuelo del Sistema PCP Convencional



Fuente: WEATHERFORD. Módulo 1: Programa de entrenamiento en BCP. Bombas de cavidades progresivas (Componentes del sistema). 2018. Pág. 79.

- **ROTOR:** El rotor está fabricado en acero de alta resistencia, mecanizado en un torno especial de alta precisión y su superficie está recubierta con un material con alta resistencia a la abrasión y la corrosión. Este rotor puede ser mecanizado a diferentes diámetros y espesores de cromado dependiendo de la necesidad de producción, la variación de estos dos parámetros me permite un ajuste fino de la interferencia.
- **ESTATOR:** El estator es un cilindro de acero (o tubo) revestido internamente con un elastómero sintético (Polímero de alto peso molecular), moldeado en forma de hélice enfrentadas entre sí, cuyos pasos son el doble del paso de la hélice del rotor⁵. Ver figura 8.

Figura 8. Rotor y Estator



Fuente: PCM (Keep it Moving). ROD DRIVEN PCP. [En línea]. Disponible en: <https://www.pcm.eu/en/oil-and-gas/pcmsolutions/artificial-lift-systems/rod-driven-pcp>

- **SARTA DE VARILLA:** Estas son las encargadas de imprimirle ese movimiento rotacional al rotor de bomba y son fabricada en diferentes metalurgias para suplir las diferentes exigencias y aplicaciones. API las clasifica como Grado C, D, y K. Ver figura 9.

⁵ CHACÍN, Nelvy. Bombeo por cavidad progresiva: Operación, Diagnóstico, Análisis de Falla y Trouble Shooting [online]. Workshop Internacional. [El Tigre, Venezuela]: ESP OIL, Sept. 2003.

Figura 9. Sarta de Varilla



Fuente: WEATHERFORD. Módulo 1: Programa de entrenamiento en BCP. Bombas de cavidades progresivas (Componentes del sistema). 2018. Pág. 82.

- **NIPLE DE PARO:** Este se ubica en el extremo inferior del estator y tiene como función principal servir de punto de referencia para las maniobras de espaciamiento del rotor. Adicionalmente, brinda la holgura necesaria para permitir el estiramiento de la sarta de cabillas bajo condiciones de operación e impide que estas o el rotor lleguen hasta el fondo del pozo en caso de producirse una desconexión o rotura en la sarta de varillas. Ver figura 10.

Figura 10. Niple de Paro



Fuente: ANGULO Elisa María, predicción del run-life en bombas de cavidades progresivas empleando inteligencia artificial en el campo casabe, Pág 40. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería de Petróleos.

- **ANCLA DE TORQUE:** tiene como función evitar la rotación y consecuente retroceso de la sarta de varilla cuando el sistema está operando (dirección de agujas del reloj), provee fácil liberación en dirección opuesta (contraria a agujas de reloj) cuando el sistema se detiene y gira retrocediendo; y normalmente no provee anclaje axial del sistema, facilitando su remoción cuando es requerido. Ver figura 11.

Figura 11. Ancla de Torque



Fuente: FLORES, Pablo. Análisis Técnico Económico para un pozo con SLA con Bombas de Cavidad Progresiva en el Campo Sacha. Quito, Octubre de 2009.

- **CENTRALIZADORES DE VARILLA:** Este es un elemento fundamental ubicado en la sarta de varilla y tienen como función separar la varilla de las paredes interna de la tubería para minimizar el desgaste especialmente en pozos desviados y de ambiente abrasivo por el contacto metal-metal que se genera. Ver figura 12.

Figura 12. Centralizadores de Varilla



Fuente: Taller de reparación de bombas-Campo Jazmín.

- **TUBERÍA DE PRODUCCIÓN:** Estas constituyen arreglos de tubulares y equipos de fondo; pueden ir desde arreglos sencillos hasta arreglos muy complicados. Su objetivo primordial es conducir los fluidos desde la boca de las perforaciones hasta la superficie. Los grados API para tubería mayormente empleados son: J-55, C-75, C-95 y P-105. Los grados C-75 y C-95 son diseñados para soportar ambientes ácidos, son más resistentes y costosos que el J-55, este último presenta un buen comportamiento en ambientes básicos. Existen dos tipos de conexiones, para tuberías de producción, abaladas por la American Petroleum Institute (API). La conexión API "NU" (NOT-UPSET), que consta de una rosca de 10 vueltas, siendo la conexión menos fuerte que la tubería. La conexión de tubería "EUE" (EXTERNAL UPSET), dicha conexión posee mayor resistencia que el cuerpo de la tubería y es ideal para los servicios de alta presión.
- **ANCLA DE GAS:** La eficiencia volumétrica del PCP, al igual que la de otros tipos de bombas, es afectada de manera significativa por la presencia de gas libre en su interior. Anclas de gas es el nombre que comúnmente se emplea para referirse a los separadores estáticos gas-líquido de fondo de pozo, generalmente la separación gas – líquido ocurre fuera del ancla desviándose el gas al espacio anular entre el revestidor y la tubería de producción y el líquido es enviado a la bomba, sin embargo, las anclas de gas no son 100% eficientes por lo que una porción del mismo es arrastrada a su interior y de allí a la bomba⁶.
- **ELASTOMERO⁷:** Es un polímero de alto peso molecular el cual se encuentra en forma de espiral la cual es adherida a la parte interna del tubo de acero para así conformar el estator. Ver figura 13. El elastómero posee una propiedad esencial para el proceso y es su capacidad de recobrar rápidamente sus dimensiones una vez que la fuerza es removida (resiliencia). Gracias a esta propiedad, es posible

⁶ FLORES, Pablo. Análisis Técnico Económico para un pozo X con levantamiento artificial con Bombas de Cavidad Progresiva en el Campo Sacha.

⁷ SPE, Petrowiki. Petroleum Engineering Handbook (PEH). Diciembre de 2020

que se cree la interferencia necesaria entre el rotor y el estator la cual determina la hermeticidad entre cavidades contiguas y en consecuencia la eficiencia de la bomba.

Varias fallas de las bombas PCP se deben a la falta de integridad del elastómero y a menudo resulta ser afectado física o químicamente por las condiciones a las que trabaja. La temperatura es uno de los factores a considerar, puesto que, aunque varía para cada yacimiento, ésta puede tener un rango entre los 60 °F a 360 °F (15 a 200 °C). De igual manera, la bomba puede trabajar con una alta presión de fondo. El fluido producido también es otro factor que puede disminuir la integridad del elastómero, debido a que puede contener sólidos (arena), gases (CH₄, CO₂, H₂S) y un variado tipo de otros constituyentes, incluyendo agua, parafinas, naftenos, asfáltenos, y aromáticos. Adicionalmente, existen fluidos en contacto con el elastómero, como los usados en estimulación de pozos, tratamientos, las trazas lodo usado en la perforación que permanece en la formación, inhibidores de corrosión entre otros.

Debido a lo anterior, la industria día a día busca desarrollar nuevos tipos de elastómeros cada vez más resistentes a estas condiciones de operación.

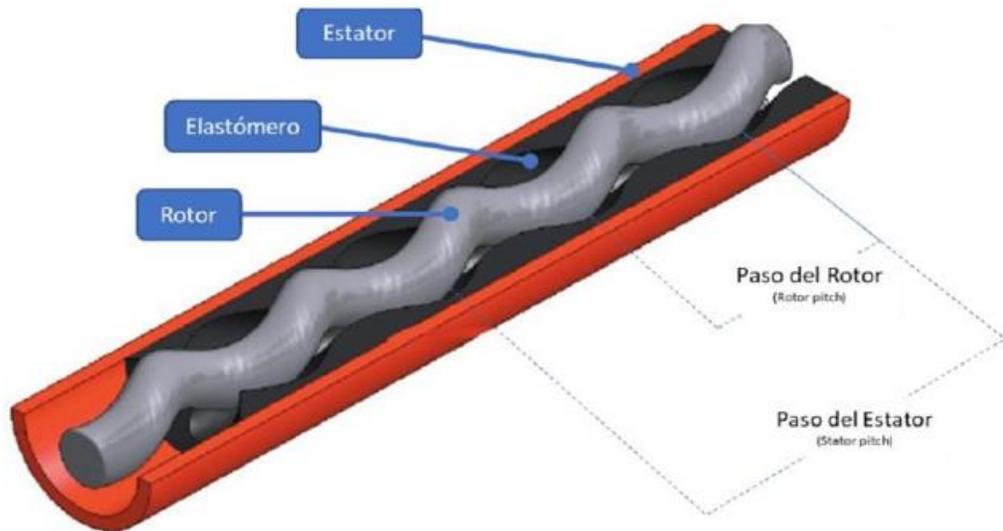
Los elastómeros más usados en la aplicación de las bombas PCP, son:

- ✓ Base Nitrílica o caucho NBR (*nitrile butadine rubber*)
- ✓ Nitrilo Hidrogenado o HNBR (*Hydrogenated nitrile butadine rubber*)

Los cambios más comunes en las propiedades mecánicas de los elastómeros son:

- ✓ Hinchamiento, lo cual provoca una excesiva interferencia entre rotor y estator.
- ✓ Endurecimiento, lo cual provoca la pérdida de resistencia del elastómero.

Figura 13. Elastómero



Fuente: WEATHERFORD. Módulo 1: Programa de entrenamiento en BCP. Bombas de cavidades progresivas (Componentes del sistema) Pág. 68. 2019.

1.2.3. Ventajas y Desventajas del Sistema PCP Convencional⁸. 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.

⁸ HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. junio 2008. p 4.

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 del Sistema PCP Convencional

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Habilidad para producir fluidos altamente viscosos. ✓ Habilidad para producir con altas concentraciones de arena. ✓ Habilidad para tolerar altos porcentajes de gas libre (no se bloquea). 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de desplazamiento real de hasta 2000 Bls/día o 320 m³/día (máximo de 4000 Bls/día o 640 m³/día). ✓ Capacidad de elevación real de hasta 6000 pies o 1850 metros (máximo de 1050 pies o 3500 metros).
VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajos costos de energía. ✓ Demanda constante de energía (no hay fluctuaciones en el consumo). ✓ Simple instalación y operación; por bajo mantenimiento. ✓ Equipos de superficie de pequeñas dimensiones. ✓ Bajo nivel de ruido. ✓ Muy buena resistencia a la abrasión; por Bajos costos de inversión inicial. ✓ Ausencia de válvulas o partes recíprocas evitando bloqueo o desgaste de las partes móviles. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Hincharse o deteriorarse con el contacto de ciertos fluidos por periodos prolongados de tiempo. ✓ Opera con bajas capacidades volumétricas cuando se producen cantidades de gas libre considerables evitando una buena lubricación). ✓ Tendencia del estator a daño considerable cuando la bomba trabaja en seco por periodos de tiempo relativamente cortos. ✓ Desgaste por contacto entre las varillas de bombeo y la tubería de producción puede tornarse un problema grave en pozos direccionales y horizontales. ✓ La mayoría de los sistemas requieren la remoción de la tubería de producción para sustituir la bomba. ✓ Los sistemas están propensos a altas vibraciones en el caso de operar a altas velocidades requiriendo el uso de anclas de tubería y estabilizadores o centralizadores de varillas de bombeo. ✓ Poca experiencia en el diseño, instalación y operación del sistema. ✓ Resistencia a la temperatura de hasta 280 °F o 138 °C (máxima de 350 °F o 178 °C).

Fuente: Modificado HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo por cavidades progresivas. Versión 2008V1. Junio 2008. p 4.

1.3. BOMBAS DE CAVIDADES PRORESIVAS METAL-METAL (AMPCP)⁹

Los sistemas PCP convencionales tienen limitaciones en cuanto a la degradación física y química de los elastómeros en ciertas aplicaciones, como altas temperaturas de fondo y altas concentraciones de gases corrosivos (CO₂ ó H₂S) en los fluidos que se están produciendo; es por esto que se ha desarrollado el sistema PCP tipo metal – metal. Estos sistemas ofrecen un estator hecho completamente de metal, lo cual permite que el sistema sea capaz de soportar temperaturas más altas, y la producción de fluidos con contaminantes que ya no van a reaccionar con el elastómero.

Las bombas de cavidades progresivas tipo metal – metal se han probado en campos de crudo pesado y extra pesado que utilizan métodos de recuperación térmica, como inyección alterna de vapor, inyección continua de vapor, SAGD o en inyección de vapor combinado con solvente. Como se muestra en la figura 14.

El diseño del PCP metal-metal consiste en:

- Un rotor recubierto similar al rotor de la bomba PCP convencional.
- Un estator hidroformado
- Una envoltura externa que permite la conexión de todos los elementos, así como las conexiones API para adaptar con la tubería de producción

⁹ Brochure Vulcain, Artificial lift for enhanced oil recovery. PCM (Keep it moving).

Figura 14. Sistema PCP Metal-Metal Instalada en Campo con Inyección de Vapor

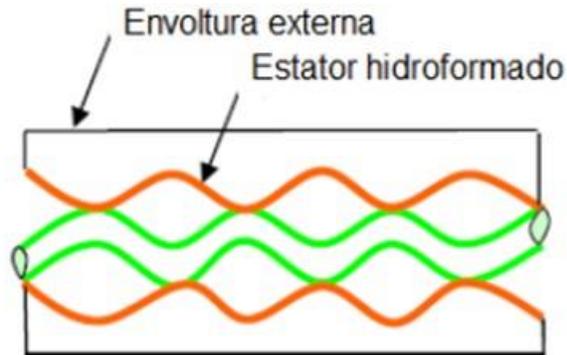


Fuente: BROCHURE KUDU'S THERMAL PACKAGE. Kudu Industries.

El estator de estos sistemas se fabrica por pequeñas secciones, que luego son unidas y fijadas dentro de un casing externo de metal, y con el fin de alcanzar la configuración deseada se utilizan secciones de metal hidroformadas. Como se muestra en la figura 15. Vale la pena mencionar que la ausencia de cualquier elastómero en estos sistemas proporciona una ventaja en la vida operacional en pozos en donde los ambientes de fondo causen graves hinchazones o degradación de los mismos.

La PCP Metal-Metal está diseñado para tener un tiempo de vida mínimo de un año (8000 horas) y habilidad de manejar hasta un 5% de contenido de arenas en el aceite. Estos sistemas requieren instalaciones y herramientas de operación similares a las de un PCP convencional, pero existen unos pasos adicionales que se involucran en el arranque de las bombas metálicas.

Figura 15. Bosquejo Estator-Rotor de una PCP Metal-Metal



Fuente: BEAUQUIN, J. L. et al. SPE 97796. Development Status of a Metal Progressing Cavity Pumps for Heavy Oil and Hot Production Wells.

El estator de estos sistemas se fabrica por pequeñas secciones, que luego son unidas y fijadas dentro de un casing externo de metal, y con el fin de alcanzar la configuración deseada se utilizan secciones de metal hidroformadas. Vale la pena mencionar que la ausencia de cualquier elastómero en estos sistemas proporciona una ventaja en la vida operacional en pozos en donde los ambientes de fondo causen graves hinchazones o degradación de los mismos.

El PCP metal está diseñado para tener un tiempo de vida mínimo de un año (8000 horas) y habilidad de manejar hasta un 5% de contenido de arenas en el aceite. Estos sistemas requieren instalaciones y herramientas de operación similares a las de un PCP convencional, pero existen unos pasos adicionales que se involucran en el arranque de las bombas metálicas.

En términos de funcionalidad, los sistemas PCP metal – metal logran el sellado mediante un espacio ajustado entre el rotor y el estator, y no por un ajuste de interferencia como en el caso de las bombas convencionales, por lo que cuando se están bombeando fluidos con baja viscosidad se pueden presentar deslizamientos y bajas eficiencias, pero en caso de bombear fluidos con viscosidades mayores a

100 cp estos sistemas son muy efectivos. Igualmente son capaces de soportar cortes de agua por encima de 60%.

1.3.1. Ventajas de las Bombas PCP Metal-Metal

- Fácil control de la tasa de flujo
- Fácil de instalar similar al PCP convencional.
- Rango de temperatura de operación alto, más de 390°F
- Acepta bajas o altas viscosidades
- Puede operar con baja presión de fondo fluyendo.
- No hay cizallamiento ni formación de emulsiones.
- Fácil puesta en marcha inicial a altas viscosidades.
- El acero no reaccionara con el fluido bombeado en la mayoría de los casos, y se escoge con el fin de que tenga la misma expansión térmica que el rotor, para que el espaciamiento de entre las partes sea constante a cualquier temperatura de operación.
- Los elementos del bombeo tipo Metal-Metal están diseñados para aproximadamente 1200 metros de levantamiento.
- La tecnología metal-metal es adecuada para la inyección de solventes.
- Menor costo capital que los sistemas de bombeo Electrosumergible.

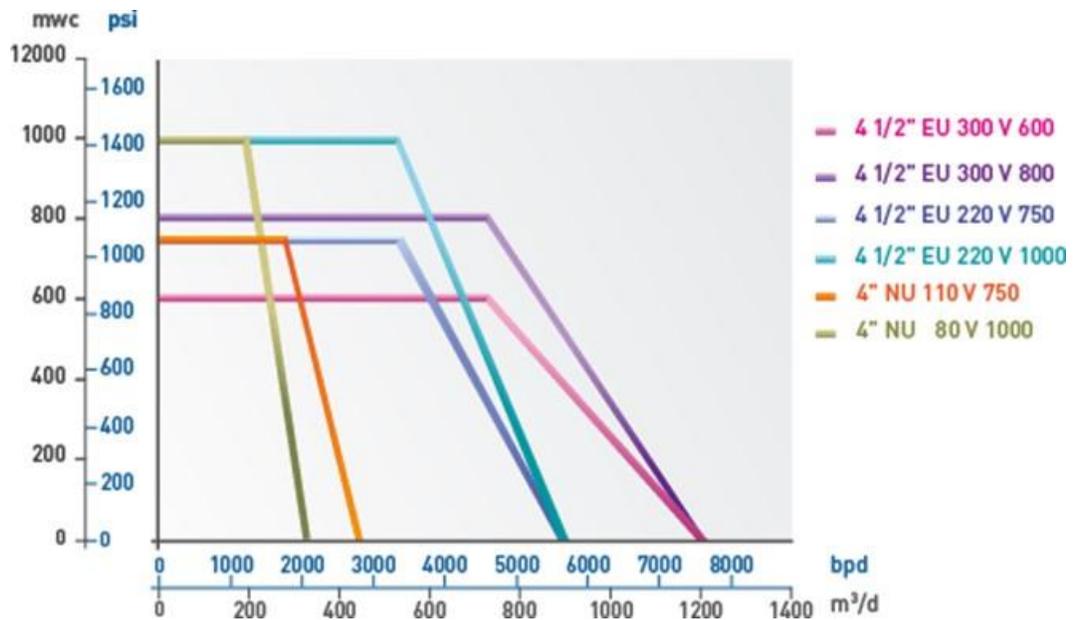
1.3.2. Desventajas de las Bombas PCP Metal-Metal

- Presenta las mismas desventajas de una PCP convencional respecto a la profundidad limitada de asentamiento de las bombas y también que no maneja altos caudales.
- Maneja menor producción de arena que una PCP convencional debido a su estructura de metal – metal.

1.4. RANGO DE OPERACIÓN DE UNA BOMBA PCP METAL-METAL

Existen diferentes tipos de bombas metal–metales disponibles en el mercado. La siguiente gráfica muestra los rangos de trabajo de varios tipos de ellas. Como se muestra en la figura 16.

Figura 16. Rango de Operación de Bombas PCP Metal-Metal Vulcain™ (PCM)



Fuente: BROCHURE VULCAIN, Artificial lift for enhanced oil recovery. PCM (Keep it moving).

Donde el primer número indica la máxima tasa en m³/d a 100 rpm y el segundo número la capacidad nominal del cabezal en metros de agua equivalente. Por ejemplo, la bomba 300V800 puede producir 300m³/d a una presión de 0 bar y a 100 rpm. Además, está clasificada para un diferencial de presión de 800 mWC. Todas las bombas pueden operar hasta 350 °C.

Figura 17. Estator de Bomba PCP Vulcain™ – PCM



Fuente: PCM EUROPE SAS. PCM Vulcain - Bomba de cavidad progresiva de alta temperatura.

1.5. PRINCIPIO DE HIDROFORMADO

Durante el desarrollo de la fabricación de las bombas PCP con estator metálico, el proceso de hidroformado fue el único capaz de garantizar éxito en términos de desempeño y costo del estator. Esta tecnología se llevó a cabo a mediados de 1990 por las empresas PCM y TOTAL.

El proceso se lleva a cabo al ubicar un tubo de acero en un molde e inyectar agua a alta presión para que el tubo llene las cavidades del molde y obtenga su forma final. El molde puede ser externo con presión interna, o interno con presión externa. Para la fabricación del estator metálico se usa el molde interno con presión externa, debido a que el área en contacto con el rotor en operación es la superficie interna del estator. Posterior al proceso de hidroformado se puede recubrir el estator internamente para incrementar su dureza, resistencia a la abrasión y por lo tanto su vida útil.

1.6 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Una PCP Metal-Metal está compuesta de un rotor y estator con perfiles helicoidales de acoplamiento. El rotor giratorio mueve las cavidades hacia arriba y produce fluido a una velocidad de cabeza constante y variable dependiendo de las rpm del

rotor.

1.7. EQUIPOS DE SUPERFICIE¹⁰

1.7.1. Cabezal de Rotación. Tienen la misma funcionalidad de un cabezal convencional, y existen cabezales de 40 HP, 60HP, 125HP y 200HP.

Figura 18. Cabezal de Rotación para PCP Metal-Metal



Fuente: KUDU INDUSTRIES. Página web. Disponible en: www.kudupump.com

1.7.2. Sello Preventor de Fugas. Se ha probado en campo para operaciones con SAGD y estimulación cíclica de vapor.

1.7.3. Válvulas Preventoras. Válvulas que se instalan en la parte superior del pozo para provocar el cierre de este frente a una surgencia descontrolada o reventón, cuando el petróleo y/o gas de las formaciones atravesadas traten de fluir a superficie.

¹⁰ MARTINEZ, Jessica. Estudio de viabilidad técnica y financiera de la implementación del sistema de levantamiento artificial por cavidades progresivas tipo metal-metal en pozos de campos colombianos.

Figura 19. BOP para PCP Metal-Metal



Fuente: BROCHURE KUDU'S Thermal Package. Kudu Industries.

1.7.4. Variador de Frecuencia. Para incrementar la flexibilidad de producción controlando la tasa de flujo.

1.7.5. Monitor del Desempeño de la Bomba. Sirve para conocer el comportamiento de la bomba en cualquier instante.

1.8. EQUIPOS DE SUBSUELO

1.8.1. Centralizador Metálico Resistente a Altas Temperaturas. Son útiles para aplicaciones en pozos desviados para que la bomba no quede recostada en la tubería.

Figura 20. Centralizador Metálico Resistente a Altas Temperaturas



Fuente: BROCHURE VULCAIN, Artificial lift for enhanced oil recovery. PCM (Keep it moving).

1.8.2. Bujías de Paro. Vitales para la instalación del PCP Metal. Sirve para espaciar la sarta de varillas cuando éstas se ensanchan al aplicar a la bomba una temperatura y diferencial de presión.

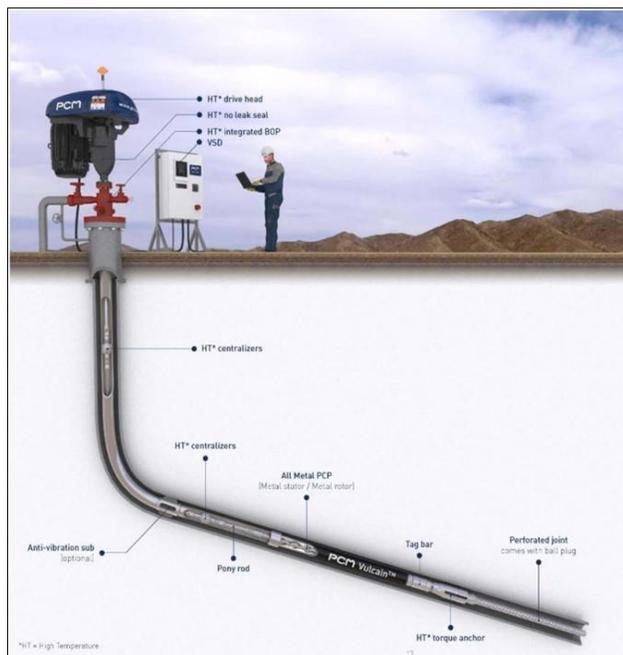
1.8.3. Anclas Anti-vibración/anti-torque. Reducen el movimiento del tubing, vibraciones y resonancia armónica. El ancla se instala por debajo de la bomba para prevenir la rotación de la sarta.

Figura 21. Ancla Antitorque para Bomba PCP Metal-Metal



Fuente: BROCHURE VULCAIN, Artificial lift for enhanced oil recovery. PCM (Keep it moving).

Figura 22. Ensamblaje de Superficie y Fondo de PCP Vulcain™ (PCM)

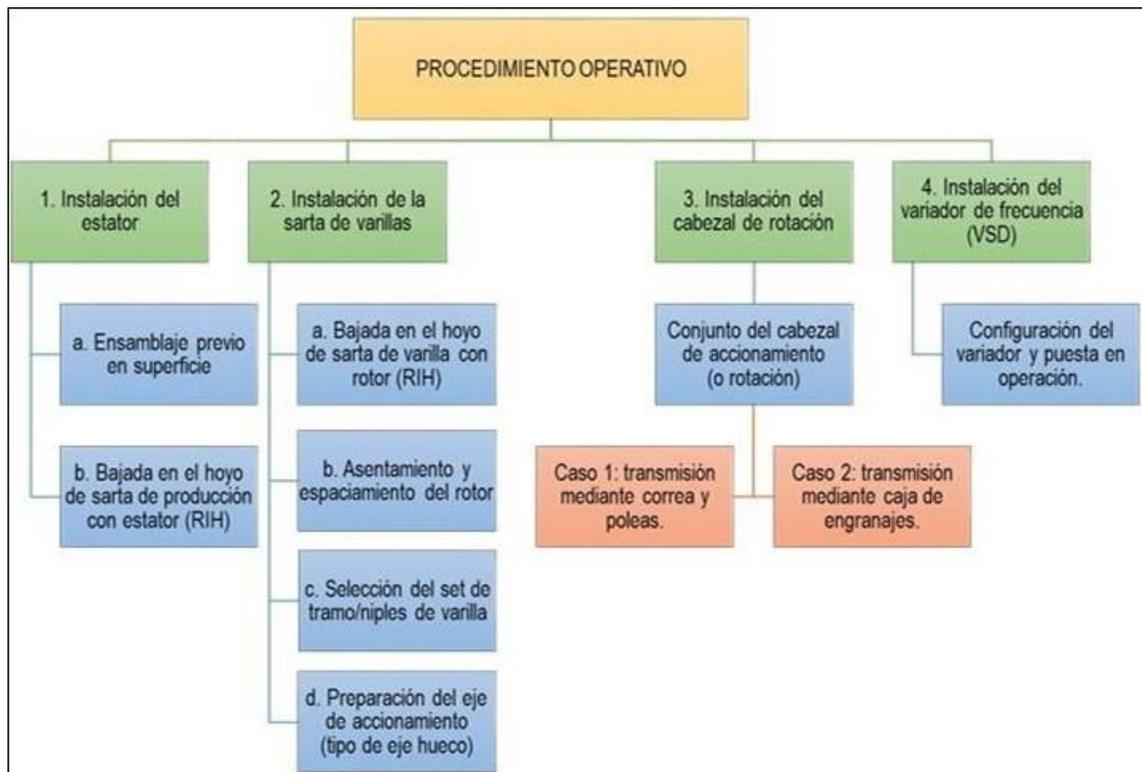


Fuente: PCM (Keep it Moving). Bombas de cavidad progresiva para petróleo y gas.

1.9. PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN (AMPCP)

Este procedimiento se divide en tres partes principales, las cuales son: la preparación del pozo antes de la instalación, el proceso de verificación previo a la instalación y por último el procedimiento operativo que hay que seguir a la hora de instalar una bomba AMPCP. En la figura 16 podemos ver los pasos del procedimiento operativo, los cuales se explican en detalle en el ANEXO A.

Figura 23. Procedimiento para la Instalación de las Bombas Metal-Metal



Fuente: BAQUERO, J. Análisis técnico-económico de los métodos de producción sarta dual y PCP metal-metal y su aplicación en un campo de curdo pesado en el valle del Magdalena Medio.

2. CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL PCP METAL-METAL PARA EL CAMPO DE ESTUDIO A PARTIR DE UNA MATRIZ DE SELECCIÓN

Por confidencialidad de la información de la empresa operadora llamaremos al campo de estudio “Campo A” y los pozos a evaluar se les llamara pozo A-1, pozo y A-2. Con el fin de proteger los datos e información del yacimiento de dicha empresa.

Para seleccionar un buen sistema de levantamiento artificial, la empresa operadora del campo A creo una serie de condiciones para la elección adecuada, debido a las condiciones del crudo y las propiedades del yacimiento fueron planteada en una matriz donde se realiza la evaluación de cada condición con los valores de 1 a 4, donde 1 es deficiente, 2 es regular, 3 es bueno y 4 es excelente.

En la siguiente Cuadro se muestra la matriz con las condiciones y requerimientos para la selección del sistema de levantamiento artificial en el campo A.

Cuadro 2. Matriz para la selección del sistema de levantamiento artificial en el campo A.

	Condición	Peso 1-100	Ponderación de peso %	Variable	BOMBEO MECÁNICO	Variable	PCP CONVENCIONAL	Variable	PCP METAL-METAL	Variable	BOMBEO HIDRÁULICO	Variable	GAS LIFT	Variable	ESP
Yacimiento-Campo-Producción-Pozo	Numero de Pozos	5	0.3	3 a 20	4	3 a 20	4	3 a 20	4	3 a 20	3	3 a 20	3	3 a 20	4
	Caudal de Producción	90	4.9	<500 BFPD	4	<500 BFPD	4	<500 BFPD	4	<500 BFPD	3	<500 BFPD	2	<500 BFPD	1
	Profundidad de Asentamiento	50	2.7	<2500 ft	4	<2500 ft	4	<2500 ft	4	<2500 ft	3	<2500 ft	3	<2500 ft	3
	Diametro de Casing	10	2.7	>= 9 5/8"	4	>= 9 5/8"	2	>= 9 5/8"	4	>= 9 5/8"	3	>= 9 5/8"	4	>= 9 5/8"	4
	Inclinación del Pozo	30	0.5	Vertical	4	Vertical	4	Vertical	4	Vertical	4	Vertical	4	Vertical	4
	Dogleg	30	1.6	<3°/100 ft	4	<3°/100 ft	4	<3°/100 ft	4	<3°/100 ft	4	<3°/100 ft	4	<3°/100 ft	4
	Temperatura	100	5.4	>350 ft	4	>350 ft	1	>350 ft	4	>350 ft	4	>350 ft	4	>350 ft	1
	Presión de Entrada de la Bomba	80	4.3	<100 psi	4	<100 psi	2	<100 psi	2	<100 psi	2	<100 psi	1	<100 psi	1
	Completamiento	50	2.7	Simple	4	Simple	4	Simple	4	Simple	4	Simple	4	Simple	4
	Recobro	100	5.4	Terciario Inyeccion de Vapor	4	Terciario Inyeccion de Vapor	1	Terciario Inyeccion de Vapor	3	Terciario Inyeccion de Vapor	3	Terciario Inyeccion de Vapor	1	Terciario Inyeccion de Vapor	1
Propiedades de los Fluidos	Corte de agua	50	2.7	25% a 80 %	4	25% a 80 %	4	25% a 80 %	4	25% a 80 %	4	25% a 80 %	3	25% a 80 %	4
	Gravedad API	100	5.4	<15 °API	3	<15 °API	4	<15 °API	4	<15 °API	3	<15 °API	2	<15 °API	4
	Fluido Corrosivo	10	0.5	No	4	No	4	No	4	No	4	No	4	No	4
	Areña Abrasiva	100	5.4	<10 ppm	3	<10 ppm	4	<10 ppm	3	<10 ppm	4	<10 ppm	4	<10 ppm	4
	Relacion Gas-Líquido	10	0.5	<500 scf/stb	4	<500 scf/stb	4	<500 scf/stb	4	<500 scf/stb	4	<500 scf/stb	3	<500 scf/stb	4
	Contaminantes	10	0.5	Ninguno	4	Ninguno	4	Ninguno	4	Ninguno	4	Ninguno	4	Ninguno	4
	Tratamiento Químico	10	0.5	Ninguno	4	Ninguno	4	Ninguno	4	Ninguno	4	Ninguno	4	Ninguno	4
Superficie	Locación	50	2.7	Onshore	4	Onshore	4	Onshore	4	Onshore	4	Onshore	4	Onshore	4
	Potencia del Sistema	100	5.4	Red Eléctrica	4	Red Eléctrica	4	Red Eléctrica	4	Red Eléctrica	4	Red Eléctrica	4	Red Eléctrica	4
	Restricciones de Espacio	10	0.5	Si	1	Si	1	Si	3	Si	2	Si	1	Si	3

Continuación de la Cuadro 2.

	Condición	Peso 1-100	Ponderación de peso %	Variable	BOMBEO MECÁNICO	Variable	PCP CONVENCIONAL	Variable	PCP METAL-METAL	Variable	BOMBEO HIDRÁULICO	Variable	GAS LIFT	Variable	ESP
Sistema	Flexibilidad Thru Tubing (Slick Line, Memories, etc.)	10	0.5	Rigless Operations	1	Rigless Operations	1	Rigless Operations	1	Rigless Operations	3	Rigless Operations	3	Rigless Operations	1
	Eficiencia del Sistema	100	5.4	Eficiencia	3	Eficiencia	3	Eficiencia	4	Eficiencia	2	Eficiencia	1	Eficiencia	3
	Run Life	100	5.4	<180 Días	2	<180 Días	2	<180 Días	3	<180 Días	2	<180 Días	2	<180 Días	1
	Mantenimiento	90	4.9	Mantenimiento de Superficie	2	Mantenimiento de Superficie	2	Mantenimiento de Superficie	3	Mantenimiento de Superficie	2	Mantenimiento de Superficie	2	Mantenimiento de Superficie	3
	Instalación Field Service	60	3.2	Instalación	3	Instalación	3	Instalación	2	Instalación	3	Instalación	2	Instalación	1
	Operatividad	90	4.9	Facilidad de Operación	3	Facilidad de Operación	3	Facilidad de Operación	3	Facilidad de Operación	2	Facilidad de Operación	2	Facilidad de Operación	4
Inversión y Costos	Inversión Inicial de Capital	100	5.4	Inversión Inicial	4	Inversión Inicial	4	Inversión Inicial	2	Inversión Inicial	2	Inversión Inicial	1	Inversión Inicial	1
	Posibilidad de Alquiler	0	0	No	1	No	3	No	3	No	4	No	1	No	2
	Servicio	100	5.4	Workover o Pulling Rod	1	Workover o Pulling Rod	1	Workover o Pulling Rod	1	Workover o Pulling Rod	4	Workover o Pulling Rod	4	Workover o Pulling Rod	1
	Producción Diferida	100	5.4	Producción Diferida	3	Producción Diferida	3	Producción Diferida	3	Producción Diferida	3	Producción Diferida	3	Producción Diferida	2
	Costo de Energía	90	4.9	Costo de Energía	3	Costo de Energía	3	Costo de Energía	3	Costo de Energía	2	Costo de Energía	2	Costo de Energía	3
			100		326		307		325		298		258		251

Un sistema de levantamiento artificial se cree que es excelente donde su condición de aplicabilidad es alta y el funcionamiento es óptimo en las condiciones presentadas en el campo, para establecer los diferentes valores de aplicabilidad de los SLA¹¹, se definió en el departamento de producción que el máximo valor obtenido en la matriz es de 400 puntos y se considera óptimo cualquier sistema para instalar en el campo que supere 300/400 en la matriz presentada. Teniendo en cuenta los criterios de selección en la matriz mostrada anteriormente y verificando los puntajes de cada ítem, el sistema de levantamiento artificial de cavidades progresivas que más se adapta a las condiciones del campo, son el del PCP Metal-Metal y PCP convencional con un puntaje total de 325 puntos y 307 puntos respectivamente.

Teniendo en cuenta los demás sistemas de levantamiento artificial de la matriz, también es una excelente opción implementar el sistema de bombeo mecánico, pero dadas las condiciones del pozo y el exceso de arena producido se descartó este método, debido a los costos por intervención como fallas de arenamiento, desgastes en los asentamientos de las válvulas fijas y viajeras. El sistema de bombeo hidráulico, gas lift y bombeo electrosumergible no se tuvieron en cuenta debido a los altos costos de inversión y también que los yacimientos son de poco potencial para satisfacer los requerimientos mínimos de estos sistemas.

Dado que los criterios de selección para una bomba PCP Metal-Metal para el Campo A son prácticamente similares a la de una PCP convencional, haciendo que la instalación de este sistema sea más factible debido a que solo cambian las condiciones de temperatura de operación y el contenido de arena del crudo. En la siguiente Cuadro se mostrará screening con los rangos máximos de aplicabilidad para un pozo candidato.

¹¹ FIGUEROA, Oscar. Selección del método de levantamiento artificial y la concentración de un reductor de viscosidad en fondo de pozo para la extracción de crudo pesado en el pozo torcaz 3.

Cuadro 3. Screening para la Aplicación de Bomba PCP Meta-Metal

SCREENING PARA LA APLICACIÓN DE BOMBA DE PCP	
Caudal	1500 BFPD
Densidad del fluido	< 40 °API
Máximo contenido CO_2	33%
Máximo contenido H_2S	1.20%
Máximo DLS por encima de la bomba	13.1°/100 ft
Máximo DLS a la profundidad de la bomba	5°/100 ft
Máximo Temperatura del fluido de fondo	210 °C (410 °F)
Máximo Temperatura del vapor	320 °C (608 °F)
Máximo Temperatura del fluido fluyendo	250 °C (482 °F)
Máximo vida útil	33 Meses
Máximo profundidad de asentamiento	2821 ft (TVD)
Máximo contenido de arena	2%
Máximo GOR en la succión de la bomba	30%

Fuente: Modificado de BINGCHANG, W.; The Special Successful PCP Applications in Heavy Oilfield. SPE 136817. Alberta, Canadá, 2010

Según los datos presentados en el Cuadro anterior, los pozos candidatos cumplen para la aplicación de la tecnología PCP metal-metal, ya que anteriormente venían produciendo con la PCP convencional, lo cual facilita la instalación de este sistema por que los requerimientos de instalación son muy similares.

Dado lo anterior se muestra un pequeño resumen con las propiedades básicas de los pozos a evaluar, donde se muestra su viabilidad.

Cuadro 4. Propiedades Básicas de los Pozos Candidatos a Evaluar

INFORMACIÓN DEL POZO A-1	
Caudal	350 BFPD
Densidad del fluido	11.4 °API
Gravedad específica del gas	0.64
Gravedad específica del agua	1.02
DogLeg a la profundidad de la bomba	1.2°/100 ft
Temperatura del vapor	505 °F
Tipo de pozo	Horizontal
Presión de burbuja	290 PSI

INFORMACIÓN DEL POZO A-2	
Caudal	450 BFPD
Densidad del fluido	11.4 °API
Gravedad específica del gas	0.64
Gravedad específica del agua	1.02
DogLeg a la profundidad de la bomba	1.1°/100 ft
Temperatura del vapor	510 °F
Tipo de pozo	Horizontal
Presión de burbuja	276 PSI

Fuente: Elaboración propia

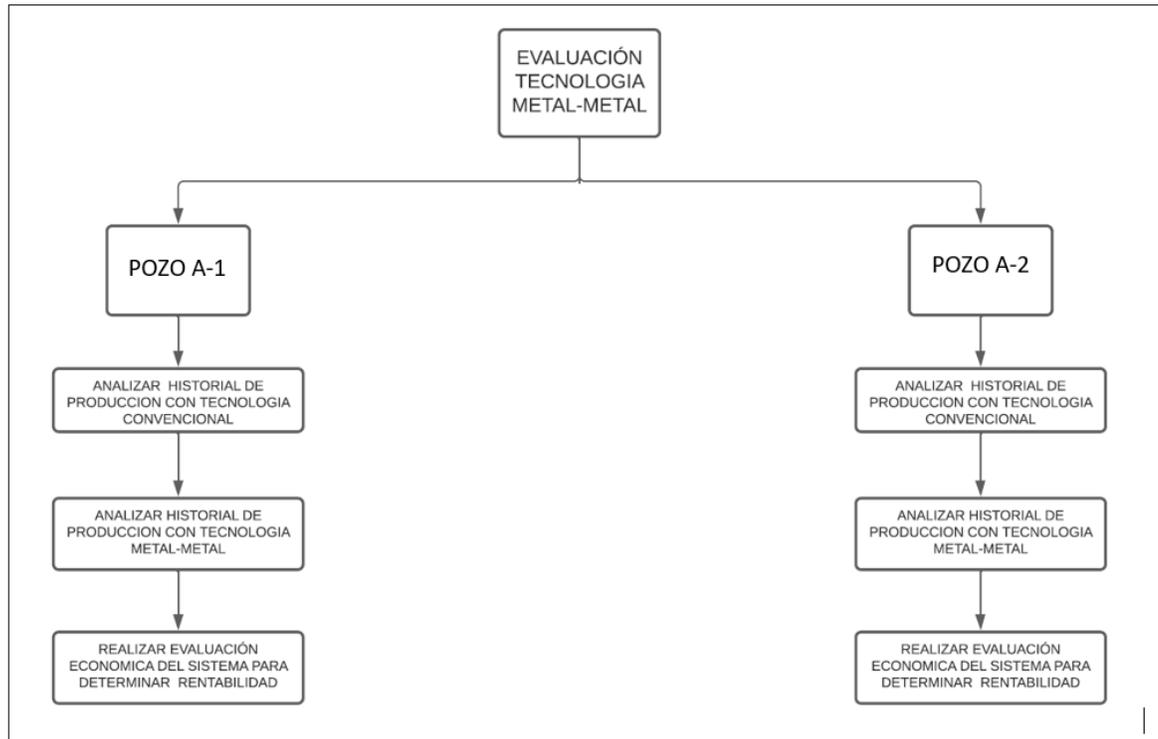
3. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CAVIDADES PROGRESIVAS METAL-METAL EN EL CAMPO DE ESTUDIO

Para la implementación de la tecnología de cavidades metal-metal se escogieron aquellos pozos candidatos que contaban con ciertas características, como la desviación del pozo, la producción de arenas, la profundidad (MD), las propiedades del yacimiento y entre otros. De los cuales se tomaron su historial de producción con el sistema convencional y con la nueva tecnología para soportar su factibilidad. Por confidencialidad de la información de la empresa operadora llamaremos al campo de estudio "Campo A" y sus pozos a evaluar con la tecnología metal-metal se llamarán Pozo A-1 y Pozo A-2.

Mencionado lo anterior se mostrará la siguiente figura, la cual indicará el procedimiento con el que se hará la evaluación del sistema de cavidades progresivas metal-metal.

La evaluación de los dos sistemas mostrados en la figura, tiene como fin verificar la factibilidad de la tecnología metal-metal, teniendo en cuenta el historial de producción de los pozos con el sistema de bombeo convencional para así poder aplicar esta tecnología en varios pozos candidatos del campo A, con el fin de aumentar la producción del campo y disminuir la reducción de fallas de las bombas convencionales por daños internos del estator y el elastómero, reflejando un ahorro en la intervención por equipos de well services.

Figura 24. Procedimiento para la Evaluación de la Tecnología PCP Metal-Metal



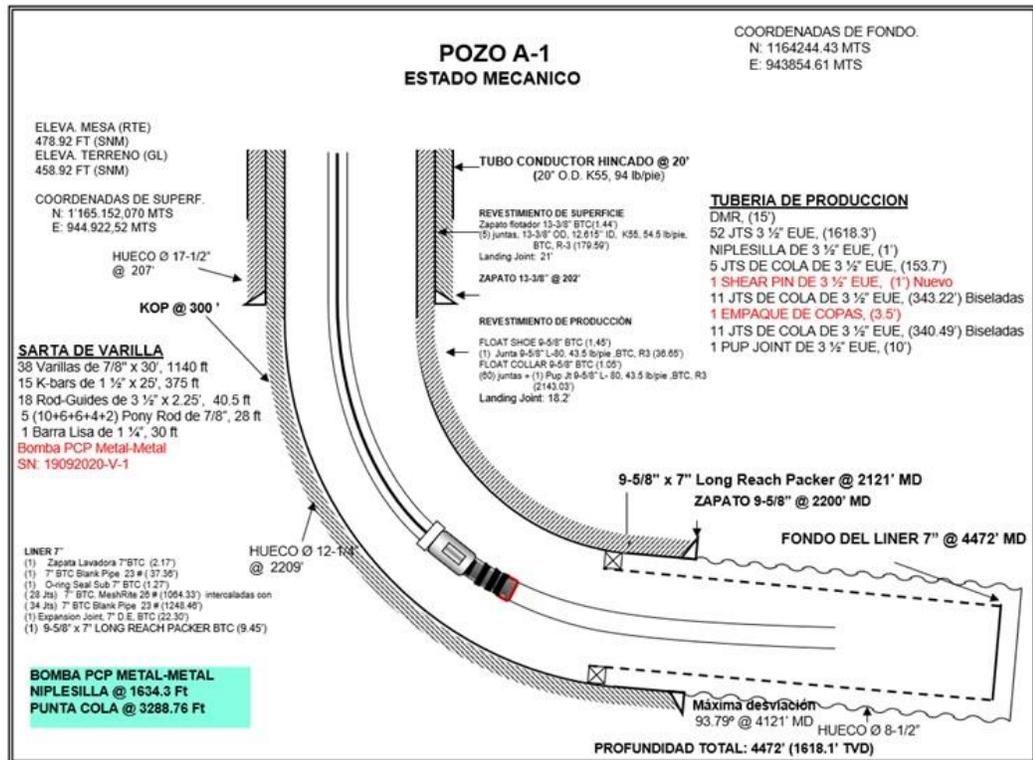
Fuente: Elaboración propia

3.1. HISTORIAL DE PRODUCCIÓN DEL POZO A-1 CON PCP CONVENCIONAL

El pozo A-1 fue perforado el 23 de abril de 2010 alcanzando una profundidad final de 4472 FT MD (1618 FT TVD), con una inclinación de 206.4 grados. Este pozo se perforó con una sección horizontal del 2311 FT. Ver figura 18. Se realizó la corrida de registros eléctricos donde se reportó un 100% de arena con shows entre buenos y muy buenos con resistividades sobre los 16 ohm.m (alcanzando promedios de 42 ohm.m).

Inicialmente el pozo A-1 se le realizaron las pruebas de producción para evaluar el potencial del pozo donde se determinó una producción diaria de 90 BOPD con una temperatura de operación de 250 °F, una presión de operación de 984 PSI y la calidad de vapor de inyección del 80% durante el primer ciclo.

Figura 25. Estado Mecánico del Pozo A-1



Fuente: Elaboración propia

Cuando el pozo A-1 inicia su vida productiva instalando como método de levantamiento artificial, el de cavidades progresivas que es designado por del departamento de producción del campo, este inició con una tasa de producción 90 BOPD, gravedad API de 11.4° y un corte de agua del 76 % en el cual se estableció la velocidad del cabezal entre los 120 rpm y 140 rpm, para no permitir canalización del agua en la formación de interés como se muestra en el Cuadro 5.

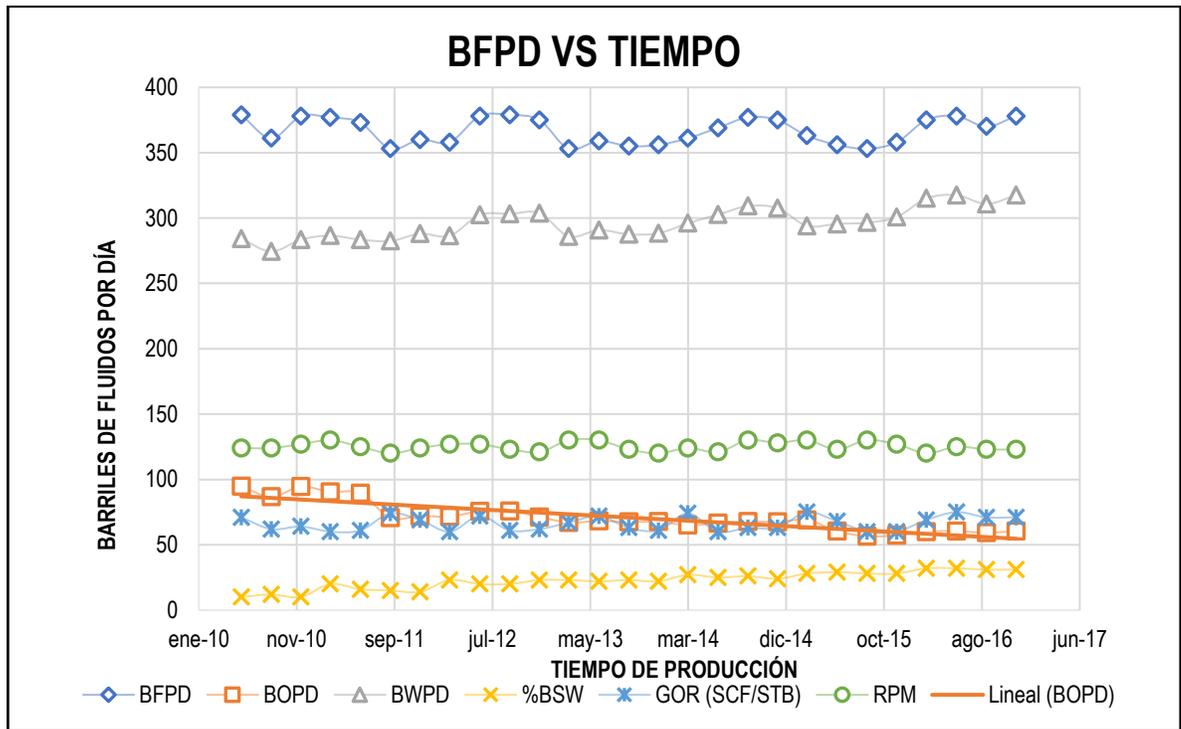
Cuadro 5. Producción Trimestral del pozo A-1

PRODUCCIÓN TRIMESTRAL PROMEDIO DEL POZO A-1						
FECHA	BFPD	BOPD	BWPD	%BSW	GOR (SCF/STB)	RPM
jun-10	378	94.5	283.5	11	70	128
sep-10	351	84.2	266.76	11	72	125
dic-10	350	84.0	266	8	64	128
mar-11	367	88.1	278.92	18	69	124
jun-11	351	87.8	263.25	17	69	128
sep-11	365	76.7	288.35	20	68	120
dic-11	369	81.2	287.82	20	72	128
mar-12	380	83.6	296.4	22	67	128
jun-12	367	73.4	293.6	22	75	126
sep-12	352	77.4	274.56	21	60	127
dic-12	380	72.2	307.8	23	67	124
mar-13	369	70.1	298.89	27	72	120
jun-13	380	72.2	307.8	26	63	122
sep-13	374	71.1	302.94	23	61	126
dic-13	362	68.8	293.22	23	66	120
mar-14	379	72.0	306.99	25	74	130
jun-14	351	63.2	287.82	24	71	130
sep-14	361	65.0	296.02	28	63	125
dic-14	362	68.8	293.22	24	66	121
mar-15	368	69.9	298.08	29	67	127
jun-15	379	60.6	318.36	29	60	122
sep-15	379	60.6	318.36	28	67	120
dic-15	359	61.0	297.97	28	72	125
mar-16	353	56.5	296.52	31	75	128
jun-16	367	62.4	304.61	30	61	129
sep-16	376	60.2	315.84	30	63	127
dic-16	358	60.9	297.14	30	63	128

Fuente: Elaboración propia

Durante los primeros 6 años de producción del pozo A-1, se refleja un disminución aproximadamente del 3% anual, del caudal inicial debido a los diferentes ciclos de inyección de vapor del crudo para poder disminuir la viscosidad del crudo y aumentar la producción del pozo como se muestra en la figura 26, pero esto trae como consecuencia el debilitamiento de la matriz de la roca generadora causando el aumento del porcentaje de BSW, aumento de producción de agua y mayor riesgo de fallas en el estator y rotor por los contenidos abrasivos de la arena

Figura 26. Gráfica de Producción Trimestral del Pozo A-1 durante 6 Años



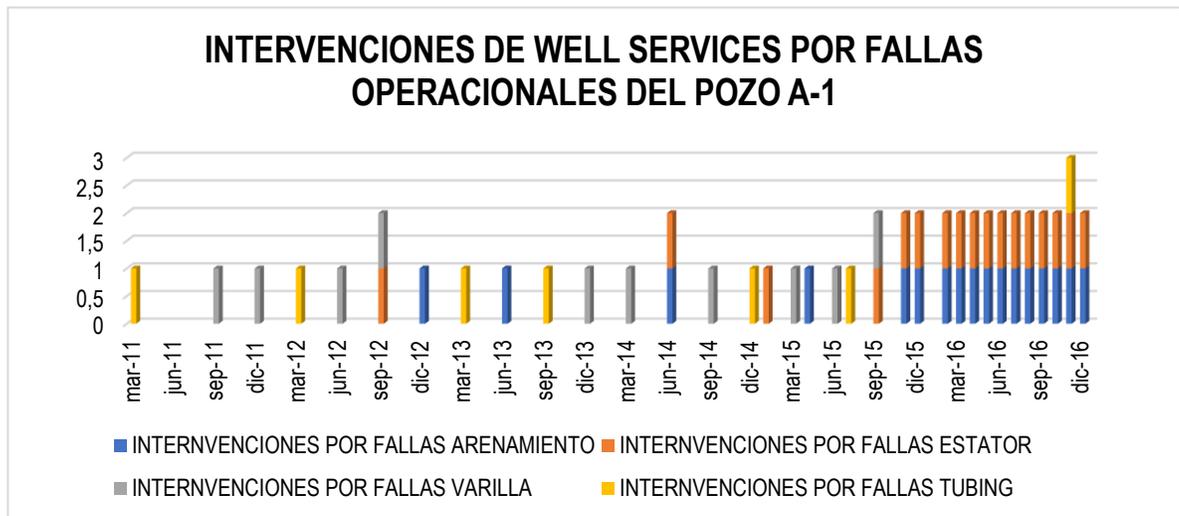
Fuente: Elaboración propia

Según el historial de producción del pozo A-1, se observa una reducción en cuanto a su producción, por problemas de arenamiento y desgaste en las bombas por el exceso de rpm del pozo para poder cumplir la meta producción, desde noviembre de 2015 según los datos recopilados del departamento de producción.

El pozo A-1, posee una buena producción y buena sumergencia que fueron evidenciado en la toma de datos del sonolog. Pero a partir de agosto de 2016 se observa una reducción en la cantidad de BOPD debido al aumento del %BSW el cual produce un desgaste critico entre el elastómero y el estator reflejando así la reducción de la producción diaria, aumentando los costos por intervención por equipo de well services y la reducción del RunLife de la bomba.

A partir del primer trimestre del año 2017, se considera la opción de implementar la primera bomba de cavidades progresivas metal-metal en el campo A, debido a que el pozo A-1, cumple con los criterios de selección por la empresa que suministra este tipo de bombas, con el fin de solucionar varios problemas que se están presentando en el yacimiento como los contratiempos en la instalación del sistema de bombeo mecánico en la fase caliente, el alto porcentaje de BSW y las fallas operacionales de la bomba debido al alto contenido de arena, como se muestra en la figura 27.

Figura 27. Intervenciones de Well Services por Fallas Operacionales del Pozo A-1



Fuente: Elaboración propia

Como se evidencia en la gráfica anterior, a finales del año 2014 se reflejó un aumento de las fallas de las bombas de PCP convencionales debido al arenamiento y al desgaste excesivo de los estatores, por el cual se planteó la posibilidad de implementar la tecnología PCP metal-metal como una alternativa para disminuir las fallas constantes en los estatores por el exceso de arena producida y por las altas temperaturas del pozo, debido por los diferentes ciclos de inyección que se realizan en el campo de estudio.

3.2. HISTORIAL DE PRODUCCIÓN DEL POZO A-1 CON PCP METAL-METAL

Se optó por la implementación de la tecnología PCP metal-metal en el pozo A-1, debido que con el sistema PCP convencional se estaban presentando una cantidad de problemas operaciones por los altos contenidos de H_2S y otros gases que han generado problemas en el elastómero, como el endurecimiento y desgaste excesivo, causando altos costos por la intervención de equipos de well services y disminución en la producción diaria, debido a la alta demanda de otros servicios prioritarios establecidos en el campo.

Para la selección de la bomba PCP metal-metal, es necesario conocer los datos del pozo para su diseño y adecuación a las condiciones operativas que se presenta en cada uno de los pozos, dado que el pozo venía produciendo con el sistema PCP convencional, esto facilita esta selección porque su diseño es similar y solo es necesario tener en cuenta la capacidad de la bomba, la carga nominal de la sarta de bombeo y ajustar las características cuándo el pozo tiene alto sus contenidos de H_2S para evitar problemas presentados anteriormente. A continuación de muestra una gráfica con los datos para la selección de las bombas PCP metal-metal.

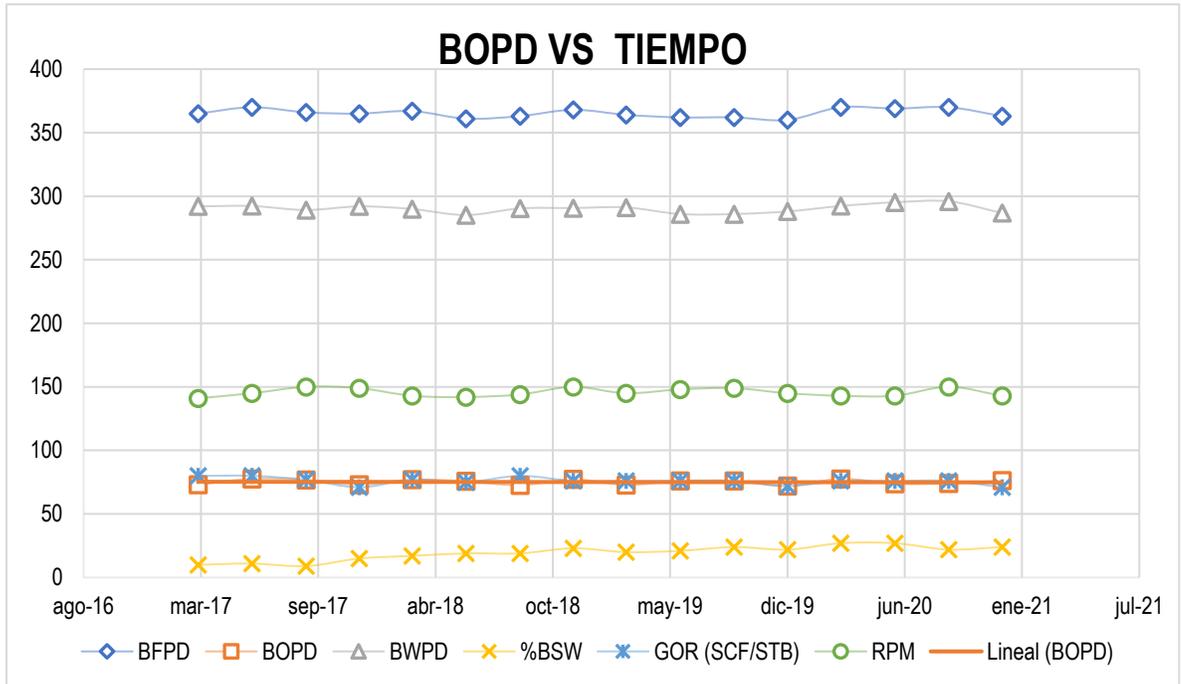
Cuadro 6. Datos para el Diseño de la Bomba PCP Metal-Metal en el Pozo A-1

DATOS PARA EL DISEÑO DEL POZO A-1	
Caudal	350 BFPD
Densidad del fluido	11.4 °API
Gravedad especifica del gas	0.64
Gravedad especifica del agua	1.02
BS&W	33%
GOR	65 SCF/STB
% H_2S	120 ppm
Velocidad de la bomba	120 RPM
Eficiencia de la bomba	80%
Nivel dinámico	2300 ft
Temperatura de fondo	280 °F
DogLeg a la profundidad de la bomba	1.2°/100 ft
Temperatura del vapor	505 °F
Tipo de pozo	Horizontal
Presion de burbuja	290 PSI

Fuente: Elaboración propia

Dado lo anterior se utilizará la bomba 80V2000 dando que cumple con el rango de producción del pozo tanto en la fase caliente y la fase fría, esto permitirá la reducción los tiempos operaciones en los cambios de ALS en las diferentes fases de producción y se obtendrá una mayor producido de crudo dado que está bomba tiene un buen manejo de arena, resistente a los gases por H_2S y reducción en las fallas operacionales por cambio de estator. Se mostrará a continuación la producción de crudo del pozo A-1 con el sistema PCP metal-metal.

Figura 28. Producción Trimestral del Pozo A-1 con PCP Metal-Metal.



PRODUCCIÓN TRIMESTRAL PROMEDIO DEL POZO A-1						
FECHA	BFPD	BOPD	BWPD	%BSW	GOR (SCF/STB)	RPM
mar-17	361	75.81	285.19	12	73	145
jun-17	364	76.44	287.56	10	73	148
sep-17	366	73.2	292.8	11	70	147
dic-17	365	76.65	288.35	20	74	143
mar-18	363	72.6	290.4	20	76	140
jun-18	369	73.8	295.2	18	76	147
sep-18	362	72.4	289.6	14	74	140
dic-18	364	76.44	287.56	24	72	143
mar-19	362	76.02	285.98	22	75	148
jun-19	368	73.6	294.4	22	77	145
sep-19	363	72.6	290.4	23	74	146
dic-19	364	72.8	291.2	23	77	143
mar-20	370	77.7	292.3	26	75	149
jun-20	369	77.49	291.51	22	74	141
sep-20	361	75.81	285.19	24	73	147

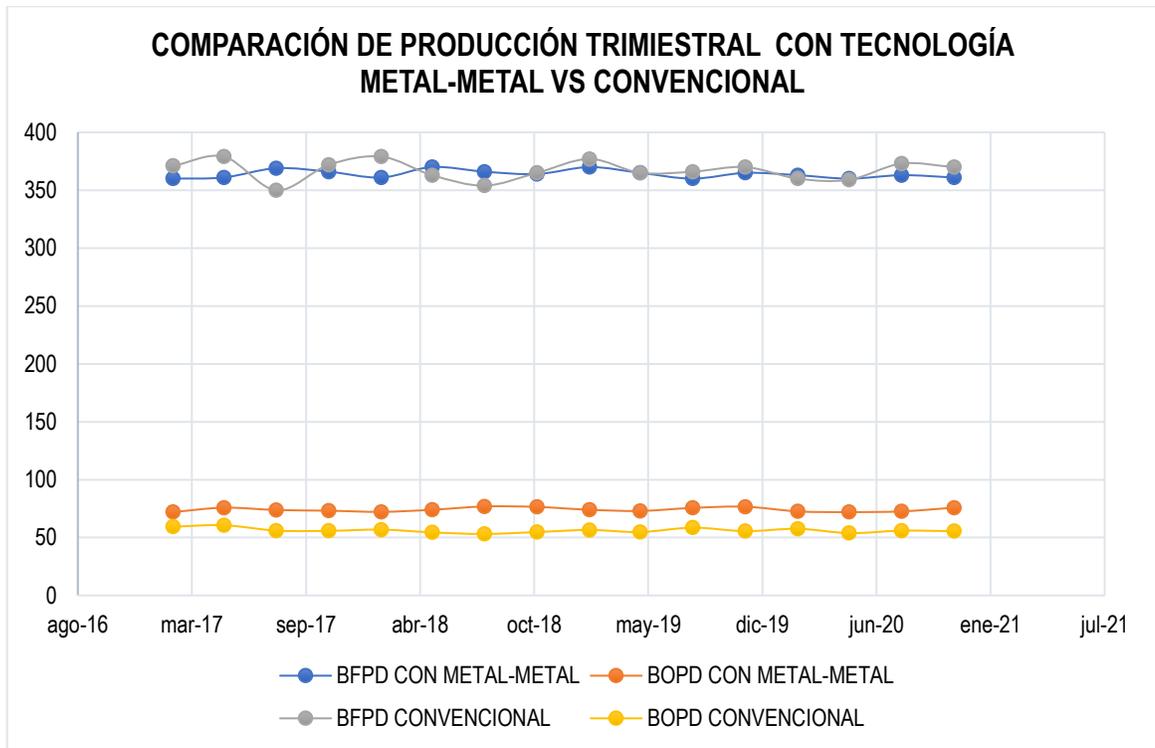
PRODUCCIÓN TRIMESTRAL PROMEDIO DEL POZO A-1						
FECHA	BFPD	BOPD	BWPD	%BSW	GOR (SCF/STB)	RPM
dic-20	363	76.23	286.77	24	73	143

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en las gráficas anteriores, la producción del pozo A-1 se mantuvo constante debido a que este tipo de bombas está diseñado para trabajar en campos donde su sistema de recobro es el térmico, como la inyección de vapor. Además, cabe resaltar que no se presentan problemas por el contenido de arenas ya que estas bombas son excelentes para este manejo.

Es importante mencionar que esta bomba funciona muy bien, en la fase caliente y fase fría, lo cual maximiza la producción del pozo por se evitan las intervenciones de los equipos de Well Services para el cambio de ALS cuando se va a producir en la fase caliente y fase fría. A continuación, se mostrará un Cuadro con la producción trimestral promedio de los 4 últimos años con la tecnología PCP metal-metal y la PCP convencional.

Figura 29. Comparación de Producción Trimestral con Tecnología PCP Metal-Metal vs Convencional del Pozo A-1



Fuente: Elaboración propia

Según las gráficas mostradas anteriormente, el sistema PCP metal-metal es el sistema más adecuado para estos tipos de pozos, ya que su métodos de recobro es la inyección cíclica de vapor, el cual permite aprovechar la máxima cantidad de fluidos producidos en la fase caliente y la fase fría por sus altas resistencia a las altas temperaturas y a los agentes abrasivos del pozo, permitiendo así un mayor runlife de las bombas y la reducción de las fallas en el estator, como ventaja en el sistema convencional.

Para verificar la viabilidad de la bomba PCP Metal-Metal se comparó la producción de dos pozos dentro de un mismo clúster que poseían las mismas propiedades de yacimiento y una producción similar para poder realizar un optima comparación y

así mismo demostrar su aplicabilidad en otros pozos del campo con inyección cíclica de vapor, como resultado, se observó una ganancia entre 5900 BBL y 6300 BBL entre los años 2017,2018, 2019 y 2020. El cual permitió pagar la tecnología adquirida y generando una rentabilidad positiva para la empresa operadora.

Cuadro 7. Comparación de Barriles de Petróleo Producido con Tecnología PCP Metal-Metal Vs Convencional

PRODUCCIÓN ACUMULADA ANUAL DE POZO A-1 [BOP/AÑO]					
TECNOLOGÍA	2017	2018	2019	2020	PRODUCCIÓN TOTAL
PCP METAL-METAL	24494	24866	24408	24539	98307
CONVENCIONAL	18557	18296	18921	18207	73981
DIFERENCIA ANUAL	5937	6570	5487	6332	24326

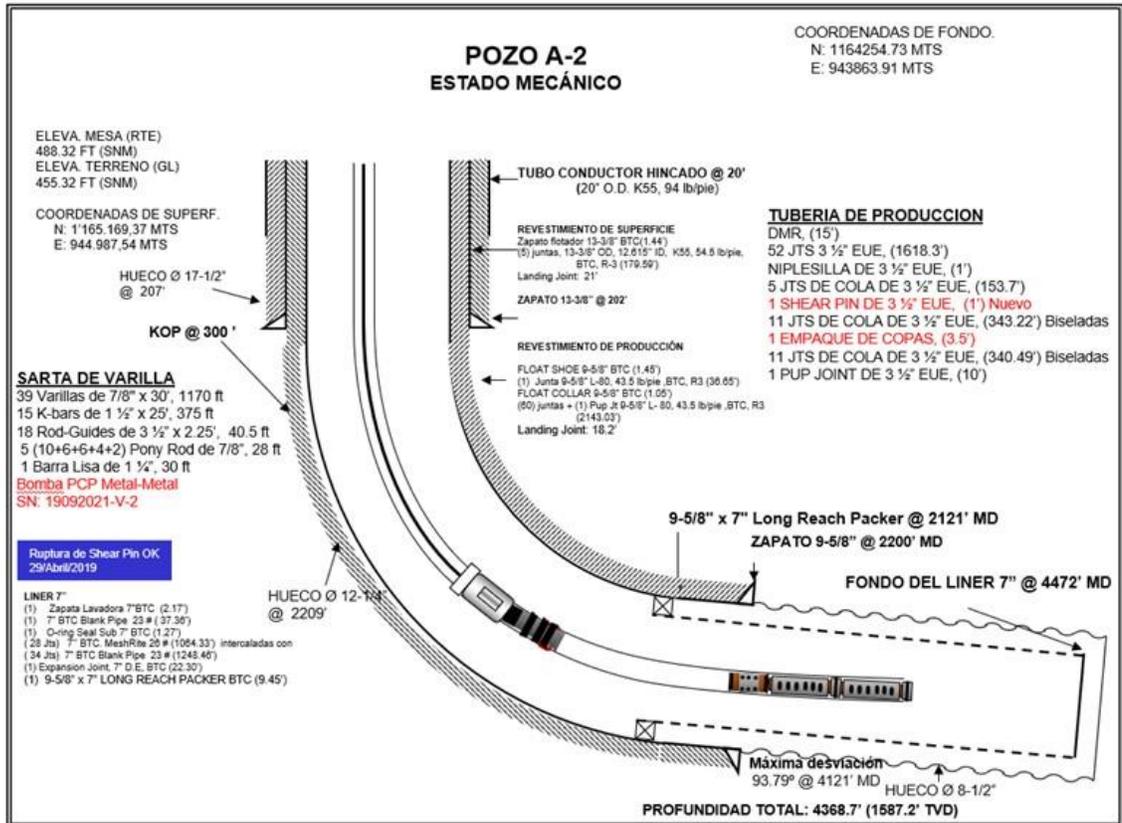
Fuente: Elaboración propia

3.3. HISTORIAL DE PRODUCCIÓN DEL POZO A-2 CON PCP CONVENCIONAL

El pozo A-2 fue perforado el 20 de enero de 2010 alcanzando una profundidad final de 4368.7 FT MD (1587.2 FT TVD), con una inclinación de 201.8 grados. Este pozo se perforó con una sección horizontal del 2209 FT. Ver figura 30. Se realizó la corrida de registros eléctricos donde se reportó un 98% de arena con shows entre buenos y muy buenos con resistividades sobre los 16.4 ohm.m (alcanzando promedios de 44 ohm.m).

Inicialmente el pozo A-2 se le realizaron las pruebas de producción para evaluar el potencial del pozo donde se determinó una producción diaria de 115 BOPD, con una temperatura de operación de 260 °F, una presión de operación de 976 PSI y la calidad de vapor de inyección del 92% durante el primer ciclo.

Figura 30. Estado Mecánico del Pozo A-2



Fuente: Elaboración propia

Cuando el pozo A-2 inicia su vida productiva instalando como método de levantamiento artificial, el de cavidades progresivas que es designado por del departamento de producción del campo, este inició con una tasa de producción 115 BOPD, gravedad API de 11.4° y un corte de agua del 75% en el cual se estableció la velocidad del cabezal entre los 140 rpm y 180 rpm, para no permitir canalización del agua en la formación de interés como se muestra en el Cuadro 8.

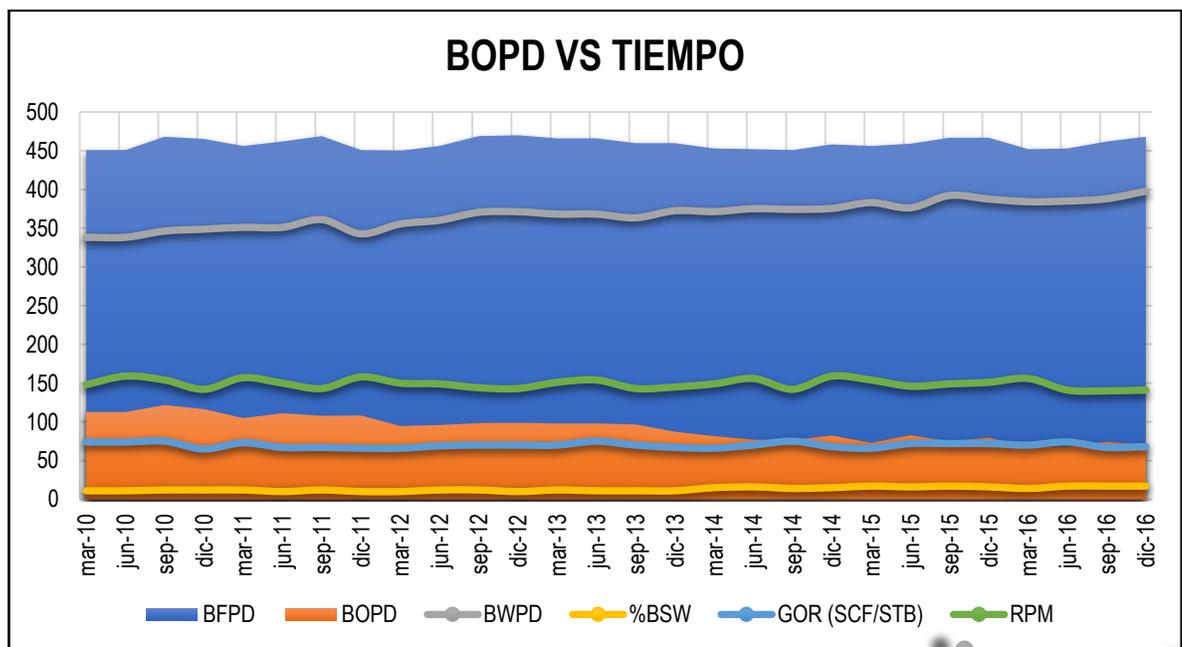
Cuadro 8. Producción Trimestral del Pozo A-2

PRODUCCIÓN TRIMESTRAL PROMEDIO DEL POZO A-2						
FECHA	BFPD	BOPD	BWPD	%BSW	GOR (SCF/STB)	RPM
mar-10	468	121.68	346.32	12	74	141
jun-10	468	117	351	12	65	155
sep-10	468	121.68	346.32	10	71	140
dic-10	450	112.5	337.5	11	74	154
mar-11	454	104.42	349.58	12	69	147
jun-11	469	112.56	356.44	11	71	147
sep-11	451	103.73	347.27	12	71	141
dic-11	466	111.84	354.16	11	75	152
mar-12	468	107.64	360.36	11	72	158
jun-12	463	101.86	361.14	12	69	156
sep-12	452	94.92	357.08	10	75	153
dic-12	463	97.23	365.77	11	74	152
mar-13	452	85.88	366.12	12	71	158
jun-13	454	86.26	367.74	11	70	140
sep-13	465	88.35	376.65	11	73	151
dic-13	460	96.6	363.4	10	66	154
mar-14	450	81	369	14	69	153
jun-14	450	81	369	17	69	142
sep-14	468	79.56	388.44	14	73	150
dic-14	454	77.18	376.82	15	70	147
mar-15	458	82.44	375.56	15	75	143
jun-15	453	81.54	371.46	14	67	156
sep-15	467	84.06	382.94	15	68	151
dic-15	458	77.86	380.14	15	75	140
mar-16	462	73.92	388.08	16	70	147
jun-16	469	70.35	398.65	14	69	146
sep-16	464	74.24	389.76	17	65	156
dic-16	459	68.85	390.15	15	72	159

Fuente: Elaboración propia

Durante los primeros 6 años de producción del pozo A-1, se refleja un disminución aproximadamente del 3.8% anual, del caudal inicial debido a los diferentes ciclos de inyección de vapor del crudo para poder disminuir la viscosidad del crudo y aumentar la producción del pozo como se muestra en la figura 31, pero esto trae como consecuencia el debilitamiento de la matriz de la roca generadora causando el aumento del porcentaje de BSW, aumento de producción de agua y mayor riesgo de fallas en el estator y rotor por los contenidos abrasivos de la arena.

Figura 31. Producción Trimestral del Pozo A-2 Durante 6 años



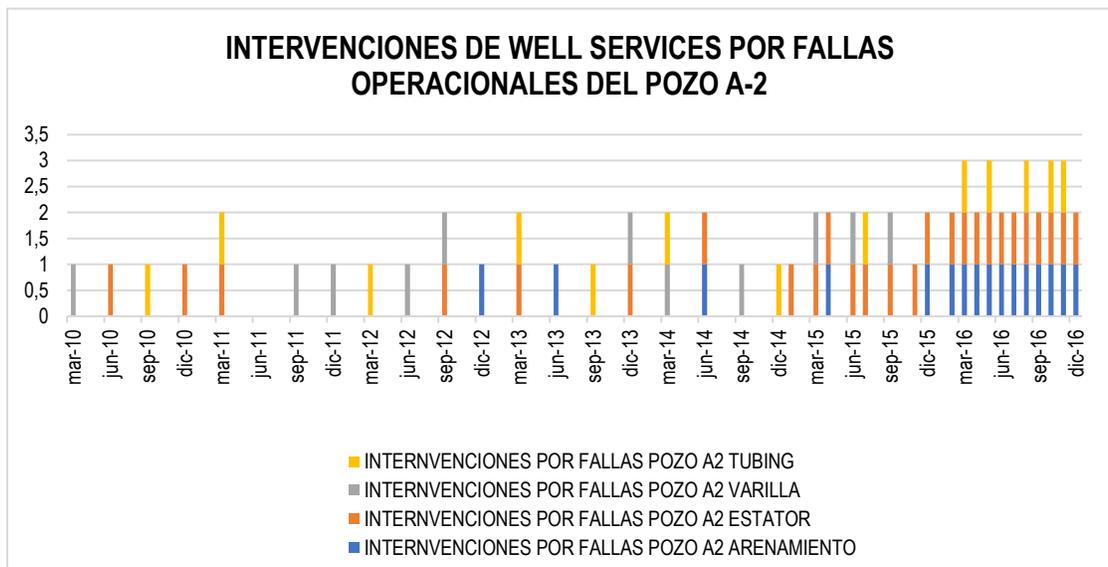
Fuente: Elaboración propia

Según el historial de producción del pozo A-2, se observa una reducción en cuanto a su producción, debido a los problemas operacionales como el exceso de rpm, causando así una preferencia del agua en el pozo, desde agosto del 2013 según los datos recopilados del departamento de producción.

El pozo A-2, posee una buena producción y buena sumergencia que fueron evidenciado en la toma de datos del sonolog. Pero a partir de diciembre del 2013 se observa una reducción en la cantidad de BOPD debido al aumento del %BSW el cual produce un desgaste critico entre el elastómero y el estator reflejando así la reducción de la producción diaria, aumentando los costos por intervención por equipo de well services y la reducción del RunLife de la bomba.

A partir de diciembre del año 2016, se considera la opción de implementar la primera bomba de cavidades progresivas metal-metal en el campo A, debido a que el pozo A-2, cumple con los criterios de selección por la empresa que suministra este tipo de bombas, con el fin de solucionar varios problemas que se están presentando en el yacimiento como los contratiempos en la instalación del sistema de bombeo mecánico en la fase caliente, el alto porcentaje de BSW y las fallas operacionales de la bomba debido al alto contenido de arena, como se muestra en la figura 32.

Figura 32. Intervenciones de Well Services por Fallas Operacionales del Pozo A-2



Fuente: Elaboración propia

Como se evidencia en la gráfica anterior, a partir de marzo del 2015 se reflejó un aumento de las fallas de las bombas de PCP convencionales debido al arenamiento, tubing con roturas y al desgaste excesivo de los estatores, por el cual se planteó la posibilidad de implementar la tecnología PCP metal-metal como una alternativa para disminuir las fallas constantes en los estatores por el exceso de arena producida y por las altas temperaturas del pozo, debido por los diferentes ciclos de inyección que se realizan en el campo de estudio.

3.4. HISTORIAL DE PRODUCCIÓN DEL POZO A-2 CON PCP METAL-METAL

Se optó por la implementación de la tecnología PCP metal-metal en el pozo A-2, debido que con el sistema PCP convencional se estaban presentando una cantidad de problemas operaciones por los altos contenidos de H_2S y otros gases que han generado problemas en el elastómero, como el endurecimiento y desgaste excesivo, causando altos costos por la intervención de equipos de well services y disminución en la producción diaria, debido a la alta demanda de otros servicios prioritarios establecidos en el campo.

Para la selección de la bomba PCP metal-metal, es necesario conocer los datos del pozo para su diseño y adecuación a las condiciones operativas que se presenta en cada uno de los pozos, dado que el pozo venía produciendo con el sistema PCP convencional, esto facilita esta selección porque su diseño es similar y solo es necesario tener en cuenta la capacidad de la bomba, la carga nominal de la sarta de bombeo y ajustar las características cuándo el pozo tiene alto sus contenidos de H_2S para evitar problemas presentados anteriormente. A continuación de muestra una gráfica con los datos para la selección de las bombas PCP metal-metal.

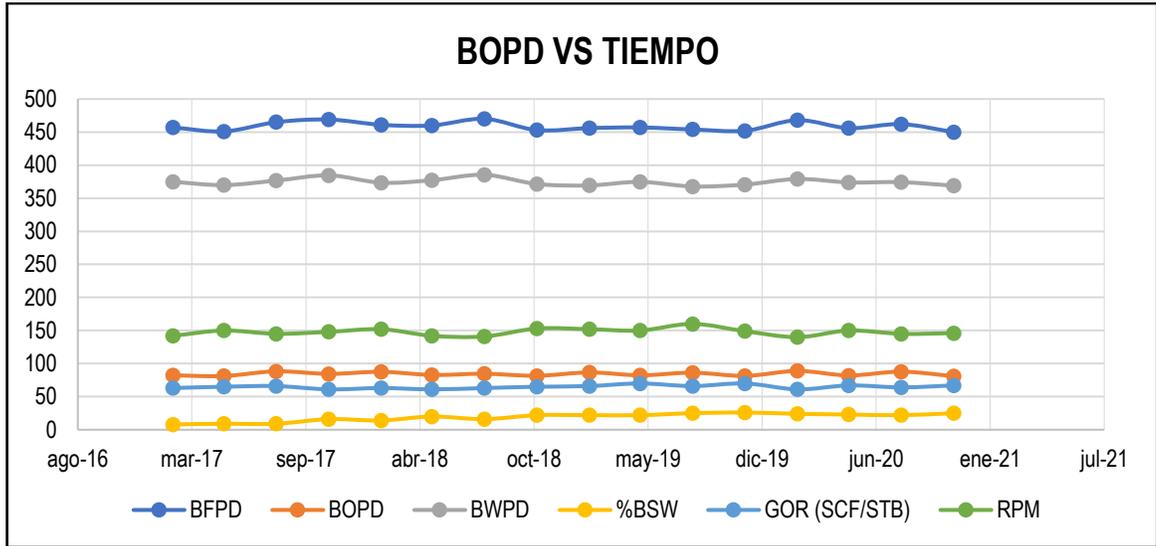
Cuadro 9. Datos para el Diseño de la Bomba PCP Metal-Metal en el Pozo A-2

DATOS PARA EL DISEÑO DEL POZO A-2	
Caudal	450 BFPD
Densidad del fluido	11.4 °API
Gravedad especifica del gas	0.635
Gravedad especifica del agua	1.02
BS&W	38%
GOR	70 SCF/STB
% H_2S	100 ppm
Velocidad de la bomba	140 RPM
Eficiencia de la bomba	80%
Nivel dinámico	2385 ft
Temperatura de fondo	290 °F
DogLeg a la profundidad de la bomba	1.1°/100 ft
Temperatura del vapor	505 °F
Tipo de pozo	Horizontal
Presion de burbuja	286 PSI

Fuente: Elaboración propia

Dado lo anterior se utilizará la bomba 1000V2000 dando que cumple con el rango de producción del pozo tanto en la fase caliente y la fase fría, esto permitirá la reducción los tiempos operaciones en los cambios de ALS en las diferentes fases de producción y se obtendrá una mayor producido de crudo dado que está bomba tiene un buen manejo de arena, resistente a los gases por H_2S y reducción en las fallas operacionales por cambio de estator. Se mostrará a continuación la producción de crudo del pozo A-2 con el sistema PCP metal-metal.

Figura 33. Producción Trimestral del Pozo A-2 con PCP Metal-Metal.



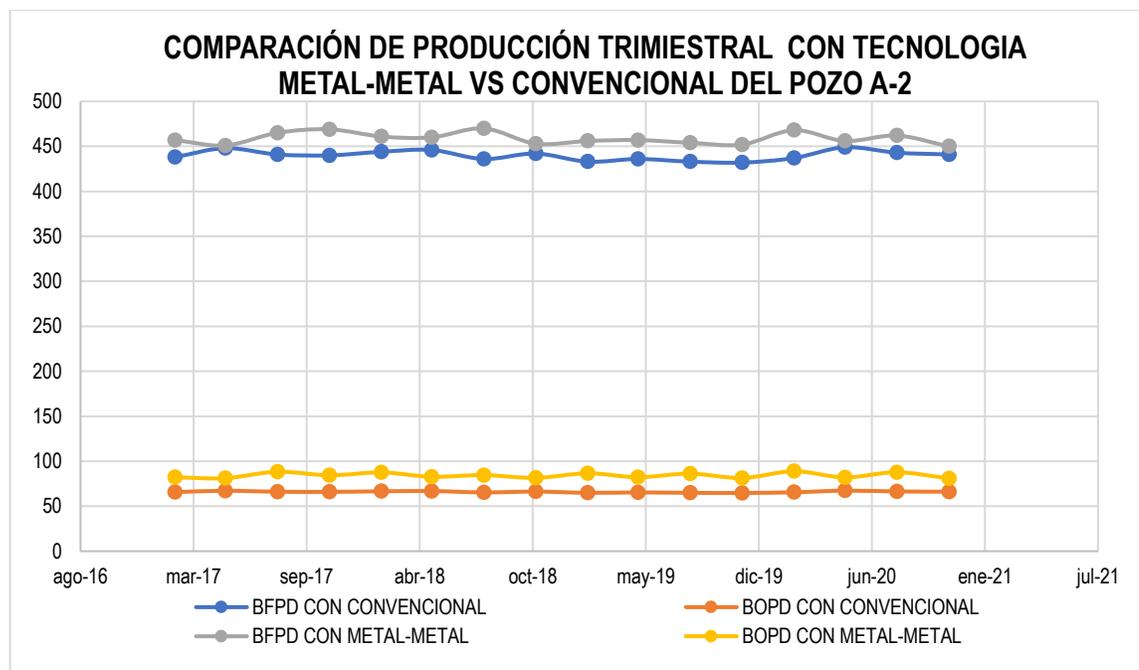
PRODUCCIÓN TRIMESTRAL PROMEDIO DEL POZO A-2 METAL-METAL						
FECHA	BFPD	BOPD	BWPD	%BSW	GOR (SCF/STB)	RPM
feb-17	459	82.62	376.38	10	62	152
may-17	457	86.83	370.17	11	61	146
ago-17	451	81.18	369.82	10	62	160
nov-17	459	82.62	376.38	17	62	144
feb-18	469	89.11	379.89	19	63	146
may-18	458	82.44	375.56	14	61	152
ago-18	458	82.44	375.56	18	64	148
nov-18	470	84.6	385.4	22	60	145
feb-19	456	86.64	369.36	23	70	142
may-19	454	86.26	367.74	25	62	156
ago-19	469	89.11	379.89	25	62	148
nov-19	459	87.21	371.79	26	60	141
feb-20	455	81.9	373.1	22	68	160
may-20	461	82.98	378.02	22	65	152
ago-20	468	84.24	383.76	22	67	150
nov-20	455	86.45	368.55	28	66	147

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en las gráficas anteriores, la producción del pozo A-2 durante la fase caliente se mantuvo constante debido a que este tipo de bombas están diseñadas para trabajar en campos donde su sistema de recobro es el térmico, como la inyección de vapor. Además, cabe resaltar que no se presentan problemas por el contenido de arenas ya que estas bombas son excelentes para este manejo.

Es importante mencionar que esta bomba funciona muy bien, en la fase caliente y fase fría, lo cual maximiza la producción del pozo por se evitan las intervenciones de los equipos de Well Services para el cambio de ALS cuando se va a producir en la fase caliente y fase fría. A continuación, se mostrará un Cuadro con la producción trimestral promedio de los 4 últimos años con la tecnología PCP metal-metal y la PCP convencional.

Figura 34. Comparación de Producción Trimestral con Tecnología PCP Metal-Metal vs Convencional del Pozo A-2



Fuente: Elaboración propia

Según las gráficas mostradas anteriormente, el sistema PCP metal-metal es el sistema más adecuado para estos tipos de pozos, ya que su métodos de recobro es la inyección cíclica de vapor, el cual permite aprovechar la máxima cantidad de fluidos producidos en la fase caliente y la fase fría por sus altas resistencia a las altas temperaturas y a los agentes abrasivos del pozo, permitiendo así un mayor runlife de las bombas y la reducción de las fallas en el estator, como ventaja en el sistema convencional.

Para verificar la viabilidad de la bomba PCP Metal-Metal se comparó la producción de dos pozos dentro de un mismo cluster que poseían las mismas propiedades de yacimiento y una producción similar para poder realizar una óptima comparación y así mismo demostrar su aplicabilidad en otros pozos del campo con inyección cíclica de vapor, como resultado, se observó una ganancia entre 5800 BBL y 7500 BBL entre los años 2017,2018, 2019 y 2020. El cual permitió pagar la tecnología adquirida y generando una rentabilidad positiva para la empresa operadora.

Cuadro 10. Comparación de Barriles de Petróleo Producido con Tecnología PCP Metal-Metal Vs Convencional

PRODUCCIÓN ACUMULADA ANUAL DE POZO A-2[BOP/AÑO]					
TECNOLOGÍA	2017	2018	2019	2020	PRODUCCIÓN TOTAL
PCP METAL-METAL	27825.3	27809.7	28519.2	29058.6	113212.8
CONVENCIONAL	22000.5	21685.5	21766.5	21541.5	86994
DIFERENCIA ANUAL	5824.8	6124.2	6752.7	7517.1	26218.8

Fuente: Elaboración propia

4. CÁLCULOS DE PÉRDIDAS ASOCIADAS AL ESCURRIMIENTO DE LA BOMBA PCP METAL-METAL MEDIANTE EL SIMULADOR PC-PUMP

Cuando ocurre interferencia en una bomba de cavidades progresivas 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. Cuando la bomba es sometida a una diferencia de presión entre su succión y su descarga, el fluido trata de romper este sello para regresar a las cavidades anteriores, lo cual se conoce como escurrimiento (o resbalamiento). Si la interferencia es muy pequeña el sello se rompe fácilmente, lo cual produce un escurrimiento excesivo y una baja eficiencia volumétrica. El escurrimiento a su vez es función de la interferencia de la bomba a condiciones de operación, del diferencial de presión en la bomba y de la viscosidad del fluido¹².

Como resultado podemos definir que el caudal de producción es la diferencia entre el caudal teórico y el caudal de escurrimiento:

$$Q_P = Q_T + Q_E$$

Donde:

Q_p: Es el Caudal de producción

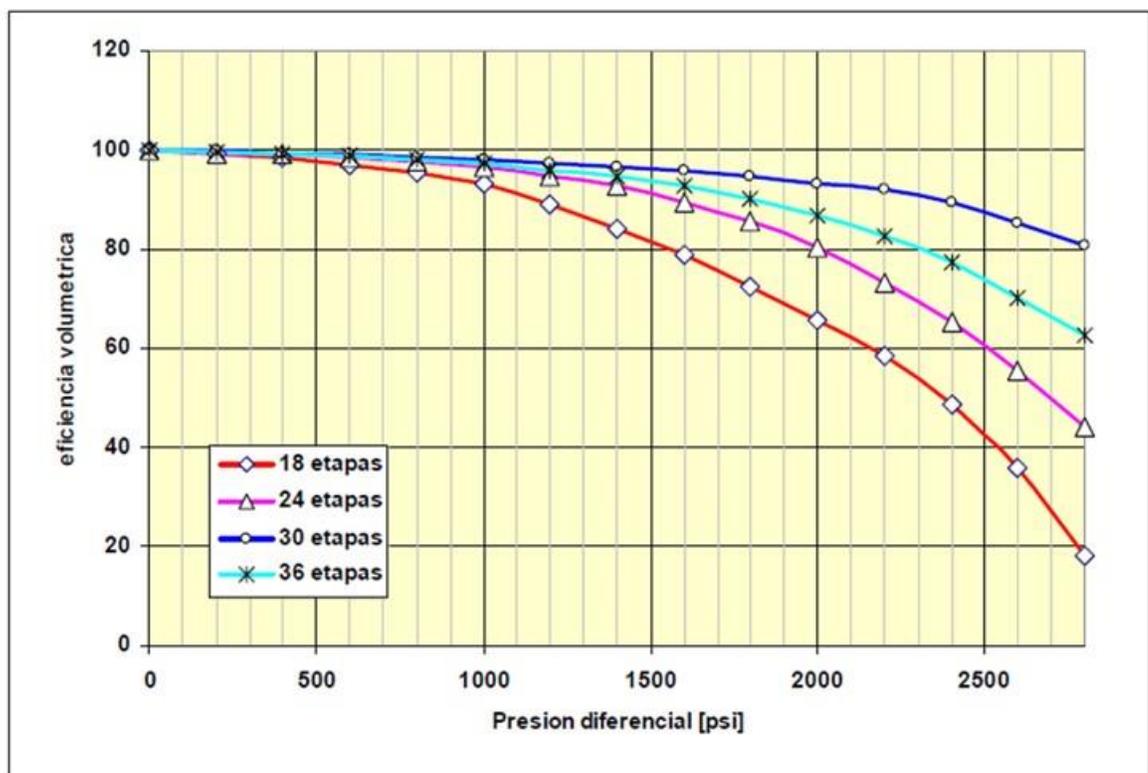
Q_t: Es el Caudal teórico

Q_e: Es el Caudal del Escurrimiento

¹² Bombeo de cavidad progresiva: Operaciones, diagnósticos, análisis de falla y trouble shooting. ESP oil international training group. WorkShop International. Nelvy Chacín.

Como dato relevante se concluye que el escurrimiento de una bomba depende de la cantidad de etapas que esta posee, porque la presión diferencial que va soportar cada cavidad será mucho menor en la línea del sello, para esto también es necesario tener en cuenta el número de revoluciones por minuto (RPM).

Figura 35. Eficiencia Volumétrica vs Presión Diferencial en Función en el Número de Etapas de la Bomba.

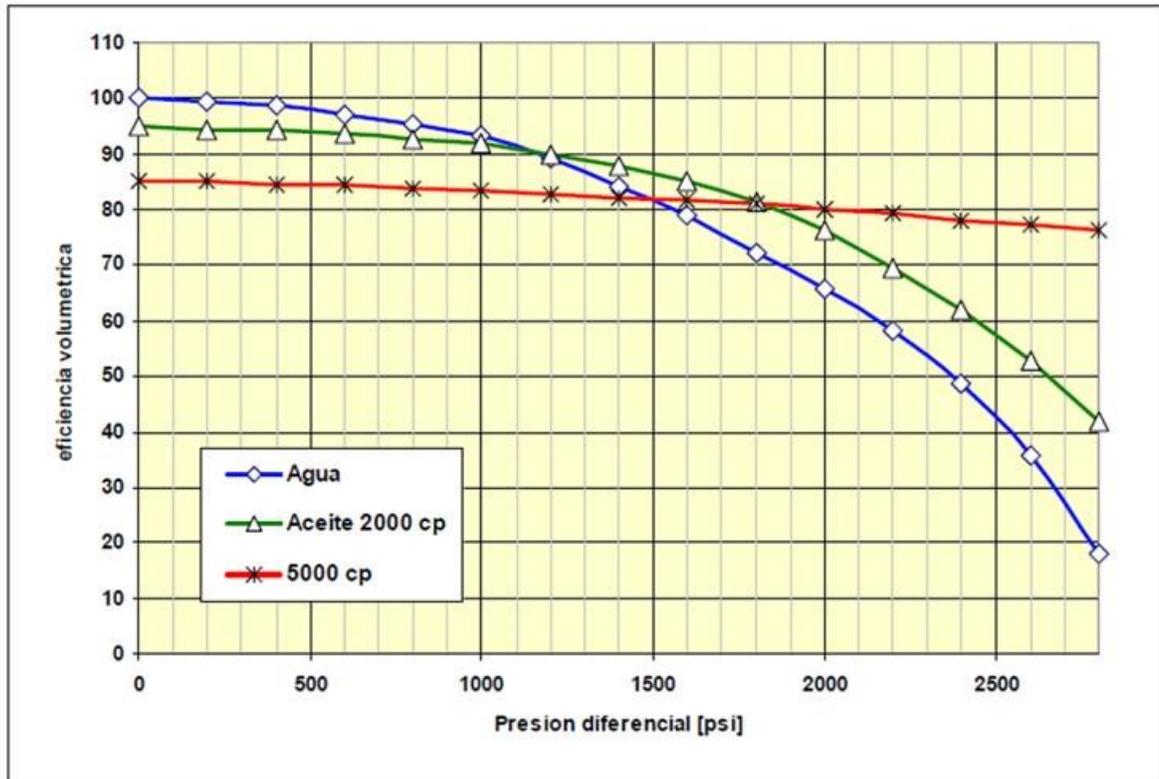


Fuente: PCM Europe SAS. PCM Vulcain

La viscosidad del crudo juega un papel importante para reducir el escurrimiento de la bomba debido a que el área del flujo transversal del crudo viscoso es afectada por la adherencia en las paredes el estator y el rotor permitiendo así la reducción

del escurrimiento de la bomba. Es decir que a mayor viscosidad del crudo la eficiencia de la bomba se mantiene constante durante la operación de succión.

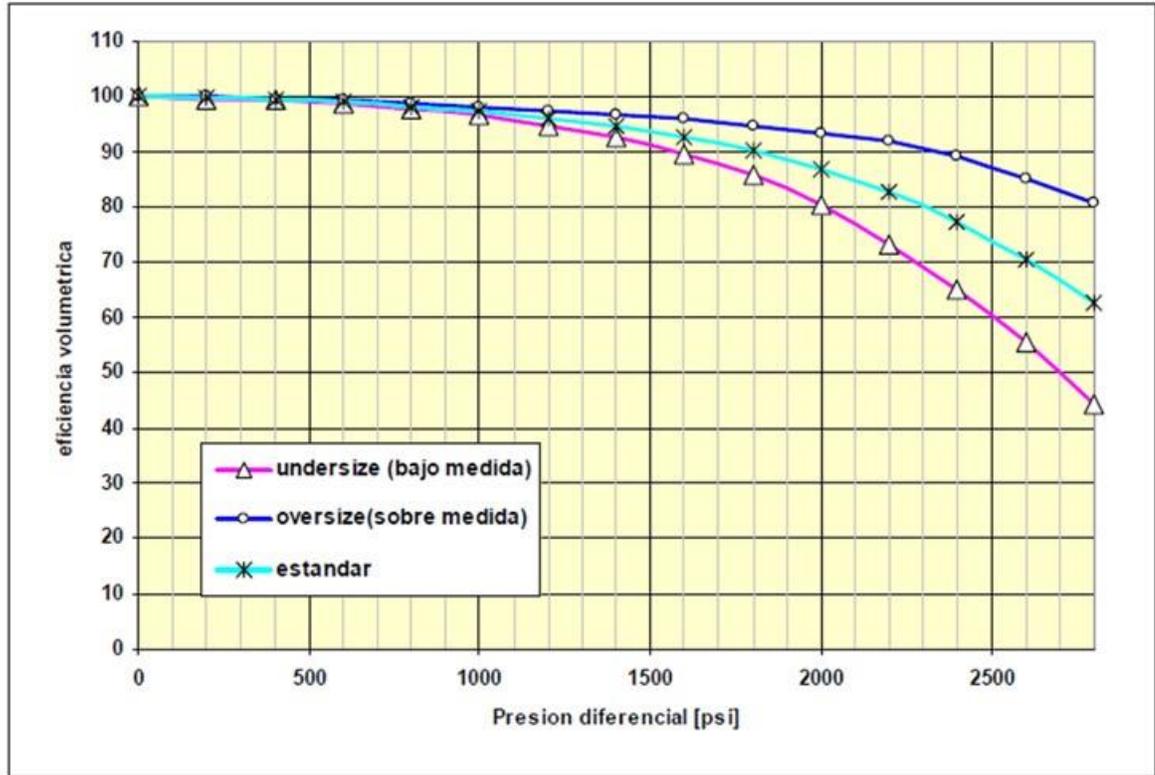
Figura 36. Eficiencia Volumétrica Vs Presión Diferencial en Función de la Viscosidad



Fuente: PCM Europe SAS. PCM Vulcain

El ajuste que se realiza entre el rotor y estator también tienen influencia en el escurrimiento de la bomba, porque entre mayor sea el ajuste entre esos dos elementos, será más difícil que se deslice el crudo a través de las líneas del sello a una presión diferencia dada.

Figura 37. Eficiencia Volumétrica Vs Presión Diferencial en Función del Ajuste del Rotor y Estator



Fuente: PCM Europe SAS. PCM Vulcain

Según las gráficas anteriores se puede concluir que para evitar el escurrimiento de una bomba PCP es necesario tener en cuenta, la viscosidad del crudo, los RPM y el número de etapas de la bomba y así poder tener la mayor cantidad de crudo posible en superficie manteniendo las condiciones óptimas de la bomba.

4.1. CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR ESCURRIMIENTO DE LA BOMBA PCP METAL-METAL EN EL POZO A-1 MEDIANTE EL SIMULADOR PC-PUMP

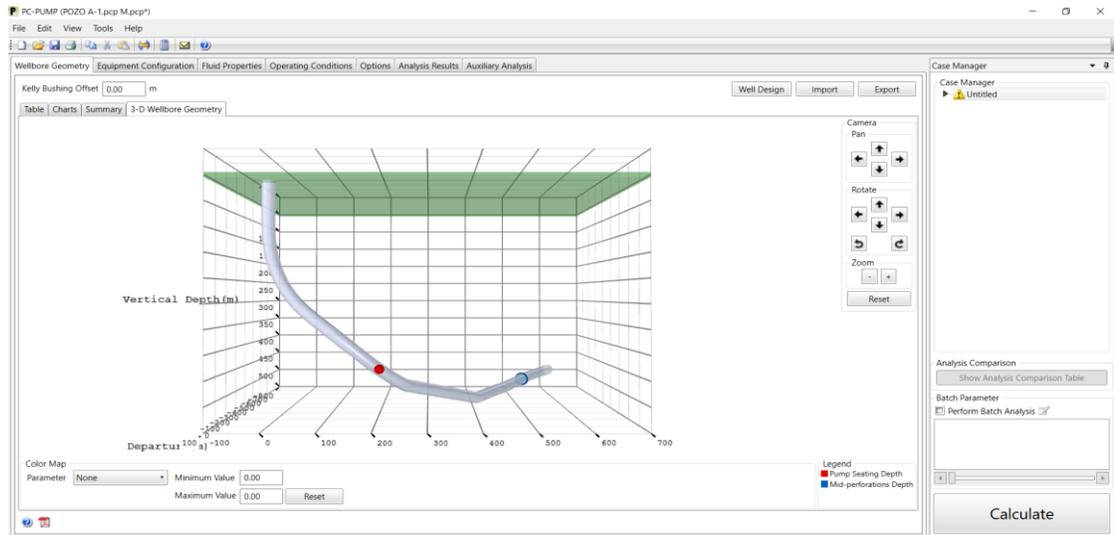
Para determinar las pérdidas de escurrimiento en el sistema de cavidades progresivas metal-metal, se recolecto la información de yacimiento, producción y las propiedades de la bomba suministrada por empresa de servicios, para poder ajustarlo en el simulador y calcular las perdidas por escurrimiento. Como se muestra en el siguiente Cuadro.

Figura 38. Información del Pozo A-1 para Ajustarlo al Simulador

DATOS PARA EL DISEÑO DEL POZO A-1	
Caudal	350 BFPD
Densidad del fluido	11.4 °API
Gravedad especifica del gas	0.64
Gravedad especifica del agua	1.02
BS&W	33%
GOR	65 SCF/STB
% H_2S	120 ppm
Velocidad de la bomba	120 RPM
Eficiencia de la bomba	90%
Nivel dinámico	2300 ft
Temperatura de fondo	280 °F
DogLeg a la profundidad de la bomba	1.2°/100 ft
Temperatura del vapor	505 °F
Tipo de pozo	Horizontal
Presion de burbuja	290 PSI
Viscosidad del petroleo (cP) a 100 °F	5345
Viscosidad del petroleo (cP) a 115 °F	2182
Viscosidad del petroleo (cP) a 130 °F	1315

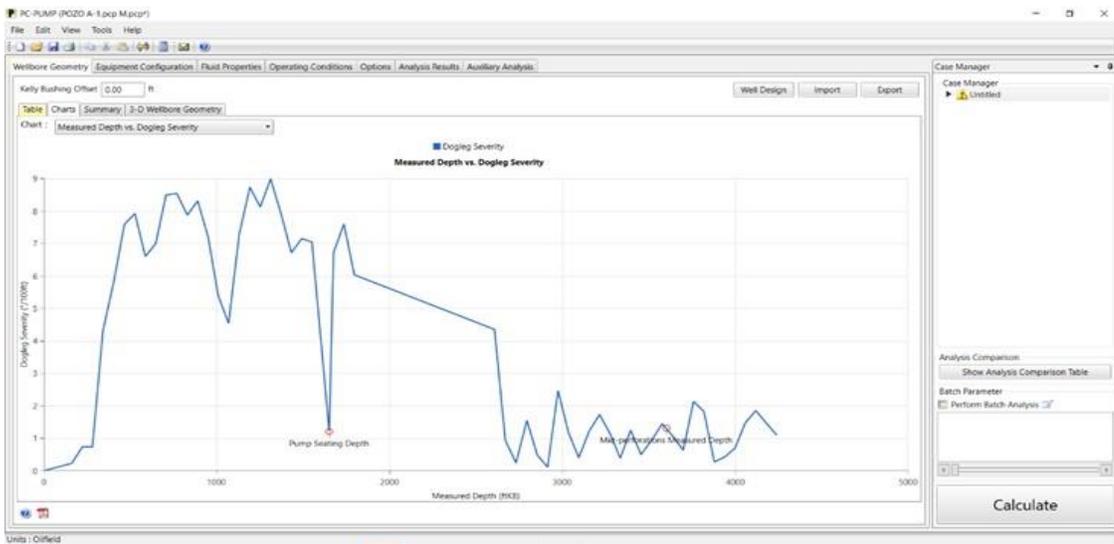
Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

1. Se ingresó los datos de survey en el simulador para determinar la profundidad donde se ubicará la bomba.



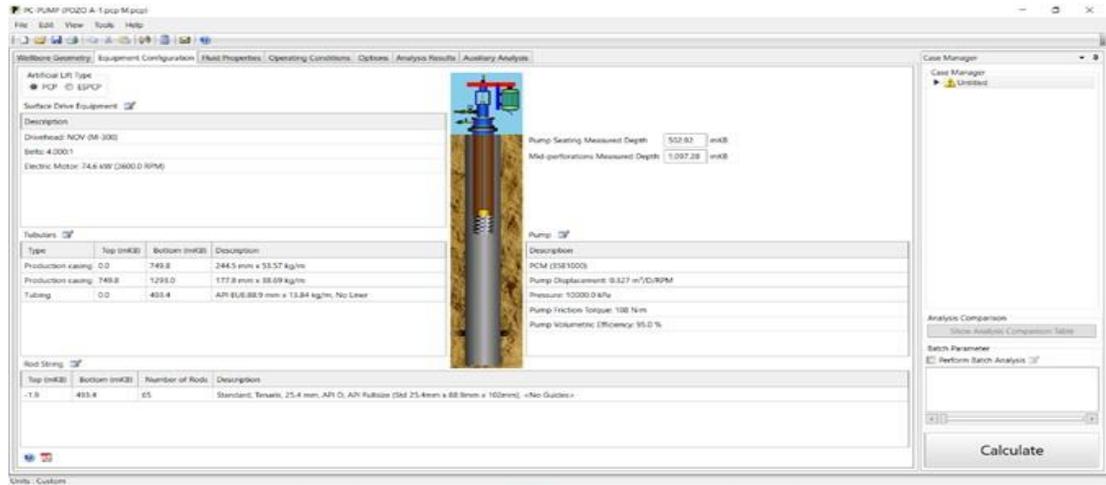
Fuente: Elaboración propia, Cfer PC-PUMP Software

2. Mediante la gráfica MD vs Dogleg Severity se escogió la profundidad donde el Dogleg menor a 2° para el asentamiento de la bomba.



Fuente: Elaboración propia. Cfer PC-PUMP Software

- Se ingresó los datos del estado mecánico, como son la profundidad del pozo, las características del Casing, la profundidad de la tubería de producción, la sarta de varilla, el tipo de bomba y las el cabezal de rotación.



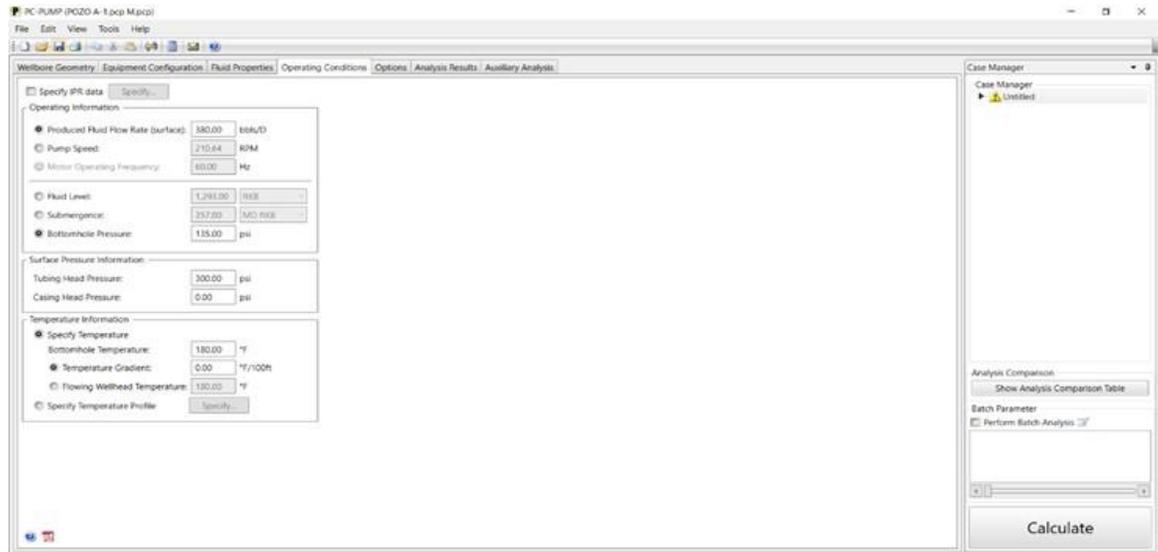
Fuente: Elaboración propia. Cfer PC-PUMP Software

- Se ingresó las propiedades de los fluidos como la gravedad API, la salinidad, el GOR, las propiedades térmicas del crudo y evaluar el crudo como multifásico.



Fuente: Elaboración propia Cfer PC-PUMP Software

5. Se ingresó los datos operacionales de la bomba y se fijan las RPM con los que trabajara en campo



Fuente: Elaboración propia Cfer PC-PUMP Software

Al ingresar todos los valores en el software se procede a realizar la simulación para obtener los datos del escurrimiento que presenta la bomba y compararlos con los datos reales en campo.

Al revisar los datos en el simulador PC-PUMP, indica que la producción promedio fluidos del pozo A-1 es de 380 BBL/DIA, pero sugiere que se tenga en cuenta las pérdidas de presión diferencial de 12.63 PSI que corresponde al escurrimiento de la bomba, es decir que el escurrimiento de la PCP metal-metal es equivalente al 6.35 barriles por día, dando una producción neta de 373.65 barriles por día.

Figura 39. Resultados de Simulación del Pozo A-1

POZO A-1.pcp M.pcp
Case: Untitled

Analysis Results - Summary

Input Parameters		Output Parameters	
Fluid Properties		Basic Parameters	
Fluid Type	Multi-phase	Pump Intake Pressure	81.89 psi
Oil API Gravity	11.40 °API	Pump Discharge Pressure	857.35 psi
Water Salinity	5000.00	Differential Pressure	775.46 psi
Gas Specific Gravity	0.64	Net Hydrostatic Head	462.83 psi
BS&W Content	75.00 %	Flow Losses	12.63 psi
Producing GOR	60.00 scf/STB	Pump Pressure Loading	53.47 % rated
Free Gas Separation	88.71	Pump Torque	222.52 ft-lbs
Operating Conditions		Pump Axial Load	1.71 kips
Surface Liquid Flow Rate (specified)	380.00 bbls/D	Maximum Rod Torque	277.48 ft-lbs
Pump Speed	210.64 RPM	Maximum Rod Torque Load	26.74 % Limit
Surface Motor Operation Frequency	14.04 Hz	Maximum Axial Rod Load	5.23 kips
Pump Volumetric Efficiency	95.00 %	Maximum Effective Rod Stress	31.69 %
Fluid Level	1293.00 ftKB	Rod Contact Loads	
Submergence (MD)	357.00 ftKB	Maximum Load Connection	116.68 lbf
Submergence (TVD)	213.95 ftKB	Surface Parameters	
Bottomhole Pressure (specified)	135.00 psi	System Input Power	12.46 hp
Tubing Head Pressure	300.00 psi	Prime Mover Output Power	12.33 hp
Casing Head Pressure	0.00 psi	Energy Cost	1114.56 \$/day
Bottomhole Temperature	180.00 °F	Thrust Bearing L10 Life	11057.72 years
Temperature Gradient	0.00 °F/100ft	Drivehead Main Shaft Torque Loading	7.93 %
Flowing Wellhead Temperature	180.00 °F	Drivehead Structural Loading	N/A
Equipment		Drivehead Power Output	3.71 %
Drivehead	NOV (M-300)	Drivehead Speed Output	26.33 %
Belts	4.000:1	Drivehead Gearbox Torque	N/A
Electric Motor	100.0 hp (3600.0 RPM)	Surface Motor Loading	52.69 %
Pump	PCM (35E1000)	System Efficiency	
Pump Displacement	2.057 bbls/D/RPM	System Mechanical/Electrical Efficiency	45.89 %
Pump Pressure Rating	1450 psi	System Overall Efficiency	43.60 %
Pump Cavity Flow Index	9.21 ft/s per 629 bbls/D	Pump Volumetric Efficiency	95.00 %
Rod String	1.000 in, APID		

Fuente: Elaboración propia Cfer PC-PUMP Software

Teniendo los datos del simulador, se realizó la comparación de los datos simulados y de los datos reales en campo para verificar las pérdidas de escurrimiento que se dan en el pozo A-1, con el fin de seguir implementado esta tecnología en otros pozos candidatos.

Cuadro 11. Comparación de los datos Simulador y Reales en Campo del Pozo A-1

CUADRO COMPARTIVO DE LOS VALORES SIMULADOS Y REALES DEL POZO A-1				
PARÁMETRO	VALOR DE CAMPO	VALOR SIMULADO	DIFERENCIA	PORCENTAJE
Presión de succión (PSI)	80	82	2	3%
Presión de descarga (PSI)	848	857	9	1%
Consumo de energía (KW/H)	46	39	7	15%
Eficiencia de la bomba %	90	85	5	6%
Caudal de fluido (BBL/DÍA)	367	374	7	2%
Revoluciones de la bomba (RPM)	150	200	50	25%

4.1.1. Análisis del Resultado Simulado y los Datos Reales en Campo del Pozo A-1. Analizando las diferencias obtenidas en el Cuadro 11. Se identificó que el margen de error es mínimo en la bomba PCP metal-metal debido a que el pozo cumple con los requisitos indispensables para evitar la máxima cantidad de escurrimiento de la bomba, porque el pozo produce un crudo viscoso, mantiene las revoluciones altas en operación y el ajuste entre rotor y estator se mantiene en sobremedida para evitar las caídas de la presión diferencial ocurrido por la presión de succión y descarga.

Las pérdidas asociadas al escurrimiento de la bomba PCP metal-metal mediante los valores simulados y reales en campo corresponde a 7 barriles/día promedio, esta diferencia puede ser asociada al número de RPM de la bomba, porque al aumentar los RPM se correría el riesgo de canalizar el agua por la formación productora, generando mayor cantidad agua y aumentaría la cantidad de arena en el crudo, por lo cual se dejó la bomba operando a 140 RPM en campo. Y generando una mayor cantidad de crudo en superficie por que soporta altas temperaturas.

4.2. CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR ESCURRIMIENTO DE LA BOMBA PCP METAL-METAL EN EL POZO A-2 MEDIANTE EL SIMULADOR PC-PUMP

Para determinar las pérdidas de escurrimiento en el sistema de cavidades progresivas metal-metal, se recolecto la información de yacimiento, producción y las propiedades de la bomba suministrada por empresa de servicios, para poder ajustarlo en el simulador y calcular las perdidas por escurrimiento. Como se muestra en el siguiente Cuadro.

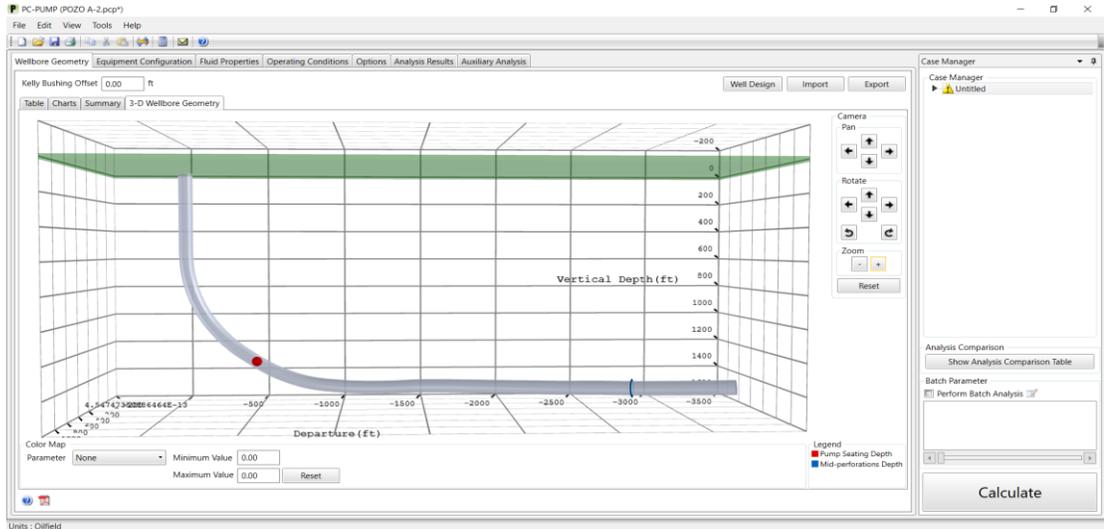
Figura 40. Información del Pozo A-2 para Ajustarlo al Simulador

DATOS PARA EL DISEÑO DEL POZO A-2	
Caudal	450 BFPD
Densidad del fluido	11.4 °API
Gravedad especifica del gas	0.635
Gravedad especifica del agua	1.02
BS&W	38%
GOR	70 SCF/STB
% H_2S	100 ppm
Velocidad de la bomba	140 RPM
Eficiencia de la bomba	80%
Nivel dinámico	2385 ft
Temperatura de fondo	290 °F
DogLeg a la profundidad de la bomba	1.1°/100 ft
Temperatura del vapor	505 °F
Tipo de pozo	Horizontal
Presion de burbuja	286 PSI
Viscosidad del petroleo (cP) a 100 °F	4625
Viscosidad del petroleo (cP) a 115 °F	1970
Viscosidad del petroleo (cP) a 130 °F	1238

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

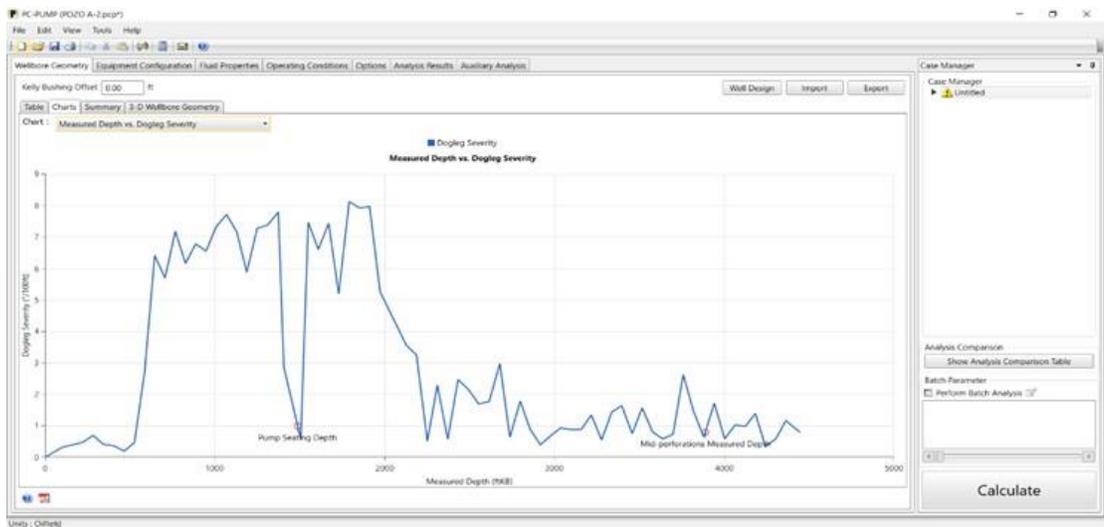
Al ingresar todos los valores en el software se procede a realizar la simulación para obtener los datos del escurrimiento que presenta la bomba y compararlos con los datos reales en campo.

1. Se ingresó los datos de survey en el simulador para determinar la profundidad donde se ubicará la bomba.



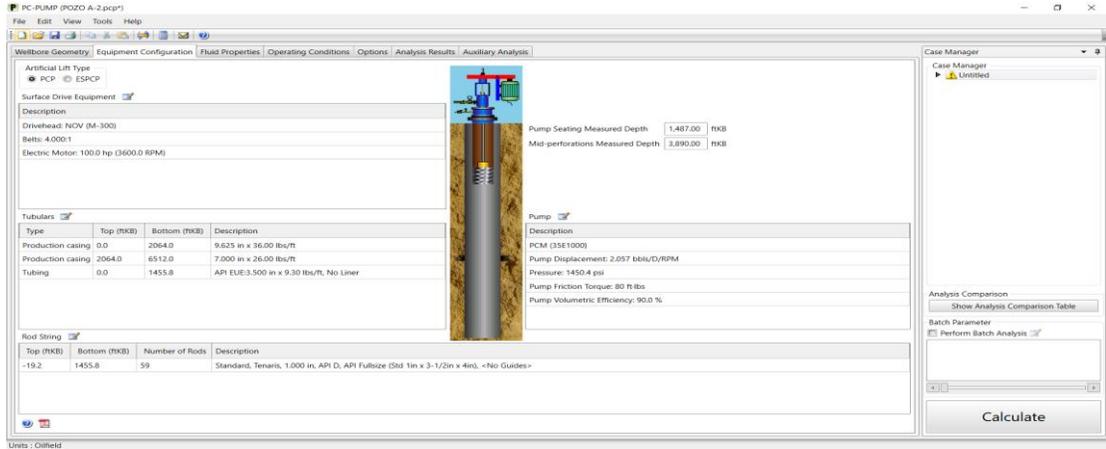
Fuente: Elaboración propia Cfer PC-PUMP Software

2. Mediante la gráfica MD vs Dogleg Severity se escogió la profundidad donde el Dogleg menor a 2° para el asentamiento de la bomba.



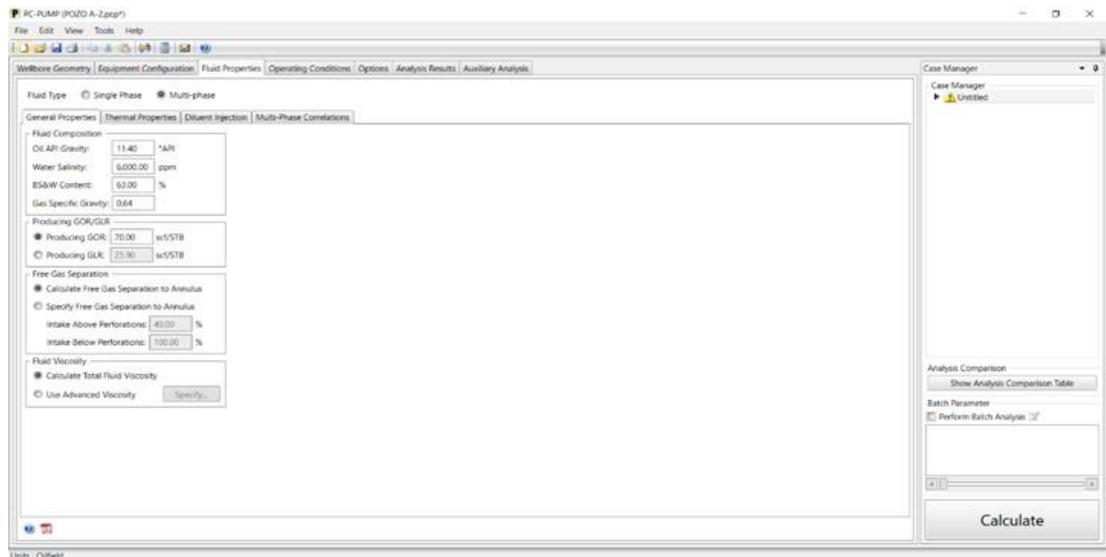
Fuente: Elaboración propia Cfer PC-PUMP Software

- Se ingresó los datos del estado mecánico, como son la profundidad del pozo, las características del Casing, la profundidad de la tුවiera de producción, la sarta de varilla, el tipo de bomba y las el cabezal de rotación.



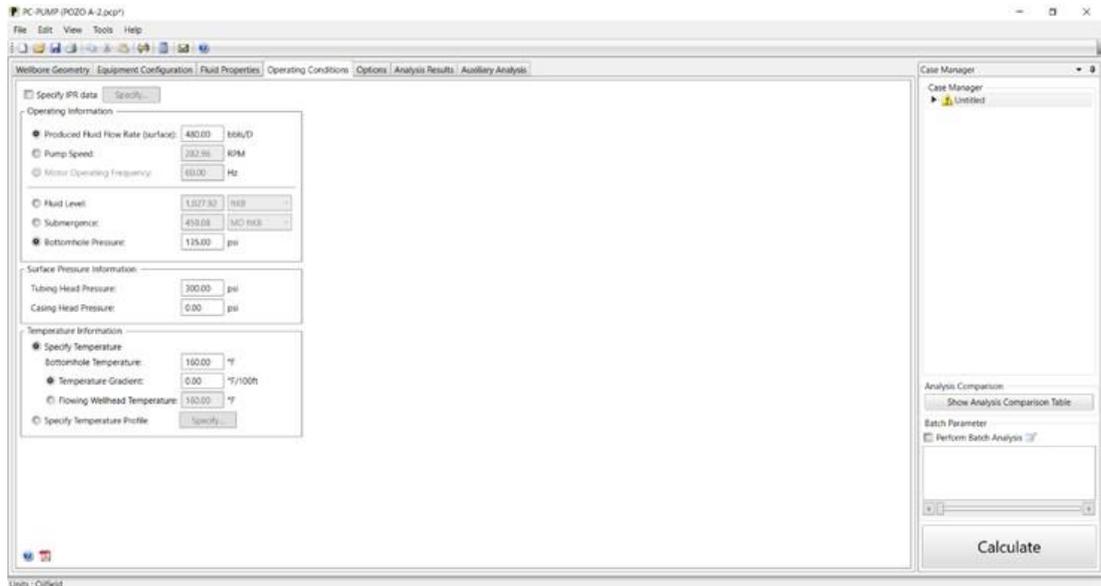
Fuente: Elaboración propia, Cfer PC-PUMP Software

- Se ingresó las propiedades de los fluidos como la gravedad API, la salinidad, el GOR, las propiedades térmicas del crudo y evaluar el crudo como multifásico.



Fuente: Elaboración propia, Cfer PC-PUMP Software

5. Se ingresó los datos operacionales de la bomba y se fijan las RPM con los que trabajara en campo.



Fuente: Elaboración propia, Cfer PC-PUMP Software

Al revisar los datos en el simulador PC-PUMP, indica que la producción promedio fluidos del pozo A-2 es de 480 BBL/DIA, pero sugiere que se tenga en cuenta las pérdidas de presión diferencial de 14 PSI que corresponde al escurrimiento de la bomba, es decir que el escurrimiento de la PCP metal-metal es equivalente a los 9 barriles por día, dando una producción neta de 471 barriles por día.

Figura 41. Resultados de Simulación del Pozo A-2

POZO A-2.pcp
Case: Untitled

Analysis Results - Summary

Input Parameters		Output Parameters	
Fluid Properties		Basic Parameters	
Fluid Type	Multi-phase	Pump Intake Pressure	115.83 psi
Oil API Gravity	11.40 °API	Pump Discharge Pressure	864.28 psi
Water Salinity	6000.00	Differential Pressure	748.45 psi
Gas Specific Gravity	0.64	Net Hydrostatic Head	434.44 psi
BS&W Content	63.00 %	Flow Losses	14.01 psi
Producing GOR	70.00 scf/STB	Pump Pressure Loading	51.60 % rated
Free Gas Separation	88.29	Pump Torque	217.56 ft-lbs
Operating Conditions		Pump Axial Load	1.63 kips
Surface Liquid Flow Rate (specified)	480.00 bbls/D	Maximum Rod Torque	240.63 ft-lbs
Pump Speed	282.96 RPM	Maximum Rod Torque Load	23.19 % Limit
Surface Motor Operation Frequency	18.86 Hz	Maximum Axial Rod Load	5.21 kips
Pump Volumetric Efficiency	90.00 %	Maximum Effective Rod Stress	27.69 %
Fluid Level	1027.92 ftKB	Rod Contact Loads	
Submergence (MD)	459.08 ftKB	Maximum Load Connection	85.92 lbf
Submergence (TVD)	316.38 ftKB	Surface Parameters	
Bottomhole Pressure (specified)	135.00 psi	System Input Power	1596.09 hp
Tubing Head Pressure	300.00 psi	Prime Mover Output Power	14.36 hp
Casing Head Pressure	0.00 psi	Energy Cost	142824.14 \$/day
Bottomhole Temperature	160.00 °F	Thrust Bearing L10 Life	8360.94 years
Temperature Gradient	0.00 °F/100ft	Drivehead Main Shaft Torque Loading	6.88 %
Flowing Wellhead Temperature	160.00 °F	Drivehead Structural Loading	N/A
Equipment		Drivehead Power Output	4.32 %
Drivehead	NOV (M-300)	Drivehead Speed Output	35.37 %
Belts	4.000:1	Drivehead Gearbox Torque	N/A
Electric Motor	100.0 hp (3600.0 RPM)	Surface Motor Loading	45.69 %
Pump	PCM (35E1000)	System Efficiency	
Pump Displacement	2.057 bbls/D/RPM	System Mechanical/Electrical Efficiency	0.46 %
Pump Pressure Rating	1450 psi	System Overall Efficiency	0.42 %
Pump Cavity Flow Index	9.21 ft/s per 629 bbls/D	Pump Volumetric Efficiency	90.00 %
Rod String	1.000 in, API D		

Fuente: Elaboración propia, Cfer PC-PUMP Software

Teniendo los datos del simulador, se realizó la comparación de los datos simulados y de los datos reales en campo para verificar las pérdidas de escurrimiento que se dan en el pozo A-2, con el fin de seguir implementado esta tecnología en otros pozos candidatos.

Cuadro 12. Comparación de los Datos Simulador y Reales en Campo del Pozo A-2

CUADRO COMPARTIVO DE LOS VALORES SIMULADOS Y REALES DEL POZO A-2				
PARÁMETRO	VALOR DE CAMPO	VALOR SIMULADO	DIFERENCIA	PORCENTAJE
Presión de succión (PSI)	112	116	4	4%
Presión de descarga (PSI)	848	865	17	2%
Consumo de energía (KW/H)	46	37	9	20%
Eficiencia de la bomba %	90	85	5	6%
Caudal de fluido (BBL/DÍA)	460	471	11	2%
Revoluciones de la bomba (RPM)	160	200	40	20%

4.2.1 Análisis del Resultado Simulado y los Datos Reales en Campo del Pozo A-2. Analizando las diferencias obtenidas en el Cuadro 12. Se observó que los datos en el simulador son mayores que los campos reales en campo ya que este software utiliza correlaciones más exactas para el cálculo de los valores, se reflejó un escurrimiento de 9 BBL/DÍA porque hubo una reducción en los parámetros como las revoluciones de la bomba a 140 RPM, para evitar la canalización del agua en la formación productora y el exceso de contenido de arena porque la formación productora es sometida a la inyección cíclica de vapor la cual debilita la matriz de la roca. Dado que el campo es productor de crudo pesado y el ajuste entre rotor y estator está a sobre medida se logra reducir los valores del escurrimiento de la bomba.

En el campo de estudio se realizó el análisis del escurrimiento de las bombas PCP metal-metal, y se determinó que al iniciar la operación de bombeo, los valores de escurrimiento de la bomba son altos, porque el crudo inicia a adherirse a la superficie del estator, rotor y a la sarta de bombeo. Después 2 horas de operación las pérdidas de escurriendo se reducen y se mantiene una producción constante como se muestra en los historiales de producción del pozo.

5. ANÁLISIS FINANCIERO

Siempre que se elabora un proyecto es necesario contar con un capital inicial de dinero para realizar la inversión, donde se adquirirán los recursos necesarios para poner en marcha este proyecto. Como todo proyecto, se estima que después de cierta cantidad de tiempo de haber realizado la inversión, el proyecto retorne el dinero invertido para justificar la inversión realizada inicialmente.

Cuando se va a realizar la inversión del capital inicial del proyecto se suele hacer un análisis económico o financiero del todo plan con diferentes criterios definidos por los expertos en economía, con el fin de hallar las alternativas más adecuadas con el propósito de obtener una rentabilidad fija o estable. En este proyecto se evaluaron 4 criterios que son la base fundamental para garantizar la rentabilidad y viabilidad de la propuesta.

Los criterios a evaluar detalladamente son los siguientes:

- Valor presente neto (VPN)
- Tasa interna de retorno (TIR)
- Pay Back
- Relación costo-beneficio

También se deben tener en cuenta que en Colombia para la generación de proyectos en el área de hidrocarburos se deben pagar unos impuestos adicionales que son las **regalías**, las cuales depende de que tan grande sea el proyecto y la generación de barriles de petróleo que pueda producir, según la Ley 141 del 1994.

5.1 INVERSIÓN INICIAL

La inversión inicial está definida como la suma de los costos de desarrollo, promoción y construcción del proyecto. Estos costos deben ser capitalizables en perspectiva. La inversión inicial se calcula totalizando todas las salidas y entradas que ocurran al momento que se está realizando el desembolso. Esta puede calcularse bajo dos escenarios, el primero donde el desarrollo físico del proyecto no existe, y el segundo donde éste si existe, pero será modificado.

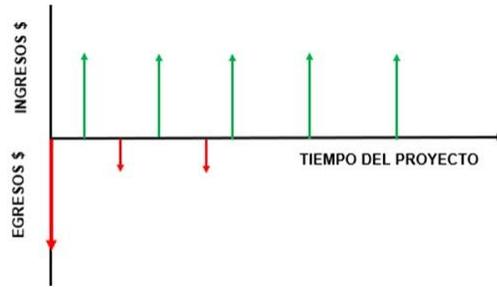
Para el proyecto de la implementación de la bomba PCP metal-metal en específico los gastos que se tendrán en cuenta para calcular la inversión inicial son:

- Costos por activos a adquirir
- Costos por instalación del equipo
- Costos de personal experto en instalación

5.2 FLUJO NETO DE EFECTIVO

Se define como las entradas y salidas del capital durante el tiempo de realización del proyecto, se representa gráficamente por medio de un plano de coordenadas cartesianas donde el eje horizontal representa el tiempo (Años, Trimestres, Meses, etc.) y perpendicularmente se marcan las líneas que indican los ingresos y egresos generados en el proyecto, estos ingresos en el proyecto son representados como la venta del petróleo generado y los egresos como la inversión inicial, regalías, costos de operación y mantenimientos entre otras, como se muestra en la siguiente gráfica.

Figura 42. Grafica del Flujo Neto Efectivo



Fuente: Elaboración propia

Mostrado lo anterior se puede expresar que flujo neto efectivo se puede expresar de la siguiente manera:

Ecuación 1. Flujo Neto Efectivo

$$\text{Flujo Neto Efectivo} = \text{Ingresos} - \text{Egresos} - \text{Impuestos}$$

5.3 REGALÍAS

El estado colombiano es el propietario del subsuelo y de sus recursos naturales no renovables según el artículo 332 de la constitución política, y de acuerdo con esto, la explotación de un recurso natural no renovable supone una contraprestación económica a favor del estado, que se llama regalía. El dinero recaudado por medio de estas regalías, cumplirá ciertas funciones económicas y para el desarrollo de la población de no solo los departamentos productores, sino los demás departamentos del país, los cuales también recibirán un porcentaje de estas; algunos usos de las

regalías son: la promoción de la minería, la preservación del medio ambiente, y la financiación de proyectos regionales de inversión¹³.

Las compañías petroleras entregan al Estado entre el 8% y el 25% del valor de la producción del petróleo crudo extraído directamente del pozo (en boca de pozo). Para la explotación de hidrocarburos pesados de una gravedad API igual o menor a 15 grados, las regalías serán del setenta y cinco por ciento (75%) de la regalía aplicada para hidrocarburos livianos y semilivianos.

Cuadro 13. Cálculos de Regalías por Producción de Hidrocarburos en Colombia

PORCENTAJES PARA EL CÁLCULO DE REGALÍAS POR HIDROCARBUROS EN COLOMBIA	
PRODUCCIÓN DIARIA PROMEDIO	PORCENTAJE
MENOR O IGUAL A 5 KBPD	8%
ENTRE 5 KBPD Y 125 KBPD	$X = 8 + (KBPD - 5 KBPD) * (0.10) \%$
ENTRE 125 KBPD Y 400 KBPD	0.2
ENTRE 400 KBPD Y 600 KBPD	$X = 20 + (KBPD - 400 KBPD) * (0.025) \%$
MAYOR A 600 KBPD	25%

Fuente: Modificado de la Ley 756 del 2002

5.4 INDICADORES FINANCIEROS

Los indicadores financieros son herramientas que se diseñan utilizando la información financiera de la empresa, y son necesarias para medir la estabilidad, la capacidad de endeudamiento, la capacidad de generar liquidez, los rendimientos y las utilidades de la entidad, a través de la interpretación de las cifras, de los

¹³ MARTINEZ CHÁVEZ, Jessica. Estudio de viabilidad técnica y financiera de la implementación del sistema de levantamiento artificial por cavidades progresivas tipo metal-metal en pozos de campos colombianos. Universidad Industrial de Santander.2013

resultados y de la información en general. Los indicadores financieros permiten el análisis de la realidad financiera, de manera individual, y facilitan la comparación de la misma con la competencia y con la entidad u organización que lidera el mercado¹⁴. Los indicadores a utilizar en este proyecto son:

5.4.1 Valor Presente Neto (VPN). Es el indicador más utilizado a nivel mundial para evaluar los proyectos de inversión a largo plazo. El valor presente neto permite determinar si la inversión puede incrementar o reducir el valor del proyecto, este cambio en el valor estimado puede ser positivo, negativo, o permanecer igual; si la tasa de interés fijada el VPN es positivo, es conveniente aceptar el proyecto, si este es negativo, no es una buena opción llevar a cabo el proyecto porque estaría generando pérdidas, cuando el VPN es cero, existe una incertidumbre entre aceptar o no el proyecto¹⁵.

Si $VPN > 0$ aceptar el proyecto

Si $VPN = 0$ indiferente adelantar o no la inversión

Si $VPN < 0$ rechazar el proyecto

El valor presente neto depende de las siguientes variables: La inversión inicial previa, las inversiones durante la operación, los flujos netos de efectivo, la tasa de interés y el tiempo de duración del proyecto.

Ecuación 2. Valor Presente Neto (VPN)

$$VPN = \sum_{n=0}^n \frac{\text{Flujo de Caja}}{(1+i)^n}$$

¹⁴ <https://actualicese.com/definicion-de-indicadores-financieros/>

¹⁵ MARTINEZ J, Op.Cit., 2013.

Donde:

n= Períodos de tiempo

i= Tasa de interés

5.4.2 Tasa Interna de Retorno (TIR). La tasa interna de retorno (TIR) es una tasa de rendimiento utilizada en el presupuesto de capital para medir y comparar la rentabilidad de las inversiones. También se conoce como la tasa de flujo de efectivo descontado de retorno. El término “interna” se refiere al hecho de que su cálculo no incorpora factores externos (por ejemplo, la tasa de interés o la inflación). En otras palabras, la tasa interna de retorno es una tasa de interés para la cual el VPN es cero.

Ecuación 3. Tasa Interna de Retorno (TIR)

$$0 = -Inversion Inicial + \sum_{n=0}^N \frac{Flujo de Caja}{(1 + i)^n}$$

Donde:

n= Períodos de tiempo

i= Tasa de interés

5.4.3. Tiempo de Recuperación de la Inversión (PAYBACK). El pay back da una idea aproximada del tiempo que tardará la compañía en recuperar la inversión inicial para determinado proyecto a través del flujo de caja neto. Puede estar expresado en semanas, meses y años.

Es un método muy útil cuando se realizan inversiones en situaciones de elevada incertidumbre o no se tiene claro el tiempo en que se va a poder recuperar la inversión. Así, proporciona información sobre el tiempo mínimo necesario para recuperar la inversión.

5.4.4. Payback Simple. Este método considera los flujos de efectivo sin tener en cuenta el valor del dinero en el tiempo, es decir se considera erróneamente que un dólar el día de hoy vale lo mismo que un dólar el día de mañana. Para que un proyecto sea aceptado, el Pay back simple debe ser menor a la vida económica del proyecto, esto asegurará que se recupere la inversión inicial antes de que se dé por terminado el mismo.

Ecuación 4. Payback Simple

$$\text{Payback Simple: } \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Flujo de caja anual}}$$

5.4.5. Payback Ajustado. Es el tiempo requerido para recuperar el valor presente de la inversión inicial del proyecto, utilizando los flujos de efectivo y teniendo en cuenta el valor del dinero en el tiempo. Se compara el valor presente de cada uno de los flujos de efectivo operativos netos con el valor presente de la inversión neta requerida, en otras palabras, todos los flujos en ciertos periodos de tiempo se llevan a valor presente neto y se calcula el payback en un mismo tiempo.

Ecuación 5. Payback Ajustado

$$\text{Payback Ajustado} = \frac{VP_{\text{Inversión Inicial}}}{VP_{\text{Flujo Efectivo Anual}}}$$

6. ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CAVIDADES PROGRESIVAS METAL-METAL

En la implementación del sistema de cavidades progresivas PCP metal-metal en el campo A, se reflejó un rendimiento óptimo de la tecnología ya que soluciono varios problemas operacionales en campo como la falla de estatores y los problemas arenamiento debido a tu alta resistencia a los agentes abrasivos, por lo cual se realizará el análisis financiero de este sistema con el fin de demostrar su viabilidad y la aplicabilidad en otros campos petroleros en Colombia.

Para realizar el análisis financiero de este proyecto, se tendrá en cuenta varios procedimientos como se presentan a continuación:

- **Estimación de ingresos netos:** Los proyectos en el área de hidrocarburos tienen éxito debido a la producción de hidrocarburos que este genere a lo largo del tiempo, pero estos deben tener en cuenta unos costos operacionales asociados a la extracción de crudo, como lo son el tratamiento, transporte y entre otros, los cuales se incluirán en el Lifting Cost y las regalías que estos generan, por lo cual los ingresos mensuales serán reflejados de la siguiente manera.

Ecuación 6. Cálculos para Ingresos del Proyecto

$$\text{Ingresos} = (\text{Producción Diaria (BPD)} * 30 \text{ días} * \text{Precio Barril}) - (\text{Regalías} + \text{Producción Diaria (BPD)} * \text{Lifting Cost})$$

- **Estimar egresos:** Los egresos corresponden a las inversiones iniciales y a cualesquiera costos asociado al lifting cost como: el servicio de espaciamento de la bomba, pulling y varillero.

- **Calcular indicadores económicos:** En este procedimiento se realizará el cálculo de cada uno de los indicadores financieros mostrados en el capítulo anterior como (valor presente neto, tasa interna de retorno y payback).
- **Selección del sistema económicamente viable:** Después de analizar los resultados obtenidos con los indicadores económicos se seleccionará el que sea más viable financieramente para la compañía.

6.1. ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DEL POZO A-1

El pozo A-1 tiene implementado el sistema de cavidades progresivas convencional, pero con el pasar de los años, el pozo ha reflejado un aumento en el contenido de H₂S el cual ha causado fallas como el endurecimiento del elastómero y el desgaste excesivo por los altos contenidos de arenas. Dado todos estos problemas se presentó la posibilidad de instalar el sistema de cavidades progresivas metal-metal, porque el elastómero presentaba problemas cada trimestre, y generaba altos egresos por las intervenciones de well services para realizar los servicios de varilleo y cambio de estator constantemente. En este caso se presentará dos escenarios: uno donde se deja implementado el sistema PCP convencional con los cambios frecuentes de estator y el otro escenario con la implementación de la tecnología metal-metal y realizar el análisis técnico-económico de cada uno de los escenarios.

6.1.1. Ingresos. Los ingresos son constantes cada mes, porque estos dependen de la producción de petróleo y para efectos en este proyecto, se considera que la producción es de 65 BOPD en el escenario con la PCP convencional y 75 BOPD en el escenario 2 con la PCP Metal-Metal.

Para calcular el ingreso total por producción de crudo se toma un valor actual de 62 USD/BBL el cual es el precio del barril Brent en el tiempo que se desarrolló la monografía, pero se debe tener en cuenta los costos por ajuste calidad del crudo que corresponde a 5 USD/BBL y los costos para transportar el crudo mediante oleoducto con un precio de 5 USD/BBL. Estos precios se ajustan para el escenario 1 y para el escenario 2. Dado que este pozo la producción es menor a los 5000 BOPD las regalías serán del 8%. En los siguientes Cuadros se muestran el resumen de los ingresos del escenario 1 y escenario 2.

Para determinar los ingresos netos por parte de la empresa operadora es necesario tener en cuenta los costos por inyección el cual corresponde a 4 USD/BBL que se tiene en cuenta para el cálculo de las ganancias totales.

Cuadro 14. Ajustes del precio de venta del crudo en el Campo A

ÍTEM	COSTO (USD/BBL)
Crudo Brent	62
Ajuste por calidad del crudo	5
Transporte	5
Precio de venta	52

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

Teniendo en cuenta el ajuste del crudo para la venta, se inicia a calcular la cantidad producida de petróleo por los dos sistemas de cavidades progresivas.

Cuadro 15. Ganancia de Crudo con la PCP en el Pozo A-1

GANANCIA CON PCP METAL-METAL	
PERIODO TRIMESTRAL	PRODUCCIÓN (BBL)
1	4376
2	6783

GANANCIA CON PCP METAL-METAL	
PERIODO TRIMESTRAL	PRODUCCIÓN (BBL)
3	6476
4	6859
TOTAL ANUAL	24494

GANANCIA CON PCP CONVENCIONAL	
PERIODO TRIMESTRAL	PRODUCCIÓN (BBL)
1	3500
2	4785
3	4795
4	5477
TOTAL ANUAL	18557

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

Teniendo en cuenta la ganancia de barriles de crudo debido a las dos tecnologías de la bomba PCP. Se calcula el volumen de regalías regido por la Ley 756 del 2002 del estado colombiano. Para el caso del Campo A corresponde el 8% por que el campo tiene una producción menor a los 5 KBPD como se muestra en la siguiente ecuación.

Ecuación 7. Calculo para el Volumen de Regalías para el Pozo A-1

$$\text{Volumen de Regalías (BBL)} = \text{Producción del Crudo} * 8\%$$

Teniendo en cuenta la producción de los trimestres del año y reemplazando en la ecuación 7 se obtiene.

$$\text{Volumen de Regalias (BBL)} = 24494 * 8\% = 1960 \text{ Barriles}$$

En el siguiente Cuadro se muestra el descuento por regalías. Según lo estipulado en la Ley 756 del 2002. Que corresponde a cada trimestre de producción del pozo A-1 con los dos tipos de bombas PCP.

Una vez calculado los barriles pertenecientes a las regalías se procede a descontarlo de la producción total del pozo para obtener la producción neta correspondiente a la empresa operadora. Como se muestra en la siguiente ecuación.

Ecuación 8. Cálculos de la Producción neta de Barriles para la Empresa Operadora.

$$\text{Producción Neta} = \text{Producción de Crudo (BBL)} - \text{Volumen de Regalias(BBL)}$$

La producción del pozo A-1 durante el primer año con la PCP metal-metal se calcula reemplazando los valores en la ecuación 8.

$$\text{Producción Neta} = 24494 \text{ BBL} - 1960 \text{ BBL} = 22534 \text{ BBL}$$

En el Cuadro 16 se muestran todos los pasos realizados para calcular la producción neta de cada tecnología implementada en el pozo A-1.

Cuadro 16. Producción Neta del Pozo A-1 del Sistema PCP Metal-Metal y Convencional Descontando Regalías

PRODUCCIÓN DE CRUDO NETA CON PCP METAL-METAL DESCONTANDO REGALÍAS			
PERIODO TRIMESTRAL	PRODUCCIÓN (BBL)	8% POR REGALÍAS (BBL)	PRODUCCIÓN NETA (BBL)
1	4376	350	4026
2	6783	543	6240
3	6476	518	5958
4	6859	549	6310
	TOTAL	1960	22534

PRODUCCIÓN DE CRUDO NETA CON PCP CONVENCIONAL DESCONTANDO REGALÍAS			
PERIODO TRIMESTRAL	PRODUCCIÓN (BBL)	8% POR REGALÍAS (BBL)	PRODUCCIÓN NETA (BBL)
1	3500	280	3220
2	4785	383	4402
3	4795	384	4411
4	5477	438	5039
	TOTAL	1485	17072

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

Teniendo la producción neta de los dos tipos de tecnología se calculan el total de los ingresos en dólares, tomado como referencia el precio del barril Brent a 52 USD según el ajuste del crudo realizado en el campo.

Ecuación 9. Cálculo para el Total de Ingresos en Dólares

$$Total\ de\ Ingresos\ (USD) = Producción\ Neta\ (BBL) * Precio\ del\ Barril\ Brent\ \left(\frac{USD}{BBL}\right)$$

$$Total\ de\ Ingresos\ (USD) = 22534\ BBL * 52\ \left(\frac{USD}{BBL}\right) = 1171768\ USD$$

En el Cuadro 17 se muestran los ingresos totales netos para los dos tipos de tecnología de la bomba.

Cuadro 17. Ingresos Totales por Producción de Crudo Descontando Regalías

INGRESOS TOTALES CON PCP METAL-METAL DESCANTANDO REGALÍAS			
PERIODO TRIMESTRAL	PRODUCCIÓN NETA (BBL)	PRECIO DEL BARRIL (USD)	INGRESOS (USD)
1	4026	52	209348
2	6240	52	324499
3	5958	52	309812
4	6310	52	328135
INGRESO TOTAL			1171793

INGRESOS TOTALES CON PCP CONVENCIONAL DESCANTANDO REGALÍAS			
PERIODO TRIMESTRAL	PRODUCCIÓN NETA (BBL)	PRECIO DEL BARRIL (USD)	INGRESOS (USD)
1	3220	52	167440
2	4402	52	228914
3	4411	52	229393
4	5039	52	262020
INGRESO TOTAL			887767

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

6.1.2. Egresos. El petróleo producido en el campo A, es de tipo pesado por lo cual hay que tener en cuenta los costos de Instalación del sistema, los costos por tratamiento y los costos por millón de BTU inyectado en cada pozo, para que estos sean vendidos en el mercado internacional, por ende, la empresa operadora ha fijado un costo de 12 USD/BBL que corresponde al lifting cost y 4 USD/MMBTU por cada millón de BTU inyectado en el pozo.

Posteriormente al calcular los ingresos netos de cada una de las tecnologías que se evalúan en la monografía, también se debe calcular el impuesto de renta sobre las ganancias obtenidas según los establecidos en el inciso primero del Artículo 240 del Estatuto Tributario, modificado por el Artículo 80 de la Ley 1943 del 28 de diciembre del 2018. La Tarifa general del impuesto de renta de las personas jurídicas para el año gravable del 2020 será del 32% como se muestra en la siguiente ecuación. Sin embargo, según la ley de financiamiento se verá una reducción gradual para los años 2021 y 2022 en los cuales se aplicará las tarifas del 31% y 30% respectivamente.

Ecuación 10. Cálculo para el Descuento de Renta de las Ganancias Netas del Pozo A-1

$$\text{Impuesto de Renta (USD)} = \text{Total de Ingreso Netos USD} * 32\%$$

$$\text{Impuesto de Renta (USD)} = 1171793 \text{ (USD)} * 32\%$$

$$\text{Impuesto de Renta (USD)} = 374974 \text{ USD}$$

En el Cuadro 18 se encuentra las ganancias netas totales con el descuento del impuesto de renta del 32% correspondiente al 2020.

Cuadro 18. Ingreso Total Neto de la Compañía Descontando el Impuesto del 32% Correspondiente al año 2020.

INGRESOS TOTALES CON PCP METAL-METAL DESCANTANDO IMPUESTO DE RENTA DEL 32% SEGÚN ESTATUTO TRIBUTARIO MODIFICADO POR EL ARTICULO 80 DE LA LEY 1943 DEL 2018				
PERIODO TRIMESTRAL	INGRESOS NETO (USD)	PORCENTAJE IMPUESTO DE RENTA (%)	IMPUESTO DEL 32% (USD)	INGRESO TOTAL PARA LA COMPAÑÍA (USD)
1	209348	32%	66991	142357
2	324499	32%	103840	220659
3	309812	32%	99140	210672
4	328135	32%	105003	223132
INGRESO TOTAL NETO			374974	796819

INGRESOS TOTALES CON PCP CONVENCIONAL DESCANTANDO IMPUESTO DE RENTA DEL 32% SEGÚN ESTATUTO TRIBUTARIO MODIFICADO POR EL ARTICULO 80 DE LA LEY 1943 DEL 2018				
PERIODO TRIMESTRAL	INGRESOS NETO (USD)	PORCENTAJE IMPUESTO DE RENTA (%)	IMPUESTO DEL 32% (USD)	INGRESO TOTAL PARA LA COMPAÑÍA (USD)
1	167440	32%	53581	113859
2	228914	32%	73253	155662
3	229393	32%	73406	155987
4	262020	32%	83846	178173
INGRESO TOTAL NETO			284085	603681

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

Como se muestra en el Cuadro anterior se procede calcular los egresos por el lifting cost del campo y los egresos por los millones de BTU inyectado en el pozo A-1.

Cuadro 19. Costos Asociados al Lifting Cost para el Pozo A-1

COSTOS DE OPERACIÓN METAL-METAL - LIFTING COST USD/BBL			
PERIODO (TRIMESTRE)	LIFTING COST (USD/BBL)	PRODUCCIÓN (BBL)	USD
1	12	4376	52512
2	12	6783	81396
3	12	6476	77712
4	12	6859	82308
		TOTAL	293928

COSTOS DE OPERACIÓN CONVENCIONAL - LIFTING COST USD/BBL			
PERIODO (TRIMESTRE)	LIFTING COST (USD/BBL)	PRODUCCIÓN (BBL)	USD
1	12	3500	42000
2	12	4785	57420
3	12	4795	57540
4	12	5477	65724
		TOTAL	222684

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

Cuadro 20. Costos Asociados a los MMBTU Inyectados al Pozo A-1

COSTOS DE OPERACIÓN METAL-METAL - VAPOR INYECTADO USD/MMBTU			
PERIODO (TRIMESTRE)	LIFTING COST (USD/BBL)	MMBTU INYECTADOS	USD
1	4	5129	20516
2	4	5389	21556
3	4	6865	27460
4	4	5438	21752
		TOTAL	91284

COSTOS DE OPERACIÓN CONVENCIONAL - VAPOR INYECTADO USD/MMBTU			
PERIODO (TRIMESTRE)	LIFTING COST (USD/BBL)	MMBTU INYECTADOS	USD
1	4	4925	19700
2	4	5090	20360
3	4	5101	20404
4	4	5189	20756
		TOTAL	81220

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

Teniendo los Ingresos netos totales de la empresa operadora y los egresos por tratamiento y millones de BTU inyectados en el pozo, se procede a realizar el cálculo de las ganancias obtenidas en el año 2020.

Cuadro 21. Flujo de Caja Neta de la Tecnología PCP Metal-Metal y PCP Convencional

FLUJO DE CAJA NETO DE LA EMPRESA OPERADORA CON PCP METAL-METAL					
TRIMESTRE	INGRESOS DEPUES DE LA RENTA (USD)	EGRESOS POR LIFTING COST (USD)	EGRESOS POR MMBTU INYECTADOS (USD)	TOTAL DE EGRESOS (USD)	FJUO NETO DE CAJA (USD)
1	142357	52512	20516	73028	69329
2	220659	81396	21556	102952	117707
3	210672	77712	27460	105172	105500
4	223132	82308	21752	104060	119072
				FLUJO TOTAL DE CAJA	411607

FLUJO DE CAJA NETO DE LA EMPRESA OPERADORA CON PCP CONVENCIONAL					
TRIMESTRE	INGRESOS DEPUES DE LA RENTA (USD)	EGRESOS POR LIFTING COST (USD)	EGRESOS POR MMBTU INYECTADOS (USD)	TOTAL DE EGRESOS (USD)	FJUO NETO DE CAJA (USD)
1	113859	42000	19700	61700	52159
2	155662	57420	20360	77780	77882
3	155987	57540	20404	77944	78043
4	178173	65724	20756	86480	91693
				FLUJO TOTAL DE CAJA	299777

FLUJO DE CAJA NETO DE LA EMPRESA OPERADORA					
TIPO DE TECNOLOGÍA	INGRESOS DEPUES DE LA RENTA (USD)	EGRESOS POR LIFTING COST (USD)	EGRESOS POR MMBTU INYECTADOS (USD)	TOTAL DE EGRESOS (USD)	FJUO NETO DE CAJA (USD)
PCP METAL-METAL	796819	293928	91284	385212	411607
PCP CONVENCIONAL	603681	222684	81220	303904	299777

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

En el Cuadro 22 se detallaron los costos de inversión inicial, el cual será utilizado para el cálculo de los indicadores financieros para determinar la viabilidad de esta tecnología en el pozo A-.

Cuadro 22. Costos de Inversión Inicial para la Tecnología PCP Metal-Metal y Convencional.

EQUIPO DE WELL SERVICES			
EQUIPO DE INSTALACIÓN	HORAS	PRECIO POR HORA	PRECIO DEL SERVICIO
JS4	45	350	15750
ENSAMBLE DE SUPERFICIE			
EQUIPO DE SUPERFICIE	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
ORYX SEAL HT 1 1/2" COMPLETE (Incluye Frame)	1	15000	15000
IBOP HT for 1" 1/2 Polished Rod	1	4400	4400

ENSAMBLE DE FONDO			
SARTA DE VARILLA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
Polished rod	1	280	280
Pony rod	6	40	240
Sucker Rod	8	60	480
Rod Guides	50	40	2000
Sinker Bar	48	200	9600
80V1000 - Rotor PCM VULCAIN 1 1/8" Pin	1	14000	14000
SARTA DE PRODUCCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
Tubing 3-1/2"	55	285	15675
X-over 3-1/2" x 4" y x-over 4" x 3-1/2"	2	148	296
Tubing pup joint 3-1/2"	1	95	95
80V1000 - Stator PCM VULCAIN 4" UN	1	35000	35000
Antivibration Sub 9" 5/8 - 3" 1/2	1	2500	2500
Stop Bushing 4" box x 3" 1/2 pin	1	280	280
End cap	1	150	150
Sloted tubing	2	250	500
Mule shoe	1	295	295
TOTAL			116541

EQUIPO DE WELL SERVICES			
EQUIPO WS	HORAS	PRECIO POR HORA (USD)	PRECIO DEL SERVICIO (USD)
JS4	38	350	13300
ENSAMBLE DE SUPERFICIE			
EQUIPO DE SUPERFICIE	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
BOP 3-1/2" OD, 3" ID 3" LP	1	3000	3000
Stufing Box HTP, 1-1/4" x 3" 8V Pin	1	300	300
Grapa Barra Lisa 1-1/4", 26000 lbs	1	244	244
PCP drive Head	1	15000	15000
Motor Electrico	1	4000	4000

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

ENSAMBLE DE FONDO			
SARTA DE VARILLA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
Polished rod	1	280	280
Pony rod	4	40	160
Sucker rod	8	60	480
Rod guides	33	40	1320
Sinker bar	48	200	9600
Rotor	1	8000	8100
SARTA DE PRODUCCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
Tubing 3-1/2"	55	285	15675
Estator	1	17000	17000
Seating nipple	1	328	328
Tubing beveled 3-1/2"	2	250	500
Antivibration Sub 9" 5/8 - 3" 1/2	1	2500	2500
Stop Bushing 4" box x 3" 1/2 pin	1	280	280
Mule shoe	1	295	295
TOTAL			92362

6.1.3. Cálculo de Indicadores Financieros. La empresa operadora establece una tasa de oportunidad del 11.25% efectiva anual, por facilidades del proyecto se trabajará a una tasa efectiva trimestral, a continuación, se muestra la conversión de la respectiva tasa:

- Tasa de interés de Oportunidad.

$$(1 + i)^n = (1 + i)^n$$

$$(1 + 0.1125)^1 = (1 + i)^4$$

$$(1 + 0.1125)^{1/4} = (1 + i)^{4/4}$$

$$i = 0.02701079$$

$$\mathbf{TIO\ trimestral = 2.70\ \%}$$

Teniendo en cuenta la tasa de oportunidad de la empresa operadora se procede a realizar el cálculo del valor presente neto para la bomba PCP metal-metal y para la PCP convencional tomando el precio del barril del crudo a 62 USD el barril por medio de la ecuación 2.

$$VPN = \sum_{n=0}^n \frac{\text{Flujo de Caja}}{(1 + i)^n}$$

$$VPN = -116541 + \sum_{n=0}^N \frac{69328}{(1 + 0.02701079)^1} + \frac{117707}{(1 + 0.02701079)^2} + \frac{105500}{(1 + 0.02701079)^3} + \frac{119071}{(1 + 0.02701079)^4}$$

$$\mathbf{VPN = 266975\ USD\ Para\ PCP\ Metal - Metal}$$

$$VPN = -116541 + \sum_{n=0}^N \frac{69328}{(1 + 0.02701079)^1} + \frac{117707}{(1 + 0.02701079)^2} + \frac{105500}{(1 + 0.02701079)^3} + \frac{119071}{(1 + 0.02701079)^4}$$

$$\mathbf{VPN = 187731\ USD\ Para\ PCP\ Convencional}$$

Después de haber el valor presente neto se procede a calcular la tasa interna de retorno (TIR) dado que es uno de los indicadores más utilizados para determinar la rentabilidad de un proyecto. Este se calcula al llevar el valor presente neto a cero. En caso que la TIR sea mayor al TIO el proyecto es rentable. Según la ecuación 3. Se procede a realizar el cálculo del TIR para la PCP metal-metal y la convencional.

$$0 = -116541 + \sum_{n=0}^N \frac{69328}{(1 + 0.02701079)^1} + \frac{117707}{(1 + 0.02701079)^2} \frac{105500}{(1 + 0.02701079)^3} + \frac{119071}{(1 + 0.02701079)^4}$$

TIR = 70.49% Para PCP Metal – Metal

$$0 = -92362 + \sum_{n=0}^N \frac{52159}{(1 + 0.02701079)^1} + \frac{77882}{(1 + 0.02701079)^2} \frac{78043}{(1 + 0.02701079)^3} + \frac{91693}{(1 + 0.02701079)^4}$$

TIR = 63% Para PCP Convencional

Cuando se calcula el TIR de cada una de la tecnología se procede a calcular la relación Beneficio costo (B/C) como se muestra en la siguiente ecuación, este indicador se evalúa teniendo en cuenta las siguientes consideraciones.

Ecuación 11. Calculo para la Relación Beneficio-Costo

$$B/C = \frac{\text{Ingresos totales netos}}{\text{Costos totales del proyecto}}$$

$$B/C = \frac{680278}{501753}$$

$$\frac{B}{C} = 1.36 \quad \text{Para la tecnología PCP Metal – Metal}$$

$$B/C = \frac{511319}{396266}$$

$$\frac{B}{C} = 1.29 \quad \text{Para la tecnología PCP Convencional}$$

Si $B/C > 1$, indica que el proyecto es rentable, ya que indica que los ingresos son mayores a los egresos

Si $B/C = 1$, es indiferente seleccionar esta propuesta o alguna otra, ya que los ingresos son iguales los egresos.

Si $B/C < 1$, indica que el proyecto no resulta rentable ya que los ingresos son menores que los egresos

Después de haber realizado el cálculo de los indicadores anteriores es necesario saber en cuanto tiempo se recupera la inversión realizada, por el cual es necesario calcular el Payback como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\text{Payback: } \frac{\text{Inversion Inicial}}{\text{Flujo de caja anual}}$$

$$\text{Payback: } \frac{116541}{411607.213}$$

$$\text{Payback: } 0.28313 \text{ Años} = 3.4 \text{ Meses} = 102 \text{ Días}$$

El tiempo de recuperación de la tecnología PCP metal-metal corresponde a 3.4 meses y a la tecnología convencional corresponden a 3.7 días. La diferencia entre las dos tecnologías para la recuperación del dinero es 9 días.

6.1.4. Resumen Financieros para el Pozo A-1. Según los procedimientos realizados anteriormente, se mostrará primero un Cuadro con todos los indicadores financieros calculas de la tecnología PCP metal-metal y convencional en un Cuadro, para analizar los resultados y seleccionar el sistema adecuadamente.

Cuadro 23. Resumen de los Indicadores Financieros de cada Tecnología en el Pozo A-1

INDICADORES ECONÓMICOS PARA EL POZO A-1					
ALS	VPN	TIR	RELACIÓN COSTO/BENEFICIO	PAYBACK (MESES)	PAYBACK (DIAS)
PCP METAL-METAL	266985	70.5%	1.36	3.40	102
PCP CONVENCIONAL	186731	63.0%	1.29	3.70	111

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

Para tener en cuenta varios escenarios con respecto al precio internacional del barril del petróleo en USD, se tomaron dos casos hipotéticos con el fin de tener un margen de aplicabilidad de cada tecnología, para esta hipótesis se plantearon los siguientes precios 62 USD, 52 USD Y 50 USD.

Cuadro 24. Indicadores Financieros Varios Precios Internacionales del Crudo

INDICADORES ECONÓMICOS PARA EL POZO A-1			
PRECIO DEL BARRIL BRENT (USD)	62	52	50
TIO	11.26%	11.26%	11.26%
TIR	70.50%	37.50%	30.30%
VPN (USD)	266985	124126	95554
PAYBACK (MESES)	3.4	5.41	6.14
PAYBACK (DIAS)	102	162	184
RELACIÓN COSTO/BENEFICIO	1.36	1.05	1.01

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

6.1.5. Selección del Sistema Económicamente Viable. Según los indicadores financieros obtenidos en el Cuadro 24. Los sistemas de levantamiento que se estudiaron para el pozo A-1, indican que ambas tecnologías son atractivas para la compañía, ya que sus tasas internas de retorno solo varían un 7.5% una de la otra. Pero teniendo en cuenta la tasa de oportunidad de la empresa operadora que es el de 11.25% anual, la mejor alternativa es el sistema de bombeo de cavidades progresivas metal-metal porque genera una mayor rentabilidad como en la producción adicional de hidrocarburos, la disminución de fallas operacionales como endurecimiento de estator, desgastes abrasivos por la cantidad de arena que produce el pozo y el payback de la tecnología se recupera en 3.4 meses (102 días) lo que lo hace más atractivo porque no genera costos adicionales de intervención por parte de well services. Otra ventaja adicional del sistema de levantamiento artificial PCP Metal-Metal, es que puede ser utilizada en pozos con inyección cíclica de vapor sin alterar o dañar sus componentes en la bomba. Cabe mencionar que esta bomba es ideal para el pozo A-1 cuando el precio internacional de barril esta 62 USD y el precio mínimo al cual se puede implementar esta tecnología es a 50 USD el barril, ya que a un precio menor generaría pérdidas para la empresa operadora y por ende se instalaría la PCP convencional la cual si puede operar a precios desde hasta 28 USD/barril para este pozo.

6.2. ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DEL POZO A-2

El pozo A-2 tiene implementado el sistema de cavidades progresivas convencional, pero con el pasar de los años, el pozo ha reflejado un aumento en el contenido de arenas, lo cual está generando un desgaste excesivo en los elastómeros del estator haciendo que su RunLife sea menor a un mes, teniendo en cuenta todos estos problemas operacionales se decidió implementar el sistema de cavidades progresivas PCP metal-metal, con el fin de darle solución a estos problemas

operacionales y reducir los costos de intervención por parte del equipo de well services, debido a que otros pozos presentan prioridades y esto genera una alta diferida para el departamento de producción de la empresa operadora.

6.2.1. Ingresos. Los ingresos son constantes cada mes, porque estos dependen de la producción de petróleo y para efectos en este proyecto, se considera que la producción es de 65 BOPD en el escenario con la PCP convencional y 85 BOPD en el escenario 2 con la PCP Metal-Metal. Para calcular el ingreso total por producción de crudo se toma un valor actual de 62 USD/BBL el cual es el precio del barril Brent en el tiempo que se desarrolló la monografía, pero se debe tener en cuenta los costos por ajuste calidad del crudo que corresponde a 5 USD/BBL y los costos para transportar el crudo mediante oleoducto con un precio de 5 USD/BBL. Estos precios se ajustan para el escenario 1 y para el escenario 2. Dado que este pozo la producción es menor a los 5000 BOPD las regalías serán del 8%. En los siguientes Cuadros se muestran el resumen de los ingresos del escenario 1 y escenario 2.

Para determinar los ingresos netos por parte de la empresa operadora es necesario tener en cuenta los costos por inyección el cual corresponde a 4 USD/BBL que se tiene en cuenta para el cálculo de las ganancias totales.

Cuadro 25. Ajustes del Precio de Venta del Crudo en el Campo A

ÍTEM	Costo (USD/BBL)
Crudo Brent	62
Ajuste por calidad del crudo	5
Transporte	5
Precio de venta	52

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

Cuadro 26. Ganancia de Crudo con la PCP en el Pozo A-2

GANANCIA CON PCP METAL-METAL	
PERIODO TRIMESTRAL	PRODUCCIÓN (BBL)
1	5233
2	7501
3	7729
4	7387
TOTAL ANUAL	27850

GANANCIA CON PCP CONVENCIONAL	
PERIODO TRIMESTRAL	PRODUCCIÓN (BBL)
1	3879
2	6034.5
3	6007.5
4	5967
TOTAL ANUAL	21888

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

Teniendo en cuenta la ganancia de barriles de crudo debido a las dos tecnologías de la bomba PCP. Se calcula el volumen de regalías regido por la Ley 756 del 2002 del estado colombiano. Para el caso del Campo A corresponde el 8% por que el campo tiene una producción menor a los 5 KBPD como se muestra en la siguiente ecuación.

Ecuación 12. Calculo para el Volumen de Regalías para el Pozo A-2

$$\text{Volumen de Regalías (BBL)} = \text{Producción del Crudo} * 8\%$$

Teniendo en cuenta la producción de los trimestres del año y reemplazando en la ecuación 7 se obtiene.

$$\text{Volumen de Regalías (BBL)} = 27850 * 8\% = 2228 \text{ Barriles}$$

En el siguiente Cuadro se muestra el descuento por regalías. Según lo estipulado en la Ley 756 del 2002. Que corresponde a cada trimestre de producción del pozo A-2 con los dos tipos de bombas PCP.

Una vez calculado los barriles pertenecientes a las regalías se procede a descontarlo de la producción total del pozo para obtener la producción neta correspondiente a la empresa operadora. Como se muestra en la siguiente ecuación.

Ecuación 13. Cálculos de la Producción neta de Barriles para la Empresa Operadora

$$\text{Producción Neta} = \text{Producción de Crudo (BBL)} - \text{Volumen de Regalías (BBL)}$$

La producción del pozo A-1 durante el primer año con la PCP metal-metal se calcula reemplazando los valores en la ecuación 8.

$$\text{Producción Neta} = 27850 \text{ BBL} - 2228 \text{ BBL} = 25622 \text{ BBL}$$

En el Cuadro 27 se muestran todos los pasos realizados para calcular la producción neta de cada tecnología implementada en el pozo A-1.

Cuadro 27. Producción Neta del Pozo A-2 del Sistema PCP Metal-Metal y Convencional Descontando Regalías

PRODUCCIÓN DE CRUDO NETA CON PCP METAL-METAL DESCONTANDO REGALIAS			
PERIODO TRIMESTRAL	PRODUCCIÓN (BBL)	8% POR REGALÍAS (BBL)	PRODUCCIÓN NETA (BBL)
1	5233	419	4814
2	7501	600	6901
3	7729	618	7111
4	7387	591	6796
	TOTAL	2228	25622

PRODUCCIÓN DE CRUDO NETA CON PCP CONVENCIONAL DESCONTANDO REGALIAS			
PERIODO TRIMESTRAL	PRODUCCIÓN (BBL)	8% POR REGALÍAS (BBL)	PRODUCCIÓN NETA (BBL)
1	3879	310	3569
2	6035	483	5552
3	6008	481	5527
4	5967	477	5490
	TOTAL	1751	20138

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

Teniendo la producción neta de los dos tipos de tecnología se calculan el total de los ingresos en dólares, tomado como referencia el precio del barril Brent a 52 USD según el ajuste del crudo realizado en el campo.

Ecuación 14. Cálculo para el Total de Ingresos en Dólares

$$Total\ de\ Ingresos\ (USD) = Producción\ Neta\ (BBL) * Precio\ del\ Barril\ Brent\ \left(\frac{USD}{BBL}\right)$$

$$Total\ de\ Ingresos\ (USD) = 25622\ BBL * 52\ \left(\frac{USD}{BBL}\right) = 1332344USD$$

En el Cuadro 28 se muestran los ingresos totales netos para los dos tipos de tecnología de la bomba.

Cuadro 28. Ingresos Totales por Producción de Crudo Descontando Regalías

INGRESOS TOTALES CON PCP METAL-METAL DESCANTANDO REGALIAS			
PERIODO TRIMESTRAL	PRODUCCIÓN NETA (BBL)	PRECIO DEL BARRIL (USD)	INGRESOS (USD)
1	4814	52	250347
2	6901	52	358848
3	7111	52	369755
4	6796	52	353394
INGRESO TOTAL			1332344

INGRESOS TOTALES CON PCP CONVENCIONAL DESCANTANDO REGALIAS			
PERIODO TRIMESTRAL	PRODUCCIÓN NETA (BBL)	PRECIO DEL BARRIL (USD)	INGRESOS (USD)
1	3569	52	185571
2	5552	52	288714
3	5527	52	287423
4	5490	52	285461
INGRESO TOTAL			1047170

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

6.2.2. Egresos. El petróleo producido en el campo A, es de tipo pesado por lo cual hay que tener en cuenta los costos de Instalación del sistema, los costos por tratamiento y los costos por millón de BTU inyectado en cada pozo, para que estos sean vendidos en el mercado internacional, por ende, la empresa operadora ha fijado un costo de 12 USD/BBL que corresponde al lifting cost y 4 USD/MMBTU por cada millón de BTU inyectado en el pozo.

Posteriormente al calcular los ingresos netos de cada una de las tecnologías que se evalúan en la monografía, también se debe calcular el impuesto de renta sobre las ganancias obtenidas según los establecidos en el inciso primero del Artículo 240 del Estatuto Tributario, modificado por el Artículo 80 de la Ley 1943 del 28 de diciembre del 2018. La Tarifa general del impuesto de renta de las personas jurídicas para el año gravable del 2020 será del 32% como se muestra en la siguiente ecuación. Sin embargo, según la ley de financiamiento se verá una reducción gradual para los años 2021 y 2022 en los cuales se aplicará las tarifas del 31% y 30% respectivamente.

Ecuación 15. Cálculo para el Descuento de Renta de las Ganancias Netas del Pozo A-2

$$\text{Impuesto de Renta (USD)} = \text{Total de Ingreso Netos USD} * 32\%$$

$$\text{Impuesto de Renta (USD)} = 1332344(\text{USD}) * 32\%$$

$$\text{Impuesto de Renta (USD)} = 426350 \text{ USD}$$

En el Cuadro 28 se encuentra las ganancias netas totales con el descuento del impuesto de renta del 32% correspondiente al 2020.

Cuadro 29. Ingreso Total Neto de la Compañía Descontando el Impuesto del 32% Correspondiente al Año 2020.

INGRESOS TOTALES CON PCP METAL-METAL DESCONTANDO IMPUESTO DE RENTA DEL 32% SEGÚN ESTATUTO TRIBUTARIO MODIFICADO POR EL ARTICULO 80 DE LA LEY 1943 DEL 2018				
PERIODO TRIMESTRAL	INGRESOS NETO (USD)	PORCENTAJE IMPUESTO DE RENTA (%)	IMPUESTO DEL 32% (USD)	INGRESO TOTAL PARA LA COMPAÑÍA (USD)
1	250347	32%	80111	170236
2	358848	32%	114831	244017
3	369755	32%	118322	251434
4	353394	32%	113086	240308
INGRESO TOTAL			426350	905994

INGRESOS TOTALES CON PCP CONVENCIONAL DESCONTANDO IMPUESTO DE RENTA DEL 32% SEGÚN ESTATUTO TRIBUTARIO MODIFICADO POR EL ARTICULO 80 DE LA LEY 1943 DEL 2018				
PERIODO TRIMESTRAL	INGRESOS NETO (USD)	PORCENTAJE IMPUESTO DE RENTA (%)	IMPUESTO DEL 32% (USD)	INGRESO TOTAL PARA LA COMPAÑÍA (USD)
1	185571	32%	59383	126189
2	288714	32%	92389	196326
3	287423	32%	91975	195447
4	285461	32%	91348	194114
INGRESO TOTAL			335094	712075

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

Como se muestra en el Cuadro anterior se procede a calcular los egresos por el lifting cost del campo y los egresos por los millones de BTU inyectado en el pozo A-1.

Cuadro 30. Costos Asociados al Lifting Cost para el Pozo A-2

COSTOS DE OPERACIÓN METAL-METAL - LIFTING COST USD/BBL			
PERIODO (TRIMESTRE)	LIFTING COST (USD/BBL)	PRODUCCIÓN (BBL)	USD
1	12	5233	62796
2	12	7501	90012
3	12	7729	92748
4	12	7387	88644
TOTAL			334200

COSTOS DE OPERACIÓN CONVENCIONAL - LIFTING COST USD/BBL			
PERIODO (TRIMESTRE)	LIFTING COST (USD/BBL)	PRODUCCIÓN (BBL)	USD
1	12	3879	46548
2	12	6035	72420
3	12	6008	72096
4	12	5967	71604
TOTAL			262668

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

Cuadro 31. Costos Asociados a los MMBTU Inyectados al Pozo A-2

COSTOS DE OPERACIÓN METAL-METAL - VAPOR INYECTADO USD/MMBTU			
PERIODO (TRIMESTRE)	LIFTING COST (USD/BBL)	MMBTU INYECTADOS	USD
1	4	5129	20516
2	4	5389	21556
3	4	6865	27460
4	4	5438	21752
TOTAL			91284

COSTOS DE OPERACIÓN CONVENCIONAL - VAPOR INYECTADO USD/MMBTU			
PERIODO (TRIMESTRE)	LIFTING COST (USD/BBL)	MMBTU INYECTADOS	USD
1	4	4925	19700
2	4	5090	20360
3	4	5101	20404
4	4	5189	20756
TOTAL			81220

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

Teniendo los costos totales por el lifting cost se realiza la cantidad neta producida de petróleo para poder realizar los indicadores financieros del proyecto para verificar la viabilidad del proyecto

Cuadro 32. Flujo de Caja Neta de la Tecnología PCP Metal-Metal y PCP Convencional

FLUJO DE CAJA NETO DE LA EMPRESA OPERADORA CON PCP METAL-METAL					
TRIMESTRE	INGRESOS DEPUES DE LA RENTA (USD)	EGRESOS POR LIFTING COST (USD)	EGRESOS POR MMBTU INYECTADOS (USD)	TOTAL DE EGRESOS (USD)	FJUO NETO DE CAJA (USD)
1	170236	62796	20516	83312	86924
2	244017	90012	21556	111568	132449
3	251434	92748	27460	120208	131226
4	240308	88644	21752	110396	129912
				FLUJO TOTAL DE CAJA	480510

FLUJO DE CAJA NETO DE LA EMPRESA OPERADORA CON PCP CONVENCIONAL					
TRIMESTRE	INGRESOS DEPUES DE LA RENTA (USD)	EGRESOS POR LIFTING COST (USD)	EGRESOS POR MMBTU INYECTADOS (USD)	TOTAL DE EGRESOS (USD)	FJUO NETO DE CAJA (USD)
1	126189	46548	19700	66248	59941
2	196326	72420	20360	92780	103546
3	195447	72096	20404	92500	102947
4	194114	71604	20756	92360	101754
				FLUJO TOTAL DE CAJA	368187

FLUJO DE CAJA NETO DE LA EMPRESA OPERADORA					
TIPO DE TECNOLOGÍA	INGRESOS DEPUES DE LA RENTA (USD)	EGRESOS POR LIFTING COST (USD)	EGRESOS POR MMBTU INYECTADOS (USD)	TOTAL DE EGRESOS (USD)	FJUO NETO DE CAJA (USD)
PCP METAL-METAL	905994	334200	91284	425484	480510
PCP CONVENCIONAL	712075	262668	81220	343888	368187

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

También se determinaron los costos de inversión inicial, el cual será utilizado para el cálculo de los indicadores financieros para determinar la viabilidad de esta tecnología en el pozo A-2

Cuadro 33. Costos de Inversión Inicial de las Bombas PCP Metal-Metal y Convencional del Pozo A-2

EQUIPO DE WELL SERVICES			
EQUIPO DE INSTALACIÓN	HORAS	PRECIO POR HORA	PRECIO DEL SERVICIO
JS4	43	350	15050
ENSAMBLE DE SUPERFICIE			
EQUIPO DE SUPERFICIE	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
ORYX SEAL HT 1 1/2" COMPLETE (Incluye Frame)	1	15000	15000
IBOP HT for 1" 1/2 Polished Rod	1	4400	4400

ENSAMBLE DE FONDO			
SARTA DE VARILLA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
Polished rod	1	280	280
Pony rod	5	40	200
Sucker Rod	8	60	480
Rod Guides	52	40	2080
Sinker Bar	50	200	10000
80V1000 - Rotor PCM VULCAIN 1 1/8" Pin	1	14000	14000
SARTA DE PRODUCCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
Tubing 3-1/2"	58	285	16530
X-over 3-1/2" x 4" y x-over 4" x 3-1/2"	2	148	296
Tubing pup joint 3-1/2"	1	95	95
80V1000 - Stator PCM VULCAIN 4" UN	1	35000	35000
Antivibration Sub 9" 5/8 - 3" 1/2	1	2500	2500
Stop Bushing 4" box x 3" 1/2 pin	1	280	280
End cap	1	150	150
Sloted tubing	2	250	500
Mule shoe	1	295	295
TOTAL			117316

EQUIPO DE WELL SERVICES			
EQUIPO WS	HORAS	PRECIO POR HORA (USD)	PRECIO DEL SERVICIO (USD)
JS4	35	350	12250
ENSAMBLE DE SUPERFICIE			
EQUIPO DE SUPERFICIE	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
BOP 3-1/2" OD, 3" ID 3" LP	1	3000	3000
Sttufing Box HTP, 1-1/4" x 3" 8V Pin	1	300	300
Grapa Barra Lisa 1-1/4", 26000 lbs	1	244	244
PCP drive Head	1	15000	15000
Motor Eléctrico	1	4000	4000

ENSAMBLE DE FONDO			
SARTA DE VARILLA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL (USD)
Polished rod	1	280	280
Pony rod	6	40	240
Sucker rod	8	60	480
Rod guides	29	40	1160
Sinker bar	50	200	10000
Rotor	1	8000	8100
SARTA DE PRODUCCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
Tubing 3-1/2"	53	285	15105
Estator	1	17000	17000
Seating nipple	1	328	328
Tubing beveled 3-1/2"	2	250	500
Antivibration Sub 9" 5/8 - 3" 1/2	1	2500	2500
Stop Bushing 4" box x 3" 1/2 pin	1	280	280
Mule shoe	1	295	295
TOTAL			91062

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

6.2.3. Cálculos De Indicadores Financieros. La empresa operadora establece una tasa de oportunidad del 11.25% efectiva anual, por facilidades del proyecto se trabajará a una tasa efectiva trimestral, a continuación, se muestra la conversión de la respectiva tasa:

- Tasa de interés de Oportunidad.

$$(1 + i)^n = (1 + i)^n$$

$$(1 + 0.1125)^1 = (1 + i)^4$$

$$(1 + 0.1125)^{1/4} = (1 + i)^{4/4}$$

$$i = 0.02701079$$

TIO trimestral = 2.70 %

Teniendo en cuenta la tasa de oportunidad de la empresa operadora se procede a realizar el cálculo del valor presente neto para la bomba PCP metal-metal y para la PCP convencional tomando el precio del barril del crudo a 62 USD el barril por medio de la ecuación 2.

$$VPN = \sum_{n=0}^n \frac{\text{Flujo de Caja}}{(1 + i)^n}$$

$$VPN = -117316 + \sum_{n=0}^N \frac{86924}{(1 + 0.02701079)^1} + \frac{132449}{(1 + 0.02701079)^2} + \frac{131226}{(1 + 0.02701079)^3} + \frac{129912}{(1 + 0.02701079)^4}$$

VPN = 330811 USD Para PCP Metal – Metal

$$VPN = -116541 + \sum_{n=0}^N \frac{59941}{(1 + 0.02701079)^1} + \frac{103546}{(1 + 0.02701079)^2} + \frac{102947}{(1 + 0.02701079)^3} + \frac{101754}{(1 + 0.02701079)^4}$$

VPN = 251973 USD Para PCP Convencional

Después de haber el valor presente neto se procede a calcular la tasa interna de retorno (TIR) dado que es uno de los indicadores más utilizados para determinar la rentabilidad de un proyecto. Este se calcula al llevar el valor presente neto a cero. En caso que la TIR sea mayor al TIO el proyecto es rentable. Según la ecuación 3. Se procede a realizar el cálculo del TIR para la PCP metal-metal y la convencional.

$$0 = -117316 + \sum_{n=0}^N \frac{86924}{(1 + 0.02701079)^1} + \frac{132449}{(1 + 0.02701079)^2} + \frac{131226}{(1 + 0.02701079)^3} + \frac{129912}{(1 + 0.02701079)^4}$$

TIR = 85.15% Para PCP Metal – Metal

$$0 = -116541 + \sum_{n=0}^N \frac{59941}{(1 + 0.02701079)^1} + \frac{103546}{(1 + 0.02701079)^2} + \frac{102947}{(1 + 0.02701079)^3} + \frac{101754}{(1 + 0.02701079)^4}$$

TIR = 81.49% Para PCP Convencional

Cuando se calcula el TIR de cada una de la tecnología se procede a calcular la relación Beneficio costo (B/C) como se muestra en la siguiente ecuación, este indicador se evalúa teniendo en cuenta las siguientes consideraciones.

Ecuación 16. Calculo para la Relación Beneficio-Costo

$$B/C = \frac{\text{Ingresos totales netos}}{\text{Costos totales del proyecto}}$$

$$B/C = \frac{788678}{542800}$$

$$\frac{B}{C} = 1.45 \quad \text{Para la tecnología PCP Metal – Metal}$$

$$B/C = \frac{621013}{434950}$$

$$\frac{B}{C} = 1.43 \quad \text{Para la tecnología PCP Convencional}$$

Si $B/C > 1$, indica que el proyecto es rentable, ya que indica que los ingresos son mayores a los egresos

Si $B/C = 1$, es indiferente seleccionar esta propuesta o alguna otra, ya que los ingresos son iguales los egresos.

Si $B/C < 1$, indica que el proyecto no resulta rentable ya que los ingresos son menores que los egresos

Después de haber realizado el cálculo de los indicadores anteriores es necesario saber en cuanto tiempo se recupera la inversión realizada, por el cual es necesario calcular el Payback como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\text{Payback: } \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Flujo de caja anual}}$$

$$\text{Payback: } \frac{91062}{368187}$$

$$\text{Payback: } 0.247 \text{ Años} = 2.97 \text{ Meses} = 89 \text{ Días}$$

El tiempo de recuperación de la tecnología PCP metal-metal corresponde a 3.4 meses y a la tecnología convencional corresponden a 3.7 días. La diferencia entre las dos tecnologías para recuperación del dinero es de un día.

6.2.4. Resumen Financiero para el Pozo A-2. Según los procedimientos realizados anteriormente, se mostrará primero un Cuadro con todos los indicadores financieros calculados de la tecnología PCP metal-metal y convencional en un Cuadro, para analizar los resultados y seleccionar el sistema adecuadamente.

Cuadro 34. Resumen de los Indicadores Financieros de cada Tecnología en el Pozo A-2

INDICADORES ECONÓMICOS PARA EL POZO A-1					
ALS	VPN	TIR	RELACIÓN COSTO/BENEFICIO	PAYBACK (MESES)	PAYBACK (DIAS)
PCP METAL-METAL	330811	85.10%	1.45	2.93	88
PCP CONVENCIONAL	251973	81.50%	1.43	2.97	89

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

Para tener en cuenta varios escenarios con respecto al precio internacional del barril del petróleo en USD, se tomaron dos casos hipotéticos con el fin de tener un margen de aplicabilidad de cada tecnología, para esta hipótesis se plantearon los siguientes precios 62 USD, 52 USD Y 50 USD.

Cuadro 35. Indicadores Financieros Varios Precios Internacionales del Crudo

INDICADORES ECONÓMICOS PARA EL POZO A-2			
PRECIO DEL BARRIL (USD)	62	52	50
TIO	11.26%	11.26%	11.26%
TIR	85.10%	48.77%	36.77%
VPN	330811	168268	119504
PAYBACK (MESES)	2.93	4.60	5.54
PAYBACK (DIAS)	88	138	166
RELACIÓN COSTO/BENEFICIO	1.45	1.13	1.04

Fuente: Mansarovar Energy Colombia Ltda.

6.2.5. Selección del Sistema Económicamente Viable. Según los indicadores financieros obtenidos en el Cuadro 34. Los sistemas de levantamiento que se estudiaron para el pozo A-2, indican que ambas tecnologías son atractivas para la compañía, pero se destaca mejor la PCP convencional porque esta reduce los precios por intervención, manteamientos o cambios en algunos de sus componentes, dado a que estas bombas son más comerciales y en el campo se encuentran varias en backup dado caso alguna falle. Pero se debe tener en cuenta que si el pozo llegase a presentar problemas por gases corrosivos y las altas temperaturas en el yacimiento sería mejor implementar la bomba PCP metal-metal ya que ahorraría los problemas mencionados anteriormente y su runlife sería mayor a la de una convencional.

Cabe mencionar que la tecnología PCP metal-metal tiene viabilidad en el pozo A-2 solo si el precio internacional de petróleo se encuentre por encima de los 50 USD por barril, ya que una cifra menor a esta, no sería económicamente viable y generaría pérdidas financieras para la compañía.

7. CONCLUSIONES

- Los indicadores financieros demostraron que las bombas PCP metal-metal implementadas en los pozos A-1 y A-2 generaron altos rendimientos económicos cuando el precio internacional de barril de petróleo se cotiza a un valor superior de 62 USD porque sus tasas internas de retorno son mayores al 70% y su relación beneficio-costos es mayor al 1.4 para los dos casos mencionados, recuperando la inversión del proyecto en menos de 120 días.
- El análisis financiero realizado demostró que la tecnología PCP metal-metal no es económicamente viable para el campo A cuando el precio internacional del petróleo se cotiza a un valor inferior de 50 USD por barril, teniendo en cuenta que el crudo que produce el campo es de tipo pesado y los costos para el tratamiento y transporte impiden que se generen mayores utilidades para la empresa operadora.
- Dentro del análisis expuesto, es posible vislumbrar que la bomba PCP metal-metal es una tecnología ideal en aquellos pozos donde la temperatura de yacimiento y de operación es mayor a los 350 °F; también en aquellos pozos donde se presenten altos índices de fallas como desgarramiento, abrasión, descompresión explosiva del elastómero, producción excesiva de gases corrosivos como el H₂S y el CO₂ para poder justificar los altos costos de instalación y mantenimiento de esta tecnología.

8. RECOMENDACIONES

- Se sugiere continuar con un estudio de factibilidad de la tecnología PCP metal-metal en un campo que produzca crudo mediano, crudo liviano y estimar el precio mínimo de barril al cual puede operar esa tecnología.
- Se considera realizar un análisis económico comparando la tecnología PCP metal-metal con el sistema de bombeo mecánico, ya que este último puede soportar altas temperaturas de yacimiento y de operación.
- Se sugiere continuar con un estudio de factibilidad de la tecnología PCP metal-metal, analizando el comportamiento de la bomba teniendo en cuenta el número de etapas y la profundidad de asentamiento de la bomba.
- Se sugiere realizar un análisis financiero de la tecnología PCP metal-metal considerando la implementación de varilla continua en pozos verticales y compararlos con los índices de fallas por varillas con el sistema PCP convencional.

BIBLIOGRAFIA

ARYSTANBAY, Rustem; BAE, Wisup; NGUYEN, Huy X.; RYOU, Sangsoo; LEE, Wonkyu & JANG, Taeheon. Successful Application of Metal PCP Rechnology to Maximize Oil Recovery in SAGD Process. SPE 149944. 2011. Korean National Oil Corporation Branch. Disponible en OnePetro.

BEAUQUIN, J. L. *et al.* SPE 97796. Development Status of a Metal Progressing Cavity Pumps for Heavy Oil and Hot Production Wells. En: International thermal operation and heavy oil symposium (November 1 – November 3, 2005, Calgary, Alberta, Canada). Editorial Committees of the Society of Petroleum Engineers and PS-CIM/CHOA. 2005.

BINGCHANG, W. The Special Successful PCP Applications in Heavy Oilfield. SPE 136817. Alberta, Canadá, 2010.

BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESIVAS. Componentes del sistema, Programa de entrenamiento en BCP; Modulo 1, Weatherford.

BRICEÑO, S. GRANADO, E. RODRÍGUEZ, E. Uso de bombas de cavidad progresiva metal-metal en operaciones de vapor. Venezuela, 2016.

BROCHURE VULCAIN, Artificial lift for enhanced oil recovery, PCM (Keep it moving) [en línea]. Disponible en: <https://www.pcm.eu/es/petroleo-y-gas/soluciones-pcm/extraccion-artificial-productos/bombas-de-perforacion/bombas-de-cavidad-progresiva-para-petroleo-vulcain>.

CARRILLO LUCIANI, Jesús Arturo. Diseño de una metodología en la determinación de una familia de criterios para la selección de sistemas de levantamiento artificial, Trabajo especial de grado, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, 2010.

CHACIN, Nelvy. Bombeo de Cavidades Progresivas: Operaciones, diagnóstico, análisis de falla y trouble shooting. Workshop. 2003.

ENYOUNG, Luo. Producing Heavy Oil by Thermal Progressive Cavity Pump in Steam Stimulation Process. SPE 122596. 2009. Liaohe Oilfield, CNPC. Disponible en OnePetro.

GUISE, Geoffroy; CROTTE Gregoire; LEHMAN, Matthieu; LIMOGES, Bastien & ROBERT, Benjamín. Field Performance and Technology Update of All Metal Progressing Cavity Pumps Deployed in Thermal Processes. SPE-184175-MS. 2016. PCM Europe and PCM Muscat LLC. Disponible en OnePetro.

HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas. Versión 2008 v1 Oil production consulting and training. 2008

MANSAROVAR ENERGY COLOMBIA LTDA. 2017. Asociación Nare. [en línea]. Disponible en: <http://www.mansarovar.com.co/nuestra-compania/nuestros-activos>.

MATUS, E & MAMORA, D. Top-Injection and Bottom-Production (Tinbop) Cyclic Steam-Injection Method Enhances Oil Recovery. SPE/PS-CIM/CHOA 97850. Disponible en OnePetro.

MORAO MALAVÉ, René Gregorio. Evaluación técnico-económica de la implementación de las bombas de cavidades progresivas metal-metal en los pozos someros del Campo Orocual. Universidad de Oriente, Barcelona, 2011.

NIND, T.E.W; Fundamentos de Producción y Mantenimiento de Pozos Petroleros, Editorial Limusa; Ontario, Canadá, 1987.

NOONAN, S. G., *et al.* SPE117493. Quest to Validate Undefined Performance for the High Volume Metallic Stator PCP at 250°C. En: International thermo operations and heavy oil symposium (20 October – 23 October Calgary, Alberta, Canada). Editorial Committees of the Society of Petroleum Engineers. 2008.

ORJUELA PAVA, Andrés Felipe. Evaluación técnica y financiera del desempeño del sistema de levantamiento artificial bombeo por cavidades progresivas metal- metal para la producción de crudo pesado en el campo abarco. Programa de ingeniería de petróleos, Fundación universidad de américa, 2017.

PALADINO, E. LIMA, J. ALMEIDA, R. SPE 114110. Computational Modeling of the Three-Dimensional flow in a Metallic Stator Progressing Cavity Pump. Committees of the Society of Petroleum Engineers Houston, Texas, 2008.

SHOUJUN, Zhang; LIGUO, Zhong; FUJUN, Song; BAOSHAN, Lang; FEI, Wu &

YOUNG, Eduardo. Elastómeros: Comportamiento con la Temperatura y Agentes Agresivos. 2002.

ANEXOS

ANEXO A. Procedimiento de Instalación de Bombas PCP

	PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP	Código: HSE-PRC-07-CO
		Fecha: 01/09/2013
		Versión: 1

1. OBJETIVO

Establecer un paso a paso de cómo se debe realizar la instalación de una bomba PCP teniendo en cuenta criterios de seguridad y ambiente.

2. ALCANCE

Este procedimiento aplica al personal directo y contratista que se involucre en la instalación de la bomba PCP.

3. RESPONSABLE

Es responsabilidad del Ing. Campo seguir los pasos aquí establecidos y verificar que el personal técnico o que tenga a cargo y que se involucre en la instalación de la bomba PCP siga estas instrucciones.

4. PELIGROS

- Mecánico por atrapamientos durante la instalación.
- Mecánico por machucones y cortaduras con herramientas manuales.
- Biomecánico por posturas prolongadas y movimientos repetitivos.
- Proyección de partículas.

5. PROCEDIMIENTO

Se recomienda tener en cuenta los siguientes pasos antes de instalar un sistema de bombas PCP.

1. Preparación del pozo:

El propósito de este procedimiento es describir la instalación de un sistema de levantamiento artificial PCP. Deben seguirse todos los procedimientos de la empresa operadora relativos al control del pozo y barreras de seguridad (para garantizar que el pozo esté controlado o muerto y sea seguro trabajar en él).

Remueva los sólidos tales como la arena o los finos de carbón del fondo del pozo antes de instalar un sistema PCP para permitir que la bomba llegue a la profundidad objetivo y que los sólidos del fondo del pozo no interfieran con la instalación o arranque.

Verifique que los fluidos dejados en el pozo por trabajos previos no afecten a los recubrimientos del estator o del rotor. Si los fluidos tienen el potencial de dañar de manera significativa la bomba, estos deberán ser eliminados o bien diluidos antes de instalar la bomba.

2. Verificaciones previas a la instalación:

Verifique que la PCP y sus accesorios en sitio concuerden con la documentación suministrada. Inspeccione todos los componentes para garantizar que se eliminen



PCM Colombia S.A.S - NIT. 900.555.433 - 2
Calle 104 # 14 A - 45 Oficina 302 - Bogotá
Tel. 702 0770 - www.pcm.eu

	PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP	Código: HSE-PRC-07-CO
		Fecha: 01/09/2013
		Versión: 1

Lista de comprobación de herramientas de instalación

Herramientas de instalación de la tubería:

- Elevador de tubos
- Llaves hidráulicas
- Controlador para verificar la ID del tubo



Herramienta estándar para la instalación de la sarta de cabillas o varillas:



- Llave hidráulica de cabillas o varillas: Diseñada específicamente para montar y desmontar conexiones de cabillas o varillas, es segura y fácil de usar.



- Grapa (clamp) antigiro, para asegurar la barra pulida.



- Placa C: Esta placa de base soporta la grapa de barra pulida y sostiene el peso de la sarta de cabillas.



- Bala o protector de barra pulida: Protege la rosca de la barra pulida y el sistema de sello cuando la barra pulida atraviesa el cabezal de rotación.



- Limpiador de rosca de la varilla de succión



- Gancho de varillas



- Elevadores de varillas de succión (x2)

- Eslingas (no incluidas en el volumen de suministro de PCM)
- Cuñas (no incluidos en el volumen de suministro de PCM)
- Orejetas de izado (no incluidas en el volumen de suministro de PCM)

Quando se utilicen cabillas/varillas continuas (no incluido en el suministro de PCM):

- Una unidad para correr la cabilla/varilla dentro del hoyo.
- Una herramienta para cortar la cabilla/varilla
- Una unidad de soldadura para soldar los extremos de las varillas

PCM Colombia S.A.S - Nit. 900.555.433 - 2
Calle 104 # 14 A - 45 Oficina 302 - Bogotá
Tel. 702 0770 - www.pcm.eu

	PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP	Código: HSE-PRC-07-CO
		Fecha: 01/09/2013
		Versión: 1

todos los embalajes y dispositivos de protección y que el equipo no sufra desperfectos.

Verifique que todos los equipos auxiliares combinen correctamente con el sistema PCP y el pozo y que se siga cualquier procedimiento especial de instalación para dichos equipos.

Garantice que todas las operaciones de servicio del pozo, el personal y el equipo cumplan los estándares y procedimientos documentados de seguridad, higiene y ambiente y de la empresa operadora, así como también las normativas y políticas locales.

Garantice que el equipo de servicio de pozo en sitio esté adaptado para realizar las conexiones requeridas de los componentes del estator, la tubería de producción, el rotor y la sarta de cabillas.

Garantice que todo el equipo de elevación y manejo en sitio esté adecuado para manejar las longitudes y soportar los pesos de la bomba y sus accesorios sin que sufran daños.

Es de la mayor importancia que la unidad de extracción esté en buen estado e incluya lo siguiente:
Indicador de peso (Martin Decker): el uso de este indicador asegurará un espaciado preciso del rotor.
Manómetro en la instalación de llave hidráulica: el uso de este indicador asegurará que el par aplicado a la tubería y las cabillas o varillas es el correcto

Lista de Verificación de la Completación

Compruebe que todos los elementos de la sarta tubería están disponibles.

Compruebe que los elementos de la sarta de cabillas o varillas están disponibles.

Prepare el número exacto de cabillas o varillas que corresponda a la profundidad



	PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP	Código: HSE-PRC-07-CO
		Fecha: 01/09/2013
		Versión: 1

- Varilla continua en una bobina de transporte; su longitud puede estar predeterminada o no. Consulte el procedimiento de la empresa de servicio de cabillas/varillas continuas y las mejores prácticas

3. Precauciones de seguridad y peligro:

El operario tiene que asegurarse de que los equipos de elevación estén en buen estado y adaptados al trabajo de instalación.

Debe revisarse el manejo seguro ensamblaje de fondo y el equipo de superficie.

Asegúrese de que el personal de instalación tenga experiencia y posea la formación adecuada para instalar el equipo PCP. Póngase en contacto con un representante de PCM para efectuar estos procedimientos.

- ✓ RESPETE EN TODO MOMENTO LAS NORMAS DE SEGURIDAD DE LA PLATAFORMA DISPONIBLES EN SITIO
- ✓ NO COMIENCE NUNCA EL TRABAJO SI NO ES PLENAMENTE CONSCIENTE DE SU ACTIVIDAD O TIENE DUDAS
- ✓ LLEVE SIEMPRE LAS PROTECCIONES ADECUADAS CUANDO ESTÉ EN SITIO
- ✓ ASEGÚRESE DE QUE SE HA REALIZADO Y REGISTRADO LA CHARLA DE SEGURIDAD
- ✓ ASEGÚRESE DE QUE SE HA REALIZADO Y REGISTRADO UNA EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS

Es posible que encuentre, y debe tener cuidado con ellos, los siguientes tipos de peligros durante el montaje del taladro:

- Grúa inadecuada / insegura
- Operario de la grúa sin certificación o sin experiencia
- La luz del sol o los reflejos dificultan la visión de los operarios de la grúa
- Los equipos de elevación están en mal estado o no están certificados
- Capacidad de elevación inadecuada de la grúa y/o del montacargas
- El personal podría sufrir lesiones o ser atrapado por las cargas móviles
- Personal sin experiencia manejando elementos críticos
- Daños en el equipo que impiden un ensamblaje correcto
- El equipo está montado sobre bloques o plataformas inestables
- Inapropiado Equipo de Protección personal en sitio
- Las herramientas disponibles en obra son inadecuadas o insuficientes
- El polvo o la arena se introducen en las conexiones

PCM Colombia S.A.S - Nit. 900.555.433 - 2
Calle 104 # 14 A - 45 Oficina 302 - Bogotá
Tel. 702 0770 - www.pcm.eu

	PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP	Código: HSE-PRC-07-CO
		Fecha: 01/09/2013
		Versión: 1

4. Instalación del estator:

Ensamblaje previo en superficie:

Asegúrese de que cualquier elemento que se introduzca en el hoyo esté medido correctamente (diámetros exteriores y longitudes) y que todos los números de seriales y de producto sean registrados.

Ponga el estator sobre el terreno con los bloques/tablas de madera necesarios para mantenerlo separado del suelo. A continuación, realice el ensamblaje del estator como se indica a continuación:.

Paso	Acciones
1	Conecte el niple de paro al extremo del estator.
2	Instale los sensores (temperatura/ presión), si existen.
3	Conecte el ancla de torque debajo del niple de paro.
4	Instale el cuello de tubería encima del estator, si es necesario.
5	Instale el niple de tubería encima del estator.
6	Instale el cuello de combinación, si existe.
7	Instale la válvula de drenaje, si existe.

Durante el ensamblaje previo, el apriete se realiza usando llaves de tubo.

Bajada en el hoyo (RIH):

Paso	Acción
Nota	Advertencia: El niple de tubería situado encima del estator tiene que permitir el movimiento excéntrico de la cabeza del rotor.
1	Levante el conjunto del estator preensamblado. Utilice un niple de elevación si es necesario.
2	A continuación, el conjunto del estator se transfiere al piso del taladro o planchada usando los elevadores conectados al niple de elevación a través de la puerta V.
3	El conjunto del estator se inserta en el hoyo y se mantiene suspendida en el pozo utilizando las cuñas.
4	Conecte el conjunto del estator al extremo de la tubería de producción empleando el equipo auxiliar necesario.
5	Asegúrese de que todas las conexiones de la sarta de tubería están apretadas entre las torques óptimas y máximas, de acuerdo con el manual de funcionamiento del producto. Registre todos los torques de apriete aplicados.
Nota	Registre todos los números seriales, información del modelo procedente del proveedor/ fabricante, longitud y diámetros exteriores de los componentes.
6	Le recomendamos que tome nota en el libro de registro del número de tubos dentro del pozo y su longitud.
7	Bajar el equipo hasta la profundidad de asentamiento de la bomba.
Nota:	No coloque el ancla de torque en medio de las perforaciones.
8	Aproximadamente 50 – 60 cm antes de que se coloque el colgador, gire la tubería en sentido horario con una llave de tubo.
9	Mantenga esa posición hasta que el colgador de tubería esté firmemente colocado.
10	Mientras se aplica el torque, baje la tubería y fije el colgador.

PCM Colombia S.A.S - Nit. 900.555.433 - 2
Calle 104 # 14 A - 45 Oficina 302 - Bogotá
Tel. 702 0770 - www.pcm.eu



PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP

Código: HSE-PRC-07-CO

Fecha: 01/09/2013

Versión: 1

Conexión			Torque de apriete de las conexiones					
Tamaño	Rosca	Grado	lb.ft			daN.m		
			Óptimo	Mínimo	Máximo	Óptimo	Mínimo	Máximo
2"3/8	EU	J55	1290	970	1610	174	131	217
	NU		730	550	910	99	74	123
2"7/8	EU		1650	1240	2060	223	167	278
	NU		1050	790	1310	142	107	177
3"1/2	EU		2280	1710	2850	308	231	385
	NU		1480	1110	1850	200	150	250
4"	EU		1240	930	1550	167	126	209
	NU		2860	2150	3580	386	290	483
4"1/2	EU	1740	1310	2180	235	177	294	
	NU	1740	1310	2180	235	177	294	
5"	CSG	K55	1840	1380	2300	248	186	311

(Referencia API Std 5b)

5. Instalación de la sarta de cabillas o varillas:

Limpieza y preparación:

Al levantar el rotor, coloque las eslingas en dos puntos para evitar el pandeo.

Ponga el rotor sobre el terreno con los bloques/tablas de madera que sean necesarios para mantenerlo separado del suelo. Asegúrese de que el rotor esté limpio y libre de cualquier cuerpo extraño o desperfecto.

Prepare el número exacto de cabillas/varillas de acuerdo con el la profundidad y cuente el número de cabillas/varillas que han sido bajadas. Revise y limpie todas las roscas y acoplamientos (couplings) de las cabillas/varillas.

Asegúrese de que se instale un acoplamiento en la cabeza del rotor para proteger las roscas. Durante el ensamblaje previo, el apriete se realiza usando llaves para cabillas/varillas.

Engrase el rotor antes del bajarlo en el pozo. Esto hará que sea más fácil insertarlo en el estator y que se elimine el posible error de espaciado debido a que el rotor quede atascado dentro del estator.

Bajada en el hoyo (RIH):

La sarta del rotor se traslada al piso del taladro utilizando los elevadores de cabillas/varillas conectados con los bloques del taladro, a los cuales se les debe permitir girar. No arrastre la sarta de cabillas o varillas por la rampa o el piso del taladro, a fin de proteger las conexiones roscadas.



Debe utilizarse una BOP para cabillas/varillas cuando estas sean bajadas. Asegúrese de que el diámetro interno de la BOP sea mayor que el diámetro externo máximo de la sarta considerando los centralizadores.

PCM Colombia S.A.S - Nit. 900.555.433 - 2
Calle 104 # 14 A - 45 Oficina 302 - Bogotá
Tel. 702 0770 - www.pcm.eu



PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP

Código: HSE-PRC-07-CO

Fecha: 01/09/2013

Versión: 1

Paso	Acciones
1	Eleve el rotor utilizando el elevador de cabillas/varillas y un tramo de cabilla (pony rod) de 2FT conectado a la cabeza del rotor.
2	Baje el rotor la tubería de producción. Apoye la cabeza del rotor en la brida superior de la BOP usando una placa base.
3	Desmonte el tramo de cabilla de 2FT de la cabeza del rotor.
4	Tome un tramo de cabilla de 12FT y conéctelo al rotor. Instale un centralizador sobre este tramo de cabilla.
5	Asegúrese de que las conexiones del rotor estén apretadas entre los torques de apriete óptimo y máximo, de conformidad con las especificaciones del producto. Registre todos los pares empleados. Baje la sarta de cabillas/varillas e instale los centralizadores de conformidad con las recomendaciones de PCM.
6	Una vez que el rotor empiece a moverse dentro del estator, es posible que empiece a girar en sentido horario y haya que realizar el espaciamento.

Torque de apriete máximo del rotor		
Diámetro	lb.ft	daN.m
3/4"	380	52
7/8"	560	77
1"	870	118
1"1/8	1200	163
1"1/2	1200	163

(Referencia API Std 11b)

PCM Colombia S.A.S - Nit. 900.555.433 - 2
Calle 104 # 14 A - 45 Oficina 302 - Bogotá
Tel. 702 0770 - www.pcm.eu



PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP

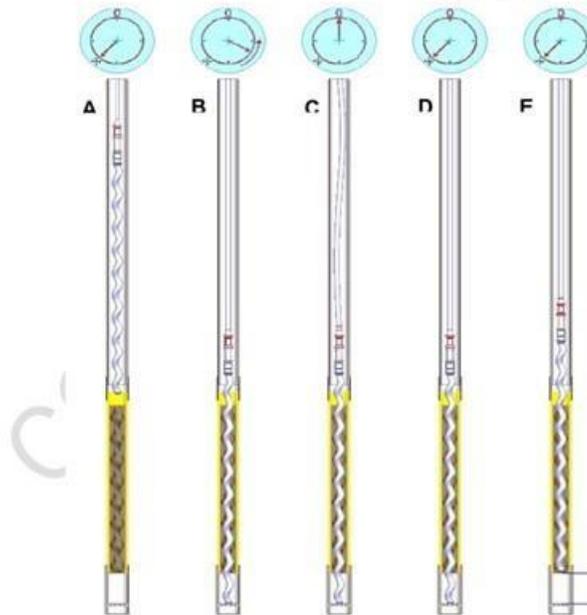
Código: HSE-PRC-07-CO

Fecha: 01/09/2013

Versión: 1

Asentamiento del rotor:

Paso	Acciones
1	Cuando el rotor empiece a girar en sentido horario, el indicador de peso debe indicar un valor más bajo; marque este nivel (el rotor está encima del estator).
2	Elévelo lo más lentamente posible y anote las lecturas del indicador de peso.
3	Bájelo lentamente hasta que el rotor se pose en el niple de paro y destense la sarta: el peso descenderá y el indicador de peso tendrá un valor cero. (fig. B y C).
4	Levántelo muy lentamente. Cuando el indicador de peso vuelva a su lectura anterior, párelo y marque la cabilla/varilla en la superficie: entonces el rotor estará apoyado en el niple de paro (sarta en tensión) (fig. D). Repita la operación varias veces hasta que esté seguro con ella.
5	Retire 10 pulgadas de longitud del niple de paro, con lo que la base del rotor y el estator estarán al mismo nivel (E).
6	Consulte el alargamiento de la cabilla/varilla de la bomba en el anexo para determinar el alargamiento dinámico de la sarta de cabillas/varillas.
7	Saque esta longitud adicional y marque la cabilla/varilla en la superficie.
8	En este momento el rotor estará espaciado correctamente: la base del rotor corresponderá con la base del estator cuando la bomba esté operando a la altura de levantamiento esperada.



PCM Colombia S.A.S - Nit. 900.555.433 - 2
Calle 104 # 14 A - 45 Oficina 302 - Bogotá
Tel. 702 0770 - www.pcm.eu



PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP

Código: HSE-PRC-07-CO

Fecha: 01/09/2013

Versión: 1

Selección del set de tramo/niples de cabilla/varilla:



La conexión de la barra pulida con la sarta de cabillas debe realizarse de tal modo que el rotor permanezca a la distancia correcta y que el extremo superior de la barra pulida esté al nivel adecuado para conectarlo al eje del cabezal de rotación.

Pasos	Acciones
1	Extraiga las dos últimas cabillas/varillas.
2	Coloque la barra pulida junto a las cabillas/varillas extraídas que han sido marcadas y coloque la última marca en paralelo con la marca de la barra pulida.
Nota	Si la longitud de la barra pulida es mayor que la longitud de las cabillas/varillas extraídas, saque otra cabilla/varilla hasta que supere la longitud de la barra pulida.
3	Añada un centralizador al extremo de la barra pulida y complete la longitud restante con tramos de cabilla/varilla.
Nota	Los tramos de cabilla/varilla no deben superar a las cabillas/varillas extraídas.
4	Deje a un lado las dos (o tres) últimas cabillas/varillas e inserte en el hoyo el grupo seleccionado de tramos de cabilla/varilla.

PCM Colombia S.A.S - Nit. 900.555.433 - 2
Calle 104 # 14 A - 45 Oficina 302 - Bogotá
Tel. 702 0770 - www.pcm.eu



PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP

Código: HSE-PRC-07-CO

Fecha: 01/09/2013

Versión: 1

Preparación del eje de accionamiento (tipo de eje hueco):

Conjunto estándar desde arriba:	
1	Tramo de cabilla/varilla de 2 ft para manipular la sarta.
2	Acoplamiento de tamaño completo (Full Size Coupling)
Nota	El acoplamiento tiene que ser más grande que la barra pulida.
3	Barra pulida - el extremo macho hacia arriba.
4	Grapa (clamp) en la barra pulida a 15 cm de la parte superior.
Nota	Los tornillos tienen que estar apretados en cruz a 220 lbs.ft. Si el cabezal de rotación está equipado con una tapa con AEC (dispositivo antieyección), apriete únicamente dos tornillos.
Nota	Elimine cualquier residuo o marcas de la llave de tubo en la barra pulida.
Nota	Tiene que apretarse en el eje hexagonal con una llave de tubo y medir el torque.
5	Bala o protector de barra pulida en la parte inferior de la misma.
Nota	Protección de rosca utilizada para insertar la barra pulida a través del cabezal de accionamiento (o rotación).
Nota	Marque la longitud del cabezal de accionamiento (o rotación) en la barra pulida.



PCM Colombia S.A.S - Nit. 900.555.433 - 2
Calle 104 # 14 A - 45 Oficina 302 - Bogotá
Tel. 702 0770 - www.pcm.eu

	PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP	Código: HSE-PRC-07-CO
		Fecha: 01/09/2013
		Versión: 1

6. Instalación del cabezal de rotación:

Consulte el manual del cabezal de accionamiento para obtener información completa.

Conjunto del cabezal de accionamiento (o rotación):

- Caso 1: transmisión mediante correa y poleas

Paso	Acciones
1	Motor eléctrico montado en la placa.
2	Instale los bujes y poleas en el cabezal de accionamiento y el motor.
Nota	Asegúrese de que los bujes estén insertados al menos a dos tercios del eje del motor.
3	Efectúe la alineación de las poleas.
4	Monte la correa.
5	Tense la correa.
Nota	Para ajustar la tensión de la correa, ajuste la posición de la placa del motor con la el o los espárrago(s) situado(s) a su lado.
6	Compruebe la tensión de la correa.
Nota	La tensión de la correa se proporciona o bien tiene que calcularse para una correa dada.
7	Pruebe el motor eléctrico.
Nota	Realizar un arranque y una parada es suficiente para hacer la prueba.
8	Suelte la correa.
9	Desmonte la correa.

Antes de poner el cabezal de accionamiento en su base, inspeccione el sistema de sello para comprobar que no haya materiales extraños incrustados y lubríquelo con grasa.

- Caso 2: transmisión mediante caja de engranajes:

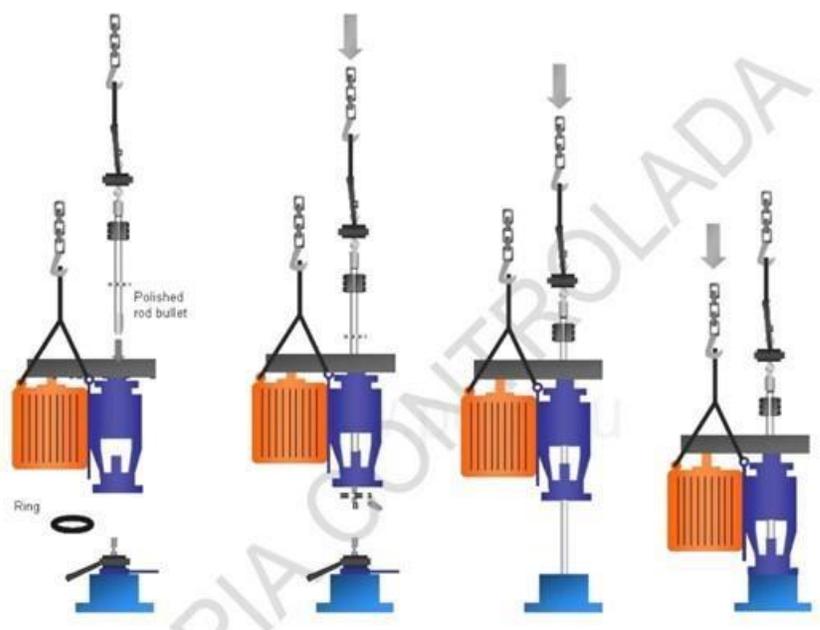
Paso	Acciones
1	Atornille los soportes de elevación del motor en las patas del motor.
2	Engrase las superficies del eje y del acoplamiento del motor con grasa antibloqueo para impedir que las piezas se oxiden juntas.
3	Levante el motor eléctrico y bájele hasta el nivel del acoplamiento del motor.
Nota	El motor eléctrico debe deslizarse libremente e insertarse en el acoplamiento y apoyarse contra el conjunto de la brida.
4	Atornille la brida del motor al soporte del motor empleando de 4 a 8 tornillos, dependiendo del tamaño del chasis del motor.



PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP

Código: HSE-PRC-07-CO
Fecha: 01/09/2013
Versión: 1

Conexión del cabezal de accionamiento a la sarta de cabillas:



PCM Colombia S.A.S - Nit. 900.555.433 - 2
Calle 104 # 14 A - 45 Oficina 302 - Bogotá
Tel. 702 0770 - www.pcm.eu

	PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP	Código: HSE-PRC-07-CO
		Fecha: 01/09/2013
		Versión: 1

En este paso de las operaciones, se ha realizado el espaciamento, la sarta de cabillas está suspendida con un elevador apoyada sobre el cabezal (IBOP, BOP).

Paso	Acciones
1	Traslade el conjunto del cabezal de accionamiento (o rotación) de su soporte hasta posicionarlo sobre el cabezal del pozo utilizando una grúa.
2	Mantenga el cabezal de accionamiento suspendido por encima del BOP (por lo menos 2ft) con la grúa.
Nota	Si el taladro está equipado con un gúinche telescópico rotativo, puede utilizarse en vez de la grúa.
Nota	El cabezal de accionamiento puede levantarse por un punto de elevación.
3	Levante la barra pulida con un elevador.
Nota	Use un tramo de cabilla/varilla de 2ft o 4ft con el elevador.
4	Baje lentamente la barra pulida a través del cabezal de accionamiento hasta que vea asomarse la bala o protector de pulida por debajo del cabezal de accionamiento.
5	Desconecte la bala.
6	Conecte la barra pulida a la sarta de cabillas con un centralizador.
Nota	No olvide colocar la junta tórica (O-Ring) en las bridas de conexión del cabezal del pozo/ cabezal de accionamiento.
7	Apriete la conexión con una llave de tubo.
8	Levante la sarta para desmontar el elevador y la placa base en el BOP.
9	Baje la barra pulida de modo que la grapa de la barra o eje hexagonal se mantenga cerca de la parte superior del cabezal de accionamiento.
10	Apoye la brida del cabezal de accionamiento en el cabezal del pozo.
11	Apriete la brida del cabezal de accionamiento en el cabezal del pozo.
12	Desmonte las eslingas del cabezal de accionamiento.
13	Apoye la barra pulida.
Nota	Apoye la barra pulida de modo que la grappa se introduzca en el perfil del eje hueco.
14	Separe el elevador de la barra pulida.
Nota	Si se ha utilizado un tramo de cabilla de 2ft o 4ft, desconéctelo.
15	Instale la correa, si aplica.
16	Compruebe la tensión de la correa (<i>gire el tensor de la correa</i>), si aplica.
17	Instale el guardacorreas, si aplica.
18	Instale el tapón respiradero en la caja de rodamientos.
19	Ajuste el sistema de sello siguiendo las recomendaciones del fabricante.

PCM Colombia S.A.S - Nit. 900.555.433 - 2
Calle 104 # 14 A - 45 Oficina 302 - Bogotá
Tel. 702 0770 - www.pcm.eu

	PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP	Código: HSE-PRC-07-CO
		Fecha: 01/09/2013
		Versión: 1

Instalación del soporte ajustable:

Si usa un soporte ajustable, no deje el motor eléctrico en la placa base durante la instalación del cabezal de accionamiento.

Desmonte el motor eléctrico después de desmontar la correa (paso 9 del procedimiento de ensamble del cabezal de accionamiento descrito anteriormente).

Conecte el cabezal de accionamiento a la sarta de cabillas (consulte el procedimiento "Conexión del cabezal de accionamiento a la sarta de cabillas"). Espere la mudanza del taladro.

Paso	Acciones
1	Instale el elemento inferior del soporte ajustable en el cabezal del pozo (no lo apriete, déjelo libre).
Nota	Compruebe que las tuercas del equipo del cabezal del pozo sean suficientemente largas para atravesar la base del soporte.
2	Afloje las tuercas del soporte superior del cabezal de accionamiento.
3	Posicione ambos elementos del soporte ajustable.
4	Apriete el soporte ajustable en el cabezal del pozo y el cuerpo del cabezal de accionamiento.
5	Instale el motor eléctrico.
6	Instale la correa.
7	Compruebe la tensión de la correa (afloje la tuerca de bloqueo y apriete o afloje el tensor de la correa).
8	Instale el guardacorreas.
9	Fije el tapón respiradero en el punto de llenado de aceite de la caja de rodamientos y en la cubierta superior del mismo.

PCM Colombia S.A.S - Nit. 900.555.433 - 2
Calle 104 # 14 A - 45 Oficina 302 - Bogotá
Tel. 702 0770 - www.pcm.eu

	PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP	Código: HSE-PRC-07-CO
		Fecha: 01/09/2013
		Versión: 1

7. Instalación del variador de frecuencia (VSD):

Consulte el manual del VSD para obtener información completa.

Montaje del variador:

PCM recomienda instalar el soporte en una losa de cemento.

Pasos	Acción
1	Taladre los agujeros siguiendo las huellas del soporte para instalar las espigas en el interior.
2	Instale el soporte en la losa de cemento y atornillelo.
3	Conecte el cable de puesta a tierra. No lo haga sobre el cemento.
4	Monte el techo del soporte utilizando los anillos de manipulación para fijarlo.
5	Monte el variador de frecuencia (VSD) en el alojamiento.



Cableado del accionamiento:

Tierra: El variador tiene que estar conectado a tierra. Para cumplir las normas en vigor acerca de las corrientes de fuga elevadas (3,5 mA aprox.), utilice al menos un conductor de protección de 10 mm² (AWG 6) o 2 conductores de protección con la misma sección transversal que los conductores de alimentación eléctrica AC de la sección de potencia

Potencia: Asegúrese de que el interruptor esté abierto. Conecte la alimentación eléctrica y el motor al variador tal y como se describe en el manual detallado del VSD.

Sensores: Conecte el sensor de sobrecalentamiento del motor; este equipamiento es obligatorio para proteger el motor contra el exceso de temperatura. Durante una fase de prueba del pozo, puede derivar este sensor con una resistencia de al menos 1,5 kOhm. No obstante, se recomienda altamente (y es obligatorio para los motores ATEX) conectar los sensores de sobrecalentamiento del motor. Conecte otros equipos, si es necesario, tales como indicadores de presión o controles remotos que están disponibles dentro de la oferta de VSD estándar de PCM.

Prensacables: Instale prensacables para garantizar un aislamiento adecuado.

	PROCEDIMIENTO DE INSTALACION DE BOMBAS PCP	Código: HSE-PRC-07-CO
		Fecha: 01/09/2013
		Versión: 1

Configuración del variador:

Programa el variador de frecuencia (VSD) de acuerdo con la capacidad del motor, que puede consultarse en el motor mismo, las especificaciones de la red y las condiciones de funcionamiento.

	Parámetros del cliente
Control de cable 2/3	Ajustes de fábrica
Configuración macro	Ajustes de fábrica
Macro personalizado	Ajustes de fábrica
Frecuencia estándar del motor	50 o 60Hz
Potencia nominal del motor	Introduzca KW de la placa de características del motor
Tensión nominal del motor	Introduzca V de la placa de características del motor
Intensidad nominal del motor	Introduzca In de la placa de características del motor
Frecuencia nominal del motor	Introduzca freq de la placa de características del motor
Velocidad nominal del motor	Introduzca Vn de la placa de características del motor
Frecuencia máxima	Ajustes de fábrica
Auto-sintonización	Sí
Estado de auto- sintonización	Ajustes de fábrica
Rotación de fase de salida	Ajustes de fábrica
Intensidad térmica del motor	Introduzca la misma que la intensidad nominal del motor
Aceleración	10
Desaceleración	3
Baja velocidad	20
Alta velocidad	50 / 60 (dependiendo de la red)
Relación de poleas	Conforme a su instalación

PCM Colombia S.A.S - Nit. 900.555.433 - 2
Calle 104 # 14 A - 45 Oficina 302 - Bogotá
Tel. 702 0770 - www.pcm.eu