

EVALUACIÓN TÉCNICA DE LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL  
UBH Y PCP A PARTIR DE LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA  
ENERGÉTICA PARA UN POZO CON CONDICIONES ESPECIALES DE  
PRODUCCIÓN EN UN CAMPO DEL ORIENTE COLOMBIANO

HÉCTOR MAURICIO ACEVEDO PÉREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEO Y GAS  
BUCARAMANGA

2021

EVALUACIÓN TÉCNICA DE LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL  
UBH Y PCP A PARTIR DE LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA  
ENERGÉTICA PARA UN POZO CON CONDICIONES ESPECIALES DE  
PRODUCCIÓN EN UN CAMPO DEL ORIENTE COLOMBIANO

HÉCTOR MAURICIO ACEVEDO PÉREZ

Trabajo presentado como requisito para obtener el título de Maestría en Ingeniería  
de Petróleo y Gas, con énfasis en producción de hidrocarburos

DIRECTOR:

EDISON GARCÍA NAVAS

MSc. Ingeniero de petróleos

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEO Y GAS  
BUCARAMANGA

2021

## **DEDICATORIA**

A Dios todopoderoso y la Santísima Virgen de Monguí por haberme permitido  
obtener este importante logro.

A mis padres HÉCTOR ACEVEDO y ROSITA PÉREZ por su infinito amor, la  
confianza y el gran apoyo brindado durante estos años.

A mis hermanos, ya que son parte fundamental de mi vida, por estar a mi lado en  
las buenas y en las malas.

A toda mi familia por el amor, apoyo y colaboración.

HÉCTOR MAURICIO ACEVEDO PÉREZ.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco especialmente al director de proyecto, profesor Edison García Navas, por convertirse en un apoyo indispensable, por el tiempo y dedicación para la consolidación de este proyecto.

A Ana María Pérez y a los ingenieros Eliana Torres, Valdemar Argüello y Fernando Pérez, quienes me motivaron a realizar este estudio, brindándome apoyo, compartiendo su experiencia, conocimiento y especialmente su amistad.

Al ingeniero Giovanni Alippio, fundador y gerente general de la empresa Jetty Pumping Co., quien por más de 20 años ha dedicado su esfuerzo al desarrollo del bombeo hidráulico como sistema de levantamiento artificial en el país.

A la Universidad Industrial de Santander, directivos, administrativos y profesores del programa de Maestría en Ingeniería de Petróleo y Gas, por ser formadores de grandes profesionales, brindando conocimientos para el crecimiento y desarrollo de esta importante industria a nivel mundial.

## CONTENIDO

pág.

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>                                                | <b>17</b> |
| <b>1. OBJETIVOS .....</b>                                               | <b>18</b> |
| <b>1.1 OBJETIVO GENERAL .....</b>                                       | <b>18</b> |
| <b>1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>                                  | <b>18</b> |
| <b>2. GENERALIDADES .....</b>                                           | <b>19</b> |
| <b>2.1 SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BH Y PCP.....</b>           | <b>19</b> |
| 2.1.1 Bombeo hidráulico tipo jet.....                                   | 22        |
| 2.1.1.1 Principio de operación. ....                                    | 22        |
| 2.1.1.2 Ventajas .....                                                  | 25        |
| 2.1.1.3 Desventajas.....                                                | 25        |
| 2.1.2 Bombeo por cavidades progresivas .....                            | 26        |
| 2.1.2.1 Principio de operación .....                                    | 26        |
| 2.1.2.2 Ventajas .....                                                  | 28        |
| 2.1.2.3 Desventajas.....                                                | 29        |
| <b>3. VARIABLES TÉCNICAS PARA EL DISEÑO DE SLA POR BH Y PCP .....</b>   | <b>30</b> |
| <b>3.1 ÍNDICE DE PRODUCTIVIDAD .....</b>                                | <b>30</b> |
| 3.1.1 Método de la línea recta.....                                     | 30        |
| 3.1.2 Método de Vogel.....                                              | 31        |
| <b>3.2 VARIABLES DE DISEÑO DE BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS .....</b> | <b>32</b> |
| 3.2.1 Caudal teórico.....                                               | 32        |
| 3.2.2 Profundidad de la bomba .....                                     | 33        |

|            |                                                                |           |
|------------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.3      | La presión de entrada a la bomba (PIP).....                    | 34        |
| 3.2.4      | Carga dinámica total (TDH) .....                               | 34        |
| 3.2.4.1    | Nivel de fluido (Hd) .....                                     | 34        |
| 3.2.4.2    | Pérdidas por fricción en el tubing (HF).....                   | 35        |
| 3.2.4.3    | Pérdidas de fricción en la línea de flujo (Pd).....            | 35        |
| 3.2.5      | Selección del elastómero .....                                 | 35        |
| 3.2.6      | Tipo de bomba.....                                             | 36        |
| 3.2.7      | Potencia requerida por la bomba .....                          | 36        |
| 3.2.8      | Requerimiento de torque.....                                   | 37        |
| 3.2.8.1    | Torque hidráulico.....                                         | 37        |
| 3.2.8.2    | Torque de fricción.....                                        | 38        |
| 3.2.8.3    | Torque de resistencia .....                                    | 38        |
| 3.2.9      | Carga axial.....                                               | 39        |
| 3.2.10     | Potencia consumida por el motor .....                          | 39        |
| 3.2.11     | Selección del cabezal.....                                     | 40        |
| <b>3.3</b> | <b>VARIABLES DE DISEÑO DE BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET .....</b> | <b>41</b> |
| 3.3.1      | Equipos de superficie.....                                     | 41        |
| 3.3.1.1    | Bombas multiplex .....                                         | 41        |
| 3.3.1.2    | Cabezales de pozo.....                                         | 41        |
| 3.3.1.3    | Sistemas de tratamiento .....                                  | 42        |
| 3.3.2      | Equipos de subsuelo.....                                       | 43        |
| 3.3.2.1    | Completamiento convencional – Circulación en directa.....      | 43        |
| 3.3.2.2    | Completamiento convencional – Circulación en reversa.....      | 43        |
| 3.3.2.3    | Completamiento en sartas concéntricas .....                    | 44        |
| 3.3.3      | Tipos de bombas jet.....                                       | 44        |
| 3.3.3.1    | Bomba jet directa .....                                        | 44        |
| 3.3.3.2    | Bomba jet reversa .....                                        | 45        |
| 3.3.4      | Relación de tamaño boquilla / garganta.....                    | 45        |
| 3.3.5      | Cavitación .....                                               | 46        |

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE SLA POR BH Y PCP.....</b>                 | <b>48</b> |
| <b>4.1 DATOS REQUERIDOS.....</b>                                         | <b>48</b> |
| 4.1.1 Datos de yacimiento y producción .....                             | 48        |
| 4.1.2 Características de los fluidos .....                               | 48        |
| 4.1.3 Datos de pozo.....                                                 | 49        |
| 4.1.4 Problemas posibles.....                                            | 49        |
| <b>4.2 ÍNDICE DE PRODUCTIVIDAD.....</b>                                  | <b>50</b> |
| <b>4.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS FLUIDOS.....</b>                       | <b>51</b> |
| 4.3.1 Gravedad específica del petróleo.....                              | 51        |
| 4.3.2 Gravedad específica de la mezcla .....                             | 51        |
| <b>4.4 DISEÑO SLA BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS .....</b>              | <b>52</b> |
| 4.4.1 Cálculo del caudal teórico .....                                   | 52        |
| 4.4.2 Carga dinámica total .....                                         | 52        |
| 4.4.3 Cálculo de potencia consumida .....                                | 54        |
| 4.4.4 Cálculo de torques .....                                           | 55        |
| 4.4.5 Cálculo de esfuerzos axiales .....                                 | 56        |
| 4.4.6 Cálculo de tensiones combinadas.....                               | 56        |
| 4.4.7 Cálculo de estiramiento de varillas.....                           | 57        |
| 4.4.8 Selección del cabezal .....                                        | 58        |
| 4.4.9 Selección del elastómero .....                                     | 58        |
| <b>4.5 DISEÑO DE SLA POR BH TIPO JET .....</b>                           | <b>60</b> |
| 4.5.1 Criterios de diseño .....                                          | 60        |
| 4.5.2 Descripción del programa NCPCv4-GR .....                           | 61        |
| 4.5.3 Procedimiento de cálculo .....                                     | 61        |
| 4.5.3.1 Iniciar el programa The New Coleman Pump Company NCPCv4-GR. .... | 61        |
| 4.5.3.2 Ingresar datos: .....                                            | 61        |
| 4.5.3.3 Realizar el primer cálculo: .....                                | 62        |
| 4.5.3.4 Selección de tamaños de boquilla y garganta.....                 | 63        |
| 4.5.3.5 Cálculo de la siguiente iteración. ....                          | 64        |

|                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.6 ANÁLISIS DE DISEÑO .....</b>                                                           | <b>64</b> |
| <b>5. SELECCIÓN DEL SLA BASADO EN LOS ANÁLISIS AMBIENTAL, PRESUPUESTAL Y ENERGÉTICO .....</b> | <b>68</b> |
| <b>5.1 ANÁLISIS AMBIENTAL .....</b>                                                           | <b>68</b> |
| 5.1.1 Huella de carbono.....                                                                  | 68        |
| 5.1.2 Cálculo de la huella de carbono.....                                                    | 70        |
| 5.1.3 Huella de carbono de SLA por bombeo de cavidades progresivas. ....                      | 74        |
| 5.1.4 Huella de carbono de SLA por BH tipo Jet.....                                           | 74        |
| 5.1.5 Balance energético .....                                                                | 75        |
| <b>5.2 ANÁLISIS PRESUPUESTAL .....</b>                                                        | <b>77</b> |
| <b>5.3 DETERMINACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS SLA BH Y PCP .....</b>                   | <b>80</b> |
| <b>5.4 SELECCIÓN DEL SLA PARA EL POZO AC-01 .....</b>                                         | <b>83</b> |
| <b>6. ALTERNATIVAS DE MEJORA DE SLA POR BH PARA POZO AC-01 .....</b>                          | <b>85</b> |
| <b>6.1 INSTALACIÓN DE BOMBEO HIDRÁULICO CONCÉNTRICO (BHC).....</b>                            | <b>85</b> |
| <b>7. CONCLUSIONES .....</b>                                                                  | <b>92</b> |
| <b>8. RECOMENDACIONES.....</b>                                                                | <b>94</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>                                                                      | <b>95</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                                                                           | <b>99</b> |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                           | pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1. Comparación de las ventajas y desventajas de los SLA .....                       | 21   |
| Tabla 2. Características de los fluidos. ....                                             | 49   |
| Tabla 3. Datos de yacimiento y producción .....                                           | 50   |
| Tabla 4. Datos de pozo.....                                                               | 50   |
| Tabla 5. Caudal teórico BCP .....                                                         | 53   |
| Tabla 6. Carga dinámica total TDH.....                                                    | 54   |
| Tabla 7. Cálculo de potencia consumida .....                                              | 55   |
| Tabla 8. Cálculo de torques .....                                                         | 55   |
| Tabla 9. Cálculo de esfuerzos axiales.....                                                | 56   |
| Tabla 10. Cálculo de tensiones combinadas.....                                            | 56   |
| Tabla 11. Cálculo de estiramiento de varillas.....                                        | 57   |
| Tabla 12. Resumen de resultados de diseño de SLA por PCP .....                            | 57   |
| Tabla 13. Resultados de las iteraciones .....                                             | 64   |
| Tabla 14. Resumen de resultados BH .....                                                  | 67   |
| Tabla 15. Energía consumida por los SLA por BH y PCP .....                                | 74   |
| Tabla 16. Huella de carbono de los SLA por BH y PCP .....                                 | 74   |
| Tabla 17. Energía generada por combustión de petróleo de pozo AC-01 .....                 | 76   |
| Tabla 18. Balance energético de los SLA – pozo AC-01.....                                 | 76   |
| Tabla 19. Presupuesto para realizar cambio de bomba PCP .....                             | 78   |
| Tabla 20. Presupuesto para cambio de SLA a BH concéntrico .....                           | 79   |
| Tabla 21. Resultados del cálculo de la potencia hidráulica para SLA BH y PCP..            | 82   |
| Tabla 22. Resultados del cálculo de eficiencia energética para los SLA BH y PCP.<br>..... | 82   |
| Tabla 23. Datos de diseño de completamiento concéntrico .....                             | 86   |
| Tabla 24. Resultados del software de diseño de BH concéntrico .....                       | 87   |
| Tabla 25. Resultados de diseño de BH concéntrico.....                                     | 90   |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 26. Resultados del cálculo de eficiencia energética para el SLA por BHC .. | 91 |
| Tabla 27. Relación de consumo energético con producción de petróleo.....         | 91 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                 | Pág. |
|---------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Esquema de la bomba hidráulica tipo Jet .....                         | 23   |
| Figura 2. Componentes de una bomba tipo Jet .....                               | 24   |
| Figura 3. Perfil de presión y velocidad a través de la bomba tipo Jet .....     | 24   |
| Figura 4. Sistema de bombeo por cavidades progresivas. ....                     | 27   |
| Figura 5. Partes principales de BCP .....                                       | 28   |
| Figura 6. Geometría de una bomba de cavidades progresivas .....                 | 33   |
| Figura 7. Facilidades en superficie para bombeo hidráulico.....                 | 42   |
| Figura 8. Curva IPR pozo AC- 01 .....                                           | 51   |
| Figura 9. Diseño SLA bombeo de cavidades progresivas.....                       | 52   |
| Figura 10. Factor de pérdida de carga por fricción.....                         | 53   |
| Figura 11. Manual de cabezales de NETZSCH .....                                 | 58   |
| Figura 12. Tipos de elastómeros.....                                            | 59   |
| Figura 13. Características de los elastómeros .....                             | 59   |
| Figura 14. Pantalla principal del programa NCPCv4-GR.....                       | 61   |
| Figura 15. Ventana de datos de programa NCPCv4-GR.....                          | 62   |
| Figura 16. Ventana de resultados programa NCPCv4-GR.....                        | 63   |
| Figura 17. Caudal de producción Vs PIP – Pozo AC-01 .....                       | 65   |
| Figura 18. Comportamiento de la producción Vs fluido motriz .....               | 66   |
| Figura 19. Comportamiento de la producción Vs presión de inyección .....        | 66   |
| Figura 20. Comportamiento del caudal de producción Vs potencia hidráulica ..... | 67   |
| Figura 21. Fuentes emisoras de gases efecto invernadero .....                   | 70   |
| Figura 22. Fases del ciclo de vida de un producto .....                         | 71   |
| Figura 23. Etapas de un ACV .....                                               | 71   |
| Figura 24. Comportamiento de PIP para completamiento concéntrico.....           | 86   |
| Figura 25. Ventana de datos de programa NCPC para C. Concéntrico .....          | 87   |
| Figura 26. Comportamiento de la producción Vs Caudal de fluido motriz .....     | 88   |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 27. Comportamiento de la producción Vs la presión de inyección ..... | 88 |
| Figura 28. Potencia hidráulica en completamiento concéntrico.....           | 89 |

## LISTA DE ANEXOS

pág.

|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| ANEXO A: ANÁLISIS DE FALLA DE BOMBA PCP .....   | 99  |
| ANEXO B. TEST INHIBIDOR DE INCRUSTACIONES ..... | 103 |

## GLOSARIO

|             |                                           |
|-------------|-------------------------------------------|
| <b>%SW</b>  | Contenido de agua libre y sedimentos      |
| <b>API</b>  | American Petroleum Institute              |
| <b>BBL</b>  | Barriles                                  |
| <b>BFPD</b> | Barriles de fluido por día                |
| <b>BH</b>   | Bombeo hidráulico                         |
| <b>BOPD</b> | Barriles de petróleo por día              |
| <b>BWPD</b> | Barriles de agua por día                  |
| <b>CHP</b>  | Presión del anular en cabeza de pozo, psi |
| <b>GOR</b>  | Relación gas – petróleo, SCF/BN           |
| <b>HP</b>   | Caballos de potencia, unidad de potencia  |
| <b>Hz</b>   | Hertz, Unidad de frecuencia               |
| <b>MSCF</b> | Miles de pies cúbicos estándar            |
| <b>PCP</b>  | Bombeo de cavidades progresivas           |
| <b>PWF</b>  | Presión de fondo fluyente, psi            |
| <b>SLA</b>  | Sistema de levantamiento artificial       |
| <b>THP</b>  | Presión en cabeza de pozo, psi            |
| <b>UBH</b>  | Unidad de bombeo hidráulico               |

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN TÉCNICA DE LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL UBH Y PCP A PARTIR DE LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA UN POZO CON CONDICIONES ESPECIALES DE PRODUCCIÓN EN UN CAMPO DEL ORIENTE COLOMBIANO.\*

**AUTOR:** HÉCTOR MAURICIO ACEVEDO PÉREZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Bombeo de cavidades progresivas, Bombeo hidráulico concéntrico, Eficiencia energética, Condiciones especiales de producción.

**DESCRIPCIÓN:** En el presente documento se realiza una evaluación técnica a los sistemas de levantamiento artificial por bombeo hidráulico y bombeo de cavidades progresivas a partir de la evaluación energética para un pozo con condiciones especiales de producción, como problemas por incrustaciones y alta producción de gas, ubicado en el oriente colombiano. La evaluación incluye un análisis de las variables técnicas que intervienen a la hora de realizar la selección y el diseño de sistemas de levantamiento artificial. También se describen metodologías de diseño mediante el uso de software, cálculos de consumo energético y características operacionales de los sistemas de levantamiento objeto de este estudio.

Adicionalmente, se realiza un análisis presupuestal, donde se describen los posibles escenarios a implementar en la operación del campo y una descripción de impacto ambiental del proyecto, basada en el cálculo de la huella de carbono. Por otra parte, se realiza la selección del sistema de levantamiento más eficiente de acuerdo con las características propias del pozo y a la evaluación de los resultados de los diseños propuestos.

El documento contiene alternativas de mejora al sistema de levantamiento artificial seleccionado, la implementación de nuevas tecnologías tales como un nuevo sistema de levantamiento y la aplicación de productos químicos especiales, acorde a las características fisicoquímicas de los fluidos del pozo. Por último, se realizan recomendaciones, las cuales buscan mejorar las condiciones operativas y reducir los costos de producción.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Edison García Navas. MSc. Ingeniero de Petróleos.

## ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL EVALUATION OF THE UBH AND PCP ARTIFICIAL LIFT SYSTEMS BASED ON THE DETERMINATION OF ENERGY EFFICIENCY FOR A WELL WITH SPECIAL PRODUCTION CONDITIONS IN A FIELD IN EASTERN COLOMBIA\*

AUTHOR: HÉCTOR MAURICIO ACEVEDO PÉREZ\*\*

KEY WORDS: Progressive cavity pumping, Concentric hydraulic pumping, Energy efficiency, Special production conditions.

DESCRIPTION: In this document, a technical evaluation of artificial lift systems by hydraulic pumping and progressive cavity pumping is carried out based on the energy evaluation for a well with special production conditions, such as incrustation problems and high gas production, located in the Colombian east. The evaluation includes an analysis of the technical variables involved in the selection and design of artificial lift systems. Design methodologies are also described through the use of software, energy consumption calculations and operational characteristics of the lifting systems that are the object of this study.

Additionally, a budget analysis is carried out, which describes the possible scenarios to be implemented in the operation of the field and a description of the environmental impact of the project, based on the calculation of the carbon footprint. On the other hand, the selection of the most efficient lifting system is made according to the characteristics of the well and the evaluation of the results of the proposed designs.

The document contains alternatives to improve the selected artificial lift system, the implementation of new technologies such as a new lifting system and the application of special chemical products, according to the physicochemical characteristics of the well fluids. Finally, recommendations are made, which seek to improve operating conditions and reduce production costs.

---

\* Degree work

\*\* Physical-chemical Engineering Faculty. Department of Petroleum Engineering. Director: Edison Garcia Navas. MSc. Petroleum engineer

## INTRODUCCIÓN

La crisis en la industria petrolera derivada de los bajos precios del barril ha conllevado el análisis de costos desde todos los factores que implican la producción, por lo tanto, para cumplir con estos objetivos se requiere mejorar y garantizar en el tiempo condiciones óptimas de recursos e infraestructura tales como: facilidades, sistemas de levantamiento, sistemas de recolección y recursos energéticos, ya que pequeños cambios en la eficiencia operativa y energética tienen gran impacto en la rentabilidad de la producción.

El sistema de levantamiento artificial utilizado actualmente en algunos pozos productores de un campo del oriente colombiano, ha presentado problemas debido al deterioro frecuente de la bomba de cavidades progresivas, ocasionado por el daño del elastómero. La compañía busca evaluar un nuevo sistema de levantamiento que emplee recursos propios y de esta manera incrementar el *runlife* de los pozos y el costo económico sea menor cuando haya que realizar *well service*.

En la actualidad, la industria de los hidrocarburos requiere producir de manera eficiente, por lo cual, es necesario evaluar la eficiencia energética de los sistemas de levantamiento artificial BH y PCP en pozos con condiciones especiales de producción; donde también incluya el análisis técnico de los diseños de SLA, análisis ambiental y de presupuesto, para finalmente, determinar la viabilidad técnico-económica en un pozo productor del oriente colombiano.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar técnicamente los sistemas de levantamiento artificial BH y PCP, a partir de la determinación de la eficiencia energética para un pozo con condiciones especiales de producción en un campo del oriente colombiano.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Determinar las variables técnicas que intervienen en el cálculo de la eficiencia energética de los sistemas de levantamiento artificial (SLA) por Bombeo Hidráulico Tipo Jet (BH) y bombeo de cavidades progresivas (PCP).

Plantear una metodología de diseño de los SLA BH tipo Jet y PCP que permita determinar la eficiencia energética, en función de las características operacionales del pozo seleccionado.

Realizar un análisis energético, presupuestal y ambiental, aplicando la metodología de determinación de eficiencia energética de los SLA evaluados a uno de los pozos productores del campo y seleccionar el sistema más eficiente de acuerdo a las características propias del caso.

Proponer alternativas de mejora del SLA seleccionado, basado en el análisis de nuevas tecnologías, a fin de mejorar las condiciones operativas y reducir los costos de producción.

## **2. GENERALIDADES**

El sistema de levantamiento artificial utilizado actualmente en el pozo productor “AC-01” ha presentado problemas debido al deterioro frecuente de la bomba de cavidades progresivas. Este impase se ha presentado tres veces en un periodo menor a seis meses, por lo tanto, se requiere evaluar el problema y las medidas correctivas a implementar, ya que, este tipo de fallas recurrentes afectan considerablemente la economía de la compañía operadora, debido a la pérdida de producción y al costo elevado que implica realizar un *workover*.

El defecto que ha presentado la bomba de subsuelo está ocasionado por el daño del elastómero. Se infiere que el problema está asociado a las condiciones especiales de producción que presenta el pozo, las cuales incluyen una relación gas – petróleo superior a 500 (scf/STB) y a las características incrustantes que presenta el agua de producción. La compañía busca evaluar nuevas tecnologías y un sistema de levantamiento artificial diferente al actual, aumentando la productividad mediante el uso de recursos propios y de esta manera determinar la viabilidad técnico-económica en la producción del pozo.

### **2.1 SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BH Y PCP**

La fuerza de empuje que desplaza los hidrocarburos dentro de un yacimiento viene de la expansión natural de los fluidos comprimidos y la diferencia de presión existente entre el yacimiento y el pozo. Si la diferencia de presión existente entre el yacimiento y las facilidades de superficie es suficiente el pozo fluirá de manera natural; sin embargo, gran cantidad del petróleo proviene de campos maduros y crudos pesados, que no cuentan con la energía requerida para vencer la columna hidrostática y levantar los fluidos a superficie, por ello se debe aportar energía de manera artificial y de esta manera extraer el petróleo presente en el yacimiento.

“La extracción de petróleo del subsuelo es un proceso que se hace posible debido a la existencia de cuatro factores principales: la presión que posee el yacimiento, la existencia de un pozo que comunique el yacimiento y la superficie, la diferencia de presión existente entre estos dos (diferencial de presión), y la buena comunicación que exista entre el yacimiento y el pozo. La reducción de alguno de estos parámetros afecta la capacidad de salida de los fluidos hasta superficie.”<sup>1</sup>

“El propósito de los sistemas de levantamiento artificial es minimizar los requerimientos de energía en la cara de la formación productora, con el objeto de maximizar el diferencial de presión a través del yacimiento y provocar, de esta manera, la mayor afluencia de fluidos, sin que se generen problemas de producción como arenamiento, conificación de agua, etc.”<sup>2</sup>

Es muy importante seleccionar un sistema de levantamiento artificial que sea adecuado para cada tipo de fluidos en un yacimiento determinado. Se debe tener presente la configuración del pozo (limitaciones mecánicas, dimensiones), condiciones de yacimiento, propiedades fisicoquímicas de los fluidos, profundidad de asentamiento, presiones, etc.

El presente estudio plantea realizar el análisis del tipo de levantamiento artificial entre bombeo de cavidades progresivas y bombeo hidráulico, que resulte más eficiente en la producción de hidrocarburos en un pozo productor con características especiales, ubicado en el oriente colombiano.

---

<sup>1</sup> CALVETE GONZALEZ Fernando y MONTES PAEZ Erik. Sistemas de levantamiento artificial. Cap. 1. Bucaramanga. 2017. p.7.

<sup>2</sup> CASTRO LÓPEZ, Hermes y RODRÍGUEZ CEDEÑO, Diocles. Desarrollo de un simulador para el dimensionamiento y análisis comparativo entre el bombeo hidráulico tipo jet y el bombeo por cavidades progresivas para la producción de crudos pesados. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. 2017. 26 p.

**Tabla 1. Comparación de las ventajas y desventajas de los SLA**

| SLA                                           | VENTAJAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | DESVENTAJAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>BOMBEO MECÁNICO (BM)</b>                   | <p>Sistema más antiguo y ampliamente usado en la industria</p> <p>Simple y fácil de operar para personal de campo</p> <p>Aplicable a todo tipo de completamiento</p> <p>Flexible para ajustar la extracción con la declinación del pozo</p> <p>Fácil diagnóstico</p> <p>El equipo de fondo puede trabajar a altas temperaturas</p> <p>Puede usar gas o electricidad como fuente de poder</p> | <p>En pozos desviados presenta problemas de fricción</p> <p>El manejo de cantidades considerables de sólidos</p> <p>Pozos con aporte de gas disminuye la eficiencia</p> <p>Se limita por profundidad debido a carga en varillas</p> <p>Intrusivo en zonas urbanas</p> <p>Susceptible a problemas de parafina</p>                                      |
| <b>BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS (BCP)</b> | <p>Costo moderado</p> <p>Equipo de superficie reducido</p> <p>Eléctricamente es eficiente</p> <p>Buen manejo de arena y fluidos viscosos</p>                                                                                                                                                                                                                                                 | <p>El elastómero del estator se puede hinchar por los fluidos del pozo</p> <p>El pozo no puede operar sin nivel</p> <p>Pierde eficiencia con la profundidad</p> <p>El desgaste de la tubería resulta alto respecto a otros sistemas</p>                                                                                                               |
| <b>BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE (BES)</b>         | <p>La capacidad de levantamiento de fluido es alta (20000 bfpd)</p> <p>No intrusivo en zonas residenciales</p> <p>Simple de operar</p> <p>Aplicable a pozos costa afuera (offshore)</p> <p>Disponible en diferentes tamaños</p> <p>El costo de levantamiento es bajo para altos caudales</p> <p>Fácil de inhibir la corrosión</p>                                                            | <p>Debe trabajar con electricidad solamente</p> <p>Se requieren altos voltajes</p> <p>No es práctico para pozos someros y de bajo aporte de fluido</p> <p>El costo de intervención resulta en el más elevado</p> <p>El cable resulta en el componente más débil</p> <p>La producción de gas y sólidos resultan en un problema (erosión)</p>           |
| <b>BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET PUMP</b>        | <p>La bomba se recupera sin sacar tubería</p> <p>No tiene parte móviles en fondo</p> <p>No presenta problemas con pozos desviados</p> <p>Caudales de fluido (30000 bfpd)</p> <p>Aplicable a pozos costa afuera (offshore)</p> <p>Se puede emplear agua como fluido motriz</p> <p>Fácil de inhibir la corrosión</p>                                                                           | <p>Requiere al menos 20% de sumergencia para un levantamiento eficiente</p> <p>El diseño resulta complejo</p> <p>La bomba cavita en ciertas condiciones</p> <p>Muy sensible a cualquier cambio en contraflujo</p> <p>La producción de gas libre reduce la capacidad de levantamiento de líquido</p> <p>En superficie se requieren altas presiones</p> |

Fuente: LEA, James F. And NICKENS Henry, *Selection of Artificial Lift*, 1999. SPE 52157

**2.1.1 Bombeo hidráulico tipo jet.** El principio operativo del bombeo hidráulico se basa en la ley de Pascal, la cual indica que: “si se ejerce una presión sobre una superficie de un fluido contenido en un recipiente, ésta se transmite a todas las superficies del mismo con igual intensidad”.

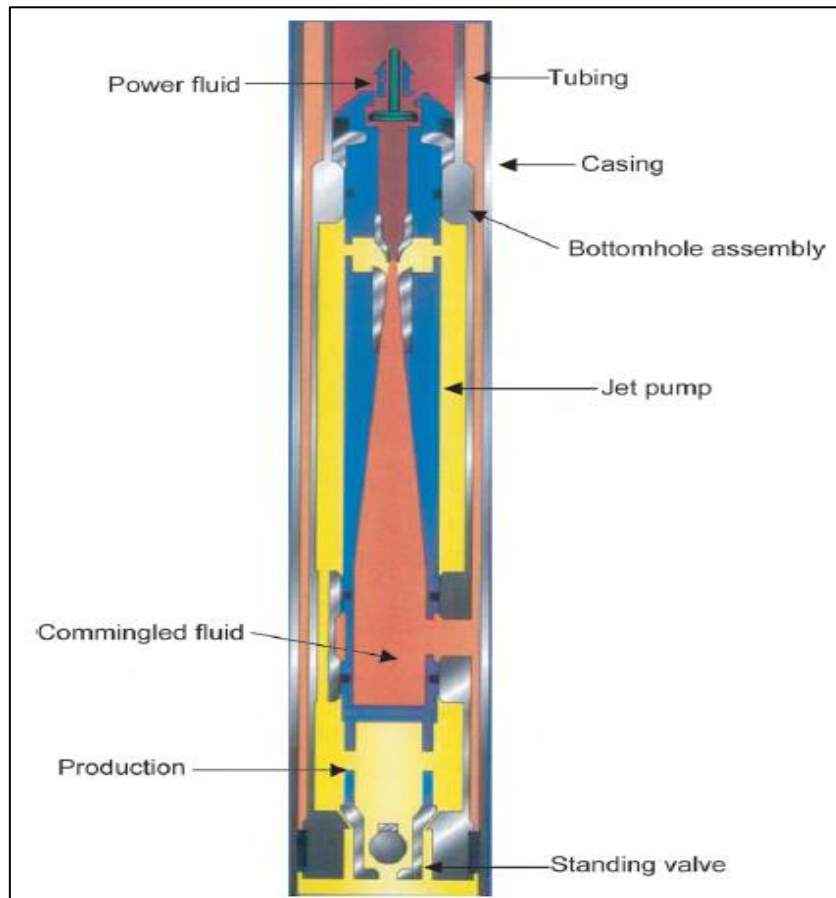
Como lo indica House<sup>3</sup>, este principio hidráulico, aplicado como SLA, hace posible transmitir potencia (fluido a presión) desde un punto central hasta la profundidad de la bomba, sin emplear aparatos mecánicos, utilizando solo tubería de producción. Dado que las pérdidas de potencia en los sistemas hidráulicos son menores que los sistemas mecánicos, hace que este SLA tenga mayor eficiencia.

**2.1.1.1 Principio de operación.** El funcionamiento de bomba hidráulica tipo Jet está basado el principio de Venturi (expresado en la transferencia de energía que existe en las dos corrientes de fluido). El fluido motriz a alta presión pasa a través de una tobera o boquilla, entra a un tubo de mezcla o garganta, que está comunicado con los fluidos de la formación, donde se transforma la energía potencial en energía cinética, disminuyendo considerablemente la presión del fluido motriz, el cual pierde momentum y energía y el fluido de producción gana momentum y energía. La baja presión del fluido motriz permite que los fluidos del yacimiento entren al pozo y posteriormente a la bomba de fondo, a la presión PS y a la tasa de producción QS.

---

<sup>3</sup> HOUSE VIVANCO, Juan y VILLACRESES ZAMBRANO, Ricardo. Estudio para la implementación del servicio de bombeo hidráulico tipo jet de la Compañía ECUAPET Cía. Ltda. en Petroproducción. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. 2010. 209 p.

**Figura 1. Esquema de la bomba hidráulica tipo Jet**

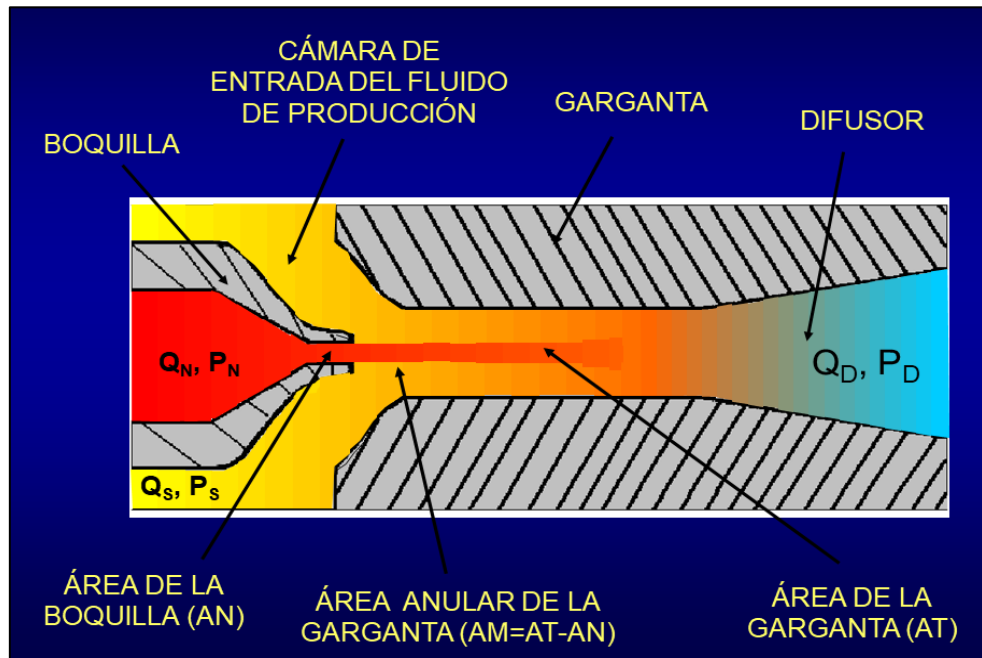


Fuente: LAKE, Larry W. Petroleum Engineering Handbook. Production operations engineering. Joe Dunn Clegg, Editor. Manufactured in the United States of America. Vol. IV. Cap.14. 727 p. ISBN 978-1-55563-135-2.

La alta velocidad del fluido motriz se mezcla con la baja velocidad de los fluidos producidos en la garganta. La mezcla de fluidos se le llama fluido de retorno. Cuando el fluido de retorno, alcanza la parte final de la cámara de mezclado, tiene baja presión y alta velocidad. El fluido entonces sale de la bomba a través del difusor, para transformar la energía cinética en presión, estableciéndose de esta manera, nuevamente, un estado de alta presión y baja velocidad. Esta alta presión de descarga  $P_D$ , debe ser suficiente para llevar la tasa del fluido de retorno  $Q_D$ , hasta la superficie<sup>4</sup>.

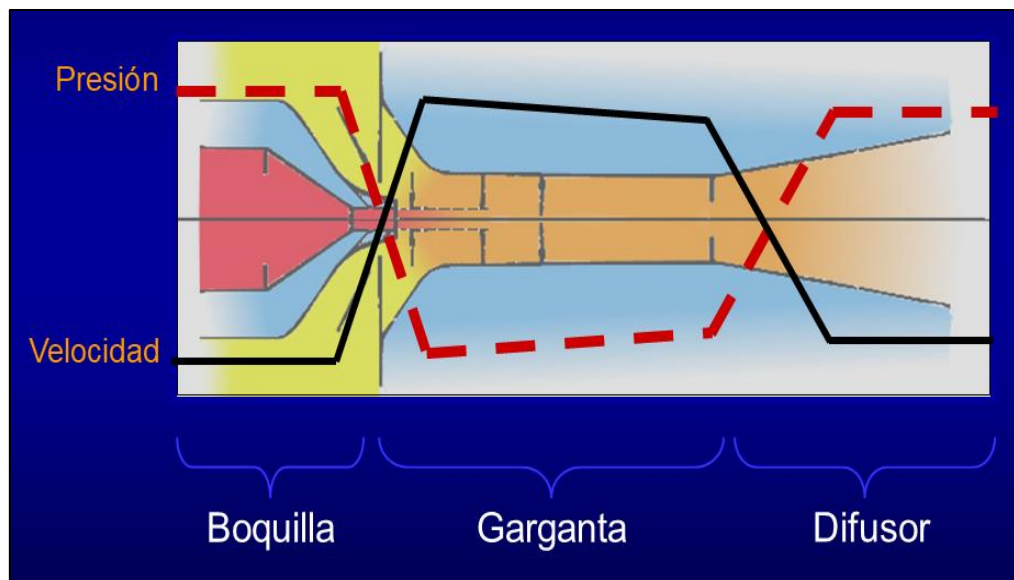
<sup>4</sup> HOUSE VIVANCO. Op.cit., p.18.

**Figura 2. Componentes de una bomba tipo Jet**



Fuente: LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL CON BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET. PDVSA – Exploración y Producción. DORANTE Yoselyne, *et al.* 2001. U.E. Tierra Este Liviano, Campo Barúa- Motatán. 48 diapositivas.

**Figura 3. Perfil de presión y velocidad a través de la bomba tipo Jet**



Fuente: levantamiento artificial con bombeo hidráulico tipo jet. PDVSA. Ibid. 48 p.

#### **2.1.1.2 Ventajas**

- La bomba no posee partes móviles lo que significa alta duración y menor tiempo en tareas de mantenimiento.
- Flexibilidad en la tasa de producción.
- Cálculo de la  $P_{wf}$  en condiciones fluyentes.
- Puede ser instalada en pozos de cualquier profundidad y desviados.
- Bombea todo tipo de crudos, inclusive crudos pesados.
- Las bombas de subsuelo pueden ser circuladas o recuperadas hidráulicamente.
- Pueden optimizarse fácilmente cambiando el tamaño de la tobera y la garganta.
- En superficie se pueden hacer facilidades multi-pozos.
- Apropriadadas para instalación de medidores de presión de fondo debido a su baja vibración.
- Puede manejar fluidos contaminados con  $CO_2$ ,  $H_2S$ , gas y arena.

#### **2.1.1.3 Desventajas**

- Los costos de mantenimiento de las bombas reciprocantes en superficie son mayores comparativamente con los sistemas ESP y PCP.
- Las bombas jet requieren una potencia alta y tienen una eficiencia menor a 33%.
- Requiere tener un nivel de sumergencia del 20% del nivel dinámico para desempeñarse correctamente.
- Requiere acondicionamiento de facilidades de alta presión para operación en superficie.
- La alta velocidad en la boquilla y garganta genera turbulencia y fricción significativa, reduciendo la eficiencia.

**2.1.2 Bombeo por cavidades progresivas.** Este sistema de levantamiento artificial consiste en una bomba de desplazamiento rotativo positivo accionada desde la superficie, el movimiento es transmitido por medio de una sarta de varillas, empleando un motor – reductor acoplado desde las varillas hasta la bomba.

“La bomba de cavidades progresivas (BCP) fue inventada por un ingeniero francés llamado René Moineau, quien estableció la empresa llamada PCM POMPES S.A, para la fabricación de la misma”.<sup>5</sup>

“La bomba PCP está constituida por dos piezas longitudinales en forma de hélice, una que gira en contacto permanente dentro de la otra que está fija, formando un “engranaje helicoidal”. La geometría del conjunto es tal, que forma una serie de cavidades idénticas y separadas entre sí. El resultado de esto es un flujo continuo por desplazamiento positivo proporcional a la velocidad de rotación.”<sup>6</sup>

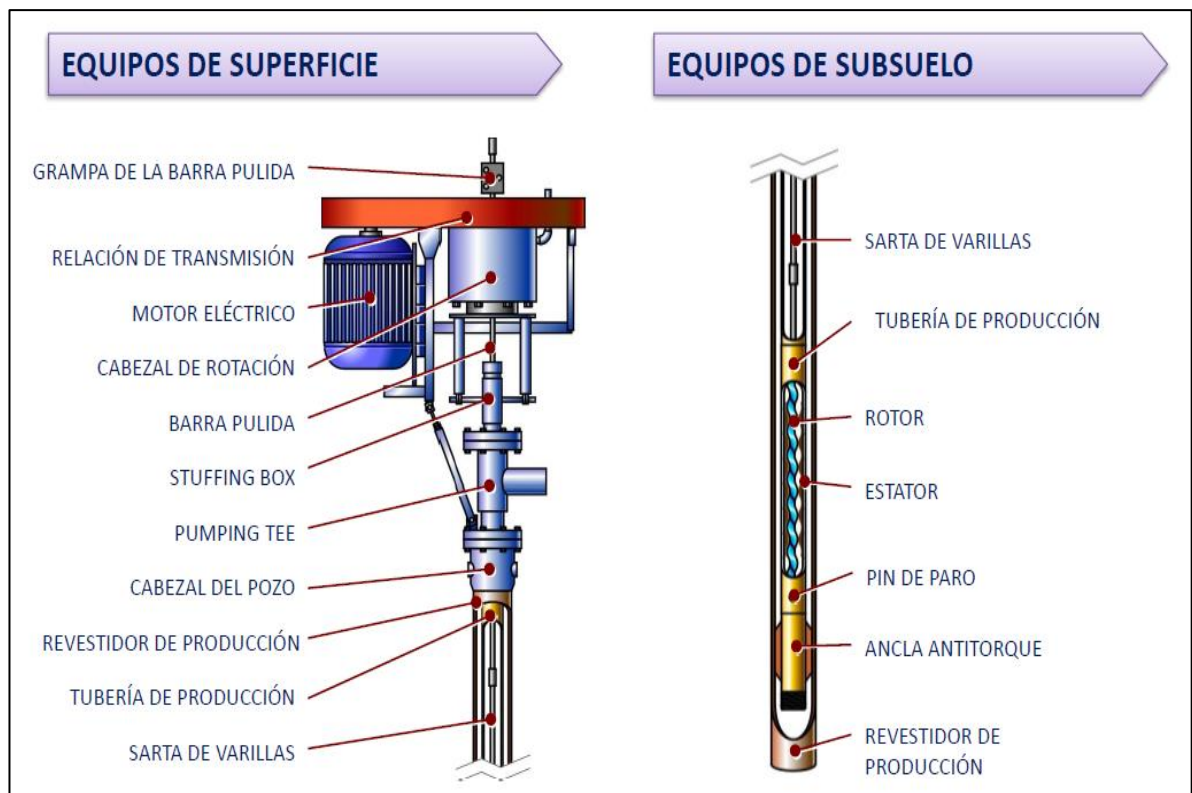
**2.1.2.1 Principio de operación.** Las bombas de cavidades progresivas (BCP) son bombas de desplazamiento positivo, que consiste en un rotor de acero y un estator pegado con un elastómero sintético. El funcionamiento de las BCP utiliza el rotor de forma helicoidal de (n) lóbulos dentro de un estator en forma de helicoide de (n+1) lóbulos. Las dimensiones del rotor y el estator están diseñadas de manera que producen una interferencia, la cual crea líneas de sello que definen las cavidades. Al girar el rotor, estas cavidades se desplazan (o progresan), en un movimiento combinado de traslación y rotación, que se manifiesta en un desplazamiento helicoidal de las cavidades desde la succión de la bomba, hasta su descarga. De manera que se tiene un desplazamiento positivo en cavidades progresivas.

---

<sup>5</sup> CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva. El Tigre, Venezuela: ESP OIL Engineering Consultants. 2003.

<sup>6</sup> CALVETE GONZALEZ. Op.cit., p.48.

**Figura 4. Sistema de bombeo por cavidades progresivas.**

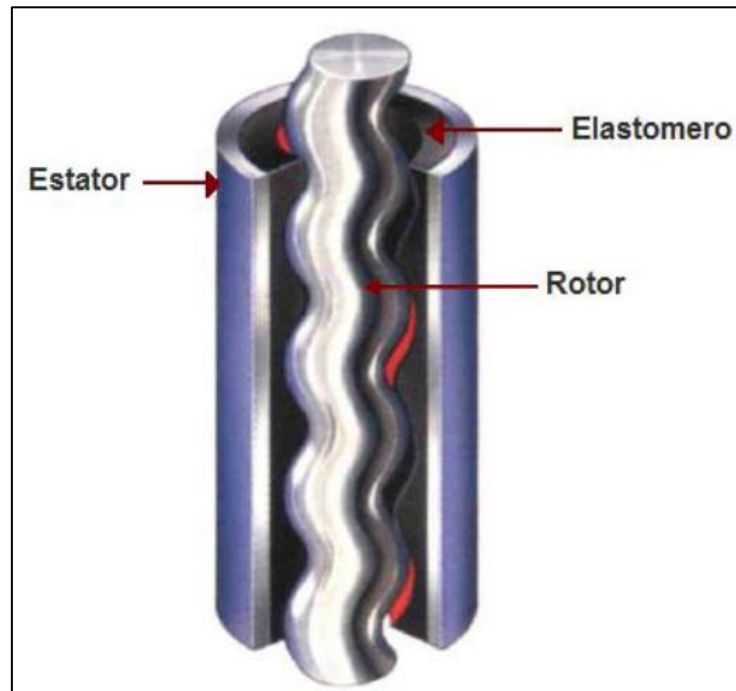


Fuente: HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo de cavidades progresivas. 2008. V1. OILProduction.net.

El estator y el rotor no son concéntricos y el movimiento del rotor es combinado, uno rotacional sobre su propio eje y otro rotacional en dirección opuesta alrededor del eje del estator.

Los equipos de superficie se seleccionan en función de los requerimientos que exige cada sistema, acorde a capacidades y dimensiones.

**Figura 5. Partes principales de BCP**



Fuente: WEATHERFORD COLOMBIA LIMITED

#### **2.1.2.2 Ventajas<sup>7</sup>**

- Eficiencia como SLA entre 70 – 80%.
- Habilidad para producir fluidos altamente viscosos, petróleos pesados y bitúmenes (<18° API).
- Producción de pozos con altos porcentajes de agua y altas producciones brutas, asociados a proyectos avanzados de recuperación secundaria.
- Habilidad para producir con altas concentraciones de arena.
- Tolera altos porcentajes de gas libre (no se bloquea).
- Ausencia de válvulas o partes reciprocantes evitando bloqueo o desgaste de las partes móviles.
- Muy buena resistencia a la abrasión.

<sup>7</sup> MONSALVE DUARTE, Diego Armando. Evaluación de los modelos matemáticos utilizados en el diseño de los sistemas de levantamiento artificial de bombeo por cavidades progresivas. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2009. 165 p.

- Bajos costos de energía y demanda constante (no hay fluctuaciones en el consumo).
- Simple instalación y operación.
- Bajo mantenimiento y bajo nivel de ruido.
- Equipos de superficie de pequeñas dimensiones.

#### **2.1.2.3 Desventajas**

- Capacidad de desplazamiento real de hasta 2000 bbl/día (máximo de 4000 bbl/día).
- Capacidad de elevación real de hasta 6000 pies (máximo de 10050 pies).
- Resistencia a la temperatura de hasta 280 °F (máxima de 350 °F).
- Alta sensibilidad a los fluidos producidos (los elastómeros pueden hincharse o deteriorarse con el contacto de ciertos fluidos por periodos prolongados de tiempo).
- Opera con bajas capacidades volumétricas cuando se producen cantidades de gas libre considerables (evitando una buena lubricación).
- Tendencia del estator a daño considerable cuando la bomba trabaja en seco por periodos de tiempo relativamente cortos.
- Desgaste por contacto entre las varillas de bombeo y la tubería de producción puede tomarse un problema grave en pozos desviados.
- 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.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> RUEDA PERDOMO, María. Optimización de producción por sistema de levantamiento artificial bombeo cavidades progresivas en el contrato de producción incremental- Neiva, Campo Dina. Monografía para obtener el título de especialista en hidrocarburos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos 2015. 75 p.

### 3. VARIABLES TÉCNICAS PARA EL DISEÑO DE SLA POR BH Y PCP

#### 3.1 ÍNDICE DE PRODUCTIVIDAD

“La productividad se puede definir como la capacidad de entrega de fluidos que tiene el yacimiento hacia un pozo, bajo unas ciertas condiciones de operación del sistema de producción. La productividad tiene un valor particular en cada pozo y, por lo tanto, debe calcularse de esa manera, sin poder generalizarlo a la totalidad del yacimiento. Existen diferentes modelos matemáticos que permiten describir el comportamiento de la productividad de un pozo”<sup>9</sup>

**3.1.1 Método de la línea recta.** El diferencial de presión existente entre la presión estática del pozo ( $P_s$ ) y la presión en el fondo del pozo ( $P_{wf}$ ), se conoce como abatimiento o drawdown y se representa por la ecuación:

$$Drawdown = P_s - P_{wf} \quad (1)$$

La relación entre la tasa de producción de un pozo y el *drawdown* para esta tasa en particular, se denomina índice de productividad (IP) y se simboliza con la letra  $J$ , e indica la capacidad que tiene una formación para aportar fluidos al pozo.<sup>10</sup>

$$IP = J = \frac{Q_o + Q_w}{P_y - P_{wf}} \quad (2)$$

Donde:  $Q_o$  es el caudal de flujo de aceite,  $Q_w$  el caudal de flujo de agua,  $P_y$  la presión del yacimiento y  $P_{wf}$  es la presión de fondo fluyendo dentro del pozo.

Si se grafica la tasa producida a cada presión de fondo fluyendo se obtiene una gráfica conocida como *curva de comportamiento de influjo* (*Inflow Performance Relationship –IPR–* en inglés). En esta gráfica el índice de productividad es la

---

<sup>9</sup> CALVETE GONZALEZ. Op.cit., p.16.

<sup>10</sup> Ibid., p. 17.

pendiente de la curva obtenida. Cuando el valor de esta pendiente es constante la curva obtenida tiene la forma de una línea recta.

El índice de productividad está asociado a la presencia de flujo de gas desde el yacimiento hacia el fondo del pozo y esta presencia de gas, a su vez, está relacionada con el mecanismo de empuje mediante el cual produce el pozo. Por ello, si el mecanismo de producción es de empuje por agua y/o la presión en el yacimiento está por encima de la presión de burbuja (yacimiento subsaturado) no habrá flujo de gas y la gráfica IPR será una línea recta. Por el contrario, si el mecanismo es gas en solución o capa de gas y la presión del yacimiento se encuentra por debajo del punto de burbuja (yacimiento saturado o sobresaturado) la gráfica IPR será una curva suave<sup>11</sup>.

**3.1.2 Método de Vogel.** En una publicación efectuada por Vogel (1968), propuso una solución numérica a la determinación de las curvas de comportamiento de influjo (IPR) para los pozos de un campo petrolero con empuje por gas en solución y con flujo por debajo del punto de burbuja. Utilizando datos medidos de la producción de pozos que fluían aceite y gas con un vasto rango de propiedades de presión, volumen y temperatura, además de características específicas de permeabilidad relativa en el yacimiento y asumiendo varias condiciones, tales como un área de drenaje circular, flujo radial uniforme y una saturación constante de agua. Despreció la segregación gravitacional y la solución solo es válida para flujo bifásico en el yacimiento<sup>12</sup>.

Vogel propuso la gráfica de la producción acumulativa Vs la relación entre la presión de fondo fluyente y la presión estática del yacimiento. La presión para cada punto en un curva de IPR es dividida por la presión máxima, o presión de cierre para cada curva particular, y la tasa de producción correspondiente es

---

<sup>11</sup> Ibid., p. 18.

<sup>12</sup> Ibid., p. 18

dividida por la tasa de producción máxima ( $Q_{\text{máx}}$ ) la cual se obtiene cuando la  $P_{wf}$  es cero, por lo que obtiene un 100% de *drawdown*).<sup>13</sup>

La ecuación final propuesta de Vogel que representa este comportamiento es la siguiente:

$$\frac{Q_o}{Q_{\text{max}}} = 1 - 0.2 * \left( \frac{P_{wf}}{P_y} \right) - 0.8 * \left( \frac{P_{wf}}{P_y} \right)^2 \quad (3)$$

Ahora bien, para establecer el IPR por medio de la curva de Vogel, es necesario determinar cuál es el valor de la tasa máxima ( $Q_{\text{máx}}$ ), para lo cual se debe utilizar un punto de prueba.

### 3.2 VARIABLES DE DISEÑO DE BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS

**3.2.1 Caudal teórico.** La finalidad del diseño es determinar la potencia consumida por la bomba y así mismo la energía que consume el motor en superficie.

Cada ciclo de rotación del rotor produce dos cavidades de fluido. El área de esta cavidad está expresada por:

$$A = 4 * d * E \quad (4)$$

$E$  = Excentricidad del rotor

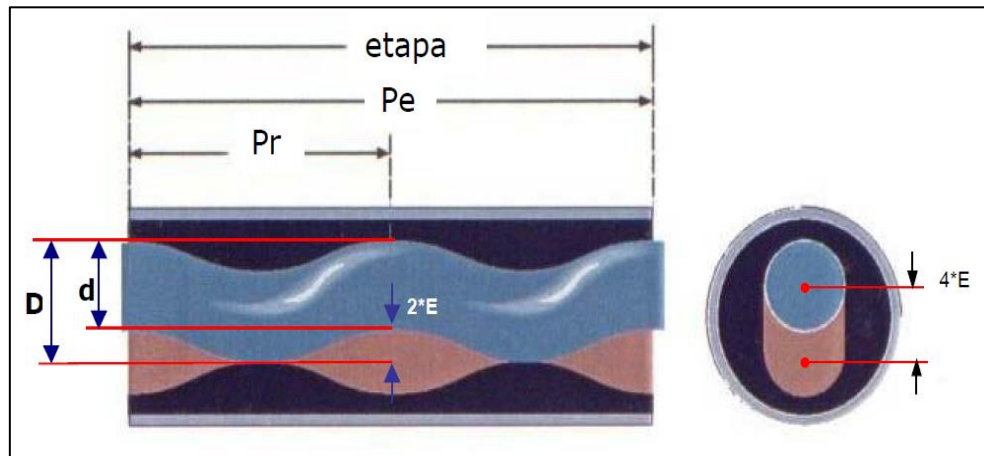
$Pr$  = Paso del rotor

$Pe$  = Paso del estator =  $2 * Pr$

---

<sup>13</sup> Ibid., p. 18

**Figura 6. Geometría de una bomba de cavidades progresivas**



Fuente: HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo de cavidades progresivas. 2008. V1. OILProduction.net.

El área es constante, y a velocidad de rotación constante, el caudal es uniforme. El desplazamiento de la bomba, es el volumen producido por cada vuelta del rotor (es función del área y de la longitud de la cavidad).

$$V = A * P = 4 * dr * E * Ps \quad (5)$$

El caudal es directamente proporcional al desplazamiento y a la velocidad de rotación N.

$$Q = V * N = 4 * dr * E * Ps * N \quad (6)$$

**3.2.2 Profundidad de la bomba.** Para el SLA de bombeo de cavidades progresivas, es común una sumergencia de la bomba de 500 pies, por lo tanto la profundidad de asentamiento de la bomba es hallada con la ecuación:

$$Prof. de la bomba = NoFo + 500 \text{ pies} \quad (7)$$

**3.2.3 La presión de entrada a la bomba (PIP).** Es la presión que genera el fluido aportado por el yacimiento en la entrada de la bomba, se determina aplicando la ecuación:

$$PIP = Pwf - (0.433 * GEm * (PMP - \text{prof. de la bomba})) \quad (8)$$

**3.2.4 Carga dinámica total (TDH).** La carga dinámica total o cabeza requerida, corresponde a la cabeza que la bomba debe vencer para que el fluido llegue a superficie. La TDH se calcula sumando el nivel de fluido con las pérdidas por fricción en la tubería y en las líneas de flujo, algebraicamente así<sup>14</sup>,

$$TDH = Hd + Ft + Pd \quad (9)$$

Donde:

Hd: Distancia vertical entre la cabeza de pozo y el nivel de fluido producido a la capacidad esperada.

Ft: Carga requerida para superar las pérdidas de fricción.

Pd: Pérdidas por fricción en las líneas de flujo en superficie.

**3.2.4.1 Nivel de fluido (Hd).** Es la distancia en pies entre el nivel de fluido dinámico y la superficie. Se calcula mediante la ecuación:

$$Hd = Nb - \left( \frac{PIP}{0.433 * GEm} \right) \quad (10)$$

Donde Nb es el nivel de profundidad de la bomba.

---

<sup>14</sup> Rodríguez y Robles, 2010. Citado por MARTINEZ DURAN, María y USECHE NARVAEZ, Catalina. Evaluación de la huella de carbono producida por los sistemas de levantamiento artificial convencionales en un campo colombiano. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2018. p 52.

**3.2.4.2 Pérdidas por fricción en el tubing (HF).** Para hallar las pérdidas de fricción en tubería se tiene en cuenta el factor  $f/1000'$ , este factor hace referencia a la pérdida de carga por cada 1000 pies de tubería y se obtuvo de la correlación de Hazen y Williams:

$$\left(\frac{f}{1000'}\right) = 2.083 * \left(\frac{100}{c}\right)^{1.85} * \left(\frac{Q^{1.85}}{ID^{4.8655}}\right) \quad (11)$$

Donde: C es una constante. 120 (tubería nueva) o 90 (tubería vieja).

Para hallar las pérdidas de fricción en el tubing se utilizó la ecuación:

$$Ft = \left( \frac{\text{Prof. bomba} * 2.083 * \left(\frac{100}{c}\right)^{1.85} * \left(\frac{Q^{1.85}}{ID^{4.8655}}\right)}{1000} \right) \quad (12)$$

**3.2.4.3 Pérdidas de fricción en la línea de flujo (Pd).** Para determinar este tipo de pérdidas se emplea la siguiente ecuación:

$$Pd = \left( \frac{THP * 2.31}{GEm} \right) \quad (13)$$

**3.2.5 Selección del elastómero.** El elastómero constituye el elemento más “delicado” de la bomba de cavidades progresivas y de su adecuada selección depende en una gran medida el éxito o fracaso de esta aplicación. Deben presentar resistencia química para manejar los fluidos producidos y excelentes propiedades mecánicas para resistir los esfuerzos y la abrasión<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> CHACIN, Nelvy. Op. Cit., p.78.

Para seleccionar el elastómero se tiene en cuenta la temperatura en la profundidad de asentamiento de la bomba y el API del crudo, por consiguiente, para hallar la temperatura se determina el gradiente geotérmico y además, se le adiciona entre 30 a 60°F de temperatura, esto debido al factor de tolerancia para prevenir efectos de calentamiento de la bomba por la fricción<sup>16</sup>. La temperatura en la profundidad de asentamiento de la bomba se puede determinar con la ecuación:

$$^{\circ}T = \left( \left( \frac{\text{grad. geotermico} * \text{prof. bomba}}{1000} \right) + ^{\circ}T \text{ superficie} \right) + 60^{\circ}F \quad (14)$$

**3.2.6 Tipo de bomba.** La bomba se selecciona de tal forma que tenga la capacidad de producir la tasa requerida a las condiciones de operación, para esto se establece un caudal de diseño (bls/día)

$$Q_{\text{diseño}} = \left( \frac{100 * Q_{\text{requerido}}}{n} \right) \quad (15)$$

Donde:

$Q_{\text{requerida}}$  es la tasa requerida (bls/día) y  $n$  es la eficiencia volumétrica de la bomba (%).

**3.2.7 Potencia requerida por la bomba.** La potencia total requerida para accionar la bomba es determinada por una potencia hidráulica (HHP), la cual es determinada mediante la ecuación.

$$HHP = Q \left( \frac{\text{bbl}}{\text{día}} \right) * P(\text{psi}) * 1.7024^{-5} \quad (16)$$

Donde:

$P$ : Presión ejercida por la cabeza dinámica total y  $Q$  es la tasa requerida.

---

<sup>16</sup> Ibid. p. 78.

La potencia total requerida para accionar la bomba es hallada con la ecuación:

$$Potencia Consumida (HP) = \left( \frac{HHP}{n} \right) \quad (17)$$

Donde: n es la eficiencia volumétrica de la bomba.

**3.2.8 Requerimiento de torque.** El torque se define como la energía requerida para girar el rotor y mover el fluido a la presión necesaria. El torque de la bomba está compuesto por una parte hidráulica, otra de fricción y de resistencia. Por consiguiente, el torque total es la suma del torque hidráulico, el torque de fricción y el torque de resistencia:

$$T_{total} = T_{hidráulico} + T_{fricción} + T_{resistencia} \quad (18)$$

**3.2.8.1 Torque hidráulico.** “El torque hidráulico tiene que ver con los HP hidráulicos que dependen del caudal a extraer y de las presiones requeridas; el torque hidráulico es proporcional al levantamiento y al desplazamiento de la bomba”.<sup>17</sup>

El torque hidráulico se calcula utilizando la ecuación:

$$T_{hidraulico} = C * v * TDH(psi) \quad (19)$$

C: Constante, con valor de 0.0897

v: Desplazamiento de la bomba (Bls/día/rpm)

---

<sup>17</sup> Matos Gutiérrez (2009). Citado por MARTINEZ DURAN, María y USECHE NARVAEZ, Catalina. Evaluación de la huella de carbono producida por los sistemas de levantamiento artificial convencionales en un campo colombiano. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2018. 103 p.

$$v = \frac{Q_{\text{diseño}}}{\text{velocidad de la bomba } N \text{ (rpm)}} \quad (20)$$

**3.2.8.2 Torque de fricción.** Es la energía requerida para vencer el ajuste de interferencia entre el estator y rotor, este torque depende del ajuste de interferencia del revestimiento del rotor, del elastómero del estator, de las propiedades lubricantes del fluido y de la longitud de la bomba, además, tiene un valor pequeño, alrededor de 80-90 N-m, valor que se determina en el ensayo de la bomba.

**3.2.8.3 Torque de resistencia.** “Al producirse el movimiento de rotación de la sarta de varilla dentro de la tubería de producción, se produce una fuerza de resistencia generada por el fluido sobre las varillas. Esta fuerza de resistencia genera un torque adicional que se conoce como torque de resistencia”.<sup>18</sup> El torque de resistencia se determina mediante la ecuación:

$$T_{\text{resistencia}} = \frac{(C * Dr^3 * L * \mu * N)}{(Dt - Dr)} \quad (21)$$

C: Constante. Sistema Internacional:  $1.643 \times 10^{-10}$ . Sistema inglés:  $2.381 \times 10^{-8}$

Dr: Diámetro externo de las varillas (milímetros o pulgadas),

L: Longitud de la sarta de varillas (metros o pies).

$\mu$ : Viscosidad del fluido (cent poise).

N: Velocidad de rotación del sistema (RPM).

Dt: Diámetros interno de la tubería de producción (milímetros o pulgadas).

---

<sup>18</sup> Monsalve Duarte, (2012). Citado por MARTINEZ DURAN, María y USECHE NARVAEZ, Catalina. Op. Cit., p. 67.

**3.2.9 Carga axial.** La carga axial que soportan las varillas de bombeo depende de parámetros como el peso de las varillas (F1) y el efecto de la presión sobre la impulsión de la bomba (F2). El peso de las varillas es:

$$F1 = longitud * peso nominal de la varilla \quad (22)$$

El efecto de la presión sobre la impulsión de la bomba es:

$$F2 = Ptotal * area efectiva \quad (23)$$

Donde: Ptotal es la presión ejercida por la cabeza dinámica total.

El área efectiva es calculada mediante la siguiente ecuación:

$$Area efectiva = \frac{\pi}{4} * \left( Drotor^2 - (645.16 * drod^2) \right) \quad (24)$$

Drotor: Diámetro mayor del rotor (mm)

drod: Diámetro de la varilla de bombeo (pulg).

**3.2.10 Potencia consumida por el motor.** “Los sistemas PCP pueden ser adaptados a motores eléctricos o motores de combustión interna, siendo el primero de ellos el más utilizado por su mayor eficiencia de operación y capacidad de automatización. La función principal de la fuente de energía primaria es proveer la potencia requerida por el sistema para poder operar. Esta potencia es función directa del torque total del mismo”.<sup>19</sup>

---

<sup>19</sup> Ibid., p 70.

La potencia requerida por el motor ( $P_{req}$ ) se calcula como sigue con la ecuación.

$$P_{req} = \frac{C * T_{sarta} * N}{\mu_{transmission}} \quad (25)$$

Donde:

$T_{sarta}$ : Torque total de la sarta.

$N$ : es la velocidad de rotación del sistema (rpm),

$\mu_{Transmisión}$ : eficiencia de transmisión del sistema (%)

$C$ : constante con un valor de  $1,917 \times 10^{-4}$ .

La eficiencia de transmisión del sistema se estableció en el 95%.

**3.2.11 Selección del cabezal.** “Los cabezales son requeridos en sistemas convencionales de bombeo PCP para transferir potencia desde el motor primario a la bomba, la cual es manejada por la sarta de varillas de bombeo. Además deben cumplir con otras funciones, tales como proveer acción de sellado entre la boca de pozo y el vástago, soportar la carga axial determinada por la acción de bombeo y proveer un medio adecuado de controlar el giro inverso de la sarta (*backspin*)”<sup>20</sup>.

La selección del cabezal se realiza teniendo en cuenta la carga axial y la potencia consumida por la bomba.

---

<sup>20</sup> Netzch. (2004). Manual de sistemas PCP. Citado por MARTINEZ DURAN, María y USECHE NARVAEZ, Catalina. Op. Cit., p. 69.

### 3.3 VARIABLES DE DISEÑO DE BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET

**3.3.1 Equipos de superficie.** “Las presiones de operación en superficie, manejadas en los sistemas de bombeo hidráulico, generalmente están comprendidas entre 2000 y 4000 psi, las tasas de fluido motriz pueden variar hasta más de 3000 BFPD. Para manejar estas condiciones, en la gran mayoría de instalaciones se utilizan bombas de desplazamiento positivo, triplex o quíntuplex, accionadas por motores eléctricos, gas o diésel”<sup>21</sup>.

**3.3.1.1 Bombas multiplex.** Las bombas multiplex aplicadas en bombeo hidráulico, van desde los 30 a 625 HP de potencia, usualmente tienen *strokes* de longitudes entre 1 y 2.5 pulgadas. Los *plungers* de mayor diámetro proporcionan caudales más altos, pero generalmente a presiones máximas más bajas. El valor máximo entregado por las bombas multiplex, normalmente es de 5000 psi, sin embargo, aplicaciones superiores a 4000 psi, son poco comunes.

**3.3.1.2 Cabezales de pozo.** Los cabezales de pozo para bombeo hidráulico, están diseñados para soportar altas presiones de trabajo, usualmente comprendidas entre 2000 y 4000 psi. La mayoría de configuraciones, posee un *Manifold* conformado por un arreglo de tuberías, válvulas y accesorios, que permiten cambiar la dirección Casing / tubing del fluido motriz y del retorno para proveer modos de operación<sup>22</sup>:

- Para circular la bomba dentro del pozo (desplazar), el fluido motriz se direcciona por la tubería principal.

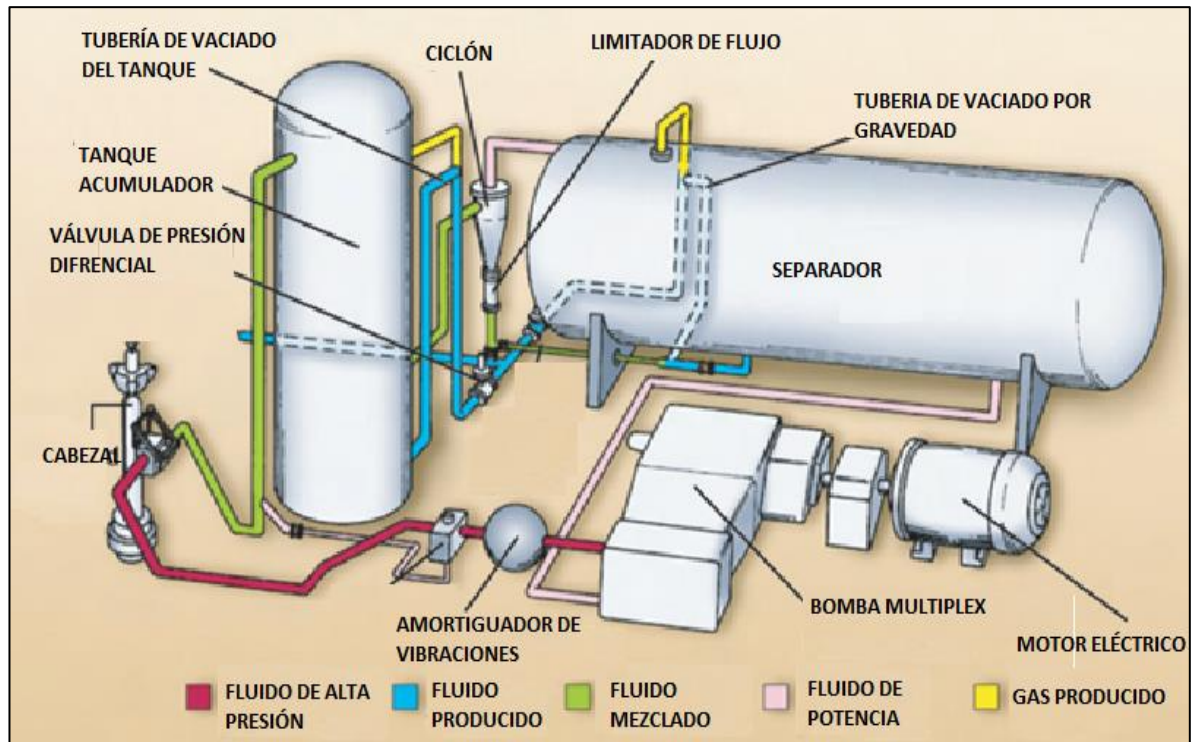
---

<sup>21</sup> MIRANDA GRIJALVA, Erick. Producción de petróleo con bombeo hidráulico tipo jet, utilizando como fluido motriz el agua del sistema de reinyección en un campo del oriente ecuatoriano. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. 2015. p.38.

<sup>22</sup> Ibid., p.38.

- Para recuperar la bomba hidráulicamente (reversar), el fluido motriz se inyecta por el anular Casing / tubing, para desasentar la bomba y circularla hasta superficie.

**Figura 7. Facilidades en superficie para bombeo hidráulico**



Fuente: LAKE, Larry W. Petroleum Engineering Handbook. Production operations Engineering. Joe Dunn Clegg, Editor. Manufactured in the United States of America. Vol. IV. Cap.14. 714 p. ISBN 978-1-55563-135-2.

**3.3.1.3 Sistemas de tratamiento.** “Este tipo de sistemas de tratamiento para BH se dividen en abiertos y cerrados, las instalaciones para bombeo hidráulico tipo jet pertenecen a sistemas de fluido motriz abierto, tienen como principal característica que todo el fluido producido desde el pozo, tanto producción como fluido motriz, debe pasar a través de la facilidad de tratamiento superficial”<sup>23</sup>.

<sup>23</sup> Ibid., p.42.

En los sistemas cerrados, el fluido retorna a superficie en una tubería separada y no necesita pasar a través de las facilidades de tratamiento. Generalmente este tipo de sistema se emplea para BH tipo pistón.

### **3.3.2 Equipos de subsuelo.**

**3.3.2.1 Completamiento convencional – Circulación en directa.** Consiste en un circuito hidráulico conformado por tubería de producción, una camisa o cavidad, un empaque y la tubería de revestimiento de producción. La bomba jet se instala en la camisa o cavidad, hidráulicamente o con equipo de *slickline*, se conecta directamente con el tubing. El fluido motriz se direcciona a través de la tubería de producción y la mezcla de fluido motriz con la producción de fluidos del pozo retornan a la superficie por el espacio anular Casing / tubing. La bomba jet puede reversarse y recuperarse hidráulicamente.

**3.3.2.2 Completamiento convencional – Circulación en reversa.** El completamiento convencional con circulación en reversa tiene los mismos componentes y características del completamiento con circulación en directa. La diferencia consiste en que el circuito hidráulico de operación se hace bombeando fluido motriz por el Casing y produciendo por tubing. Este tipo de completamientos es ideal para pozos verticales, desviados, someros o profundos, que produzcan arena o tengan RGLs altas. También se emplea para pozos en pruebas donde se requiera tener fluidos producidos muy rápido.

**3.3.2.3 Completamiento en sartas concéntricas.** Este tipo de completamientos se usa en pozos donde se requiere aislar los fluidos producidos de las paredes del Casing de producción o cuando se desea un pasaje para ventear gas. El fluido motriz se inyecta por la tubería paralela y el fluido de retorno se dirige a superficie a través del espacio anular tubería paralela / tubing de producción. El espacio anular Casing / tubing sirve como conducto para ventear el gas. Para obtener el máximo provecho a esta característica se debe instalar la bomba jet por debajo de las perforaciones.

Este tipo de configuraciones son ideales para pozos de baja presión de fondo y de baja productividad. Normalmente no requiere empaques, sin embargo en pozos que producen fluidos corrosivos como CO<sub>2</sub> o H<sub>2</sub>S, se puede colocar un *packer* por encima de las perforaciones para aislar el Casing de estos fluidos, ya que generalmente alcanzarían un nivel por encima de la bomba<sup>24</sup>.

Otras de las ventajas es que se puede medir niveles de fluido y se puede instalar para operar en directa o en reversa. Las principales configuraciones de tubing / tubería concéntrica son de los siguientes tamaños: 4-1/2" x 2-3/8", 3-1/2" x 1-1/4" y 2-7/8" x 1".

### **3.3.3 Tipos de bombas jet**

**3.3.3.1 Bomba jet directa.** La bomba jet convencional o directa, la inyección del fluido motriz se realiza por el tubing y el fluido de retorno se produce por el espacio anular Casing / tubing. Se utiliza para pruebas y producción permanente de pozos. Se puede instalar y recuperar hidráulicamente o con unidad de slickline. Algunos modelos especiales incorporan una válvula de cierre de fondo y permiten acoplar sensores electrónicos de presión y temperatura o muestreadores de fluido.

---

<sup>24</sup> Ibid., p.26

**3.3.3.2 Bomba jet reversa.** “La bomba jet reversa, el fluido motriz se inyecta por el espacio anular y la producción (fluido de formación más fluido motriz) retorna por el tubing. Los fluidos del yacimiento, se recuperan una vez que la capacidad de la tubería de producción que se encuentra sobre la bomba ha sido desplazada, implica un ahorro de tiempo respecto a sistemas de inyección por directa”<sup>25</sup>. Se utiliza para obtener datos de producción del yacimiento en forma rápida, habitualmente en evaluaciones para pozos exploratorios.

Otras aplicaciones incluyen la producción de fluido corrosivo y la recuperación de ácidos y solventes, donde se desea salvaguardar la integridad de la tubería de revestimiento. Se utiliza también para pozos con producción de arena. Únicamente puede recuperarse con unidad de slickline, debido a que posee patas de anclaje.

**3.3.4 Relación de tamaño boquilla / garganta.** Para la configuración de la bomba jet se debe tener en cuenta la relación de áreas entre la boquilla y la garganta. La cual debe estar ente 0.2 – 0.6.

$$F_{aD} = \frac{A_n}{A_t} \quad (26)$$

Donde:

An: Área de la boquilla

At: Área de la garganta.

Si la FaD es baja, la bomba jet sería ineficiente debido a que el chorro es pequeño con respecto al volumen de fluido de producción a mover. El chorro pierde energía al interactuar con un volumen grande de fluido.

Si la relación de FaD es alta, la bomba jet sería ineficiente debido a que el chorro sería muy grande con respecto al volumen de fluido de producción a mover. El

---

<sup>25</sup> Ibid., p.35

chorro estrangularía la producción del pozo al dejar un área anular relativamente pequeña<sup>26</sup>.

**3.3.5 Cavitación.** La cavitación en las bombas jet se produce cuando la presión del fluido disminuye hasta la presión de saturación, esto provoca que se formen burbujas de vapor. Al alcanzar dicha presión se produce un colapso de las burbujas y esto a su vez causa erosión en la bomba, lo que provoca un mal funcionamiento<sup>27</sup>.

En resumen, el sistema de levantamiento artificial por bombeo hidráulico normalmente se usa en áreas donde otros tipos de levantamiento artificial han fallado o, debido a las condiciones del pozo, se han eliminado debido a sus deficiencias. Los sistemas de bombeo hidráulico se han implementado donde el uso de otros métodos de levantamiento artificial puede no ser factible. Estos incluyen, entre otros, los siguientes:

- Usar bombas hidráulicas libres en áreas remotas donde los costos de la plataforma son inusualmente altos o la disponibilidad de plataformas de reacondicionamiento es limitada.
- Pozos desviados
- Uso de sistemas hidráulicos en pozos relativamente profundos, calientes y de gran volumen. (Las bombas hidráulicas pueden atravesar la tubería con una acumulación de hasta 24° por cada 100 pies).
- El uso en pozos arenosos y corrosivos.
- El uso en pozos profundos con baja presión de producción de fondo de pozo.

---

<sup>26</sup> BOMBEO HIDRÁULICO PARA INGENIEROS. Production and Lifting Services SAS. ALIPPIO Giovanni. 2018. Bogotá, Colombia. 260 diapositivas.

<sup>27</sup> ARIAS BAUTISTA, David. Análisis técnico-económico comparativo para el cambio de fluido motriz de petróleo por agua de formación del sistema hidráulico en el campo Sacha. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. 2017. p 28.

- Pozos con volúmenes de producción que cambian rápidamente.

#### **4. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE SLA POR BH Y PCP**

Para el diseño de un sistema de levantamiento artificial se deben tener en cuenta parámetros cuantitativos tales como: profundidad, temperatura de fondo, índice de productividad, punto medio de perforados, relación gas líquido, tasa de producción, corte de agua y presión estática de yacimiento. Entre los parámetros cualitativos se destacan: ubicación del pozo, volumen de gas disponible, disponibilidad de fuente eléctrica, método de declinación, tipo de completamiento.

Es importante a la hora de realizar los diseños de SLA, tener presentes las condiciones especiales de producción que presenta el pozo AC-01, las cuales incluyen una relación gas – petróleo superior a 500 (scf/STB) y las características incrustantes del agua de producción.

#### **4.1 DATOS REQUERIDOS**

##### **4.1.1 Datos de yacimiento y producción.**

- Presión estática de yacimiento
- Presión de cabeza de pozo.
- Temperatura de fondo de pozo.
- Índice de productividad.
- Tasa de producción deseada.
- Presión de fondo fluyente.
- Porcentaje de agua y sedimentos (%S&W).
- Relación de gas / petróleo (GOR).

##### **4.1.2 Características de los fluidos.**

- Gravedad específica del agua y del gas.
- API del petróleo.

- Presión de burbuja.
- Factor volumétrico para cada fase.
- Viscosidad del petróleo.

#### 4.1.3 Datos de pozo.

- Especificaciones del Casing. Tamaño, peso y grado.
- Especificaciones del Tubing. Tamaño, peso y grado.
- Especificaciones de la sarta de varillas. Tamaño, peso y grado.
- Profundidad de los intervalos perforados en MD y TVD.
- Profundidad de asentamiento de la bomba en MD y TVD.

#### 4.1.4 Problemas posibles.

- Producción de arena.
- Formación de escamas.
- Deposición de parafinas.
- Corrosión
- Emulsiones.

Para realizar el diseño de los sistemas de levantamiento artificial PCP y BH para el pozo AC-01 se establecen los siguientes parámetros:

**Tabla 2. Características de los fluidos.**

| CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS POZO AC-01 |       |           |
|-------------------------------------------|-------|-----------|
| PARÁMETROS                                | Valor | Unidad    |
| Gravedad específica del agua              | 1,03  | -         |
| API del petróleo                          | 28    | °API      |
| Gravedad específica del gas               | 0,75  | -         |
| Presión de burbuja                        | 2235  | psi       |
| Viscosidad del petróleo                   | 40,2  | cP @ 80°F |

Fuente: Autor

**Tabla 3. Datos de yacimiento y producción**

| DATOS DE YACIMIENTO Y PRODUCCIÓN POZO AC-01 |       |         |
|---------------------------------------------|-------|---------|
| PARÁMETROS                                  | Valor | Unidad  |
| Presión estática de yacimiento              | 1720  | psi     |
| Presión de cabeza de pozo                   | 60    | psi     |
| Temperatura de fondo de pozo                | 180   | °F      |
| Índice de productividad                     | 1,75  | Bbl/psi |
| Tasa de producción deseada                  | 500   | BPD     |
| Presión de fondo fluyente                   | 1410  | psi     |
| Porcentaje de agua y sedimentos (S&W)       | 35    | %       |
| Relación de gas / petróleo (GOR)            | 550   | scf/STB |

Fuente: Autor

**Tabla 4. Datos de pozo**

| DATOS DE POZO AC-01                                         |                            |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------|
| PARÁMETROS                                                  | ESPECIFICACIONES           |
| Especificaciones del Casing. Tamaño y peso                  | 7" * 26 lb/ft * ID: 6,151  |
| Especificaciones del Tubing. Tamaño y peso                  | 3,5" * 9,3 lb/ft ID: 2,867 |
| Especificaciones de sarta de varillas. Tamaño, peso y grado | 1" * 7/8" Grado D          |
| Profundidad de asentamiento de la bomba en MD y TVD         | 4980' MD - 4530' TVD       |
| Profundidad de los intervalos perforados en MD y TVD        | 5350' MD - 4925' TVD       |

Fuente: Autor

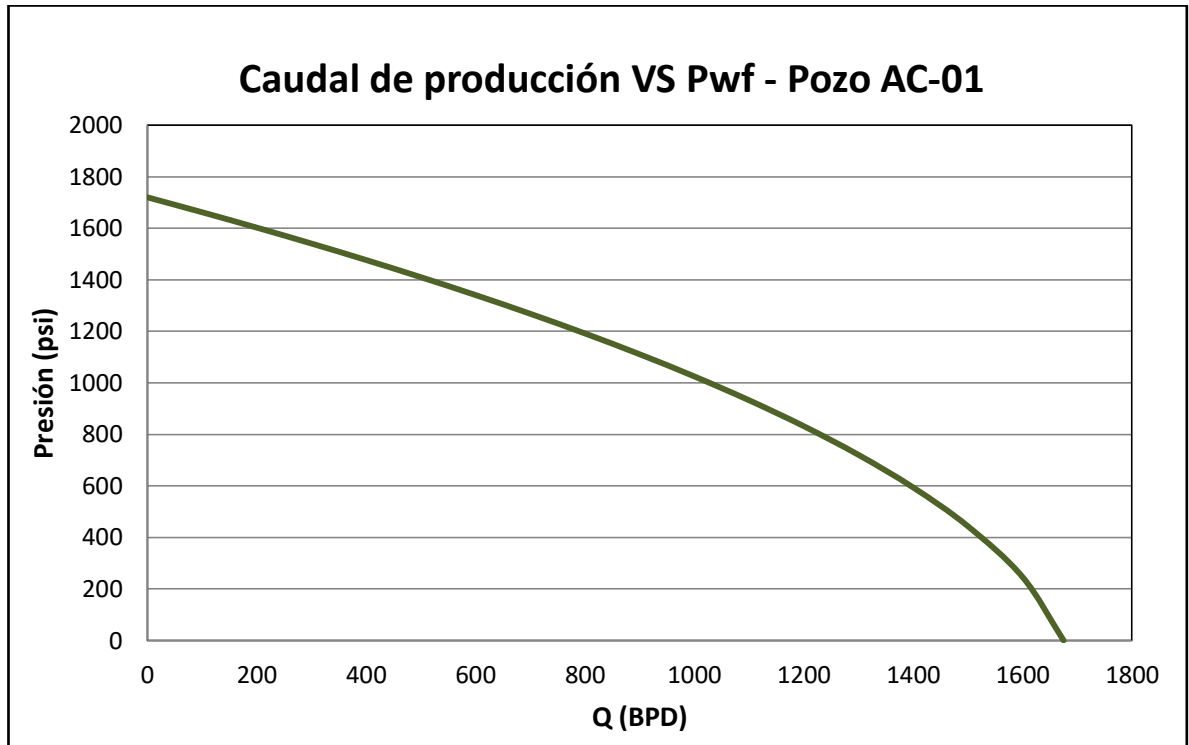
## 4.2 ÍNDICE DE PRODUCTIVIDAD

Acorde a los datos establecidos para el pozo AC-01, se observa que la presión de burbuja es mayor que la presión de yacimiento, esto indica que es un yacimiento saturado o con capa de gas. Para calcular el IP se emplea la ecuación de Vogel.

$$IP = \frac{1.8 * Q}{Py * \left( 1 - 0.2 * \left( \frac{P_{wf}}{Py} \right) - 0.8 * \left( \frac{P_{wf}}{Py} \right)^2 \right)} \quad (27)$$

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{IP * Py}{1.8} \quad (28)$$

**Figura 8. Curva IPR pozo AC- 01**



Fuente: Autor

### 4.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS FLUIDOS

#### 4.3.1 Gravedad específica del petróleo.

$$SG_o = \frac{141.5}{API + 131.5} \quad (29)$$

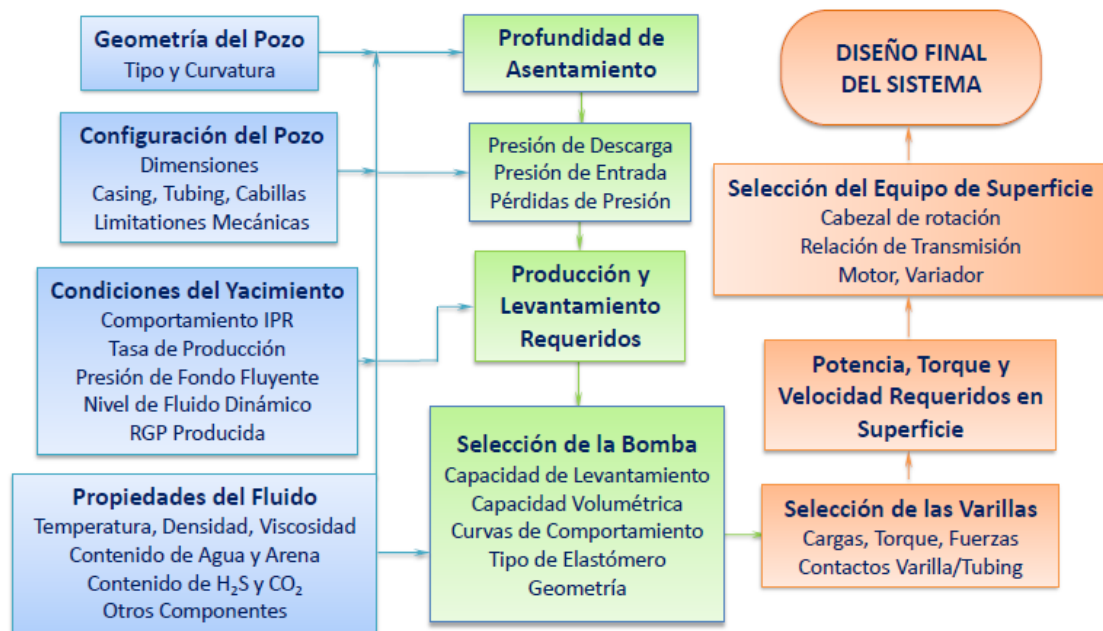
#### 4.3.2 Gravedad específica de la mezcla.

$$SG_M = (SG_w * S\&W) + (1 - S\&W) * SG_o \quad (30)$$

#### 4.4 DISEÑO SLA BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS

Con base en las variables de diseño para los sistemas de levantamiento artificial presentadas en el capítulo 3 de este trabajo, se construyó una plantilla en el programa *Excel* para realizar los cálculos correspondientes.

**Figura 9. Diseño SLA bombeo de cavidades progresivas**



Fuente: CALVETE GONZALEZ Fernando y MONTES PAEZ Erick. Sistemas de levantamiento artificial. Cap. 1. Bucaramanga. 2017.

##### 4.4.1 Cálculo del caudal teórico

El caudal de la bomba se puede extraer de la información del catálogo, sin embargo, se detalla el procedimiento para el cálculo del caudal teórico del desplazamiento de la bomba PCP de geometría *single-lobe* (Ver tabla 5).

##### 4.4.2 Carga dinámica total

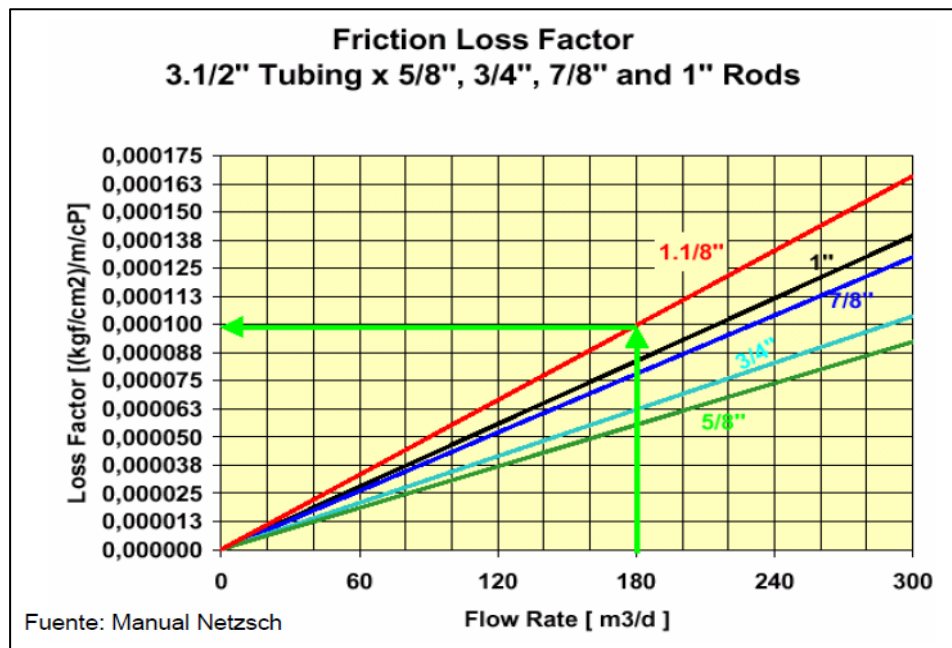
La carga dinámica total (presión total sobre la impulsión de la bomba) está dada por los siguientes términos (Ver tabla 6).

Tabla 5. Caudal teórico BCP

| CÁLCULO DE CAUDAL TEÓRICO                                                                     |           |                       |                             |     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------------|-----|----|
| Dimensiones del diseño de la bomba                                                            |           |                       |                             |     |    |
| D =                                                                                           | 57        | mm                    | Pe =                        | 320 | mm |
| d =                                                                                           | 38        | mm                    | Pr =                        | 160 | mm |
| E =                                                                                           | 9,5       | mm                    |                             |     |    |
| El área generada por cada cavidad es:                                                         |           |                       |                             |     |    |
| $A = 4 * d * E$                                                                               |           |                       |                             |     |    |
| A =                                                                                           | 14,44     | cm <sup>2</sup>       |                             |     |    |
| El volumen producido por cada vuelta del rotor                                                |           |                       |                             |     |    |
| $V = A * Pe$                                                                                  |           |                       |                             |     |    |
| V =                                                                                           | 462,08    | cm <sup>3</sup>       |                             |     |    |
| V =                                                                                           | 0,0004621 | m <sup>3</sup>        |                             |     |    |
| El caudal (Q) es directamente proporcional al desplazamiento y a la velocidad de rotación (N) |           |                       |                             |     |    |
| $Q = V * N = V * \text{rpm} = 1 / \text{min}$                                                 |           |                       |                             |     |    |
| Q =                                                                                           | 0,6654    | m <sup>3</sup> /d/rpm | Constante volumétrica ( C ) |     |    |

Fuente: Autor

Figura 10. Factor de pérdida de carga por fricción



**Tabla 6. Carga dinámica total TDH**

| CARGA DINÁMICA TOTAL                                                          |             |                          |                             |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------|-----------------------------|
| <b>1. THP</b>                                                                 |             |                          |                             |
|                                                                               | <b>psi</b>  | <b>kg/cm<sup>2</sup></b> |                             |
| <b>THP</b>                                                                    | 60          | 4,218                    |                             |
| <b>CHP</b>                                                                    | 40          | 2,812                    |                             |
| <b>2. Pfricción: Pérdida de carga por fricción entre varilla y tubing</b>     |             |                          |                             |
| Pfricción = Long. Tubing * Factor de pérdida de carga * Viscosidad            |             |                          |                             |
|                                                                               | <b>pies</b> | <b>metros</b>            |                             |
| <b>Long. Tubing</b>                                                           | 4530        | 1381                     |                             |
| <b>Factor pérdida de carga</b>                                                |             | 0,000038                 | (kgf/cm <sup>2</sup> )/m*cP |
|                                                                               |             | 0,0001647                | PSI/ft*cP                   |
| <b>Viscosidad del fluido</b>                                                  |             | 40,2                     | cP @ 80 °F                  |
| <b>Pfricción =</b>                                                            |             | <b>2,11</b>              | <b>kgf/cm<sup>2</sup></b>   |
| <b>3. Pnivel: Presión de la columna de líquido a elevar (nivel dinámico)</b>  |             |                          |                             |
| Pnivel (kg/cm <sup>2</sup> ) = nivel (m) * densidad (g/cm <sup>3</sup> ) / 10 |             |                          |                             |
|                                                                               | <b>pies</b> | <b>metros</b>            |                             |
| <b>Nivel</b>                                                                  | 2020        | 616                      |                             |
| <b>Densidad del agua</b>                                                      |             | 1,03                     | g/cm <sup>3</sup>           |
| <b>Pnivel =</b>                                                               |             | <b>63,4</b>              | <b>kgf/cm<sup>2</sup></b>   |
| <b>Presión Total = THP + Pfricción + Pnivel</b>                               |             |                          |                             |
| <b>Presión Total =</b>                                                        |             | <b>69,7</b>              | <b>kgf/cm<sup>2</sup></b>   |

Fuente: Autor

**4.4.3 Cálculo de potencia consumida.** La selección del motor se realiza a través de la potencia requerida, la cual se determina calculando la potencia hidráulica y la eficiencia de la bomba. Ver tabla 7

**Tabla 7. Cálculo de potencia consumida**

| CÁLCULO DE POTENCIA CONSUMIDA                                                                   |             |                        |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------|-----------|
| POTENCIA HIDRÁULICA (HHP) = CAUDAL (m <sup>3</sup> /d) * PRESION (kg/cm <sup>2</sup> ) * 0,0014 |             |                        |           |
| POTENCIA CONSUMIDA = (HHP) / n                                                                  |             |                        |           |
|                                                                                                 | <b>BPD</b>  | <b>m<sup>3</sup>/d</b> |           |
| <b>CAUDAL</b>                                                                                   | 500         | 79                     |           |
| <b>POTENCIA HIDRÁULICA (HHP) =</b>                                                              |             | <b>7,8</b>             | <b>HP</b> |
| EFICIENCIA DE BOMBAS PCP (0,6 - 0,7)                                                            |             |                        |           |
| <b>n =</b>                                                                                      | <b>0,65</b> |                        |           |
| <b>POTENCIA CONSUMIDA =</b>                                                                     |             | <b>12</b>              | <b>HP</b> |

Fuente: Autor

#### 4.4.4 Cálculo de torques.

**Tabla 8. Cálculo de torques**

| 6. CÁLCULO DE TORQUES                                     |                                          |             |               |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------|---------------|
| Torque Total = T. Hidráulico + T. Fricción + T. Resistivo |                                          |             |               |
| <b>6.1 T.Hidráulico = K * HP / RPM</b>                    |                                          |             |               |
| Para determinar las RPM de operación estimadas:           |                                          |             |               |
| <b>RPM =</b>                                              | <b>Q (m3/d) / C / % Eficiencia bomba</b> |             |               |
| <b>% Eficiencia bomba =</b>                               | 95,7%                                    |             |               |
| <b>RPM =</b>                                              | <b>125</b>                               |             |               |
| <b>K =</b>                                                | 5252                                     | lb*ft       |               |
| <b>T. Hidráulico =</b>                                    |                                          | <b>502</b>  | <b>lb* ft</b> |
| <b>T. Hidráulico =</b>                                    |                                          | <b>681</b>  | <b>N * m</b>  |
| Torque Resistivo                                          |                                          |             |               |
| T.Res = (C * Dr <sup>3</sup> * L * μ * N) / (Dt - Dr)     |                                          |             |               |
| <b>C =</b>                                                | 2,381E-08                                |             |               |
| <b>L =</b>                                                | 4530                                     | ft          |               |
| <b>μ =</b>                                                | 40,2                                     | cP          |               |
| <b>N =</b>                                                | 125                                      | RPM         |               |
| <b>Dr =</b>                                               | 1                                        | In          |               |
| <b>Dt =</b>                                               | 2,867                                    | In          |               |
| <b>Torque Resistivo =</b>                                 |                                          | <b>0,29</b> | <b>lb* ft</b> |
| <b>Torque Resistivo =</b>                                 |                                          | <b>0,39</b> | <b>N * m</b>  |
| Torque por fricción                                       |                                          |             |               |
| <b>T. Fricción =</b>                                      |                                          | <b>85</b>   | <b>N * m</b>  |
| <b>T. Fricción =</b>                                      |                                          | <b>63</b>   | <b>lb* ft</b> |
| <b>T. Total =</b>                                         |                                          | <b>767</b>  | <b>N * m</b>  |
| <b>T. Total =</b>                                         |                                          | <b>565</b>  | <b>lb* ft</b> |

Fuente: Autor

#### 4.4.5 Cálculo de esfuerzos axiales

Tabla 9. Cálculo de esfuerzos axiales

| CÁLCULO DE ESFUERZOS AXIALES                                                                                                                          |             |                 |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|--|
| Debido al peso de las varillas                                                                                                                        |             |                 |  |
| <b>F1 = Long. Varillas (m) * Peso por varilla (kg/m)</b>                                                                                              |             |                 |  |
| Peso Varilla 1" grado D                                                                                                                               | 4,203       | kg/m            |  |
| <b>F1 =</b>                                                                                                                                           | <b>5803</b> | <b>kg</b>       |  |
| 7.2 Debido a la presión sobre la bomba                                                                                                                |             |                 |  |
| <b>F2 = Presión total * Área efectiva</b>                                                                                                             |             |                 |  |
| Área efectiva = Área proyectada del rotor menos área de la varilla de bombeo ( $\pi/4 \cdot (D_{\text{rotor}}^2 - (645,16 \cdot D_{\text{rod}}^2))$ ) |             |                 |  |
| Área efectiva =                                                                                                                                       | 20,45       | cm <sup>2</sup> |  |
| <b>F2 =</b>                                                                                                                                           | <b>1426</b> | <b>kg</b>       |  |
| <b>F = F1 + F2</b>                                                                                                                                    |             |                 |  |
| <b>F =</b>                                                                                                                                            | <b>7230</b> | <b>kg</b>       |  |

Fuente: Autor

#### 4.4.6 Cálculo de tensiones combinadas.

Tabla 10. Cálculo de tensiones combinadas

| CÁLCULO DE TENSIONES COMBINADAS                                            |             |                          |  |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------|--|
| <b>Axial (Tensión a la tracción): <math>\sigma</math></b>                  |             |                          |  |
| $\sigma = F / \text{Área de la barra}$                                     |             |                          |  |
| Área de la barra =                                                         | 5,07        | cm <sup>2</sup>          |  |
| <b><math>\sigma =</math></b>                                               | <b>1427</b> | <b>kg/cm2</b>            |  |
| <b>8.2 Tangencial (Tensión a la torsión) : T</b>                           |             |                          |  |
| $T = M. \text{Torsor} / Wt$                                                |             |                          |  |
| M. Torsor = Torque Calculado =                                             | 565         | lb*ft                    |  |
| M. Torsor = Torque Calculado =                                             | 78.2        | kg*m                     |  |
| $Wt = \text{Módulo de resistencia polar} = Jp / \text{Radio de la barra}$  |             |                          |  |
| Radio de la barra =                                                        | 1,27        | cm                       |  |
| $Jp = \pi \cdot d^4 / 32 =$                                                | 4,09        | cm <sup>4</sup>          |  |
| Wt =                                                                       | 3,22        | cm <sup>3</sup>          |  |
| <b>T =</b>                                                                 | <b>2429</b> | <b>kg/cm<sup>2</sup></b> |  |
| <b>Tensión Combinada = <math>((\sigma^2) + (4 \cdot T^2))^{0,5}</math></b> |             |                          |  |
| <b>Tensión Combinada =</b>                                                 | <b>5064</b> | <b>kg/cm<sup>2</sup></b> |  |

Fuente: Autor

**4.4.7 Cálculo de estiramiento de varillas.** Una vez conectado el rotor de la bomba con sarta de varillas de bombeo, se debe ajustar la medida de dicha sarta para garantizar que el rotor trabaje dentro del estator durante su operación.

**Tabla 11. Cálculo de estiramiento de varillas**

| CÁLCULO DE ESTIRAMIENTO DE VARILLAS                                                                               |         |                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------|
| $X = \Delta L + \Delta LT + D$                                                                                    |         |                    |
| $\Delta L = \text{Elongación debido a la carga axial por presión diferencial}$<br>$= (L_o * F_2) / (E * S)$       |         |                    |
| $L_o = \text{Longitud de la sarta de varillas (cm)}$                                                              |         |                    |
| $F_2 = \text{Carga axial debido a la presión diferencial sobre la bomba}$                                         |         |                    |
| $E = \text{módulo de elasticidad del acero}$                                                                      |         |                    |
| $S = \text{Área transversal de la barra (cm}^2\text{)}$                                                           |         |                    |
| $E =$                                                                                                             | 2000000 | kg/cm <sup>2</sup> |
| $\Delta L =$                                                                                                      | 19      | cm                 |
| $\Delta LT = \text{Elongación debido a dilatación térmica (solo se considera si se instala un ancla de tensión)}$ |         |                    |
| $D = \text{Longitud de niple de paro}$                                                                            |         |                    |

Fuente: Autor

**Tabla 12. Resumen de resultados de diseño de SLA por PCP**

| RESUMEN DE RESULTADOS    |        |                       |
|--------------------------|--------|-----------------------|
| PARÁMETRO                | VALOR  | UNIDAD                |
| Caudal teórico           | 0,6654 | m <sup>3</sup> /d/rpm |
| Carga dinámica total     | 69,7   | kgf/cm <sup>2</sup>   |
| Potencia consumida       | 12     | HP                    |
| Torques (Th+Tf+Tr)       | 565    | lb*ft                 |
| Esfuerzos axiales        | 7230   | kg                    |
| Tensiones combinadas     | 5064   | kgf/cm <sup>2</sup>   |
| Estiramiento de varillas | 19     | cm                    |

Fuente: Autor

**4.4.8 Selección del cabezal.** Para la selección del cabezal se debe tener en cuenta la carga axial y la potencia consumida. Se toma como ejemplo el manual de cabezales de NETZSCH.

**Figura 11. Manual de cabezales de NETZSCH**

| MODELOS       | Carga Axial |      | HP<br>[range] | Veloc. <sup>(1)</sup><br>rpm | Rel.<br>Reduc. | DIMENSIONES |                                        |                       |           |
|---------------|-------------|------|---------------|------------------------------|----------------|-------------|----------------------------------------|-----------------------|-----------|
|               | lbf         | kgf  |               |                              |                | A [mm]      | B <sup>(2)</sup><br>2000 psi<br>3.1/8" | C <sup>(3)</sup> [mm] | D [pol.]  |
| NDH 010 DH 5  | 5000        | 2300 | ≤ 10          | 135 - 374                    | 1 : 1          | 842         | 2000 psi<br>3.1/8"                     | -                     | 1.1/8     |
| NDH 030 DH 9  | 9000        | 4100 | ≤ 30          | 135 - 374                    | 1 : 1          | 1115        | 2000 psi<br>3.1/8"                     | -                     | 1.1/2     |
| NDH 020 DH 20 | 20000       | 9000 | ≤ 20          | 129 - 317                    | 1 : 1          | 1200        | 2000 psi<br>3.1/8"                     | -                     | 1.1/4     |
| NDX 030 DH 20 | 20000       | 9000 | ≤ 30          | 129 - 317                    | 1 : 1          | 1200        | 2000 psi<br>3.1/8"                     | -                     | 1.1/4     |
| NDH 060 DH 20 | 20000       | 9000 | ≤ 60          | 110 - 450                    | 1 : 1          | 1495        | 2000 psi<br>3.1/8"                     | -                     | 1.1/2     |
| NDH 060 DS 20 | 20000       | 9000 | ≤ 60          | 110 - 450                    | 1 : 1          | 1495        | 2000 psi<br>3.1/8"                     | -                     | for 1.1/8 |
| NDH 075 DH 20 | 20000       | 9000 | ≤ 75          | 160 - 450                    | 1 : 1          | 1464        | 2000 psi<br>3.1/8"                     | -                     | 1.1/2     |
| NDX 075 DH 20 | 20000       | 9000 | ≤ 75          | 160 - 450                    | 1 : 1          | 1464        | 2000 psi<br>3.1/8"                     | -                     | 1.1/2     |
| NDH 075 DS 20 | 20000       | 9000 | ≤ 75          | 160 - 450                    | 1 : 1          | 1464        | 2000 psi<br>3.1/8"                     | -                     | for 1.1/8 |

Fuente: CALVETE GONZALEZ Fernando y MONTES PAEZ Erick. Sistemas de levantamiento artificial. Cap. 1. Bucaramanga. 2017.

**4.4.9 Selección del elastómero.** La correcta elección del elastómero y su interferencia con el rotor depende en gran medida la vida útil de la BCP.

Acorde con las características fisicoquímicas de los fluidos del pozo AC-01, la profundidad de la bomba y la temperatura de fondo, es recomendable que el elastómero de la bomba sea de alto nitrilo. (Ver figuras 12 y 13).

**Figura 12. Tipos de elastómeros**

| Nombre de Referencia de Elastómero | Código de Referencia de Elastómero                     | Características                                                                                     | Aplicaciones Típicas                                                                                 |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Buna                               | * 0366/68<br>* N080<br>* 0311 (Medio-Nitrilo)<br>* 590 | *Excelentes Propiedades Mecánicas y de Desgaste.                                                    | * Crudo Pesado (<15 API)<br>*Desagüe de Lechos de Metano de Carbón<br>*Pozos de Fuente de Agua       |
| Buna Suave                         | * G062A<br>*590-55<br>*0366/055                        | *Excelentes Propiedades Mecánicas y de Desgaste.<br>*Dureza más baja comparada con el Buna regular. | * Crudo Pesado (<15 API)<br>*Altas concentraciones de arena y residuos foráneos (ej. Pirita Férrica) |
| Alto Nitrilo                       | * G60<br>*0356<br>*68                                  | *Excelentes Propiedades Mecánicas y de Desgaste.<br>*Mejor resistencia a los Aromáticos.            | * Crudo Liviano (>15 API)                                                                            |

Fuente: CALVETE GONZALEZ Fernando y MONTES PAEZ Erick. Sistemas de levantamiento artificial. Cap. 1. Bucaramanga. 2017.

**Figura 13. Características de los elastómeros**

| Características              |  | Tipo de Elastomero |         |                |                |                |
|------------------------------|--|--------------------|---------|----------------|----------------|----------------|
|                              |  | Buna               |         | Alto Nitrilo   | Hidrogenado    | Viton          |
|                              |  | Suave              | Medio   |                |                |                |
| Elastomeros Weatherford      |  | NBRM 55<br>NBRM 64 | NBRM 70 | NBRA 70        | HNBR (P)       | FKM            |
|                              |  | 590-55             | 590     | 68A-1          | 45C (P)        |                |
|                              |  | 366/55             | 366     | 356            |                | HTR            |
|                              |  | G62A               | N080    | G60            |                |                |
| Propiedades Mecánicas        |  | Excelente          |         | Bueno          | Bueno          | Pobre          |
| Resistencia a la Abrasión    |  | Muy Bueno          |         | Bueno          | Bueno          | Pobre          |
| Resistencia a los Aromáticos |  | Bueno              |         | Muy Bueno      | Bueno          | Excelente      |
| Resistencia al H2S           |  | Bueno              |         | Muy Bueno      | Excelente      | Excelente      |
| Resistencia al Agua          |  | Muy Bueno          |         | Bueno          | Excelente      | Excelente      |
| Límite de Temperatura        |  | 95° C (203°F)      |         | 105° C (221°F) | 135° C (275°F) | 150° C (302°F) |

Fuente: CALVETE GONZALEZ Fernando y MONTES PAEZ Erick. Sistemas de levantamiento artificial. Cap. 1. Bucaramanga. 2017.

## 4.5 DISEÑO DE SLA POR BH TIPO JET

**4.5.1 Criterios de diseño.** Los criterios utilizados para el diseño del SLA con bomba jet son los siguientes:

- La bomba jet debe ubicarse a una inclinación máxima de 60°, para facilitar la operación con unidad de *slickline* para abrir la camisa deslizante o para recuperar la bomba jet.
- Los diseños se realizan para emplear la bomba jet en directa. De este modo se puede recuperar la bomba jet hidráulicamente.
- El caudal de inyección máximo está limitado por el caudal que puedan manejar las tuberías, válvulas y accesorios que conducen el fluido motriz desde las facilidades de superficie hasta el pozo productor.
- Se debe seleccionar la configuración boquilla y garganta que permita manejar un rango de producción (dado por la IPR), con el menor gasto de potencia hidráulica. Para esto se utiliza el programa NCPCv4-GR.
- Con base en los requerimientos de potencia hidráulica (presión y caudal), se selecciona el equipo en superficie que pueda proveer el fluido motriz para lograr esta producción.
- Determinar el tipo de fluido motriz, agua o petróleo. Para las condiciones del pozo de estudio (AC-01) se decidió utilizar agua de producción como fluido motriz.
- Determinar limitaciones de presión tales como: máxima presión en el cabezal, máxima presión en el sistema de inyección, etc.

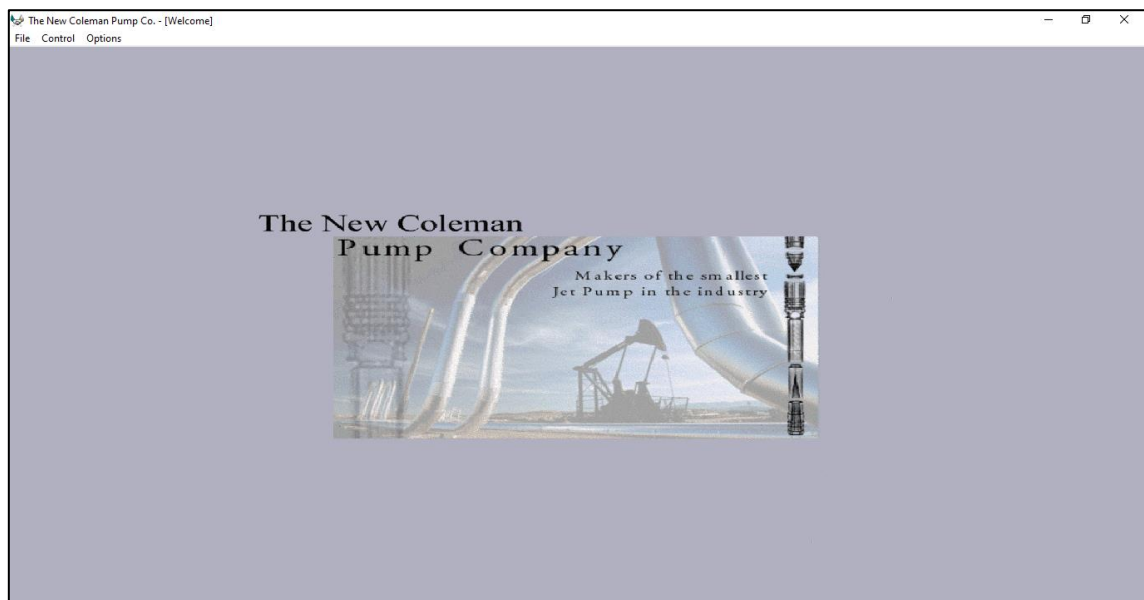
#### 4.5.2 Descripción del programa NCPCv4-GR.

El programa está basado en el Capítulo 6 del Petroleum Engineering Handbook. Consiste en una rutina iterativa que realiza cálculos para determinar el diseño (*SIZING*) de las posibles combinaciones de tamaños de boquilla y garganta. También determina la presión de inyección y la rata optima de fluido motriz para producir el caudal objetivo.

#### 4.5.3 Procedimiento de cálculo.

##### 4.5.3.1 Iniciar el programa The New Coleman Pump Company NCPCv4-GR.

**Figura 14. Pantalla principal del programa NCPCv4-GR.**



Fuente: EADS, Paul. The New Coleman Pump Company. [Programa informático]. Houston, Texas. Copyright 2001. Versión 4-1 – 020106.

##### 4.5.3.2 Ingresar datos:

- *Control – Input Data – Enter New Data*
- *Pump Depth es = TVD bomba*

- *Tubing Depth to Pump* es = MD bomba
- El corte de agua debe ir en fracción (ej. 70% es 0.7)
- *Design Liq Prod Rate* = Q producción.
- *Pumping BHP* = PIP

Los datos deben ser ingresados en totalidad, de lo contrario, el programa no realiza los cálculos. Cada iteración se hace con un valor de caudal de producción (*Design Liq. Prod. Rate*) y su correspondiente presión de entrada a la bomba (*pumping BHP*). Estos datos son obtenidos del cálculo de la curva IPR.

**Figura 15. Ventana de datos de programa NCPCv4-GR.**

The screenshot shows the 'The New Coleman Pump Co. - [DATA INPUT FORM]' window. It contains the following fields and values:

| Field                      | Value                               | Unit    |
|----------------------------|-------------------------------------|---------|
| COMPANY                    | UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER |         |
| LEASE                      | UIS                                 |         |
| WELL IDENTIFICATION        | AC-01                               |         |
| REPRESENTATIVE             | ME                                  |         |
| TUBING ID                  | 2.867                               | Inches  |
| TUBING OD                  | 3.5                                 | Inches  |
| CASING ID                  | 6.151                               | Inches  |
| PUMP DEPTH                 | 4530                                | Feet    |
| TUBING LENGTH TO PUMP      | 4980                                | Feet    |
| POWER FLUID                | Water                               |         |
| BH TEMP                    | 180                                 | Deg F   |
| FLOWING WH TEMP            | 80                                  | Deg F   |
| GAS LIQ. RATIO             | 181                                 | SCF/BBL |
| DESIGN LIQ. PROD. RATE     | 500                                 | BBL/DAY |
| PROD. RETURN               | Annulus                             |         |
| PRODUCED OIL GRAVITY       | 28                                  | API     |
| PROD. WATER GRAV. (Sp.Gr.) | 1.03                                |         |
| PRODUCED GAS GRAVITY       | 0.75                                |         |
| WAT. FRAC. (50% = 0.50)    | 0.35                                |         |
| SURFACE HYD. PRESS.        | 4000                                | psig    |
| PUMPING BHP                | 1077                                | psig    |
| FLOWING WH PRESS.          | 60                                  | psig    |
| Date                       | 05 - julio - 2021                   |         |

Fuente: Ventana de datos programa NCPCv4-GR

#### 4.5.3.3 Realizar el primer cálculo:

- *Control – Compute – Geometry Size Selection*

El programa presenta una tabla de todas las configuraciones de boquillas y gargantas disponibles por debajo del caudal de cavitación, para producir el caudal de producción calculado (Ver figura 16).

**Figura 16. Ventana de resultados programa NCPCv4-GR**

The New Coleman Pump Co. - [Sizing results]  
File Control Options

Calculations for all pumps having an annular area great enough to avoid cavitation. (calc. ASM = .0136)  
Pumps that require Power Fluid Rate greater than 15 times the Design production rate are not calculated.

| Pump Size | Power Press | Power fluid Rate | Horse Power | Max Non-cav. rate | Prod.Rate (bbl/d) | Pumping BHP | Nozzle Area | Throat Area |
|-----------|-------------|------------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| BB-2      | 2582        | 278              | 13          | 554               | 500               | 1306        | .0038       | .0189       |
| A-3       | 2028        | 368              | 14          | 683               | 500               | 1306        | .0055       | .0241       |
| A-3       | 1734        | 475              | 15          | 609               | 500               | 1306        | .0075       | .0241       |
| B-3       | 1676        | 592              | 18          | 536               | 500               | 1306        | .0095       | .0241       |
| B-4       | 1467        | 568              | 15          | 804               | 500               | 1306        | .0095       | .0314       |
| B-5       | 1547        | 577              | 16          | 1046              | 500               | 1306        | .0095       | .038        |
| B-6       | 1731        | 599              | 19          | 1311              | 500               | 1306        | .0095       | .0452       |
| B-4       | 1374        | 636              | 16          | 753               | 500               | 1306        | .0109       | .0314       |
| B-5       | 1395        | 639              | 16          | 995               | 500               | 1306        | .0109       | .038        |
| B-6       | 1533        | 658              | 19          | 1260              | 500               | 1306        | .0109       | .0452       |
| C-4       | 1328        | 708              | 17          | 701               | 500               | 1306        | .0123       | .0314       |
| C-5       | 1288        | 702              | 17          | 944               | 500               | 1306        | .0123       | .038        |
| C-6       | 1386        | 718              | 18          | 1208              | 500               | 1306        | .0123       | .0452       |
| C-7       | 1560        | 745              | 21          | 1498              | 500               | 1306        | .0123       | .0531       |
| C-4       | 1353        | 862              | 22          | 602               | 500               | 1306        | .015        | .0314       |
| C-5       | 1175        | 827              | 18          | 844               | 500               | 1306        | .015        | .038        |
| C-6       | 1198        | 832              | 18          | 1109              | 500               | 1306        | .015        | .0452       |
| C-7       | 1314        | 855              | 21          | 1399              | 500               | 1306        | .015        | .0531       |
| C-8       | 1590        | 907              | 27          | 1877              | 500               | 1306        | .015        | .0661       |
| D-4       | 1550        | 1052             | 30          | 503               | 500               | 1306        | .0177       | .0314       |
| D-5       | 1157        | 963              | 21          | 745               | 500               | 1306        | .0177       | .038        |
| D-6       | 1097        | 949              | 19          | 1010              | 500               | 1306        | .0177       | .0452       |

Fuente: Ventana de resultados programa NCPCv4-GR

#### 4.5.3.4 Selección de tamaños de boquilla y garganta

En la ventana de resultados se debe seleccionar tres configuraciones que cumplan con los siguientes criterios:

- Menor caudal de cavitación calculado para esta configuración.
- Presión de fluido motriz dentro del rango en superficie.
- Caudal de fluido motriz dentro del rango en superficie.
- Menor requerimiento de potencia.

Posterior a la selección de las tres configuraciones boquilla/garganta, se registran los datos de presión, caudal, potencia y caudal de cavitación, en la hoja de cálculo de *Excel*.

#### 4.5.3.5 Cálculo de la siguiente iteración. Volver a la ventana de datos por:

- *Control – Input data – Get Previous Data – Get Last Data*
- Ingresar el siguiente valor de Q y PIP.
- *Control – Compute – Geometry Size Selection.*
- Registrar los datos correspondientes a las configuraciones de boquilla y garganta anteriormente seleccionadas.
- Completar los datos de la hoja de cálculo de Excel, correspondiente a presión y caudal de la curva IPR. (Ver tabla 13).
- Cuando se vuelve a la página de datos, grabar datos iniciales por: *File – Save File*

**Tabla 13. Resultados de las iteraciones**

| Qs<br>BPD | PIP<br>(psi) | CONFIG 1      |             |            |    | CONFIG 2      |             |            |     | CONFIG 3      |             |            |     |
|-----------|--------------|---------------|-------------|------------|----|---------------|-------------|------------|-----|---------------|-------------|------------|-----|
|           |              | P In<br>(psi) | Q In<br>BPD | CAV<br>BPD | HP | P In<br>(psi) | Q In<br>BPD | CAV<br>BPD | HP  | P In<br>(psi) | Q In<br>BPD | CAV<br>BPD | HP  |
| 700       | 874          | 669           | 1263        | 2011       | 16 | 742           | 1293        | 2011       | 18  | 774           | 1504        | 1933       | 22  |
| 800       | 760          | 1124          | 1479        | 1383       | 31 | 1178          | 1498        | 1830       | 33  | 1163          | 1720        | 1759       | 38  |
| 900       | 633          | 1822          | 1745        | 1220       | 45 | 1804          | 1739        | 1614       | 59  | 1723          | 1977        | 1552       | 64  |
| 1000      | 490          | 2971          | 2095        | 1020       | 88 | 2771          | 2045        | 1350       | 107 | 2640          | 2318        | 1298       | 116 |

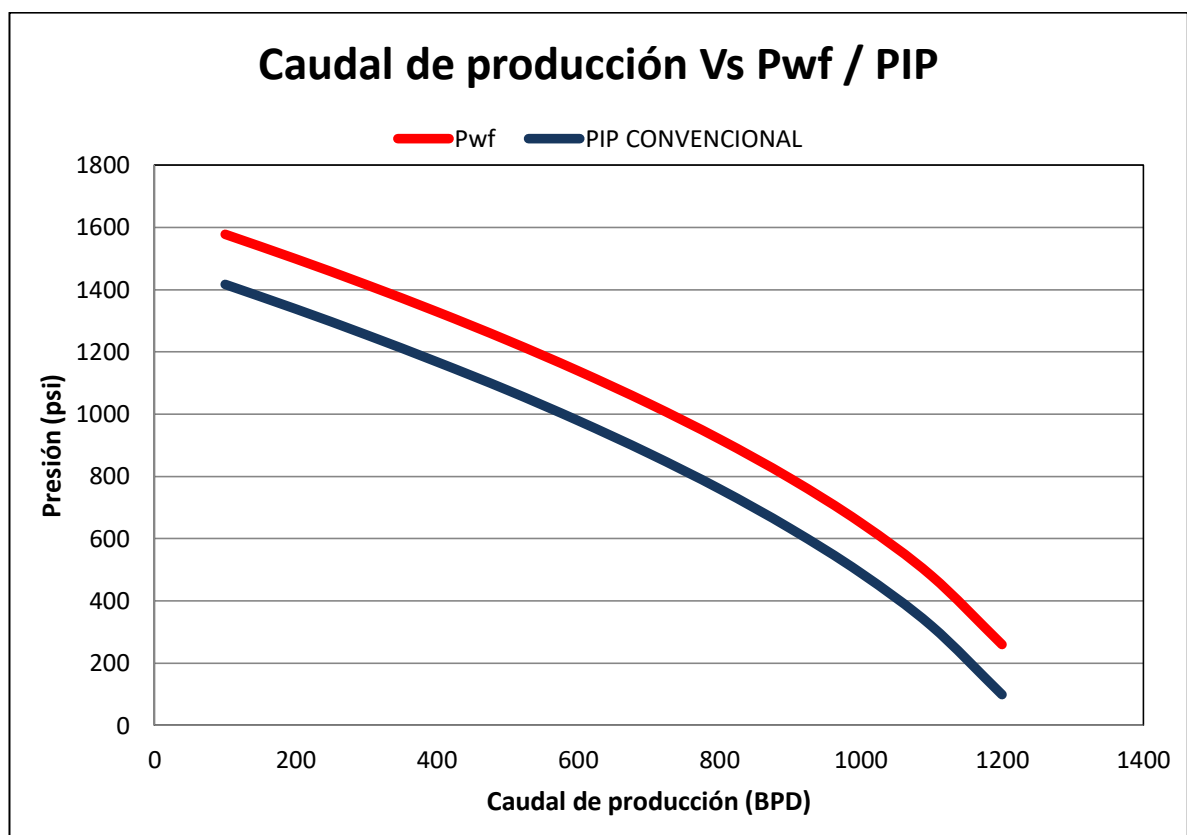
Fuente: Autor

## 4.6 ANÁLISIS DE DISEÑO

De las tres configuraciones predeterminadas, se selecciona aquella que logre la máxima producción con el menor requerimiento de potencia.

Para determinar el diseño final, se realizan varias graficas (caudal de producción vs caudal de inyección, caudal de producción vs presión de inyección, caudal de producción vs potencia hidráulica) que muestran el comportamiento de las variables del bombeo hidráulico y son una guía para la correcta selección de tamaños boquilla/garganta.

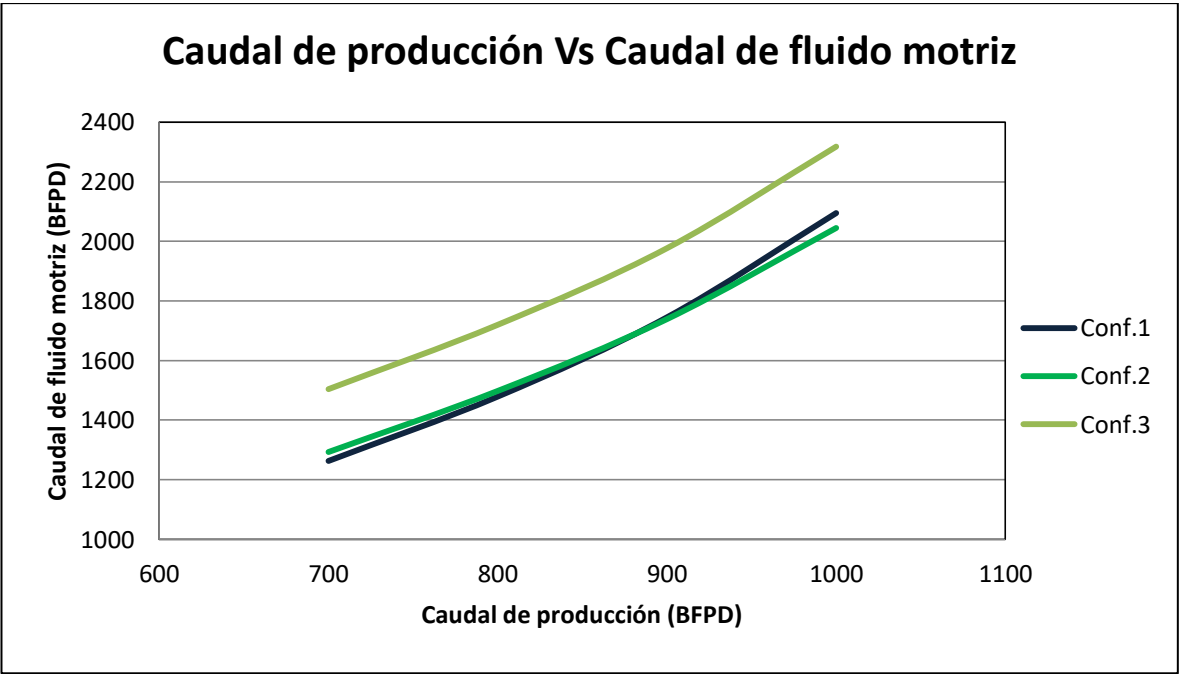
**Figura 17. Caudal de producción Vs PIP – Pozo AC-01**



Fuente: Autor

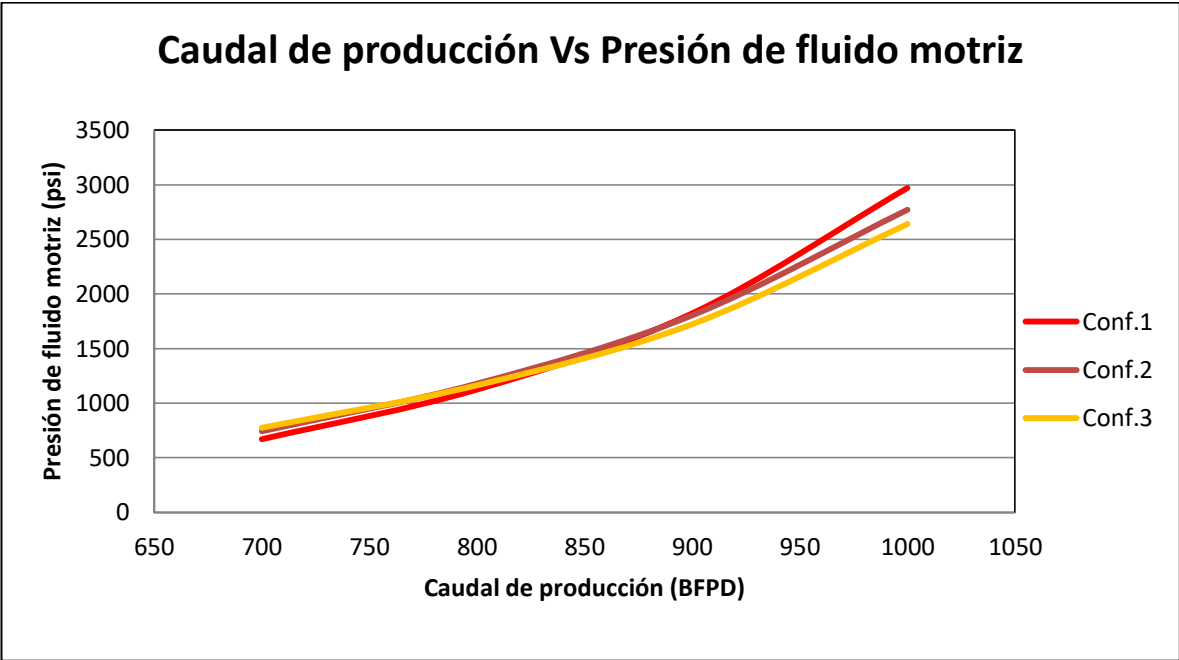
El diseño de bombeo hidráulico es una estimación del comportamiento de una configuración para unas condiciones dadas. Si las condiciones cambian o son diferentes al diseño, los valores no se ajustarán al desempeño del bombeo hidráulico y deberán ajustarse más adelante.

Figura 18. Comportamiento de la producción Vs fluido motriz



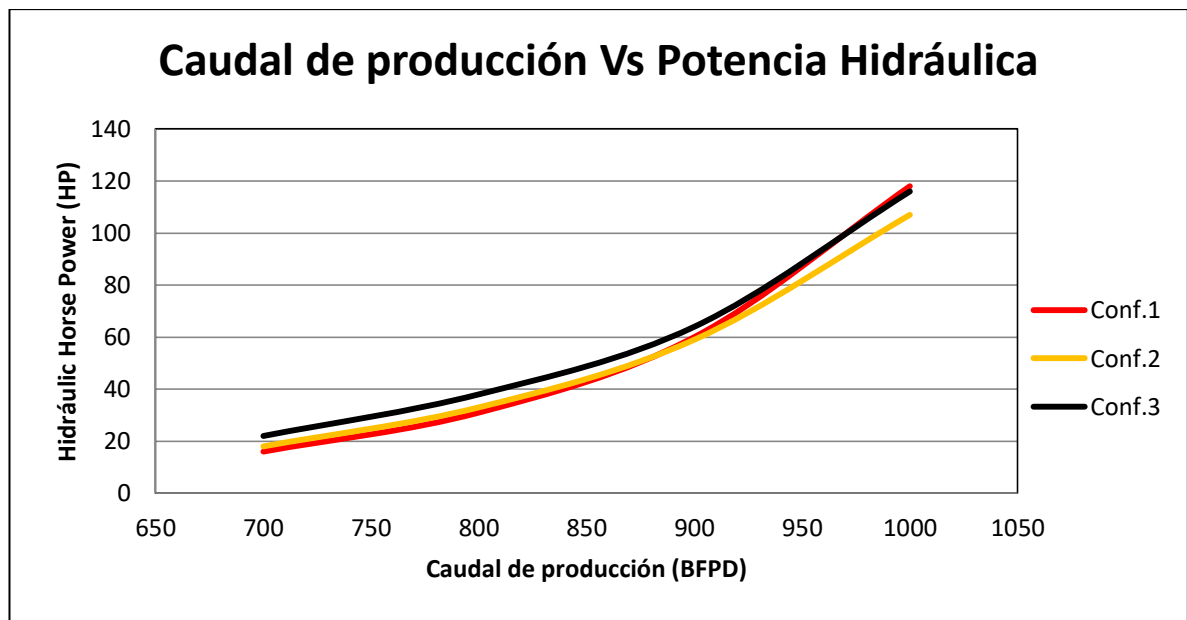
Fuente: Autor

Figura 19. Comportamiento de la producción Vs presión de inyección



Fuente: Autor

**Figura 20. Comportamiento del caudal de producción Vs potencia hidráulica**



Fuente: Autor

Con base en las recomendaciones de diseño y los resultados obtenidos, se recomienda la configuración número uno (Conf.1). La selección del cabezal y los equipos de superficie (bombas multiplex) se hacen con los datos de presión de inyección, caudal de inyección y potencia hidráulica.

**Tabla 14. Resumen de resultados BH**

| RESUMEN DE RESULTADOS       |        |                    |
|-----------------------------|--------|--------------------|
| PARÁMETRO                   | VALOR  | UNIDAD             |
| Área de la boquilla         | 0,0241 | pulg. <sup>2</sup> |
| Área de la garganta         | 0,0962 | pulg. <sup>2</sup> |
| Potencia Hidráulica (máx.)  | 118    | HP                 |
| Presión de Inyección (máx.) | 2971   | psi                |
| Caudal de Inyección (máx.)  | 2095   | BPD                |
| Caudal de cavitación        | 1020   | BPD                |

Fuente: Autor

## **5. SELECCIÓN DEL SLA BASADO EN LOS ANÁLISIS AMBIENTAL, PRESUPUESTAL Y ENERGÉTICO**

Para realizar la selección adecuada del sistema de levantamiento artificial, acorde a las condiciones especiales de producción del pozo AC-01, se plantea, además del diseño técnico, incluir el análisis ambiental mediante el cálculo de la huella de carbono; también se propone un análisis presupuestal, donde se evalúan dos escenarios: cambio de bomba PCP y cambio de sistema de levantamiento artificial. Finalmente se realiza el cálculo de la eficiencia energética para cada SLA en estudio, BH y PCP.

### **5.1 ANÁLISIS AMBIENTAL**

Debido a la trascendencia que tiene la cantidad de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) como impacto ambiental en el ecosistema, se pretende evaluar la huella de carbono producida por los SLA de bombeo de cavidades progresivas y bombeo hidráulico, aplicados a un pozo productor ubicado en el oriente colombiano. De esta manera, se busca generar conciencia ambiental en la industria a la hora de diseñar y seleccionar los sistemas de levantamiento artificial.

**5.1.1 Huella de carbono.** “La huella de carbono es un parámetro utilizado para medir la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, originadas ya sea en forma directa o indirecta por una empresa, evento, actividad, o durante el ciclo de vida de un producto o servicio”<sup>28</sup>.

---

<sup>28</sup> Atance, L. A., Marín, I. C., Uranga, O. R., & Luengo, E. R. Criterios de selección de un estándar para la medida de la huella de carbono. Citado por MARTINEZ DURAN, María y USECHE NARVAEZ, Catalina. Evaluación de la huella de carbono producida por los sistemas de levantamiento artificial convencionales en un campo colombiano. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2018. 21 p.

“Las emisiones directas son las que se liberan en el lugar donde se produce la actividad, mientras que las emisiones indirectas son causadas por el desarrollo de la actividad, pero estas emisiones provienen de fuentes que no están en el lugar, por ejemplo, el uso de la electricidad”<sup>29</sup>.

El Protocolo de Kioto considera seis tipos de GEI conocidos como: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, PFCs, HFCs y SF<sub>6</sub>, lo cual lleva a que la medición de la huella de carbono corresponda a un inventario de GEI expresado en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

La huella de carbono no solo sirve para cuantificar las emisiones de GEI, también permite detectar y delimitar las fuentes emisoras, para ello se han establecido tres alcances:

Alcance 1: “Emisiones directas de GEI provenientes de fuentes controladas por la organización.

Alcance 2: “Emisiones indirectas que ocurren por fuera de la organización, a partir de recursos externos importados, como la electricidad, calor o vapor.

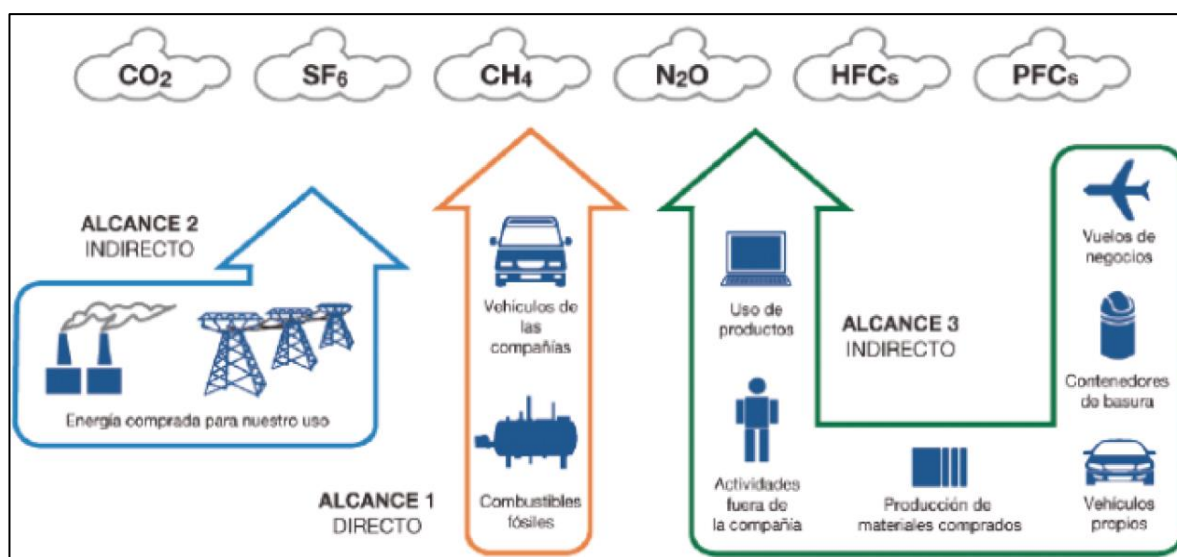
Alcance 3: “Emisiones indirectas expandidas que ocurren fuera de la organización a partir de fuentes no pertenecientes o controladas por la misma, pero que están ligadas a sus actividades”<sup>30</sup>

---

<sup>29</sup> Atance, L. A., Marín, I. C., Uranga, O. R., & Luengo, E. R. Op, cit. p.21

<sup>30</sup> Hidalgo Carvajal, D. A. Estudio de huella de carbono que aporta la aviación de pasajeros dentro del territorio colombiano. Caso de estudio: aeronaves turborreactores. Citado por MARTINEZ DURAN, María y USECHE NARVAEZ, Catalina. Evaluación de la huella de carbono producida por los sistemas de levantamiento artificial convencionales en un campo colombiano. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2018. 24 p

**Figura 21. Fuentes emisoras de gases efecto invernadero**



Fuente: Atance, L. A., Marín, I. C., Uranga, O. R., & Luengo, E. R. Op.cit., p.22.

**5.1.2 Cálculo de la huella de carbono.** La Sociedad Pública de Gestión Ambiental afirma que la sistemática de cálculo de la huella de carbono y la forma de desarrollar cada paso difiere en función de si se realiza la huella de carbono de un producto o servicio, o de una organización<sup>31</sup>.

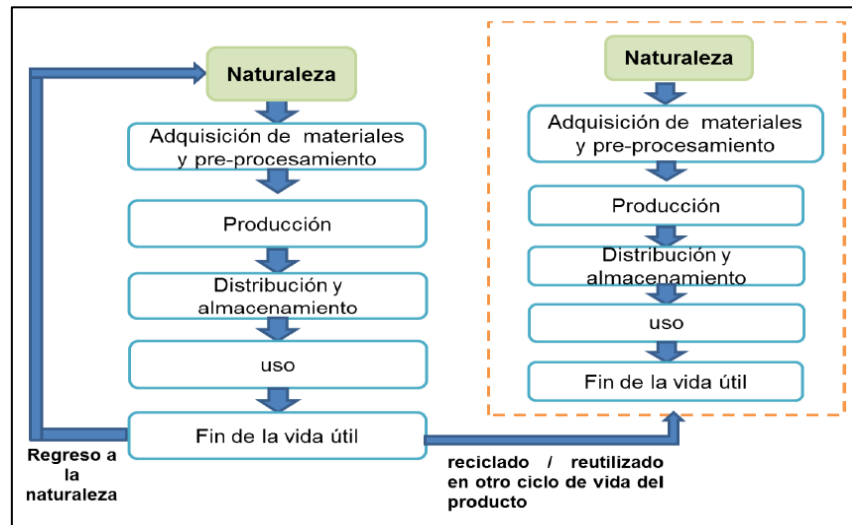
Evaluar la huella de carbono producida por un SLA corresponde a medir las emisiones de GEI para un producto, por consiguiente esta medición se realiza con base al análisis del ciclo de vida (ACV) del sistema de levantamiento.

El ciclo de vida de un producto comprende las etapas desde la obtención de la materia prima hasta que se convierte en residuo.<sup>32</sup> En la siguiente figura se evidencia claramente las fases del ciclo de vida comprendidas por el protocolo Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol).

<sup>31</sup> Ihobe. Guía metodológica para la aplicación de la norma UNE-ISO 14064-1:2006 para el desarrollo de inventarios de Gases de Efecto Invernadero en organizaciones. (Ihobe, I. Ingeniería, Consultoría, & S. Creara Consultores, Eds.). Vasco: Ihobe S.A. 2012.

<sup>32</sup> Ibid., p.24.

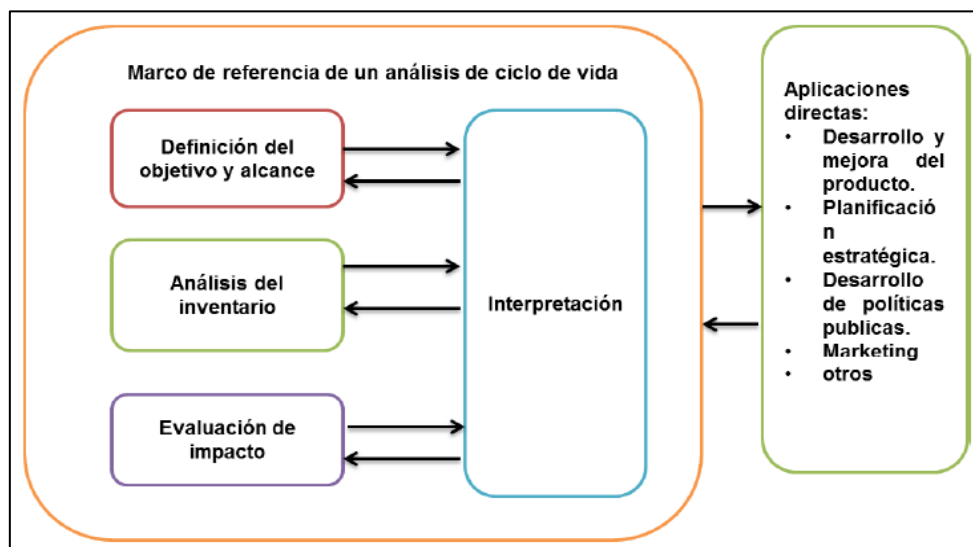
**Figura 22. Fases del ciclo de vida de un producto**



Fuente: Adaptado GHG Protocol

Para evaluar la huella de carbono producida por los sistemas de levantamiento se debe realizar el análisis del ciclo de vida (ACV). Para esto se deben seguir cuatro fases o etapas que componen un estudio ACV, según la norma técnica colombiana (NTC) ISO 14040.

**Figura 23. Etapas de un ACV**



Fuente: Adaptado de Norma técnica colombiana NTC-ISO 14040 (2007)

La NTC ISO 14040 de 2007 define las etapas metodológicas de un ACV:

1. Definición del objetivo y alcance: para establecer el objetivo se debe exponer las razones para realizar el estudio, la aplicación prevista y el público previsto. Así mismo para el alcance se debe tener en cuenta el sistema del producto, la unidad funcional, los límites del sistemas y suposiciones, de tal manera que al establecerlo este esté lo suficientemente bien definido para asegurar la amplitud, profundidad y el nivel de detalle del estudio y así mismo asegurar compatibilidad para alcanzar el objetivo.
2. Análisis de inventario de ciclo de vida (ICV): esta etapa implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas de un sistema del producto. El sistema de un producto es un conjunto de procesos unitarios vinculados entre sí por flujos de productos intermedios. La división de dicho sistema en los procesos unitarios facilita la identificación de las entradas y salidas del sistema.  
La base metodológica para los procedimientos de cálculo de la huella de carbono en este proyecto se hará con la ecuación:

$$\text{Huella de carbono} = \text{Dato de la actividad} * \text{factor de emisión} \quad (31)$$

Donde:

- El dato de actividad, es el parámetro que define el grado o nivel de la actividad generadora de las emisiones de GEI.
  - El factor de emisión (FE) supone la cantidad de GEI emitidos por cada unidad del parámetro “dato de actividad”. Estos factores varían en función de la actividad que se trate.
3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV): esta etapa tiene como propósito evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del ICV.

4. Interpretación: los análisis del inventario y de la evaluación de impacto se consideran en conjunto. La fase de interpretación debe proporcionar resultados que sean coherentes con el objetivo y los alcances definidos para que lleven a conclusiones y posteriormente a recomendaciones.

Teniendo en cuenta la metodología anteriormente definida por la NTC ISO 14040 se hará el ACV de los SLA por bombeo de cavidades progresivas y bombeo hidráulico, de esta manera determinar la huella de carbono.

Se establece como unidad funcional las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al consumo de electricidad (ton CO<sub>2</sub> eq.) por los sistemas de levantamiento cuando estos están en uso durante un periodo de un (1) año.

Los SLA objeto de este estudio operan con motor eléctrico, por tal motivo en el diseño de estos sistemas de levantamiento se determinó la energía requerida en superficie al año (kWh/año) para que el SLA funcione correctamente. Con este valor de energía se realiza el cálculo de la huella de carbono (Ton CO<sub>2</sub>/ año). También es necesario el factor de emisión, el cual, según la Unidad de planeación minero energética (UPME 2020) es de 203 gCO<sub>2</sub>/kWh.

Para el cálculo se emplea la siguiente formula:

$$Ton\left(\frac{CO_2}{año}\right) = \frac{kWh}{año} * 203 \frac{gCO_2}{KWh} * \frac{1 Ton}{1000000 g} \quad (32)$$

### 5.1.3 Huella de carbono de SLA por bombeo de cavidades progresivas.

Calculando la energía consumida por el sistema de levantamiento durante un año (kWh/año) y determinando el factor de emisión, se procede a aplicar la ecuación 32. Se estableció un tiempo de un (1) año de trabajo constante del motor, el cual, es equivalente a 8640 horas.

**5.1.4 Huella de carbono de SLA por BH tipo Jet.** En este sistema, al igual que en el anterior se aplica la misma metodología para determinar las emisiones de CO<sub>2</sub>. En la tabla 16 se presentan los resultados de los cálculos de la huella de carbono para los casos de estudio.

**Tabla 15. Energía consumida por los SLA por BH y PCP**

| Sistema de Levantamiento | Potencia requerida (HP) | Potencia requerida (kW) | Tiempo (h/año) | Energía Consumida (kWh/año) |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------------|
| PCP                      | 12                      | 9                       | 8.640          | <b>77.345</b>               |
| BH                       | 16                      | 12                      | 8.640          | <b>103.127</b>              |

Fuente: Autor

**Tabla 16. Huella de carbono de los SLA por BH y PCP**

| Sistema de Levantamiento | Energía Consumida (kWh/año) | Factor de emisión (gCO <sub>2</sub> /kWh) | Huella de Carbono (Ton CO <sub>2</sub> /año) |
|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|
| PCP                      | 77.345                      | 203                                       | <b>16</b>                                    |
| BH                       | 103.127                     | 203                                       | <b>21</b>                                    |

Fuente: Autor

Los resultados corresponden a emisiones indirectas debido al consumo de energía eléctrica de los SLA, por consiguiente este indicador incluye únicamente las emisiones por CO<sub>2</sub>.

La generación de energía eléctrica pasa por numerosas etapas hasta llegar a su uso final, en cada una de las cuales se realizan actividades con un potencial impacto sobre el entorno. El consumo de energía eléctrica presenta impactos ambientales negativos, tales como: calentamiento global, agotamiento de los recursos naturales y disminución de la capa de ozono, entre otros.

La huella de carbono se calculó con base en el consumo de energía eléctrica, por lo tanto, a mayor consumo de energía de los equipos en superficie, mayor será la emisión de CO<sub>2</sub> que emita el sistema de levantamiento. En consecuencia, el sistema de levantamiento que más huella de carbono genera indirectamente, es el bombeo hidráulico.

**5.1.5 Balance energético.** El balance energético propuesto en este trabajo se realiza comparando el consumo de energía de los sistemas de levantamiento, expresado en (kWh), durante un periodo de un año, y la energía generada por la combustión de los barriles de petróleo producidos durante un año.

“La energía generada por la combustión de un barril de petróleo (EGC) es calculada teniendo en cuenta la fracción molar de los componentes del crudo y el respectivo poder calorífico. Para un crudo liviano la energía generada por cada kilogramo de aceite es de 13.01 kWh/kg y para un crudo pesado es de 11.73 Kwh/Kg”<sup>33</sup>. Estos valores deben ser multiplicados por la densidad del crudo para realizar la conversión kWh/bbl.

Para los cálculos se planteó un caudal de 500 BPD, con un estimado de producción de 360 días por año. La energía generada por la combustión de los barriles de petróleo producidos por el pozo AC-01, se realizó con la ecuación 33.

$$E_{generada}(kWh) = \rho_{oil} \left( \frac{kg}{bbl} \right) * Q \left( \frac{bbl}{d} \right) * EGC \left( \frac{kWh}{kg} \right) * (1 - s\&w) * t(d) \quad (33)$$

---

<sup>33</sup> MARTINEZ DURAN, María y USECHE NARVAEZ, Catalina. Op.cit., p 87.

**Tabla 17. Energía generada por combustión de petróleo de pozo AC-01**

| Energía Generada (kWh)        |                 |
|-------------------------------|-----------------|
| API                           | 28              |
| SGo                           | 0,89            |
| Densidad (kg/m3)              | 887,15          |
| Densidad (kg/bbl))            | 141,04          |
| Tiempo (d)                    | 360             |
| EGC (kWh/kg)                  | 13,01           |
| Tasa de producción (BPD)      | 500             |
| %S&W                          | 35%             |
| <b>Energía generada (kWh)</b> | <b>2.15 E+8</b> |

Fuente: Autor

El balance energético se realiza calculando la energía eléctrica consumida por cada SLA al año y la energía generada por la combustión de los barriles de petróleo producidos.

$$Balance\ energético\left(\frac{kWh}{año}\right) = E_{generada} - E_{consumida} \quad (34)$$

**Tabla 18. Balance energético de los SLA – pozo AC-01**

| Sistema de Levantamiento | Energía Consumida (kWh) | Energía generada por uso del aceite (kWh) | Balance Energético (kWh) | % Energía Consumida | % Energía Neta |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|---------------------|----------------|
| PCP                      | 77.345                  | 2,15E+08                                  | 2,15E+08                 | 0,04                | 99,96          |
| BH                       | 103.127                 | 2,15E+08                                  | 2,15E+08                 | 0,05                | 99,95          |

Fuente: Autor

## 5.2 ANÁLISIS PRESUPUESTAL

La industria de los hidrocarburos requiere producir de manera eficiente, por lo cual, demanda que el ingeniero de producción, apoyado por los ingenieros de yacimientos, logren la máxima eficiencia de explotación del pozo, buscando alcanzar la mayor extracción de aceite al menor costo.

Al considerar la implementación del bombeo hidráulico concéntrico tipo Jet como SLA, es necesario evaluar el punto de vista económico. Por lo tanto se realizó un sondeo con las empresas prestadoras de servicios de *workover*, y hacer un presupuesto con las dos opciones de estudio:

- *Workover* para cambiar de bomba PCP y seguir operando con este sistema de levantamiento.
- *Workover* para realizar cambio de SLA a BH concéntrico tipo jet.

Los resultados presupuestales se presentan en las tablas 19 y 20.

Para realizar el presupuesto se tuvo en cuenta factores principales como:

- Movilización y desmovilización de equipos de *well service*.
- Fluidos de completamiento, lodos y tratamiento de fluidos contaminados.
- Equipos, herramientas, materiales (alquiler y compra).
- Empresas prestadoras de servicios (*slick line*, transporte, alimentación, alojamiento, combustible, agua...)
- Company man y servicios de ingeniería.
- Costos asociados a HSEQ.

Los resultados presupuestales indican que el costo es menor al realizar el cambio de SLA a BH concéntrico, aproximadamente USD 45.000

**Tabla 19. Presupuesto para realizar cambio de bomba PCP**

| WORKOVER POZO AC-01 SLA PCP                           |                                                                                 |             |      | Fecha              | 15/07/2021      |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------|------|--------------------|-----------------|
|                                                       |                                                                                 |             |      | DIAS DE WORKOVER   | 5               |
| PRESUPUESTO Y DETALLE DEL SERVICIO                    |                                                                                 |             |      |                    |                 |
| ITEM                                                  | DESCRIPCION                                                                     | UNIDAD      | CANT | VALOR UNITARIO USD | VALOR TOTAL USD |
| WORKOVER COST                                         |                                                                                 |             |      |                    | 437.239         |
| EQUIPO DE COMPLETAMIENTO                              |                                                                                 |             |      |                    | 137.500         |
| 1                                                     | Movilización y desmovilización de RIG                                           | US\$/DAY    | 1    | 75000              | 75.000,00       |
| 2                                                     | WORK OVER RIG 550 HP                                                            | US\$/DAY    | 5    | 12500              | 62.500,00       |
| FLUIDOS DE COMPLETAMIENTO                             |                                                                                 |             |      |                    | 30.000,00       |
| 3                                                     | Movilización de personal                                                        | US\$/GLOB   | 1    | 30000              | 30.000,00       |
| 4                                                     | Productos químicos para el completamiento                                       | US\$/GLOB   |      |                    |                 |
| 5                                                     | Ingeniero de fluidos                                                            | US\$/DIA    |      |                    |                 |
| 6                                                     | Tratamiento de fluidos contaminados                                             | US\$/GLOB   |      |                    |                 |
| 7                                                     | Unidad de filtrado y equipos                                                    | US\$/DIA    |      |                    |                 |
| MATERIALES PARA EL COMPLETAMIENTO                     |                                                                                 |             |      |                    | 78.500,00       |
| 8                                                     | 1 PACKERS 7", 1 LANDING NIPLLE, 2 SLIDING SLEEVE, 3 STANDDING VALVE             | US\$/GLOB   | 1    | 75000              | 75.000,00       |
| 9                                                     | Combustible, Técnico y movilización                                             | US\$/GLOB   | 1    | 3500               | 3.500,00        |
| SERVICIOS PARA EL COMPLETAMIENTO Y CONEXIÓN ELÉCTRICA |                                                                                 |             |      |                    | 44.250,00       |
| 10                                                    | Unidad de SLICK LINE - Movilización y desmovilización                           | US\$/GLOB   | 3    | 6000               | 18.000,00       |
| 11                                                    | Inspección de tubería de 3 1/2" EUE / Varillas de 1"                            | US\$/GLOB   | 1    | 5500               | 5.500,00        |
| 12                                                    | Herramientas para manejo de Varilla de 1 "                                      | US\$/GLOB   | 1    | 5000               | 5.000,00        |
| 13                                                    | Registro de presión estática                                                    | US\$/GLOB   | 1    | 12000              | 12.000,00       |
| 14                                                    | Hospedaje, comida, lavandería, camarería * 5 días                               | US\$/GLOB   | 1    | 3750               | 3.750,00        |
| LINEAS DE FLUJO                                       |                                                                                 |             |      |                    | 27.000,00       |
| 15                                                    | FLOW LINES (PIPE + PERSONAL+ VALVE + PAINT + INSTALATION) y Conexión eléctrica. | US\$/GLOBAL | 1    | 27000              | 27.000,00       |
| LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL                              |                                                                                 |             |      |                    | 83.500,00       |
| 16                                                    | BOMBA PCP ( ROTOR + ESTATOR)                                                    | US\$/GLOB   | 1    | 35000              | 35.000,00       |
| 17                                                    | PIN DE PARO + STOP BUSHING + TORQUE HANCHOR + CENTRALIZADORES + BARRA LISA      | US\$/GLOB   | 1    | 12000              | 12.000,00       |
| 18                                                    | Sarta de varillas de 1" x 7/8" Grado D                                          | US\$/GLOB   | 1    | 25000              | 25.000,00       |
| 19                                                    | Mantenimiento de cabezal                                                        | US\$/GLOB   | 1    | 8000               | 8.000,00        |
| 20                                                    | Servicio técnico y movilización                                                 | US\$/GLOB   | 1    | 3500               | 3.500,00        |
| PERSONAL PARA EL COMPLETAMIENTO                       |                                                                                 |             |      |                    | 4.900,00        |
| 21                                                    | COMPANY MAN                                                                     | US\$/DAY    | 7    | 500                | 3.500,00        |
| 22                                                    | Administrador                                                                   | US\$/DAY    | 7    | 200                | 1.400,00        |
| TRANSPORTE Y SUMINISTRO DE AGUA                       |                                                                                 |             |      |                    | 3.000,00        |
| 23                                                    | Suministro y transporte de agua industrial                                      | US\$/UNIT   | 1    | 1000               | 1.000,00        |
| 24                                                    | Suministro y transporte de agua potable                                         | US\$/UNIT   | 1    | 2000               | 2.000,00        |
| TRANSPORTE PERSONAL PARA EL COMPLETAMIENTO            |                                                                                 |             |      |                    | 3.840,00        |
| 25                                                    | TRANSPORTE BOGOTA-POZO-BOGOTA PERSONAL DE OPERACIONES                           | US\$/TICK   | 1    | 3000               | 3.000,00        |
| 26                                                    | Alquiler de camioneta para COMPANY MAN                                          | US\$/GLOB   | 7    | 120                | 840,00          |
|                                                       |                                                                                 |             |      |                    | 412.490         |
| COSTOS DE HSEQ                                        |                                                                                 |             |      |                    | 4.125           |
| 27                                                    | Ambulancia - HSE- Paramédicos - Supervisor - Dotación - Otros                   | US\$/GLOB   | 1    | 4125               | 4.124,90        |
| CONTINGENCIA OPERACIONES                              |                                                                                 |             |      |                    | 20.625          |
| TOTAL COSTOS INTERVENCION POZO AC-01 (USD)            |                                                                                 |             |      |                    | 437.239         |

Fuente: Autor

**Tabla 20. Presupuesto para cambio de SLA a BH concéntrico**

| WORKOVER Y CAMBIO DE SLA A BOMBEO HIDRAULICO CONCENTRICO POZO AC-01 |                                                                             |            |      | Fecha            | 15/07/2021      |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------|------|------------------|-----------------|
|                                                                     |                                                                             |            |      | DIAS DE WORKOVER | 7               |
| PRESUPUESTO Y DETALLE DEL SERVICIO                                  |                                                                             |            |      |                  |                 |
| ITEM                                                                | DESCRIPCION                                                                 | UNIDAD     | CANT | VALOR UNIT USD   | VALOR TOTAL USD |
| WORKOVER COST                                                       |                                                                             |            |      |                  | 392.415         |
| EQUIPO DE COMPLETAMIENTO                                            |                                                                             |            |      |                  | 162.500,00      |
| 1                                                                   | Movilización y desmovilización del RIG                                      | US\$/GLOB  | 1    | 75.000           | 75.000,00       |
| 2                                                                   | WORK OVER RIG 350 HP                                                        | US\$/DAY   | 7    | 12.500           | 87.500,00       |
| FLUIDOS DE COMPLETAMIENTO                                           |                                                                             |            |      |                  | 30.000,00       |
| 3                                                                   | Movilización de personal                                                    | US\$/GLOB  | 1    | 30.000           | 30.000,00       |
| 4                                                                   | Productos químicos para el completamiento                                   | US\$/GLOB  |      |                  |                 |
| 5                                                                   | Ingeniero de fluidos                                                        | US\$/DIA   |      |                  |                 |
| 6                                                                   | Tratamiento de fluidos contaminados                                         | US\$/BLS   |      |                  |                 |
| 7                                                                   | Unidad de filtrado y equipos                                                | US\$/GLOB  |      |                  |                 |
| MATERIALES PARA EL COMPLETAMIENTO                                   |                                                                             |            |      |                  | 10.430,00       |
| 8                                                                   | COMPLETION STRING (MAINTENANCE PAKER, SLINDING SLEEVE, PUP JOINTS)          | US\$/GLOB  | 1    | 10.430           | 10.430,00       |
| 9                                                                   | WELL HEAD ADAPTER (HANGER FOR 1.9 TUBING AND SPACER)                        | US\$/GAL   |      |                  |                 |
| SERVICIOS PARA EL COMPLETAMIENTO                                    |                                                                             |            |      |                  | 57.513,00       |
| 10                                                                  | Unidad de SLICK LINE - Movilización y desmovilización                       | US\$/GLOB  | 2    | 6.000            | 12.000,00       |
| 11                                                                  | RENTAL SCRAPRES 7" + TOOLS FOR RUNING 1.9" AND 2 3/8" CS Hydrill            | US\$/GLOB  | 1    | 3.170            | 3.170,00        |
| 12                                                                  | RENTAL FISHING TOOLS + DP 3 1/2" + DCs 4 3/4" + TOOLS FOR RUNNING DP 3 1/2" | US\$/ GLOB | 1    | 34.843           | 34.843,00       |
| 13                                                                  | Inspección de Tubing                                                        | US\$/GLOB  | 1    | 2.500            | 2.500,00        |
| 14                                                                  | Hospedaje, comida, lavandería, camarería * 7 días                           | US\$/ GLOB | 1    | 5.000            | 5.000,00        |
| LINEAS DE FLUJO Y ENERGIZACION                                      |                                                                             |            |      |                  | 8.000,00        |
| 15                                                                  | FLOW LINES ( PIPE + PERSONAL+ VALVE + PAINT + INSTALATION)                  | US\$/ GLOB | 1    | 8.000            | 8.000,00        |
| 16                                                                  | Conexión Eléctrica                                                          | US\$/ GLOB |      |                  |                 |
| LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL                                            |                                                                             |            |      |                  | 84.800,00       |
| 17                                                                  | Tubing 1,9"                                                                 | US\$/ GLOB | 1    | 80.000           | 80.000,00       |
| 18                                                                  | Equipos de superficie (bomba, motor eléctrico, variador, separador)         | US\$/ GLOB |      |                  |                 |
| 19                                                                  | OPS JET PUMP + JET PUMP + PUP JOINTS                                        | US\$/ GLOB |      |                  |                 |
| 20                                                                  | Servicio técnico en pozo                                                    | US\$/ GLOB | 4    | 1.200            | 4.800,00        |
| PERSONAL PÁRA EL COMPLETAMIENTO                                     |                                                                             |            |      |                  | 6.300,00        |
| 21                                                                  | COMPANY MAN                                                                 | US\$/DAY   | 9    | 500              | 4.500,00        |
| 22                                                                  | ADMINISTRADOR                                                               | US\$/DAY   | 9    | 200              | 1.800,00        |
| TRANSPORTE Y SUMINISTRO DE AGUA                                     |                                                                             |            |      |                  | 3.000,00        |
| 23                                                                  | Suministro y transporte de agua industrial                                  | US\$/UNIT  | 1    | 1.000            | 1.000,00        |
| 24                                                                  | Suministro y transporte de agua potable                                     | US\$/UNIT  | 1    | 2.000            | 2.000,00        |
| TRANSPORTE DE PERSONAL Y EQUIPOS PARA EL WORKOVER                   |                                                                             |            |      |                  | 4.200,00        |
| 25                                                                  | TRANSPORTE BOGOTA-POZO-BOGOTA PERSONAL DE OPERACIONES                       | US\$/GLOB  | 1    | 3.000            | 3.000,00        |
| 26                                                                  | Alquiler de camioneta para COMPANY MAN                                      | US\$/DAY   | 10   | 120              | 1.200,00        |
|                                                                     |                                                                             |            |      |                  | 366.743,00      |
| COSTOS DE HSEQ                                                      |                                                                             |            |      |                  | 7.134,86        |
| 27                                                                  | Ambulancia - HSE- Paramédicos - Supervisor - Dotación - Otros               | US\$/GLOB  | 1    | 7.335            | 7.334,86        |
| CONTINGENCIA OPERACIONES                                            |                                                                             |            |      |                  | 18.337          |
| TOTAL COSTOS INTERVENCION POZO AC-01 (USD)                          |                                                                             |            |      |                  | 392.415         |

Fuente: Autor

### 5.3 DETERMINACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS SLA BH Y PCP

“La rentabilidad de cualquier tipo de sistema de levantamiento artificial se puede evaluar mejor considerando los costos de levantamiento en unidades monetarias por volumen de líquido levantado”<sup>34</sup>. La mayor parte del costo operativo de los SLA se basa en el consumo de energía eléctrica, por ende, es un factor decisivo en el gasto operativo total.

“La eficiencia energética de cualquier sistema de levantamiento artificial se define por la relación entre la potencia útil del sistema, que está representada por la potencia hidráulica gastada en el levantamiento de fluidos, y la entrada de energía total, es igual al requerimiento de energía eléctrica de superficie”<sup>35</sup>.

$$\eta_{system} = \frac{P_{hydr}}{\frac{P_e}{0.746}} = 0.746 \frac{P_{hydr}}{P_e} \quad (35)$$

$\eta_{system}$  = eficiencia energética del sistema.

$P_{hydr}$  = potencia hidráulica utilizada para el levantamiento del fluido, HP

$P_e$  = potencia eléctrica total de entrada, kW.

“El trabajo de salida útil lo realiza la bomba centrífuga cuando eleva una cantidad determinada de líquido desde la profundidad de ajuste de la bomba a la superficie. Este trabajo se suele describir mediante la denominada potencia hidráulica útil,  $P_{hydr}$ , y se puede calcular como la potencia consumida para incrementar la energía potencial del líquido bombeado”<sup>36</sup>.

---

<sup>34</sup> TAKACS, Gabor. Electrical submersible pumps manual. Design, operations an maintenance. Second Edition. Cambridge, United States. Gulf Professional Publishing An imprint of Elsevier. Copyright 2018 Elsevier Inc. All rights reserved. p. 348

<sup>35</sup> Ibid., p.351

<sup>36</sup> TAKACS, Gabor. (2010, January). Ways to obtain optimum power efficiency of artificial lift installations. In SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. SPE 126544.

La siguiente fórmula, recomendada por Lea<sup>37</sup> se puede aplicar a cualquier sistema de levantamiento artificial y ofrece una forma estandarizada de comparar la eficacia de diferentes sistemas de levantamiento:

$$P_{hydr} = 1.7 \times 10^{-5} * q_l * [(0.433 * \gamma_l * L_{pump}) - PIP] \quad (36)$$

$P_{hydr}$  = potencia hidráulica utilizada para elevación de fluido, HP

$q_l$  = tasa de producción de líquido, BPD.

$\gamma_l$  = gravedad específica del líquido producido

$L_{pump}$  = profundidad de ajuste de la bomba, pies

$PIP$  = presión de succión de la bomba, llamada PIP, psi.

La ecuación (36), representa la potencia mínima posible que se requiere para elevar los fluidos del pozo a la superficie. Dado que su valor es constante siempre que la presión de admisión de la bomba sea constante, proporciona una forma estándar de comparar la eficiencia energética del mismo sistema en diferentes condiciones o las eficiencias de diferentes sistemas de bombeo. Por sus características beneficiosas, se recomienda la aplicación general de esta ecuación para el cálculo de la potencia útil ejercida por cualquier sistema de bombeo<sup>38</sup>.

Con base en lo expuesto anteriormente, empleando la ecuación 36, se determinó la potencia hidráulica utilizada para el levantamiento de fluidos de fondo de pozo. El resultado es el mismo debido a que las características de los fluidos, el caudal de producción, la profundidad de asentamiento de la bomba y la PIP son iguales para los dos sistemas de levantamiento artificial en estudio, BH y PCP. Los resultados se presentan en la tabla 21.

<sup>37</sup> Lea, J. F. – Rowlan, L. – McCoy, J.: "Artificial Lift Power Efficiency." Proc. 46th Annual Southwestern Petroleum Short Course, Lubbock, Texas, 1999 pp52-63. Citado por TAKACS, Gabor. (2010, January). Op.cit., p 2.

<sup>38</sup> TAKACS, Gabor. (2010, January). Op.cit., p 2.

**Tabla 21. Resultados del cálculo de la potencia hidráulica para SLA BH y PCP.**

| VARIABLES                                          | VALOR |
|----------------------------------------------------|-------|
| Rata de producción de líquido (BPD)                | 500   |
| Profundidad de ajuste de la bomba - TVD (ft)       | 4530  |
| Presión de entrada de la bomba PIP - succión (psi) | 1481  |
| Gravedad específica del fluido producido           | 0,937 |
| Potencia hidráulica Phyr (HP)                      | 3,03  |

Fuente: Autor

La potencia eléctrica total a la entrada de la bomba  $P_e$ , fue calculada en los diseños de los SLA BH y PCP realizados en el capítulo 4 de este libro. Para determinar la eficiencia energética de los sistemas de levantamiento artificial objeto de estudio, se emplea la ecuación 35. Los resultados se presentan en la tabla 22.

**Tabla 22. Resultados del cálculo de eficiencia energética para los SLA BH y PCP.**

| Sistema de Levantamiento | Potencia requerida por el motor (HP) | Potencia requerida por el motor (kW) | Phyr (HP) | Eficiencia del sistema ( $\eta$ ) |
|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| PCP                      | 12                                   | 9                                    | 3,03      | <b>25%</b>                        |
| BH                       | 16                                   | 12                                   | 3,03      | <b>19%</b>                        |

Fuente: Autor

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que la eficiencia energética del bombeo de cavidades progresivas es superior al bombeo hidráulico; esto se debe a que el requerimiento de potencia a la entrada de la bomba es menor para el SLA por PCP.

La eficiencia energética para un SLA por cavidades progresivas oscila entre 70 - 80%, sin embargo, se observa que el presentado para el pozo AC-01 es bajo; se

puede inferir que es ocasionado por la interferencia de gas libre en la bomba, ya que altera la presión diferencial máxima tanto de una cavidad como por el total de cavidades de la bomba, lo que ocasiona fallas en la integridad de la línea de sello entre el rotor y el estator, por ende, causa el deslizamiento o filtración del fluido, lo que hace que el sistema sea ineficiente.

En general, se puede establecer que la eficiencia total del sistema se puede dividir en eficiencias individuales que representan los diferentes puntos en el flujo de energía, se calcula luego como el producto de los elementos de eficiencia que lo construyen. “Se puede demostrar que la ecuación 36 da resultados idénticos a las fórmulas calculadas a partir de eficiencias individuales. La ventaja de la fórmula detallada radica en brindar la posibilidad de detectar componentes del sistema donde pueden ocurrir pérdidas de energía excepcionalmente grandes. El uso de esta fórmula, por lo tanto, ayuda a lograr condiciones económicas óptimas y a reducir los costos de levantamiento de fluidos”<sup>39</sup>.

#### **5.4 SELECCIÓN DEL SLA PARA EL POZO AC-01**

El sistema de levantamiento artificial utilizado actualmente en el pozo productor AC-01, ha presentado problemas debido al deterioro frecuente de la bomba de cavidades progresivas, ocasionado por el daño del elastómero. Es probable que estas fallas sean ocasionadas por las condiciones especiales de producción que presenta el pozo, ya que el aporte de gas es elevado, lo cual genera bloqueos en la bomba y esto genera desprendimiento del elastómero. El agua de producción por sus características incrustantes puede aumentar la fricción entre el rotor y el estator.

Con el fin de evaluar el diseño del SLA actual y el sistema de levantamiento por bombeo hidráulico tipo jet, donde se busca emplear recursos propios de la

---

<sup>39</sup> TAKACS, Gabor. Electrical submersible pumps manual. Op.cit., p 356.

compañía operadora y así garantizar un equilibrio económico e incrementar el *runlife* del pozo, se estableció un análisis ambiental, presupuestal y de eficiencia energética, para elegir el SLA apropiado para las condiciones del pozo AC-01.

Con base en los resultados obtenidos al realizar los diseños de los SLA, el análisis ambiental, el cual se determinó mediante el cálculo de la huella de carbono, el análisis presupuestal, donde se presentaron dos escenarios para realizar el cambio de bomba PCP y el cambio de sistema de levantamiento, y finalmente el cálculo de la eficiencia energética de los SLA, se establece que:

- La relación gas – petróleo es alta (mayor a 500 scf/STB), esto genera fallas en el elastómero, lo que produce el desprendimiento del mismo.
- A partir de los diseños de los SLA se observa que el bombeo de cavidades progresivas requiere menor consumo energético, por lo tanto, las emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente son inferiores a las ocasionadas por el BH.
- El diseño del SLA por BH presenta un incremento en producción (mayor al 100%), lo cual es muy favorable para la compañía operadora.
- El análisis presupuestal indica que el escenario más favorable es el cambio de SLA a BH, debido a que hay un ahorro de USD 45.000 respecto a realizar el cambio de bomba PCP.
- La eficiencia energética del SLA por cavidades progresivas es mayor a la calculada por el BH, sin embargo, está lejos de la eficiencia general de estos sistemas de levantamiento, la cual está en el rango del 70 - 80%.

Por lo expuesto anteriormente, se establece que el SLA adecuado para las condiciones del pozo AC-01 es el bombeo hidráulico tipo jet.

## **6. ALTERNATIVAS DE MEJORA DE SLA POR BH PARA POZO AC-01**

Validando los resultados del diseño de bombeo hidráulico convencional se observa que:

- El pozo tiene una producción de gas considerable, lo que hace que requiera más potencia hidráulica, ya que todo el gas debe pasar a través de la bomba para salir mezclado con los fluidos.
- La bomba jet queda por encima de los perforados.
- El pozo podría llegar a producir 1000 BPD.

### **6.1 INSTALACIÓN DE BOMBEO HIDRÁULICO CONCÉNTRICO (BHC)**

Al Instalar este tipo de completamiento, el gas puede ser liberado y producido por el espacio anular, por esta razón, se puede profundizar la bomba jet a punto medio de perforados, inclusive, se puede profundizar aún más del PMP.

En el siguiente diseño se plantea profundizar la bomba jet 175 ft desde PMP, lo cual permite incrementar la presión de entrada a la bomba, reduciendo potencia hidráulica y reduciendo la cantidad de gas que pasa a través de la misma; esta acción mejora la eficiencia de la bomba jet en términos de producción de líquidos.

El diseño consiste en instalar un completamiento concéntrico en directa, con una configuración de tubería concéntrica es de 1.9" dentro del tubing de producción de 3.5". El mayor porcentaje de gas producido será liberado por el espacio anular entre el Casing de 7" y el tubing de 3.5". Los líquidos retornan a superficie por el espacio anular entre la tubería de 1.9" y el tubing de 3.5".

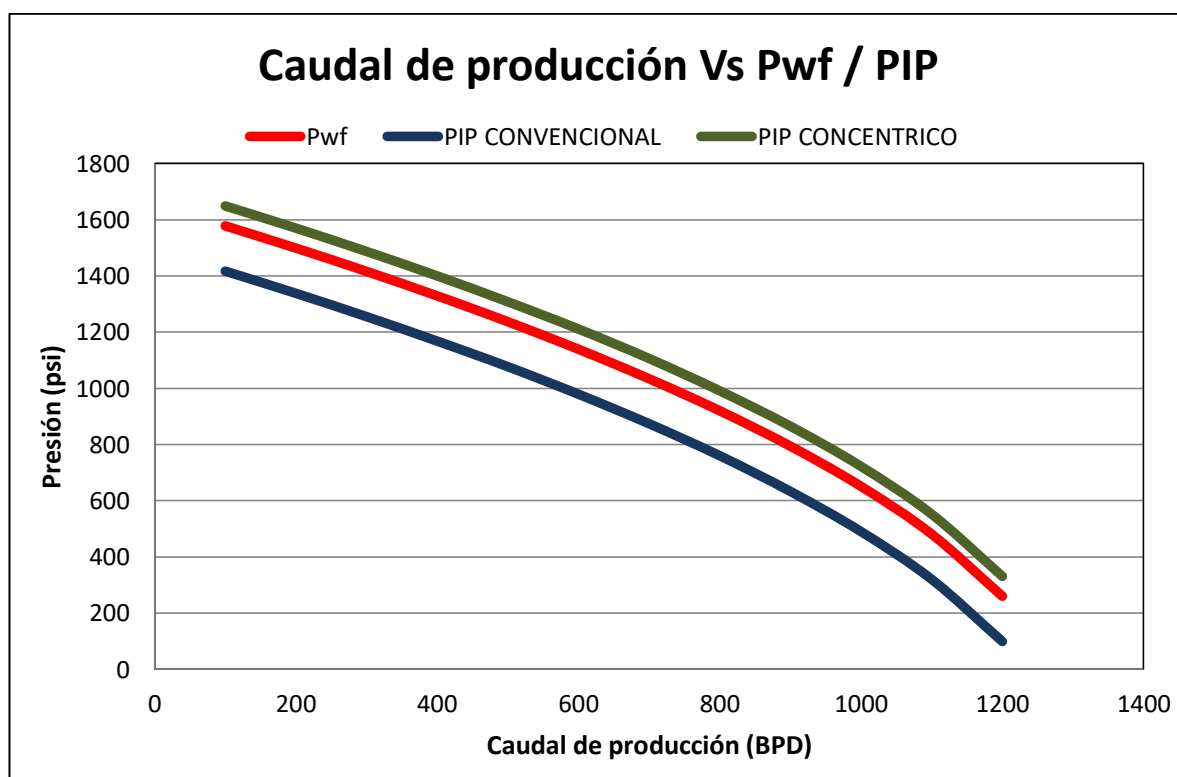
**Tabla 23. Datos de diseño de completamiento concéntrico**

| DATOS DE DISEÑO                                       |                            |
|-------------------------------------------------------|----------------------------|
| PARÁMETROS                                            | ESPECIFICACIONES           |
| Tubería concéntrica                                   | 1.9" * 2,75 lb/ft ID: 1,6" |
| Profundidad de asentamiento de la bomba en MD y TVD   | 5525' MD - 5100' TVD       |
| Profundidad de los intervalos perforados en MD y TVD. | 5350' MD - 4925' TVD       |

Fuente: Autor

El diseño del SLA por bombeo hidráulico concéntrico se realizó con el programa NCPCv4-GR, siguiendo el procedimiento presentado en el capítulo 4 de este trabajo.

**Figura 24. Comportamiento de PIP para completamiento concéntrico**



Fuente: Autor

**Figura 25. Ventana de datos de programa NCPC para C. Concéntrico**

The New Coleman Pump Co. - [DATA INPUT FORM]

File Control Options

COMPANY: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER LEASE: UIS

WELL IDENTIFICATION: AC-01 REPRESENTATIVE: ME

TUBING ID: 1.6 Inches TUBING OD: 1.9 Inches CASING ID: 2.867 Inches

PUMP DEPTH: 5100 Feet TUBING LENGTH TO PUMP: 5525 Feet

POWER FLUID: Water BH TEMP.: 180 Deg F

FLOWING WH TEMP.: 80 Deg F GAS LIQ. RATIO: 55 SCF/BBL

DESIGN LIQ. PROD. RATE: 500 BBL/DAY PROD. RETURN: Annulus

PRODUCED OIL GRAVITY: 28 API PROD. WATER GRAV: (Sp.Gr.): 1.03

PRODUCED GAS GRAVITY: 0.75 WAT. FRAC.: (50% = 0.50): 0.35

SURFACE HYD. PRESS.: 4000 psig PUMPING BHP: 1308 psig

FLOWING WH PRESS.: 60 psig Today Date: 05 - julio - 2021

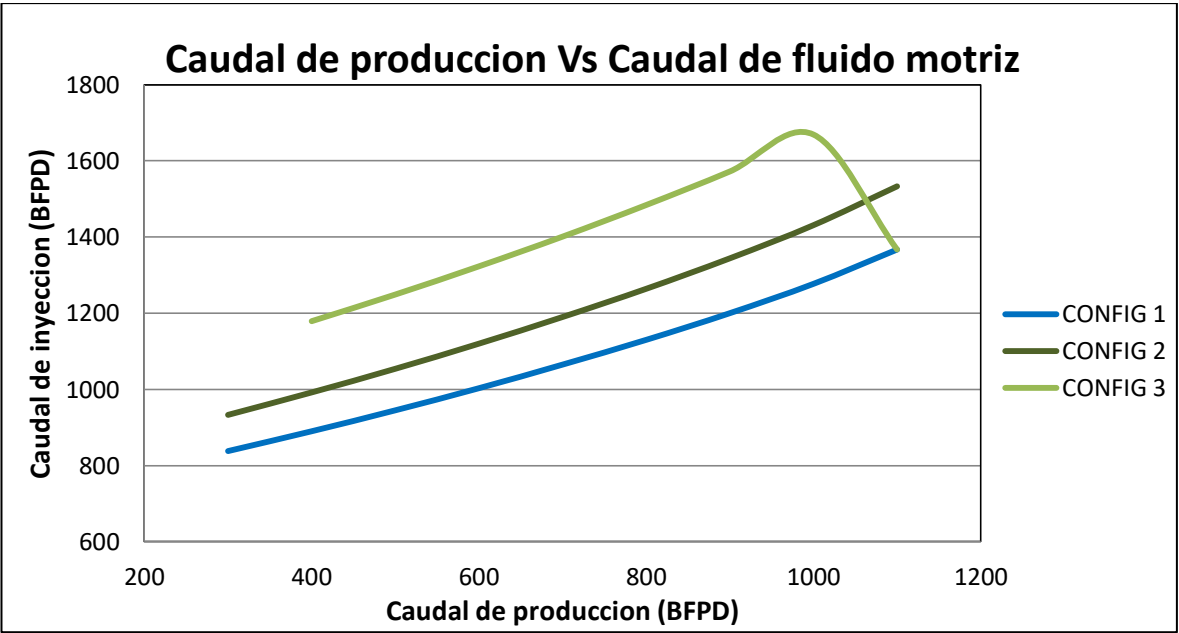
Fuente: Ventana de datos programa NCPCv4-GR

**Tabla 24. Resultados del software de diseño de BH concéntrico**

| Qs<br>(bbl/d) | PIP<br>(psi) | CONFIG 1      |             |            |     | CONFIG 2      |             |            |    | CONFIG 3      |             |            |     |
|---------------|--------------|---------------|-------------|------------|-----|---------------|-------------|------------|----|---------------|-------------|------------|-----|
|               |              | P In<br>(psi) | Q In<br>BPD | CAV<br>BPD | HP  | P In<br>(psi) | Q In<br>BPD | CAV<br>BPD | HP | P In<br>(psi) | Q In<br>BPD | CAV<br>BPD | HP  |
| 300           | 1487         | 1321          | 838         | 2021       | 21  | 1116          | 933         | 1915       | 20 |               |             |            |     |
| 400           | 1400         | 1500          | 890         | 1958       | 25  | 1275          | 992         | 1855       | 24 | 1349          | 1179        | 2280       | 30  |
| 500           | 1308         | 1710          | 945         | 1889       | 31  | 1463          | 1054        | 1789       | 29 | 1529          | 1249        | 2200       | 36  |
| 600           | 1211         | 1949          | 1003        | 1814       | 37  | 1677          | 1120        | 1718       | 35 | 1732          | 1323        | 2113       | 43  |
| 700           | 1106         | 2223          | 1065        | 1728       | 45  | 1922          | 1190        | 1637       | 43 | 1963          | 1401        | 2013       | 52  |
| 800           | 991          | 2537          | 1130        | 1630       | 54  | 2202          | 1264        | 1544       | 53 | 2227          | 1484        | 1898       | 62  |
| 900           | 865          | 2896          | 1200        | 1516       | 66  | 2523          | 1344        | 1436       | 64 | 2527          | 1572        | 1765       | 75  |
| 1000          | 722          | 3319          | 1277        | 1376       | 80  | 2904          | 1431        | 1303       | 78 | 2880          | 1669        | 1602       | 91  |
| 1100          | 552          | 3857          | 1367        | 1190       | 100 | 3389          | 1533        | 1127       | 98 | 3857          | 1367        | 1460       | 100 |

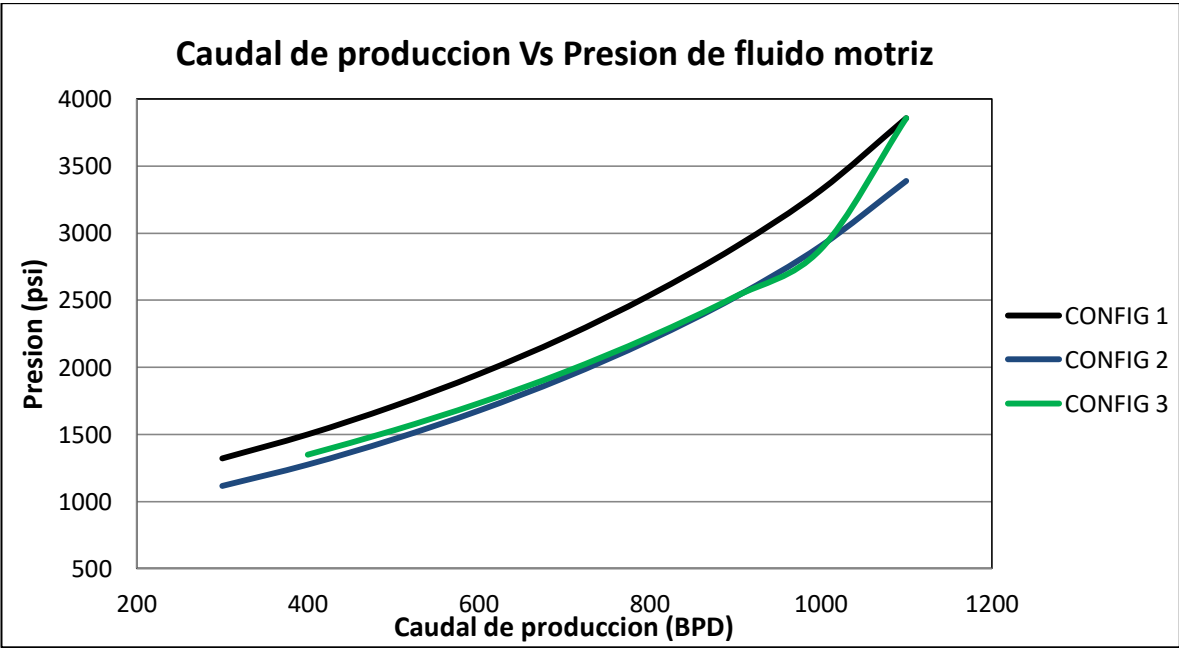
Fuente: Autor

Figura 26. Comportamiento de la producción Vs Caudal de fluido motriz



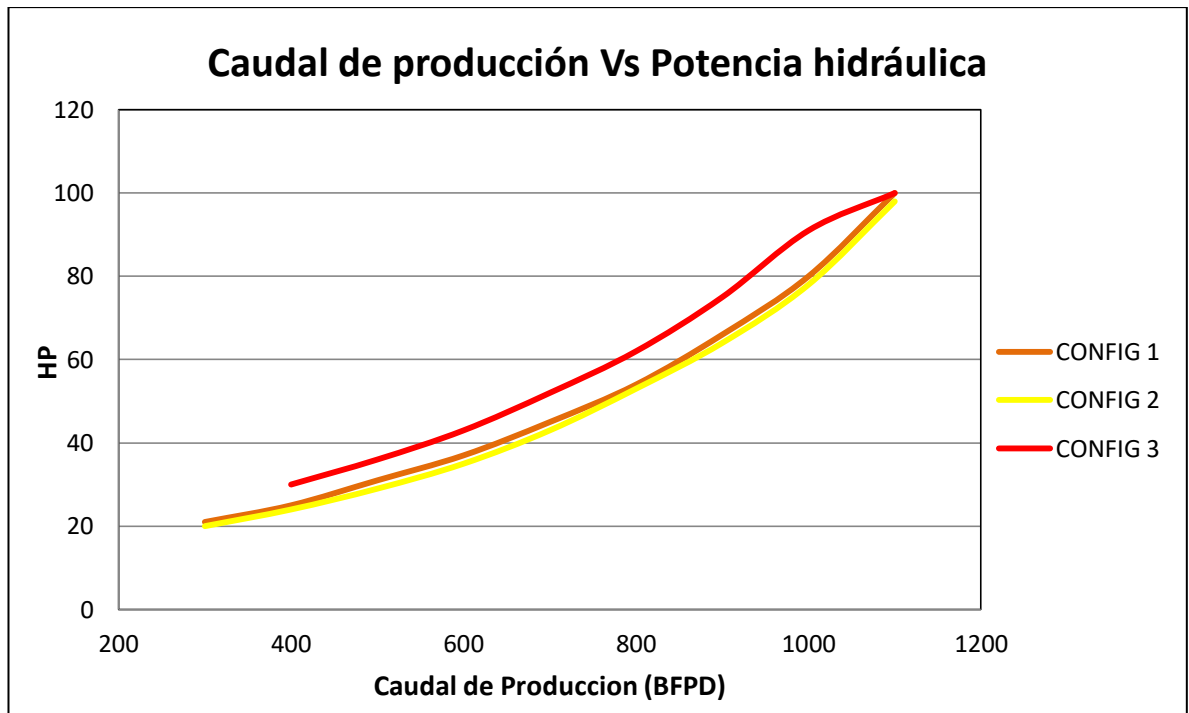
Fuente: Autor

Figura 27. Comportamiento de la producción Vs la presión de inyección



Fuente: Autor

**Figura 28. Potencia hidráulica en completamiento concéntrico.**



Fuente: Autor

Teniendo en cuenta que, de las tres configuraciones predeterminadas, se debe seleccionar aquella que logre la máxima producción con el menor requerimiento de potencia y basados en las gráficas guía, que muestran el comportamiento de las variables del bombeo hidráulico, se recomienda la configuración número uno (Conf.1).

La selección del cabezal y los equipos de superficie (bombas multiplex) se hacen con los datos de presión de inyección, caudal de inyección y potencia hidráulica. (Ver tabla 25).

**Tabla 25. Resultados de diseño de BH concéntrico**

| RESUMEN DE RESULTADOS BH CONCENTRÍCO |        |                    |
|--------------------------------------|--------|--------------------|
| PARÁMETRO                            | VALOR  | UNIDAD             |
| Área de la boquilla                  | 0,0150 | pulg. <sup>2</sup> |
| Área de la garganta                  | 0,0661 | pulg. <sup>2</sup> |
| Potencia Hidráulica (máx.)           | 100    | HP                 |
| Presión de Inyección (máx.)          | 3857   | psi                |
| Caudal de Inyección (máx.)           | 1367   | BPD                |
| Caudal de cavitación                 | 1190   | BPD                |

Fuente: Autor

Con base en los resultados presentados en el diseño de sistema de levantamiento artificial concéntrico, con bomba jet en directa, se observa que hay un incremento en la PIP superior a las 230 psi. Esto significa una reducción en potencia hidráulica y mejora la eficiencia de la bomba jet en términos de producción de líquidos (más de 200 BPD).

El consumo energético incrementa para valores de producción entre 500 y 800 BPD; sin embargo, para producción mayor a 1000 BPD, la potencia hidráulica se reduce un 32% respecto al BH convencional.

La presión máxima de inyección es de 3857 psi, la cual está en el rango de operación de estos SLA (2000 – 4000 psi).

El caudal de inyección disminuye aproximadamente 700 BPD respecto al diseño del bombeo hidráulico convencional. Este factor es muy importante debido a la reducción de volumen operacional de los equipos en superficie.

La eficiencia energética del SLA por bombeo hidráulico concéntrico se reduce al 16%, esto debido a que el requerimiento de potencia a la entrada de la bomba

aumenta a 80 HP. El cálculo se hizo para una producción de 1000 BPD y una profundidad de la bomba de 5100 ft.

**Tabla 26. Resultados del cálculo de eficiencia energética para el SLA por BHC**

| VARIABLES                                      | VALOR         |
|------------------------------------------------|---------------|
| Rata de producción de líquido (BPD)            | 1000          |
| Profundidad de ajuste de la bomba - TVD (ft)   | 5100          |
| Presión de entrada de la bomba - succión (psi) | 1308          |
| Gravedad específica del fluido producido       | 0,937         |
| Potencia hidráulica Phyr (HP)                  | 12,94         |
| Potencia entrada (HP)                          | 80            |
| Eficiencia energética                          | <b>16,18%</b> |

Fuente: Autor

Como se mencionó anteriormente, la rentabilidad de cualquier SLA se puede evaluar mejor considerando los costos de levantamiento referentes al consumo de energía eléctrica por volumen de líquido producido; debido a que la mayor parte del costo operativo total de los SLA se basa en el gasto de energía eléctrica.

En la tabla 27 se presenta una relación de consumo energético contra la producción total de petróleo (kW/STB) para cada SLA objeto de estudio de este trabajo. Se observa que el consumo energético se eleva considerablemente al implementar el bombeo hidráulico concéntrico.

**Tabla 27. Relación de consumo energético con producción de petróleo**

| Sistema de Levantamiento | Potencia requerida por el motor (kWh) | Potencia requerida por el motor (kWd) | Producción de petróleo (STB/d) | Consumo Energético (kW/STB) |
|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| PCP                      | 9                                     | 216                                   | 325                            | <b>0,66</b>                 |
| BH                       | 12                                    | 288                                   | 325                            | <b>0,89</b>                 |
| BHC                      | 60                                    | 1440                                  | 650                            | <b>2,22</b>                 |

Fuente: Autor

## 7. CONCLUSIONES

El termino eficiencia se ha eliminado del argot del bombeo hidráulico, porque genera confusión. Inicialmente porque no es una bomba mecánica que se le pueda medir una eficiencia volumétrica y el cálculo de eficiencia que se hace en el capítulo 6 del Petroleum Engineering Handbook se hace con ecuaciones adimensionales de presión y de caudal y no con valores de presión y caudal. Este cálculo sirve para comparar cual configuración boquilla y garganta tiene un mejor desempeño.

Para comparar sistemas de levantamiento artificial es mejor comparar los requerimientos de potencia en superficie o energía consumida en kWh o kWh/BPD; y se debe tener presente que el SLA por bombeo hidráulico es un sistema de levantamiento artificial que no está estandarizado por el American Petroleum Institute API.

El completamiento de bombeo hidráulico tipo jet concéntrico es ideal para pozos con altas producciones de gas. En el completamiento concéntrico, la bomba al estar al frente o debajo de perforados hace que la PIP aumente y esto genere mayor aporte de fluido. El completamiento concéntrico permite que una alta proporción del gas de producción (80-90%) sea liberado por el espacio anular, esto debido a que no tiene empaque, por ende, la eficiencia de la bomba jet aumenta en términos de producción de líquidos.

En el completamiento convencional, la bomba jet está arriba de perforados, por lo tanto la PIP siempre será menor que la Pwf. El pozo AC-01 tiene una producción de gas importante, por esta razón, se muestra que por debajo de 700 BPD el pozo puede producir en flujo natural. Los requerimientos de potencia para producir 1000 BPD requiere entre 107 y 118 HP, esto es porque al tener que producir el gas asociado con el líquido, se requiere más potencia hidráulica en la bomba jet. Al

incrementar la producción a más de 1000 BPD, debido a que se incrementa el diferencial de presión (*drawdown*) y se libera más gas en la bomba jet, se incrementan los requerimientos de potencia, es decir, para producir 1200 BPD, el requerimiento de potencia puede llegar a 200 HP.

Con el completamiento concéntrico, para producir 1000 BPD la potencia requerida es de 80 HP, una reducción mayor al 30% comparado con el completamiento convencional.; sin embargo, en el completamiento concéntrico, al incrementar el volumen a producir se incrementan las pérdidas por fricción en tuberías tan pequeñas y por ende los requerimientos de potencia hidráulica.

La determinación de la eficiencia energética de los sistemas de levantamiento artificial UBH y PCP para un pozo con condiciones especiales de producción, se llevó a cabo a satisfacción; esto a partir de la evaluación técnica, empleando diseños para cada SLA y cálculos de consumo energético. También se evaluaron nuevas metodologías de producción, teniendo en cuenta el impacto ambiental, la relación de gasto energético *versus* la producción. Finalmente, evaluando los resultados obtenidos, se decidió seleccionar el BH concéntrico tipo Jet como SLA para el pozo AC-01.

La eficiencia energética para un SLA por cavidades progresivas oscila entre 70 - 80%, sin embargo, se observa que el presentado para el pozo AC-01 es bajo (21%); se puede inferir que es ocasionado por la interferencia de gas libre en la bomba, ya que altera la presión diferencial máxima tanto de una cavidad como por el total de cavidades de la bomba, lo que ocasiona fallas en la integridad de la línea de sello entre el rotor y el estator, por ende, causa el deslizamiento o filtración del fluido, lo que hace que el sistema sea ineficiente.

## **8. RECOMENDACIONES**

Determinar la eficiencia energética de los SLA BH y PCP mediante el cálculo de eficiencias individuales que representen los diferentes puntos en el flujo de energía y analizar los elementos de eficiencia que lo construyen, con el fin de detectar los componentes del sistema donde pueden ocurrir grandes pérdidas de energía. Comparar los resultados con los presentados en este trabajo.

Implementar la aplicación de productos químicos especiales, acordes a las características fisicoquímicas del pozo (inhibidores de incrustaciones y de corrosión, aditivos para mejorar el flujo del fluido de fondo, surfactantes y nanocompuestos) para evitar el taponamiento prematuro de la bomba jet y proteger los equipos de superficie y de fondo. Esto se puede realizar incorporando el químico al fluido de potencia. También se puede considerar la instalación de un capilar para inyección de productos químicos por debajo de la bomba jet.

Realizar un análisis ambiental para el cálculo de la huella de carbono, donde se incluyan análisis de ciclo de vida de los equipos, involucrando actividades directas e indirectas del proceso y así determinar el impacto ambiental generado por esta actividad.

El componente más crítico y vulnerable a fallar en una bomba PCP es el elastómero, componente fundamental del estator, es por esto que se debe evaluar la compatibilidad de los fluidos de producción con los elastómeros de las bombas PCP que fueron instaladas, esto a fin determinar las fallas y proponer, si es el caso, un nuevo modelo de bomba de cavidades progresivas.

Realizar caracterización fisicoquímica periódica de fluidos de fondo de pozo, para determinar si hay presencia de agentes agresivos tales como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , aromáticos y condiciones severas tales como alta temperatura y presión.

## **BIBLIOGRAFÍA**

ARIAS BAUTISTA, David. Análisis técnico-económico comparativo para el cambio de fluido motriz de petróleo por agua de formación del sistema hidráulico en el campo Sacha. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. 2017. 121 p.

BOMBEO HIDRÁULICO PARA INGENIEROS. Production and Lifting Services SAS. ALIPPIO Giovanni. 2018. Bogotá, Colombia. 260 diapositivas.

BUITRAGO ESPARZA, José y Masías Manquillo, Henry. Análisis técnico y económico de la implementación del sistema de bombeo por cavidades progresivas (BCP) para crudo pesado en campos colombianos. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2012. 162 p.

CALVETE GONZALEZ Fernando y MONTES PAEZ Erick. Sistemas de levantamiento artificial. Cap. 1. Bucaramanga. 2017.

CASTRO LÓPEZ, Hermes y RODRÍGUEZ CEDEÑO, Diocles. Desarrollo de un simulador para el dimensionamiento y análisis comparativo entre el bombeo hidráulico tipo jet y el bombeo por cavidades progresivas para la producción de crudos pesados. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. 2017. 126 p.

CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidad progresiva. El Tigre, Venezuela: ESP OIL Enginnering Consultants. 2003.

EADS, Paul. The New Coleman Pump Company. [Programa informático]. Houston, Texas. Copyright 2001. Versión 4-1 – 020106.

FORERO RINCON, Santiago y ORTIZ PRINCE, Sebastián. Análisis técnico y financiero del comportamiento del sistema de levantamiento por bombeo hidráulico tipo jet aplicado a pozos en un campo colombiano mediante una herramienta software de diseño. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2009. 139 p.

HIRSCHFELDT, Marcelo. Manual de bombeo de cavidades progresivas. 2008. V1. OILProduction.net.

HOUSE VIVANCO, Juan y VILLACRESES ZAMBRANO, Ricardo. Estudio para la implementación del servicio de bombeo hidráulico tipo jet de la Compañía ECUAPET Cía. Ltda., en Petroproducción. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. 2010. 209 p.

Ihobe. Guía metodológica para la aplicación de la norma UNE-ISO 14064-1:2006 para el desarrollo de inventarios de Gases de Efecto Invernadero en organizaciones. (Ihobe, I. Ingeniería, Consultoría, & S. Creará Consultores, Eds.). Vasco: Ihobe S.A. 2012.

JULIO PARRA, Jesús. Evaluación técnica de las fallas mecánicas-operacionales recurrentes en el sistema de bombeo de cavidades progresivas en los pozos del campo Bonanza. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2013. 171 p.

LAKE, Larry W. Petroleum Engineering Handbook. Production operations Engineering. Joe Dunn Clegg, Editor. Manufactured in the United States of America. Vol. IV. Cap.14. 908 p. ISBN 978-1-55563-135-2.

LEA, J. F. – Rowlan, L. – McCoy, J.: “Artificial Lift Power Efficiency.” Proc. 46th Annual Southwestern Petroleum Short Course, Lubbock, Texas, 1999 pp52-63.

LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL CON BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET. PDVSA – Exploración y Producción. DORANTE Yoselyne, *et al.* 2001. U.E. Tierra Este Liviano, Campo Barúa- Motatán. 48 diapositivas.

MARTINEZ DURAN, María y USECHE NARVAEZ, Catalina. Evaluación de la huella de carbono producida por los sistemas de levantamiento artificial convencionales en un campo colombiano. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2018. 103 p.

MELO, V. (2010). Optimización de la geometría de la bomba hidráulica tipo jet. Enfoque UTE, 1(1), 12-35.

MIRANDA GRIJALVA, Erick. Producción de petróleo con bombeo hidráulico tipo jet, utilizando como fluido motriz el agua del sistema de reinyección en un campo del oriente ecuatoriano. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. 2015. 152 p.

MONSALVE DUARTE, Diego Armando. Evaluación de los modelos matemáticos utilizados en el diseño de los sistemas de levantamiento artificial de bombeo por cavidades progresivas. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2009. 165 p.

OBREGON VASQUEZ, Cristian. Estudio financiero del bombeo hidráulico tipo jet pump para la extracción de pozos productores del campo la Cira Infantas. Monografía para obtener el título de especialista en alta gerencia. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2013. 82 p.

RUEDA PERDOMO, María. Optimización de producción por sistema de levantamiento artificial bombeo cavidades progresivas en el contrato de producción incremental- Neiva, Campo Dina. Monografía para obtener el título de especialista en hidrocarburos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2015. 75 p.

TAKACS, Gabor. Electrical submersible pumps manual. Desing, operations an maintenance. Second Edition. Cambridge, United States. Gulf Professional Publishing An imprint of Elsevier. Copyright 2018 Elsevier Inc. All rights reserved.

TAKACS, Gabor. (2010, January). Ways to obtain optimum power efficiency of artificial lift installations. In SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. SPE 126544.

## ANEXOS

### Anexo A: Análisis de falla de bomba PCP

Reporte de falla presentado a la empresa que suministró la bomba PCP al pozo AC-01.

#### Hechos

Después de retirar el sistema de PCP instalado en el pozo AC-01 se encontró lo siguiente:

- El equipo de superficie (motor, caja reductora) no presenta ningún daño.

#### 8.1.1 Toda la sarta de varillas está en buen estado.

- El rotor presenta pequeñas raspaduras en el pie inferior.
- El elastómero esta desprendido del estator.
- Se encontró elastómero en el pup joint superior al estator, en el pup joint inferior al estator, en el pin de paro y en los dos pies superiores del empaque mecánico.
- Al sacarle el elastómero al pin de paro se encontró que el pin estaba partido, dejando un pedazo de metal en cada extremo en una longitud aproximada de 7 milímetros.
- Los pedazos de elastómero eran grandes, es decir, el elastómero se desprendió del estator. El elastómero no está blando ni quebradizo.
- Durante la limpieza con broca y raspador no se evidenció presencia de elastómeros.
- Al momento de sacar el rotor del estator no se presentó *overpull* y el giro de la sarta de varillas fue normal, unas dos vueltas, lo cual indica que el rotor no se encontraba pegado.
- Durante la instalación de la bomba estuvo presente un técnico del proveedor. En especial durante el espaciamiento y el arranque del sistema.

- El tiempo de vida de la bomba fue de 3.5 meses, lo cual es considerada muy baja.

### **Fundamentos teóricos**

- Los daños en el elastómero están relacionados con las condiciones operacionales, los fluidos producidos o el material utilizado.
- Una alta velocidad de giro del rotor está íntimamente relacionada con el desgaste del elastómero.
- Un crudo con alto contenido de aromáticos puede ablandar el elastómero, produciendo ampollas y posterior desprendimiento.
- Pozos que producen alta cantidad de gas a presiones elevadas pueden producir cortes al elastómero.
- La presencia de arena o material abrasivo produce desgaste al elastómero y al rotor, alto torque de la sarta y pega de la sarta.
- Alta temperatura de los fluidos producidos causa daño prematuro del elastómero, si éste no tiene las características para resistir altas temperaturas.
- Los bajos niveles de fluido por baja presión del yacimiento pueden dejar al elastómero seco y producir un daño prematuro, por fricción en seco entre el estator y el rotor.
- Altos contenidos de  $H_2S$  y  $CO_2$  dañan los elastómeros, por lo general el elastómero se nota quebradizo.
- El ajuste rotor-estator es el que obtiene el aislamiento entre las cavidades. Una baja interferencia ocasiona mucho escurrimiento y por ende bajas eficiencias volumétricas, un sobre ajuste produce esfuerzos excesivos sobre el elastómero disminuye la vida útil de la bomba o desgarramiento prematuro del mismo
- Un elastómero debe poseer cierta rigidez de ejercer suficiente fuerza de sello pero a la vez suficiente flexibilidad para permitir el paso de partículas sólidas sin causar desgarramiento.

- Un inadecuado ajuste rotor – estator provoca un torque por fricción muy alto, por ello el diseñador debe calcular este torque.

### **Análisis de la falla**

- De acuerdo a la historia de los parámetros utilizados no se evidencia haber sobrepasado la velocidad de rotación que produjera un desgaste del estator.
- La sarta de tubería estaba en buen estado como lo corroboró la prueba de integridad hecha antes de sacar la sarta.
- Los fluidos producidos no presentan ningún contenido de material abrasivo que destruyera el elastómero, lo cual fue corroborado por la no presencia de sucio por debajo de los intervalos productores.
- El contenido de aromáticos del crudo no es alto, por tanto, no existen sustancias que ablanden el elastómero y produzcan ampollas y posterior desprendimiento del elastómero.
- La temperatura del pozo es 180°F a la profundidad de instalación de la bomba. Esta temperatura para todos los efectos es baja y ningún elastómero debe presentar problemas.
- El contenido de H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub> del gas del pozo AC-01 son casi nulos.
- Si las condiciones operativas y del fluido no debieron dañar el elastómero entonces las causas del daño deben estar relacionadas con el propio elastómero con que fue fabricado el estator o con el procedimiento de adherencia del elastómero al barril metálico o carried del estator.
- El ajuste estator rotor siempre está a cargo del proveedor de la bomba, pues forma parte del diseño.
- La selección del elastómero estuvo a cargo del proveedor del sistema PCP con base en sus conocimientos de sus productos y las experiencias en este pozo.
- Si la selección del elastómero fue adecuada entonces la falla puede deberse a la calidad del material, fallas en el procedimiento de fabricación del estator o

un inadecuado ajuste rotor - estator. Lo normal es que el fabricante haga una investigación al lote correspondiente empezando por el proveedor del elastómero y cada una de las etapas fabricación del estator.

### **Conclusiones por la falla de la bomba PCP.**

- La falla de la bomba no puede atribuirse al operador.
- La falla de la bomba no está relacionada con condiciones anormales de los fluidos producidos.
- Tampoco puede atribuirse a la temperatura y presión del yacimiento.
- La falla está íntimamente relacionada con la selección del elastómero o la calidad del material o falla en la fabricación del estator o falla de diseño del ajuste rotor - estator.

## **Anexo B. Test inhibidor de incrustaciones**

### **Informe de laboratorio**

**Cliente:** UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

**Campo:** POZO AC-01

**Fecha:** Febrero 2021

### **Resultados análisis de inhibición de incrustaciones en presencia de fase hidrocarburos**

La preparación del agua sintética se realizó considerando los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados en campo.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el laboratorio.

#### **1. Resultados método dinámico en loop de incrustaciones.**

Para la evaluación del inhibidor de incrustaciones, se realizaron los análisis fisicoquímicos de la muestra de agua obtenida durante la prueba de botellas, y con base en estos se desarrolló una salmuera sintética, la cual fue evaluada en laboratorio. Se corre un blanco (agua sin tratamiento de inhibidor) y seguidamente la salmuera tratada con los inhibidores a dosis varias, según resultados que se vayan obteniendo.

Condiciones de la evaluación en el Loop:

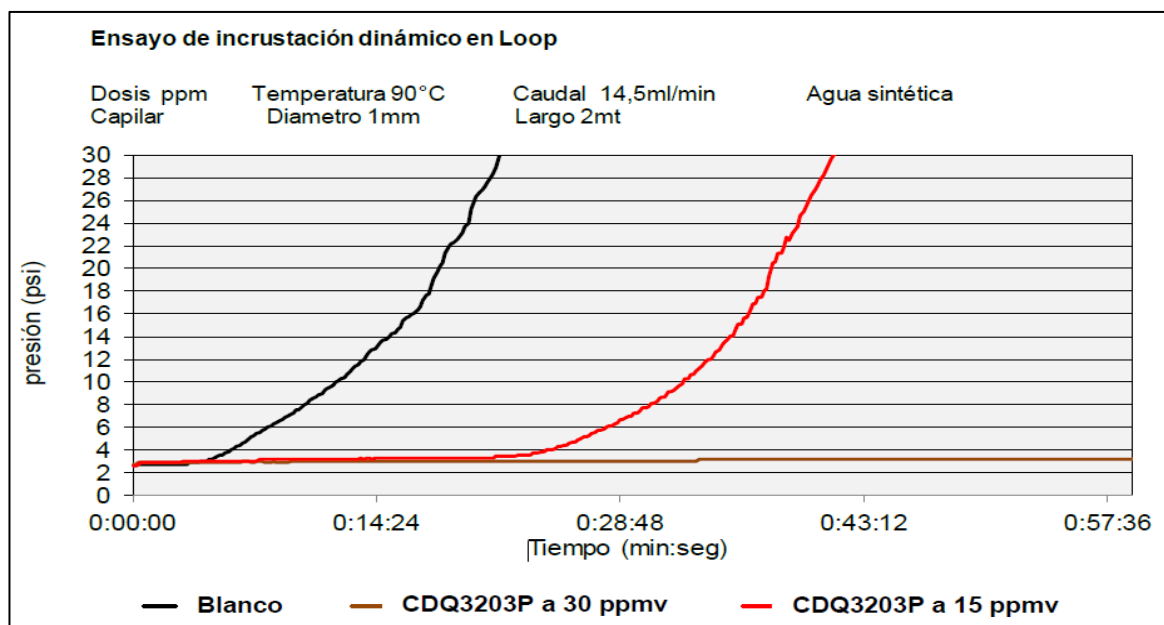
- Temperatura: 90°C +/- 5°C
- Caudal: 14,5 ml/min
- Capilar: Diámetro interior: 1 mm - Largo: 2 m.
- Tiempo: 60 minutos
- Productos: 3203P
- Dosis: Varias 2

Las dosificaciones de 30 y 15 ppm están expresadas sobre el volumen de agua, ya que, en este caso, el power Oil funciona como vehículo para llevar el inhibidor hasta la fase acuosa, que genera las deposiciones inorgánicas de carbonato y sulfato de calcio.

El producto **3203P**, muestra muy buena inhibición, no se genera incremento de presión, lo que se traduce en no formación de incrustaciones dentro del loop.

Los resultados obtenidos se muestran en el gráfico indicado a continuación.

**Gráfico 1:** Evaluación Test Dinámico – Salmuera



## 2. Resultados estabilidad térmica del inhibidor de incrustaciones.

Se realizan ensayos de estabilidad térmica del producto sugerido según:

Condiciones:

Celda: HTHP

Temperatura: 170°C 3

Presión: 1.000 psi (suministrada en forma hidráulica).

Tiempo: 24 h.

Producto: 3203P

El ensayo de estabilidad térmica consiste en someter el producto a condiciones de P y T de fondo de pozo durante 24 horas. Finalizado el mismo, se observa característica del producto y se verifican propiedades físicas.

**Resultado:** El producto es estable térmicamente, mantiene sus propiedades físicas luego de ser sometido presión y temperatura de fondo de pozo. Tampoco se evidencia separación de fases ni formación de sólidos. El producto seleccionado es dispersable en hidrocarburo y estable térmicamente según condiciones de fondo de pozo. El mismo, demostró muy buena performance de inhibición.

### **3. Evaluación eficiencia inhibición en test estático**

Condiciones del ensayo:

Método: adaptación Nace TM0374

Ensayo de eficiencia en botellas, estático.

Temperatura: 90°C +/- 5°C

Tiempo: 24 horas

Presión: atmosférica

Productos evaluados: 3203P y 3208P

Salmuera sintética.

Dosis evaluadas: 10, 25, 50, 75 y 100 ppmv

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

**Grafico 2. Eficiencia de los productos evaluados.**

