

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y  
PETRÓLEOS**

**APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE SMART Y PETRIE, PARA  
OPTIMIZAR LA PRODUCCIÓN DE POZOS CON BOMBEO  
HIDRÁULICO DEL CAMPO LAGO AGRIO**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
PETRÓLEOS  
OPCIÓN: TÉCNICO - EXPERIMENTAL**

**FREDDY ALBERTO BECERRA OLMEDO  
fabo\_6@hotmail.com**

**DIRECTOR: MSC. ING. VINICIO MELO G.  
vinicio.melo@epn.edu.ec**

**Quito, agosto 2017**

## DECLARACIÓN

Yo Freddy Alberto Becerra Olmedo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

FREDDY BECERRA OLMEDO

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Freddy Alberto Becerra Olmedo, bajo mi supervisión.

---

MSC. ING. VINICIO MELO G.  
DIRECTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios todopoderoso, quien día a día me muestra su amor y misericordia.

A mis amados padres, autores de mis días, a ustedes gracias por ese incansable apoyo.

A mis abuelos adorados, verdaderos ángeles en la tierra enviados por Dios para alumbrar mi camino.

A mi tío Lino por su perseverancia, gracias tío.

A la Escuela Politécnica Nacional, especialmente a todos quienes forman parte de la facultad de Geología y Petróleos, por la dedicación, esmero y paciencia demostrada en mi formación profesional.

A Petroamazonas E.P., campo Lago Agrio, por la invaluable colaboración brindada para la realización de este proyecto.

Al Ing. Vinicio Melo, tutor del presente trabajo, catedrático de la E.P.N., pero sobre todo fraterno y sincero amigo, gracias por su paciencia y su sabio consejo, para la culminación junto con este trabajo de mi formación universitaria.

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo a mis queridos hermanos Diosita y Mirkitto, como ejemplo de sacrificio y lucha; se los dedico a ellos en retribución del inmenso amor que me han brindado.

A mis padres, quienes siempre han estado a mi lado dándome la fuerza y ejemplo necesario para levantarme y continuar en la lucha diaria.

A mi tía Gloria allá en el cielo, tu apoyo fue incondicional, recibe allá en el cielo una flor en homenaje a tu legado.

A mis abuelitas, mami Noris y mami Diosa; que hermosa que ha sido la vida junto a ustedes, las amo con todo mi corazón.

A ti Isa, mi amor, por aceptar ser mi compañera en esta vida.



|   |     |
|---|-----|
| 2.2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE HAL PETRIE PARA EL DISEÑO DE UNA BOMBA JET .....            | 45  |
| 2.2.1 SECUENCIA DE CÁLCULO DEL MÉTODO DE HAL PETRIE .....                                 | 46  |
| 2.3 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SMART AL CAMPO LAGO AGRIO .....  | 57  |
| 2.3.1 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 12 (LGA-012) .....  | 57  |
| 2.3.2 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 32 (LGA-032) .....  | 65  |
| 2.3.3 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 48 (LGAF-048) .....   | 67  |
| 2.4 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE PETRIE AL CAMPO LAGO AGRIO ..... | 69  |
| 2.4.1 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 9 (LGAB-009) .....  | 69  |
| 2.4.2 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 18 (LGA-018) .....  | 80  |
| 2.4.3 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 22 (LGA-022) .....  | 82  |
| 2.4.4 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 35 (LGA-035) .....  | 84  |
| 2.4.5 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 38 (LGA-038) .....  | 86  |
| 2.4.6 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 39 (LGAJ-039) .....   | 88  |
| 2.4.7 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 43 (LGAJ-043) .....   | 90  |
| 2.4.8 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 44 (LGAG-044) .....   | 92  |
| CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....  | 95  |
| 3.1 ANÁLISIS TÉCNICO .....  | 95  |
| 3.1.1 ANÁLISIS TÉCNICO DE LA APLICACIÓN DEL METODO DE E. SMART .....                      | 95  |
| 3.1.2 ANÁLISIS TÉCNICO DE LA APLICACIÓN DEL METODO DE HAL PETRIE .....                    | 97  |
| 3.1.3 ANÁLISIS TÉCNICO .....  | 100 |
| 3.2 ANÁLISIS ECONÓMICO .....  | 101 |
| 3.2.1 INDICADORES FINANCIEROS .....   | 102 |
| 3.2.1.1 Flujo de neto de caja (FNC) .....   | 102 |
| 3.2.1.2 Período de recuperación de la inversión .....                                     | 102 |
| 3.2.1.3 Valor actual neto (VAN) .....   | 103 |
| 3.2.1.4 Tasa interna de retorno (TIR) .....   | 104 |
| 3.2.1.5 Relación beneficio - costo (B/C) .....  | 104 |
| 3.2.1.6 Consideraciones empleadas para el análisis .....                                  | 105 |
| 3.2.1.7 Estimación de ingresos .....  | 107 |
| 3.2.1.8 Estimación de egresos .....   | 107 |
| 3.3 ANÁLISIS FINANCIERO DEL PROYECTO .....  | 108 |
| CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....  | 113 |
| 4.1 CONCLUSIONES .....  | 113 |
| 4.2 RECOMENDACIONES .....   | 115 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 117 |
| ANEXOS .....  | 119 |

## ÍNDICE DE TABLAS

| No   | DESCRIPCIÓN   | PÁGINA |
|------|---|--------|
| 1.1  | Coordenadas del campo Lago Agrio  | 2      |
| 1.2  | Características de formaciones productivas campo Lago Agrio                               | 7      |
| 1.3  | Características de las rocas del campo Lago Agrio   | 8      |
| 1.4  | Características de los fluidos del campo Lago Agrio                                       | 9      |
| 1.5  | Reservas del campo Lago Agrio al 30 de septiembre de 2016                                 | 10     |
| 1.6  | Presiones de reservorio de pozos productores campo Lago Agrio                             | 11     |
| 1.7  | Estado actual de pozos campo Lago Agrio   | 12     |
| 1.8  | Pozos productores del campo Lago Agrio  | 12     |
| 1.9  | Pozos que se encuentran en espera de Workover (E.W.O.)                                    | 13     |
| 1.10 | Pozos cerrados campo Lago Agrio   | 13     |
| 1.11 | Pozos en espera de abandono campo Lago Agrio  | 14     |
| 1.12 | Pozos abandonados campo Lago Agrio  | 14     |
| 1.13 | Cantidad de fluido producido por estaciones del campo Lago Agrio                          | 16     |
| 1.14 | Pozos productores por estación  | 16     |
| 1.15 | Facilidades de producción de estaciones campo Lago Agrio                                  | 17     |
| 1.16 | Características del sistema power oil estación Lago central                               | 18     |
| 1.17 | Características del sistema power oil estación Lago norte                                 | 19     |
| 1.18 | Ejemplos de cavitación en bomba jet   | 27     |
| 1.19 | Tamaños de toberas y gargantas de bombas jet  | 30     |
| 1.20 | Áreas anulares garganta – tobera de Kobe (pg <sup>2</sup> )                               | 31     |
| 1.21 | Áreas anulares garganta – tobera de National (pg <sup>2</sup> )                           | 32     |
| 1.22 | Relaciones de áreas y áreas anulares de garganta (pg <sup>2</sup> ) para bombas Guiberson | 33     |
| 2.1  | Relaciones áreas óptimas  | 39     |
| 2.2  | Resultados método de Smart  | 45     |
| 2.3  | Resultados método de Petrie   | 52     |
| 2.4  | Datos pozo LGA – 0012   | 58     |
| 2.5  | Resultados obtenidos por iteración pozo LGA – 012 método de Smart                         | 62     |
| 2.6  | Resultados método de Smart pozo LGA – 012   | 63     |
| 2.7  | Geometrías óptimas por fabricantes pozo LGA – 012   | 64     |
| 2.8  | Datos pozo LGA – 032  | 66     |
| 2.9  | Resultados método de Smart pozo LGA – 032   | 66     |
| 2.10 | Geometrías óptimas por fabricantes pozo LGA – 032   | 66     |
| 2.11 | Datos pozo LGAF – 048   | 67     |
| 2.12 | Resultados método de Smart pozo LGAF – 048  | 67     |
| 2.13 | Geometrías óptimas por fabricantes pozo LGAF – 048  | 68     |
| 2.14 | Resumen de resultados – método de Smart   | 68     |
| 2.15 | Datos pozo LGAB – 009   | 69     |
| 2.16 | Resultados método de Petrie pozo LGAB – 009   | 77     |
| 2.17 | Resultados obtenidos por cada iteración pozo LGAB – 009                                   | 77     |
| 2.18 | Resultados método de Petrie segundo análisis pozo LGAB – 009                              | 78     |
| 2.19 | Resultados pozo LGAB – 009  | 79     |

| <b>No</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>   | <b>PÁGINA</b> |
|-----------|--|---------------|
| 2.20      | Datos pozo LGA – 018   | 80            |
| 2.21      | Sumario final de resultados por cada análisis datos pozo LGA – 018                         | 80            |
| 2.22      | Sumario final de resultados pozo LGA – 018   | 81            |
| 2.23      | Datos pozo LGA – 022   | 82            |
| 2.24      | Sumario final de resultados por cada análisis datos pozo LGA – 022                         | 82            |
| 2.25      | Sumario final de resultados pozo LGA – 022   | 83            |
| 2.26      | Datos pozo LGA – 035   | 84            |
| 2.27      | Sumario final de resultados por cada análisis datos pozo LGA – 035                         | 84            |
| 2.28      | Sumario final de resultados pozo LGA – 035   | 85            |
| 2.29      | Datos pozo LGA – 038   | 86            |
| 2.30      | Sumario final de resultados por cada análisis datos pozo LGA – 038                         | 86            |
| 2.31      | Sumario final de resultados pozo LGA – 038   | 87            |
| 2.32      | Datos pozo LGAJ – 039  | 88            |
| 2.33      | Sumario final de resultados por cada análisis datos pozo LGAJ– 039                         | 88            |
| 2.34      | Sumario final de resultados pozo LGAJ – 039  | 89            |
| 2.35      | Datos pozo LGAI – 043  | 90            |
| 2.36      | Sumario final de resultados por cada análisis datos pozo LGAI – 043                        | 90            |
| 2.37      | Sumario final de resultados pozo LGAI – 043  | 91            |
| 2.38      | Datos pozo LGAG – 044  | 92            |
| 2.39      | Sumario final de resultados por cada análisis datos pozo LGAG– 044                         | 92            |
| 2.40      | Sumario final de resultados pozo LGAG – 044  | 93            |
| 2.41      | Resumen de resultados – método de Petrie   | 94            |
| 3.1       | Situación actual vs. Implementación de BHJ en pozos analizados métodos de Smart            | 95            |
| 3.2       | Situación actual vs. Rediseño de BHJ en pozos analizados métodos de Petrie                 | 98            |
| 3.3       | Valores estimados de operaciones requeridas para puesta en operación de pozos              | 106           |
| 3.4       | Valores estimados de gastos – revisión bomba jet   | 106           |
| 3.5       | Costos del barril de petróleo  | 107           |
| 3.6       | Análisis económico escenario pesimista – precio del barril 15 dólares                      | 109           |
| 3.7       | Análisis económico escenario presupuesto general del estado – precio del barril 35 dólares | 110           |
| 3.8       | Análisis económico escenario optimista – precio del barril 45 dólares                      | 111           |

## ÍNDICE DE FIGURAS

| No   | DESCRIPCIÓN   | PÁGINA |
|------|---|--------|
| 1.1  | Ubicación geográfica campo Lago Agrio   | 3      |
| 1.2  | Sección sísmica campo Lago Agrio  | 4      |
| 1.3  | Mapa estructural tomada al tope de Hollín   | 5      |
| 1.4  | Mapa estructural a la base de la Caliza "A"   | 6      |
| 1.5  | Sección estratigráfica Hollín-Napo-Tena inf., del campo Lago Agrio                    | 8      |
| 1.6  | Porcentaje de producción del campo Lago Agrio por sistema de levantamiento artificial | 15     |
| 1.7  | Principales componentes del bombeo hidráulico   | 21     |
| 1.8  | Bomba hidráulica tipo pistón  | 22     |
| 1.9  | Principio de Venturi en bomba jet   | 23     |
| 1.10 | Partes de la bomba hidráulica tipo jet  | 24     |
| 2.1  | Nomenclatura de la bomba jet  | 35     |
| 2.2  | Curvas H – M de las bombas jet Guiberson  | 37     |
| 2.3  | Curva de comportamiento de diseño de bombas jet                                       | 38     |
| 2.4  | Curva de resultados presión vs caudal   | 53     |
| 2.5  | Análisis nodal pozo LGAB – 009  | 78     |
| 2.6  | Análisis nodal pozo LGA – 018   | 81     |
| 2.7  | Análisis nodal pozo LGA – 022   | 83     |
| 2.8  | Análisis nodal pozo LGA – 035   | 85     |
| 2.9  | Análisis nodal pozo LGA – 038   | 87     |
| 2.10 | Análisis nodal pozo LGAJ – 039  | 89     |
| 2.11 | Análisis nodal pozo LGAI – 043  | 91     |
| 2.12 | Análisis nodal pozo LGAJ – 044  | 93     |
| 3.1  | Petróleo producción por pozo – método de Smart  | 96     |
| 3.2  | Fluido motriz inyectado por pozo – método de Smart                                    | 97     |
| 3.3  | Análisis de petróleo producción por pozo – método de Petrie                           | 99     |
| 3.4  | Análisis de fluido motriz requerido por pozo – método de Petrie                       | 100    |
| 3.5  | Petróleo total producido  | 101    |
| 3.6  | Fluido motriz total requerido   | 101    |

## SIMBOLOGÍA

| SÍMBOLO       | SIGNIFICADO   | DIMENSIONES |
|---------------|---|-------------|
| A             | Área  | $L^2$       |
| API           | American Petroleum Institute  |             |
| $A_{CM}$      | Área anular mínima en la succión para evitar la cavitación                            | $L^2$       |
| $A_N$         | Área de flujo en la tobera  | $L^2$       |
| $A_S$         | Área anular de la cámara de mezclado para el flujo de la producción                   | $L^2$       |
| $A_T$         | Área total de flujo de la cámara de mezclado  | $L^2$       |
| bl            | Barriles  | $L^3$       |
| BF            | Barriles fiscales   | $L^3$       |
| bapd          | Barriles de agua por día  | $L^3/t$     |
| bppd          | Barriles de petróleo por día  | $L^3/t$     |
| bfpd          | Barriles de fluido por día (agua y petróleo)  | $L^3/t$     |
| $B_g$         | Factor volumétrico del gas  |             |
| $B_o$         | Factor volumétrico del petróleo   |             |
| $B_t$         | Factor volumétrico total (gas y petróleo)   |             |
| $B_w$         | Factor volumétrico del agua   |             |
| C             | Variable definida en función de diámetros de tubería                                  |             |
| cp            | Centipoises   | M/Lt        |
| cst           | Centistokes   | M/Lt        |
| D             | Longitud vertical verdadera   | L           |
| $D_{Itp}$     | Diámetro interno de la tubería de producción  | L           |
| $D_{oTP}$     | Diámetro externo de la tubería de producción  | L           |
| $D_{iTR}$     | Diámetro interno de la tubería de revestimiento                                       | L           |
| $D_{oTr}$     | Diámetro externo de la tubería de revestimiento                                       | L           |
| $D_{Nominal}$ | Diámetro nominal  | L           |
| $D_1$         | Diámetro interno de la tubería de producción o de revestimiento                       | L           |
| $D_2$         | Diámetro externo de la tubería interior en flujo anular                               | L           |
| $D_3$         | Distancia entre el centro del tubing y el centro del Casing para flujo anular laminar | L           |
| $d_3$         | Diámetro externo de las juntas del tubing para flujo anular turbulento                | L           |
| E             | Eficiencia  |             |
| e             | Excentricidad de las tuberías   |             |
| $F_o$         | Fracción de petróleo  |             |
| $F_w$         | Fracción de agua de formación   |             |
| $F_{wD}$      | Fracción de agua en el fluido de retorno  |             |
| F             | Factor de fricción  |             |
| FR            | Factor de recobro   |             |
| $ft^3/bl$     | Pies cúbicos por barril   | $L^3/L^3$   |
| $g/cm^3$      | Gramos masa por centímetro cúbico   | $M/L^3$     |

| SÍMBOLO      | SIGNIFICADO   | DIMENSIONES |
|--------------|---|-------------|
| $G_N$        | Gradiente del fluido motriz en línea de inyección                     | $M/L^2T^2$  |
| $G_D$        | Gradiente del fluido motriz en línea de retorno                       | $M/L^2T^2$  |
| $G_S$        | Gradiente del fluido producido  | $M/L^2T^2$  |
| $G_W$        | Gradiente del agua de formación                                       | $M/L^2T^2$  |
| GLR          | Relación gas líquido  | $L^3/L^3$   |
| GOR          | Relación gas petróleo   | $L^3/L^3$   |
| H            | Relación adimensional de presiones                                    |             |
| HP           | Potencia requerida HP   |             |
| ha           | Hectáreas   | $L^2$       |
| $K_N$        | Coefficiente de pérdida de presión en la tobera                       |             |
| $K_{TD}$     | Coefficiente de pérdida de presión en la cámara de mezclado – difusor |             |
| M            | Relación de flujo másico adimensional                                 |             |
| $M_L$        | Relación de flujo másico adimensional en el límite de cavitación      |             |
| MD           | Profundidad medida  | L           |
| $N_{RE}$     | Numero de Reynolds  |             |
| NUM          | Variable para definir H   |             |
| P            | Presión   | $M/Lt^2$    |
| PCS          | Pie cúbico estándar   | $L^3$       |
| $P_b$        | Presión de burbuja  | $M/Lt^2$    |
| $P_D$        | Presión de descarga   | $M/Lt^2$    |
| $P_F$        | Pérdidas de presión por fricción                                      | $M/Lt^2$    |
| $P_{FN}$     | Pérdidas de presión por fricción en línea de inyección                | $M/Lt^2$    |
| $P_{FD}$     | Pérdidas de presión por fricción en línea de retorno                  | $M/Lt^2$    |
| $P_N$        | Presión a la entrada de la tobera                                     | $M/Lt^2$    |
| $P_R$        | Presión de reservorio   | $M/Lt^2$    |
| $P_S$        | Presión de succión  | $M/Lt^2$    |
| $P_T$        | Presión superficial de trabajo  | $M/Lt^2$    |
| $P_{WH}$     | Presión en la cabeza del pozo   | $M/Lt^2$    |
| $P_{WF}$     | Presión de fondo fluvente   | $M/Lt^2$    |
| ppm          | Partes por millón   |             |
| psi          | Libras fuerza por pulgada cuadrada                                    | $M/Lt^2$    |
| pg           | Pulgadas  | L           |
| POES         | Petróleo original en sitio  | $L^3$       |
| PVT          | Presión - Volumen – Temperatura                                       |             |
| $Q_S$        | Tasa de producción  | $L^3/t$     |
| $Q_{SC}$     | Tasa de producción a la cual inicia la cavitación                     | $L^3/t$     |
| $Q_D$        | Tasa de fluido producido más fluido motriz                            | $L^3/t$     |
| $Q_g$        | Tasa de producción de gas   | $L^3/t$     |
| $Q_N$        | Tasa de fluido motriz   | $L^3/t$     |
| $Q_w$        | Tasa de producción de agua  | $L^3/t$     |
| $\Delta Q_N$ | Variación de fluido motriz  | $L^3/t$     |
| R            | Relación de áreas de tobera y garganta                                |             |
| $R_s$        | Razón gas disuelto – petróleo (solubilidad del gas en el petróleo)    |             |

| SÍMBOLO  | SIGNIFICADO                                | DIMENSIONES |
|----------|--|-------------|
| T        | Temperatura                                | T           |
| $T_{WH}$ | Temperatura en la cabeza del pozo          | T           |
| $T_{WF}$ | Temperatura en el fondo del pozo           | T           |
| TP       | Longitud tubería de producción             | L           |
| TR       | Longitud tubería de revestimiento          | L           |
| TVD      | Profundidad vertical verdadera             | L           |
| US\$     | Dólares de Estados Unidos de América       |             |
| V        | Volumen                                    | $L^3$       |
| V        | Velocidad del fluido                       | L/T         |
| °F       | Grados Fahrenheit                          | T           |
| $\mu_g$  | Viscosidad del gas                         | M/Lt        |
| $\mu_o$  | Viscosidad del petróleo                    | M/Lt        |
| $\mu_w$  | Viscosidad del agua                        | M/Lt        |
| $\rho$   | Densidad                                   | $M/L^3$     |
| $\rho_g$ | Densidad del gas                           | $M/L^3$     |
| $\rho_o$ | Densidad del petróleo                      | $M/L^3$     |
| $\rho_w$ | Densidad del agua                          | $M/L^3$     |
| FNC      | Flujo neto de caja                         |             |
| N        | Vida útil del proyecto                     | T           |
| $I_o$    | Inversión inicial del proyecto             |             |
| PRI      | Período de recuperación de la inversión    | T           |
| SFNC     | Suma acumulada de los flujos netos de caja |             |
| VAN      | Valor actual neto                          |             |
| R        | Tasa de actualización                      |             |
| TIR      | Tasa interna de retorno                    |             |
| B/C      | Relación beneficio costo                   |             |
| °API     | Grados API                                 |             |
| %        | Tanto por ciento                           |             |

## RESUMEN

El presente trabajo Técnico – Experimental, plantea dos alternativas de optimización del sistema de levantamiento artificial por bombeo hidráulico del campo Lago Agrio, mediante la aplicación del método de Smart para implementar el bombeo hidráulico tipo jet en pozos que actualmente no están operando y el método propuesto por Petrie para rediseñar las condiciones operativas de pozos que se encuentran produciendo con el mencionado sistema.

En el primer capítulo se exponen aspectos referentes a la descripción del campo en estudio. Datos técnicos como la geología, las características de las arenas productoras y sus fluidos. Se analiza las condiciones actuales de producción del campo Lago Agrio, haciendo énfasis especial en pozos que producen con el sistema de levantamiento artificial en estudio y por último se exponen los fundamentos teóricos del sistema de levantamiento artificial de bombeo hidráulico.

En el segundo capítulo se describe detalladamente los métodos de Smart y Petrie para luego aplicarlos a los pozos en análisis, usando hojas de cálculo para seleccionar la geometría más adecuada de entre los diferentes fabricantes del mercado o redimensionando los parámetros superficiales de operación, según sea el caso, para la optimización del sistema de levantamiento por bombeo hidráulico del campo Lago Agrio

En el capítulo tercero se analiza de manera técnica los resultados obtenidos mediante la aplicación de los métodos de Smart y Petrie, determinando una alternativa de optimización del sistema de levantamiento artificial por bombeo hidráulico, además se presenta una evaluación económica de la rentabilidad del proyecto propuesto y su viabilidad, mediante el uso de indicadores financieros que dan cuenta del beneficio obtenido, de la aplicación de la propuesta respecto a las condiciones actuales de producción.

En el cuarto capítulo se presentan las conclusiones derivadas del estudio y recomendaciones realizadas, sustentadas en el análisis de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología propuesta.

## PRESENTACIÓN

En el Campo Lago Agrio operado por Petroamazonas E.P., el sistema de levantamiento artificial por bombeo hidráulico, es el de mayor impacto en la producción de petróleo, sin embargo el diseño de sus parámetros de operación se han estimado en algunos casos de manera empírica y en otros, en base a características de diseño propias de cada fabricante; por lo tanto no existe una planeación integral del sistema de bombeo hidráulico en el campo.

El presente trabajo presenta la aplicación de los algoritmos planteados por Petrie y Smart para el diseño del sistema de bombeo hidráulico, para dimensionar adecuadamente los parámetros de operación del sistema de levantamiento o determinar las mejores condiciones de operación para instalar bombas jet, esto para optimizar la recuperación de hidrocarburos, lo cual nos permitirá brindar una alternativa de producción económicamente rentable.

El estudio propuesto adquiere especial importancia en la época actual donde los precios globales del petróleo limitan la capacidad de realizar grandes inversiones, lo cual lleva a la necesidad de optimizar sistemas de levantamiento fácilmente adaptables y económicos como éste.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 DESCRIPCIÓN DEL CAMPO LAGO AGRIO**

#### **1.1.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA**

El Campo Lago Agrio fue descubierto a partir de que, en el año de 1967 el consorcio Texaco – Gulf con Texaco como operadora, perfora el pozo Lago Agrio 1 entre febrero y abril, alcanzando una profundidad total de 10175 pies, con una producción a flujo natural de 2955 bppd de 29° API, provenientes de la formación Hollín.

El programa de perforación define la formación Hollín como objetivo primario y como secundario las areniscas y calizas de Napo y los conglomerados de Tiyuyacu. Este primer descubrimiento confirmó el potencial petrolífero de la cuenca Oriente y marcó el inicio de una agresiva etapa de exploración, que culminó en los años siguientes con el descubrimiento de los más grandes campos de la cuenca oriente. (Baby et al, 2014)

En Mayo de 1972, Lago Agrio se incorpora a la producción nacional como un campo petrolífero, con una producción promedia de 10450 bppd. En noviembre de 1973, alcanza su pico de producción máxima de 53618 bppd. A partir del año de 1980 se observa una declinación sostenida de la producción del campo, a razón de 15% anual. (Baby et al, 2014)

En los 45 años de actividad del campo, se han extraído alrededor de 158`512518 barriles de petróleo del Campo Lago Agrio. Al cierre de esta investigación, de

acuerdo al Forecast de septiembre de 2016, el campo tiene una producción promedio de 3632 bppd.

El pozo Lago Agrio 1 produjo, hasta el 2003, alrededor de 9 millones 600 mil barriles, de los cuales el 99% del crudo proviene de la arenisca Hollín y el resto de “Zona Napo” como consta, sin especificar a cuales reservorios engloba dicha zona, en los últimos reportes de producción de Texaco en 1975. Las últimas pruebas realizadas en este pozo en el año de 2003, arrojan alrededor de 60 bppd, lo cual demuestra que el campo está agotando su capacidad productiva y un debilitamiento del potencial productivo, reflejado en sus curvas declinantes de producción.

### 1.1.2 UBICACIÓN

El Campo Lago Agrio se encuentra ubicado en la región amazónica del Ecuador, provincia de Sucumbíos, cantón Nueva Loja, al noroeste de la Cuenca Oriente. En la organización geográfica petrolera ecuatoriana, se encuentra en el bloque petrolero 56 como se puede observar en la figura 1.1.

Cuenta con una extensión total de 41.8 km<sup>2</sup>, con 150 pies de cierre vertical, sus coordenadas son: latitudes 0°00’-0° 10’ N y longitudes 76° 50’- 76° 57’W, las coordenadas geográficas se muestran en la tabla 1.1:

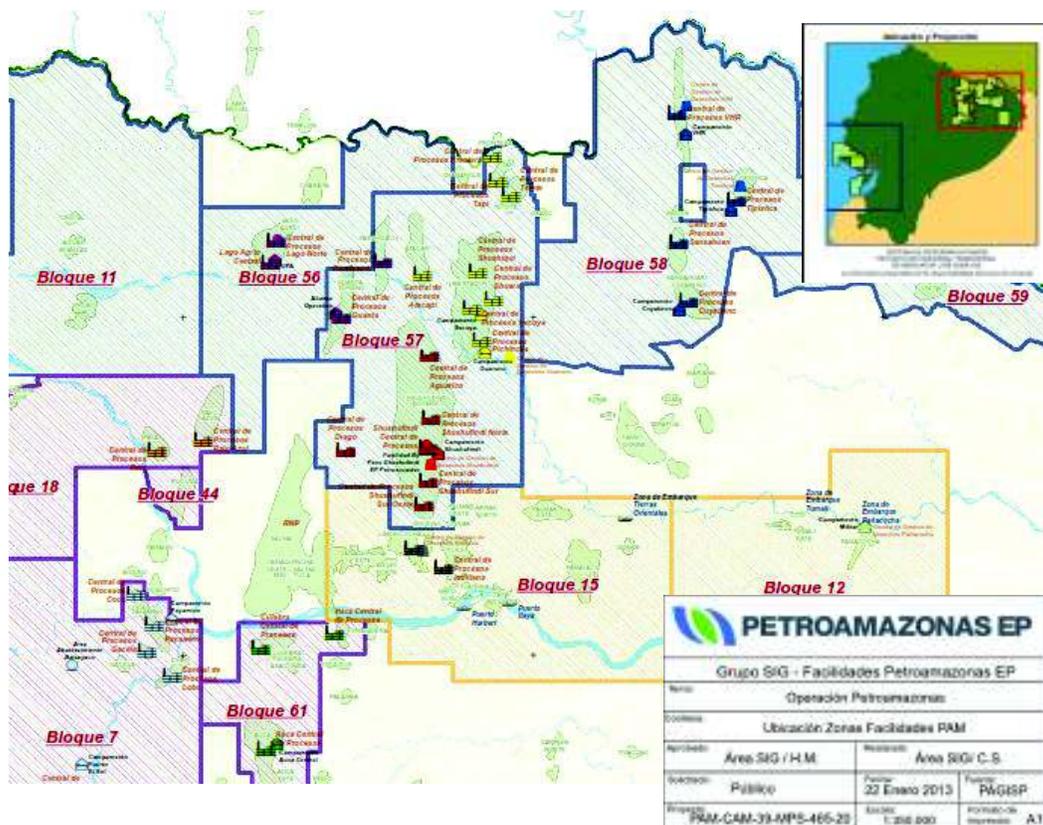
**TABLA 1.1 COORDENADAS DEL CAMPO LAGO AGRIO**

| PUNTO | COORDENADAS GEOGRÁFICAS |                  | COORDENADAS MÉTRICAS |            |
|-------|-------------------------|------------------|----------------------|------------|
| 1     | 76° 58’ 28.53’’ W       | 00° 09’ 43.85’’N | 10.017.936.88        | 280.225.86 |
| 2     | 76° 44’ 45.63’’ W       | 00° 09’ 43.85’’N | 10.017.936.88        | 305.675.86 |
| 3     | 76° 44’ 45.63’’ W       | 00° 03’ 49.94’’S | 9.992.936.88         | 305.675.86 |
| 4     | 76° 58’ 28.53’’ W       | 00° 03’ 49.94’’S | 9.992.936.88         | 280.225.86 |

FUENTE: Archivo técnico, PETROAMAZONAS E.P. 2016

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**FIGURA 1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA CAMPO LAGO AGRIO**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P. 2016  
Elaborado por: Departamento FIC

Geológicamente se encuentra alineado en el Play petrolero de los campos Tiguino, Cononaco, Auca, Sacha, Palo Azul-Rojo y Charapa; que entrapan hidrocarburos en las secuencias detríticas de las formaciones Hollín, Napo. (Grefa, 2012)

### 1.1.3 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA

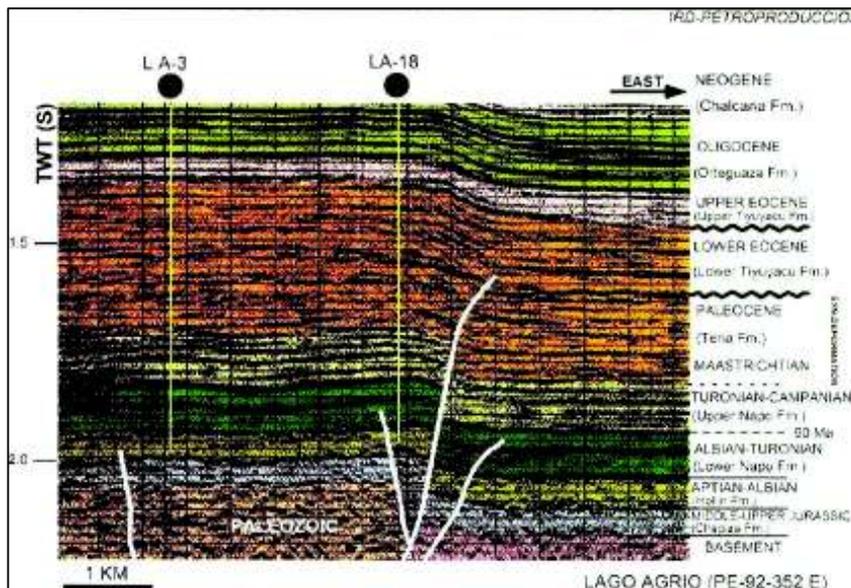
#### 1.1.3.1 Estructura

La estructura Lago Agrio se observa como anticlinal simétrico fallado, alargada en dirección Nor Este - Sur Oeste, de una longitud aproximada de 11 km con un ancho promedio de 4.5 km; limitado al este por una falla regional inversa y por el

flanco occidental limitado por una segunda falla, lo que asegura el cierre de la estructura.

La estructura Lago Agrio crece como resultado de esfuerzos transgresivos que reactivan la falla oriental del campo, dando inicio a la formación de las estructuras del campo en el período de depositación de Tena inferior, Maestrichtiano y en el Mío-Plioceno provoca un flexuramiento de las capas que alcanzan horizontes cercanos a la superficie como se observa en la figura 1.2. Está determinada como una inversión de fallas extensionales reactivadas por un régimen tectónico compresivo durante el Cretáceo Superior. (Baby et al, 2014)

**FIGURA 1.2 SECCIÓN SÍSMICA CAMPO LAGO AGRIO**



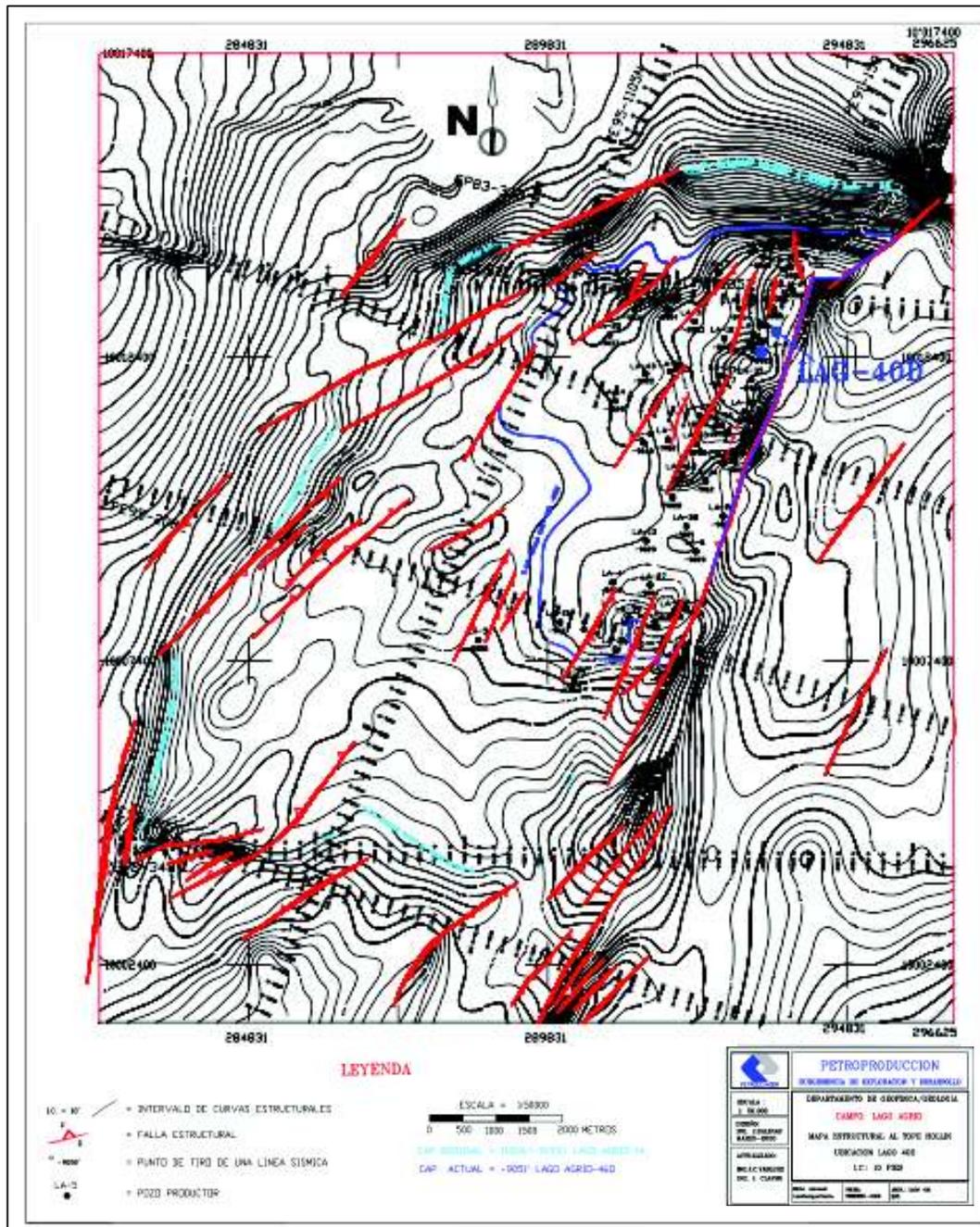
Fuente: La Cuenca Oriente, Geología y Petróleo, (Baby et al, 2014)  
Elaborado por: IRD-Petroproducción

En el mapa estructural elaborado al tope de Hollín, figura 1.3, se observa un anticlinal con un eje principal en la dirección NNE-SSO, con dos altos al norte separado por un valle perpendicular al eje mencionado y un tercer alto en la parte sur de la estructura.

La estructura a nivel de la caliza "A", figura 1.4, está limitada en su flanco oriental por una falla transpresional que hacia el sur, continua hacia la estructura Palo

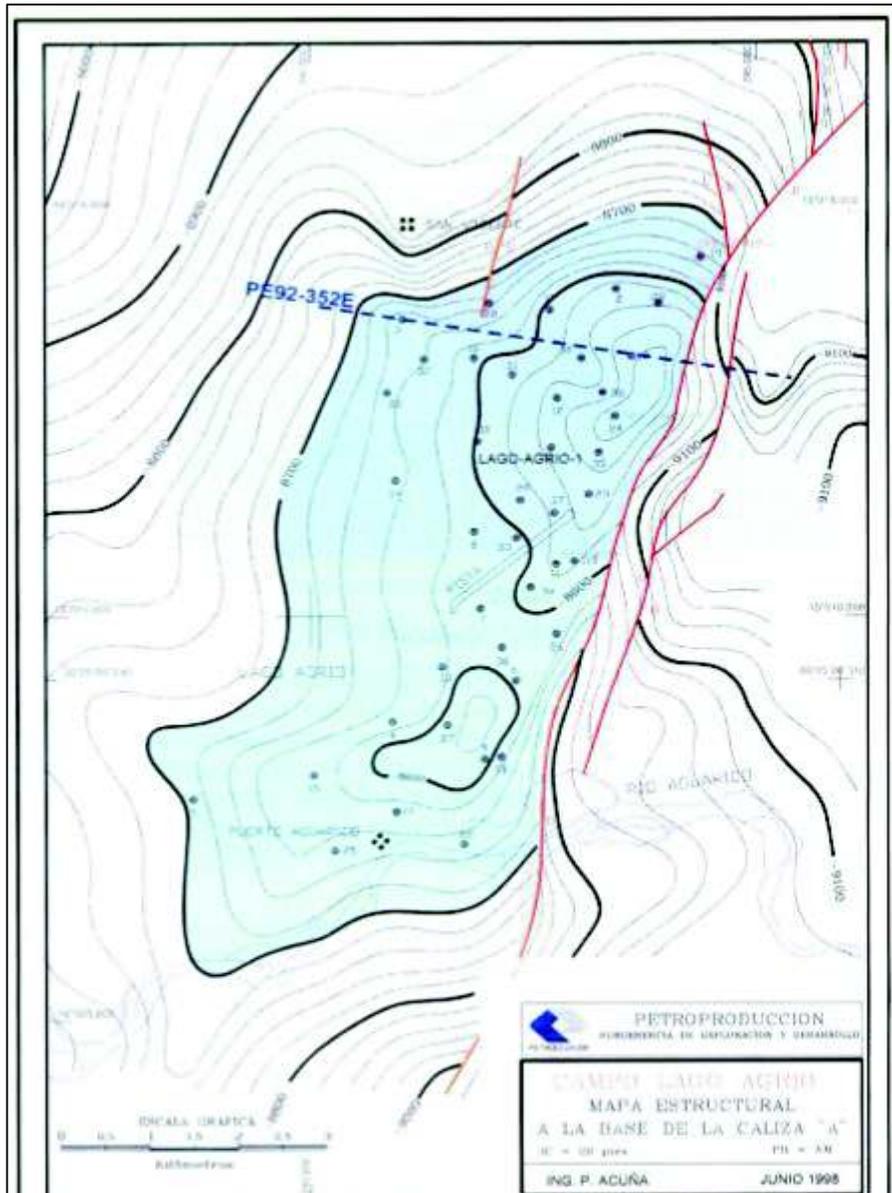
Rojo, y hacia el norte, corta el flanco oriental del campo Charapa base de la caliza A. (Baby et al, 2014)

**FIGURA 1.3 MAPA ESTRUCTURAL TOMADA AL TOPE DE HOLLÍN**



Fuente: La Cuenca Oriente, Geología y Petróleo, (Baby et al, 2014)  
Elaborado por: Petroproducción

**FIGURA 1.4 MAPA ESTRUCTURAL A LA BASE DE LA CALIZA "A"**



Fuente: La Cuenca Oriente, Geología y Petróleo, (Baby et al, 2014)  
Elaborado por: Petroproducción

### 1.1.3.2 Estratigrafía y litología

Como se expresó anteriormente la formación objetivo principal para el campo es el yacimiento Hollín, el cual se subdivide en dos Hollín superior y Hollín inferior, con alta porosidad y permeabilidad.

Los yacimientos secundarios son las Arenas “U” y “T”, pertenecientes a Napo, resaltando la arena “Ti” cuyo espesor tiende a mejorar respecto de “Us” y “Ts” que tienen un desarrollo pobre de areniscas y el yacimiento “Basal Tena”, pocos pozos producen de este último.

Las principales características de las formaciones productivas del campo se detallan en la tabla 1.2.

**TABLA 1.2 CARACTERÍSTICAS DE FORMACIONES PRODUCTIVAS CAMPO LAGO AGRIO**

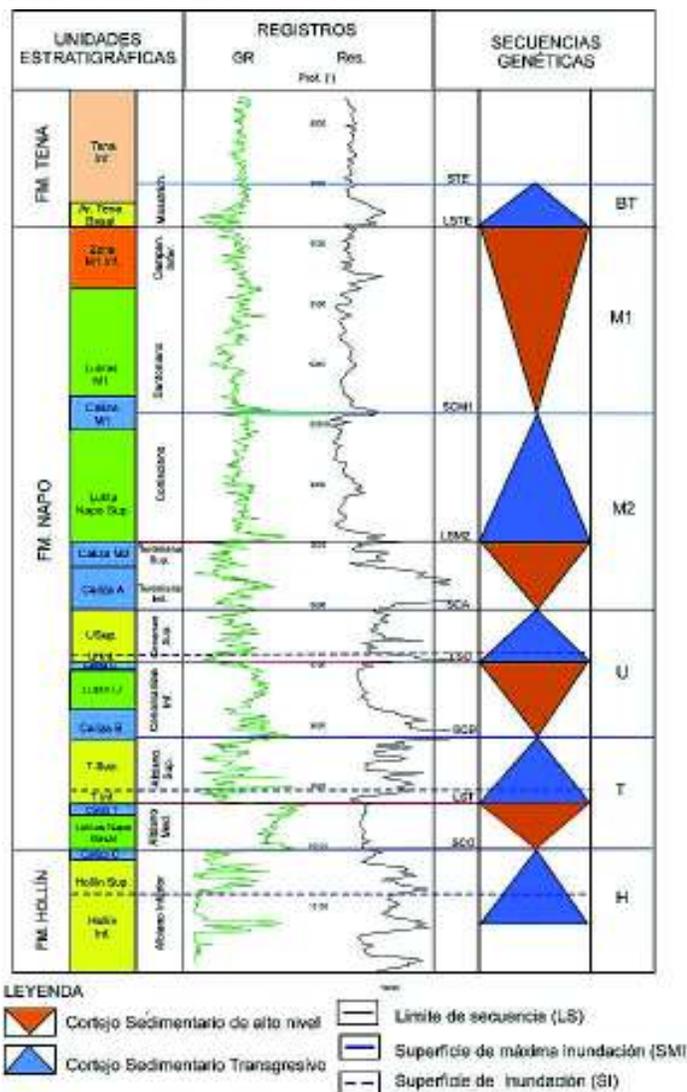
| Formación | Zona        | Tope – Base (ft) | Espesor (ft) | Características  | °API   | Porosidad  |
|-----------|-------------|------------------|--------------|--|--------|------------|
| HOLLÍN    | Hollín Inf. | 9994 – 10161     | 184 a 295    | Constituido principalmente de areniscas limpias con poca presencia de arcilla  | 28-32° | 8 % a 20 % |
|           | Hollín Sup. | 9903 – 10048     | 16 a 70      | Constituida de dos flujos de areniscas glauconiliticas, intercalación de lutitas y calizas                             |        | 12 % a 19% |
| NAPO      | T           | 9746 – 9958      | 35 a 106     | Constituido por arenisca cuarzosa glauconiliticas, gris verdosa, grano fino a medio, cemento silicio, a veces calcáreo | 29-34° | 9% A 18%   |
|           | U           | 9508 – 9720      | 44 a 102     | Constituido por arenisca cuarzosa, gris claro, café, grano fino a grueso con glauconita                                | 29-31° | 9% a 20%   |
| TENA      | Basal Tena. | 8873 – 9002      | 8 a 32       | Constituido por arenisca cuarzosa, grano fino a grueso color café claro cemento silicio a veces calcáreo.              | 28-29° | 9% a 21%   |

FUENTE: Departamento de Ingeniería de Petróleos Campo Lago Agrio 2016

ELABORADO POR: Becerra Freddy

La sección estratigráfica Hollín – Napo – Tena inferior correspondiente al campo Lago Agrio se muestra en la figura 1.5.

**FIGURA 1.5 SECCIÓN ESTRATIGRÁFICA HOLLÍN-NAPO-TENA INFERIOR, DEL CAMPO LAGO AGRIO**



Fuente: La Cuenca Oriente, Geología y Petróleo, (Baby et al, 2014)  
Elaborado por: Patrice Baby

### 1.1.3.3 Descripción de las características y propiedades de la roca y fluidos

Las características promedio básicas de las rocas productoras del campo, se detallan en la tabla 1.3.

**TABLA 1.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS ROCAS DEL CAMPO LAGO AGRIO**

| PARÁMETROS                                 | RESERVORIO |      |      |      |
|--|------------|------|------|------|
|  | B.T.       | U    | T    | H    |
| P <sub>b</sub> (psi)                       | 810        | 800  | 770  | 880  |
| Saturación de Agua (%)                     | 27         | 35.5 | 38.6 | 29.6 |
| Porosidad promedio (%)                     | 15         | 14.5 | 13.6 | 15.2 |
| Temperatura del yacimiento (°F)            | 192        | 207  | 214  | 232  |
| Permeabilidad promedio del reservorio (md) | 106        | 473  | 261  | 100  |

FUENTE: Departamento de Ingeniería de Petróleos Campo Lago Agrio, 2016

ELABORADO POR: Becerra Freddy

El conocimiento de estas propiedades es fundamental para entender el comportamiento del yacimiento. Éstas fueron determinadas a partir de muestras de fondo a condiciones de yacimiento y mediante correlaciones empíricas.

Cuando se dispone de muestras de fluido, las propiedades de éstos pueden ser determinadas mediante un análisis en el laboratorio denominado análisis PVT, los resultados obtenidos para fluidos del campo Lago Agrio se describen en la tabla 1.4.

**TABLA 1.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS DEL CAMPO LAGO AGRIO**

| PARÁMETROS   | RESERVORIO |        |        |       |
|--|------------|--------|--------|-------|
|  | B.T.       | U      | T      | H     |
| Pr (psi)   | 3500       | 4195   | 4417   | 4485  |
| Compresibilidad de petróleo ( $\cdot 10^{-6}$ ) (psi <sup>-1</sup> ) | 8.010      | 9.266  | 8.529  | 8.486 |
| Factor volumétrico de petróleo (bl/BF)                               | 1.1584     | 1.2424 | 1.2179 | 1.178 |
| Factor volumétrico de petróleo a P <sub>b</sub> (bl/BF)              | 1.1863     | 1.294  | 1.27   | 1.21  |
| Viscosidad del petróleo (cp)   | 1.527      | 1.56   | 1.56   | 1.50  |
| Viscosidad del petróleo 60°F y 14.7 psi (cp)                         | 1.125      | 1.120  | 1.155  | 0.981 |
| Gravedad API   | 27.5       | 29.7   | 32.3   | 29.8  |
| Gas en solución, R <sub>s</sub> (pie <sup>3</sup> /BF)               | 198        | 251    | 264    | 227   |

FUENTE: Departamento de Ingeniería de Petróleos Campo Lago Agrio, 2016

ELABORADO POR: Becerra Freddy

## 1.2 ESTADO ACTUAL DEL CAMPO

### 1.2.1 RESERVAS

Las reservas, están definidas como el volumen de hidrocarburo que se prevé recuperar en condiciones económicamente rentables, naturalmente involucra algún grado de incertidumbre.

Para un yacimiento dado, existe una acumulación de petróleo y/o gas contenida en éste, conocida como el petróleo original in situ, POES. Por lo tanto, para determinar las reservas de un yacimiento debemos conocer primero el POES, ya que las reservas están dadas por la fracción del POES que se puede recuperar, teniendo en cuenta que por la propia naturaleza del yacimiento, no se puede recuperar la totalidad del petróleo existente in situ.

En el año de 1998, se realizó un estudio de simulación de los yacimientos de interés del campo, estos son “Basal Tena”, “U”, “T” y “Hollín”; el cual determinó que el POES es de 504`354447 barriles, con un factor de recobro promedio de 37%. La tabla 1.5 muestra las reservas originales y remanentes a septiembre de 2016.

**TABLA 1.5 RESERVAS DEL CAMPO LAGO AGRIO AL 30 DE SEPTIEMBRE DE 2016**

| ZONA         | POES (bl)        | FR Inicial (%) | RESERVAS ORIGINALES |                |                  | Producción acumulada (bl) al 30/09/2016 | Reservas Remanentes (bl) al 30/09/2016 |
|--------------|------------------|----------------|---------------------|----------------|------------------|---|--|
|              |                  |                | Probadas (bl)       | Probables (bl) | TOTALES (bl)     |   |  |
| B. T.        | 17771529         | 40             | 7108611             | 0              | 7108611          | 4966532                                 | 2141079                                |
| U            | 45593985         | 24             | 10942556            | 0              | 10942556         | 3148978                                 | 77993578                               |
| T            | 49148888         | 24             | 11795733            | 0              | 11795733         | 6531973                                 | 5263796                                |
| Hollín       | 391840045        | 40             | 156736018           | 0              | 156736018        | 143865071                               | 12870947                               |
| <b>TOTAL</b> | <b>504354447</b> | <b>37</b>      | <b>186582918</b>    | <b>0</b>       | <b>186582918</b> | <b>158512518</b>                        | <b>28070400</b>                        |

FUENTE: Archivo técnico de la Secretaría de Hidrocarburos del Ecuador, 2016

ELABORADO POR: Becerra Freddy

### 1.2.2 PRESIONES

Las presiones promedias de reservorio obtenidas inicialmente de las formaciones productoras son:

- “Basal Tena”: 3500 psi.
- “U”: 4195 psi.
- “T”: 4417 psi.
- “Hollín”: 4485 psi.

En la tabla 1.6 se muestra la matriz de presiones de los pozos del campo Lago Agrio, obtenidas mediante pruebas de restauración de presión B`UP.

**TABLA 1.6 PRESIONES DE RESERVORIO DE POZOS PRODUCTORES CAMPO LAGO AGRIO**

| POZO       | YACIMIENTO | P <sub>R</sub> (psi) | P <sub>WF</sub> (psi) |
|------------|------------|----------------------|-----------------------|
| LGAB – 09A | T          | 2248                 | 859                   |
| LGAC – 11  | Hs         | 4012                 | 1299                  |
| LGA – 13   | Hs.        | 3967                 | 1312                  |
| LGA – 18   | Hs + Hi    | 3620                 | 1124                  |
| LGA – 22   | B.T.       | 1650                 | 1380                  |
| LGA – 27   | Hs         | 3976                 | 1412                  |
| LGAH – 31  | Ts +Tp     | 1213                 | 467                   |
| LGA – 34   | Us         | 2643                 | 1155                  |
| LGA – 35   | Hs         | 2100                 | 989                   |
| LGA – 37   | Hs         | 3992                 | 1158                  |
| LGA – 38   | Us + Ui    | 1229                 | 1059                  |
| LGAJ – 39  | Hs         | 3445                 | 1069                  |
| LGAE – 40  | Hs         | 3991                 | 1312                  |
| LGA – 41   | Ti         | 2234                 | 420                   |
| LGAI – 43  | Hs         | 3349                 | 1157                  |
| LGAG – 44  | Hs         | 3120                 | 550                   |
| LGAF – 47  | Hs + Hi    | 4108                 | 1095                  |
| LGAH – 54  | B.T.       | 1823                 | 1002                  |

FUENTE: Departamento de Ingeniería de Petróleos Campo Lago Agrio, septiembre 2016  
ELABORADO POR: Becerra Freddy

### 1.2.3 ESTADO ACTUAL DE LOS POZOS

Hasta septiembre de 2016 en el Campo Lago Agrio se han perforado 57 pozos, de los cuales únicamente 18 están en producción, debido a que el campo está caracterizado como un campo maduro, es decir se encuentra en declinación, teniendo en cuenta que hasta esta fecha produjo durante más de 44 años continuamente.

En los pozos del campo, se observa una declinación constante de la producción y un incremento en el porcentaje de agua producida, lo que junto a otros problemas ha llevado a tener fuera de operación un total de 44 pozos; 2 han sido abandonados definitivamente, 2 están en espera de abandono definitivo y un pozo ha sido convertido a reinyector, en la tabla 1.7 se resumen el estado actual de los pozos del Campo Lago Agrio.

**TABLA 1.7 ESTADO ACTUAL DE POZOS CAMPO LAGO AGRIO**

| ESTADO             | NÚM. DE POZOS |
|--------------------|---------------|
| Produciendo        | 18            |
| Cerrado            | 21            |
| E.W.O              | 13            |
| Abandonado         | 2             |
| Esperando Abandono | 2             |
| Reinyector         | 1             |

FUENTE: Departamento de Ingeniería de Petróleos Campo Lago Agrio, septiembre 2016  
ELABORADO POR: Becerra Freddy

La tabla 1.8 muestra los yacimientos de los cuales se encuentran produciendo los pozos, así como también el sistema de levantamiento artificial con el que operan.

**TABLA 1.8 POZOS PRODUCTORES DEL CAMPO LAGO AGRIO**

| POZO       | YACIMIENTO | Sistema de levantamiento |
|------------|------------|--------------------------|
| LGAB – 09A | T          | HIDRÁULICO – JET         |
| LGAC – 11  | Hs         | B.E.S.                   |
| LGA – 13   | Hs         | B.E.S.                   |
| LGA – 18   | Hs + Hi    | HIDRÁULICO – JET         |
| LGA – 22   | B.T.       | HIDRÁULICO – JET         |
| LGA – 27   | Hs         | B.E.S.                   |

**TABLA 1.8 CONTINUACIÓN**

| POZO      | YACIMIENTO | Sistema de levantamiento |
|-----------|------------|--------------------------|
| LGAH – 31 | Ts + Tp    | B.E.S.                   |
| LGA – 34  | Us         | MECÁNICO                 |
| LGA – 35  | Hs         | HIDRÁULICO – JET         |
| LGA – 37  | Hs         | B.E.S.                   |
| LGA – 38  | Us + Ui    | HIDRÁULICO – JET         |
| LGAJ – 39 | Hs         | HIDRÁULICO – JET         |
| LGAE – 40 | Hs         | B.E.S.                   |
| LGA – 41  | Ti         | B.E.S.                   |
| LGAI – 43 | Hs         | HIDRÁULICO – JET         |
| LGAG – 44 | Hs         | HIDRÁULICO – JET         |
| LGAF – 47 | Hs + Hi    | B.E.S.                   |
| LGAH – 54 | B.T.       | B.E.S.                   |

FUENTE: Departamento de Ingeniería de Petróleos Campo Lago Agrio, septiembre 2016

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Los pozos que se encuentran en espera de trabajos de reacondicionamiento y el motivo se detallan en la tabla 1.9

**TABLA 1.9 POZOS QUE SE ENCUENTRAN EN ESPERA DE WORK OVER (E.W.O.)**

| POZO      | Yacimiento | Método de Levantamiento Anterior | Observaciones  |
|-----------|------------|----------------------------------|--|
| LGA – 02  | Hs         | Mecánico                         | W.O. Suspendido  |
| LGA – 04  | Hs         | B.E.S                            | Packer desasentado   |
| LGA – 17  | Ts + Ti    | Mecánico                         | Sarta de varillas se desprende al fondo del pozo (17-julio-2016) |
| LGA – 24  | Hs         | B.E.S.                           | Equipo desprendido, se detecta TBG roto a +/- 3100'              |
| LGA – 25  | Ui         | Mecánico                         | W.O. Suspendido por IGAPo (8-nov-2015)                           |
| LGA – 30  | Ui         | Mecánico                         | Bomba mecánica atascada en NO-GO                                 |
| LGA – 32  | Hs         | Hidráulico                       | Recirculando en superficie para CPS.                             |
| LGA – 33  | Hs + Hi    | Hidráulico                       | W.O. Suspendido, pescado (Cable + B.E.S.)                        |
| LGA – 36  | Hs         | Hidráulico                       | W.O. Suspendido, por IGAPo realizar fractura.                    |
| LGAF – 42 | Hs         | B.E.S.                           | Posible comunicación csg-tbg, Tubing punch a 9490'               |

**TABLA 1.9 CONTINUACIÓN**

| POZO      | Yacimiento | Método de Levantamiento Anterior | Observaciones               |
|-----------|------------|----------------------------------|-----------------------------|
| LGAF – 48 | Hs         | Hidráulico                       | Pozo no aporta              |
| LGAG – 50 | Hs         | B.E.S.                           | Equipo B.E.S. atascado      |
| LGAH – 60 |            | Hidráulico                       | W.O. suspendido con pescado |

FUENTE: Departamento de Ingeniería de Petróleos Campo Lago Agrio, septiembre 2016  
ELABORADO POR: Becerra Freddy

El detalle de los pozos cerrados y el motivo del cierre se muestran en la tabla 1.10

**TABLA 1.10 POZOS CERRADOS CAMPO LAGO AGRIO**

| POZO      | YACIMIENTO | Motivo del cierre                                |
|-----------|------------|--|
| LGA – 01  | H          | Pozo no aporta                                   |
| LGA – 03  | H          | B.E.S. off circuitado                            |
| LGA – 06  | H          | Comunicación csg-tbg                             |
| LGA – 08  | H          | Packer desasentado                               |
| LGA – 9B  | Ui         | Pozo no aporta                                   |
| LGA – 12  |            | Cerrado por bajo aporte                          |
| LGA – 14  | H          | Posible cable circuitado (4-junio-1992)          |
| LGA – 15  | U          | Atascamiento externo del tubing de 8800' @ 8900' |
| LGA – 20  | U          | Packer desasentado (29-agosto-1994)              |
| LGA – 21  | B.T.       | Sin tubing (17-marzo-2008)                       |
| LGA – 23  | H          | Alto %BSW, Casing roto @ 3690', pozo no aporta   |
| LGA – 26  | H          | Cerrado por alto %BSW (1-diciembre-2010)         |
| LGA – 28  | H          | Bomba atascada (17-junio-2010)                   |
| LGA – 29  | U          | Comunicación CSG-TBG                             |
| LGA – 45  | B.T.       | Cerrado pozo sin bomba de subsuelo               |
| LGA – 46D | Ti         | Pozo no aporta (6-agosto-2008)                   |
| LGAE – 49 | Ui         | Cerrado por bajo aporte                          |
| LGA – 51D | B.T.       | Pozo no aporta, alto %BSW                        |
| LGA – 52  |            | Pozo no aporta.                                  |
| LGA – 53  | B.T.       | Pozo no aporta, alto %BSW                        |
| LGAH – 55 | Hi         | Cerrado por alto %BSW                            |

FUENTE: Departamento de Ingeniería de Petróleos Campo Lago Agrio, septiembre 2016  
ELABORADO POR: Becerra Freddy

Los pozos en espera de abandono y los pozos abandonados con su respectivo motivo, se expresan respectivamente en las tablas 1.11 y 1.12.

**TABLA 1.11 POZOS EN ESPERA DE ABANDONO CAMPO LAGO AGRIO**

| POZO     | YACIMIENTO | Motivo del abandono                    |
|----------|------------|--|
| LGA – 05 | CA         | Gel no apto para fractura (1-ene-1995) |
| LGA – 10 | Hi         | Tapón CIBP a 4002' (13-febrero-2002)   |

FUENTE: Departamento de Ingeniería de Petróleos Campo Lago Agrio, septiembre 2016

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA 1.12 POZOS ABANDONADOS CAMPO LAGO AGRIO**

| POZO     | Yacimiento | Motivo del abandono                                      |
|----------|------------|--|
| LGA – 07 | H          | B.E.S. Pescado, Casing colapsado a 4820' (2-agosto-1981) |
| LGA – 19 | H          | Incapacidad de flujo (11-septiembre-1980)                |

FUENTE: Departamento de Ingeniería de Petróleos Campo Lago Agrio, septiembre 2016

ELABORADO POR: Becerra Freddy

El pozo 16B, corresponde al pozo reinector del Campo Lago Agrio, el cual inyecta 536 bapd provenientes de la estación Lago Agrio Central y 2211 de Lago Agrio Norte; total 2747 bapd a septiembre de 2016.

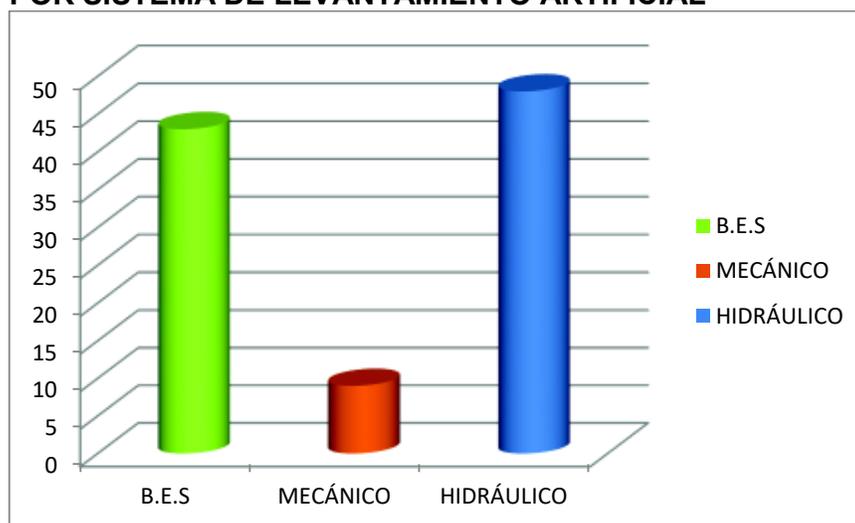
#### **1.2.4 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL.**

Cuando la energía disponible de un yacimiento no es suficiente para elevar el petróleo hasta la superficie, es necesario utilizar un sistema artificial de levantamiento, que proporcione la energía adicional requerida para continuar la explotación racional del yacimiento. (Melo, 2014)

Como se mencionó anteriormente la producción del campo proviene de 18 pozos, con una producción diaria de 3632 bppd, de los cuales 1 produce con bombeo mecánico, 9 con bombeo electrosumergible y 8 por bombeo hidráulico.

En la figura 1.6 se puede observar el porcentaje de incidencia que cada sistema de levantamiento artificial tiene en la producción general del campo, observándose que el bombeo hidráulico, objeto del presente estudio, representa el 48 % de la producción.

**FIGURA 1.6 PORCENTAJE DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO LAGO AGRIO POR SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL**



Fuente: Departamento de Producción Campo Lago Agrio, septiembre 2016  
Elaborado por: Becerra Freddy

### 1.2.5 ESTACIONES DE PRODUCCIÓN

Las operaciones del Campo Lago Agrio, se desarrollan en dos estaciones:

- Estación de producción Lago Agrio Central; y
- Estación de producción Lago Agrio Norte.

La tabla 1.13 Muestra la producción del campo por estaciones y la cantidad de fluido que manejan.

**TABLA 1.13 CANTIDAD DE FLUIDO PRODUCIDO POR ESTACIONES DEL CAMPO LAGO AGRIO**

| ESTACIONES   | bfpd | bppd | bapd | GAS MSCF |
|--------------|------|------|------|----------|
| LAGO CENTRAL | 2070 | 1534 | 536  | 397      |
| LAGO NORTE   | 4309 | 2098 | 2211 | 739      |
| TOTAL        | 6379 | 3632 | 2747 | 1136     |

FUENTE: Departamento de Producción Campo Lago Agrio, septiembre 2016  
ELABORADO POR: Becerra Freddy

Los pozos que producen a cada una de las estaciones de producción del campo se esquematizan en la tabla 1.14.

**TABLA 1.14 POZOS PRODUCTORES POR ESTACIÓN**

| ESTACIONES   | POZOS   |
|--------------|---|
| LAGO CENTRAL | <ul style="list-style-type: none"> <li>• LGAB – 09A</li> <li>• LGA – 013</li> <li>• LGA – 022</li> <li>• LGA – 027</li> <li>• LGA – 038</li> <li>• LGAJ – 039</li> </ul>  |
| LAGO NORTE   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• LGAC – 011</li> <li>• LGA – 018</li> <li>• LGAH – 031</li> <li>• LGA – 034</li> <li>• LGA – 035</li> <li>• LGA – 037</li> <li>• LGAE – 040</li> <li>• LGA – 041</li> <li>• LGAI – 043</li> <li>• LGAG – 044</li> <li>• LGAF – 047</li> <li>• LGAH – 054</li> </ul> |

FUENTE: Departamento de Producción Campo Lago Agrio, septiembre 2016

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Las estaciones de producción Lago Agrio central y Lago Agrio norte, cuentan con facilidades e instalaciones de superficie, que permiten realizar la separación de los fluidos que vienen de los pozos, almacenarlos y transferirlos; además de tratarlos químicamente y proceder a la reinyección de agua.

Las facilidades de producción de cada estación se detallan en la tabla 1.15.

**TABLA 1.15 FACILIDADES DE PRODUCCIÓN DE ESTACIONES CAMPO LAGO AGRIO**

| ESTACIÓN     | FACILIDADES DE PRODUCCIÓN  |
|--------------|--|
| LAGO CENTRAL | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema contraincendios</li> <li>• Manifold de producción</li> <li>• Manifold de prueba</li> <li>• Separador de prueba 5000 (bl/día)</li> <li>• Separador de producción 10000 (bl/día)</li> <li>• Bota de Gas de 20000 (bl/día)</li> <li>• Tanque de lavado de 14690 bl</li> <li>• Tanque de reposo 14100 bl</li> <li>• Bomba de recirculación</li> <li>• Bomba del calentador</li> <li>• Bomba booster</li> <li>• Bomba de inyección de químicos</li> <li>• Bomba HPS REDA</li> <li>• Bombas de transferencia</li> </ul> |

**TABLA 1.15 CONTINUACIÓN**

| ESTACIÓN   | FACILIDADES DE PRODUCCIÓN   |
|------------|---|
| LAGO NORTE | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema contra incendios</li> <li>• Manifold de producción</li> <li>• Manifold de prueba</li> <li>• Separador de prueba 5000 (bl/día)</li> <li>• Separador de producción 10000 (bl/día)</li> <li>• Bota de Gas de 15000 (bl/día)</li> <li>• Tanque de lavado de 24680 bl</li> <li>• Tanque de reposo 18800 bl</li> <li>• Calentador de 800 bapd</li> <li>• Bomba de recirculación</li> <li>• Bomba del calentador</li> <li>• Bomba booster para reinyección de agua</li> <li>• Bomba de inyección de químicos</li> <li>• Bombas de reinyección de agua</li> <li>• Bombas de transferencia</li> </ul> |

FUENTE: Departamento de Producción Campo Lago Agrio, septiembre 2016

ELABORADO POR: Becerra Freddy

### 1.2.6 SISTEMA POWER OIL

El sistema Power Oil, está diseñado para abastecer de fluido motriz en presión y caudal necesarios para la operación de los distintos pozos con sistema de levantamiento por bombeo hidráulico.

En el Campo Lago Agrio, dicho sistema no es centralizado en las estaciones, sino que más bien cada estación provee fluido motriz a sistemas independientes de bombeo que a su vez alimentan a varios pozos desde una locación determinada, sea ésta un pozo o en la estación misma.

El detalle del funcionamiento del sistema Power Oil del campo, tanto para la estación Lago Central, como para Lago Norte se detalla en las tablas 1.16 y 1.17 respectivamente.

**TABLA 1.16 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA POWER OIL ESTACIÓN LAGO CENTRAL**

| SISTEMA POWER OIL ESTACIÓN LAGO CENTRAL |                  |                   |           |                  |
|---|------------------|-------------------|-----------|------------------|
| BOMBA                                   | P. Succión (psi) | P. Descarga (psi) | UBICACIÓN | CAPACIDAD (bipd) |
| Tríplex National                        | 275              | 3550              | LGA – 13  | 2468             |
| Quíntuplex National                     | 145              | 3855              | LGA – 27  | 4114             |
| HPS REDA                                | 65               | 3900              | LGA – 39  | 4114             |

FUENTE: Departamento de Producción Campo Lago Agrio, septiembre 2016

ELABORADO POR: Becerra Freddy

La bomba tríplex que se encuentra en el pozo LGA – 13 inyecta fluido motriz al pozo LGA – 038.

El fluido motriz de la bomba quíntuplex instalada en la locación LGA – 27, alimenta el pozo LGA – 009A.

La bomba HPS REDA instalada en el pozo LGA – 39, inyecta fluido motriz a los pozos LGA – 022 y LGA – 039.

**TABLA 1.17 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA POWER OIL ESTACIÓN LAGO NORTE**

| SISTEMA POWER OIL ESTACIÓN LAGO NORTE |                  |                   |           |                  |
|---------------------------------------|------------------|-------------------|-----------|------------------|
| BOMBA                                 | P. Succión (psi) | P. Descarga (psi) | UBICACIÓN | CAPACIDAD (bipd) |
| HPS REDA                              | 655              | 3900              | LGA – 08  | 4114             |
| Quíntuplex National                   | 145              | 3855              | LGA – 23  | 4114             |
| HPS WOODGROUP                         | 150              | 5000              | ESTACIÓN  | 8297             |
| HPS CENTRILIFT                        | 150              | 3600              | LGA – 17  | 4114             |

FUENTE: Departamento de Producción Campo Lago Agrio, septiembre 2016

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Los pozos LGA – 018, LGA – 044, son alimentados de fluido motriz provenientes de la bomba HPS instalada en el LGA – 17.

La bomba quintuplex que se encuentra en el pozo LGA – 23 alimenta los pozos LGA – 35 y LGA – 48.

La HPS instalada en la estación Lago Norte, provee fluido motriz para los pozos LGA – 12, LGA – 43 y LGA – 32.

### **1.2.7 SISTEMA DE REINYECCIÓN DE AGUA**

El propósito de un sistema de reinyección de agua, es controlar el volumen total de agua producida, para lo cual es necesario contar con una serie de instalaciones que permitan tratar el agua de formación para mejorar la calidad del agua y prolongar la vida útil de los equipos y posteriormente reinyectarla.

El sistema de reinyección de agua del campo Lago Agrio, se encuentra en la estación Lago Agrio norte; el cual recibe agua desde los tanques de surgencia de las estaciones norte y central mediante bombas booster.

El agua proveniente de los tanques mencionados, llegan a un tanque de sedimentos cónico, pasa por un filtro de agua y finalmente a un tanque empernado de almacenamiento. Posteriormente con la ayuda de bombas booster, se alimentan bombas horizontales de reinyección de agua, que a su vez envía este fluido hasta el pozo reinyector LGA – 16, formación Tiyuyacu.

## **1.3 FUNDAMENTOS DEL BOMBEO HIDRÁULICO**

### **1.3.1 INTRODUCCIÓN**

Conforme avanza la vida productiva de un yacimiento, la energía natural con la que cuenta para producir hidrocarburos se ve disminuida, además de factores

propios del reservorio que contribuyen a tal efecto; cuando se observa este declive en la producción del mismo, se hace necesario aportar energía adicional al reservorio que permita continuar con la producción de hidrocarburos, esta energía adicional es lo que conocemos como sistemas de levantamiento artificial.

El propósito de los métodos 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. (Collaguazo y Romero, 2011)

El sistema de levantamiento por bombeo hidráulico, objeto de este estudio, fue implementado en los años 60, pero su etapa de desarrollo se remonta a 1932, debido a sus claras ventajas en relación a otros sistemas de levantamiento, se presenta como una viable alternativa de levantamiento artificial.

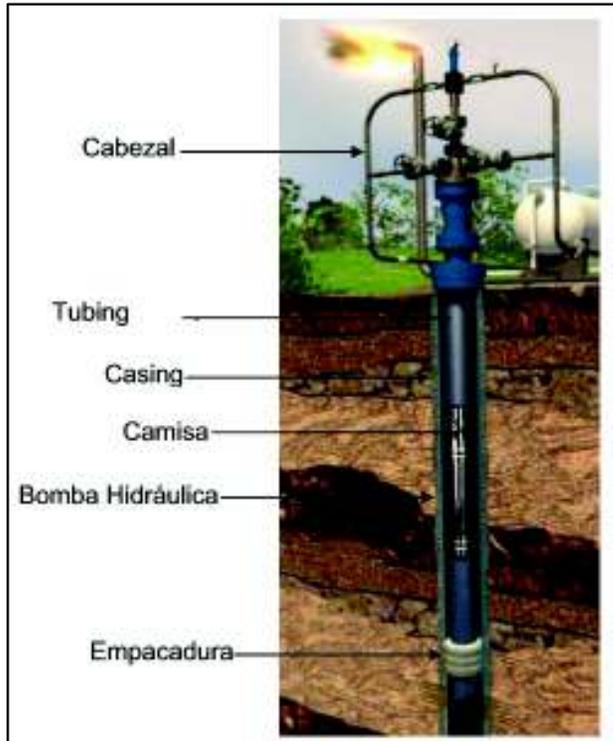
### **1.3.2 DEFINICIÓN**

El principio fundamental en el cual se basa el bombeo hidráulico es la Ley de Pascal, que expresa que: *“La presión aplicada sobre cualquier punto de un líquido se transmite, con igual intensidad, a cada punto del fluido y a las paredes del recipiente que lo contiene”*.

Mediante este principio se consigue transmitir presión desde la superficie, por medio de un arreglo de tuberías llenas de líquido, a cualquier punto de un pozo de petróleo; accionando en fondo una bomba hidráulica tipo pistón o tipo jet.

La figura 1.7 ilustra los componentes en superficie y en subsuelo de un arreglo típico de bombeo hidráulico.

**FIGURA 1.7 PRINCIPALES COMPONENTES DEL BOMBEO HIDRÁULICO**



Fuente: Manual de Operaciones Sertecpet, 2008  
Elaborado por: Sertecpet

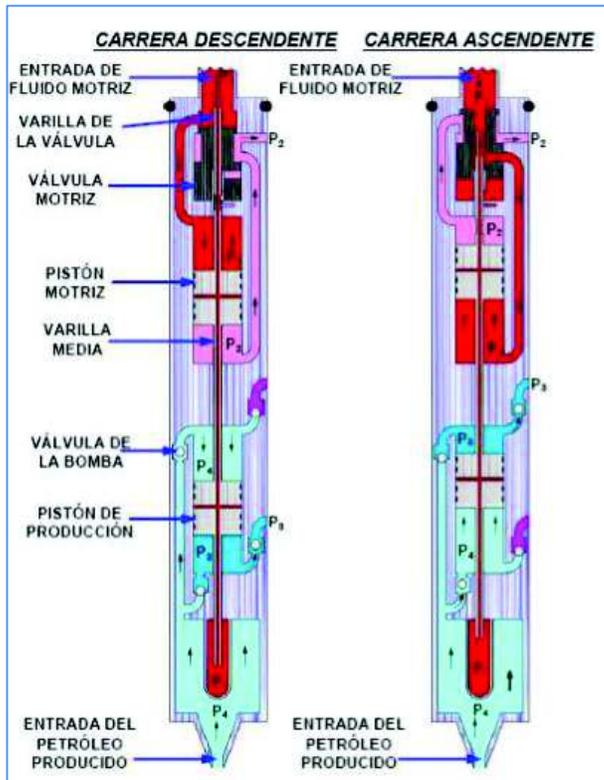
### 1.3.3 BOMBEO HIDRÁULICO TIPO PISTÓN

En el bombeo hidráulico tipo pistón, utiliza una bomba en fondo de desplazamiento positivo, la misma que consta de un motor hidráulico recíprocante accionado mediante un fluido motriz, conectado por un eje a un pistón en el extremo de bombeo.

La bomba actúa casi como una bomba de varillas, excepto que las bombas hidráulicas son usualmente de doble acción, es decir el fluido está siendo desplazado de la bomba en la carrera ascendente y en la carrera descendente. (Melo, 2014)

Los componentes básicos de una bomba hidráulica tipo pistón y su funcionamiento general tanto en la carrera ascendente como descendente se observan en la figura 1.8.

**FIGURA 1.8 BOMBA HIDRÁULICA TIPO PISTÓN**



Fuente: Levantamiento Artificial, (Melo, 2014)  
Elaborado por: Melo Vinicio

### 1.3.4 BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET

El sistema de bombeo hidráulico tipo jet, es una variante del bombeo hidráulico que a diferencia del tipo pistón, no consta de partes móviles.

El principio de funcionamiento de la bomba hidráulica tipo jet es el principio de Venturi, mediante el cual se produce la transformación de energía potencial en energía cinética, mediante el cambio de áreas figura 1.9.

El fluido motriz, con energía potencial, entra por la parte superior de la bomba y pasa a través de un área reducida, la tobera, donde se produce un cambio de energía potencial a cinética a la salida de ésta; esto provoca un efecto de succión de los fluidos de la formación. Los fluidos de inyección y de producción mezclados entran en una zona de área constante llamada garganta o troath la cual actúa como una cámara de mezclado cuyo diámetro es mayor al de la tobera. Después, la mezcla pasa al difusor, que es la última sección de trabajo, en donde la energía que en su mayor parte es conservada en forma de velocidad se convierte en presión, energía potencial, la cual debe ser suficiente para vencer la presión ejercida por la columna de fluidos en el espacio anular y llevar estos fluidos hasta la superficie.

**FIGURA 1.9 PRINCIPIO DE VENTURI EN BOMBA JET**



Fuente: Manual de Operaciones Sertecpet, 2008  
Elaborado por: Sertecpet

#### 1.3.4.1 Partes de la bomba hidráulica tipo jet

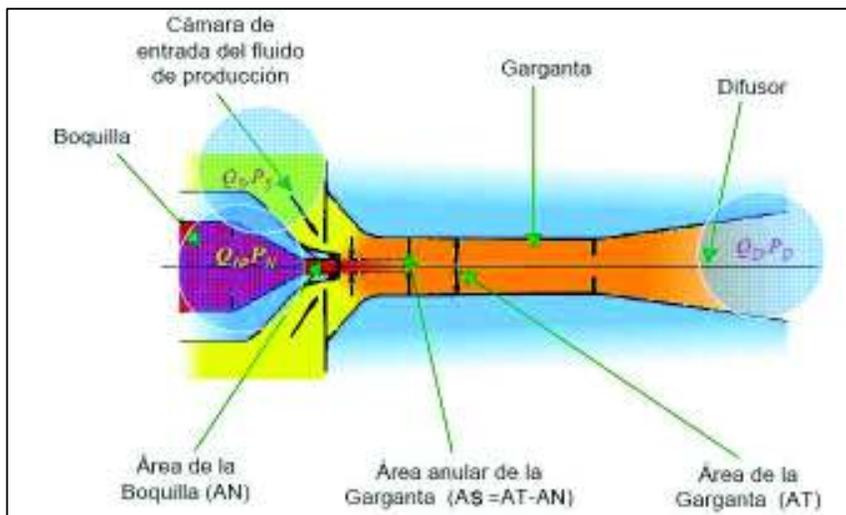
Para su funcionamiento la bomba hidráulica tipo jet consta de tres partes fundamentales:

- Tobera (Nozzle): Es un instrumento diseñado para trabajar en condiciones de altas presiones y temperaturas; tiene una forma de embudo con diámetro mayor a la entrada y menor a la salida, lo cual sirve para convertir la energía potencial en cinética.

- Garganta (Troath): Es la cámara de mezclado donde ingresan el fluido motriz a alta velocidad y el fluido de formación.
- Difusor: Consta de una forma de embudo inverso en relación a la tobera, cuya zona expandida es por donde salen los fluidos mezclados y por el cambio de diámetros permite la transformación de energía cinética en potencial, la misma que llevará los fluidos a superficie.

La figura 1.10. muestra las principales partes de la bomba jet.

**FIGURA 1.10 PARTES DE LA BOMBA HIDRÁULICA TIPO JET**



Fuente: Oilwell Hydraulics Inc., (2001)

Elaborado por: Oilwell Hydraulics Inc.

Donde:

$P_S$  = Presión de succión

$P_N$  = Presión a la entrada de la tobera

$P_D$  = Presión de descarga

$Q_S$  = Caudal de fluido producido

$Q_N$  = Caudal de fluido motriz

$Q_D$  = Caudal de descarga (fluido motriz más fluido producido)

$A_N$  = Área de flujo de la tobera

$A_T$  = Área de flujo total en la cámara de mezclado

$A_S$  = Área anular de la cámara de mezclado para el flujo de la producción

#### **1.3.4.2 Ventajas del sistema de bombeo hidráulico tipo jet**

- No posee partes móviles.
- Permite manejar fluidos de cualquier calidad, sean estos parafínicos, gaseosos o con cualquier tipo de suciedad.
- La sección de trabajo compuesta por la tobera, la cámara de mezclado y el difusor es compacta lo que facilita su instalación.
- Tiene un alto rango de adaptabilidad a diferentes profundidades de pozos desviados u horizontales.
- Puede producir hasta 35000 bl/día.
- Maneja altas temperaturas de fondo.
- Puede trabajar con hidrocarburos desde los 6 °API.
- No necesita torre de reacondicionamiento para reparaciones u optimizaciones.

#### **1.3.4.3 Desventajas del sistema de bombeo hidráulico**

Entre las principales limitaciones del sistema tenemos:

- Presenta una baja eficiencia mecánica en relación a otros sistemas de levantamiento artificial.
- Requiere de altas presiones en la succión para evitar la cavitación.
- Requiere un fluido motriz limpio.

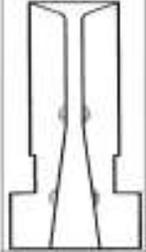
#### 1.3.4.4 Cavitación de las bombas hidráulicas tipo jet

El sistema de levantamiento por bombeo hidráulico tipo jet, requiere que a la entrada de la cámara de mezclado, el fluido producido esté acelerado hasta velocidades en el orden de 200 y 300 pie/s, lo cual presenta a la cavitación como un problema posible, debido a que el fluido sufre una caída de presión hasta llegar a una presión tal, en la que empieza a liberarse la primera burbuja de gas, punto de burbuja.

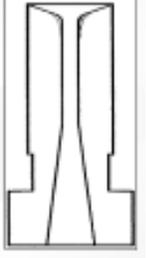
Cuando esta depresión ocurre, se forman burbujas o cavidades de vapor que viajan a zonas de mayor presión e implosionan provocando cargas puntuales en las paredes de la garganta lo cual causará erosión en la misma, provocando un funcionamiento incorrecto de la bomba.

La tabla 1.18 esquematiza los ejemplos de cavitación.

**TABLA 1.18 EJEMPLOS DE CAVITACIÓN EN BOMBA JET**

| LOCALIZACIÓN DE LA CAVITACIÓN  | EJEMPLO   |
|--|---|
| Cavitación en la entrada de la garganta, es provocada por el fluido de producción. Se soluciona aumentando el tamaño de la garganta.   |  |
| Cavitación en el extremo inferior de la garganta y entre el difusor, es causada por el fluido motriz usualmente indica menor presión de intake. Se soluciona disminuyendo el tamaño de la garganta y presión de operación. |  |

**TABLA 1.18 CONTINUACIÓN**

| LOCALIZACIÓN DE LA CAVITACIÓN   | EJEMPLO   |
|---|---|
| Erosión por arena, normalmente ocurre en una gran longitud de área desde el extremo de la entrada de la garganta dentro de la sección del difusor de la garganta. |  |
| El extremo de entrada de la garganta más ancho, usualmente por altos volúmenes de gas.  |  |

FUENTE: Manual de Operaciones Sertecpet, 2008

ELABORADO POR: Becerra Freddy

El objetivo al seleccionar la geometría óptima de la bomba tipo jet es: primero, escoger la bomba que levante el fluido con los menores requerimientos de potencia y, segundo, que no exista cavitación en la bomba. La cavitación ocurriría en la bomba cuando la presión del fluido producido dentro de la cámara de mezclado sea menor que la presión de saturación del fluido producido. Al ocurrir la cavitación la cámara de mezclado puede resultar dañada, por lo que es necesario seleccionar otra bomba, la cual aunque requiera mayor potencia HP, evitaría dichos daños. Los límites para la cavitación en la bomba se pueden predecir mediante modelos matemáticos teóricos o utilizando pruebas de laboratorio para establecer las constantes de dichas ecuaciones teóricas. (Melo, 2010)

#### 1.3.4.5 Fabricantes de bombas hidráulicas tipo jet

Como ya se dijo anteriormente, el Campo Lago Agrio es operado por la estatal Petroamazonas E.P. la misma que para su operación utiliza equipos hidráulicos y ensamblajes tipo jet de las siguientes marcas:

- Kobe;
- National OilMaster;
- Guiberson; y
- Claw.

El diseño básico de estos fabricantes es muy similar, la principal diferencia es la forma en que los fluidos son circulados dentro y fuera de la sección de trabajo. (Melo, 2014)

Todos reconocidos a nivel mundial con probada efectividad en el levantamiento de hidrocarburos por bombeo jet.

#### **1.3.4.6 Consideraciones de toberas y cámaras de mezclado de las bombas jet.**

A la combinación de una tobera (nozzle) y cámara de mezclado (troath), se le denomina geometría de bomba jet, la cual da origen a la nomenclatura para identificar el tamaño y capacidad de cada bomba.

El primer estudio del arreglo geométrico de bombas jet fue presentado por Gosline - O'Brien y luego mejorado por diversos autores, entre ellos Cunningham; de lo que se obtiene un conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento de bombas geoméricamente similares. Al expresar estas ecuaciones de forma adimensional, se aplican a todas las bombas siempre y cuando se desprecien los efectos de la viscosidad, como en su operación las bombas jet requieren de altas presiones y velocidades, esta condición se cumple.

Los diferentes fabricantes de bombas jet ofrecen un gran número de combinaciones de toberas y gargantas para varias condiciones de bombeo. Para cada diámetro de tobera, se pueden usar cinco o más gargantas proporcionando diferentes características de presión y flujo. (Melo, 2014)

Kobe, National y Guiberson tienen diferentes dimensiones y combinaciones de toberas y cámaras de mezclado. Kobe y National incrementan las áreas de las toberas y cámaras de mezclado en progresión geométrica, al igual que Guiberson, éste último se diferencia debido a que no usa el mismo factor sobre el rango total.

Las dimensiones ofrecidas por Guiberson cubren un rango ligeramente más amplio que los rangos ofrecidos por Kobe y National (Melo, 2014).

Las dimensiones de cada fabricante se indican en la tabla 1.19.

National y Kobe, establecen relaciones de incremento de áreas fijas entre toberas y gargantas, por lo tanto una tobera dada que se utilice con el mismo número de garganta siempre dará la misma relación de área (0.38 para National y 0.400 para Kobe). Ésta relación se conoce como relación A; Gargantas sucesivamente más grandes usadas con una tobera dada dan relaciones B, C, D y E. En el sistema Guiberson las combinaciones tobera – garganta no dan relaciones de áreas fijas, sin embargo cubren el mismo rango básico de los otros sistemas. (Melo, 2014)

**TABLA 1.19 TAMAÑOS DE TOBERAS Y GARGANTAS DE BOMBAS JET**  
**TAMAÑOS DE TOBERAS Y GARGANTAS PRINCIPALES FABRICANTES**

| KOBE   |          |    | NATIONAL |          |        | GUIBERSON |          |     | CLAW   |          |        |   |        |
|--------|----------|----|----------|----------|--------|-----------|----------|-----|--------|----------|--------|---|--------|
| TOBERA | GARGANTA |    | TOBERA   | GARGANTA |        | TOBERA    | GARGANTA |     | TOBERA | GARGANTA |        |   |        |
| 1      | 0.0024   | 1  | 0.0024   | 1        | 0.0064 | DD        | 0.0016   | 000 | 0.0044 | 1        | 0.0018 | A | 0.0046 |
| 2      | 0.0031   | 2  | 0.0031   | 2        | 0.0081 | CC        | 0.0028   | 00  | 0.0071 | 2        | 0.0030 | B | 0.0072 |
| 3      | 0.0040   | 3  | 0.0039   | 3        | 0.0104 | BB        | 0.0038   | 0   | 0.0104 | 3        | 0.0038 | C | 0.0104 |
| 4      | 0.0052   | 4  | 0.0050   | 4        | 0.0131 | A         | 0.0055   | 1   | 0.0143 | 4        | 0.0054 | D | 0.0142 |
| 5      | 0.0067   | 5  | 0.0064   | 5        | 0.0167 | A+        | 0.0075   | 2   | 0.0189 | 5        | 0.0074 | E | 0.0187 |
| 6      | 0.0086   | 6  | 0.0081   | 6        | 0.0212 | B         | 0.0095   | 3   | 0.0241 | 6        | 0.0094 | F | 0.0239 |
| 7      | 0.0111   | 7  | 0.0103   | 7        | 0.0271 | B+        | 0.0109   | 4   | 0.0314 | 7        | 0.0108 | G | 0.0311 |
| 8      | 0.0144   | 8  | 0.0131   | 8        | 0.0346 | C         | 0.0123   | 5   | 0.0380 | 8        | 0.0122 | H | 0.0376 |
| 9      | 0.0186   | 9  | 0.0167   | 9        | 0.0441 | C+        | 0.0149   | 6   | 0.0452 | 9        | 0.0148 | I | 0.0447 |
| 10     | 0.0240   | 10 | 0.0212   | 10       | 0.0562 | D         | 0.0177   | 7   | 0.0531 | 10       | 0.0175 | J | 0.0526 |
| 11     | 0.0310   | 11 | 0.0271   | 11       | 0.0715 | E         | 0.0241   | 8   | 0.0661 | 11       | 0.0239 | K | 0.0654 |
| 12     | 0.0400   | 12 | 0.0346   | 12       | 0.0910 | F         | 0.0314   | 9   | 0.0804 | 12       | 0.0311 | L | 0.0796 |
| 13     | 0.0517   | 13 | 0.0441   | 13       | 0.1159 | G         | 0.0452   | 10  | 0.0962 | 13       | 0.0450 | M | 0.0957 |
| 14     | 0.0668   | 14 | 0.0582   | 14       | 0.1476 | H         | 0.0661   | 11  | 0.1195 | 14       | 0.0658 | N | 0.1119 |
| 15     | 0.0863   | 15 | 0.0715   | 15       | 0.1879 | I         | 0.0855   | 12  | 0.1452 | 15       | 0.0851 | O | 0.1445 |
| 16     | 0.1114   | 16 | 0.0910   | 16       | 0.2392 | J         | 0.1257   | 13  | 0.1772 | 16       | 0.1251 | P | 0.1763 |
| 17     | 0.1439   | 17 | 0.1159   | 17       | 0.3046 | K         | 0.1590   | 14  | 0.2165 | 17       | 0.1552 | Q | 0.2154 |
| 18     | 0.1858   | 18 | 0.1476   | 18       | 0.3878 | L         | 0.1963   | 15  | 0.2606 | 18       | 0.1950 | R | 0.2593 |
| 19     | 0.2400   | 19 | 0.1879   | 19       | 0.4938 | M         | 0.2463   | 16  | 0.3127 | 19       | 0.2464 | S | 0.3127 |
| 20     | 0.3100   | 20 | 0.2392   | 20       | 0.6287 | N         | 0.3117   | 17  | 0.375  | 20       | 0.3119 | T | 0.3760 |
|        |          | 21 | 1.0000   |          |        | P         | 0.3848   | 18  | 0.4513 | 21       | 0.3821 | U | 0.4515 |
|        |          | 22 | 1.2916   |          |        |           |          | 19  | 0.5424 |          |        | V | 0.5426 |
|        |          | 23 | 1.6681   |          |        |           |          | 20  | 0.6518 |          |        | W | 0.6520 |
|        |          | 24 | 2.1544   |          |        |           |          |     |        |          |        |   |        |

FUENTE: Levantamiento Artificial, (Melo 2014)  
 ELABORADO POR: Becerra Freddy

Las áreas anulares para las bombas Kobe y National están listadas en las tablas 1.20 y 1.21; mientras que las relaciones de área y las áreas anulares de las bombas usadas en los cálculos de diseño de bombas Guiberson se enlistan en la tabla 1.22. Las áreas anulares garganta – tobera para las bombas jet del fabricante Claw, se encuentran en el anexo N° 1.

El sistema National y Kobe las bombas se designan por el número de la tobera y la letra de la relación de áreas, por ejemplo 11 – B, mientras que para Guiberson la letra o letras de la tobera y el número de la cámara de mezclado designan la dimensión de la bomba, por ejemplo C – 5.

Las relaciones de áreas más comúnmente usadas están entre 0.400 y 0.235, relaciones mayores a 0.400 se usan en pozos muy profundos donde la capacidad de levantamiento necesaria es mayor o las presiones de fondo requieren un paso de flujo anular grande para evitar la cavitación.

**TABLA 1.20 ÁREAS ANULARES GARGANTA – TOBERA DE KOBE (pg<sup>2</sup>)**

| ÁREA ANULAR GARGANTA – TOBERA, A <sub>s</sub> |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TOBERA  | A'     | A      | B      | C      | D      | E      |
| 1   |        | 0.0036 | 0.0053 | 0.0076 | 0.0105 | 0.0143 |
| 2   | 0.0029 | 0.0046 | 0.0069 | 0.0098 | 0.0136 | 0.0184 |
| 3   | 0.0037 | 0.0060 | 0.0089 | 0.0127 | 0.0175 | 0.0231 |
| 4   | 0.0048 | 0.0077 | 0.0115 | 0.0164 | 0.0227 | 0.0308 |
| 5   | 0.0062 | 0.0100 | 0.0149 | 0.0211 | 0.0293 | 0.0397 |
| 6   | 0.0080 | 0.0129 | 0.0192 | 0.0273 | 0.0378 | 0.0513 |
| 7   | 0.0104 | 0.0167 | 0.0248 | 0.0353 | 0.0488 | 0.0663 |
| 8   | 0.0134 | 0.0216 | 0.0320 | 0.0456 | 0.0631 | 0.0856 |
| 9   | 0.0174 | 0.0278 | 0.0414 | 0.0589 | 0.0814 | 0.1106 |
| 10  | 0.0224 | 0.0360 | 0.0534 | 0.0760 | 0.1051 | 0.1428 |
| 11  | 0.0289 | 0.0464 | 0.0690 | 0.0981 | 0.1358 | 0.1840 |
| 12  | 0.0374 | 0.0599 | 0.0891 | 0.1268 | 0.1749 | 0.2382 |
| 13  | 0.0483 | 0.0774 | 0.1151 | 0.1633 | 0.2265 | 0.3076 |
| 14  | 0.0624 | 0.1001 | 0.1482 | 0.2115 | 0.2926 | 0.3974 |
| 15  | 0.0806 | 0.1287 | 0.1920 | 0.2731 | 0.3780 | 0.5133 |
| 16  | 0.1036 | 0.1668 | 0.2479 | 0.3528 | 0.4881 | 0.6629 |
| 17  | 0.1344 | 0.2155 | 0.3203 | 0.4557 | 0.6304 | 0.8562 |
| 18  | 0.1735 | 0.2784 | 0.4137 | 0.5885 | 0.8142 | 1.1058 |
| 19  | 0.2242 | 0.3595 | 0.5343 | 0.7600 | 1.0516 | 1.4282 |
| 20  | 0.2896 | 0.4643 | 0.6901 | 0.9817 | 1.3583 | 1.8444 |

FUENTE: Levantamiento Artificial, (Melo, 2014)

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA 1.21 ÁREAS ANULARES GARGANTA – TOBERA DE NATIONAL  
(pg<sup>2</sup>)**

| ÁREA ANULAR GARGANTA – TOBERA, A <sub>s</sub> |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TOBERA  | X      | A      | B      | C      | D      | E      |
| 1   |        | 0.0040 | 0.0057 | 0.0080 | 0.0108 | 0.0144 |
| 2   | 0.0033 | 0.0050 | 0.0073 | 0.0101 | 0.0137 | 0.0183 |
| 3   | 0.0042 | 0.0065 | 0.0093 | 0.0129 | 0.0175 | 0.0233 |
| 4   | 0.0054 | 0.0082 | 0.0118 | 0.0164 | 0.0222 | 0.0296 |
| 5   | 0.0068 | 0.0104 | 0.0150 | 0.0208 | 0.0282 | 0.0377 |
| 6   | 0.0087 | 0.0133 | 0.0191 | 0.0265 | 0.0360 | 0.0481 |
| 7   | 0.0111 | 0.0169 | 0.0243 | 0.0338 | 0.0459 | 0.0612 |
| 8   | 0.0141 | 0.0215 | 0.0310 | 0.0431 | 0.0584 | 0.0779 |
| 9   | 0.0179 | 0.0274 | 0.0395 | 0.0548 | 0.0743 | 0.0992 |
| 10  | 0.0229 | 0.0350 | 0.0503 | 0.0698 | 0.0947 | 0.1264 |
| 11  | 0.0291 | 0.0444 | 0.0639 | 0.0888 | 0.1205 | 0.1608 |
| 12  | 0.0369 | 0.0564 | 0.1035 | 0.1130 | 0.1533 | 0.2046 |
| 13  | 0.0469 | 0.0718 | 0.1677 | 0.1438 | 0.1951 | 0.2605 |
| 14  | 0.0597 | 0.0914 | 0.1317 | 0.1830 | 0.2484 | 0.3316 |
| 15  | 0.0761 | 0.1164 | 0.1677 | 0.2331 | 0.3163 | 0.4223 |
| 16  | 0.0969 | 0.1482 | 0.2136 | 0.2968 | 0.4028 | 0.5377 |
| 17  | 0.1234 | 0.1888 | 0.2720 | 0.3779 | 0.5128 |        |
| 18  | 0.1571 | 0.2403 | 0.3463 | 0.4812 |        |        |
| 19  | 0.2000 | 0.3060 | 0.4409 |        |        |        |
| 20  | 0.2546 | 0.3896 |        |        |        |        |

FUENTE: Levantamiento Artificial, (Melo, 2014)

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA 1.22 RELACIONES DE ÁREAS Y ÁREAS ANULARES DE GARGANTA (pg<sup>2</sup>) PARA BOMBAS GUIBERSON**

| TOBERA |                |        |        |         |        |        |        |        |        |
|--------|----------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| DD     | GARGANTAS      | 000    | 00     |         |        |        |        |        |        |
|        | R              | 0.36   | 0.22   |         |        |        |        |        |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.0028 | 0.0056 |         |        |        |        |        |        |
| CC     | GARGANTAS      | 000    | 00     | 0       | 1      |        |        |        |        |
|        | R              | 0.64   | 0.40   | 0.27    | 0.20   |        |        |        |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.0016 | 0.0043 | 0.0076  | 0.0115 |        |        |        |        |
| BB     | GARGANTAS      | 00     | 0      | 1       | 2      |        |        |        |        |
|        | R              | 0.54   | 0.37   | 0.27    | 0.20   |        |        |        |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.0032 | 0.0065 | 0.0105  | 0.0150 |        |        |        |        |
| A      | GARGANTAS      | 0      | 1      | 2       | 3      |        |        |        |        |
|        | R              | 0.53   | 0.39   | 0.29    | 0.23   |        |        |        |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.0048 | 0.0088 | 0.0133  | 0.0185 |        |        |        |        |
| B      | GARGANTAS      | 0      | 1      | 2       | 3      | 4      | 5      | 6      |        |
|        | R              | 0.92   | 0.66   | 0.50    | 0.40   | 0.30   | 0.25   | 0.21   |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.0009 | 0.0048 | 0.0094  | 0.0145 | 0.0219 | 0.0285 | 0.0357 |        |
| C      | GARGANTAS      | 1      | 2      | 3       | 4      | 5      | 6      | 7      |        |
|        | R              | 0.86   | 0.65   | 0.51    | 0.39   | 0.32   | 0.27   | 0.23   |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.0020 | 0.0066 | 0.0118  | 0.0191 | 0.0257 | 0.0330 | 0.0408 |        |
| D      | GARGANTAS      | 3      | 4      | 5       | 6      | 7      | 8      | 9      |        |
|        | R              | 0.74   | 0.56   | 0.46    | 0.39   | 0.33   | 0.27   | 0.22   |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.0064 | 0.0137 | 0.0203  | 0.0276 | 0.0354 | 0.0484 | 0.0628 |        |
| E      | GARGANTAS      | 4      | 5      | 6       | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     |
|        | R              | 0.77   | 0.63   | 0.53    | 0.45   | 0.36   | 0.30   | 0.25   | 0.20   |
|        | A <sub>s</sub> | 0.0074 | 0.0140 | 0.0212  | 0.0290 | 0.0420 | 0.0564 | 0.0722 | 0.0954 |
| F      | GARGANTAS      | 6      | 7      | 8       | 9      | 10     | 11     | 12     |        |
|        | R              | 0.69   | 0.59   | 0.48    | 0.39   | 0.33   | 0.26   | 0.22   |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.0138 | 0.0217 | 0.0345  | 0.0490 | 0.0648 | 0.0880 | 0.1138 |        |
| G      | GARGANTAS      | 8      | 9      | 10      | 11     | 12     | 13     | 14     |        |
|        | R              | 0.68   | 0.56   | 0.47    | 0.38   | 0.31   | 0.26   | 0.21   |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.0208 | 0.0352 | 0.0510  | 0.0742 | 0.100  | 0.1320 | 0.1712 |        |
| H      | GARGANTAS      | 10     | 11     | 12      | 13     | 14     | 15     | 16     |        |
|        | R              | 0.69   | 0.55   | 0.45    | 0.37   | 0.30   | 0.25   | 0.21   |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.0302 | 0.0534 | 0.792   | 0.112  | 0.1504 | 0.1945 | 0.2467 |        |
| I      | GARGANTAS      | 11     | 12     | 13      | 14     | 15     | 16     | 17     |        |
|        | R              | 0.72   | 0.59   | 0.48    | 0.40   | 0.33   | 0.27   | 0.23   |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.0339 | 0.0597 | 0.0917  | 0.1309 | 0.1750 | 0.2272 | 0.2895 |        |
| J      | GARGANTAS      | 13     | 14     | 15      | 16     | 17     | 18     | 19     |        |
|        | R              | 0.71   | 0.58   | 0.48    | 0.40   | 0.34   | 0.28   | 0.23   |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.0515 | 0.0908 | 0.1349  | 0.1871 | 0.2493 | 0.3256 | 0.4167 |        |
| K      | GARGANTAS      | 15     | 16     | 17      | 18     | 19     | 20     |        |        |
|        | R              | 0.61   | 0.51   | 0.42    | 0.35   | 0.29   | 0.24   |        |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.1015 | 0.1537 | 0.21609 | 0.2922 | 0.3833 | 0.4928 |        |        |
| L      | GARGANTAS      | 16     | 17     | 18      | 19     | 20     |        |        |        |
|        | R              | 0.63   | 0.52   | 0.44    | 0.36   | 0.30   |        |        |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.1164 | 0.1787 | 0.2549  | 0.3460 | 0.4555 |        |        |        |
| M      | GARGANTAS      | 17     | 18     | 19      | 20     |        |        |        |        |
|        | R              | 0.66   | 0.55   | 0.45    | 0.38   |        |        |        |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.1287 | 0.2050 | 0.2961  | 0.4055 |        |        |        |        |
| N      | GARGANTAS      | 18     | 19     | 20      |        |        |        |        |        |
|        | R              | 0.69   | 0.57   | 0.48    |        |        |        |        |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.1395 | 0.2306 | 0.3401  |        |        |        |        |        |
| P      | GARGANTAS      | 19     | 20     |         |        |        |        |        |        |
|        | R              | 0.71   | 0.59   |         |        |        |        |        |        |
|        | A <sub>s</sub> | 0.1575 | 0.2670 |         |        |        |        |        |        |

FUENTE: Levantamiento Artificial, (Melo, 2014)

ELABORADO POR: Becerra Freddy

## CAPÍTULO 2

### APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE SMART Y PETRIE AL CAMPO LAGO AGRIO

#### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE EDDIE E. SMART PARA LA SELECCIÓN DE GEOMETRÍA DE LA BOMBA JET

El método propuesto por Eddie E. Smart, de la división Guiberson, pretende calcular directamente la geometría óptima de una bomba tipo jet, para un conjunto de condiciones dadas. (Melo, 2014)

El procedimiento propuesto, permite seleccionar la mejor combinación de nozzle – garganta, para la implementación del bombeo hidráulico tipo jet, como sistema de levantamiento artificial en pozos que operaban bajo otros sistemas de levantamiento, garantizando la mayor producción posible y, evitando cambios prematuros de la bomba debido a las variaciones de las condiciones de operación respecto al tiempo.

Para diseñar un sistema de bombeo hidráulico tipo jet, se deben respetar dos condiciones.

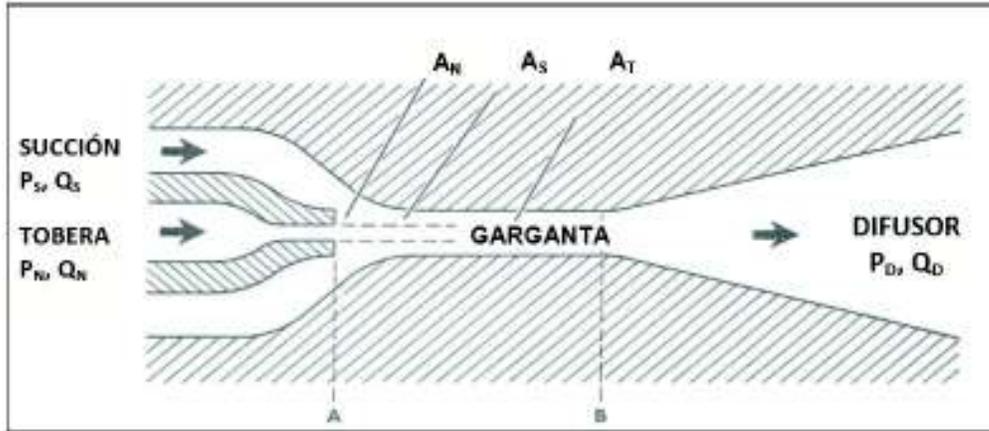
La primera se refiere al caudal de fluido que puede bombearse a través de una tobera de diámetro dado, para una determinada caída de presión entre la presión de la tobera y la presión de succión. Esto se expresa en la siguiente ecuación.

$$Q_N = 832A_N \sqrt{\frac{P_N - P_S}{G_N}} \quad (2.1)$$

La segunda condición se describe mediante las curvas de comportamiento adimensional que relacionan la presión de entrada a la tobera  $P_N$ , la presión de

succión de los fluidos del pozo  $P_S$  y la presión de descarga de la bomba  $P_D$ , con la tasa que pasa a través de la tobera  $Q_N$  y la tasa de fluido producido que ingresa a la bomba  $Q_S$ , como se observa en la figura 2.1.

**FIGURA 2.1 NOMENCLATURA DE LA BOMBA JET**



Fuente: Levantamiento artificial (Melo, 2014)

Elaborado por: Melo Vinicio

Dichas curvas se muestran en la figura 2.2 y se definen mediante la ecuación (2.2).

$$H = \frac{\text{NUM}}{(1 + K_N) - \text{NUM}} \quad (2.2)$$

Donde:

$$\text{NUM} = 2R + (1 - 2R) \left[ \frac{M \times R}{1 - R} \right]^2 - (1 + K_{TD}) R^2 (1 + M)^2 \quad (2.3)$$

$$R = \frac{A_N}{A_T} \quad (2.4)$$

$$M = \frac{Q_S \times G_S}{Q_N \times G_N} \quad (2.5)$$

$$H = \frac{P_D - P_S}{P_N - P_D} \quad (2.6)$$

Donde:

$P_S$  = Presión de succión

$P_N$  = Presión a la entrada de la tobera

$P_D$  = Presión de descarga

$Q_S$  = Caudal de fluido producido

$Q_N$  = Caudal de fluido motriz

$Q_D$  = Caudal de descarga (fluido motriz más fluido producido)

$A_N$  = Área de flujo de la tobera

$A_T$  = Área de flujo total en la cámara de mezclado

$A_S$  = Área anular de la cámara de mezclado para el flujo de la producción.

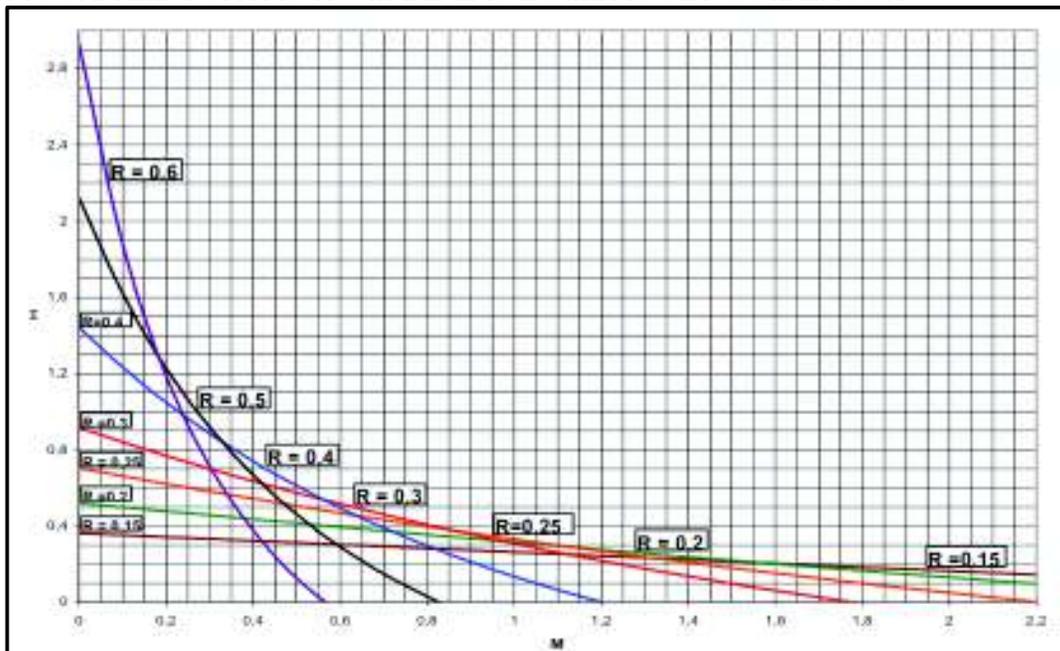
### **2.1.1 FACTORES INVOLUCRADOS EN LA SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA BOMBA JET.**

Las áreas  $A_N$  y  $A_T$  determinan el comportamiento de la bomba, como se observa en las ecuaciones (2.1) y (2.2). En la ecuación (2.1), el área de la tobera  $A_N$  se relaciona con el caudal de fluido motriz requerido  $Q_N$ . La ecuación (2.2), expresa la relación de áreas  $R$ , entre el área de la tobera y el área de la cámara de mezclado. Se puede observar que los parámetros a modificar son estas áreas para poder obtener una geometría adecuada para las condiciones de producción del pozo.

Si  $R$  permanece constante, se puede obtener una gráfica la relación de presiones  $H$  vs la relación de flujo adimensional  $M$ . En la figura 2.2, se observa que para cada valor de  $R$  se tiene una curva de  $H$  vs  $M$ .

Analizando la figura 2.2, se tiene que para  $R = 0.6$  el valor de  $H$  es más grande, si los valores de  $M$  son menores que 0.18, ya que en este punto se cruzan las curvas de  $R = 0.6$  y  $R = 0.5$ . A partir de este valor la curva de  $R = 0.5$  proporciona los valores de  $H$  más grandes, hasta intersectarse con la de  $R = 0.4$ , que ocurre para el valor de  $M = 0.33$ . Este comportamiento continúa a medida que el valor de  $R$  disminuye. (Melo, 2014)

**FIGURA 2.2 CURVAS H – M DE LAS BOMBAS JET GUIBERSON**



Fuente: Levantamiento artificial (Melo, 2014)

Elaborado por: Melo Vinicio

La ecuación (2.6) se la puede resolver para  $P_N$ :

$$P_N = \frac{P_D - P_S}{H} + P_D \quad (2.7)$$

La presión en la tobera  $P_N$ , está compuesta por la presión de operación en superficie, la presión hidrostática de la columna de fluido motriz y las pérdidas de presión del fluido en la tubería.

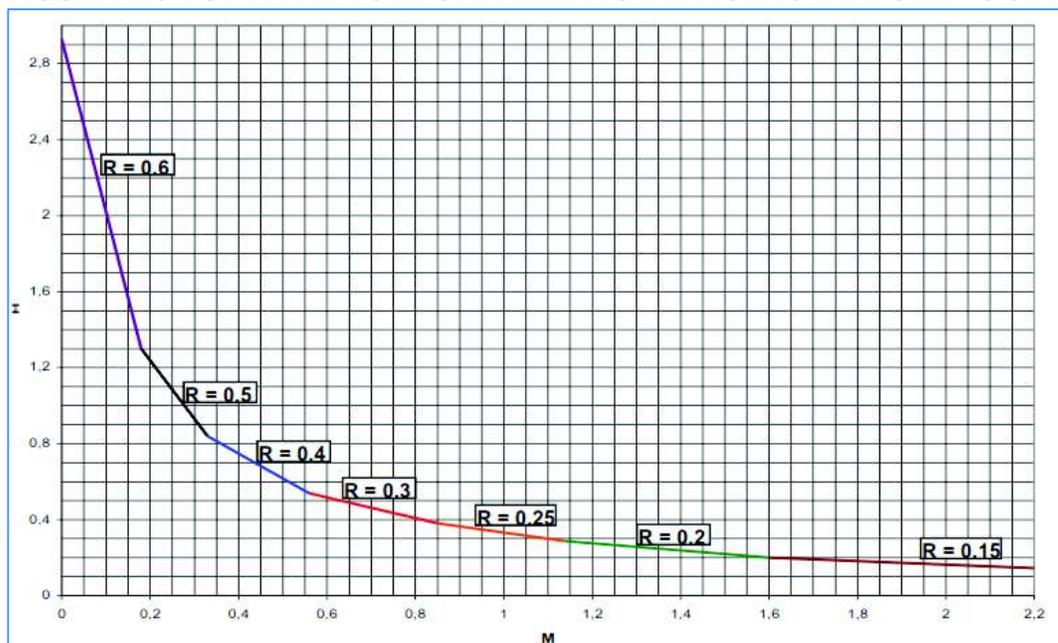
En la ecuación (2.7) se puede observar que si permanecen constantes las presiones  $P_S$  y  $P_D$ , a medida que el valor de  $H$  aumenta, se reduce el valor de  $P_N$ . Esto repercutiría en bajos valores de la presión de operación superficial y bajos requerimientos de potencia. (Melo, 2014)

De acuerdo a este análisis, de la figura 2.2 se puede obtener una Curva de Comportamiento de Diseño compuesta por los segmentos de máximos valores de  $H$ , dicho de otra forma, la Curva de Comportamiento de Diseño es la envolvente superior de las curvas de la figura 2.2.

La curva de comportamiento de diseño de la figura 2.3 se puede utilizar como si fuera la curva de comportamiento de una sola bomba, para calcular la relación de presiones  $H$  y la relación de flujo adimensional  $M$ , que sea consistente con la descripción del pozo y la curva del IPR. Para calcular la geometría óptima de la bomba se debe especificar la presión de operación superficial deseada.

Como regla general, la mayor eficiencia se obtiene con la mayor presión de operación superficial, debido a que se requiere una menor tasa de fluido motriz como consecuencia se tienen menos pérdidas de presión por fricción en la tubería. (Melo, 2014)

**FIGURA 2.3 CURVA DE COMPORTAMIENTO DE DISEÑO DE BOMBAS JET**



Fuente: Levantamiento artificial (Melo, 2014)  
Elaborado por: Melo Vinicio

La tabla 2.1, muestra valores que corresponden a los puntos de intersección de las curvas de la figura 2.2.

Para cada valor obtenido de  $M$  y  $H$ , corresponderá un valor de  $R$  en la curva de comportamiento de la figura 2.3, como solución para una tasa de producción y presión fluyente dadas, por lo tanto se puede usar el valor de  $M$  junto con dicho caudal de producción para determinar el caudal de fluido motriz necesario, así

como la  $P_N$ , con estos datos usando la ecuación (2.1) podemos calcular el área exacta de la tobera.

**TABLA 2.1 RELACIONES ÁREAS ÓPTIMAS**

| RELACIÓN DE ÁREAS R | RANGO DE RELACIÓN DE PRESIONES, H |
|---------------------|-----------------------------------|
| 0.60                | 2.930 – 1.300                     |
| 0.50                | 1.300 – 0.839                     |
| 0.40                | 0.839 – 0.538                     |
| 0.30                | 0.538 – 0.380                     |
| 0.25                | 0.380 – 0.286                     |
| 0.20                | 0.286 – 0.160                     |
| 0.15                | 0.160                             |

FUENTE: Levantamiento Artificial, (Melo, 2014)

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Un aspecto determinante en el diseño de una bomba jet, es la cavitación, esto ocurre cuando la presión del fluido producido alcanza una presión menor a la presión de saturación de dicho fluido, dentro de la cámara de mezclado; al presentarse este hecho, la cámara de mezclado puede resultar dañada y se deberá necesariamente seleccionar otra combinación que aunque pueda requerir más potencia, evitaría dicho fenómeno.

Los límites para la cavitación de la bomba se pueden predecir mediante modelos matemáticos, la ecuación (2.8), representa la relación de flujo adimensional en el límite de la cavitación. Cuando la relación de flujo adimensional es mayor que la relación de flujo adimensional en el límite de cavitación, puede provocar daños a la bomba. (Melo, 2014)

$$M_L = \frac{1-R}{R} \sqrt{\frac{P_s}{1.3(P_N - P_s)}} \quad (2.8)$$

### 2.1.2 SECUENCIA DE CÁLCULO MÉTODO DE EDDIE E. SMART.

1. Fijar la presión de operación superficial deseada,  $P_T$ .

2. Como valor inicial suponer una relación de flujo adimensional igual a 1, la misma que es utilizada únicamente para calcular las pérdidas de presión por fricciones iniciales.
3. Calcular el gradiente de presión del petróleo producido a partir de su gravedad API.

$$G_D = \frac{0.433 \times 141.5}{131.5 + \text{°API}} \quad (2.9)$$

4. Calcular el gradiente de presión del fluido producido, basado en los gradientes de petróleo y agua.

$$G_S = F_W \times G_W + F_O \times G_O \quad (2.10)$$

Donde  $F_O = 1 - F_W$

5. Estimar el factor de volumen de formación para el petróleo y el agua.

$$B_T = \left[ 1 + 2.8 \left( \frac{\text{GOR}}{P_S} \right)^{1.2} \right] F_O + F_W \quad (2.11)$$

6. Calcular la tasa del fluido motriz, con base en la producción deseada y la relación de flujo adimensional, M.

$$Q_N = \frac{G_S \times Q_S \times B_T}{G_N \times M} \quad (2.12)$$

$G_N$  = Gradiente de fluido motriz que pasa a través de la tobera.

7. Utilizando la ecuación:

$$P_F = \left[ \frac{2.02 \times 10^{-6} \times L \left( (D_1 + D_2) \times \mu \right)^{0.21}}{C \times G^{0.21}} \right] G \times Q^{1.79} \quad (2.13)$$

Donde:

$$C = (D_1 - D_2)(D_1^2 - D_2^2)^2 (D_1 / ((D_1 - D_2)))^{0.1}$$

|                | Flujo anular     | Flujo por T.P.   |
|----------------|------------------|------------------|
| D <sub>1</sub> | D <sub>iTR</sub> | D <sub>ltp</sub> |
| D <sub>2</sub> | D <sub>oTR</sub> | 0                |

Calcular las pérdidas de presión por fricción en la tubería por la que fluye el fluido motriz, ya sea a través de una sección anular o circular, y considerar que:

$P_{FN}$  = pérdida de presión por fricción del fluido motriz.

$P_{FD}$  = pérdida de presión por fricción del fluido de retorno.

8. Calcular la presión del fluido motriz en la tobera  $P_N$ , como la suma de la presión de operación más la presión hidrostática del fluido motriz, menos la pérdida de presión por fricción de éste, en la tubería.

$$P_N = P_T + G_N \times D - P_{FN} \quad (2.14)$$

9. Calcular la tasa del fluido de retorno  $Q_D$ , como la suma de la tasa de producción y la tasa del fluido motriz.

$$Q_D = Q_N + Q_S \quad (2.15)$$

10. Calcular el gradiente del fluido de retorno  $G_D$ , como un promedio ponderado del gradiente del fluido motriz y el gradiente del fluido producido.

$$G_D = \frac{G_S \times Q_S + G_N \times Q_N}{Q_D} \quad (2.16)$$

11. Calcular la fracción de agua del fluido de retorno  $F_{WD}$ , dependiendo si el fluido motriz es petróleo o agua, con las siguientes ecuaciones:

Si el fluido motriz es petróleo:

$$F_{WD} = \frac{Q_S \times F_W}{Q_D} \quad (2.17.a)$$

Si el fluido motriz es agua:

$$F_{WD} = \frac{Q_N + Q_S \times F_W}{Q_D} \quad (2.17.b)$$

12. Determinar la relación gas – líquido del fluido de retorno GLR.

$$GLR = \frac{Q_S \times F_O \times GOR}{Q_D} \quad (2.18)$$

13. Determinar la viscosidad del fluido de retorno  $\mu_D$ , como un promedio ponderado de las viscosidades del agua y del petróleo.

$$\mu_D = F_{WD} \times \mu_W + (1 - F_{WD}) \times \mu_O \quad (2.19)$$

14. Determinar la presión de descarga de la bomba  $P_D$ , como la suma de la presión hidrostática del fluido de retorno, la caída de presión por fricción en el conducto de retorno y la contrapresión en la cabeza del pozo. Si la GLR es menor que 10 pie<sup>3</sup>/bl, determinar  $P_{FD}$  con la ecuación (2.13).

$$P_D = P_{WH} + G_H \times D + P_{FD} \quad (2.20)$$

Si la GLR es mayor o igual que 10 pie<sup>3</sup>/bl, se debe utilizar una correlación adecuada para flujo multifásico.

15. Calcular un nuevo valor de la relación de presiones H.

$$H = \frac{P_D - P_S}{P_N - P_D} \quad (2.6)$$

16. Basado en este valor de H y la figura 2.3 o la tabla 2.1, se determina la relación de áreas óptima, R.

17. Utilizando la Curva de Comportamiento de Diseño de la figura 2.3, se encuentra un nuevo valor para M correspondiente al valor de H del paso 15. También se puede utilizar la siguiente ecuación para calcular M, usando el valor de R obtenido en el paso anterior.

$$M = C_3 - \sqrt{\frac{C_2 \times C_3 + C_3 \times C_1 - C_2 \times C_1 + \frac{C_4(C_2 - C_3)H}{H+1}}{C_2 - C_3}} \quad (2.21)$$

Donde:

$$C_1 = 2R \quad K_{TD} = 0.20$$

$$C_2 = \frac{(1 - 2R)R^2}{(1 - R)^2} \quad K_N = 0.03$$

$$C_3 = (1 + K_{TD})R^2$$

$$C_4 = 1 + K_N$$

Si en el paso 20 se determina la existencia de cavitación, se recomienda usar las Curvas de Comportamiento de la figura 2.2, para encontrar un nuevo valor de M en lugar de la figura 2.3. Usar el valor de R determinado en el paso 16. En vez de usar la figura 2.3 se puede utilizar la ecuación (2.21).

18. Comparar el nuevo valor de M con el anterior, si la variación de M es menor del 1%, se considera que se ha obtenido la convergencia y se

continúa en el paso 19. Caso contrario regresar al paso 6 usando el nuevo valor de M.

19. Calcular la relación de flujo adimensional en el límite de cavitación,  $M_L$ .

$$M_L = \frac{1-R}{R} \sqrt{\frac{P_S}{1.3(P_N - P_S)}} \quad (2.8)$$

20. Si  $M < M_L$ , no existe problema de cavitación, en tal caso continuar en el paso 24. Si  $M > M_L$ , entonces se tendrán problemas de cavitación, por lo que se requiere un ajuste y continuar en el paso siguiente.

21. Fijar  $M = M_L$  y utilizar el valor de la relación de áreas seleccionada para calcular un nuevo valor de la relación de presiones H. La curva de comportamiento de la figura 2.2, también se puede usar para encontrar el valor de H correspondiente a  $M_L$ . El valor de R se debe mantener constante en los cálculos para evitar cavitación.

22. Se calcula la presión de operación superficial requerida para evitar la cavitación:

$$P_T = \frac{P_D - P_S}{H} + P_D - G_N \times D + P_{FN} \quad (2.22)$$

23. Repetir los cálculos para evitar cavitación, regresando al paso 5.

24. Determinar el área de la tobera requerida para manejar la tasa de fluido motriz calculada en el paso 6, despejando  $A_N$  de la ecuación (2.1).

$$A_N = \frac{Q_N}{832 \sqrt{\frac{P_N - P_S}{G_N}}} \quad (2.23)$$

La relación de áreas encontrada en el paso 16 junto con el área de la tobera del paso 24 definen la geometría óptima de la bomba tipo jet, para la presión de operación superficial dada. Esta área de la tobera es la medida ideal requerida para que la tasa calculada del fluido motriz pase a través de ella. Generalmente el diámetro exacto de la tobera no es el comercial y no se encuentra disponible, por lo que se selecciona el diámetro disponible más cercano, así como la cámara de mezclado que combina con esta tobera comercialmente disponible, para obtener la relación de áreas óptima.

Los resultados de los cálculos realizados se registrarán en la tabla 2.2, lo cual nos servirá para seleccionar la geometría de bomba jet óptima.

**TABLA 2.2 RESULTADOS MÉTODO DE SMART**

| PARÁMETRO          | RESULTADO | PARÁMETRO                | RESULTADO |
|--------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| $Q_N$ (bl/día)     |           | $A_N$ (pg <sup>2</sup> ) |           |
| $Q_s$ (bl/día)     |           | $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) |           |
| $P_T$ (psi)        |           | R                        |           |
| Potencia req. (HP) |           |                          |           |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE HAL PETRIE PARA EL DISEÑO DE UNA BOMBA JET

El método propuesto por Hal Petrie, permite determinar las mejores condiciones de operación para una bomba jet, en pozos donde ya se encuentra operando este sistema.

La ecuación (2.24), expresa la relación adimensional de presión, H, en función de R, M y de los coeficientes de pérdidas de presión por fricción en la tobera,  $K_N$ , y en la garganta – difusor,  $K_{TD}$ . Estos coeficientes de pérdidas de presión por fricción son determinados experimentalmente por los diferentes fabricantes de

bombas jet y tienen un significado similar a los coeficientes de pérdidas de presión por fricción en tuberías y orificios.

$$H = \frac{\{2R + [(1-2R)(M^2R^2)/(1-R)^2] - (1+K_{TD})R^2(1+M)^2\}}{(1+K_N) - \{2R + [(1-2R)(M^2R^2)/(1-R)^2] - (1+K_{TD})R^2(1+M)^2\}} \quad (2.24)$$

De la ecuación (2.24) se tiene que para las relaciones adimensionales de áreas R, de 0.15; 0.20; 0.25; 0.30; 0.40 y 0.50. Las eficiencias máximas están alrededor de 33%, esto se obtiene con relaciones R de 0.30 y 0.25. Las bombas con valores de R mayores a 0.50 o menores a 0.10 tendrán eficiencias máximas marcadamente reducidas.

### 2.2.1 SECUENCIA DE CALCULO DEL MÉTODO DE HAL PETRIE

El método propuesto por Hal Petrie, es un proceso iterativo que involucra resolver sucesivas iteraciones de cálculos; la secuencia de cálculos está dividida en tres secciones, la primera en la cual se escoge una tobera y se analiza el flujo de fluido a través de esta (Parte A), la segunda se realizan iteraciones para analizar el fluido de retorno (Parte B) y en la tercera cálculos finales en relación a requerimientos del sistema en superficie (Parte C).

#### Parte A. Escoger una tobera e iterar con la tasa de fluido motriz:

1. Determinar el gradiente de fluido producido en la succión de la bomba.

$$G_S = G_O(1-F_W) + G_W F_W \quad (2.25)$$

2. Determinar el área anular mínima de la succión para evitar a cavitación.

$$A_{CM} = Q_S \left[ \frac{1}{691} \sqrt{\frac{G_S}{P_S}} + \frac{(1-F_W)GOR}{24650P_S} \right] \quad (2.26)$$

3. Seleccionar la tobera con una R aproximada de 0.4 tal que el área anular de la garganta (tablas 1.18, 1.19, 1.20, 1.21) sea mayor al  $A_{CM}$  del paso 2.
4. Escoger la presión de operación  $P_T$ .
5. Determinar a presión del fluido motriz en la tobera despreciando las pérdidas de presión por fricción en la primera iteración.

$$P_N = P_T + G_N \times D - P_{FN} \quad (2.27)$$

6. Determinar la tasa de flujo en la tobera, ecuación (2.1)

$$Q_N = 832 A_N \sqrt{\frac{P_N - P_S}{G_N}} \quad (2.1)$$

7. Determinar las pérdidas de presión por fricción en la tubería de inyección del fluido motriz mediante las ecuaciones siguientes.

$$v = 0.01191 \frac{Q_N}{d^2} \quad (2.28)$$

$$\rho_o = \frac{\rho_{osc}}{1 + \frac{T - 68}{1885}} \quad (2.29)$$

$$\mu[\text{cp}] = v_o[\text{cts}] \times \rho_o[\text{g/cm}^3] \quad (2.30)$$

$$N_{RE} = 7.742 \times 10^3 \frac{dv}{\mu/\rho} \quad (2.31)$$

Si  $N_{RE} \leq 1200$  se tiene flujo laminar y las pérdidas de presión por fricción se calcular mediante:

$$P_{FN} = 7.95 \times 10^{-6} \frac{\bar{\mu} L Q_N}{d^4} \quad (2.32)$$

Si  $N_{RE} > 1200$  se tiene flujo de transición y turbulento y las pérdidas de presión por fricción se calcular mediante:

$$\bar{f} = 0.0361 \frac{(\bar{\mu}/\bar{\rho})^{0.21}}{(\bar{d}v)^{0.21}} \quad (2.33)$$

Flujo turbulento:

$$P_{FN} = 11.46 \times 10^{-6} \bar{\gamma} \bar{L} \frac{Q_N^2}{d^5} \quad (2.34)$$

8. Regresar al paso 5 hasta que los valores sucesivos de  $Q_N$  estén con una diferencia dentro del 15%. Luego continuar con la parte B.

### Parte B. Iterar con la tasa de producción

1. Determinar las propiedades del fluido de retorno.

a. Tasa de fluido de retorno

$$Q_D = Q_N + Q_S \quad (2.35)$$

b. Gradiente de fluido de retorno

$$G_D = \frac{G_N \times Q_N + G_S \times Q_S}{Q_D} \quad (2.36)$$

c. Corte de agua del fluido de retorno en el caso de agua como fluido motriz

$$F_{WD} = \frac{Q_N + Q_S F_W}{Q_D} \quad (2.37)$$

- d. Corte de agua del fluido de retorno en caso de petróleo como fluido motriz

$$F_{WD} = \frac{Q_S \times F_W}{Q_D} \quad (2.38)$$

- e. Relación gas – líquido del fluido de retorno

$$GLR = \frac{Q_S \times (1 - F_W) \times GOR}{Q_D} \quad (2.39)$$

- f. Viscosidad del fluido de retorno

$$v_D = (1 - F_W) \times v_O + F_{WD} \times v_W \quad (2.40)$$

2. Determinar la presión de descarga  $P_D$  si el GLR del fluido de retorno es menor o igual a 10.

$P_{FD}$  con las siguientes ecuaciones:

$$v = 0.01191 \frac{Q_D}{d_1^2 - d_2^2} \quad (2.41)$$

Donde:  $Q_D$  = Tasa de fluido de retorno (bl/día)

$d_1$  = ID del Casing

$d_2$  = OD del tubing

Se calcula  $N_{RE}$  con ecuación (2.31).

Dependiendo del tipo de flujo, laminar ( $N_{RE} \leq 1200$ ) o turbulento ( $N_{RE} > 1200$ ) se calcula  $P_{FD}$ .

Flujo laminar:

$$P_{FD} = \frac{7.95 \times 10^{-6} \bar{\mu} L Q_D \left( \frac{d_1}{d_1 - d_2} \right)^{0.1}}{(d_1 - d_2)^2 (d_1^2 - d_2^2) (1 + 1.5e^2)} \quad (2.42)$$

$$e = \frac{2d_3}{(d_1 - d_2)} \quad (2.43)$$

Donde: e = Excentricidad del tubing respecto al Casing.  
 $d_1$  = ID del Casing.  
 $d_2$  = OD del tubing.  
 $d_3$  = distancia entre el centro del tubing y de Casing.

Flujo turbulento

$$P_{FD} = \frac{11.46 \times 10^{-6} \bar{\gamma}_L \bar{L} Q_D}{(d_1 - d_2)^2 (d_1^2 - d_2^2)^2 \left( \frac{d_1}{d_1 - d_2} \right)^{0.1} (1 + 1.5e^2)^{0.25}} \quad (2.44)$$

$$\bar{f} = 0.0361 \frac{(\bar{f}/\rho)^{0.21}}{(dv)^{0.21}} \quad (2.33)$$

$$e = \frac{d_1 - d_3}{d_1 - d_2} \quad (2.45)$$

Donde: e = Excentricidad del tubing respecto al Casing  
 $d_1$  = ID del Casing  
 $d_2$  = OD del tubing  
 $d_3$  = OD de las juntas del tubing

$$P_D = P_{WH} + G_D x D + P_{FD} \quad (2.46)$$

- Si el GLR del fluido de retorno es mayor a 10 determinar la presión de descarga, con la correlación de flujo multifásico de Hagerdorn y Brow o una equivalente de acuerdo a las decisiones de las áreas de producción de las compañías operadoras.

4. Calcular la relación adimensional de presión H con la ecuación (2.6)
5. Calcular la relación adimensional de flujo másico, M

$$\text{GOR} \neq 0 \quad M = Q_s \left\{ \left[ 1 + 2.8 \left( \frac{\text{GOR}}{P_s} \right)^{1.2} \right] F_o + F_w \right\} \times \left( \frac{G_s}{Q_N \times G_N} \right) \quad (2.47)$$

$$\text{GOR} = 0 \quad M = \frac{Q_s \times G_s}{Q_N \times G_N} \quad (2.48)$$

6. Usar el valor de H en la figura 2.3 para encontrar M en la envolvente de los comportamientos de mejor eficiencia. Registrar el valor debido de R. Para determinar con mayor facilidad R sin utilizar la gráfica se puede usar la tabla 2.1.

Usando el valor de H del paso 4 y el valor de R obtenido con la figura 2.3 o con la tabla 2.1, también se puede calcular M, usando la ecuación (2.21).

7. Comparar el valor de M del paso 5 con el valor de M del paso 6. Si la diferencia es menor o igual al 5%, ir al paso 1 de la parte C, sino corregir  $Q_s$  con la ecuación (2.49) y retornar al paso B.1.a.

$$Q_s \text{ paso 5} = Q_s \text{ paso 6} \left( \frac{M_6}{M_5} \right) \quad (2.49)$$

### Parte C. Cálculos finales.

1. Escoger el tamaño de la garganta inmediatamente superior al valor obtenido con la ecuación (2.50)

$$A_T = \frac{A_N}{R} \quad (2.50)$$

2. Calcular la tasa de flujo en la succión de la bomba a partir de la cual inicia la cavitación.

$$Q_{SC} = Q_{SI} \frac{(A_T - A_N)}{A_{CM}} \quad (2.51)$$

3. Calcular la potencia hidráulica de la bomba de superficie.

$$HP = 0.000017 Q_N P_T \quad (2.52)$$

4. Calcular la potencia de la bomba de desplazamiento positivo de superficie considerando una eficiencia del 90%.

$$HP = \frac{0.000017 Q_N P_T}{0.9} \quad (2.53)$$

Los valores obtenidos se registran en la tabla 2.3, de acuerdo con lo sugerido por Hal Petrie.

**TABLA 2.3 RESULTADOS MÉTODO DE PETRIE**

| PARÁMETRO                | RESULTADO | PARÁMETRO         | RESULTADO |
|--------------------------|-----------|-------------------|-----------|
| $P_T$ (psi)              |           | R                 |           |
| $Q_N$ (bl/día)           |           | $Q_S$ (bl/día)    |           |
| HP a 90% (HP)            |           | $P_s$ (psi)       |           |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> ) |           | $Q_{sc}$ (bl/día) |           |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) |           | $P_{sc}$ (psi)    |           |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

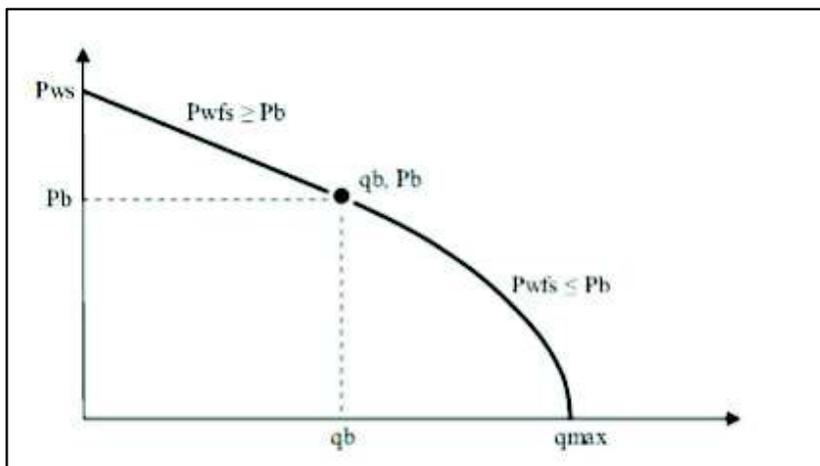
Con los datos obtenidos, se realiza la selección de la mejor combinación tobera – cámara de mezclado, que optimice los parámetros de operación y aumente la producción del pozo en estudio, haciendo uso de las tablas de combinaciones de tobera – cámara de mezclado proporcionada por los principales fabricantes.

En el presente proyecto, se mantendrá constante la geometría de la bomba y la presión de operación, variando el caudal de fluido motriz para optimizar la recuperación de hidrocarburos.

### Construcción de la curva IPR

Para realizar un análisis nodal del comportamiento del pozo, se utilizarán los algoritmos de Petrobras para construir la curva del IPR, con los valores obtenidos de presión de sección de la bomba  $P_s$  y el caudal de fluido producido  $Q_s$  se obtiene una curva como se observa en la figura 2.4.

**FIGURA 2.4 CURVA DE RESULTADOS PRESIÓN VS CAUDAL**



Fuente: Oilwell Hydraulics Inc. (2001)  
Elaborado por: Oilwell Hydraulics Inc.

El método de Petrobras, define la curva en tres zonas en base a los valores de  $Q_b$ ,  $Q_{max}$ ,  $Q_{tmax}$  donde:

- Zona 1: valores entre  $0 < Q < Q_b$ ;
- Zona 2: valores entre  $Q_b < Q < Q_{max}$ ; y
- Zona 3: valores entre  $Q_{max} < Q < Q_{tmax}$ .

### IPR Yacimientos saturados

Esto ocurre cuando la presión de fondo fluyente se encuentra por debajo de la presión de saturación  $P_{WF} < P_b$ .

- Primero se determina el valor de J:

$$J = \frac{Q_{TEST}}{f_o \left( P_R - P_B + \frac{P_B A}{1.8} \right) + f_w (P_R - P_{wfTEST})} \quad (2.54)$$

Donde:

$$A = 1 - 0.2 \left( \frac{P_{wfTEST}}{P_B} \right) - 0.8 \left( \frac{P_{wfTEST}}{P_B} \right)^2 \quad (2.55)$$

- Caudal en el punto de saturación:

$$P_{wf} = P_R - \frac{Q_T}{J} \quad (2.56)$$

- Caudal máximo de petróleo:

$$Q_{Omax} = Q_o + \frac{J + P_B}{1.8} \quad (2.57)$$

- Determinar CD:

$$CD = P_{wfD} - P_{wfC}$$

$$CD = f_w \left( \frac{0.001 Q_{Omax}}{J} \right) + f_o (0.125) P_B \left[ -1 + \sqrt{81 - 80 \left( \frac{0.999 Q_{Omax} - Q_B}{Q_{Omax} - Q_B} \right)} \right] \quad (2.58)$$

- Determinar CG:

$$CG = 0.001Q_{O\text{MAX}} \quad (2.59)$$

- Determinar  $\tan \alpha$  :

$$\tan \alpha = \frac{CG}{CD} \quad (2.60)$$

- Determinar  $\tan \beta$

$$\tan \beta = \frac{CD}{CG} \quad (2.61)$$

- Determinar el caudal máximo total esperado

$$Q_{t\text{MAX}} = Q_{O\text{MAX}} + f_w \left( P_R - \frac{Q_{O\text{MAX}}}{J} \right) \tan \alpha \quad (2.62)$$

- Calcular las presiones de fondo fluyente para diferentes valores de caudal en el intervalo comprendido entre 0 bl/día hasta el caudal de burbuja con la ecuación (2.56)
- Calcular las presiones de fondo fluyente para diferentes valores de caudal en el intervalo comprendido entre el caudal de burbuja y el caudal máximo.

$$P_{WF} = f_w \left( P_R - \frac{Q_t}{J} \right) + F_o (0.125) P_B \left[ -1 + \sqrt{81 - 80 \left( \frac{Q_t - Q_B}{Q_{O\text{MAX}} - Q_B} \right)} \right] \quad (2.63)$$

- Calcular la presión de fondo fluyente para diferentes valores de caudal en el intervalo comprendido entre el caudal máximo de petróleo hasta el caudal total máximo

$$P_{WF} = f_W \left( P_R - \frac{Q_{oMAX}}{J} \right) - (Q_T - Q_{oMAX}) \tan \beta \quad (2.64)$$

- Generar una tabla y su correspondiente grafica con los valores de presión y caudal obtenidos con las ecuaciones (2.56), (2.63) y (2.64).

### IPR Yacimientos subsaturados

En yacimientos subsaturados la IPR tendrá dos comportamientos, cuando  $P_{WF} > P_b$ , flujo de una sola fase, y cuando  $P_{WF} < P_b$ , flujo multifásico.

- Primero se determina el valor de J

$$J = \frac{Q_T}{(P_R - P_{WF})} \quad (2.65)$$

- Para determinar el caudal en el punto de saturación:

$$Q_B = J(P_R - P_B) \quad (2.66)$$

- Caudal máximo de petróleo:

$$Q_{OMax} = Q_B + \frac{J + P_B}{1.8} \quad (2.67)$$

- Determinar CD, con la ecuación (2.58).
- Determinar CG, con la ecuación (2.59).
- Determinar  $\tan \alpha$  con la ecuación (2.60).
- Determinar  $\tan \beta$  con la ecuación (2.61).
- Determinar el caudal máximo total esperado ecuación (2.62).

- Calcular las presiones de fondo fluyente para diferentes valores de caudal en el intervalo comprendido entre 0 bl/día hasta el caudal de burbuja con la ecuación (2.56).
- Calcular las presiones de fondo fluyente para diferentes valores de caudal en el intervalo comprendido entre el caudal de burbuja y el caudal máximo, ecuación (2.63).
- Calcular la presión de fondo fluyente para diferentes valores de caudal en el intervalo comprendido entre el caudal máximo de petróleo hasta el caudal total máximo, ecuación (2.64).
- Generar una tabla y su correspondiente grafica con los valores de presión y caudal obtenidos con las ecuaciones (2.56), (2.63) y (2.64).

## **2.3 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA APLICACIÓN DEL MÉTODOS DE SMART AL CAMPO LAGO AGRIO**

Se presentan los resultados obtenidos con la aplicación de los algoritmos propuestos por Smart para seleccionar la mejor geometría aplicable a pozos que no están funcionando con bombeo hidráulico tipo Jet.

El análisis del pozo LGA – 012, se lo realizara paso a paso como ejemplo de cálculo. Para el estudio de los siguientes pozos, la tabla correspondiente a los resultados por cada iteración realizada, se encuentran en el anexo N° 2.

### **2.3.1 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 12 (LGA-012)**

Los datos requeridos para el estudio, obtenidos en la investigación de campo, se observan en la tabla 2.4, con los cuales se procede a realizar el análisis del pozo para la implementación del sistema de bombeo hidráulico.

TABLA 2.4 DATOS POZO LGA – 0012

| PARÁMETRO                      | VALOR     | PARÁMETRO                           | VALOR                   |
|--------------------------------|-----------|-------------------------------------|-------------------------|
| Arena                          | “B.T.”    | °API petróleo                       | 24.43                   |
| Profundidad Arena (D)          | 8666 pies | Viscosidad del petróleo ( $\mu_o$ ) | 3.784 cp                |
| Longitud T.P. (L)              | 8666 pies | Viscosidad del agua ( $\mu_w$ )     | 0.31 cp                 |
| Diam ext T.P. ( $D_{oTP}$ )    | 3.5 pg    | Relación gas - petróleo (GOR)       | 194pie <sup>3</sup> /bl |
| Diam. Int T.P. ( $D_{iTP}$ )   | 2.992 pg  | Fracción de agua ( $F_w$ )          | 0.04                    |
| Diam. Int T.R. ( $D_{iTR}$ )   | 6.276 pg  | Caudal de Producción ( $Q_s$ )      | 500 bl/día              |
| Presión de cabeza ( $P_{WH}$ ) | 50 psi    | Presión de fondo ( $P_s$ )          | 1485 psi                |
| Fluido Motriz                  | Petróleo  | Gradiente de agua ( $G_w$ )         | 0.436 psi/pie           |
| $G_N$                          | $G_o$     | Presión de reservorio ( $P_R$ )     | 2347 psi                |
| Presión de Burbuja ( $P_b$ )   | 810 psi   | Salinidad (ppmCl)                   | 28000                   |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

1. Se fija una presión de trabajo  $P_T=3500$  psi, de acuerdo a la información de campo obtenida.
2.  $M = 1$
3. Calcular el gradiente de presión del petróleo producido.

$$G_D = \frac{0.433 \times 141.5}{131.5 + \text{°API}} = \frac{0.433 \times 141.5}{131.5 + 24.43} = 0.3929 \text{ psi/pie}$$

4. Calcular el gradiente de presión del fluido producido.

$$G_s = F_w \times G_w + F_o \times G_o = 0.04 \times 0.436 + (1 - 0.04) \times 0.3929 = 0.3947 \text{ psi/pie}$$

5. Estimar el factor de volumen de formación para el petróleo y el agua.

$$B_T = \left[ 1 + 2.8 \left( \frac{GOR}{P_s} \right)^{1.2} \right] F_o + F_w = \left[ 1 + 2.8 \left( \frac{194}{1485.25} \right)^{1.2} \right] (1 - 0.04 + 0.04) = 1.2337$$

6. Calcular la tasa del fluido motriz, con base en la producción deseada y la relación de flujo adimensional, M.

$$Q_N = \frac{G_S \times Q_S \times B_T}{G_N \times M} = \frac{0.3913 \times 500 \times 1.2337}{0.39299 \times 1} = 619.55 \text{ bl/día}$$

$G_N = G_O$  Fluido motriz usado es petróleo.

7. Cálculo de pérdidas de presión en tubería:

$$C = (D_1 - D_2)(D_1^2 - D_2^2)^2 (D_1 / ((D_1 - D_2)))^{0.1}$$

$$C = (2.992 - 0)(2.992^2 - 0^2)^2 (2.992 / ((2.992 - 0)))^{0.1}$$

$$C = 239.78$$

$$P_F = \left[ \frac{2.02 \times 10^{-6} \times L \times ((D_1 + D_2) \times \mu)^{0.21}}{C \times G^{0.21}} \right] G \times Q^{1.79}$$

$$P_F = \left[ \frac{2.02 \times 10^{-6} \times 8666 \times ((2.992 + 0) \times 3.784)^{0.21}}{239.78 \times 0.3929^{0.21}} \right] 0.3929 \times 619.55^{1.79} = 5.78 \text{ psi}$$

8. Calcular la presión del fluido motriz en la tobera  $P_N$ .

$$P_N = P_T + G_N \times D - P_{FN} = 3500 + 0.3929 \times 8666 - 5.79 = 6899.33 \text{ psi}$$

9. Calcular la tasa del fluido de retorno  $Q_D$ .

$$Q_D = Q_N + Q_S = 619.54 + 500 = 1119.55 \text{ bl/día}$$

10. Calcular el gradiente del fluido de retorno  $G_D$ .

$$G_D = \frac{G_S \times Q_S + G_N \times Q_N}{Q_D} = \frac{0.3913 \times 500 + 0.3829 \times 619.54}{1119.55} = 0.3937 \text{ psi/pie}$$

11. Calcular la fracción de agua del fluido de retorno  $F_{WD}$ .

Fluido motriz petróleo:

$$F_{WD} = \frac{Q_S \times F_W}{Q_D} = \frac{500 \times 0.04}{1119.55} = 0.018$$

12. Determinar la relación gas – líquido del fluido de retorno GLR.

$$GLR = \frac{Q_s \times F_o \times GOR}{Q_D} = \frac{500 \times (1 - 0.04) \times 194}{1119.55} = \text{pie}^3 / \text{bl}$$

13. Determinar la viscosidad del fluido de retorno  $\mu_D$ .

$$\mu_D = F_{WD} \times \mu_W + (1 - F_{WD}) \times \mu_O = 0.018 \times 0.31 + (1 - 0.018) \times 3.784 = 3.7215 \text{cp}$$

14. Determinar la presión de descarga de la bomba  $P_D$ .

Para el cálculo de  $P_{FD}$ , primero calculamos C, tomando en cuenta el espacio anular y se tiene que:

$$D_1 = 6.276 \text{pg} \quad D_2 = 3.5 \text{pg}$$

Entonces:

$$C = (D_1 - D_2)(D_1^2 - D_2^2)^2 (D_1 / (D_1 - D_2))^{0.1}$$

$$C = (6.276 - 3.5)(6.276^2 - 3.5^2)^2 (6.276 / (6.276 - 3.5))^{0.1} = 2218.23$$

$$P_F = \left[ \frac{2.02 \times 10^{-6} \times L \times ((D_1 + D_2) \times \mu)^{0.21}}{C \times G^{0.21}} \right] G \times Q^{1.79}$$

$$P_F = \left[ \frac{2.02 \times 10^{-6} \times 8666 \times ((6.276 + 3.5) \times 3.784)^{0.21}}{2218.23 \times 0.3929^{0.21}} \right] 0.3929 \times 2240.25^{1.79} = 2.3063 \text{psi}$$

Por lo tanto:

$$P_D = P_{WH} + G_H \times D + P_{FD} = 50 + 0.436 \times 8666 + 2.306 = 3464.1 \text{psi}$$

15. Calcular un nuevo valor de la relación de presiones H.

$$H = \frac{P_D - P_S}{P_N - P_D} = \frac{3464.1 - 1485.25}{6899.35 - 3464.1} = 0.576$$

16. Basado en este valor de H y la tabla 2.1, se determina la relación de áreas óptima,  $R = 0.4$

17. Utilizando la ecuación (2.21)

$$M = C_3 - \sqrt{\frac{C_2 \times C_3 + C_3 \times C_1 - C_2 \times C_1 + \frac{C_4(C_2 - C_3)H}{H+1}}{C_2 - C_3}}$$

Donde:

$$C_1 = 2R = 2 \times 0.4 = 0.8$$

$$K_{TD} = 0.20$$

$$C_2 = \frac{(1-2R)R^2}{(1-R)^2} = \frac{(1-2 \times 0.4)0.4^2}{(1-0.4)^2} = 0.0889$$

$$K_N = 0.03$$

$$C_3 = (1+K_{TD})R^2 = (1+0.20)0.4^2 = 0.1920$$

$$C_4 = 1+K_N = 1+0.03 = 1.03$$

Reemplazando éstos valores en la ecuación (2.21):

$$M = 0.192 - \sqrt{\frac{0.889 \times 0.192 + 0.192 \times 0.8 - 0.0889 \times 0.8 + \frac{1.03(0.0889 - 0.192)H}{0.4 + 1}}{0.0889 - 0.192}} = 0.528$$

Al comparar el valor de M obtenido con el M anterior se observa que:

$$\% \text{Error} = (M_{\text{obtenido}} - M_{\text{inicial}}) / M_{\text{obtenido}} = (0.528 - 1) / 0.528 = 89,36\%$$

La variación de M es mayor que el 1%, por lo tanto regresamos al paso 6, usando el nuevo valor de M. Los resultados de los cálculos se esquematizan en la tabla 2.5

**TABLA 2.5 RESULTADOS OBTENIDOS POR ITERACIÓN POZO LGA – 0012  
MÉTODO DE SMART**

|     |                         | Primera Iteración           |                      | Segunda Iteración |         |
|-----|-------------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------|---------|
| 1)  | <b>P<sub>T</sub></b>    | 3500                        | psi                  | 3500              | psi     |
| 2)  | <b>M</b>                | 1.0000                      |                      | 0.5281            |         |
| 3)  | <b>Go</b>               | 0.3929                      | psi/pie              | 0.3929            | psi/pie |
| 4)  | <b>Gs</b>               | 0.3947                      | psi/pie              | 0.39465           | psi/pie |
| 5)  | <b>B<sub>T</sub></b>    | 1.2337                      |                      | 1.2337            |         |
| 6)  | <b>Q<sub>N</sub></b>    | 619.5469                    | bl/día               | 1173.2129         | bl/día  |
| 7)  | <b>C</b>                | 239.7772                    |                      | 239.7772          |         |
|     | <b>P<sub>FN</sub></b>   | 5.7810                      | psi                  | 18.1291           | Psi     |
| 8)  | <b>P<sub>N</sub></b>    | 6899.3462                   | psi                  | 6886.9981         | Psi     |
| 9)  | <b>Q<sub>D</sub></b>    | 1119.5469                   | bl/día               | 1673.2129         | bl/día  |
| 10) | <b>G<sub>D</sub></b>    | 0.3937                      | psi/día              | 0.3934            | psi/día |
| 11) | <b>F<sub>WD</sub></b>   | 0.0179                      |                      | 0.0120            |         |
| 12) | <b>GLR</b>              | 83.17650788                 |                      | 55.65340913       |         |
| 13) | <b>μ<sub>D</sub></b>    | 3.7219                      | cp                   | 3.7425            | Cp      |
|     | <b>C</b>                | 2218.2328                   |                      | 2218.2328         |         |
|     | <b>P<sub>FD</sub></b>   | 2.3063                      | psi                  | 4.7378            | psi     |
| 14) | <b>P<sub>D</sub></b>    | 3464.1014                   | psi                  | 3464.3265         | psi     |
| 15) | <b>H</b>                | 0.5760                      |                      | 0.5782            |         |
| 16) | <b>R</b>                | 0.4                         |                      | 0.4               |         |
| 17) | <b>C<sub>1</sub></b>    | 0.8                         |                      | 0.8               |         |
|     | <b>C<sub>2</sub></b>    | 0.0889                      |                      | 0.0889            |         |
|     | <b>C<sub>3</sub></b>    | 0.1920                      |                      | 0.1920            |         |
|     | <b>C<sub>4</sub></b>    | 1.0300                      |                      | 1.0300            |         |
|     | <b>K<sub>TD</sub></b>   | 0.2000                      |                      | 0.2000            |         |
|     | <b>K<sub>N</sub></b>    | 0.0300                      |                      | 0.0300            |         |
|     | <b>M</b>                | 0.5281                      |                      | 0.5262            |         |
| 18) | <b>%ERROR</b>           | 89.3663                     |                      | 0.3485            |         |
| 19) | <b>M<sub>L</sub></b>    | 0.6891                      |                      | 0.6898            |         |
| 20) | Cavitación              | <b>M &lt; M<sub>L</sub></b> | No existe cavitación |                   |         |
| 24) | <b>A<sub>N</sub></b>    | 0.006413113                 |                      | 0.012158146       |         |
|     | <b>A<sub>T</sub></b>    | 0.016032782                 |                      | 0.030395364       |         |
|     | <b>HP<sub>sup</sub></b> | 36.86303944                 |                      | 69,80616533       |         |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

18. Calcular la relación de flujo adimensional en el límite de cavitación,  $M_L$ , con la ecuación (2.8).

$$M_L = \frac{1-R}{R} \sqrt{\frac{P_s}{1.3(P_N - P_s)}} = \frac{1-0.4}{0.4} \sqrt{\frac{1485.25}{1.3(6886.88 - 1485.25)}} = 0.6898$$

Como se observa  $M < M_L$ , no existe problema de cavitación se continua con el paso 24.

24. Determinar el área de la tobera requerida para manejar la tasa de fluido motriz calculada en el paso 6.

$$A_N = \frac{Q_N}{832 \sqrt{\frac{P_N - P_s}{G_N}}} = \frac{1177.3}{832 \sqrt{\frac{6866.88 - 1495.25}{0.8929}}} = 0.01215 \text{pg}^2$$

Se sabe que  $R = A_N / A_T$

Por lo tanto  $A_T = A_N / R = 0.01215 / 0.4$

$$A_T = 0.03039 \text{pg}^2$$

**TABLA 2.6 RESULTADOS MÉTODO DE SMART POZO LGA – 012**

| PARÁMETRO                | RESULTADO | PARÁMETRO                | RESULTADO |
|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| $Q_N$ (bl/día)           | 1173.21   | $P_T$ (psi)              | 3500      |
| $Q_s$ (bl/día)           | 500       | Potencia req (HP)        | 70        |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.01215   | $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.03039   |
| R                        | 0.4       |                          |           |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

La bomba jet que requiere este pozo, debe operar con una presión de superficie de 3500 psi, para producir 500 bl/día con un área de tobera de 0.01215 pg<sup>2</sup>, con caudal de inyección de 1173.21 bl/día. La curva de comportamiento para esta condición con el valor más alto de relación de presiones H corresponde a  $R = 0.4$ , para lo cual se tiene una cámara de mezclado de 0.03039 pg<sup>2</sup>.

Con estos datos y de acuerdo a los datos de cada fabricante se obtiene la tabla 2.7.

TABLA 2.7 GEOMETRÍAS ÓPTIMAS POR FABRICANTES POZO LGA – 012

| TAMAÑOS DE TOBERAS Y GARGANTAS PRINCIPALES FABRICANTES |                          |                          |        |                |        |                |          |        |       |       |   |       |
|--|--------------------------|--------------------------|--------|----------------|--------|----------------|----------|--------|-------|-------|---|-------|
| KOBE   |                          |                          |        |                |        | NATIONAL       |          |        |       |       |   |       |
| Tobera   | Garganta                 |                          | R      | Bomba          | Tobera |                | Garganta |        | R     | Bomba |   |       |
|  | No                       | Área                     |        |                | No     | Área           | No       | Área   |       |       |   |       |
| 7  | 0.0111                   | 7                        | 0.0278 |                | 7      | 0.0103         | 7        | 0.0271 |       |       |   |       |
|  |                          | 8                        | 0.0395 |                |        |                | 8        | 0.0346 |       |       |   |       |
| 8  | 0.0144                   | 7                        | 0.0278 |                | 8      | 0.0131         | 7        | 0.0271 |       |       |   |       |
|  |                          | 8                        | 0.0395 | 0.4            | 8A     |                | 8        | 0.0346 | 0.38  | 8A    |   |       |
| GUIBERSON  |                          |                          |        |                |        |                |          |        |       |       |   |       |
| Tobera   | Garganta                 |                          | R      | Bomba          | Tobera |                | Garganta |        | R     | Bomba |   |       |
|  | No                       | Área                     |        |                | No     | Área           | No       | Área   |       |       |   |       |
| B  | 0.0095                   | 3                        | 0.0241 |                | 7      | 0.0108         | F        | 0.0239 |       |       |   |       |
|  |                          | 4                        | 0.0314 |                |        |                | G        | 0.0311 |       |       |   |       |
| C  | 0.0123                   | 3                        | 0.0241 |                | 8      | 0.0122         | F        | 0.0239 |       |       |   |       |
|  |                          | 4                        | 0.0314 | 0.39           | C4     |                | G        | 0.0311 | 0.517 | 8G    |   |       |
| RESUMEN MEJOR GEOMETRÍA SELECCIONADA                   |                          |                          |        |                |        |                |          |        |       |       |   |       |
| FABRICANTE   | $A_n$ (pg <sup>2</sup> ) | $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | R      | Bomba          | R      | Bomba          | R        | Bomba  | R     | Bomba | R | Bomba |
| KOBE   | 0.0144                   | 0.0395                   | 0.4    | 8 <sup>a</sup> | 0.38   | 8 <sup>a</sup> | 0.39     | C4     | 0.517 | 8G    |   |       |
| NATIONAL   | 0.0131                   | 0.0346                   | 0.38   | 8 <sup>a</sup> | 0.39   | C4             | 0.517    | 8G     |       |       |   |       |
| GUIBERSON  | 0.0123                   | 0.0314                   | 0.39   | C4             | 0.39   | C4             | 0.39     | C4     | 0.39  | C4    |   |       |
| CLAW   | 0.0122                   | 0.0311                   | 0.517  | 8G             | 0.517  | 8G             | 0.517    | 8G     | 0.517 | 8G    |   |       |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

- **Criterio para la selección de la bomba:**

Para seleccionar la bomba que más se ajusta a los parámetros calculados, de entre las alternativas de cada fabricante, se consideró lo siguiente:

Se escogió la bomba cuya área de tobera  $A_N$ , área de cámara de mezclado  $A_T$ , fuese igual o ligeramente mayor a la determinada en los cálculos y el valor de  $R$  obtenido de estas combinaciones, que cumpla con el  $R$  determinado en los cálculos iterativos.

Para el pozo LGA – 12, se obtuvo un  $A_N$  de  $0.01215 \text{ pg}^2$  y una  $R$  de 0.4. Con estos valores obtenidos mediante el método de Smart, se seleccionó de las tablas de bombas de cada fabricante la que más se ajusta; para esto se toman dos bombas, una con una  $A_N$  menor y otra con e inmediatamente mayor de  $A_N$  que establezca un rango que permita determinar la opción óptima.

Como en muchas ocasiones los valores obtenidos no son exactamente provistos por los fabricantes, se selecciona la bomba cuyo valor de  $A_N$  y  $R$  se ajusten a las condiciones óptimas determinadas.

En base a lo anterior se seleccionó la bomba C4 de Guiberson, que cumple con dichas condiciones.

### **2.3.2 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 32 (LGA-032)**

En el historial del pozo LGA – 032, se observa que se encontraba produciendo de la arena hollín con un %BSW de 95% y una producción de 7 bppd, por lo cual se decidió cerrar este pozo. Al momento del presente estudio se tiene como objetivo del departamento de Ingeniería, abrir a la producción la arena basal Tena; los datos esperados de producción de dicha arena se observan en la tabla 2.8, con los cuales se procede a realizar el análisis del pozo mediante el método de Smart para la implementación de una geometría óptima para las condiciones dadas, los resultados del análisis se presentan en la tabla 2.9.

**TABLA 2.8 DATOS POZO LGA – 032**

| PARÁMETRO                      | VALOR     | PARÁMETRO                           | VALOR                    |
|--------------------------------|-----------|-------------------------------------|--------------------------|
| Arena                          | “B.T.”    | °API petróleo                       | 24.9                     |
| Profundidad Arena (D)          | 8779 pies | Viscosidad del petróleo ( $\mu_o$ ) | 3.84 cp                  |
| Longitud T.P. (L)              | 8779 pies | Viscosidad del agua ( $\mu_w$ )     | 0.37 cp                  |
| Diam ext T.P. ( $D_{oTP}$ )    | 3.5 pg    | Relación gas - petróleo (GOR)       | 200 pie <sup>3</sup> /bl |
| Diam. Int T.P. ( $D_{ITP}$ )   | 2.992 pg  | Fracción de agua ( $F_w$ )          | 0.376                    |
| Diam. Int T.R. ( $D_{ITR}$ )   | 6.276 pg  | Caudal de Producción ( $Q_s$ )      | 200 bl/día               |
| Presión de cabeza ( $P_{WH}$ ) | 65 psi    | Presión de fondo ( $P_s$ )          | 1400 psi                 |
| Fluido Motriz                  | Petróleo  | Gradiente de agua ( $G_w$ )         | 0.44 psi/pie             |
| $G_N$                          | $G_o$     | Presión de reservorio ( $P_R$ )     | 2152 psi                 |
| Presión de Burbuja ( $P_b$ )   | 780 psi   | Salinidad (ppmCl)                   | 28000                    |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA 2.9 RESULTADOS MÉTODO DE SMART POZO LGA – 032**

| PARÁMETRO                | RESULTADO | PARÁMETRO                | RESULTADO |
|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| $Q_N$ (bl/día)           | 642.2     | $P_T$ (psi)              | 3600      |
| $Q_s$ (bl/día)           | 200       | Potencia req (HP)        | 39        |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0062828 | $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0157    |
| R                        | 0.4       |                          |           |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

La bomba jet que requiere este pozo, debe operar con una presión de superficie de 3600 psi, para producir 200 bl/día con un área de tobera de 0.0062828 pg<sup>2</sup>, con caudal de inyección de 642.2 bl/día. La curva de comportamiento para esta condición con el valor más alto de relación de presiones H corresponde a  $R = 0.4$ , para lo cual se tiene una cámara de mezclado de 0.0157 pg<sup>2</sup>.

Con estos datos y de acuerdo a los datos de cada fabricante se obtiene la tabla 2.10.

**TABLA 2.10 GEOMETRÍAS ÓPTIMAS POR FABRICANTES POZO LGA – 032**

| FABRICANTE | $A_n$ (pg <sup>2</sup> ) | $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | R    | Bomba |
|------------|--------------------------|--------------------------|------|-------|
| KOBE       | 0.0067                   | 0.0167                   | 0.4  | 5A    |
| NATIONAL   | 0.0064                   | 0.0167                   | 0.38 | 5A    |
| GUIBERSON  | 0.0095                   | 0.0189                   | 0.5  | B2    |
| CLAW       | 0.0074                   | 0.0187                   | 0.4  | 5E    |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Para los resultados obtenidos en el análisis del pozo LGA – 032, de las tablas de bombas de cada fabricante la que más se ajusta es la bomba jet Kobe 5 – A, con  $A_N = 0.0067 \text{ pg}^2$ ,  $A_T = 0.0167 \text{ pg}^2$  y  $R = 0.4$ .

### 2.3.3 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 48 (LGAF-048)

Al momento del presente estudio el pozo LGAF – 048, se encuentra en W.O., con el objetivo de poner en producción la arena “Tinf”; los datos esperados de producción de dicha arena se observan en la tabla 2.11, con los cuales se procede a realizar el análisis del pozo mediante el método de Smart para la implementación de una geometría óptima para las condiciones dadas, los resultados del análisis se presentan en la tabla 2.12.

**TABLA 2.11 DATOS POZO LGAF – 048**

| PARÁMETRO                      | VALOR     | PARÁMETRO                           | VALOR                    |
|--------------------------------|-----------|-------------------------------------|--------------------------|
| Arena                          | “Tinf.”   | °API petróleo                       | 24.1                     |
| Profundidad Arena (D)          | 9934 pies | Viscosidad del petróleo ( $\mu_o$ ) | 4.65 cp                  |
| Longitud T.P. (L)              | 9934 pies | Viscosidad del agua ( $\mu_w$ )     | 0.28 cp                  |
| Diam ext T.P. ( $D_{oTP}$ )    | 3.5 pg    | Relación gas - petróleo (GOR)       | 363 pie <sup>3</sup> /bl |
| Diam. Int T.P. ( $D_{iTP}$ )   | 2.992 pg  | Fracción de agua ( $F_w$ )          | 0.65                     |
| Diam. Int T.R. ( $D_{iTR}$ )   | 6.276 pg  | Caudal de Producción ( $Q_s$ )      | 450 bl/día               |
| Presión de cabeza ( $P_{WH}$ ) | 100 psi   | Presión de fondo ( $P_s$ )          | 1098 psi                 |
| Fluido Motriz                  | Petróleo  | Gradiente de agua ( $G_w$ )         | 0.44psi/pie              |
| Gn                             | Go        | Presión de reservorio ( $P_R$ )     | 2250 psi                 |
| Presión de Burbuja ( $P_b$ )   | 770 psi   | Salinidad (ppmCl <sup>-</sup> )     | 20500                    |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA 2.12 RESULTADOS MÉTODO DE SMART POZO LGAF – 048**

| PARÁMETRO                | RESULTADO | PARÁMETRO                | RESULTADO |
|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| $Q_N$ (bl/día)           | 1947      | $P_T$ (psi)              | 3600      |
| $Q_s$ (bl/día)           | 450       | Potencia req (HP)        | 119       |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0186    | $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.037236  |
| R                        | 0.5       |                          |           |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

La bomba jet que requiere este pozo, debe operar con una presión de superficie de 3600 psi, para producir 450 bl/día con un área de tobera de

0.0186  $\text{pg}^2$ , con caudal de inyección de 1947 bl/día. La curva de comportamiento para esta condición con el valor más alto de relación de presiones H corresponde a  $R = 0.5$ , para lo cual se tiene una cámara de mezclado de 0.03723  $\text{pg}^2$ .

Con estos datos y de acuerdo a los datos de cada fabricante se obtiene la tabla 2.13.

**TABLA 2.13 GEOMETRÍAS ÓPTIMAS POR FABRICANTES POZO LGA – 032**

| FABRICANTE | $A_n$ ( $\text{pg}^2$ ) | $A_T$ ( $\text{pg}^2$ ) | R     | Bomba           |
|------------|-------------------------|-------------------------|-------|-----------------|
| KOBE       | 0.0186                  | 0.0395                  | 0.517 | 9A <sup>-</sup> |
| NATIONAL   | 0.0212                  | 0.0441                  | 0.483 | 10X             |
| GUIBERSON  | 0.0241                  | 0.038                   | 0.53  | E6              |
| CLAW       | 0.0175                  | 0.0376                  | 0.465 | 10H             |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Para los resultados obtenidos en el análisis del pozo LGAF – 048, de las tablas de bombas de cada fabricante la que más se ajusta es la bomba jet Kobe 9 – A, con  $A_N = 0.0186 \text{ pg}^2$ ;  $A_T = 0.0395 \text{ pg}^2$  y  $R = 0.517$ .

En la tabla 2.14, se presenta un resumen de los estudios realizados con el método de Smart a los pozos seleccionados para la aplicación de este método.

**TABLA 2.14 RESUMEN DE RESULTADOS – MÉTODO DE SMART**

| POZO                    | LGA – 012 | LGA – 032 | LGAF – 048       |
|-------------------------|-----------|-----------|------------------|
| Fabricante              | GUIBERSON | KOBE      | KOBE             |
| Bomba                   | C-4       | 5-A       | 9-A <sup>-</sup> |
| $A_n$ ( $\text{pg}^2$ ) | 0.0123    | 0.0067    | 0.0186           |
| $A_T$ ( $\text{pg}^2$ ) | 0.0314    | 0.0167    | 0.0395           |
| R                       | 0.39      | 0.4       | 0.517            |
| $P_T$ (psi)             | 3500      | 3600      | 3600             |
| $Q_N$ (bl/día)          | 1173.21   | 200       | 1947             |
| $Q_S$ (bl/día)          | 500       | 642.2     | 450              |
| HP                      | 70        | 39        | 119              |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

## 2.4 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA APLICACIÓN DEL MÉTODOS DE PETRIE AL CAMPO LAGO AGRIO

Se presentan los resultados obtenidos con la aplicación de los algoritmos propuestos por Petrie a los pozos que se encuentran funcionando con bombeo hidráulico jet, detallando una posible optimización del sistema. La optimización se la realiza en virtud del análisis y variación de parámetros de operación, manteniendo la presión de trabajo así como también la geometría usada; todo esto, en busca del objetivo principal, el incremento de producción.

El análisis del pozo LGAB – 009, se lo realizara paso a paso como ejemplo de cálculo. Para el estudio de los siguientes pozos, la tabla correspondiente a los resultados por cada iteración realizada, se encuentran en el anexo N° 2.

### 2.4.1 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 9 (LGAB-009)

Los datos requeridos para el estudio, obtenidos en la investigación de campo, se observan en la tabla 2.15, con los cuales se procede a realizar el análisis del pozo para la optimización del sistema de bombeo hidráulico.

**TABLA 2.15 DATOS POZO LGAB – 009**

| PARÁMETRO                      | VALOR     | PARÁMETRO                           | VALOR                   |
|--------------------------------|-----------|-------------------------------------|-------------------------|
| Arena                          | "T."      | °API petróleo                       | 28.5                    |
| Profundidad Arena (D)          | 9903 pies | Viscosidad del petróleo ( $\mu_o$ ) | 4.65 cp                 |
| Longitud T.P. (L)              | 9484 pies | Viscosidad del agua ( $\mu_w$ )     | 0.28 cp                 |
| Diam ext T.P. ( $D_{oTP}$ )    | 3.5 pg    | Relación gas - petróleo (GOR)       | 363pie <sup>3</sup> /bl |
| Diam. Int T.P. ( $D_{iTP}$ )   | 2.992 pg  | Fracción de agua ( $F_w$ )          | 0.157                   |
| Diam. Int T.R. ( $D_{iTR}$ )   | 6.276 pg  | Caudal de Producción ( $Q_s$ )      | 142 bl/día              |
| Presión de cabeza ( $P_{WH}$ ) | 50 psi    | Presión de succión ( $P_s$ )        | 859 psi                 |
| Fluido Motriz                  | Petróleo  | Gradiente de agua ( $G_w$ )         | 0.44 psi/pie            |
| $G_N = G_o$                    | 0.3829    | Presión de reservorio ( $P_R$ )     | 2200 psi                |
| Presión de Burbuja ( $P_b$ )   | 770 psi   | Salinidad (ppmCl <sup>-</sup> )     | 35000                   |
| G.E. gas                       | 0.965     | G.E. agua                           | 1.024                   |
| Temp. sup.                     | 100 °F    | Temp fondo                          | 210 °F                  |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**Parte A. Escoger una tobera e iterar con la tasa de fluido motriz.**

1. Determinar el gradiente de fluido producido en la succión de la bomba.

$$G_s = G_o(1-F_w) + G_w F_w = 0.3829(1-0.157) + 0.444 \times 0.157 = 0.3924 \text{ psi/ft}$$

2. Determinar el área anular mínima de la succión para evitar a cavitación.

$$A_{CM} = Q_s \left[ \frac{1}{691} \sqrt{\frac{G_s}{P_s}} + \frac{(1-F_w)GOR}{24650P_s} \right]$$

$$A_{CM} = Q_s \left[ \frac{1}{691} \sqrt{\frac{0.3924}{859}} + \frac{(1-0.157)363}{24650 \times 859} \right] = 0.0064 \text{ pg}^2$$

3. Seleccionar la tobera con una R aproximada de 0.4 tal que el área anular de la garganta sea mayor al  $A_{CM}$  del paso 2.

Pozo se encuentra trabajando con geometría 8A de Kobe

4.  $P_T = 3450 \text{ psi}$

5. Determinar a presión del fluido motriz en la tobera despreciando las pérdidas de presión por fricción en la primera iteración.

$$P_N = P_T + G_N \times D - P_{FN} = 3450 + (0.3829 \times 9484) = 7082 \text{ psi}$$

6. Determinar la tasa de flujo en la tobera.

$$Q_N = 832 A_N \sqrt{\frac{P_N - P_s}{G_N}} = 832 A_N \sqrt{\frac{7082 - 859}{0.3829}} = 1527 \text{ bl/día}$$

7. Determinar las pérdidas de presión por fricción en la tubería de inyección del fluido motriz.

$$v = 0.01191 \frac{Q_N}{d^2} = 0.01191 \frac{1527}{2.992^2} = 2.032 \text{ ft/s}$$

$$\rho_o = \frac{\rho_{osc}}{1 + \frac{T - 68}{1885}} = \frac{0.88437}{1 + \frac{((100 + 210)/2) - 68}{1885}} = 0.8453 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu[\text{cp}] = v_o[\text{cts}] \times \rho_o[\text{g/cm}^3] = 4.6492 \times 0.8453 = 3.93 \text{ cp}$$

$$N_{RE} = 7.742 \times 10^3 \frac{dv}{\mu/\rho} = 7.742 \times 10^3 \frac{2.992 \times 2.032}{1.56} = 10122.31$$

$N_{RE} > 1200$  se tiene flujo de transición o turbulento y las pérdidas de presión por fricción se calcular mediante:

$$\bar{f} = 0.0361 \frac{(\bar{\mu}/\bar{\rho})^{0.21}}{(dv)^{0.21}} = 0.0361 \frac{(1.56)^{0.21}}{(1.227 \times 22.992)^{0.21}} = 0.0341$$

Flujo turbulento:

$$P_{FN} = 11.46 \times 10^{-6} \bar{f} L \frac{Q_N^2}{d^5} = 11.46 \times 10^{-6} \times 0.8518 \times 0.0341 \times 9849 \frac{1527^2}{2.992^5} = 31 \text{ psi}$$

8. Regresar al paso 5 hasta que los valores sucesivos de  $Q_N$  estén con una diferencia dentro del 15%. Luego continuar con la parte B.

$$P_N = P_T + G_N \times D - P_{FN} = 3450 + (0.3829 \times 9484) - 31 = 7051 \text{ psi}$$

$$\Delta P_N \% = \frac{7082 - 7051}{7051} \times 100 = 0.43$$

Entonces:

$$Q_N = 832 A_N \sqrt{\frac{P_N - P_S}{G_N}} = 832 \times 0.0086 \sqrt{\frac{7051 - 870}{0.3829}} = 1524 \text{ bl/día}$$

$$\Delta Q_N \% = \frac{1527 - 1524}{1527} \times 100 = 0.25$$

$$v = 0.01191 \frac{Q_N}{d^2} = 2.027 \text{ ft/s}$$

$$\rho_o = 0.854 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu [\text{cp}] = v_o [\text{cts}] \times \rho_o [\text{g/cm}^3] = 3.93 \text{ cp}$$

$$N_{RE} = 7.742 \times 10^3 \frac{dv}{\mu/\rho} = 7.742 \times 10^3 \frac{2.992 \times 2.027}{3.93 \times 0.8554} = 10097.48$$

$N_{RE} > 1200$  se tiene flujo de transición o turbulento y las pérdidas de presión por fricción se calcular mediante:

$$\bar{f} = 0.0361 \frac{(\bar{\mu}/\bar{\rho})^{0.21}}{(dv)^{0.21}} = 0.03414$$

Flujo turbulento:

$$P_{FN} = 11.46 \times 10^{-6} \bar{\gamma} \bar{f} L \frac{Q_N^2}{d^5} = 11.46 \times 10^{-6} \times 0.8518 \times 0.0301 \times 9849 \frac{1527^2}{2.992^5} = 30 \text{ psi}$$

## Parte B. Iterar con la tasa de producción

### Iteración 1

1. Determinar las propiedades del fluido de retorno.

a. Tasa de fluido de retorno:

$$Q_D = Q_N + Q_S = 142 + 1524 = 1666 \text{ bl/día}$$

b. Gradiente de fluido de retorno:

$$G_D = \frac{G_N \times Q_N + G_S \times Q_S}{Q_D} = \frac{0.383 \times 1524 + 0.3912 \times 142}{1666} = 0.3837 \text{ psi/pie}$$

c. Corte de agua del fluido de retorno en caso de petróleo como fluido motriz:

$$F_{WD} = \frac{Q_s F_w}{Q_D} = \frac{142 \times 0.157}{1666} = 0.0134$$

d. Relación gas – líquido del fluido de retorno:

$$GLR = \frac{Q_s \times (1 - F_w) \times GOR}{Q_D} = \frac{142 \times (1 - 0.157) \times 363}{1666} = 26 \text{ pie}^3 / \text{bl}$$

e. Viscosidad del fluido de retorno:

$$v_D = (1 - F_w) \times v_o + F_{WD} \times v_w = (1 - 0.021) \times 1.56 + 0.021 \times 1 = 1.5 \text{ cts}$$

2. Determinar la presión de descarga  $P_D$  si el GLR del fluido de retorno es menor o igual a 10.

GLR > 10.

3. GLR del fluido de retorno es mayor a 10 determinar la presión de descarga, con la correlación de flujo multifásico de Hagerdorn y Brow.

$P_D = 3692$  psi.

4. Calcular la relación adimensional de presión H.

$$H = \frac{P_D - P_s}{P_N - P_D} = \frac{3692 - 580}{7051 - 3692} = 0.8435$$

5. Calcular la relación adimensional de flujo másico, M. Condición  $GOR \neq 0$

$$M = Q_s \left\{ \left[ 1 + 2.8 \left( \frac{GOR}{P_s} \right)^{1.2} \right] F_o + F_w \right\} \times \left( \frac{G_s}{Q_N \times G_N} \right)$$

$$M = 142 \left\{ \left[ 1 + 2.8 \left( \frac{363}{858} \right)^{1.2} \right] (1 - 0.157) + 0.157 \right\} \times \left( \frac{0.3912}{1527 \times 0.383} \right) = 0.1758$$

6. Con la tabla 2.1, se obtiene un valor de  $R=0.5$

$$M = C_3 - \sqrt{\frac{C_2 \times C_3 + C_3 \times C_1 - C_2 \times C_1 + \frac{C_4(C_2 - C_3)H}{H+1}}{C_2 - C_3}}$$

Donde:

$$C_1 = 2R = 2 \times 0.5 = 1 \quad K_{TD} = 0.20$$

$$C_2 = \frac{(1-2R)R^2}{(1-R)^2} = \frac{(1-2 \times 0.5)0.5^2}{(1-0.5)^2} = 0 \quad K_N = 0.03$$

$$C_3 = (1+K_{TD})R^2 = (1+0.20)0.5^2 = 0.3$$

$$C_4 = 1+K_N = 1+0.03 = 1.03$$

$$M = 0.3 - \sqrt{\frac{0 \times 0.3 + 0.3 \times 1 - 0 \times 1 + \frac{1.03(0 - 0.3)0.5}{0.5 + 1}}{0 - 0.3}} = 0.3276$$

7. Al Comparar el valor de M del paso 5 con el valor de M del paso 6. Se observa una diferencia mayor al 5%.

M en 6=0.3276 y M en 5 = 0.1758.

Por lo tanto se corrige  $Q_s$  con la ecuación (2.49) y se retornar al paso B.1.a.

$$Q_s \text{ paso 5} = Q_s \text{ paso 6} \left( \frac{M_6}{M_5} \right) = 142 \left( \frac{0.327}{0.1758} \right) = 265 \text{ bl/día}$$

Paso B:

- B.1.a  $Q_D = 1788$  bl/día
- B.1.b  $G_D = 0.3843$  psi/pie
- B.1.c  $F_{WD} = 0.0232$
- B.1.d  $GLR = 45$ pie<sup>3</sup>/bl
- B.1.e  $\nu_m = 4.5$  cst

Paso 3

- $P_D = 3697.85$  psi.

Paso 4

- $H = 0.8467$ .

Paso 5:

- $M = 0.3276$ .

Paso 6

- $R = 0.5$ .
- $C_1 = 1$ .
- $C_2 = 0.0000$ .
- $C_3 = 0.3000$ .
- $C_4 = 1.0300$ .
- $K_{TD} = 0.2000$ .
- $K_N = 0.0300$

- $M_6 = 0.3263$

Al Comparar el valor de M del paso 5 con el valor de M del paso 6. Se observa una diferencia menor al 5%

M en 6=0.3263 y M en 5 = 0.3276.

### Parte C. Cálculos finales.

1. Escoger el tamaño de la garganta inmediatamente superior al valor obtenido con la ecuación (2.50).

$$A_T = \frac{A_N}{R} = \frac{0.0144}{0.5} = 0.0288 \text{pg}^2$$

Se escoge la garganta nº 8, con un área real de 0.0395 pg<sup>2</sup>; por lo tanto se escoge la bomba que corresponde a la denominación KOBE 9A.

2. Calcular la tasa de flujo en la succión de la bomba a partir de la cual inicia la cavitación.

$$Q_{SC} = Q_{SI} \frac{(A_T - A_N)}{A_{CM}} = 142 \frac{(0.0395 - 0.0144)}{0.0064} = 553 \text{bl/día}$$

3. Calcular la potencia hidráulica de la bomba de superficie.

$$HP = 0.000017 Q_N P_T = 0.000017 \times 1527 \times 3450 = 90 \text{HP}$$

4. Calcular la potencia de la bomba de desplazamiento positivo de superficie considerando una eficiencia del 90%.

$$HP = \frac{0.000017 Q_N P_T}{0.9} = \frac{0.000017 \times 1527 \times 3450}{0.9} = 100 \text{HP}$$

Los valores obtenidos se registran en la tabla 2.16.

**TABLA 2.16 RESULTADOS MÉTODO DE PETRIE POZO LGAB - 009**

| PARÁMETRO                | RESULTADO | PARÁMETRO         | RESULTADO |
|--------------------------|-----------|-------------------|-----------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0144    | $P_T$ (psi)       | 3450      |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0395    | $Q_N$ (bl/día)    | 1527      |
| HP (a 90%)               | 100       | $Q_S$ (bl/día)    | 189       |
| R                        | 0.400     | $P_S$ (psi)       | 858.58    |
|                          |           | $Q_{SC}$ (bl/día) | 220       |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Para realizar el análisis nodal del sistema, realizamos un segundo análisis con una producción deseada y una presión tal que interseque la curva de inflow.

Producción deseada: 100 bl/día

Presión de succión a la tasa deseada: 500 psi

Y realizamos los cálculos correspondientes:

**TABLA 2.17 RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA ITERACIÓN POZO LGAB - 009**

| <b>PARTE A.- Escoger la tobera e iterar con el caudal de fluido motriz</b> |                   |                   |
|--|-------------------|-------------------|
| Parámetro  | Resultado         |                   |
| $G_S$ (psi/pie)  | 0.3924            |                   |
| $A_{CM}$ (pg <sup>2</sup> )  | 0.0116            |                   |
| Fabricante   | KOBE              |                   |
| Tobera   | 9                 |                   |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )   | 0.0144            |                   |
| Parámetro  | Iteración         |                   |
|  | Primera           | Segunda           |
| $P_T$ (psi)  | 3450              | 3450              |
| $P_N$ (psi)  | 7082              | 7052              |
| $Q_N$ (bl/día)   | 1571              | 1567              |
| $\Delta Q_N$ (%)   |                   | 0.24              |
| $v$ (pie/seg)  | 2.09              | 2.085             |
| $N_{RE}$   | 10409.86          | 10384.46          |
| Flujo  | <b>TURBULENTO</b> | <b>TURBULENTO</b> |
| $\rho_o$ (g/cm <sup>3</sup> )  | 0.8454            | 0.8454            |
| $\mu_o$ (cp)   | 3.93              | 3.93              |
| $\bar{f}$  | 0.03426           | 0.03428           |
| $P_{FN}$ (psi)   | 32                | 32                |
| $\Delta Q_N < 15\%$  |                   | VERDADERO         |

**TABLA 2.17 CONTINUACIÓN**

| PARTE B.- Iterar con el caudal de producción |             |             |
|--|-------------|-------------|
| Parámetro                                    | Iteración   |             |
|  | Primera     | Segunda     |
| $Q_D$ (bl/día)                               | 1667        | 1738        |
| $G_D$ (psi/pie)                              | 0.3835      | 0.3839      |
| $F_{WD}$                                     | 0.0094      | 0.0155      |
| GLR (pie <sup>2</sup> /bl)                   | 18          | 30          |
| $P_D$ (psi)                                  | 3674.34     | 3678.01     |
| H  | 0.9405      | 0.9426      |
| $M_5$  | 0.1705      | 0.2920      |
| R  | 0.5         | 0.5         |
| $C_1$  | 1           | 1           |
| $C_2$  | 0.0         | 0.0         |
| $C_3$  | 0.3         | 0.3         |
| $C_4$  | 1.03        | 1.03        |
| $M_6$  | 0.292       | 0.2913      |
| Convergencia                                 | NO CONVERGE | SI CONVERGE |
| $Q_S$ Nuevo                                  | 171         | 171         |
| PARTE C.- Cálculos finales                   |             |             |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )                     | 0.0360      |             |
| Garganta (pg <sup>2</sup> )                  | 0.0395      |             |
| Nº   | 8           |             |
| Bomba  | KOBE 8A     |             |
| $Q_{SC}$ (bl/día)                            | 180         |             |
| HP (HP)                                      | 92          |             |
| HP al 90% (HP)                               | 102         |             |

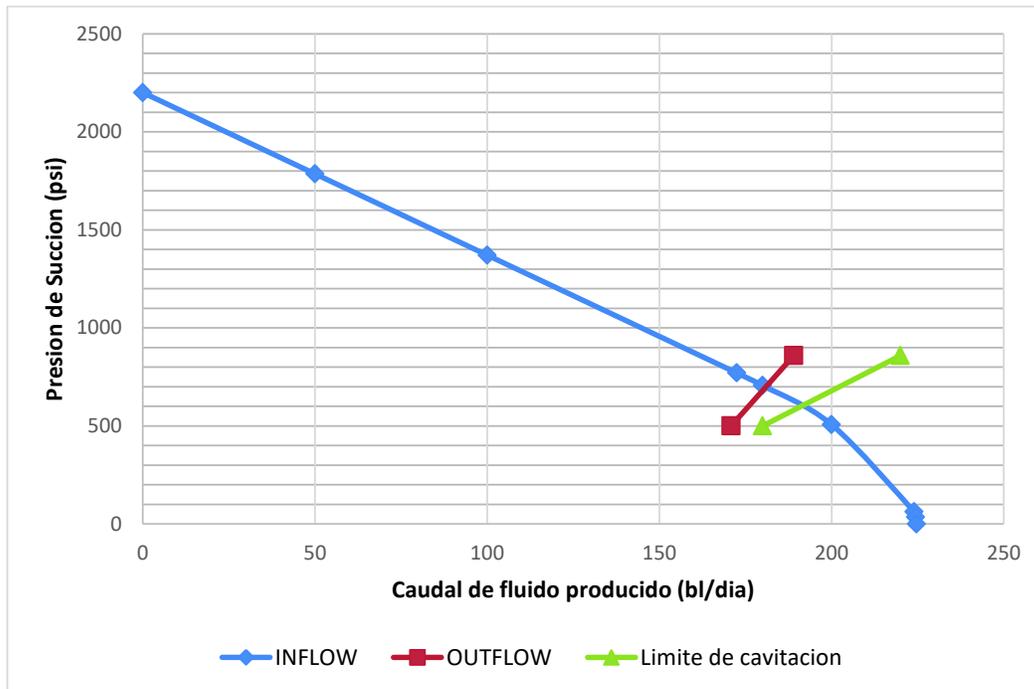
ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA 2.18 RESULTADOS MÉTODO DE PETRIE SEGUNDO ANÁLISIS POZO LGAB - 009**

| PARÁMETRO                | RESULTADO | PARÁMETRO         | RESULTADO |
|--------------------------|-----------|-------------------|-----------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0144    | $P_T$ (psi)       | 3450      |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0395    | $Q_N$ (bl/día)    | 1567      |
| HP (a 90%)               | 102       | $Q_S$ (bl/día)    | 171       |
| R                        | 0.500     | $P_S$ (psi)       | 500       |
|                          |           | $Q_{SC}$ (bl/día) | 180       |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Realizando el análisis nodal del sistema, figura 2.5, se determina la optimización del diseño de funcionamiento, los valores correspondientes a la propuesta de rediseño se presentan en la tabla 2.19.

**FIGURA 2.5 ANÁLISIS NODAL POZO LGAB - 009**

Elaborado por: Becerra Freddy

**TABLA 2.19 RESULTADOS POZO LGAB - 009**

| PARÁMETRO                | RESULTADO | PARÁMETRO         | RESULTADO |
|--------------------------|-----------|-------------------|-----------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0144    | $P_T$ (psi)       | 3450      |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0395    | $Q_N$ (bl/día)    | 1544      |
| HP (a 90%)               | 102       | $Q_S$ (bl/día)    | 182       |
| R                        | 0.400     | $P_S$ (psi)       | 690       |
| Bomba                    | Kobe 8A   | $Q_{SC}$ (bl/día) | 197       |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

El pozo LGAB – 009, para producir 182 bl/día, con una presión de operación de 3450 psi, con un caudal de fluido motriz de 1544 bl/día, requiere una bomba jet Kobe 8A. Se seleccionó la tobera 8 del fabricante Kobe,  $A_N$  de 0.0144 pg<sup>2</sup>, luego de realizar las iteraciones necesarias se determinó que la garganta necesaria es la que tiene un área,  $A_T$  de 0.0395 pg<sup>2</sup>, que corresponde a la número 8.

A partir de un caudal de producción de 197 bl/día, se presentara cavitación en la bomba. La potencia hidráulica requerida en superficie considerando una eficiencia del 90 % es de 102 HP.

## 2.4.2 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 18 (LGA-018)

En base a la información de campo obtenida, se presenta la tabla 2.20 con los datos requeridos para realizar el estudio de optimización del pozo LGA – 018, el resultado del análisis se presenta en la tabla 2.21.

**TABLA 2.20 DATOS POZO LGA – 018**

| PARÁMETRO                      | VALOR      | PARÁMETRO                           | VALOR                    |
|--------------------------------|------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Arena                          | “Hs + Hi”  | °API petróleo                       | 27.7                     |
| Profundidad Arena (D)          | 9560 pies  | Viscosidad del petróleo ( $\mu_o$ ) | 5.174 cp                 |
| Longitud T.P. (L)              | 9560 pies  | Viscosidad del agua ( $\mu_w$ )     | 0.33 cp                  |
| Diam ext T.P. ( $D_{oTP}$ )    | 3.5 pg     | Relación gas - petróleo (GOR)       | 148 pie <sup>3</sup> /bl |
| Diam. Int T.P. ( $D_{iTP}$ )   | 2.992 pg   | Fracción de agua ( $F_w$ )          | 0.897                    |
| Diam. Int T.R. ( $D_{iTR}$ )   | 6.276 pg   | Caudal de Producción ( $Q_s$ )      | 292 bl/día               |
| Presión de cabeza ( $P_{WH}$ ) | 100 psi    | Presión de succión ( $P_s$ )        | 1124 psi                 |
| Fluido Motriz                  | Petróleo   | Gradiente de agua ( $G_w$ )         | 0.43 psi/pie             |
| $G_N = G_o$                    | 0.3849     | Presión de reservorio ( $P_R$ )     | 3620 psi                 |
| Presión de Burbuja ( $P_b$ )   | 880 psi    | Salinidad (ppmCl <sup>-</sup> )     | 7450                     |
| G.E. gas                       | 1.161      | G.E. agua                           | 1.0052                   |
| Temp sup                       | 102 °F     | Temp fondo                          | 210 °F                   |
| DATOS DE DISEÑO                |            |                                     |                          |
| Parámetros                     | Análisis 1 | Análisis 2                          |                          |
| Prod deseada (bl/día)          | 292        | 20                                  |                          |
| $P_s$ (psi)                    | 1024       | 150                                 |                          |
| $P_T$ (psi)                    | 3500       | 3500                                |                          |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

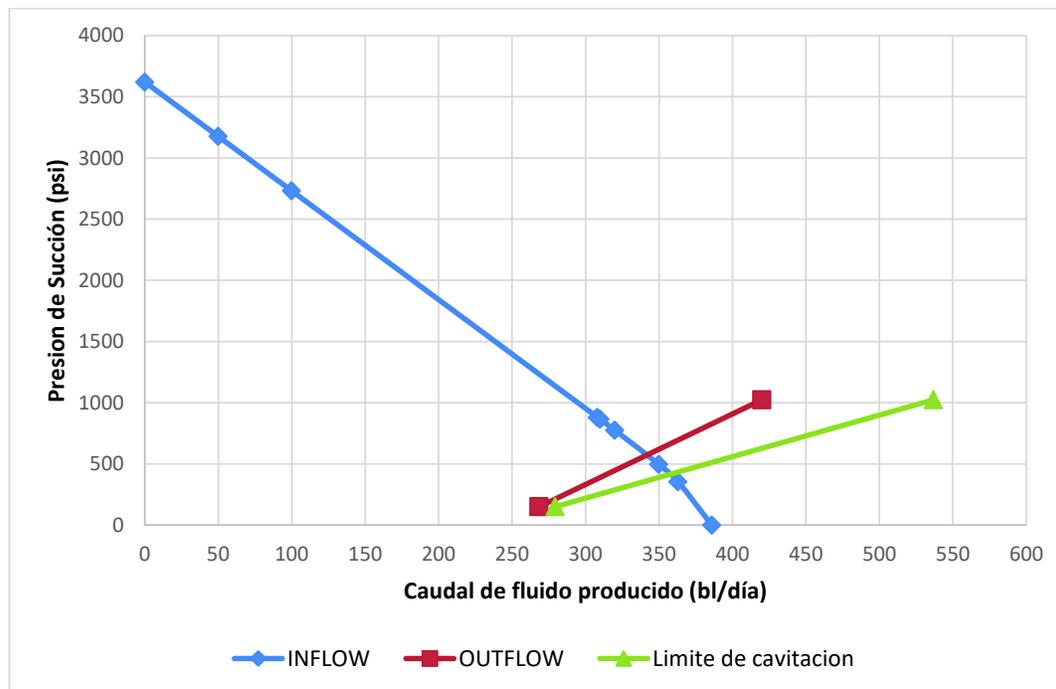
**TABLA 2.21 SUMARIO FINAL DE RESULTADOS POR CADA ANÁLISIS DATOS POZO LGA – 018**

| Sumario de resultados análisis 1 |         |                   |      |
|----------------------------------|---------|-------------------|------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0148  | $P_T$ (psi)       | 3500 |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0376  | $Q_N$ (bl/día)    | 1527 |
| HP (a 90%)                       | 101     | $Q_S$ (bl/día)    | 420  |
| R                                | 0.4     | $P_s$ (psi)       | 1024 |
| Bomba                            | CLAW 9H | $Q_{SC}$ (bl/día) | 537  |
| Sumario de resultados análisis 2 |         |                   |      |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0148  | $P_T$ (psi)       | 3500 |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0376  | $Q_N$ (bl/día)    | 1660 |
| HP (a 90%)                       | 110     | $Q_S$ (bl/día)    | 268  |
| R                                | 0.4     | $P_s$ (psi)       | 150  |
| Bomba                            | CLAW 9H | $Q_{SC}$ (bl/día) | 279  |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Al realizar el análisis nodal del sistema, figura 2.6, se determinó un rediseño de optimización cuyos valores se presentan en la tabla 2.22.

**FIGURA 2.6 ANÁLISIS NODAL POZO LGA - 018**



Elaborado por: Becerra Freddy

**TABLA 2.22 SUMARIO FINAL DE RESULTADOS POZO LGA – 018**

| PARÁMETRO                | RESULTADO | PARÁMETRO         | RESULTADO |
|--------------------------|-----------|-------------------|-----------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0148    | $P_T$ (psi)       | 3500      |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0376    | $Q_N$ (bl/día)    | 1660      |
| HP (a 90%)               | 105       | $Q_S$ (bl/día)    | 342       |
| R                        | 0.517     | $P_S$ (psi)       | 580       |
| Bomba                    | Claw 9H   | $Q_{SC}$ (bl/día) | 360       |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

El pozo LGA – 018, requiere una bomba jet Claw 9-H para producir 342 bl/día con una presión de operación de 3500 psi y un caudal de inyección de 1660 bl/día. Se selección la tobera 9 que tiene un  $A_N$  de 0.0148 pg<sup>2</sup> luego de las iteraciones necesarias se tiene que la garganta necesaria es la que tiene un  $A_T$  de 0.03768 pg<sup>2</sup> correspondiente a la H. El caudal al cual inicia la cavitación es de 360 bl/día. La potencia hidráulica necesaria es de 105 HP.

### 2.4.3 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 22 (LGA-022)

En base a la información de campo obtenida, se presenta la tabla 2.23 con los datos requeridos para realizar el estudio de optimización del pozo LGA – 022, las datos que resultan del análisis del pozo, se detallan en la tabla 2.24.

**TABLA 2.23 DATOS POZO LGA – 022**

| PARÁMETRO                      | VALOR      | PARÁMETRO                           | VALOR                    |
|--------------------------------|------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Arena                          | “B.T”      | °API petróleo                       | 28.7                     |
| Profundidad Arena (D)          | 8727 pies  | Viscosidad del petróleo ( $\mu_o$ ) | 1.4359 cp                |
| Longitud T.P. (L)              | 8727 pies  | Viscosidad del agua ( $\mu_w$ )     | 0.4523 cp                |
| Diam ext T.P. ( $D_{oTP}$ )    | 3.5 pg     | Relación gas - petróleo (GOR)       | 122 pie <sup>3</sup> /bl |
| Diam. Int T.P. ( $D_{iTP}$ )   | 2.992 pg   | Fracción de agua ( $F_w$ )          | 0.088                    |
| Diam. Int T.R. ( $D_{iTR}$ )   | 6.276 pg   | Caudal de Producción ( $Q_s$ )      | 467 bl/día               |
| Presión de cabeza ( $P_{WH}$ ) | 100 psi    | Presión de succión ( $P_s$ )        | 1380 psi                 |
| Fluido Motriz                  | Petróleo   | Gradiente de agua ( $G_w$ )         | 0.44 psi/pie             |
| $G_N = G_o$                    | 0.3825     | Presión de reservorio ( $P_R$ )     | 1650 psi                 |
| Presión de Burbuja ( $P_b$ )   | 810 psi    | Salinidad (ppmCl <sup>-</sup> )     | 27500                    |
| G.E. gas                       | 1.030      | G.E. agua                           | 1.019                    |
| Temp sup                       | 100 °F     | Temp fondo                          | 180 °F                   |
| DATOS DE DISEÑO                |            |                                     |                          |
| Parámetros                     | Análisis 1 | Análisis 2                          |                          |
| Prod deseada (bl/día)          | 467        | 300                                 |                          |
| $P_s$ (psi)                    | 1380       | 800                                 |                          |
| $P_T$ (psi)                    | 3650       | 3650                                |                          |

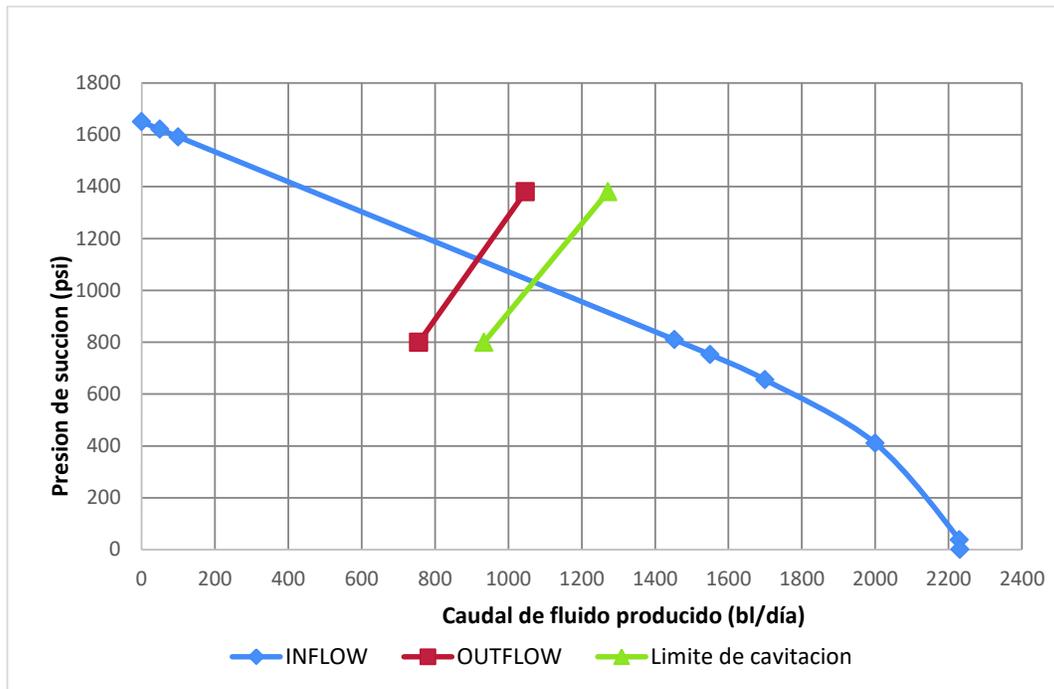
ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA 2.24 SUMARIO FINAL DE RESULTADOS POR CADA ANÁLISIS DATOS POZO LGA – 022**

| Sumario de resultados análisis 1 |              |                   |      |
|----------------------------------|--------------|-------------------|------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0212       | $P_T$ (psi)       | 3650 |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0562       | $Q_N$ (bl/día)    | 2128 |
| HP (a 90%)                       | 147          | $Q_s$ (bl/día)    | 1046 |
| R                                | 0.4          | $P_s$ (psi)       | 1380 |
| Bomba                            | NATIONAL 10A | $Q_{SC}$ (bl/día) | 1272 |
| Sumario de resultados análisis 2 |              |                   |      |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0212       | $P_T$ (psi)       | 3650 |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0562       | $Q_N$ (bl/día)    | 2236 |
| HP (a 90%)                       | 154          | $Q_s$ (bl/día)    | 756  |
| R                                | 0.4          | $P_s$ (psi)       | 800  |
| Bomba                            | NATIONAL 10A | $Q_{SC}$ (bl/día) | 933  |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Al realizar el análisis nodal del sistema, figura 2.7, se determinó un rediseño de optimización cuyos valores se presentan en la tabla 2.25.

**FIGURA 2.7 ANÁLISIS NODAL POZO LGA - 022**

Elaborado por: Becerra Freddy

**TABLA 2.25 SUMARIO FINAL DE RESULTADOS POZO LGA – 022**

| PARÁMETRO                | RESULTADO    | PARÁMETRO         | RESULTADO |
|--------------------------|--------------|-------------------|-----------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0212       | $P_T$ (psi)       | 3650      |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0562       | $Q_N$ (bl/día)    | 2181      |
| HP (a 90%)               | 151          | $Q_S$ (bl/día)    | 920       |
| R                        | 0.38         | $P_S$ (psi)       | 1100      |
| Bomba                    | National 10A | $Q_{SC}$ (bl/día) | 1090      |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

El pozo LGA – 022, requiere una bomba jet National 10 -A para producir 920 bl/día con una presión de operación de 3650 psi y un caudal de inyección de 2181 bl/día. Se selección la tobera 10 que tiene un  $A_N$  de 0.0212 pg<sup>2</sup> luego de las iteraciones necesarias se tiene que la garganta necesaria es la que tiene un  $A_T$  de 0.0562 pg<sup>2</sup> correspondiente a la 10. con una  $R=0.38$  lo cual le da la denominación de 10 – A. El caudal al cual inicia la cavitación es de 1090 bl/día. La potencia hidráulica necesaria es de 151 HP.

#### 2.4.4 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 35 (LGA-035)

En base a la información de campo obtenida, se presenta la tabla 2.26 con los datos requeridos para realizar el estudio de optimización del pozo LGA – 035, los datos que resultan del análisis del pozo, se detallan en la tabla 2.27.

**TABLA 2.26 DATOS POZO LGA – 035**

| PARÁMETRO                      | VALOR      | PARÁMETRO                           | VALOR                    |
|--------------------------------|------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Arena                          | "Hs"       | °API petróleo                       | 24                       |
| Profundidad Arena (D)          | 9678 pies  | Viscosidad del petróleo ( $\mu_o$ ) | 1.78 cp                  |
| Longitud T.P. (L)              | 9678 pies  | Viscosidad del agua ( $\mu_w$ )     | 0.31 cp                  |
| Diam ext T.P. ( $D_{OTP}$ )    | 3.5 pg     | Relación gas - petróleo (GOR)       | 220 pie <sup>3</sup> /bl |
| Diam. Int T.P. ( $D_{ITP}$ )   | 2.992 pg   | Fracción de agua ( $F_w$ )          | 0.293                    |
| Diam. Int T.R. ( $D_{ITR}$ )   | 6.276 pg   | Caudal de Producción ( $Q_s$ )      | 189 bl/día               |
| Presión de cabeza ( $P_{WH}$ ) | 50 psi     | Presión de succión ( $P_s$ )        | 989 psi                  |
| Fluido Motriz                  | Petróleo   | Gradiente de agua ( $G_w$ )         | 0.43 psi/pie             |
| $G_N = G_O$                    | 0.394      | Presión de reservorio ( $P_R$ )     | 2100psi                  |
| Presión de Burbuja ( $P_b$ )   | 579 psi    | Salinidad (ppmCl <sup>-</sup> )     | 8000                     |
| G.E. gas                       | 1.048      | G.E. agua                           | 1.005                    |
| Temp sup                       | 102 °F     | Temp fondo                          | 202 °F                   |
| DATOS DE DISEÑO                |            |                                     |                          |
| Parámetros                     | Análisis 1 | Análisis 2                          |                          |
| Prod deseada (bl/día)          | 130        | 80                                  |                          |
| $P_s$ (psi)                    | 850        | 400                                 |                          |
| $P_T$ (psi)                    | 3450       | 3450                                |                          |

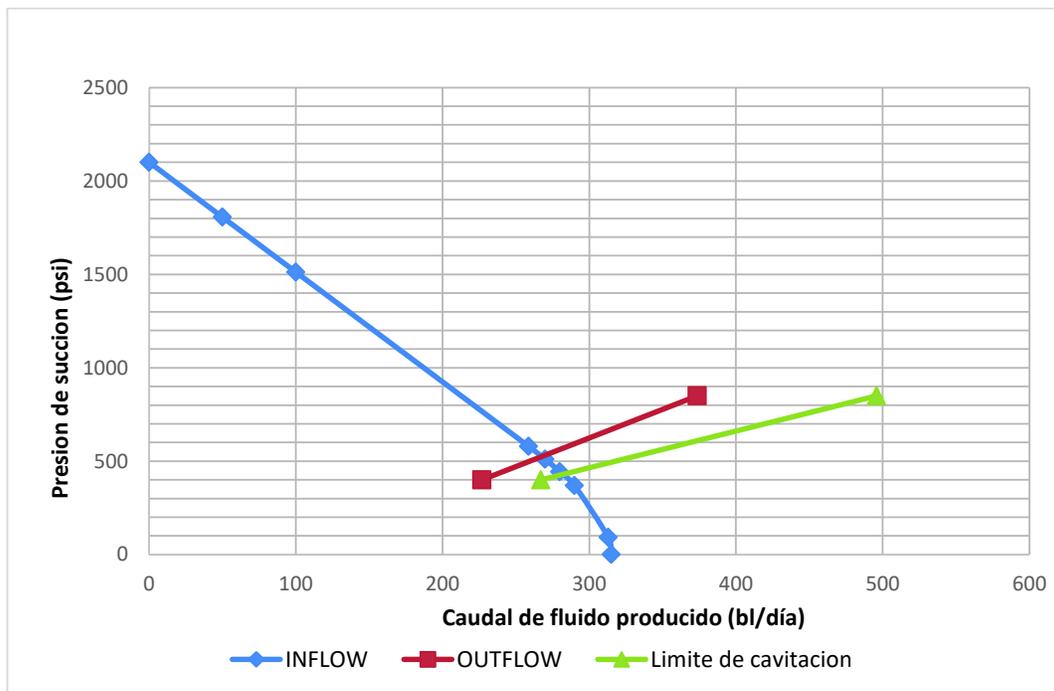
ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA 2.27 SUMARIO FINAL DE RESULTADOS POR CADA ANÁLISIS DATOS POZO LGA – 035**

| Sumario de resultados análisis 1 |         |                   |      |
|----------------------------------|---------|-------------------|------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0144  | $P_T$ (psi)       | 3450 |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0395  | $Q_N$ (bl/día)    | 1525 |
| HP (a 90%)                       | 99      | $Q_S$ (bl/día)    | 374  |
| R                                | 0.4     | $P_s$ (psi)       | 850  |
| Bomba                            | KOBE 8A | $Q_{SC}$ (bl/día) | 496  |
| Sumario de resultados análisis 2 |         |                   |      |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0144  | $P_T$ (psi)       | 3450 |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0395  | $Q_N$ (bl/día)    | 1578 |
| HP (a 90%)                       | 103     | $Q_S$ (bl/día)    | 227  |
| R                                | 0.4     | $P_s$ (psi)       | 400  |
| Bomba                            | KOBE 8A | $Q_{SC}$ (bl/día) | 267  |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Al realizar el análisis nodal del sistema, figura 2.8, se determinó un rediseño de optimización cuyos valores se presentan en la tabla 2.28.

**FIGURA 2.8 ANÁLISIS NODAL POZO LGA - 035**

Elaborado por: Becerra Freddy

**TABLA 2.28 SUMARIO FINAL DE RESULTADOS POZO LGA – 035**

| PARÁMETRO                | RESULTADO  | PARÁMETRO         | RESULTADO |
|--------------------------|------------|-------------------|-----------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0144     | $P_T$ (psi)       | 3450      |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0395     | $Q_N$ (bl/día)    | 1564      |
| HP (a 90%)               | 101        | $Q_S$ (bl/día)    | 268       |
| R                        | 0.4        | $P_S$ (psi)       | 520       |
| Bomba                    | KOBE 8 - A | $Q_{SC}$ (bl/día) | 282       |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

El pozo LGA – 035, requiere una bomba jet Kobe 8 - A para producir 268 bl/día con una presión de operación de 3450 psi y un caudal de inyección de 1564 bl/día. Se seleccionó la tobera 8 que tiene un  $A_N$  de 0.0144 pg<sup>2</sup> luego de las iteraciones necesarias se tiene que la garganta necesaria es la que tiene un  $A_T$  de 0.0395 pg<sup>2</sup> correspondiente a la 8, con una  $R=0.4$  lo cual le da la denominación de 8 – A. El caudal al cual inicia la cavitación es de 282 bl/día. La potencia hidráulica necesaria es de 101 HP.

## 2.4.5 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 38 (LGA-038)

En base a la información de campo obtenida, se presenta la tabla 2.29 con los datos requeridos para realizar el estudio de optimización del pozo LGA – 038, las datos que resultan del análisis del pozo, se detallan en la tabla 2.30.

**TABLA 2.29 DATOS POZO LGA – 038**

| PARÁMETRO                      | VALOR      | PARÁMETRO                           | VALOR                    |
|--------------------------------|------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Arena                          | “Us + Ui”  | °API petróleo                       | 28.6                     |
| Profundidad Arena (D)          | 9503 pies  | Viscosidad del petróleo ( $\mu_o$ ) | 1.43 cp                  |
| Longitud T.P. (L)              | 9503 pies  | Viscosidad del agua ( $\mu_w$ )     | 0.45 cp                  |
| Diam ext T.P. ( $D_{oTP}$ )    | 3.5 pg     | Relación gas - petróleo (GOR)       | 148 pie <sup>3</sup> /bl |
| Diam. Int T.P. ( $D_{iTP}$ )   | 2.992 pg   | Fracción de agua ( $F_w$ )          | 0.096                    |
| Diam. Int T.R. ( $D_{iTR}$ )   | 6.276 pg   | Caudal de Producción ( $Q_s$ )      | 287 bl/día               |
| Presión de cabeza ( $P_{WH}$ ) | 100 psi    | Presión de succión ( $P_s$ )        | 1059 psi                 |
| Fluido Motriz                  | Petróleo   | Gradiente de agua ( $G_w$ )         | 0.43 psi/pie             |
| $G_N = G_o$                    | 0.3827     | Presión de reservorio ( $P_R$ )     | 1229psi                  |
| Presión de Burbuja ( $P_b$ )   | 800 psi    | Salinidad (ppmCl <sup>-</sup> )     | 15000                    |
| G.E. gas                       | 0.97       | G.E. agua                           | 1.01                     |
| Temp sup (°F)                  | 100 °F     | Temp fondo (°F)                     | 220 °F                   |
| DATOS DE DISEÑO                |            |                                     |                          |
| Parámetros                     | Análisis 1 | Análisis 2                          |                          |
| Prod deseada (bl/día)          | 287        | 250                                 |                          |
| $P_s$ (psi)                    | 1059       | 800                                 |                          |
| $P_T$ (psi)                    | 3500       | 3500                                |                          |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

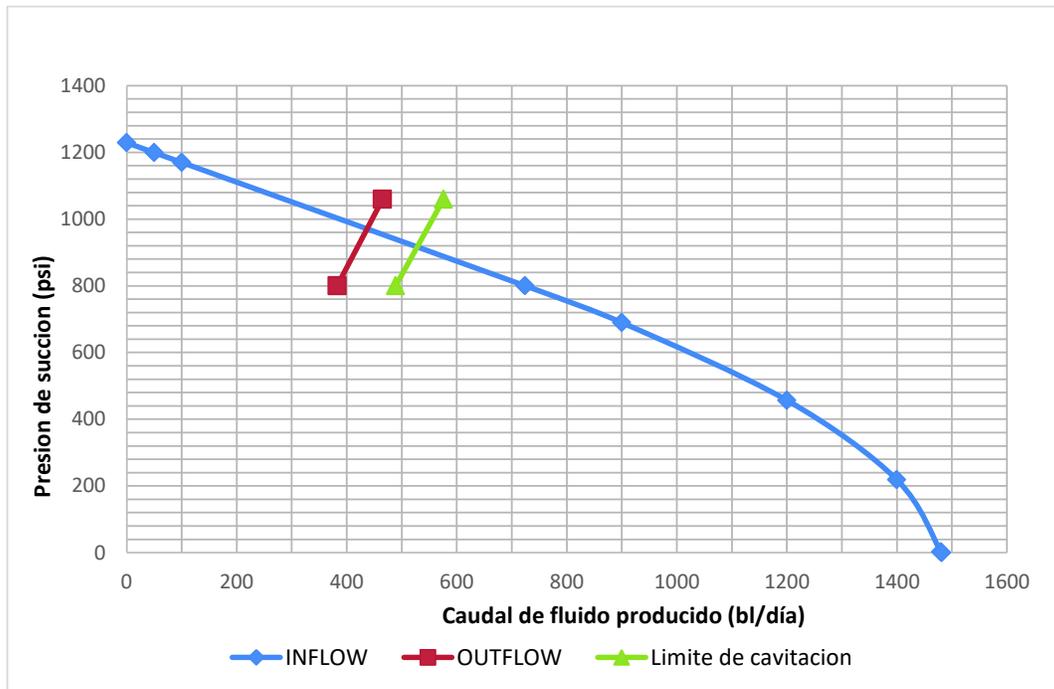
**TABLA 2.30 SUMARIO FINAL DE RESULTADOS POR CADA ANÁLISIS DATOS POZO LGA – 038**

| Sumario de resultados análisis 1 |         |                   |      |
|----------------------------------|---------|-------------------|------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0122  | $P_T$ (psi)       | 3500 |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0311  | $Q_N$ (bl/día)    | 1277 |
| HP (a 90%)                       | 84      | $Q_S$ (bl/día)    | 465  |
| R                                | 0.517   | $P_s$ (psi)       | 1059 |
| Bomba                            | CLAW 8G | $Q_{SC}$ (bl/día) | 576  |
| Sumario de resultados análisis 2 |         |                   |      |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0122  | $P_T$ (psi)       | 3500 |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0311  | $Q_N$ (bl/día)    | 1304 |
| HP (a 90%)                       | 86      | $Q_S$ (bl/día)    | 383  |
| R                                | 0.517   | $P_s$ (psi)       | 800  |
| Bomba                            | CLAW 8G | $Q_{SC}$ (bl/día) | 489  |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Al realizar el análisis nodal del sistema, figura 2.9, se determinó un rediseño de optimización cuyos valores se presentan en la tabla 2.25.

FIGURA 2.9 ANÁLISIS NODAL POZO LGA - 038



Elaborado por: Becerra Freddy

TABLA 2.31 SUMARIO FINAL DE RESULTADOS POZO LGA – 038

| PARÁMETRO                | RESULTADO  | PARÁMETRO         | RESULTADO |
|--------------------------|------------|-------------------|-----------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0122     | $P_T$ (psi)       | 3500      |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0311     | $Q_N$ (bl/día)    | 1289      |
| HP (a 90%)               | 85         | $Q_S$ (bl/día)    | 440       |
| R                        | 0.517      | $P_S$ (psi)       | 962       |
| Bomba                    | CLAW 8 - G | $Q_{SC}$ (bl/día) | 530       |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

El pozo LGA – 038, requiere una bomba jet Claw 8 - G para producir 440 bl/día con una presión de operación de 3500 psi y un caudal de inyección de 1289 bl/día. Se selección la tobera 8 que tiene un  $A_N$  de 0.0122 pg<sup>2</sup> luego de las iteraciones necesarias se tiene que la garganta necesaria es la que tiene un  $A_T$  de 0.0311 pg<sup>2</sup> correspondiente a la G, con una  $R=0.517$  lo cual le da la denominación de 8 – G. El caudal al cual inicia la cavitación es de 530 bl/día. La potencia hidráulica necesaria es de 85 HP.

## 2.4.6 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 39 (LGAJ-039)

En base a la información de campo obtenida, se presenta la tabla 2.32 con los datos requeridos para realizar el estudio de optimización del pozo LGA – 039, los datos que resultan del análisis del pozo, se detallan en la tabla 2.33.

**TABLA 2.32 DATOS POZO LGAJ – 039**

| PARÁMETRO                      | VALOR      | PARÁMETRO                           | VALOR                    |
|--------------------------------|------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Arena                          | "Hs"       | °API petróleo                       | 28.7                     |
| Profundidad Arena (D)          | 9458 pies  | Viscosidad del petróleo ( $\mu_o$ ) | 1.56 cp                  |
| Longitud T.P. (L)              | 9458 pies  | Viscosidad del agua ( $\mu_w$ )     | 0.31 cp                  |
| Diam ext T.P. ( $D_{oTP}$ )    | 3.5 pg     | Relación gas - petróleo (GOR)       | 230 pie <sup>3</sup> /bl |
| Diam. Int T.P. ( $D_{iTP}$ )   | 2.992 pg   | Fracción de agua ( $F_w$ )          | 0.173                    |
| Diam. Int T.R. ( $D_{iTR}$ )   | 6.276 pg   | Caudal de Producción ( $Q_s$ )      | 732 bl/día               |
| Presión de cabeza ( $P_{WH}$ ) | 60 psi     | Presión de succión ( $P_s$ )        | 1069.8 psi               |
| Fluido Motriz                  | Petróleo   | Gradiente de agua ( $G_w$ )         | 0.436 psi/pie            |
| $G_N = G_o$                    | 0.382      | Presión de reservorio ( $P_R$ )     | 3445.6 psi               |
| Presión de Burbuja ( $P_b$ )   | 725 psi    | Salinidad (ppmCl <sup>-</sup> )     | 7850                     |
| G.E. gas                       | 1.253      | G.E. agua                           | 1.0054                   |
| Temp sup                       | 98 °F      | Temp fondo                          | 203 °F                   |
| DATOS DE DISEÑO                |            |                                     |                          |
| Parámetros                     | Análisis 1 | Análisis 2                          |                          |
| Prod deseada (bl/día)          | 732        | 500                                 |                          |
| $P_s$ (psi)                    | 1070       | 800                                 |                          |
| $P_T$ (psi)                    | 3580       | 3580                                |                          |

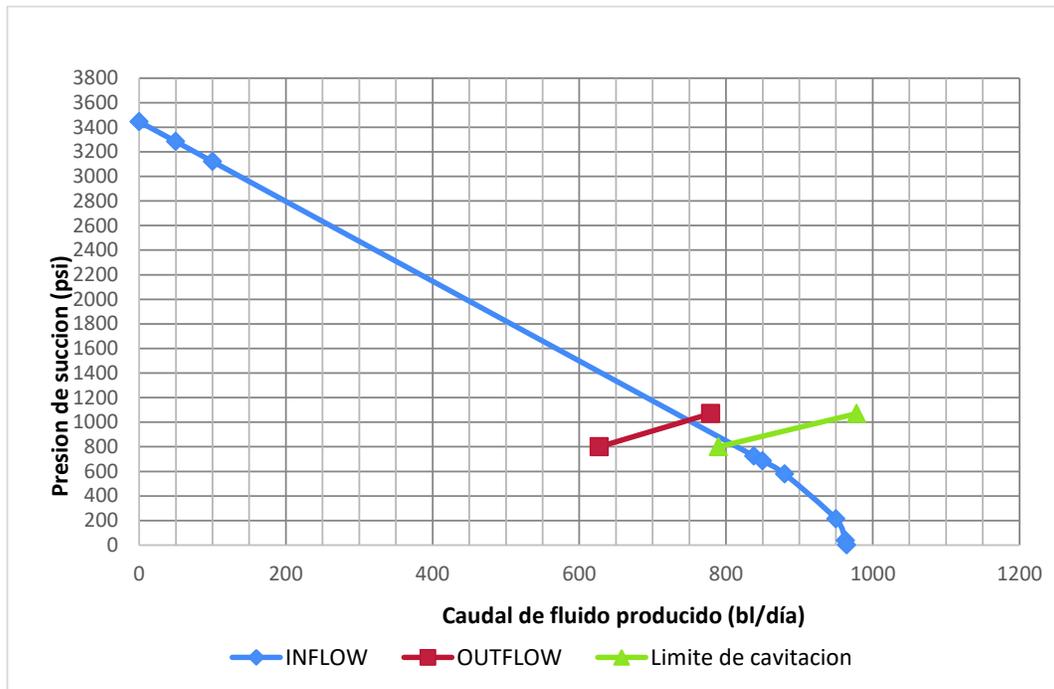
ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA 2.33 SUMARIO FINAL DE RESULTADOS POR CADA ANÁLISIS DATOS POZO LGAJ – 039**

| Sumario de resultados análisis 1 |               |                   |        |
|----------------------------------|---------------|-------------------|--------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0212        | $P_T$ (psi)       | 3580   |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0562        | $Q_N$ (bl/día)    | 2224   |
| HP (a 90%)                       | 150           | $Q_S$ (bl/día)    | 779    |
| R                                | 0.38          | $P_s$ (psi)       | 1069.8 |
| Bomba                            | NATIONAL 10 A | $Q_{SC}$ (bl/día) | 978    |
| Sumario de resultados análisis 2 |               |                   |        |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0212        | $P_T$ (psi)       | 3580   |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0562        | $Q_N$ (bl/día)    | 2272   |
| HP (a 90%)                       | 154           | $Q_S$ (bl/día)    | 627    |
| R                                | 0.38          | $P_s$ (psi)       | 800    |
| Bomba                            | NATIONAL 10 A | $Q_{SC}$ (bl/día) | 790    |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Al realizar el análisis nodal del sistema, figura 2.10. se determinó un rediseño de optimización cuyos valores se presentan en la tabla 2.34.

**FIGURA 2.10 ANÁLISIS NODAL POZO LGAJ - 039**

Elaborado por: Becerra Freddy

**TABLA 2.34 SUMARIO FINAL DE RESULTADOS POZO LGAJ – 039**

| PARÁMETRO                | RESULTADO     | PARÁMETRO         | RESULTADO |
|--------------------------|---------------|-------------------|-----------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0212        | $P_T$ (psi)       | 3580      |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0562        | $Q_N$ (bl/día)    | 2237      |
| HP (a 90%)               | 152           | $Q_S$ (bl/día)    | 748       |
| R                        | 0.38          | $P_S$ (psi)       | 1000      |
| Bomba                    | NATIONAL 10-A | $Q_{SC}$ (bl/día) | 810       |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

El pozo LGA – 038, requiere una bomba jet National 10 – A para producir 748 bl/día con una presión de operación de 3580 psi y un caudal de inyección de 2237 bl/día. Se selección la tobera 10 que tiene un  $A_N$  de 0.0212 pg<sup>2</sup> luego de las iteraciones necesarias se tiene que la garganta necesaria es la que tiene un  $A_T$  de 0.0562 pg<sup>2</sup> correspondiente a la numero 10. con una  $R=0.38$  lo cual le la denominación de 10 – A. El caudal al cual inicia la cavitación es de 810 bl/día. La potencia hidráulica necesaria es de 152 HP.

### 2.4.7 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 43 (LGAI – 43)

En base a la información de campo obtenida, se presenta la tabla 2.35 con los datos requeridos para realizar el estudio de optimización del pozo LGAI – 043, los datos que resultan del análisis del pozo, se detallan en la tabla 2.36.

**TABLA 2.35 DATOS POZO LGAI – 043**

| PARÁMETRO                      | VALOR      | PARÁMETRO                           | VALOR                    |
|--------------------------------|------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Arena                          | "Hs"       | °API petróleo                       | 28.6                     |
| Profundidad Arena (D)          | 9500 pies  | Viscosidad del petróleo ( $\mu_o$ ) | 3.84 cp                  |
| Longitud T.P. (L)              | 9500 pies  | Viscosidad del agua ( $\mu_w$ )     | 0.43cp                   |
| Diam ext T.P. ( $D_{OTP}$ )    | 3.5 pg     | Relación gas - petróleo (GOR)       | 546 pie <sup>3</sup> /bl |
| Diam. Int T.P. ( $D_{ITP}$ )   | 2.992 pg   | Fracción de agua ( $F_w$ )          | 0.358                    |
| Diam. Int T.R. ( $D_{ITR}$ )   | 6.276 pg   | Caudal de Producción ( $Q_s$ )      | 238 bl/día               |
| Presión de cabeza ( $P_{WH}$ ) | 65 psi     | Presión de succión ( $P_s$ )        | 1157 psi                 |
| Fluido Motriz                  | Petróleo   | Gradiente de agua ( $G_w$ )         | 0.44psi/pie              |
| $G_N = G_O$                    | 0.383      | Presión de reservorio ( $P_R$ )     | 3349 psi                 |
| Presión de Burbuja ( $P_b$ )   | 750 psi    | Salinidad (ppmCl <sup>-</sup> )     | 7500                     |
| G.E. gas                       | 1.005      | G.E. agua                           | 1.005                    |
| Temp sup                       | 102 °F     | Temp fondo                          | 150 °F                   |
| DATOS DE DISEÑO                |            |                                     |                          |
| Parámetros                     | Análisis 1 | Análisis 2                          |                          |
| Prod deseada (bl/día)          | 200        | 150                                 |                          |
| $P_s$ (psi)                    | 900        | 700                                 |                          |
| $P_T$ (psi)                    | 3700       | 3700                                |                          |

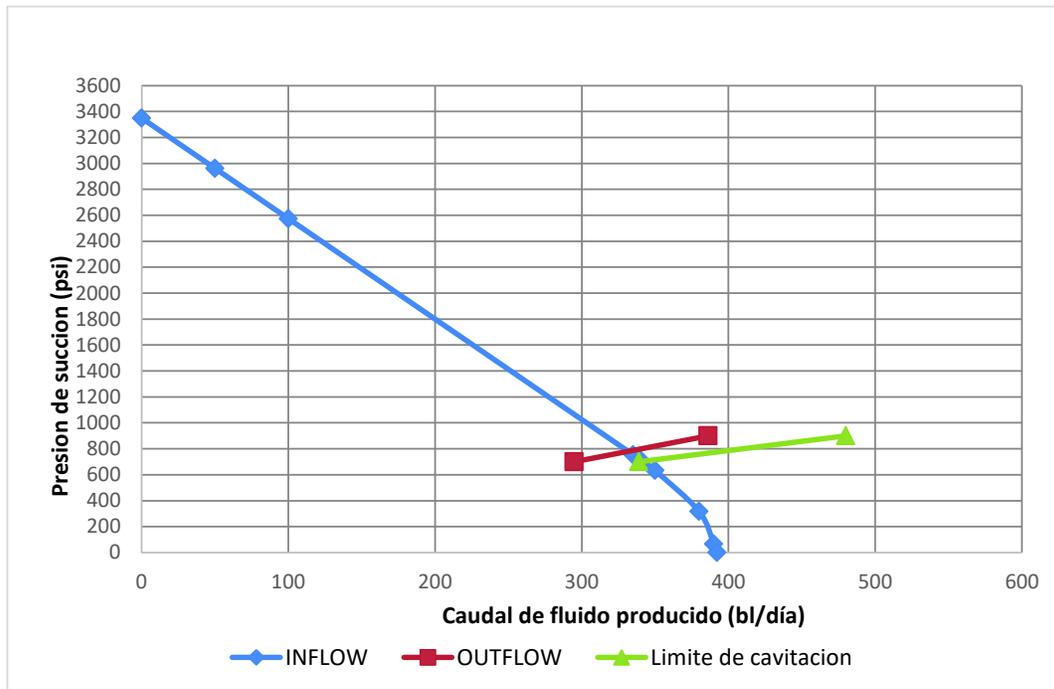
ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA 2.36 SUMARIO FINAL DE RESULTADOS POR CADA ANÁLISIS DATOS POZO LGAI – 043**

| Sumario de resultados análisis 1 |              |                   |      |
|----------------------------------|--------------|-------------------|------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0167       | $P_T$ (psi)       | 3700 |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0441       | $Q_N$ (bl/día)    | 1796 |
| HP (a 90%)                       | 126          | $Q_S$ (bl/día)    | 286  |
| R                                | 0.38         | $P_s$ (psi)       | 900  |
| Bomba                            | NATIONAL 9 A | $Q_{SC}$ (bl/día) | 480  |
| Sumario de resultados análisis 2 |              |                   |      |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0167       | $P_T$ (psi)       | 3700 |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0441       | $Q_N$ (bl/día)    | 1824 |
| HP (a 90%)                       | 127          | $Q_S$ (bl/día)    | 295  |
| R                                | 0.38         | $P_s$ (psi)       | 700  |
| Bomba                            | NATIONAL 9 A | $Q_{SC}$ (bl/día) | 339  |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Al realizar el análisis nodal del sistema, figura 2.11, se determinó un rediseño de optimización cuyos valores se presentan en la tabla 2.37.

**FIGURA 2.11 ANÁLISIS NODAL POZO LGAI - 043**

Elaborado por: Becerra Freddy

**TABLA 2.37 SUMARIO FINAL DE RESULTADOS POZO LGAI – 043**

| PARÁMETRO        | RESULTADO    | PARÁMETRO         | RESULTADO |
|------------------|--------------|-------------------|-----------|
| $A_N$ ( $pg^2$ ) | 0.0167       | $P_T$ (psi)       | 3700      |
| $A_T$ ( $pg^2$ ) | 0.0441       | $Q_N$ (bl/día)    | 1811      |
| HP (a 90%)       | 127          | $Q_S$ (bl/día)    | 332       |
| R                | 0.38         | $P_S$ (psi)       | 790       |
| Bomba            | NATIONAL 9 A | $Q_{SC}$ (bl/día) | 355       |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

El pozo LGAI – 043, requiere una bomba jet National 9 – A para producir 748 bl/día con una presión de operación de 3700 psi y un caudal de inyección de 1811 bl/día. Se seleccionó la tobera 9 que tiene un  $A_N$  de  $0.0167 \text{ pg}^2$  luego de las iteraciones necesarias se tiene que la garganta necesaria es la que tiene un  $A_T$  de  $0.0441 \text{ pg}^2$  correspondiente a la número 9, con una  $R=0.38$  lo cual le da la denominación de 9 – A. El caudal al cual inicia la cavitación es de 355 bl/día. La potencia hidráulica necesaria es de 127 HP.

## 2.4.8 ESTUDIO POZO LAGO AGRIO 44 (LGAG – 44)

En base a la información de campo obtenida, se presenta la tabla 2.38 con los datos requeridos para realizar el estudio de optimización del pozo LGAG – 044, las datos que resultan del análisis del pozo, se detallan en la tabla 2.39.

**TABLA 2.38 DATOS POZO LGAG – 044**

| PARÁMETRO                      | VALOR      | PARÁMETRO                           | VALOR                    |
|--------------------------------|------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Arena                          | "Hs"       | °API petróleo                       | 28.6                     |
| Profundidad Arena (D)          | 9620 pies  | Viscosidad del petróleo ( $\mu_o$ ) | 2.98 cp                  |
| Longitud T.P. (L)              | 9620 pies  | Viscosidad del agua ( $\mu_w$ )     | 0.43cp                   |
| Diam ext T.P. ( $D_{oTP}$ )    | 3.5 pg     | Relación gas - petróleo (GOR)       | 600 pie <sup>3</sup> /bl |
| Diam. Int T.P. ( $D_{ITP}$ )   | 2.992 pg   | Fracción de agua ( $F_w$ )          | 0.327                    |
| Diam. Int T.R. ( $D_{ITR}$ )   | 6.276 pg   | Caudal de Producción ( $Q_s$ )      | 120 bl/día               |
| Presión de cabeza ( $P_{WH}$ ) | 65 psi     | Presión de succión ( $P_s$ )        | 550 psi                  |
| Fluido Motriz                  | Petróleo   | Gradiente de agua ( $G_w$ )         | 0.44psi/pie              |
| $G_N = G_o$                    | 0.383      | Presión de reservorio ( $P_R$ )     | 3120 psi                 |
| Presión de Burbuja ( $P_b$ )   | 750 psi    | Salinidad (ppmCl <sup>-</sup> )     | 7580                     |
| G.E. gas                       | 1.01       | G.E. agua                           | 1.005                    |
| Temp sup                       | 100 °F     | Temp fondo                          | 220 °F                   |
| DATOS DE DISEÑO                |            |                                     |                          |
| Parámetros                     | Análisis 1 | Análisis 2                          |                          |
| Prod deseada (bl/día)          | 120        | 50                                  |                          |
| $P_s$ (psi)                    | 550        | 200                                 |                          |
| $P_T$ (psi)                    | 3650       | 3650                                |                          |

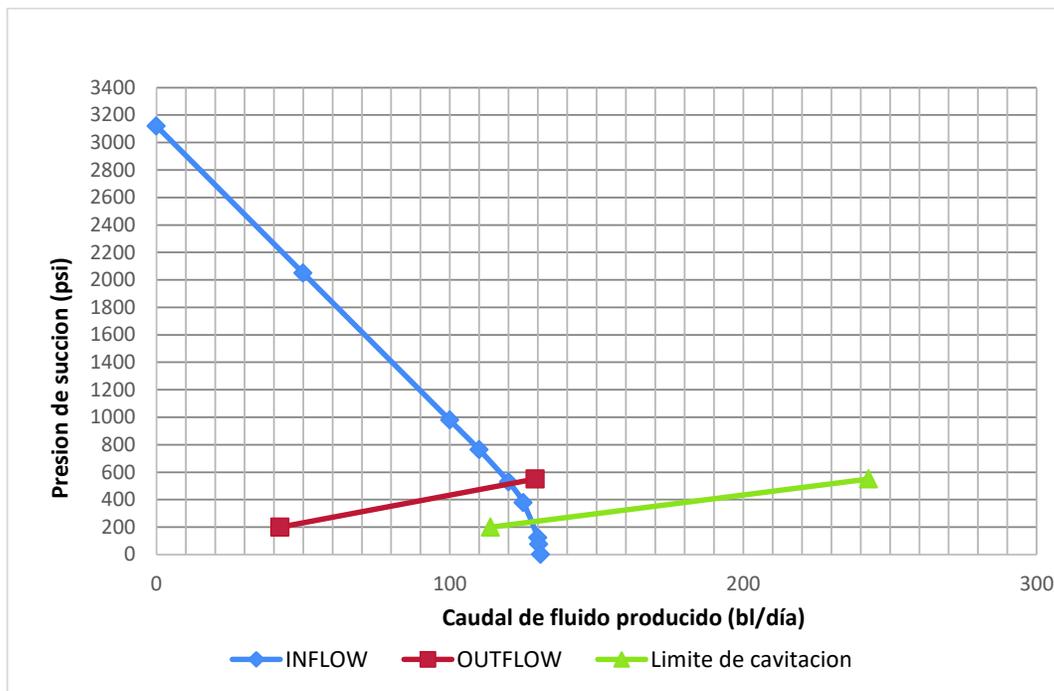
ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA 2.39 SUMARIO FINAL DE RESULTADOS POR CADA ANÁLISIS DATOS POZO LGAJ – 044**

| Sumario de resultados análisis 1 |          |                   |      |
|----------------------------------|----------|-------------------|------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0111   | $P_T$ (psi)       | 3650 |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0278   | $Q_N$ (bl/día)    | 1128 |
| HP (a 90%)                       | 85       | $Q_S$ (bl/día)    | 129  |
| R                                | 0.4      | $P_s$ (psi)       | 550  |
| Bomba                            | KOBE 7 A | $Q_{SC}$ (bl/día) | 243  |
| Sumario de resultados análisis 2 |          |                   |      |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0111   | $P_T$ (psi)       | 3650 |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )         | 0.0278   | $Q_N$ (bl/día)    | 1159 |
| HP (a 90%)                       | 87       | $Q_S$ (bl/día)    | 42   |
| R                                | 0.4      | $P_s$ (psi)       | 200  |
| Bomba                            | KOBE 7 A | $Q_{SC}$ (bl/día) | 114  |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Al realizar el análisis nodal del sistema, figura 2.12, se determinó un rediseño de optimización cuyos valores se presentan en la tabla 2.40.

**FIGURA 2.12 ANÁLISIS NODAL POZO LGAJ – 044**

Elaborado por: Becerra Freddy

**TABLA 2.41 SUMARIO FINAL DE RESULTADOS POZO LGAJ – 044**

| PARÁMETRO                | RESULTADO | PARÁMETRO         | RESULTADO |
|--------------------------|-----------|-------------------|-----------|
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0111    | $P_T$ (psi)       | 3650      |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0278    | $Q_N$ (bl/día)    | 1120      |
| HP (a 90%)               | 87        | $Q_S$ (bl/día)    | 120       |
| R                        | 0.4       | $P_S$ (psi)       | 550       |
| Bomba                    | KOBE 7 A  | $Q_{SC}$ (bl/día) | 129       |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

El pozo LGAJ – 044, requiere una bomba jet Kobe 7 – A para producir 120 bl/día con una presión de operación de 3650 psi y un caudal de inyección de 1120 bl/día. Se seleccionó la tobera 7 que tiene un  $A_N$  de 0.0278 pg<sup>2</sup> luego de las iteraciones necesarias se tiene que la garganta necesaria es la que tiene un  $A_T$  de 0.0278 pg<sup>2</sup> correspondiente a la número 7, con una  $R=0.4$  lo cual le da la denominación de 7 – A. El caudal al cual inicia la cavitación es de 129 bl/día. La potencia hidráulica necesaria es de 87 HP.

En la tabla 2.42, se presenta un resumen de los estudios realizados con el método de Smart a los pozos seleccionados para la aplicación de este método.

**TABLA 2.42 RESUMEN DE RESULTADOS – MÉTODO DE PETRIE.**

| <b>POZO</b>              | <b>LGAB – 009</b> | <b>LGA – 018</b> | <b>LGA – 022</b> | <b>LGA – 035</b> | <b>LGA – 038</b> | <b>LGAJ – 039</b> | <b>LGAI – 043</b> | <b>LGAJ – 044</b> |
|--------------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Fabricante</b>        | <b>KOBE</b>       | <b>CLAW</b>      | <b>NATIONAL</b>  | <b>KOBE</b>      | <b>CLAW</b>      | <b>NATIONAL</b>   | <b>NATIONAL</b>   | <b>KOBE</b>       |
| <b>Bomba</b>             | 8-A               | 9-H              | 10-A             | 8-A              | 8-G              | 10-A              | 9-A               | 7-A               |
| $A_n$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0144            | 0.0148           | 0.0212           | 0.0144           | 0.0122           | 0.0212            | 0.0167            | 0.0111            |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> ) | 0.0395            | 0.0376           | 0.0562           | 0.0395           | 0.0311           | 0.0562            | 0.0441            | 0.0278            |
| <b>R</b>                 | 0.4               | 0.517            | 0.38             | 0.4              | 0.517            | 0.38              | 0.38              | 0.4               |
| $P_T$ (psi)              | 3450              | 3500             | 3650             | 3450             | 3500             | 3580              | 3700              | 3650              |
| $Q_N$ (bl/día)           | 1544              | 1660             | 2181             | 1564             | 1289             | 2237              | 1811              | 1120              |
| $Q_S$ (bl/día)           | 182               | 342              | 920              | 268              | 440              | 748               | 332               | 120               |
| $P_S$ (psi)              | 690               | 580              | 1100             | 520              | 962              | 1000              | 790               | 550               |
| $Q_{sc}$ (bl/día)        | 197               | 360              | 1090             | 282              | 530              | 810               | 355               | 129               |
| <b>HP</b>                | 102               | 105              | 151              | 101              | 85               | 152               | 127               | 87                |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 ANÁLISIS TÉCNICO

Es fundamental para el presente trabajo realizar un análisis desde el punto de vista técnico de los pozos que operan con sistema de bombeo hidráulico en el campo Lago Agrio, que nos permita comparar la situación de producción actual y un escenario de mejora, en caso de ser así, para de esta manera determinar la mejor alternativa de producción del sistema.

##### 3.1.1 ANÁLISIS TÉCNICO DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE E. SMART

En la tabla 3.1, se observa la producción esperada con la determinación de geometría óptima para bomba jet mediante la aplicación del método de Smart de cada pozo analizado.

**TABLA 3.1 SITUACIÓN ACTUAL VS. IMPLEMENTACIÓN DE BHJ EN POZOS ANALIZADOS MÉTODO DE SMART**

| POZO      | Producción de fluidos (bl/día) |              | Petróleo producido (bl/día) |              |            | Fluido Motriz Requerido (bl/día) |
|-----------|--------------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|------------|----------------------------------|
|           | Actual                         | Optimización | Actual                      | Optimización | $\Delta Q$ |                                  |
| LGA – 012 | 0                              | 500          | 0                           | 480.0        | 480.0      | 1173.21                          |
| LGA – 032 | 0                              | 200          | 0                           | 124.8        | 124.8      | 642.20                           |
| LGAF - 48 | 0                              | 450          | 0                           | 157.5        | 157.5      | 1947.00                          |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

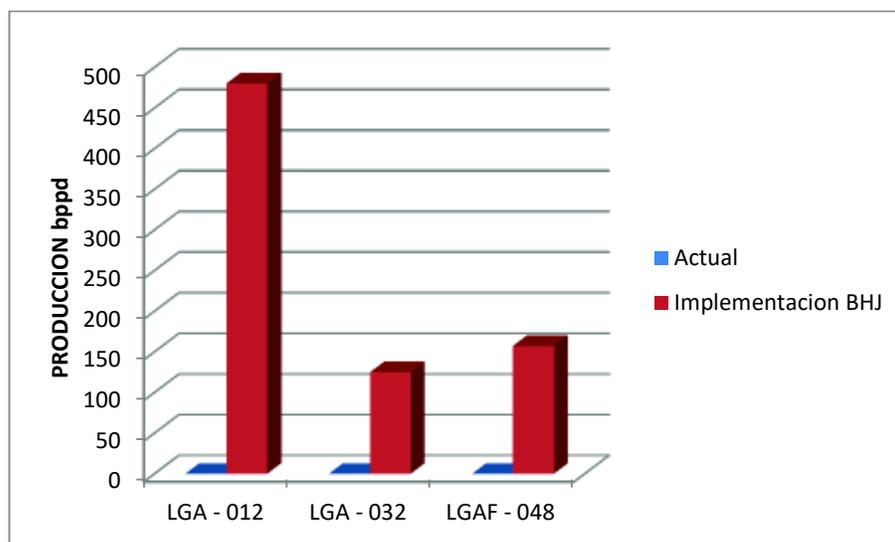
Se observa que la producción actual de los pozos analizados es cero, esto es debido a que para el análisis se consideraron pozos con completación

hidráulica que se encuentran cerrados o en espera de W.O., ahorrando en costos de operación para puesta en producción ya que se tiene B.H.A. de producción hidráulica.

En la figura 3.1 se muestra la cantidad de petróleo producido por día por cada pozo que se tendría al implementar la propuesta de estudio. Se puede apreciar que el aumento de producción al implementar B.H.J. es bastante atractivo, esto es debido a los bajos cortes de agua que se presentan, a diferencia del pozo LGAF-048 donde si bien el caudal de fluido producido es de 450. se tiene un caudal de petróleo producido de 157.5 debido al alto %BSW.

Esto expresado en ingresos económicos es un aporte significativo como se verá más adelante.

**FIGURA 3.1 PETRÓLEO PRODUCCIÓN POR POZO – MÉTODO DE SMART**

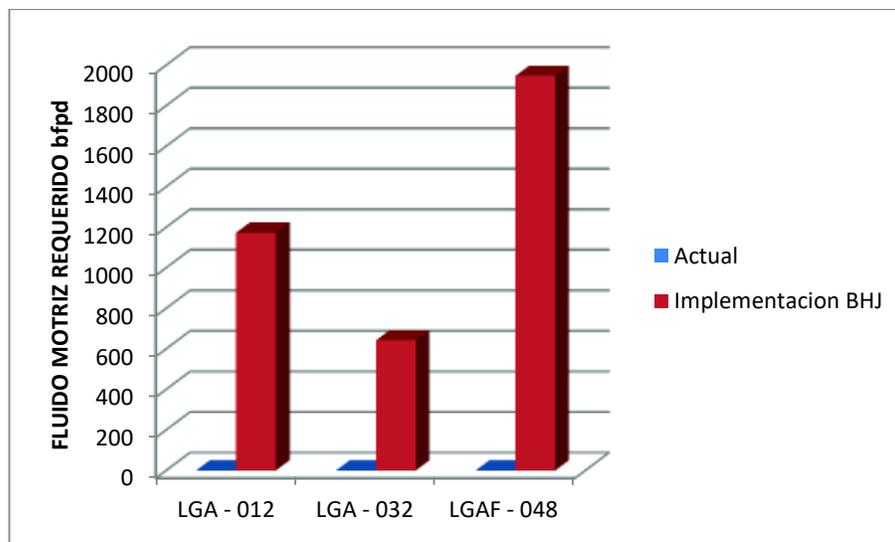


Elaborado por: Becerra Freddy

La figura 3.2 nos muestra la cantidad de barriles por día que se determinó en el estudio, que se necesita inyectar para producir cada pozo a la tasa de producción propuesta, mediante la determinación de la geometría óptima para las condiciones expresadas.

Como se dijo anteriormente, los pozos analizados no se encuentran en producción, por lo que los valores de fluido motriz actual son cero; pero cuentan con completamientos hidráulicos, por lo que la implementación del sistema B.H.J, sería bastante económico, objetivo del presente proyecto.

**FIGURA 3.2 FLUIDO MOTRIZ INYECTADO POR POZO – MÉTODO DE SMART**



Elaborado por: Becerra Freddy

La producción de petróleo por día que se obtendría con la aplicación del método de Smart, para determinar la geometría óptima de funcionamiento de los pozos analizados es de 762.3 bppd, con un requerimiento de 3762.41 bl/día de fluido motriz.

### 3.1.2 ANÁLISIS TÉCNICO DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE HAL PETRIE

En el capítulo anterior, se aplicaron los algoritmos matemáticos planteados por Petrie, a pozos que se encuentran operando mediante el sistema de bombeo hidráulico tipo Jet, estudiando a fondo sus características y variando sus parámetros de operación, especialmente el caudal de inyección para optimizar su producción.

En este análisis se realizó también el análisis nodal al sistema en donde se determinó que los pozos LGAJ-039 y LGAG-044, se encuentran operando adecuadamente con las condiciones actuales de operación, por lo cual se excluyen del análisis técnico y económico. Los pozos restantes presentan una mejora significativa en su caudal de producción.

Para realizar el análisis correspondiente, en la tabla 3.2. se detalla la producción de fluido total, la producción de petróleo y el fluido motriz requerido de las condiciones actuales de operación comparadas con las propuestas en el rediseño de los pozos analizados.

**TABLA 3.2 SITUACIÓN ACTUAL VS. REDISEÑO DE BHJ EN POZOS ANALIZADOS MÉTODOS DE PETRIE**

| POZO       | Producción total |          | Petróleo producido |          |            |      | Fluido Motriz |          |            |      |
|------------|------------------|----------|--------------------|----------|------------|------|---------------|----------|------------|------|
|            | (bl/día)         |          | (bl/día)           |          |            |      | (bl/día)      |          |            |      |
|            | Actual           | Rediseño | Actual             | Rediseño | $\Delta Q$ | %    | Actual        | Rediseño | $\Delta Q$ | %    |
| LGA-09A    | 142              | 182      | 119.71             | 153.43   | 33.72      | 28.2 | 1510          | 1544     | 34         | 2.3  |
| LGA - 018  | 292              | 342      | 29.49              | 34.54    | 5.05       | 17.1 | 1590          | 1660     | 70         | 4.4  |
| LGA - 022  | 467              | 920      | 425.90             | 839.04   | 413.14     | 97.0 | 2050          | 2367     | 317        | 15.5 |
| LGA - 035  | 189              | 268      | 133.62             | 189.48   | 55.85      | 41.8 | 1230          | 1564     | 334        | 27.2 |
| LGA - 038  | 287              | 440      | 259.45             | 397.76   | 138.31     | 53.3 | 1090          | 1289     | 199        | 18.3 |
| LGAI - 043 | 238              | 332      | 152.80             | 213.14   | 60.35      | 39.5 | 1600          | 1811     | 211        | 13.2 |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

Los pozos objeto del presente estudio, se encuentran produciendo actualmente 1615 bl/día con las condiciones actuales de operación, tomando solo en cuenta el volumen de petróleo producido, se tiene una producción diaria de 1120.97 bl/día; esta producción con una demanda de fluido motriz de 9070 bl/día.

En base al estudio realizado, la propuesta de rediseño para la optimización del sistema de levantamiento artificial por bombeo hidráulico en los pozos escogidos para el análisis mediante el método de Petrie, permitirá aumentar la producción a 2484 bl/día, con un caudal de petróleo producido de 1827.39 bl/día, equivalente a un incremento de 706.42 bl/día de petróleo, un 63% más de producción; para lograr esta producción se debe incrementar el caudal de

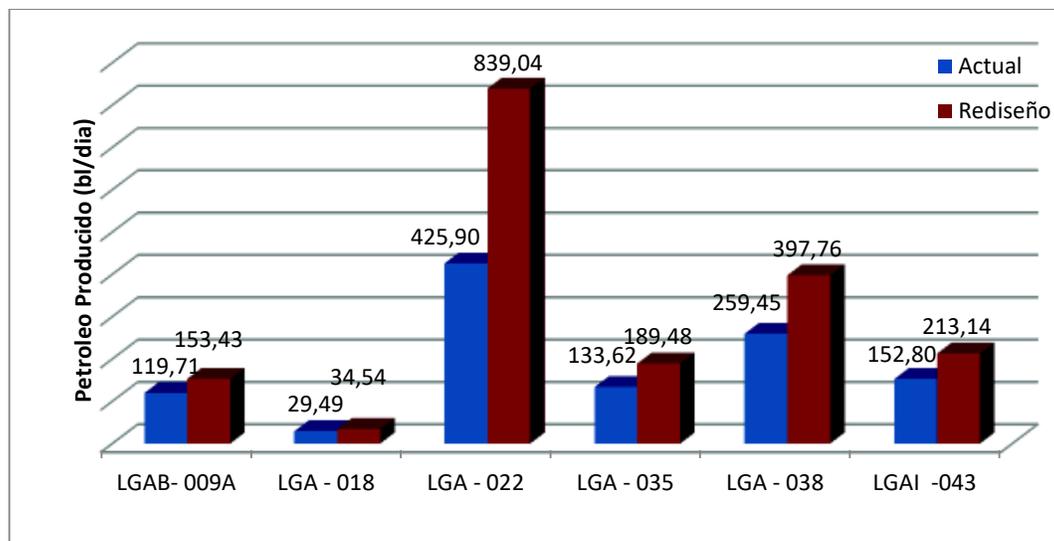
inyección en una tasa de 1165 bl/día, equivalentes a un aumento del 12.8% de barriles adicionales de fluido motriz necesarios.

Como se dijo anteriormente, para el estudio de optimización de los pozos analizados se mantuvo constante la presión de operación así como la geometría de las bombas jet actuales, la ganancia de petróleo producido se debe únicamente al aumento del fluido motriz utilizado en los pozos.

De acuerdo al análisis nodal realizado, cabe mencionar que los pozos LGA – 022 y LGA – 38, se puede lograr una ganancia mayor en su producción si se aumenta la presión de operación o en su defecto una geometría que genere un mayor diferencial en la  $P_{WF}$  de estos pozos.

En la figura 3.3 se presenta gráficamente el incremento de petróleo producido por cada uno de los pozos analizados.

**FIGURA 3.3 ANÁLISIS DE PETRÓLEO PRODUCCIÓN POR POZO – MÉTODO DE PETRIE**

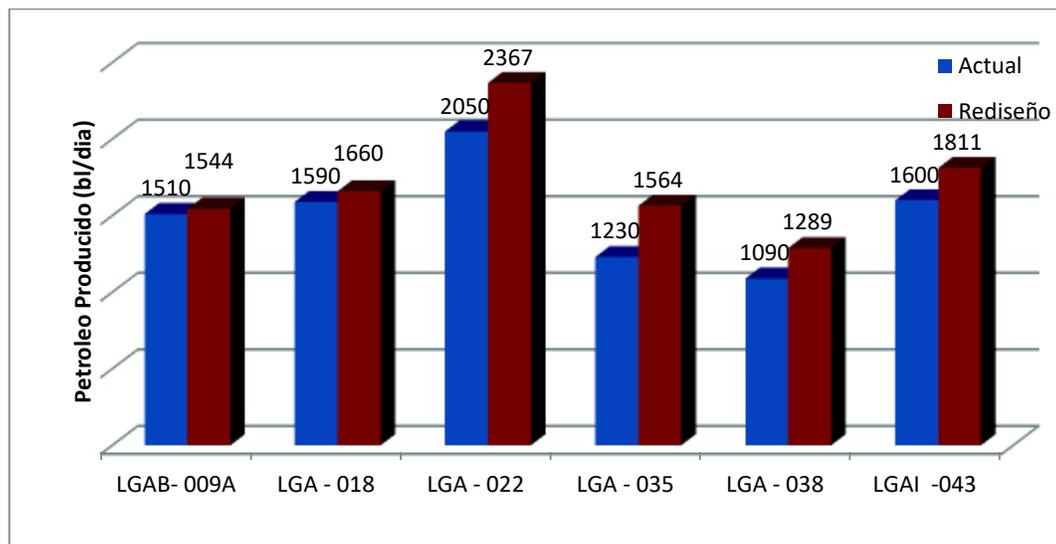


Elaborado por: Becerra Freddy

Se aprecia el incremento de la producción de petróleo en cada uno de los pozos, lo cual indudablemente deriva en un incremento de los ingresos económicos de la producción del campo.

En la figura 3.4. se evalúa el incremento de fluido motriz en la propuesta de rediseño en comparación con los parámetros actuales de funcionamiento.

**FIGURA 3.4 ANÁLISIS DE FLUIDO MOTRIZ REQUERIDO POR POZO – MÉTODO DE PETRIE**



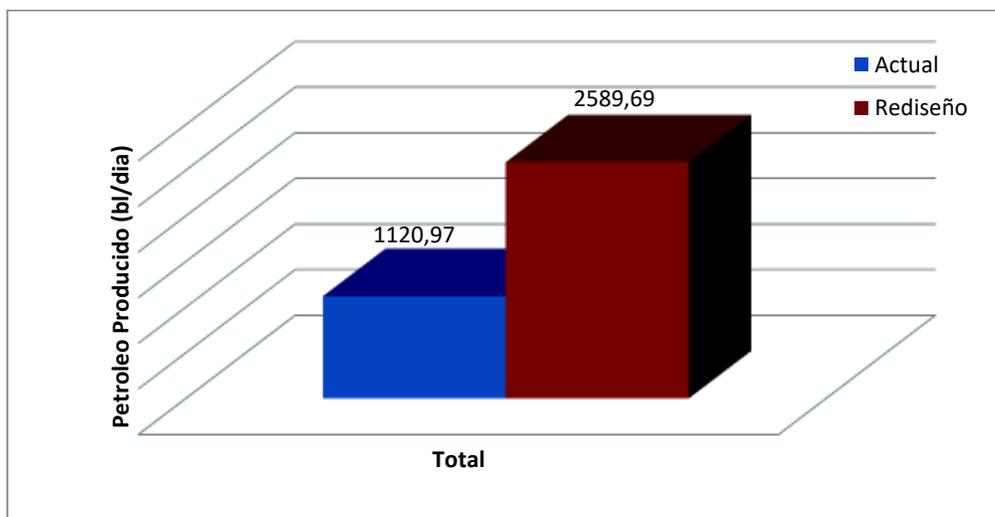
Elaborado por: Becerra Freddy

Se tiene que con la aplicación del método de Petrie, comparando las condiciones actuales de operación y la propuesta de rediseño, se puede observar una ganancia de 706.42 bl/día de petróleo con un aumento de fluido motriz de 1165 bl/día.

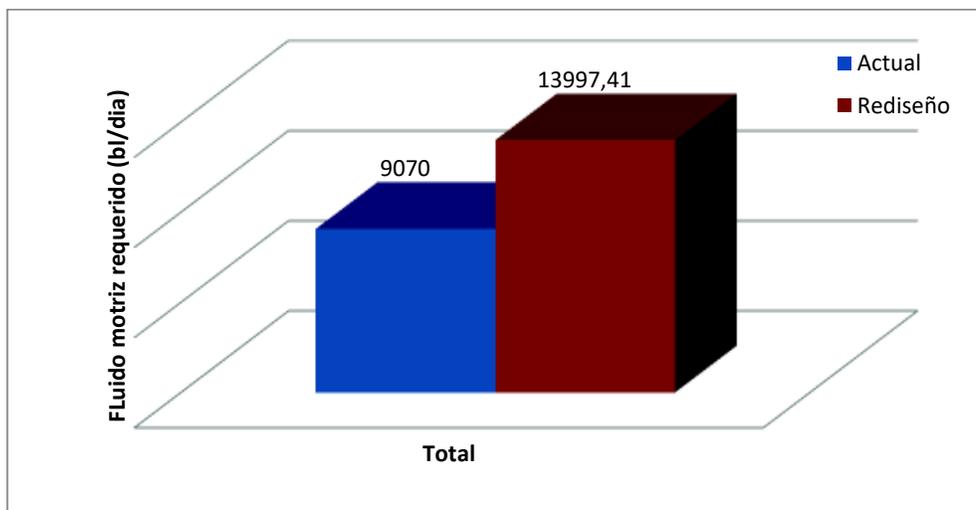
### 3.1.3 ANÁLISIS TÉCNICO

De la aplicación de los métodos de Smart y Petrie a pozos que operan con sistema de bombeo hidráulico tipo jet del campo Lago Agrio, se tiene un incremento de 1120.97 bl/día de petróleo a 2589.69 bl/día de petróleo; con un incremento de fluido motriz de 9070 bl/día a 13997.41 bl/día, como se observa en la figura 3.5 y 3.6.

Se tiene un incremento del 131% de la producción, con un aumento del 54.3% del fluido motriz.

**FIGURA 3.5 PETRÓLEO TOTAL PRODUCIDO**

Elaborado por: Becerra Freddy

**FIGURA 3.6 FLUIDO MOTRIZ TOTAL REQUERIDO**

Elaborado por: Becerra Freddy

### 3.2 ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico del presente proyecto, comprende el estudio de las medidas de comercialización del producto y consideración de costos necesarios para ejecutar y operar el proyecto. Se analizará los efectos que tendrá el proyecto propuesto en la empresa operadora del campo, tomando en

cuenta la legislación nacional aplicable además de las normas y consideraciones emitidas por los entes de control.

Además se considera el precio de venta del petróleo en el mercado internacional, ya que nos encontramos expuestos a este importante aspecto que junto a los indicadores, fijaran la viabilidad económica del proyecto.

### **3.2.1 INDICADORES FINANCIEROS**

#### **3.2.1.1 Flujo neto de caja (FNC)**

Representa el movimiento neto de caja o la generación neta de fondos durante cierto período de tiempo que generalmente es el año. (Vega, 1983)

$$FNC_K = R_K - D_K \quad (3.1)$$

Donde:

$R_K$  = Monto previsto de ingresos para el año K

$D_K$  = Monto previsto de egresos para el año K

#### **3.2.1.2 Período de recuperación de la inversión (PRI)**

Tiene relación con el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial del proyecto, el período de recuperación de la inversión no puede ser calculado explícitamente; para obtener su valor debe calcularse por tanteo o efectuando una interpolación entre los valores contiguos al PRI. (Aguirre y Mendoza, 2016)

Teniendo en cuenta los flujos netos de caja el PRI se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$SFNC = \sum_{n=0}^n FNC_k = 0 \quad (3.2)$$

Donde:

SNFC = Suma acumulada de los flujos netos de caja

FNC<sub>k</sub> = Flujo neto de caja del año k

### **Criterio de evaluación**

Un proyecto es aceptable si su período de recuperación de la inversión es inferior a cierto valor de referencia; de tratarse de proyectos excluyentes el mejor proyecto para dos o más alternativas es aquel que presenta menor tiempo de recuperación de la inversión. (Vega, 1983)

#### **3.2.1.3 Valor actual neto (VAN)**

Es una medida de la cantidad de valor que se crea o añade el día de hoy como resultado de haber realizado una inversión. (Ross, 2001)

$$VAN = \sum_{K=0}^K \frac{FNC_K}{(1+r)^k} \quad (3.3)$$

Donde:

FNC<sub>k</sub> = Flujo neto de caja del año k

r = tasa de actualización.

K = año

### **Criterio de evaluación**

Si VAN > 0. el proyecto es rentable

Si VAN = 0. es indiferente al realizar

Si VAN < 0. el proyecto no es rentable

### 3.2.1.4 Tasa interna de retorno (TIR)

Es la tasa de actualización que anula el valor actual neto del flujo de caja. (Vega, 1983)

La tasa interna de retorno de un proyecto se obtiene cuando el VAN es igual a 0; es decir para hallar el TIR de un proyecto hay que llevar los valores del flujo de caja al punto cero.

$$VAN = \sum_{K=0}^K \frac{FNC_K}{(1 + TIR)^K} = 0 \quad (3.4)$$

Donde:

VAN = Valor actual neto

FNC<sub>K</sub> = Flujo neto de caja del año k

K = año

### Criterio de evaluación

Si TIR > d, el proyecto es rentable

Si TIR = d, es indiferente al realizar

Si TIR < d, el proyecto no es rentable

### 3.2.1.5 Relación beneficio – costo (B/C)

Esta relación refleja los beneficios equivalentes en dólares para el usuario y el costo equivalente en dólares para quien lo patrocina. (Ross, 2001)

Indica de forma notoria la rentabilidad de un proyecto, ya que considera los ingresos generados, los gastos y la inversión, todos estos calculados en el período de la inversión, consiste en dividir el valor presente de los ingresos para el valor presente de los egresos, determinado así los beneficios por cada dólar que se invierte en el proyecto.

$$B/C = \frac{\sum V_{pi}}{\sum V_{pc}} \quad (3.5)$$

Donde:

B/C = Relación beneficio - costo

$V_{pi}$  = Valor presente de ingresos

$V_{pe}$  = Valor presente de egresos

### **Criterio de evaluación**

Si  $B/C > 1$ , el proyecto es rentable

Si  $B/C = 1$ , es indiferente al realizar

Si  $B/C < 1$ , el proyecto no es rentable

#### **3.2.1.6 Consideraciones empleadas para el análisis**

El análisis del presente trabajo se efectuara para condiciones del año 2017, asumiendo una producción ininterrumpida de 12 meses y 30 días por cada mes.

De la aplicación de los métodos propuestos por Smart y Petrie a los pozos de estudio, se determinó un incremento de la producción de petróleo de 1468.72 bl/día, teniendo una producción total de 2589.69 bl/día de petróleo en el primer día de producción con las nuevas condiciones.

De acuerdo a lo determinado por el departamento de ingeniería del campo Lago Agrio, la producción del campo declina a razón de 15 % anual, equivalente a una declinación mensual de 1.25%. La tasa de actualización bancaria anual estimada es de 12% la misma que emplea Petroamazonas E.P., resultando en una tasa de actualización mensual de 1 %. El costo de producción del barril de petróleo estimado para el campo Lago Agrio es de

\$9.58. Valores estimados por el departamento financiero de Petroamazonas E.P.

En las tablas 3.3. y 3.4 se detalla el desglose de gastos operativos estimados de las operaciones necesarias para la aplicación de la propuesta.

**TABLA 3.3 VALORES ESTIMADOS DE OPERACIONES REQUERIDAS PARA PUESTA EN OPERACIÓN DE POZOS**

| <b>OPERACIÓN – COMPAÑÍA – MATERIAL</b> | <b>COSTO (dólares)</b> |
|--|------------------------|
| EQUIPO JET DE FONDO                    | 22482.50               |
| TRABAJO DE LA TORRE                    | 45000.00               |
| MOVILIZACIÓN Y SUPERVISIÓN             | 3200.00                |
| CAMIÓN PLUMA                           | 700.00                 |
| TÉCNICO DE OPERACIÓN                   | 300.00                 |
| CORRIDA + RECUPERADA DE BOMBA          | 16500.00               |
| LUBRICADOR                             | 250.00                 |
| KIT DE REPARACIÓN                      | 452.00                 |
| INSPECCIÓN + REPARACIÓN DE BOMBA       | 1200.00                |
| CONTINGENCIAS (+/- 25%)                | 22521.13               |
| <b>TOTAL</b>                           | <b>112605.63</b>       |

FUENTE: Departamento de Ingeniería de Petróleos Campo Lago Agrio, 2017  
ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA 3.4 VALORES ESTIMADOS DE GASTOS – REVISIÓN BOMBA JET**

| <b>OPERACIÓN – COMPAÑÍA – MATERIAL</b> | <b>COSTO (dólares)</b> |
|--|------------------------|
| MOVILIZACIÓN Y SUPERVISIÓN             | 3000.00                |
| TÉCNICO DE OPERACIÓN                   | 300.00                 |
| CAMIÓN PLUMA                           | 700.00                 |
| CORRIDA + RECUPERADA DE BOMBA          | 16500.00               |
| KIT DE REPARACIÓN                      | 452.00                 |
| LUBRICADOR                             | 250.00                 |
| INSPECCIÓN + REPARACIÓN DE BOMBA       | 1200.00                |
| CONTINGENCIAS (+/- 25%)                | 5600.50                |
| <b>TOTAL</b>                           | <b>28002.50</b>        |

FUENTE: Departamento de Ingeniería de Petróleos Campo Lago Agrio, 2017  
ELABORADO POR: Becerra Freddy

Para el precio del petróleo ecuatoriano está fijado en base al marcador estadounidense West Texas Intermediate (WTI) con la aplicación de castigo al crudo ecuatoriano de acuerdo a la calidad del petróleo, cuya diferencia es

establecida mensualmente por E.P. PETROECUADOR, en base a esto se plantean tres escenarios de análisis, mostrados en la tabla 3.5.

**TABLA 3.5 COSTOS DEL BARRIL DE PETRÓLEO**

| <b>ESCENARIO</b>       | <b>COSTO DEL BARRIL (dólares)</b> |
|------------------------|-----------------------------------|
| PESIMISTA              | 15                                |
| PRESUPUESTO DEL ESTADO | 35                                |
| OPTIMISTA              | 45                                |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

### **3.2.1.7 Estimación de ingresos**

Para el análisis del proyecto los ingresos se estiman en base al incremento de producción que se obtendrá con los cambios propuestos, es decir la producción mensual adicional multiplicada por el precio del petróleo establecido en cada escenario.

### **3.2.1.8 Estimación de egresos**

Los egresos estarán determinados por el valor de producción del barril de petróleo multiplicando la producción incremental por dicho costo.

Para el primer mes se toman en cuenta los costos de trabajos y operaciones requeridas para la aplicación de los cambios propuestos, como inversión inicial.

De acuerdo a la tabla 3.3 se tiene que para el caso de la puesta en operación con bombeo hidráulico jet se requiere una inversión de 1112605.63 dólares por cada pozo, como son tres los pozos en estudio se tendrá una inversión inicial de 337816.88 dólares.

Para los pozos en los cuales la propuesta de optimización comprende un rediseño de los parámetros de operación de acuerdo a la tabla 3.4, a inversión

inicial necesaria por cada pozo es de 28002.5 dólares, esto multiplicado por los 6 pozos en estudio da un total de 168015 dólares de inversión inicial requerida.

De acuerdo a lo anterior, la inversión inicial total requerida para la aplicación de la propuesta es de 505831.88 dólares.

### **3.3 ANÁLISIS FINANCIERO DEL PROYECTO**

El proyecto planteado pretende optimizar el sistema de bombeo hidráulico del campo Lago Agrio para aumentar su producción, para lo cual se considera la puesta en operación con de pozos con completamiento hidráulico que se encuentran fuera de operación con bombeo hidráulico tipo jet y realizando un rediseño de los parámetros de operación de bombas jet que se encuentran operando.

Para realizar el análisis económico del proyecto, se consideran tres escenarios de análisis, que junto a las consideraciones e indicadores financieros permitirán evaluar la viabilidad del proyecto.

En las tablas 3.6, 3.7 y 3.8 se muestran el detalle del estudio económico para cada uno de los tres escenarios propuestos respectivamente, con sus correspondientes indicadores económicos financieros.

**TABLA 3.6 ANÁLISIS ECONÓMICO ESCENARIO PESIMISTA – PRECIO DEL BARRIL 15 DÓLARES**

| MES/AÑO   | Periodo | Producción incremental mensual (bl/día) | Ingreso total (dólares) | Costo Operativo (dólares) | Egreso total (dólares) | Flujo de caja (dólares) | INGRESO TOTAL (dólares) | EGRESO TOTAL (dólares) | FLUJO DE CAJA TOTAL (dólares) |
|-----------|---------|---|-------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------|
| NOV./2017 | 0       | 0.0                                     | 0.0                     | 0.0                       | 505831.9               | -505831.9               | 0.0                     | 505831.90              | -505831.9                     |
| DIC./2017 | 1       | 25589.7                                 | 383845.4                | 245149.2                  | 245149.2               | 138696.1                | 380237.20               | 242844.83              | 137392.4                      |
| ENE./2018 | 2       | 25269.8                                 | 379047.3                | 242084.9                  | 242084.9               | 136962.4                | 371921.19               | 237533.67              | 134387.5                      |
| FEB./2018 | 3       | 24953.9                                 | 374309.2                | 239058.8                  | 239058.8               | 135250.4                | 363753.67               | 232317.35              | 131436.3                      |
| MAR./2018 | 4       | 24642.0                                 | 369630.3                | 236070.6                  | 236070.6               | 133559.8                | 355732.23               | 227194.32              | 128537.9                      |
| ABR./2018 | 5       | 24334.0                                 | 365009.9                | 233119.7                  | 233119.7               | 131890.3                | 347854.48               | 222163.06              | 125691.4                      |
| MAY./2018 | 6       | 24029.8                                 | 360447.3                | 230205.7                  | 230205.7               | 130241.6                | 340118.10               | 217222.01              | 122896.0                      |
| JUN./2018 | 7       | 23729.4                                 | 355941.7                | 227328.1                  | 227328.1               | 128613.6                | 332520.77               | 212369.93              | 120150.8                      |
| JUL./2018 | 8       | 23432.8                                 | 351492.5                | 224486.5                  | 224486.5               | 127005.9                | 325060.23               | 207605.13              | 117455.1                      |
| AGO./2018 | 9       | 23139.9                                 | 347098.8                | 221680.4                  | 221680.4               | 125418.4                | 317734.25               | 202926.27              | 114808.0                      |
| SEP./2018 | 10      | 22850.7                                 | 342760.1                | 218909.4                  | 218909.4               | 123850.6                | 310540.62               | 198331.95              | 112208.7                      |
| OCT./2018 | 11      | 22565.0                                 | 338475.6                | 216173.1                  | 216173.1               | 122302.5                | 303477.20               | 193820.77              | 109656.4                      |
| TOTAL     |         |   |                         |                           |                        |                         | 3748949.90              | 2900161.20             | 848788.7                      |

**RESULTADOS ANÁLISIS ECONÓMICO – PRIMER ESCENARIO**

|     |                   |
|-----|-------------------|
| PRC | 3 MESES 24 DÍAS   |
| VAN | 840810.25 dólares |
| TIR | 23%               |
| B/C | 1.29              |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA 3.7 ANÁLISIS ECONÓMICO ESCENARIO PRESUPUESTO GENERAL DEL ESTADO – PRECIO DEL BARRIL 35 DÓLARES**

| MES/AÑO   | Periodo            | Producción incremental mensual (bl/día) | Ingreso total (dólares) | Costo Operativo (dólares) | Egreso total (dólares) | Flujo de caja (dólares) | INGRESO TOTAL (dólares) | EGRESO TOTAL (dólares) | FLUJO DE CAJA TOTAL (dólares) |
|---|--------------------|---|-------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------|
| NOV./2017   | 0                  | 0.0                                     | 0.0                     | 0.0                       | 505831.9               | -505831.9               | 0.0                     | 505831.90              | -505831.9                     |
| DIC./2017   | 1                  | 25589.7                                 | 895639.2                | 245149.2                  | 245149.2               | 650489.9                | 887220.14               | 242844.83              | 644375.3                      |
| ENE./2018   | 2                  | 25269.8                                 | 884443.7                | 242084.9                  | 242084.9               | 642358.8                | 867816.12               | 237533.67              | 630282.5                      |
| FEB./2018   | 3                  | 24953.9                                 | 873388.1                | 239058.8                  | 239058.8               | 634329.3                | 848758.57               | 232317.35              | 616441.2                      |
| MAR./2018   | 4                  | 24642.0                                 | 862470.8                | 236070.6                  | 236070.6               | 626400.2                | 830041.86               | 227194.32              | 602847.5                      |
| ABR./2018   | 5                  | 24334.0                                 | 851689.9                | 233119.7                  | 233119.7               | 618570.2                | 811660.45               | 222163.06              | 589497.4                      |
| MAY./2018   | 6                  | 24029.8                                 | 841043.8                | 230205.7                  | 230205.7               | 610838.1                | 793608.89               | 217222.09              | 576386.8                      |
| JUN./2018   | 7                  | 23729.4                                 | 830530.7                | 227328.1                  | 227328.1               | 603202.6                | 775881.79               | 212369.93              | 563511.9                      |
| JUL./2018   | 8                  | 23432.8                                 | 820149.1                | 224486.5                  | 224486.5               | 595662.6                | 758473.86               | 207605.13              | 550868.7                      |
| AGO./2018   | 9                  | 23139.9                                 | 809897.2                | 221680.4                  | 221680.4               | 588216.8                | 741379.91               | 202926.27              | 538453.6                      |
| SEP./2018   | 10                 | 22850.7                                 | 799773.5                | 218909.4                  | 218909.4               | 580864.1                | 724594.79               | 198331.94              | 526262.8                      |
| OCT./2018   | 11                 | 22565.0                                 | 789776.3                | 216173.1                  | 216173.1               | 573603.3                | 708113.46               | 193820.77              | 514292.7                      |
| TOTAL   |                    |   |                         |                           |                        |                         | 8747549.8               | 2900161.20             | 5847388.6                     |
| RESULTADOS ANÁLISIS ECONÓMICO – SEGUNDO ESCENARIO |                    |   |                         |                           |                        |                         |                         |                        |                               |
| PRC   | 24 DÍAS            |   |                         |                           |                        |                         |                         |                        |                               |
| VAN   | 5792424.29 dólares |   |                         |                           |                        |                         |                         |                        |                               |
| TIR   | 125%               |   |                         |                           |                        |                         |                         |                        |                               |
| B/C   | 3.016              |   |                         |                           |                        |                         |                         |                        |                               |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA 3.8 ANÁLISIS ECONÓMICO ESCENARIO OPTIMISTA – PRECIO DEL BARRIL 45 DÓLARES**

| MES/AÑO   | Período | Producción incremental mensual (bl/día) | Ingreso total (dólares) | Costo Operativo (dólares) | Egreso total (dólares) | Flujo de caja (dólares) | INGRESO TOTAL (dólares) | EGRESO TOTAL (dólares) | FLUJO DE CAJA TOTAL (dólares) |
|-----------|---------|---|-------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------|
| NOV./2017 | 0       | 0.0                                     | 0.0                     | 0.0                       | 505831.9               | -505831.9               | 0.0                     | 505831.9               | -505831.9                     |
| DIC./2017 | 1       | 25589.7                                 | 1151536.1               | 245149.2                  | 245149.2               | 906386.8                | 1140711.61              | 242844.83              | 897866.8                      |
| ENE./2018 | 2       | 25269.8                                 | 1137141.8               | 242084.9                  | 242084.9               | 895057.0                | 1115763.58              | 237533.67              | 878229.9                      |
| FEB./2018 | 3       | 24953.9                                 | 1122927.6               | 239058.8                  | 239058.8               | 883868.8                | 1091261.02              | 232317.35              | 858943.7                      |
| MAR./2018 | 4       | 24642.0                                 | 1108891.0               | 236070.6                  | 236070.6               | 872820.4                | 1067196.68              | 227194.32              | 840002.4                      |
| ABR./2018 | 5       | 24334.0                                 | 1095029.8               | 233119.7                  | 233119.7               | 861910.2                | 1043563.44              | 222163.06              | 821400.4                      |
| MAY./2018 | 6       | 24029.8                                 | 1081342.0               | 230205.7                  | 230205.7               | 851136.3                | 1020354.28              | 217222.09              | 803132.2                      |
| JUN./2018 | 7       | 23729.4                                 | 1067825.2               | 227328.1                  | 227328.1               | 840497.1                | 997562.30               | 212369.93              | 785192.4                      |
| JUL./2018 | 8       | 23432.8                                 | 1054477.4               | 224486.5                  | 224486.5               | 829990.9                | 975180.68               | 207605.13              | 767575.6                      |
| AGO./2018 | 9       | 23139.9                                 | 1041296.4               | 221680.4                  | 221680.4               | 819616.0                | 953202.74               | 202926.27              | 750276.5                      |
| SEP./2018 | 10      | 22850.7                                 | 1028280.2               | 218909.4                  | 218909.4               | 809370.8                | 931621.87               | 198331.95              | 733289.9                      |
| OCT./2018 | 11      | 22565.0                                 | 1015426.7               | 216173.1                  | 216173.1               | 799253.6                | 910431.59               | 193820.77              | 716610.8                      |
| TOTAL     |         |   |                         |                           |                        |                         | 11246849.8              | 2900161.2              | 8346688.6                     |

**RESULTADOS ANÁLISIS ECONÓMICO – TERCER ESCENARIO**

|     |                    |
|-----|--------------------|
| PRC | 17 días            |
| VAN | 8268231.31 dólares |
| TIR | 175%               |
| B/C | 3.87800845         |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

De los resultados finales del análisis económico del proyecto se observa que, en los tres escenarios propuestos se tiene rentabilidad y representan una ganancia económica para la empresa operadora del campo.

Para el primer escenario, definido como pesimista, con un precio de venta del crudo de 15 dólares, se tiene una tasa interna de retorno de 23%, con una relación beneficio – costo de 1.29, lo cual indica que por cada dólar invertido se recibe un beneficio económico positivo de 1.29 dólares, lo cual permitirá recuperar la inversión realizada en 3 meses y 24 días de puesta en marcha de la propuesta y un valor actual neto de 840810.25 dólares; analizando los indicadores financieros para este escenario se tiene que el proyecto es viable y su ejecución es rentable para la empresa operadora del campo.

En el segundo escenario, en el cual se toma como referencia para el precio de venta del barril de petróleo el establecido en el presupuesto general del Estado de 35, el proyecto es rentable, ya que como se ve en el análisis económico sus indicadores son positivos, TIR de 125%, B/C de 3.016 y VAN de 5792424.29 dólares, indican que la inversión realizada se recuperara en 24 días; lo cual da cuenta de la alta rentabilidad de este proyecto en estas condiciones.

Para el escenario optimista, con un precio de petróleo fijado en 45 dólares, siendo este el escenario que muestra la más alta rentabilidad para el proyecto ya que la tasa interna de retorno calculada para estas condiciones es de 175% con una relación beneficio – costo de 3.88 la misma que expresa que por cada dólar invertido en la propuesta, la empresa recibe 3.88 dólares de ganancia con un valor actual neto de 8268231.31 dólares que permitirá recuperar la inversión en 17 días.

En todos los casos el VAN es superior al valor base de 0. lo cual representa un valor atractivo para la ejecución del proyecto.

## **CAPÍTULO 4**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1 CONCLUSIONES**

- El sistema de levantamiento por bombeo hidráulico tipo jet, es el de mayor impacto en la producción de petróleo del campo Lago Agrio ya que los pozos que operan bajo este sistema aportan con el 48% total de la producción del campo.
- Mediante la aplicación del método propuesto pos Smart a los pozos seleccionados para tal efecto del campo Lago Agrio, se logrará incrementar la producción en 1150 bl/día, un incremento de 762.5 bl/día de petróleo, con un requerimiento de 3762.41 bl/día de fluido motriz.
- La puesta en marcha en operación de los pozos LGA – 012, LGA – 32 y LGAF – 048, requiere poca inversión ya que cuentan actualmente con completamiento hidráulico y las facilidades de superficies necesarias para su funcionamiento.
- Mediante los algoritmos propuestos por Petrie para pozos que se encuentran operando con bombeo hidráulico tipo jet, se determinó que los pozos LGAJ-039 y LGAG-044, se encuentran operando adecuadamente con las bombas jet instaladas, por lo que no requieren intervención alguna.
- Al aumentar el caudal de fluido motriz en 12.8%, los pozos LGA – 09A, LGA – 018, LGA – 022, LGA – 035, LGA – 038 y LGA – 043, se observa un aumento de la producción de petróleo del 63%, esto es 706.42 bl/día de petróleo.

- Mediante el análisis nodal de los pozos LGA – 022 y LGA – 38, se observa que si se aumenta la presión de operación o se dimensiona una geometría mayor se puede lograr una ganancia mayor en su producción, de alrededor de 700 bl/día de petróleo adicionales de la producción actual, tomando en cuenta una  $P_{WF}$  de 100 psi por encima de la  $P_b$ .
- De la aplicación de la propuesta al campo Lago Agrio, se obtiene un aumento de la producción de 1120.97 bl/día de petróleo a 2589.69 bl/día de petróleo; con un incremento de fluido motriz de 9070 bl/día a 13997.41 bl/día, equivalente a un incremento del 131% de la producción, con un aumento del 54.3% del fluido motriz.
- Al aplicar la propuesta se tendrá un BSW estimado de 28.74%, lo cual explica que se obtenga un buen volumen de recuperación de petróleo, de alrededor de 1460 bl/día adicionales.
- La inversión inicial requerida para la aplicación del presente proyecto tiene un valor estimado de 505831.88 dólares, analizando los tres escenarios se concluye que son rentables y su aplicación es viable, ya que la inversión se recuperara entre 17 días y 3.8 meses dependiendo de las condiciones de mercado del precio del barril.
- Los indicadores financieros que se usaron para evaluar económicamente el proyecto TIR, VAN y B/C; dan valores positivos y altos, lo cual afirma la viabilidad económica del proyecto en los tres escenarios planteados. Para el primer escenario se tiene un TIR=23%, VAN=840810.25\$ y B/C=1.29. En el segundo escenario TIR=125%, VAN=5792424.29\$ y B/C=3.016. En el tercer escenario TIR=175%, VAN=8268231.31\$ y B/C=2.878.
- Se presenta un cuadro resumen de la aplicación de la propuesta de optimización a los pozos seleccionados:

| POZO      | Petróleo producido |          |            | Fluido Motriz |          |            | OBSERVACIONES  |
|-----------|--------------------|----------|------------|---------------|----------|------------|--|
|           | (bl/día)           |          |            | (bl/día)      |          |            |  |
|           | Actual             | Rediseño | $\Delta Q$ | Actual        | Rediseño | $\Delta Q$ |  |
| LGA-09A   | 119.71             | 153.43   | 33.72      | 1510          | 1544     | 34         | - Incrementar caudal de fluido motriz.   |
| LGA – 012 | 0.00               | 480.00   | 480.00     | 0             | 1173     | 1173.21    | - Trabajo de estimulación matricial (fractura)<br>- Corrida de bomba jet Guiberson C4.<br>- Presión de inyección 3500 psi.               |
| LGA - 018 | 29.49              | 34.54    | 5.05       | 1590          | 1660.    | 70         | - Incrementar caudal de fluido motriz.   |
| LGA - 022 | 425.90             | 839.04   | 413.14     | 2050          | 2367     | 317        | - Incrementar caudal de fluido motriz.   |
| LGA - 032 | 0.00               | 124.80   | 124.80     | 0             | 642      | 642.20     | - Cambio de zona productora a B.T.<br>- Corrida de bomba jet Kobe 5A.<br>- Presión de trabajo 3600 psi                                   |
| LGA - 035 | 133.62             | 189.48   | 55.85      | 1230          | 1564     | 334        | - Incrementar caudal de fluido motriz.   |
| LGA - 038 | 259.45             | 397.76   | 138.31     | 1090          | 1289     | 199        | - Incrementar caudal de fluido motriz.   |
| LGA - 043 | 152.80             | 213.14   | 60.35      | 1600          | 1811     | 211        | - Incrementar caudal de fluido motriz.   |
| LGA - 048 | 0                  | 157.50   | 157.50     | 0             | 1947     | 1947       | - Trabajo de estimulación matricial. (Acidificación de arena Tinf).<br>- Corrida de bomba jet Kobe 9A.<br>- Presión de trabajo 3500 psi. |

#### 4.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda poner en funcionamiento los pozos LGA – 012, LGA – 32 y LGAF – 048 con las geometrías y las condiciones de operación determinadas en el análisis, para aprovechar el completamiento hidráulico y las facilidades de superficie apropiadas para bombeo hidráulico, para utilizar de mejor manera la capacidad operativa instalada de la operadora del campo.
- Se recomienda realizar trabajos de limpieza y estimulación a los pozos LGA – 012, LGA – 32 y LGAF – 048 ya que tienen un tiempo considerable de inhabilitación a fin de obtener el aporte apropiado de estos pozos.

- Se recomienda aumentar el caudal de fluido motriz de los pozos LGA – 09A, LGA – 018, LGA – 022, LGA – 035, LGA – 038 y LGA – 043, para obtener un incremento de su producción de petróleo en un 63%, para beneficio de la operadora del Campo Lago Agrio.
- Se recomienda analizar la producción de los pozos LGAJ-039 y LGAG-044 a fin de confirmar que los parámetros de funcionamiento de estos pozos son los correctos.
- De acuerdo a los análisis de las curvas IPR de los pozos LGA – 022 y LGA – 38, se recomienda el redimensionamiento de la bomba jet para obtener una mejor recuperación de petróleo.
- Se recomienda realizar una campaña de pruebas de presión al campo Lago Agrio, para contar con datos actualizados que permitan conocer la situación actual del campo y de esta manera tener datos efectivos para el dimensionamiento de bombas jet.
- Se recomienda realizar mantenimientos periódicos a las instalaciones de superficie y a las bombas de fondo, para obtener el máximo rendimiento técnico y económico del sistema de levantamiento hidráulico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida R., (2007). *Texto Guía de Bombeo Hidráulico*. Petroproducción D.A.
- Amaya A. y Chanatasig D., (2009). *Programa de Diseño Unificado de Bombeo Hidráulico para la Selección de Bombas Jet y Pistón usadas en las Operaciones de Petroproducción*. E.P.N. Quito.
- Araya A., (2009). *Análisis Técnico-Económico para el cambio de Levantamiento Artificial en cuatro pozos del Campo Shushufindi*. E.P.N. Quito
- Baby P., Rivadeneira M. y Barragán R. (2014). *La cuenca oriente, Geología y Petróleo*, Quito.
- Banco Central del Ecuador, (2017). *Precio del petróleo*, Recuperado de [http://www.bce.fin.ec/resumen\\_ticker.php?ticker\\_value=petroleo](http://www.bce.fin.ec/resumen_ticker.php?ticker_value=petroleo)
- Benavides A. y Vergara E. (2011). *Estudio del Sistema de bombeo hidráulico en el Campo Shushufindi*, E.P.N. Quito.
- Bradley, H., (2004). *Petroleum Engineering Handbook*, Society of Petroleum Engineers.
- Brown, E. (1984). *The Technology of Artificial Lift Methods*. Vol 4. PennWell Publishing Co.
- Collaguazo C. y Romero F., (2011). *Estudio del Sistema de bombeo hidráulico en el Campo Lago Agrio para Incrementar su Producción*, E.P.N. Quito.
- House J. y Villacreces R. (2010). *Estudio para la Implementación del Servicio de Bombeo Hidráulico tipo Jet de la Compañía Ecuapet Cia. Ltda. en Petroproducción*, E.P.N. Quito.
- Melo V., (2014). *Folleto de levantamiento artificial*, Quito.
- Melo V., (2010). *Optimización de la geometría de la bomba hidráulica tipo jet*, Quito. Recuperado de <http://oaji.net/articles/2015/1783-1426291528.pdf>

- Oilwell Hydraulics Inc., (2001). *Hydraulic Pumping Systems*, Texas, Odessa.
- Ordoñez D. (2001). *Estudio del Sistema de Bombeo Hidráulico en el Campo Parahuacu*. E.P.N. Quito.
- Petroamazonas E.P. (2016). *Resumen ejecutivo de operaciones Septiembre 2016*. Recuperado de [http://www.petroamazonas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/10/reporte\\_diario16.pdf](http://www.petroamazonas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/10/reporte_diario16.pdf)
- Ross J., (2001). *Fundamentos de Finanzas Corporativas*, McGraw-Hill. México.
- Secretaría de Hidrocarburos del Ecuador (2016). *Banco de información petrolera del Ecuador*, Quito. Recuperado de <http://www.she.gob.ec/banco-de-informacion-petrolera/>
- Sertecpet, (2016). *Manual para Operaciones de Campo*. Quito.
- Simbaña L. (2014). *Propuesta para incrementar la producción de los pozos con bombeo hidráulico de la Estación Sacha Central, mediante Análisis Nodal*, E.P.N. Quito.
- Smart E., (1985). *Jet Pump Geometry Selection*, Southwestern Petroleum Short Course, April 23 – 25, 1985, Texas Tech University.
- lipet, (2007).
- Solipet, (2007). *Introducción a las operaciones del sistema de bombeo hidráulico*, Quito.
- Vega C. (1983). *Ingeniería Económica*, Quito.

## **ANEXOS**

**ANEXO No 1**

**ÁREAS ANULARES PARA BOMBAS CLAW**

**TABLA A 1.1 ÁREAS ANULARES GARGANTA – TOBERA DE CLAW (pg<sup>2</sup>)**

| <b>ÁREA ANULAR GARGANTA – TOBERA, A<sub>s</sub></b> |           |          |          |          |          |          |
|---|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>TOBERA</b>                                       | <b>A'</b> | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> | <b>D</b> | <b>E</b> |
| 1   |           | 0.0028   | 0.0054   | 0.0086   | 0.0124   | 0.0169   |
| 2   | 0.0016    | 0.0042   | 0.0074   | 0.0112   | 0.0157   | 0.0209   |
| 3   | 0.0034    | 0.0066   | 0.0104   | 0.0149   | 0.0201   | 0.0273   |
| 4   | 0.0050    | 0.0088   | 0.0133   | 0.0185   | 0.0257   | 0.0322   |
| 5   | 0.0068    | 0.0113   | 0.0165   | 0.0237   | 0.0302   | 0.0373   |
| 6   | 0.0093    | 0.0145   | 0.0217   | 0.0282   | 0.0353   | 0.0432   |
| 7   | 0.0131    | 0.0203   | 0.0268   | 0.0339   | 0.0418   | 0.0547   |
| 8   | 0.0189    | 0.0254   | 0.0325   | 0.0404   | 0.0533   | 0.0674   |
| 9   | 0.0228    | 0.0299   | 0.0378   | 0.0507   | 0.0648   | 0.0809   |
| 10  | 0.0272    | 0.0351   | 0.0480   | 0.0621   | 0.0782   | 0.0944   |
| 11  | 0.0287    | 0.0416   | 0.0557   | 0.0718   | 0.0880   | 0.1206   |
| 12  | 0.0344    | 0.0485   | 0.0646   | 0.0808   | 0.1134   | 0.1452   |
| 13  | 0.0346    | 0.0507   | 0.0669   | 0.0995   | 0.1313   | 0.1704   |
| 14  | 0.02992   | 0.0461   | 0.0787   | 0.1105   | 0.1496   | 0.1934   |
| 15  | 0.0268    | 0.0594   | 0.0912   | 0.1203   | 0.1742   | 0.2276   |
| 16  | 0.0194    | 0.0512   | 0.0903   | 0.1342   | 0.1876   | 0.2509   |
| 17  | 0.0211    | 0.0602   | 0.1041   | 0.1575   | 0.2208   | 0.2693   |
| 18  | 0.0204    | 0.0643   | 0.1177   | 0.1810   | 0.2565   | 0.3476   |
| 19  | 0.0129    | 0.0663   | 0.1296   | 0.2051   | 0.2962   | 0.4056   |
| 20  | 0.0008    | 0.0641   | 0.1369   | 0.2307   | 0.3401   |          |
| 21  |           | 0.0665   | 0.1576   | 0.2670   |          |          |

FUENTE: SERTECPET (2010)

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**ANEXO No 2**  
**TABLAS DE CÁLCULOS**

**TABLA A 2.1 RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA ITERACIÓN POZO LGA – 32, MÉTODO DE SMART**

|     |               | Primera Iteración |                      | Segunda Iteración |         | Tercera Iteración  |         |
|-----|---------------|-------------------|----------------------|-------------------|---------|--------------------|---------|
| 1)  | $P_T$         | 3600              | psi                  | 3600              | psi     | 3600               | psi     |
| 2)  | $M$           | 1.0000            |                      | 0.4089            |         | 0.4131             |         |
| 3)  | $G_o$         | 0.3917            | psi/pie              | 0.3917            | psi/pie | 0.3917             | psi/pie |
| 4)  | $G_s$         | 0.4002            | psi/pie              | 0.40024           | psi/pie | 0.40024            | psi/pie |
| 5)  | $B_T$         | 1.2983            |                      | 1.2983            |         | 1.2983             |         |
| 6)  | $Q_N$         | 265.2884          | bl/día               | 648.7133          | bl/día  | 642.2035           | bl/día  |
| 7)  | $C$           | 239.7772          |                      | 239.7772          |         | 239.7772           |         |
|     | $P_{FN}$      | 1.2840            | psi                  | 6.3636            | psi     | 6.2497             | psi     |
| 8)  | $P_N$         | 7037.8780         | psi                  | 7032.7985         | psi     | 7032.9123          | psi     |
| 9)  | $Q_D$         | 465.2884          | bl/día               | 848.7133          | bl/día  | 842.2035           | bl/día  |
| 10) | $G_D$         | 0.3954            | psi/día              | 0.3937            | psi/día | 0.3938             | psi/día |
| 11) | $F_{WD}$      | 0.0757            |                      | 0.0415            |         | 0.0418             |         |
| 12) | $GLR$         | 63.75400907       |                      | 34.95173124       |         | 35.22189172        |         |
| 13) | $\square_D$   | 3.5775            | cp                   | 3.6961            | cp      | 3.6950             | cp      |
|     | $C$           | 2218.2328         |                      | 2218.2328         |         | 2218.2328          |         |
|     | $P_{FD}$      | 0.4829            | psi                  | 1.4212            | psi     | 1.4017             | psi     |
| 14) | $P_D$         | 3536.6910         | psi                  | 3523.1518         | psi     | 3523.2681          | psi     |
| 15) | $H$           | 0.7274            |                      | 0.7218            |         | 0.7218             |         |
| 16) | $R$           | 0.4               |                      | 0.4               |         | 0.4                |         |
| 17) | $C_1$         | 0.8               |                      | 0.8               |         | 0.8                |         |
|     | $C_2$         | 0.0889            |                      | 0.0889            |         | 0.0889             |         |
|     | $C_3$         | 0.1920            |                      | 0.1920            |         | 0.1920             |         |
|     | $C_4$         | 1.0300            |                      | 1.0300            |         | 1.0300             |         |
|     | $K_{TD}$      | 0.2000            |                      | 0.2000            |         | 0.2000             |         |
|     | $K_N$         | 0.0300            |                      | 0.0300            |         | 0.0300             |         |
|     | $M$           | 0.4089            |                      | 0.4131            |         | 0.4131             |         |
| 18) | <b>%ERROR</b> | 144.5314          |                      | 1.0035            |         | 0.0060             |         |
| 19) | $M_L$         | 0.5323            |                      | 0.5325            |         | 0.5325             |         |
| 20) | Cavitación    | $M < M_L$         | No existe cavitación |                   |         |                    |         |
| 24) | $A_N$         | 0.002594303       |                      | 0.00634655        |         | <b>0.006282803</b> |         |
|     | $A_T$         | 0.006485757       |                      | 0.015866376       |         | <b>0.01570701</b>  |         |
|     | $H_{psup}$    | 16.23564924       |                      | 39.70125543       |         | <b>39</b>          |         |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA A 2.2 RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA ITERACIÓN POZO LGAF – 048, MÉTODO DE SMART**

|     |            | Primera Iteración |                      | Segunda Iteración |         | Tercera Iteración |         |
|-----|------------|-------------------|----------------------|-------------------|---------|-------------------|---------|
| 1)  | PT         | 3600              | Psi                  | 3600              | Psi     | 3600              | psi     |
| 2)  | M          | 1.0000            |                      | 0.3049            |         | 0.3133            |         |
| 3)  | Go         | 0.3938            | psi/pie              | 0.3938            | psi/pie | 0.3938            | psi/pie |
| 4)  | Gs         | 0.4238            | psi/pie              | 0.42382           | psi/pie | 0.42382           | psi/pie |
| 5)  | BT         | 1.2597            |                      | 1.2597            |         | 1.2597            |         |
| 6)  | QN         | 610.1079          | bl/día               | 2000.6826         | bl/día  | 1947.3364         | bl/día  |
| 7)  | C          | 239.7772          |                      | 239.7772          |         | 239.7772          |         |
|     | PFN        | 6.7437            | Psi                  | 56.5105           | Psi     | 53.8418           | psi     |
| 8)  | PN         | 7504.8965         | Psi                  | 7455.1297         | Psi     | 7457.7984         | psi     |
| 9)  | QD         | 1060.1079         | bl/día               | 2450.6826         | bl/día  | 2397.3364         | bl/día  |
| 10) | GD         | 0.4065            | psi/día              | 0.3993            | psi/día | 0.3994            | psi/día |
| 11) | FWD        | 0.2759            |                      | 0.1194            |         | 0.1220            |         |
| 12) | GLR        | 53.93083242       |                      | 23.32921456       |         | 23.84834266       |         |
| 13) | GD         | 3.4443            | cp                   | 4.1284            | cp      | 4.1168            | cp      |
|     | C          | 2481.8174         |                      | 2481.8174         |         | 2481.8174         |         |
|     | PFD        | 2.1668            | Psi                  | 9.9454            | psi     | 9.5579            | psi     |
| 14) | PD         | 4140.5403         | Psi                  | 4076.4075         | psi     | 4077.2399         | psi     |
| 15) | H          | 0.9043            |                      | 0.8815            |         | 0.8813            |         |
| 16) | R          | 0.5               |                      | 0.5               |         | 0.5               |         |
| 17) | C1         | 1                 |                      | 1                 |         | 1                 |         |
|     | C2         | 0.0000            |                      | 0.0000            |         | 0.0000            |         |
|     | C3         | 0.3000            |                      | 0.3000            |         | 0.3000            |         |
|     | C4         | 1.0300            |                      | 1.0300            |         | 1.0300            |         |
|     | KTD        | 0.2000            |                      | 0.2000            |         | 0.2000            |         |
|     | KN         | 0.0300            |                      | 0.0300            |         | 0.0300            |         |
|     | M          | 0.3049            |                      | 0.3133            |         | 0.3134            |         |
| 18) | %ERROR     | 227.9228          |                      | 2.6664            |         | 0.0274            |         |
| 19) | ML         | 0.3631            |                      | 0.3645            |         | 0.3644            |         |
| 20) | Cavitación | M < ML            | No existe cavitación |                   |         |                   |         |
| 24) | AN         | 0.005811662       |                      | 0.019132212       |         | 0.018618164       |         |
|     | AT         | 0.011623323       |                      | 0.038264425       |         | 0.03723633        |         |
|     | Hpsup      | 37.33860178       |                      | 122.4417746       |         | 119               |         |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA A 2.3 RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA ITERACIÓN POZO LGA-018, MÉTODO DE PETRIE**

| <b>PARTE A.- Escoger la tobera e iterar con el caudal de fluido motriz</b> |                   |                   |                   |                   |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Parámetro  | <b>ANÁLISIS 1</b> |                   | <b>ANÁLISIS 2</b> |                   |
| $G_S$ (psi/pie)  | 0.430061128       |                   | 0.4301            |                   |
| $A_{CM}$ (pg <sup>2</sup> )  | 0.008836386       |                   | 0.0016            |                   |
| Fabricante   | CLAW              |                   | CLAW              |                   |
| $A_n$ (pg <sup>2</sup> )   | 0.0148            |                   | 0.0148            |                   |
| Tobera   | 9                 |                   | 9                 |                   |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )   | 0.0148            |                   | 0.0148            |                   |
| Parámetro  | <b>ANÁLISIS 1</b> |                   | <b>ANÁLISIS 2</b> |                   |
|  | <b>Iteración</b>  |                   | <b>Iteración</b>  |                   |
|  | Primera           | Segunda           | Primera           | Segunda           |
| $P_T$ (psi)  | 3500              | 3500              | 3500              | 3500              |
| $P_N$ (psi)  | 7179              | 7146              | 7179              | 7142              |
| $Q_N$ (bl/día)   | 1557              | 1527              | 1664              | 1660              |
| $\Delta Q_N$ (%)   |                   | 1.98              |                   | 0.27              |
| $v$ (pie/seg)  | 2.071790307       | 2.031550489       | 2.214             | 2.208             |
| $N_{RE}$   | 9275.43           | 9095.28           | 9912.10           | 9885.89           |
| Flujo  | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> |
| $\rho_o$ (g/cm3)   | 0.856118546       | 0.856118546       | 0.8561            | 0.8561            |
| $\mu_o$ (cp)   | 4.429557358       | 4.429557358       | 4.4296            | 4.4296            |
| F  | 0.034755713       | 0.034899163       | 0.034274534       | 0.034293599       |
| $P_{FN}$ (psi)   | 33                | 32                | 37                | 37                |
| $\Delta Q_N < 15\%$  |                   | VERDADERO         |                   | VERDADERO         |
| <b>PARTE B.- Iterar con el caudal de producción</b>                        |                   |                   |                   |                   |
| Parámetro  | <b>ANÁLISIS 1</b> |                   | <b>ANÁLISIS 2</b> |                   |
|  | <b>Iteración</b>  |                   | <b>Iteración</b>  |                   |
|  | Primera           | Segunda           | Primera           | Segunda           |
| $Q_D$ (bl/día)   | 1819              | 1954              | 1680              | 1942              |
| $G_D$ (psi/pie)  | 0.392114918       | 0.39474           | 0.3854            | 0.3914            |
| $F_{WD}$   | 0.143993403       | 0.19617230        | 0.0107            | 0.1303            |
| GLR (pie <sup>2</sup> /bl)   | 2                 | 3                 | 0.1815            | 2                 |
| $v_D$ (cst)  | 4.476495956       | 4.2237            | 5.1               | 4.5               |
| $\mu_o$ (cst)  | 3.928507011       | 3.7395            | 4.3934            | 3.9776            |
| $\mu_w$ (cst)  | 1.0052            | 1.0052            | 1.0052            | 1.0052            |
| $v$ (pie/s)  | 0.798295729       | 0.8577314         | 0.7371773         | 0.852137739       |
| $N_{RE}$   | 3832.641856       | 4364              | 3093.01873        | 4031.19757        |
| Flujo  | Turbulento        | Turbulento        | Turbulento        | Turbulento        |
| E  | 1.157420749       | 1.157421          | 1.15742075        | 1.157420749       |
| F  | 0.04184386        | 0.0407176         | 0.04377           | 0.04140           |
| PFD  | 4.556177658       | 5.163668          | 3.9721            | 5.1247            |
| Flujo  | N/A               | N/A               | N/A               | N/A               |
| $P_D$ (psi)  | 3853.174794       | 3878.919803       | 3788.36627        | 3847.123404       |
| H  | 0.859120783       | 0.873769638       | 1.0849            | 1.1220            |
| $M_5$  | 0.219733894       | 0.3216471         | 0.0173            | 0.2437            |

**TABLA A 2.3 CONTINUACIÓN**

|                                   |             |             |             |             |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| R                                 | 0.5         | 0.5         | 0.5         | 0.5         |
| C <sub>1</sub>                    | 1           | 1           | 1           | 1           |
| C <sub>2</sub>                    | 0           | 0           | 0           | 0           |
| C <sub>3</sub>                    | 0.3         | 0.3         | 0.3         | 0.3         |
| C <sub>4</sub>                    | 1.03        | 1.03        | 1.03        | 1.03        |
| M <sub>6</sub>                    | 0.3216      | 0.3162      | 0.2437      | 0.2320      |
| Convergencia                      | No converge | Si converge | No converge | Si converge |
| Q <sub>S</sub> Nuevo              | 427         | 420         | 282         | 268         |
| PARTE C.- Cálculos finales        |             |             |             |             |
| Parámetro                         | ANÁLISIS 1  |             | ANÁLISIS 2  |             |
| A <sub>T</sub> (pg <sup>2</sup> ) | 0.0296      |             | 0.0296      |             |
| Garganta (pg <sup>2</sup> )       | 0.0376      |             | 0.0376      |             |
| Nº                                | H           |             | H           |             |
| Bomba                             | CLAW 9H     |             | CLAW 9H     |             |
| Q <sub>SC</sub> (bl/día)          | 537         |             | 279         |             |
| HP (HP)                           | 91          |             | 99          |             |
| HP al 90% (HP)                    | 101         |             | 110         |             |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA A 2.4 RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA ITERACIÓN POZO LGA-022, MÉTODO DE PETRIE**

| PARTE A.- Escoger la tobera e iterar con el caudal de fluido motriz |                   |                   |                   |                   |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Parámetro   | ANÁLISIS 1        |                   | ANÁLISIS 2        |                   |
| G <sub>S</sub> (psi/pie)  | 0.387628126       |                   | 0.3876            |                   |
| A <sub>CM</sub> (pg <sup>2</sup> )                                  | 0.012854272       |                   | 0.0112            |                   |
| Fabricante  | NATIONAL          |                   | NATIONAL          |                   |
| A <sub>n</sub> (pg <sup>2</sup> )                                   | 0.0212            |                   | 0.0212            |                   |
| Tobera  | 10                |                   | 10                |                   |
| A <sub>N</sub> (pg <sup>2</sup> )                                   | 0.0212            |                   | 0.0212            |                   |
| Parámetro   | ANÁLISIS 1        |                   | ANÁLISIS 2        |                   |
|   | Iteración         |                   | Iteración         |                   |
|   | Primera           | Segunda           | Primera           | Segunda           |
| P <sub>T</sub> (psi)  | 3650              | 3650              | 3650              | 3650              |
| P <sub>N</sub> (psi)  | 6988              | 6947              | 6988              | 6944              |
| Q <sub>N</sub> (bl/día)   | 2136              | 2128              | 2244              | 2236              |
| ΔQ <sub>N</sub> (%)   |                   | 0.36              |                   | 0.36              |
| v (pie/seg)   | 2.841509391       | 2.831300027       | 2.985             | 2.974             |
| N <sub>RE</sub>   | 45839.48          | 45674.78          | 48151.73          | 47980.51          |
| Flujo   | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> |
| ρ <sub>o</sub> (g/cm <sup>3</sup> )                                 | 0.850774485       | 0.850774485       | 0.8508            | 0.8508            |
| μ <sub>o</sub> (cp)   | 1.221627084       | 1.221627084       | 1.2216            | 1.2216            |
| F   | 0.024848835       | 0.024867625       | 0.024593360       | 0.024611765       |
| P <sub>FN</sub> (psi)   | 40                | 40                | 44                | 44                |

**TABLA A 2.4 CONTINUACIÓN**

| $\Delta Q_N < 15\%$                          |                          | VERDADERO   |              | VERDADERO   |
|--|--------------------------|-------------|--------------|-------------|
| PARTE B.- Iterar con el caudal de producción |                          |             |              |             |
| Parámetro                                    | ANÁLISIS 1               |             | ANÁLISIS 2   |             |
|  | Iteración                |             | Iteración    |             |
|  | Primera                  | Segunda     | Primera      | Segunda     |
| $Q_D$ (bl/día)                               | 2595                     | 3176        | 2536         | 2992        |
| $G_D$ (psi/pie)                              | 0.383386988              | 0.38416     | 0.3831       | 0.3838      |
| $F_{WD}$                                     | 0.015835841              | 0.02904346  | 0.0104       | 0.0222      |
| GLR (pie <sup>2</sup> /bl)                   | 20                       | 37          | 13.1644      | 28          |
| $v_D$ (cst)                                  | 1.420323867              | 1.4073      | 1.4          | 1.4         |
| $\mu_O$ (cst)                                | 1.212159039              | 1.2042      | 1.2154       | 1.2083      |
| $\mu_W$ (cst)                                | 1.019                    | 1.0190      | 1.0190       | 1.0190      |
| $v$ (pie/s)                                  | 1.138910332              | 1.3940524   | 1.11276751   | 1.313060878 |
| $N_{RE}$                                     | 17233.55112              | 21289       | 16774.9584   | 19957.33938 |
| Flujo  | Turbulento               | Turbulento  | Turbulento   | Turbulento  |
| $e$  | 1.157420749              | 1.157421    | 1.15742075   | 1.157420749 |
| $F$  | 0.030516004              | 0.0291913   | 0.03069      | 0.02959     |
| PFD  | 6.003962874              | 8.627252    | 5.7579       | 7.7481      |
| Flujo  | N/A                      | N/A         | N/A          | N/A         |
| $P_D$ (psi)                                  | 3315.1                   | 3316.7      | 3315         | 3316        |
| $H$  | 0.532737232              | 0.533412675 | 0.6931       | 0.6935      |
| $M_5$  | 0.253318189              | 0.5686737   | 0.1724       | 0.4346      |
| $R$  | 0.3                      | 0.3         | 0.4          | 0.4         |
| $C_1$  | 0.6                      | 0.6         | 0.8          | 0.8         |
| $C_2$  | 0.073469388              | 0.073469388 | 0.08888889   | 0.08888889  |
| $C_3$  | 0.108                    | 0.108       | 0.192        | 0.192       |
| $C_4$  | 1.03                     | 1.03        | 1.03         | 1.03        |
| $M_6$  | 0.5687                   | 0.5675      | 0.4346       | 0.4342      |
| Convergencia                                 | No converge              | Si converge | No converge  | Si converge |
| $Q_S$ Nuevo                                  | 1048                     | 1046        | 756          | 756         |
| PARTE C.- Cálculos finales                   |                          |             |              |             |
| Parámetro                                    | ANÁLISIS 1               |             | ANÁLISIS 2   |             |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )                     | 0.0424                   |             | 0.0424       |             |
| Garganta (pg <sup>2</sup> )                  | 0.0562                   |             | 0.0562       |             |
| Nº   | 10                       |             | 10           |             |
| Bomba  | NATIONAL 10 <sup>a</sup> |             | NATIONAL 10A |             |
| $Q_{SC}$ (bl/día)                            | 1272                     |             | 933          |             |
| HP (HP)                                      | 132                      |             | 139          |             |
| HP al 90% (HP)                               | 147                      |             | 154          |             |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA A 2.5 RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA ITERACIÓN POZO LGAJ – 035, MÉTODO DE PETRIE**

| <b>PARTE A.- Escoger la tobera e iterar con el caudal de fluido motriz</b> |                   |                   |                   |                   |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Parámetro  | <b>ANÁLISIS 1</b> |                   | <b>ANÁLISIS 2</b> |                   |
| $G_s$ (psi/pie)  | 0.406072712       |                   | 0.4061            |                   |
| $A_{CM}$ (pg <sup>2</sup> )  | 0.005077093       |                   | 0.0050            |                   |
| Fabricante   | KOBE              |                   | KOBE              |                   |
| $A_n$ (pg <sup>2</sup> )   | 0.0144            |                   | 0.0144            |                   |
| Tobera   | 8                 |                   | 8                 |                   |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )   | 0.0144            |                   | 0.0144            |                   |
| Parámetro  | <b>ANÁLISIS 1</b> |                   | <b>ANÁLISIS 2</b> |                   |
|  | <b>Iteración</b>  |                   | <b>Iteración</b>  |                   |
|  | Primera           | Segunda           | Primera           | Segunda           |
| $P_T$ (psi)  | 3450              | 3450              | 3450              | 3450              |
| $P_N$ (psi)  | 7263              | 7237              | 7263              | 7235              |
| $Q_N$ (bl/día)   | 1529              | 1525              | 1581              | 1578              |
| $\Delta Q_N$ (%)   |                   | 0.21              |                   | 0.20              |
| $v$ (pie/seg)  | 2.033563733       | 2.029397016       | 2.104             | 2.099             |
| $N_{RE}$   | 26463.82          | 26409.60          | 27376.52          | 27320.83          |
| Flujo  | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> |
| $\rho_o$ (g/cm3)   | 0.87114748        | 0.87114748        | 0.8711            | 0.8711            |
| $\mu_o$ (cp)   | 1.550642515       | 1.550642515       | 1.5506            | 1.5506            |
| F  | 0.027887484       | 0.027899498       | 0.027689616       | 0.027701460       |
| $P_{FN}$ (psi)   | 26                | 26                | 28                | 28                |
| $\Delta Q_N < 15\%$  |                   | VERDADERO         |                   | VERDADERO         |
| <b>PARTE B.- Iterar con el caudal de producción</b>                        |                   |                   |                   |                   |
| Parámetro  | <b>ANÁLISIS 1</b> |                   | <b>ANÁLISIS 2</b> |                   |
|  | <b>Iteración</b>  |                   | <b>Iteración</b>  |                   |
|  | Primera           | Segunda           | Primera           | Segunda           |
| $Q_D$ (bl/día)   | 1655              | 1871              | 1658              | 1781              |
| $G_D$ (psi/pie)  | 0.394962906       | 0.39624           | 0.3946            | 0.3954            |
| $F_{WD}$   | 0.023009804       | 0.05410540        | 0.0141            | 0.0334            |
| GLR (pie <sup>2</sup> /bl)   | 12                | 29                | 7.5049            | 18                |
| $v_D$ (cst)  | 1.746175589       | 1.7005            | 1.8               | 1.7               |
| $\mu_o$ (cst)  | 1.526554546       | 1.4937            | 1.5359            | 1.5156            |
| $\mu_w$ (cst)  | 1.005             | 1.0050            | 1.0050            | 1.0050            |
| $v$ (pie/s)  | 0.726489207       | 0.8210523         | 0.72764403        | 0.781633686       |
| $N_{RE}$   | 8941.572105       | 10377             | 8889.38956        | 9705.169727       |
| Flujo  | Turbulento        | Turbulento        | Turbulento        | Turbulento        |
| E  | 1.157420749       | 1.157421          | 1.15742075        | 1.157420749       |
| F  | 0.035024299       | 0.0339461         | 0.03507           | 0.03443           |
| PFD  | 3.185164673       | 3.961859          | 3.1949            | 3.6299            |
| Flujo  | N/A               | N/A               | N/A               | N/A               |
| $P_D$ (psi)  | 3786.6            | 3755.1            | 3872.11255        | 3815.5            |
| H  | 0.851081535       | 0.80343           | 1.0324            | 0.9987            |
| $M_5$  | 0.122175288       | 0.3246779         | 0.1027            | 0.2607            |
| R  | 0.5               | 0.5               | 0.5               | 0.5               |
| $C_1$  | 1                 | 1                 | 1                 | 1                 |
| $C_2$  | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |

**TABLA A 2.5 CONTINUACIÓN**

|                                   |             |             |                     |             |
|-----------------------------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|
| C <sub>3</sub>                    | 0.3         | 0.3         | 0.3                 | 0.3         |
| C <sub>4</sub>                    | 1.03        | 1.03        | 1.03                | 1.03        |
| M <sub>6</sub>                    | 0.3247      | 0.3311      | 0.2607              | 0.2719      |
| Convergencia                      | No converge | Si converge | No converge         | Si converge |
| Q <sub>s</sub> Nuevo              | 345         | 352         | 203                 | 212         |
| PARTE C.- Cálculos finales        |             |             |                     |             |
| Parámetro                         | ANÁLISIS 1  |             | ANÁLISIS 2          |             |
| A <sub>T</sub> (pg <sup>2</sup> ) | 0.036       |             | 0.0288              |             |
| Garganta                          | 0.0395      |             | 0.0395              |             |
| Nº                                | 8           |             | 8                   |             |
| Bomba                             | KOBE 8A     |             | KOBE 8 <sup>a</sup> |             |
| Q <sub>SC</sub> (bl/día)          | 496         |             | 267                 |             |
| HP (HP)                           | 89          |             | 93                  |             |
| HP al 90%                         | 99          |             | 103                 |             |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA A 2.6 RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA ITERACIÓN POZO LGA – 038, MÉTODO DE PETRIE**

| PARTE A.- Escoger la tobera e iterar con el caudal de fluido motriz |                   |                   |                   |                   |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Parámetro   | ANÁLISIS 1        |                   | ANÁLISIS 2        |                   |
| G <sub>S</sub> (psi/pie)  | 0.387940132       |                   | 0.3879            |                   |
| A <sub>CM</sub> (pg <sup>2</sup> )                                  | 0.009420425       |                   | 0.0097            |                   |
| Fabricante  | CLAW              |                   | CLAW              |                   |
| A <sub>n</sub> (pg <sup>2</sup> )                                   | 0.0122            |                   | 0.0122            |                   |
| Tobera  | 8                 |                   | 8                 |                   |
| A <sub>N</sub> (pg <sup>2</sup> )                                   | 0.0122            |                   | 0.0122            |                   |
| Parámetro   | ANÁLISIS 1        |                   | ANÁLISIS 2        |                   |
|   | Iteración         |                   | Iteración         |                   |
|   | Primera           | Segunda           | Primera           | Segunda           |
| P <sub>T</sub> (psi)  | 3500              | 3500              | 3500              | 3500              |
| P <sub>N</sub> (psi)  | 7137              | 7119              | 7137              | 7119              |
| Q <sub>N</sub> (bl/día)   | 1279              | 1277              | 1306              | 1304              |
| ΔQ <sub>N</sub> (%)   |                   | 0.14              |                   | 0.14              |
| v (pie/seg)   | 1.701832211       | 1.699406159       | 1.738             | 1.735             |
| N <sub>RE</sub>   | 27567.38          | 27528.08          | 28148.63          | 28108.68          |
| Flujo   | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> |
| ρ <sub>O</sub> (g/cm <sup>3</sup> )                                 | 0.842693789       | 0.842693789       | 0.8427            | 0.8427            |
| μ <sub>O</sub> (cp)   | 1.205052119       | 1.205052119       | 1.2051            | 1.2051            |
| F   | 0.027649248       | 0.027657532       | 0.027528359       | 0.027536571       |
| P <sub>FN</sub> (psi)   | 17                | 17                | 18                | 18                |
| ΔQ <sub>N</sub> <15%  |                   | VERDADERO         |                   | VERDADERO         |
| PARTE B.- Iterar con el caudal de producción                        |                   |                   |                   |                   |
| Parámetro   | ANÁLISIS 1        |                   | ANÁLISIS 2        |                   |
|   | Iteración         |                   | Iteración         |                   |
|   | Primera           | Segunda           | Primera           | Segunda           |
| Q <sub>D</sub> (bl/día)   | 1564              | 1732              | 1554              | 1682              |

**TABLA A 2.6 CONTINUACIÓN**

|                             |             |             |             |             |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $G_D$ (psi/pie)             | 0.383657444 | 0.38407     | 0.3835      | 0.3839      |
| $F_{WD}$                    | 0.01761247  | 0.02520392  | 0.0154      | 0.0216      |
| GLR (pie <sup>2</sup> /bl)  | 25          | 35          | 21.5198     | 30          |
| $v_D$ (cst)                 | 1.412739779 | 1.4053      | 1.4         | 1.4         |
| $\mu_o$ (cst)               | 1.194669924 | 1.1902      | 1.1960      | 1.1923      |
| $\mu_w$ (cst)               | 1.01        | 1.0100      | 1.0100      | 1.0100      |
| $v$ (pie/s)                 | 0.686537028 | 0.7601543   | 0.68212244  | 0.738194067 |
| $N_{RE}$                    | 10444.18174 | 11625       | 10361.4169  | 11260.87038 |
| Flujo                       | Turbulento  | Turbulento  | Turbulento  | Turbulento  |
| E                           | 1.157420749 | 1.157421    | 1.15742075  | 1.157420749 |
| F                           | 0.033900237 | 0.0331460   | 0.03396     | 0.03337     |
| PFD                         | 2.614997202 | 3.139259    | 2.5847      | 2.9782      |
| Flujo                       | N/A         | N/A         | N/A         | N/A         |
| $P_D$ (psi)                 | 3505.2      | 3476.9      | 3510.1      | 3495.9      |
| H                           | 0.676823459 | 0.663795696 | 0.7510      | 0.7441      |
| $M_5$                       | 0.282120316 | 0.4470129   | 0.2592      | 0.3917      |
| R                           | 0.4         | 0.4         | 0.4         | 0.4         |
| $C_1$                       | 0.8         | 0.8         | 0.8         | 0.8         |
| $C_2$                       | 0.088888889 | 0.088888889 | 0.08888889  | 0.088888889 |
| $C_3$                       | 0.192       | 0.192       | 0.192       | 0.192       |
| $C_4$                       | 1.03        | 1.03        | 1.03        | 1.03        |
| $M_6$                       | 0.4470      | 0.4571      | 0.3917      | 0.3967      |
| Convergencia                | No converge | Si converge | No converge | Si converge |
| $Q_s$ Nuevo                 | 455         | 465         | 378         | 383         |
| PARTE C.- Cálculos finales  |             |             |             |             |
| Parámetro                   | ANÁLISIS 1  |             | ANÁLISIS 2  |             |
| $A_T$ (pg <sup>2</sup> )    | 0.0244      |             | 0.0244      |             |
| Garganta (pg <sup>2</sup> ) | 0.0311      |             | 0.0311      |             |
| Nº                          | G           |             | G           |             |
| Bomba                       | CLAW 8G     |             | CLAW 8G     |             |
| $Q_{SC}$ (bl/día)           | 576         |             | 489         |             |
| HP (HP)                     | 76          |             | 78          |             |
| HP al 90% (HP)              | 84          |             | 86          |             |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA A 2.7 RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA ITERACIÓN POZO LGA – 039, MÉTODO DE PETRIE**

| <b>PARTE A.- Escoger la tobera e iterar con el caudal de fluido motriz</b> |                   |                   |                   |                   |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Parámetro  | <b>ANÁLISIS 1</b> |                   | <b>ANÁLISIS 2</b> |                   |
| $G_S$ (psi/pie)  | 0.391604873       |                   | 0.3916            |                   |
| $A_{CM}$ (pg <sup>2</sup> )  | 0.025547652       |                   | 0.0208            |                   |
| Fabricante   | NATIONAL          |                   | NATIONAL          |                   |
| $A_n$ (pg <sup>2</sup> )   | 0.0212            |                   | 0.0212            |                   |
| Tobera   | 10                |                   | 10                |                   |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )   | 0.0212            |                   | 0.0212            |                   |
| Parámetro  | <b>ANÁLISIS 1</b> |                   | <b>ANÁLISIS 2</b> |                   |
|  | <b>Iteración</b>  |                   | <b>Iteración</b>  |                   |
|  | Primera           | Segunda           | Primera           | Segunda           |
| $P_T$ (psi)  | 3580              | 3580              | 3580              | 3580              |
| $P_N$ (psi)  | 7197              | 7150              | 7197              | 7148              |
| $Q_N$ (bl/día)   | 2233              | 2224              | 2281              | 2272              |
| $\Delta Q_N$ (%)   |                   | 0.39              |                   | 0.39              |
| $v$ (pie/seg)  | 2.970280856       | 2.958681246       | 3.035             | 3.023             |
| $N_{RE}$   | 44104.98          | 43932.74          | 45065.52          | 44890.33          |
| Flujo  | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> |
| $\rho_o$ (g/cm <sup>3</sup> )  | 0.846234139       | 0.846234139       | 0.8462            | 0.8462            |
| $\mu_o$ (cp)   | 1.320125256       | 1.320125256       | 1.3201            | 1.3201            |
| F  | 0.025050936       | 0.025071529       | 0.024937852       | 0.024958259       |
| $P_{FN}$ (psi)   | 48                | 47                | 50                | 49                |
| $\Delta Q_N < 15\%$  |                   | VERDADERO         |                   | VERDADERO         |
| <b>PARTE B.- Iterar con el caudal de producción</b>                        |                   |                   |                   |                   |
| Parámetro  | <b>ANÁLISIS 1</b> |                   | <b>ANÁLISIS 2</b> |                   |
|  | <b>Iteración</b>  |                   | <b>Iteración</b>  |                   |
|  | Primera           | Segunda           | Primera           | Segunda           |
| $Q_D$ (bl/día)   | 2956              | 3001              | 2772              | 2895              |
| $G_D$ (psi/pie)  | 0.384721881       | 0.38483           | 0.3841            | 0.3844            |
| $F_{WD}$   | 0.042842194       | 0.04480145        | 0.0312            | 0.0372            |
| GLR (pie <sup>2</sup> /bl)   | 47                | 49                | 34.3049           | 41                |
| $v_D$ (cst)  | 1.506447257       | 1.5040            | 1.5               | 1.5               |
| $\mu_o$ (cst)  | 1.285079583       | 1.2835            | 1.2947            | 1.2897            |
| $\mu_w$ (cst)  | 1.0054            | 1.0054            | 1.0054            | 1.0054            |
| $v$ (pie/s)  | 1.297228814       | 1.3170543         | 1.21668511        | 1.270382579       |
| $N_{RE}$   | 18506.96844       | 18820             | 17191.8248        | 18039.43089       |
| Flujo  | Turbulento        | Turbulento        | Turbulento        | Turbulento        |
| E  | 1.157420749       | 1.157421          | 1.15742075        | 1.157420749       |
| F  | 0.03006256        | 0.0299567         | 0.03053           | 0.03022           |
| PFD  | 8.312441581       | 8.541416          | 7.4102            | 8.0065            |
| Flujo  | N/A               | N/A               | N/A               | N/A               |
| $P_D$ (psi)  | 3405.2            | 3401.7            | 3423.7            | 3413.6            |
| H  | 0.623720243       | 0.622203884       | 0.7046            | 0.6999            |
| $M_5$  | 0.460408464       | 0.4888220         | 0.3422            | 0.4259            |

TABLA A 2.7 CONTINUACIÓN

|                                   |              |             |              |             |
|-----------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| R                                 | 0.4          | 0.4         | 0.4          | 0.4         |
| C <sub>1</sub>                    | 0.8          | 0.8         | 0.8          | 0.8         |
| C <sub>2</sub>                    | 0.0889       | 0.0889      | 0.0889       | 0.0889      |
| C <sub>3</sub>                    | 0.192        | 0.192       | 0.192        | 0.192       |
| C <sub>4</sub>                    | 1.03         | 1.03        | 1.03         | 1.03        |
| M <sub>6</sub>                    | 0.4888       | 0.49        | 0.4259       | 0.4294      |
| Convergencia                      | No converge  | Si converge | No converge  | Si converge |
| Q <sub>s</sub> Nuevo              | 777          | 779         | 622          | 627         |
| PARTE C.- Cálculos finales        |              |             |              |             |
| Parámetro                         | ANÁLISIS 1   |             | ANÁLISIS 2   |             |
| A <sub>T</sub> (pg <sup>2</sup> ) | 0.0424       |             | 0.0424       |             |
| Garganta (pg <sup>2</sup> )       | 0.0562       |             | 0.0562       |             |
| Nº                                | 10           |             | 10           |             |
| Bomba                             | NATIONAL 10A |             | NATIONAL 10A |             |
| Q <sub>SC</sub> (bl/día)          | 1003         |             | 840          |             |
| HP (HP)                           | 135          |             | 138          |             |
| HP al 90% (HP)                    | 150          |             | 154          |             |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

TABLA A 2.8 RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA ITERACIÓN POZO LGA – 043, MÉTODO DE PETRIE

| PARTE A.- Escoger la tobera e iterar con el caudal de fluido motriz |                   |                   |                   |                   |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Parámetro   | ANÁLISIS 1        |                   | ANÁLISIS 2        |                   |
| G <sub>S</sub> (psi/pie)  | 0.401541388       |                   | 0.4015            |                   |
| A <sub>CM</sub> (pg <sup>2</sup> )                                  | 0.009273665       |                   | 0.0082            |                   |
| Fabricante  | NATIONAL          |                   | NATIONAL          |                   |
| A <sub>n</sub> (pg <sup>2</sup> )                                   | 0.0167            |                   | 0.0167            |                   |
| Tobera  | 9                 |                   | 9                 |                   |
| A <sub>N</sub> (pg <sup>2</sup> )                                   | 0.0167            |                   | 0.0167            |                   |
| Parámetro   | ANÁLISIS 1        |                   | ANÁLISIS 2        |                   |
|   | Iteración         |                   | Iteración         |                   |
|   | Primera           | Segunda           | Primera           | Segunda           |
| P <sub>T</sub> (psi)  | 3700              | 3700              | 3700              | 3700              |
| P <sub>N</sub> (psi)  | 7336              | 7296              | 7336              | 7294              |
| Q <sub>N</sub> (bl/día)   | 1802              | 1796              | 1830              | 1824              |
| ΔQ <sub>N</sub> (%)   |                   | 0.31              |                   | 0.31              |
| v (pie/seg)   | 2.397157367       | 2.38969284        | 2.434             | 2.427             |
| N <sub>RE</sub>   | 14460.39          | 14415.36          | 14683.37          | 14637.79          |
| Flujo   | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> |
| ρ <sub>o</sub> (g/cm <sup>3</sup> )                                 | 0.857439846       | 0.857439846       | 0.8574            | 0.8574            |
| μ <sub>o</sub> (cp)   | 3.29256901        | 3.29256901        | 3.2926            | 3.2926            |
| F   | 0.031661286       | 0.031682029       | 0.031559708       | 0.031580318       |
| P <sub>FN</sub> (psi)   | 40                | 40                | 41                | 41                |
| ΔQ <sub>N</sub> < 15%   |                   | VERDADERO         |                   | VERDADERO         |

**TABLA A 2.8 CONTINUACIÓN**

| PARTE B.- Iterar con el caudal de producción |                         |             |                         |             |
|--|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| Parámetro                                    | ANÁLISIS 1              |             | ANÁLISIS 2              |             |
|  | Iteración               |             | Iteración               |             |
|  | Primera                 | Segunda     | Primera                 | Segunda     |
| Q <sub>D</sub> (bl/día)                      | 1996                    | 2164        | 1974                    | 2108        |
| G <sub>D</sub> (psi/pie)                     | 0.384583403             | 0.38590     | 0.3841                  | 0.3852      |
| F <sub>WD</sub>                              | 0.035868238             | 0.06091098  | 0.0272                  | 0.0483      |
| GLR (pie <sup>2</sup> /bl)                   | 35                      | 60          | 26.6374                 | 47          |
| v <sub>D</sub> (cst)                         | 3.717689308             | 3.6323      | 3.7                     | 3.7         |
| μ <sub>O</sub> (cst)                         | 3.207424987             | 3.1472      | 3.2281                  | 3.1776      |
| μ <sub>W</sub> (cst)                         | 1.0054                  | 1.0054      | 1.0054                  | 1.0054      |
| v (pie/s)                                    | 0.876060471             | 0.9499069   | 0.86628038              | 0.925342332 |
| N <sub>RE</sub>                              | 5064.465547             | 5620        | 4968.44632              | 5411.156693 |
| Flujo  | Turbulento              | Turbulento  | Turbulento              | Turbulento  |
| e  | 1.157420749             | 1.157421    | 1.15742075              | 1.157420749 |
| F  | 0.0394652               | 0.0386113   | 0.03962                 | 0.03892     |
| PFD  | 5.055726479             | 5.840344    | 4.9560                  | 5.5745      |
| Flujo  | N/A                     | N/A         | N/A                     | N/A         |
| P <sub>D</sub> (psi)                         | 3539.2                  | 3477.9      | 3556.8                  | 3516.1      |
| H  | 0.702590024             | 0.675251804 | 0.7643                  | 0.7453      |
| M <sub>5</sub>                               | 0.232118623             | 0.4274078   | 0.2014                  | 0.3821      |
| R  | 0.4                     | 0.4         | 0.4                     | 0.4         |
| C <sub>1</sub>                               | 0.8                     | 0.8         | 0.8                     | 0.8         |
| C <sub>2</sub>                               | 0.08888889              | 0.08888889  | 0.08888889              | 0.08888889  |
| C <sub>3</sub>                               | 0.192                   | 0.192       | 0.192                   | 0.192       |
| C <sub>4</sub>                               | 1.03                    | 1.03        | 1.03                    | 1.03        |
| M <sub>6</sub>                               | 0.4274                  | 0.4482      | 0.3821                  | 0.3958      |
| Convergencia                                 | No converge             | Si converge | No converge             | Si converge |
| Q <sub>S</sub> Nuevo                         | 368                     | 386         | 285                     | 295         |
| PARTE C.- Cálculos finales                   |                         |             |                         |             |
| Parámetro                                    | ANÁLISIS 1              |             | ANÁLISIS 2              |             |
| A <sub>T</sub> (pg <sup>2</sup> )            | 0.04175                 |             | 0.0334                  |             |
| Garganta (pg <sup>2</sup> )                  | 0.0441                  |             | 0.0441                  |             |
| Nº   | 9                       |             | 9                       |             |
| Bomba  | NATIONAL 9 <sup>a</sup> |             | NATIONAL 9 <sup>a</sup> |             |
| Q <sub>SC</sub> (bl/día)                     | 591                     |             | 498                     |             |
| HP (HP)                                      | 113                     |             | 115                     |             |
| HP al 90% (HP)                               | 126                     |             | 127                     |             |

ELABORADO POR: Becerra Freddy

**TABLA A 2.9 RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA ITERACIÓN POZO  
LGA – 044, MÉTODO DE PETRIE**

| PARTE A.- Escoger la tobera e iterar con el caudal de fluido motriz |                   |                   |                   |                   |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Parámetro   | ANÁLISIS 1        |                   | ANÁLISIS 2        |                   |
| $G_S$ (psi/pie)   | 0.399909455       |                   | 0.3999            |                   |
| $A_{CM}$ (pg <sup>2</sup> )   | 0.008256879       |                   | 0.0073            |                   |
| Fabricante  | KOBE              |                   | KOBE              |                   |
| $A_n$ (pg <sup>2</sup> )  | 0.0111            |                   | 0.0111            |                   |
| Tobera  | 7                 |                   | 7                 |                   |
| $A_N$ (pg <sup>2</sup> )  | 0.0111            |                   | 0.0111            |                   |
| Parámetro   | ANÁLISIS 1        |                   | ANÁLISIS 2        |                   |
|   | Iteración         |                   | Iteración         |                   |
|   | Primera           | Segunda           | Primera           | Segunda           |
| $P_T$ (psi)   | 3650              | 3650              | 3650              | 3650              |
| $P_N$ (psi)   | 7332              | 7311              | 7332              | 7310              |
| $Q_N$ (bl/día)  | 1229              | 1228              | 1261              | 1259              |
| $\Delta Q_N$ (%)  |                   | 0.15              |                   | 0.15              |
| $v$ (pie/seg)   | 1.635581377       | 1.633138581       | 1.677             | 1.675             |
| $N_{RE}$  | 9519.27           | 9505.06           | 9761.83           | 9747.33           |
| Flujo   | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> | <b>Turbulento</b> |
| $\rho_o$ (g/cm3)  | 0.842693789       | 0.842693789       | 0.8427            | 0.8427            |
| $\mu_o$ (cp)  | 3.353921281       | 3.353921281       | 3.3539            | 3.3539            |
| F   | 0.034566831       | 0.034577682       | 0.034384664       | 0.034395401       |
| $P_{FN}$ (psi)  | 20                | 20                | 21                | 21                |
| $\Delta Q_N < 15\%$   |                   | VERDADERO         |                   | VERDADERO         |
| PARTE B.- Iterar con el caudal de producción                        |                   |                   |                   |                   |
| Parámetro   | ANÁLISIS 1        |                   | ANÁLISIS 2        |                   |
|   | Iteración         |                   | Iteración         |                   |
|   | Primera           | Segunda           | Primera           | Segunda           |
| $Q_D$ (bl/día)  | 1348              | 1356              | 1309              | 1301              |
| $G_D$ (psi/pie)   | 0.384228145       | 0.38432           | 0.3834            | 0.3833            |
| $F_{WD}$  | 0.029119802       | 0.03091654        | 0.0125            | 0.0106            |
| GLR (pie <sup>2</sup> /bl)  | 36                | 38                | 15.4260           | 13                |
| $v_D$ (cst)   | 3.876624701       | 3.8702            | 3.9               | 3.9               |
| $\mu_o$ (cst)   | 3.285174901       | 3.2809            | 3.3245            | 3.3289            |
| $\mu_w$ (cst)   | 1.0054            | 1.0054            | 1.0054            | 1.0054            |
| $v$ (pie/s)   | 0.591386875       | 0.5949756         | 0.57439774        | 0.571015041       |
| $N_{RE}$  | 3278.615984       | 3304              | 3136.66803        | 3112.964187       |
| Flujo   | Turbulento        | Transición        | Turbulento        | Transición        |
| E   | 1.157420749       | 1.157421          | 1.15742075        | 1.157420749       |
| F   | 0.043238573       | 0.0431687         | 0.04364           | 0.04371           |
| PFD   | 2.51066401        | N/A               | 2.3830            | N/A               |
| Flujo   | N/A               | N/A               | N/A               | N/A               |
| $P_D$ (psi)   | 3613.7            | 3606.7            | 3697.7            | 3702.6            |
| H   | 0.828567617       | 0.825112448       | 0.9682            | 0.9709            |
| $M_5$   | 0.315839408       | 0.3373620         | 0.3338            | 0.2823            |
| R   | 0.4               | 0.4               | 0.5               | 0.5               |

**TABLA A 2.9 CONTINUACIÓN**

|                                   |             |             |             |             |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| C <sub>1</sub>                    | 0.8         | 0.8         | 1           | 1           |
| C <sub>2</sub>                    | 0.088888889 | 0.088888889 | 0           | 0           |
| C <sub>3</sub>                    | 0.192       | 0.192       | 0.3         | 0.3         |
| C <sub>4</sub>                    | 1.03        | 1.03        | 1.03        | 1.03        |
| M <sub>6</sub>                    | 0.3374      | 0.3397      | 0.2823      | 0.2814      |
| Convergencia                      | No converge | Si converge | No converge | Si converge |
| Q <sub>s</sub> Nuevo              | 128         | 129         | 42          | 42          |
| PARTE C.- Cálculos finales        |             |             |             |             |
| Parámetro                         | ANÁLISIS 1  |             | ANÁLISIS 2  |             |
| A <sub>T</sub> (pg <sup>2</sup> ) | 0.02775     |             | 0.0222      |             |
| Garganta (pg <sup>2</sup> )       | 0.0278      |             | 0.0278      |             |
| Nº                                | 9           |             | 9           |             |
| Bomba                             | KOBE 7A     |             | KOBE 7A     |             |
| Q <sub>SC</sub> (bl/día)          | 243         |             | 114         |             |
| HP (HP)                           | 76          |             | 78          |             |
| HP al 90% (HP)                    | 85          |             | 87          |             |

ELABORADO POR: Becerra Freddy