



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

**“IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA POWER OIL MOVIL UTILIZANDO HPS  
EN POZOS CON SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL  
HIDRÁULICO EN LA MISMA LOCACIÓN”**

**PROYECTO DE GRADO**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN PETRÓLEO**

Presentada por:

**JUAN CARLOS RENGIFO CALDERÓN**

**KEVIN BENJAMÍN TOBAR MERCADO**

GUAYAQUIL - ECUADOR  
2018

## DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso, cuyos planes y tiempo son perfectos, quien me brindó salud y bienestar para llegar a este momento.

A mis padres, Juan Rengifo y Doris Calderón, quienes día a día dedicaron sus esfuerzos para ayudarme a construir un buen futuro.

A mi esposa y a la vez mi fuerza, Jeniffer Bajaña; cuya compañía, apoyo, comprensión y guía, me ayudaron a culminar con esta meta.

A mi hija, Isabella Rengifo Bajaña, fuente de alegría e inspiración para cumplir con ésta labor; con la finalidad de protegerte y verte siempre sonreír.

Juan Carlos Rengifo Calderón

## DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis a mi familia que siempre confiaron en que este día llegara por gracia de Dios, pero en especial a mi madre que fue la persona que siempre estuvo en pie de lucha junto a mí.

A los profesores que han estado en cada etapa de mi vida profesional quienes fueron un gran ejemplo de superación y supieron transmitir sus conocimientos de la mejor manera, a mis compañeros que siempre me ayudaron en los problemas que no podía resolver solo.

Kevin Benjamín Tobar Mercado

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente, a quien ha forjado nuestra vida y dirigido por el camino correcto, Dios; que en todo momento está con nosotros, ayudándonos a aprender de los errores y no cometerlos otra vez.

A la familia y amigos, quiénes con su apoyo y compañía incondicional, fueron pilar en todo momento durante la vida académica y personal.

A nuestra alma mater, ESPOL, conjunto a todos aquellos docentes que aportaron con sus conocimientos a nuestro desarrollo académico, profesional y personal.

Juan Carlos Rengifo Calderón

Kevin Benjamín Tobar Mercado

## **TRIBUNAL DEL PROYECTO**

---

Ing. Xavier Ernesto Vargas Gutierrez  
MIEMBRO EVALUADOR

---

Ing. Danilo Andrés Arcentales Bastidas  
PROFESOR DE MATERIA INTEGRADORA

---

Ing. Fernando Javier Sagnay Sares  
TUTOR DE PROYECTO DE GRADO

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Materia Integradora, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral.”

(Art. 12 del Reglamento de Graduación de la ESPOL)

\_\_\_\_\_  
Juan Carlos Rengifo Calderón

\_\_\_\_\_  
Kevin Benjamín Tobar Mercado

## **RESUMEN**

Al utilizar un sistema de levantamiento artificial hidráulico el uso de los diferentes equipos de superficie destinados a proporcionar fluidos motriz en el pozo es de vital importancia para la recuperación del hidrocarburo de los yacimientos.

Los equipos utilizados para este tipo de pruebas se los denomina como facilidades tempranas de producción. Los equipos utilizados para pruebas de completación, admisión e inyectividad y de producción se denominan MTU (Móvil Testing Unit), mientras que para la producción de pozos se puede emplear MTU convencional, eléctrica y HPS (Horizontal Pump System).

En el presente trabajo se mencionará un equipo de vital importancia para realizar la producción de pozos con sistema de levantamiento hidráulico, el sistema de bombeo horizontal móvil (HPS). La empresa Sertecpet realiza la asistencia de renta de estos equipos en un lapso determinado por el requerimiento del cliente que lo implementa.

## ÍNDICE GENERAL

|                                   |             |
|-----------------------------------|-------------|
| <b>DEDICATORIA</b>                | <b>II</b>   |
| <b>AGRADECIMIENTO</b>             | <b>IV</b>   |
| <b>TRIBUNAL DEL PROYECTO</b>      | <b>V</b>    |
| <b>DECLARACIÓN EXPRESA</b>        | <b>VI</b>   |
| <b>RESUMEN</b>                    | <b>VII</b>  |
| <b>ÍNDICE GENERAL</b>             | <b>VIII</b> |
| <b>ABREVIATURAS</b>               | <b>XI</b>   |
| <b>SIMBOLOGÍA</b>                 | <b>XIII</b> |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>          | <b>XIV</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b>           | <b>XVII</b> |
| <b>CAPÍTULO 1</b>                 | <b>18</b>   |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>               | <b>18</b>   |
| 1.1 Preámbulo.                    | 19          |
| 1.2 Hipótesis.                    | 20          |
| 1.3 Objetivos.                    | 20          |
| 1.3.1 Objetivo General.           | 20          |
| 1.3.2 Objetivos Específicos.      | 21          |
| 1.4 Justificación del Proyecto.   | 21          |
| 1.5 Metodología de investigación. | 22          |
| <b>CAPÍTULO 2</b>                 | <b>23</b>   |



|   |           |
|---|-----------|
| <b>DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</b>                            | <b>23</b> |
| 2.1 Ubicación y Mapa del campo Isabella.                          | 24        |
| 2.1.1 Geología.   | 25        |
| 2.1.2 Litología del campo Isabella.                               | 27        |
| 2.2 Sistema de Levantamiento Artificial (SLA): Bombeo Hidráulico. | 29        |
| 2.2.1 Tipos de bombeo hidráulico                                  | 30        |
| 2.2.2 Componentes del equipo.                                     | 34        |
| 2.2.3 Procedimiento operativo del bombeo hidráulico tipo Jet.     | 44        |
| 2.2.4 Ventajas y desventajas del bombeo hidráulico                | 46        |
| 2.3 Unidad Móvil Horizontal / Horizontal Pump System(HPS).        | 48        |
| 2.3.1 Componentes de la HPS:                                      | 48        |
| 2.3.2 Proceso operativo de la HPS                                 | 56        |
| <b>CAPÍTULO 3</b>   | <b>59</b> |
| <b>METODOLOGÍA</b>  | <b>59</b> |
| 3.1 Metodología de Investigación                                  | 60        |
| 3.2 Metodología de Campo  | 61        |
| 3.3 Desarrollo  | 61        |
| <b>CAPÍTULO 4</b>   | <b>78</b> |
| <b>ANÁLISIS Y RESULTADOS</b>                                      | <b>78</b> |
| 4.1 Análisis técnico.   | 79        |
| 4.1.1 Sustitución de geometrías actuales                          | 83        |
| 4.2 Análisis Económico  | 90        |

|   |            |
|---|------------|
| 4.2.1 Consumo específico de combustible en un sistema centralizado.<br>(condiciones actuales del pozo)_____   | 93         |
| 4.2.2 Consumo específico de combustible, individual, con unidad MTU.<br>(OPCION UNO) _____  | 95         |
| 4.2.3 Precio final con la implementación de las unidades móviles de<br>prueba. _____  | 102        |
| 4.2.4 Consumo específico de electricidad para la producción del campo<br>Isabella con el uso de las unidades de bombeo horizontal(HPS), sistema<br>centralizado (OPCIÓN DOS). _____ | 102        |
| 4.2.5 Costo del consumo Energético diario. _____  | 104        |
| 4.2.6 Precio final con la implementación de la unidad de bombeo horizontal<br>HPS. _____  | 106        |
| 4.3 Análisis Ambiental. _____   | 106        |
| <b>CAPÍTULO 5</b> _____   | <b>111</b> |
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> _____   | <b>111</b> |
| <b>Conclusiones</b> _____   | <b>112</b> |
| <b>Recomendaciones</b> _____  | <b>114</b> |

ANEXO

BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

|                   |  |
|-------------------|--|
| <b>API</b>        | American Petroleum Institute.<br>Instituto Americano del Petróleo. |
| <b>bbl, bbls</b>  | Barrel, barrels. (barril, barriles)                                |
| <b>bbl/d, BPD</b> | Barrels per day. (barriles por día)                                |
| <b>bbl/h, BPH</b> | barrels per hour. (barriles por hora)                              |
| <b>BS&amp;W</b>   | agua y sedimento (S&W)   |
| <b>°C</b>         | Celsius, grados Centígrados.                                       |
| <b>CF</b>         | Crudo Fiscalizado  |
| <b>cfm</b>        | cubic feet per minute. (pie cúbico por minuto)                     |
| <b>cm</b>         | Centimetre. (Centímetro)   |
| <b>CSMS</b>       | Calidad, Seguridad, Medio Ambiente y Salud.                        |
| <b>D/P</b>        | Diferencial Pressure (Presión Diferencial.)                        |
| <b>fpm</b>        | feet per minute. (pie por minuto)                                  |
| <b>geo</b>        | geometría interna de la bomba hidráulica                           |
| <b>IP</b>         | Institute of Petroleum (Instituto de Petróleo)                     |
| <b>ID</b>         | Internal diameter  |
| <b>°K</b>         | Kelvin (Grados Kelvin)   |
| <b>Kg</b>         | Kilogram. (kilogramo)  |
| <b>OD</b>         | Outside Diameter. (Diámetro Externo)                               |

|              |  |
|--------------|--|
| <b>PI</b>    | Presión inicial  |
| <b>Piny</b>  | Presion de Inyección   |
| <b>Pip</b>   | Pressure intake pump.  |
| <b>ppm</b>   | Parts per million. (Partes por millón)                                     |
| <b>Prod</b>  | Produccion deseada   |
| <b>psi</b>   | pounds per square inch.<br>(libras por pulgada cuadrada)                   |
| <b>psig</b>  | pounds per square inch gauge.<br>(Libras por pulgada cuadrada manométrica) |
| <b>PT</b>    | Indicador de Temperatura   |
| <b>PV</b>    | Válvula de Presión   |
| <b>Q Cav</b> | Caudal de cavitacion   |
| <b>rpm</b>   | Revoluciones por minuto  |

## SIMBOLOGÍA

|                       |                            |
|-----------------------|----------------------------|
| <b>cm<sup>3</sup></b> | Centímetros al cubo        |
| <b>cP</b>             | Centi-poise                |
| <b>ft</b>             | Feet                       |
| <b>h</b>              | Hora                       |
| <b>in</b>             | Pulgadas                   |
| <b>km<sup>2</sup></b> | Kilómetros Cuadrados       |
| <b>lbf</b>            | Libras fuerza              |
| <b>lpg</b>            | Libra por Galón            |
| <b>mg/L</b>           | Miligramos sobre litro     |
| <b>min</b>            | Minutos                    |
| <b>mm</b>             | Milímetros                 |
| <b>psi</b>            | Libra por pulgada cuadrada |
| <b>s</b>              | Segundos                   |
| <b>ppg</b>            | Libra por Galón            |
| <b>°</b>              | Grados                     |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1. 1</b> Logo Sertecpet.....   | 19 |
| <b>Figura 2. 1</b> Geología general del nororiente ecuatoriano.....  | 25 |
| <b>Figura 2. 2</b> Columna Tectónico-Estratigráfica y eventos Geodinámicas que controlaron el desarrollo de la Cuenca Oriente y de sus Sistemas Petroleros.<br>..... | 26 |
| <b>Figura 2. 3</b> Esquema de una bomba tipo Jet .....   | 31 |
| <b>Figura 2. 4</b> Bomba Jet Claw Directa.....   | 31 |
| <b>Figura 2. 5</b> Bomba de Pistón.....  | 33 |
| <b>Figura 2. 6</b> Cabezal de pozo .....   | 35 |
| <b>Figura 2. 7</b> Unidad Móvil de Prueba - Mobile Test Unit (MTU).....  | 37 |
| <b>Figura 2. 8</b> Separador Bifásico.....   | 38 |
| <b>Figura 2. 9</b> Bomba de superficie, Quintuplex. ....   | 39 |
| <b>Figura 2. 10</b> Camisa.....  | 42 |
| <b>Figura 2. 11</b> Standing valve.....  | 43 |
| <b>Figura 2. 12</b> Bomba jet en operación. ....   | 43 |
| <b>Figura 2. 13</b> Packer de formación .....  | 44 |
| <b>Figura 2. 14.</b> Esquema operativo del bombeo hidráulico. ....   | 46 |
| <b>Figura 2. 15</b> Plataforma de la HPS.....  | 49 |
| <b>Figura 2. 16.</b> Variador (VFD). ....  | 50 |
| <b>Figura 2. 17</b> Distribuidor de energía eléctrica.....   | 51 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figura 2. 18</b> Bomba Booster. ....  | 51        |
| <b>Figura 2. 19</b> Motor de inducción para la bomba horizontal. ....                        | 52        |
| <b>Figura 2. 20</b> Motor de inducción para la bomba Booster.....                            | 52        |
| <b>Figura 2. 21</b> Cámara de empuje.....  | 53        |
| <b>Figura 2. 22</b> Bomba Horizontal centrífuga.....   | 54        |
| <b>Figura 2. 23</b> Medidor de turbina (Izq.) Analizador MCII acoplado a la turbina<br>..... | <b>55</b> |
| <b>Figura 2. 24</b> Transmisores de alta y baja presión (Izq –Derch.).....                   | 55        |
| <b>Figura 2. 25</b> Línea de descarga .....  | 56        |
| <b>Figura 2. 26</b> Línea de succión.....  | 56        |
| <b>Figura 2. 27</b> Bomba centrífuga de dos etapas .....                                     | 58        |
| <b>Figura 3. 1</b> Sistema Power Oil, PAD A, usando HPS.....                                 | 63        |
| <b>Figura 3. 2</b> Diagrama IPR pozo Isabella 01. ....                                       | 66        |
| <b>Figura 3. 3</b> Diagrama IPR pozo Isabella 02. ....                                       | 68        |
| <b>Figura 3. 4</b> Diagrama IPR pozo Isabella 03. ....                                       | 70        |
| <b>Figura 3. 5</b> Curva de capacidad de levantamiento vs caudal.....                        | 71        |
| <b>Figura 3. 6</b> Diagrama mecánico de la bomba.....  | 72        |
| <b>Figura 3. 7</b> Diagrama del separador bifásico.....                                      | 74        |
| <b>Figura 3. 8</b> Diagrama del tanque bota.....   | 76        |
| <b>Figura 4. 1</b> Diagrama IPR para el pozo Isabella 01.....                                | 80        |
| <b>Figura 4. 2</b> Diagrama IPR el pozo Isabella 02.....                                     | 81        |
| <b>Figura 4. 3</b> Diagrama IPR para el pozo Isabella 03.....                                | 82        |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 4. 4</b> Parámetros de operación de la nueva bomba para el pozo Isabella 01.....                         | 84  |
| <b>Figura 4. 5</b> Diagrama IPR con la nueva geometría de bomba para el pozo Isabella 01. ....                     | 85  |
| <b>Figura 4. 6</b> Parámetros de operación de la nueva bomba para el pozo Isabella 02.....                         | 86  |
| <b>Figura 4. 7</b> Diagrama IPR con la nueva geometría de bomba para el pozo Isabella 02. ....                     | 87  |
| <b>Figura 4. 8</b> Parámetros de operación de la nueva bomba para el pozo Isabella 03.....                         | 88  |
| <b>Figura 4. 9</b> Diagrama IPR con la nueva geometría de bomba para el pozo Isabella 03. ....                     | 89  |
| <b>Figura 4. 10</b> Tarifa del alquiler de la MTU por hora.....  | 101 |
| <b>Figura 4. 11</b> Diagrama de la curva de rendimiento de la bomba.....   | 103 |
| <b>Figura 4. 12</b> Tarifa del alquiler de la HPS por día. ....  | 106 |
| <b>Figura 4. 13</b> Referencia, del volumen de CO <sub>2</sub> , en referencia a las dimensiones de una casa. .... | 109 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla I.</b> Resumen de las Ventajas y Desventajas del Bombeo Hidráulico tipo jet con MTU..... | 46 |
| <b>Tabla II.</b> Parámetros Mecánicos del pozo Isabella-01 .....                                  | 65 |
| <b>Tabla III.</b> Parámetros de formación productora, Isabella-01 .....                           | 65 |
| <b>Tabla IV.</b> Parámetros mecánicos, Isabella-02 .....  | 67 |
| <b>Tabla V.</b> Parámetros de formación productora, Isabella-02 .....                             | 67 |
| <b>Tabla VI.</b> Parámetros mecánicos, Isabella-03 .....  | 69 |
| <b>Tabla VII.</b> Parámetros de formación productora, Isabella-03 .....                           | 69 |
| <b>Tabla VIII.</b> Características de Bomba Horizontal. ....                                      | 73 |
| <b>Tabla IX.</b> Características de motor y variador (VFD).....                                   | 73 |
| <b>Tabla X.</b> Elementos de seguridad, Instrumentación y Control.....                            | 75 |
| <b>Tabla XI.</b> Diseño y Capacidad del separador bifásico .....                                  | 75 |
| <b>Tabla XII.</b> Conexiones, Grado de materiales y diseño.....                                   | 77 |
| <b>Tabla XIII.</b> Resultados del diagrama IPR pozo Isabella 01.....                              | 81 |
| <b>Tabla XIV.</b> Resultados del diagrama IPR pozo Isabella 02 .....                              | 82 |
| <b>Tabla XV.</b> Resultados del diagrama IPR pozo Isabella 03 .....                               | 83 |
| <b>Tabla XVI.</b> Resultados del diagrama IPR pozo Isabella 01 .....                              | 85 |
| <b>Tabla XVII.</b> Resultados del diagrama IPR pozo Isabella 02 .....                             | 87 |
| <b>Tabla XVIII.</b> Resultados del diagrama IPR pozo Isabella 03 .....                            | 89 |

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

### 1.1 Preámbulo.

La unidad móvil de bombeo horizontal (HPS) brinda una opción muy eficaz de producir varios pozos dentro de un mismo Well Pad. Tiene la capacidad máxima de inyectar volúmenes de 8000 a 12000 barriles de fluido motriz por día, y permite minimizar los costos operativos y optimizar las operaciones de producción en pozos con levantamiento artificial hidráulico. Actualmente SERTECPET, **Figura 1. 1**, emplea servicios de Well Testing elaboración de facilidades tempranas y definitivas. En el levantamiento por bombeo hidráulico, SERTECPET brinda varios tipos de bombas de pistón y tipo jet, equipos o herramientas de completación de fondo, entre otros.



**Figura 1. 1 Logo Sertecpet**  
**Fuente:** (Sertecpet, 2017b)

## 1.2 Hipótesis.

La implementación de sistemas de bombeo horizontal, HPS por sus siglas en inglés (Horizontal Pump System), brinda algunas ventajas como son:

- 1.- Transferencia de fluidos.
- 2.- Inyección de agua para recuperación asistida.
- 3.- Reinyección de Agua.
- 4.- Sistema de Power Oil Móvil.

## 1.3 Objetivos.

### 1.3.1 Objetivo General.

Optimizar los procesos que se llevan a cabo en “**producción temprana en pozos dentro de la locación para un sistema de power oil móvil en el oriente ecuatoriano**” con la implementación de un sistema de bombeo centrífugo en superficie, con el fin de alimentar de forma eficiente a los pozos intervenidos por los sistemas individuales de producción de fluido motriz.

### **1.3.2 Objetivos Específicos.**

- Describir el funcionamiento de las HPS.
- Analizar los parámetros operacionales protegidos por los fabricantes de los equipos previamente instalados.
- Garantizar el funcionamiento óptimo de la HPS (caudal -presión) y de la bomba de subsuelo desde la perspectiva de producción.

### **1.4 Justificación del Proyecto.**

La empresa prestadora de servicios SERTECPET especialista en sistemas de levantamiento artificial hidráulico ponen en consideración sistemas de power oil móvil en locaciones donde tengan pozos de bombeo hidráulico ya que los parámetros operacionales del equipo (bomba multietapa), permite inyectar fluido a "n" pozos, dependiendo de los diseños de la bomba de subsuelo (Bomba jet), que van a regir el caudal de inyección para cada pozo.

En ese ámbito un estudio específico de las ventajas en el uso de unidades HPS es fundamental para la ampliación de nuevos servicios a desarrollarse.

### **1.5 Metodología de investigación.**

Utilizando la información existente en el área del levantamiento artificial hidráulico, brindada por parte de la prestadora de servicios Sertecpet, se realiza un proyecto de investigación e intervención, cuya finalidad será verificar los potenciales de los pozos mediante el diseño de las bombas Jet. Y verificar si los equipos a utilizar están dentro del rango operativo de presión y caudal, para el levantamiento hidráulico con sistema power oil móvil centralizado, con ayuda del software CLAW y software SYAL.

## **CAPÍTULO 2**

### **DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

Este capítulo describe el área de estudio y la teoría básica que engloba el levantamiento artificial hidráulico y el sistema de bombeo horizontal, las partes que los componen, su funcionamiento y ventajas y desventajas de cada tipo. Por motivos de cumplir con los derechos de privacidad, por parte de la prestadora de servicios Sertecpet, el nombre del campo y pozos de estudio han sido modificados.

Tomando en consideración que nuestro proyecto de tesis implica la optimización en pozos con levantamiento hidráulico, se dará principal alcance a los pozos que presenten el mencionado sistema de levantamiento artificial, y sus respectivas configuraciones en superficie y fondo.

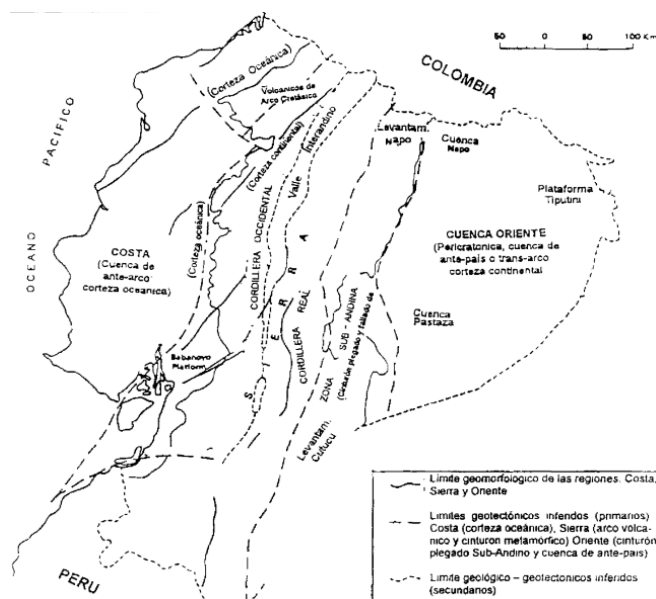
### **2.1 Ubicación y Mapa del campo Isabella.**

EL campo Isabella se encuentra en la región del Coca, provincia de Francisco de Orellana, en la zona Amazónica del Ecuador.

En la actualidad el campo Isabella, cuenta con 15 pozos perforados: 9 productores, 3 cerrados, 2 reinyectores y 1 abandonado; con un promedio en BSW de 15% y un API ponderado de 22°. sus principales reservorios producen de las arenas Basal Tena, U inferior, U superior, T inferior, T superior; las cuales operan con sistema de levantamiento hidráulico, electrosumergible y mecánico(PETROAMAZONAS, 2017).



En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..1** se muestra la cuenca Oriente, donde se ubica el campo Isabella, en la provincia de Sucumbíos.



**Figura 2. 1 Geología general del nororiente ecuatoriano.**

Fuente: (SIERRA)

### 2.1.1 Geología.

El campo Isabella forma parte de la Cuenca Oriente del Ecuador, la cual se encuentra limitada entre las sub-cuencas Putumayo (Colombia) por el norte y Marañón (Perú) por Sur.

En la Llanura Amazónica del sur-oriental ecuatoriano existen trampas petrolíferas donde se almacena el fluido formado por gas, agua y petróleo, en las siguientes formaciones: Hollín, Napo y Basal Tena (Baby, Rivadeneira, & Barragán, 2004).

Las trampas de petróleo se desarrollaron en los periodos del cretácico. En la Figura 2. 2 muestra la columna tectónico - estratigráfica de la Cuenca Oriente.

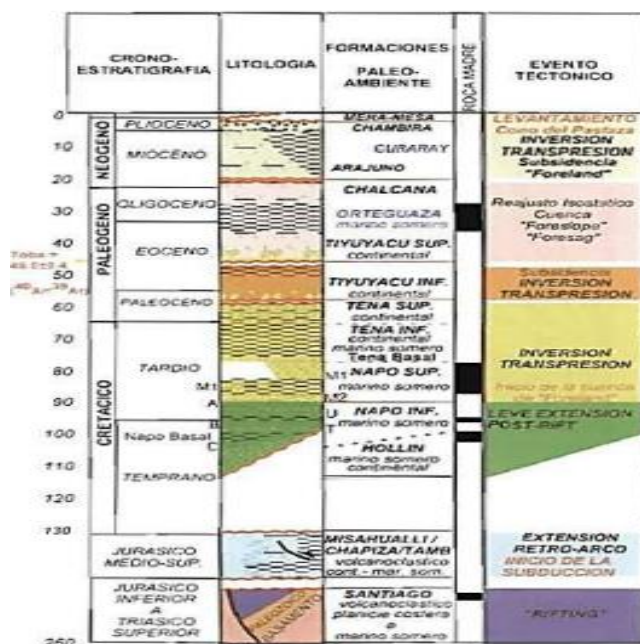


Figura 2. 2 Columna Tectónico-Estratigráfica y eventos Geodinámicas que controlaron el

## **desarrollo de la Cuenca Oriente y de sus Sistemas Petroleros.**

**Fuente:**(Baby et al., 2004).

### **2.1.2 Litología del campo Isabella.**

Presenta la misma relación estratigráfica de la cuenca oriente.

#### **2.1.2.1 Formación Hollín.**

La formación cuenta con presencia de areniscas de color blanco, porosas y de grano grueso; en el campo [Isabella](#), es de espesor mínimo sin presencia de hidrocarburos(Aracely & Játiva, 2007).

#### **2.1.2.2 Formación Napo.**

Se divide en dos areniscas que son "T" y "U". (Aracely & Játiva, 2007).

##### **2.1.2.1.1 Arenisca "T"**

Contiene lutitas negras intercaladas, areniscas cuarzosas, limolitas ricas en arcillas. Se divide en Inferior y superior:

"T" Inferior

Arenisca cuarzosa, con gran presencia de glauconita (Armijos Honores & Yépez Pazmiño, 2013).

“T” Superior

Contiene mayor proporción de grano fino que del grueso; es una arenisca (Armijos Honores & Yépez Pazmiño, 2013).

2.1.2.1.2 Arenisca “U”

Está caracterizada por ser continua y porosa , se divide en Inferior y superior.

“U” Inferior

Es cuarzosa, limpia y va de grano medio a fino con (Armijos Honores & Yépez Pazmiño, 2013).

“U” Superior

Es cuarzosa con intercalaciones de lutitas (Armijos Honores & Yépez Pazmiño, 2013).

### **2.1.2.3 Formación Basal Tena.**

Es una arenisca cuarzosa, que va de grano medio a grueso, tiene presencia de arcillas y limolitas de color ladrillo con intervalos arenosos (Armijos Honores & Yépez Pazmiño, 2013).

## **2.2 Sistema de Levantamiento Artificial (SLA): Bombeo Hidráulico.**

El levantamiento artificial hidráulico se fundamenta en el “ Principio de Pascal”, cuyo enunciado indica que la presión ejercida sobre la superficie de un fluido se transmite con igual intensidad en todas las direcciones(Coello Zambrano, 2017). Adaptando este principio es factible inyectar a nivel de superficie un fluido a elevada presión que va a iniciar la operación de la unidad de bombeo situada en subsuelo(Castillo, 2016). Esto se da gracias a la transferencia de energía entre el fluido y la mencionada bomba en subsuelo, dependiendo del tipo de la misma. Los fluidos de potencia más utilizados son agua y crudos livianos; los cuales se pueden adquirir del mismo pozo, una vez cumplido un ciclo de tratamiento, con la finalidad de alcanzar propiedades óptimas para su implementación en el proceso de producción.

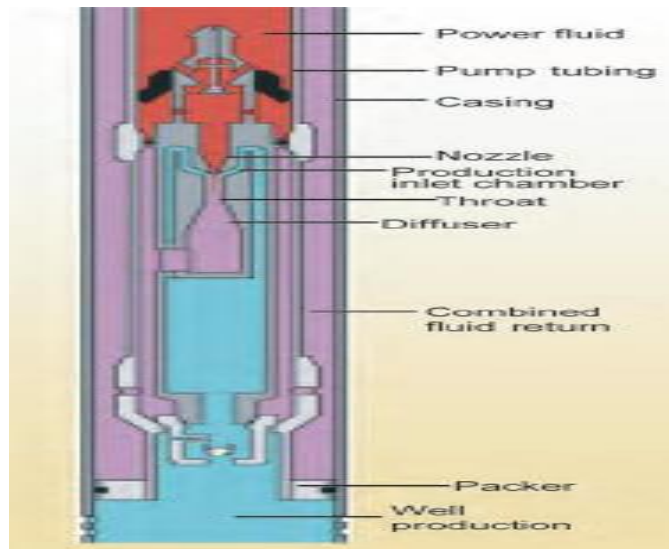
## 2.2.1 Tipos de bombeo hidráulico

Conforme al tipo de bomba usada en subsuelo, el levantamiento hidráulico se divide en dos: levantamiento hidráulico tipo jet y levantamiento hidráulico tipo pistón.

### 2.2.1.1 Levantamiento hidráulico tipo Jet.

Este tipo de levantamiento funciona por medio de la transferencia de energía de presión hacia una herramienta con un mecanismo similar al tubo Venturi, donde su energía de presión ayuda a la producción de fluido de formación por medio de una conversión a energía cinética, por un cambio de velocidad (Fretwell, 2006).

La **Figura 2. 3** muestra el esquema de una bomba tipo Jet y la **Figura 2. 4** detalla las partes de una bomba Jet Claw emitida por la empresa Sertecpet, cuya función de levantamiento se lleva a cabo por la interacción entre las velocidades de dos fluidos en cuestión, en este caso el fluido inyectado (motriz) y el fluido a producirse (de formación) dentro del Venturi, generando cambio de energía que permiten la producción.



**Figura 2. 3** Esquema de una bomba tipo Jet  
**Fuente:** Petroleum Engineering Handbook, Volume IV(Lake, 2006).



**Figura 2. 4** Bomba Jet Claw Directa.  
**Fuente:** Rengifo, J., 2017

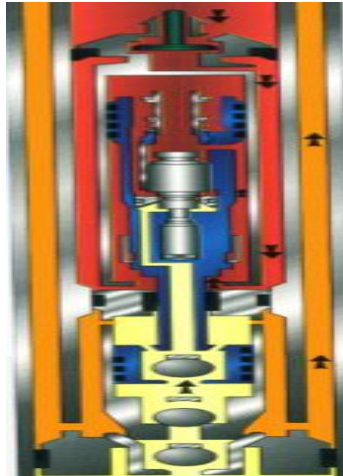
### 2.2.1.2 Levantamiento hidráulico tipo Pistón.

Teniendo en cuenta el uso de un sistema de levantamiento artificial hidráulico tipo pistón, en el cual el arreglo de pistones reciprocantes es accionado por la influencia del fluido impulsor que transmite la presión desde el émbolo del motor hacia el émbolo de la bomba(Cano Delgado & Sarmiento Ordóñez, 2017), los elementos que componen el sistema de fondo consiste básicamente en lo siguiente:

#### Bomba hidráulica de succión

La base de su acción es similar al de las bombas del levantamiento artificial tipo mecánico, a diferencia que en el bombeo hidráulico tipo pistón la sarta de varillas está dentro de la bomba. Las bombas hidráulicas se clasifican en bombas de doble acción, **Figura 2. 5**, que mueven el fluido hacia superficie en sus dos recorridos por medio de válvulas de succión y de descarga en los dos extremos del pistón; y las de acción simple que transportan el fluido a la superficie en un solo sentido, es decir, en el movimiento de descenso o ascenso(Cano Delgado & Sarmiento Ordóñez, 2017).





**Figura 2. 5 Bomba de Pistón.**  
**Fuente: (Sertecpet, 2017a)**

No se aconseja el uso de bombas tipo pistón en aquellos pozos con alta relación gas aceite (GOR); dado que, si el fluido de producción posee mucho gas, la posibilidad de manipular el fluido líquido se reduce cada vez que la saturación del gas incrementa, lo que se refleja en una eficiencia reducida (Cano Delgado & Sarmiento Ordóñez, 2017).

## **2.2.2 Componentes del equipo.**

La base de nuestro proyecto de tesis es la intervención de los pozos con levantamiento hidráulico; considerando que los Pozos a intervenir producen con bomba hidráulica tipo Jet, nos enfocaremos en los elementos del bombeo hidráulico tipo jet, usado en los pozos a intervenir:

### **2.2.2.1 Equipos de superficie.**

El equipo de superficie usado en el levantamiento hidráulico con bomba jet está compuesto por el cabezal del pozo y la unidad MTU:

- **Cabezal del Pozo.**

La **Figura 2. 6** muestra el cabezal de un pozo, cuyo propósito de uso implica tener un soporte para la sarta de tuberías dentro del pozo y además de realizar un monitoreo y control de las altas presiones que se presentan frecuentemente en los diferentes pozos.



**Figura 2. 6 Cabezal de pozo**  
**Fuente: (Sertecpet, 2017a)**

- **Unidad Móvil de Prueba – Mobile Testing Unit (MTU).**

La unidad móvil de prueba, Mobile Testing Unit (MTU), es implementada para la producción y evaluación de un pozo por medio de la impartición de la presión necesaria, al fluido de impulsión para que éste logre el punto de operación óptimo requerido por la bomba jet en el fondo del pozo(Perlaza Díaz & Beltrán Apolo, 2016).

Su operación inicia con la succión del fluido motriz, directamente del separador bifásico, por parte de una bomba Booster (centrífuga) que lo entrega a la bomba de desplazamiento positivo (bomba quintuplex), la cual incrementa su presión hasta el punto operacional requerido

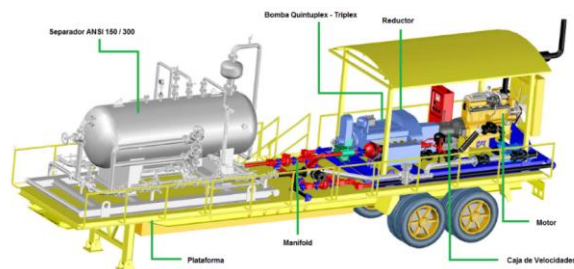
para que inicie su acción la bomba de fondo en el subsuelo(Cano Delgado & Sarmiento Ordóñez, 2017).

El fluido motriz se contabiliza por medio de un medidor de flujo tipo turbina MC-II y se desplaza a través de la línea de alta presión hacia el cabezal que comunica el tubing, pasando por la bomba jet y retornando el fluido de inyección, más producción por el espacio anular hacia el manifold que este a su vez llega hasta la entrada del separador bifásico. Esta configuración dependerá si la bomba a utilizarse sea directa o reversa, posteriormente el fluido producido es transferido hacia el separador bifásico, antes de ser transportado hacia una estación central o un tanque de almacenamiento por medio de un vacuum.

La unidad móvil de prueba (MTU), se muestra en la **Figura 2. 7**, se compone primordialmente de los siguientes elementos(Perlaza Diaz & Beltrán Apolo, 2016):

- Motor de combustión interna.
- Caja de transmisión
- Reductor de velocidades.
- Bomba quintuplex/triplex.
- Contador de flujo – MC II.

- Manifold de inyección.
- Separador bifásico.
- Plataforma móvil.
- Líneas de alta y baja presión.
- Dispositivos de seguridad
- Relief de baja y alta
- Disco de ruptura



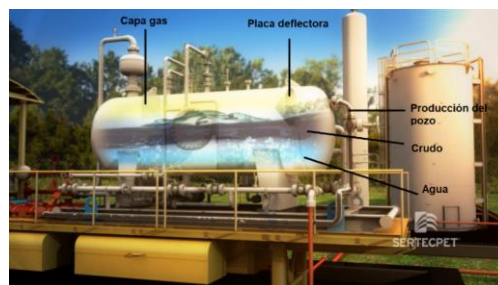
**Figura 2. 7 Unidad Móvil de Prueba - Mobile Test Unit (MTU)**

Fuente: (Sertecpet, 2015)

### Separador bifásico

El separador bifásico posee la finalidad de receptor y separar los fluidos líquidos de los gaseosos a través de los elementos internos del separador. Cumpliéndose tres procesos internos: momento, segregación gravitacional y coalescencia y conforme a su tiempo de retención va a separar las fases del fluido en gas, líquidos; por densidades

el líquido se asentará en el fondo del separador, donde será succionada para alimentar el sistema de inyección por medio de la bomba Booster. La capa de gases liberados en el tope del separador aplica presión sobre los fluidos líquidos, lo cual permite el arranque de la bomba Booster. Se muestra un separador bifásico en operación en la **Figura 2. 8.**



**Figura 2. 8 Separador Bifásico.**  
Fuente: Rengifo, J., 2017

#### Bombas de Superficie.

Encargadas de impulsar el fluido motriz en esta clase de levantamiento artificial, es una bomba quintuplex que se subdivide en: terminal de fluido y terminal de potencia.

- Terminal de potencia: abarca los engranajes, el cigüeñal y la biela.

- Terminal de fluido abarca: émbolos individuales, cada uno con válvulas de retención y descarga, las mismas que acostumbran estar equipadas con resortes.

Las bombas múltiples habitualmente instaladas en campo, son aquellas de configuración horizontal(Fretwell, 2006).

En la **Figura 2. 9** se muestra un ejemplo de bomba usada en superficie para la inyección del fluido motriz al sistema de levantamiento artificial.



**Figura 2. 9** Bomba de superficie, Quintuplex.  
Fuente: (Sertecpet, 2015).

#### Múltiples de Control.

En un conjunto de válvulas tapón de alta presión que sirven para direccionar y controlar el fluido de inyección y el fluido de retorno.

Está compuesto por 4 válvulas tapón y 1 válvula Check.

Su uso consiste en, dirigir flujos directamente hacia cada uno de los pozos, desde un depósito central; con la supervisión de un medidor de flujo propio para cada pozo o un medidor de flujo universal.

El múltiple normaliza la repartición del fluido motriz hacia los pozos por medio de válvulas de control(Coello Zambrano, 2017).

#### Válvula de Control.

Es un dispositivo que se encarga de la seguridad de la bomba, sirve para aliviar la presión cuando esta sobrepasa las condiciones de operación.

#### **2.2.2.2 Equipos de subsuelo**

Se puede mencionar los siguientes elementos presentes en el sistema de subsuelo:

#### Sistema de fluido impulsor.

El fluido impulsor tiene como función lubricar los elementos móviles del sistema de fondo, así mismo como de transferir la potencia generada en superficie hacia la bomba de fondo.



Dependiendo del tipo de sistema y fluido seleccionado, el fluido impulsor se transportará conjuntamente o por separado con el fluido producido, por medio de tuberías hacia superficie, para posteriormente recibir el tratamiento correspondiente.

Existen dos tipos de sistemas de fluido, pero en nuestro país el utilizado es:

- Sistema de fluido abierto (Fma)

Utilizado comúnmente con crudo debidamente tratado, como fluido impulsor, el cual se mezcla con el fluido proveniente de la formación con el fin de alivianar su peso y minimizar los efectos de corrosión; es decir, reducir la densidad y el porcentaje de compuestos corrosivos en el crudo, y permitir un flujo más eficiente de la mezcla producida hacia superficie (Cano Delgado & Sarmiento Ordóñez, 2017).

Camisa de circulación.

Entre sus funciones principales se encuentra la protección y alojamiento de la bomba de levantamiento hidráulico, y la comunicación entre el espacio anular y la tubería de

producción y viceversa(Cano Delgado & Sarmiento Ordóñez, 2017).

Está compuesta de 4 secciones: upper sub, lower sub, housing sleeve y closing sleeve, las cuales se pueden apreciar en la **Figura 2. 10.**



**Figura 2. 10 Camisa.**  
**Fuente:** Rengifo, J., 2017

Válvula de pie, Standing valve.

La **Figura 2. 11** muestra la herramienta, que permite el paso del fluido proveniente de la formación en un solo sentido hacia superficie, y previene el retorno del mismo con la columna presente en el tubing, por medio de una válvula de bola y su respectivo asiento; por lo cual, son empleadas en pruebas de presión(Sertecpet, 2017a).



**Figura 2. 11 Standing valve.**  
**Fuente:** Rengifo, J., 2017

#### Bombas Hidráulicas.

Constituyen el elemento primordial del sistema de subsuelo, siendo operadas por medio de la presión ejercida desde la bomba de superficie y transferida por el fluido de potencia, generando una acción de succión entre la boquilla y la garganta del dispositivo Venturi (Fretwell, 2006).

Se muestra una bomba Jet Claw operando, en la **Figura 2. 12.**



**Figura 2. 12 Bomba jet en operación.**  
**Fuente:** (Sertecpet, 2015)

### Packer.

Herramienta empleada para la aislación de una formación de interés, para su producción, **Figura 2. 13** . Luego de su asentamiento, puede permanecer en tensión, compresión, o en neutro(Sertecpet, 2017a).



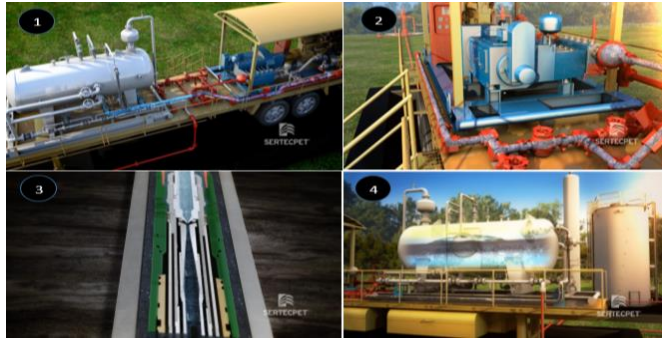
**Figura 2. 13 Packer de formación**  
Fuente: (Sertecpet, 2015, 2017a)

### **2.2.3 Procedimiento operativo del bombeo hidráulico tipo Jet.**

La bomba triplex o quintuplex se alimenta del fluido de impulsión, agua, desde el separador bifásico presente en la MTU por medio de la acción de una bomba Booster. El fluido impulsor, ahora con alta presión por la acción de la bomba quintuplex, transportado al pozo con ayuda de las válvulas de control posteriores al múltiple de control. El fluido impulsor ingresa al pozo a través de las válvulas en el cabezal y es dirigido a la bomba ubicada en el subsuelo, donde ingresa y fluye hacia un dispositivo con configuración Venturi, pasa

por una boquilla desde un diámetro mayor hacia uno menor, lo cual produce un cambio con la energía potencial o de presión que es convertida en energía cinética(Cano Delgado & Sarmiento Ordóñez, 2017). Este cambio de velocidad produce un drawdown en la presión existente en la entrada de la garganta y permite el ingreso del fluido proveniente de la formación, por el efecto de succión generado en ese punto, mezclándose ambos fluidos y reduciendo nuevamente su velocidad al cambiar a un área mayor, generando un efecto inversamente proporcional en la energía de presión. La mezcla del fluido impulsor con el fluido de la formación, posteriormente retorna a la superficie hacia el separador bifásico presente en la unidad MTU, cumplen con el proceso de separación y la producción, de crudo adquirida, es transportada por tubería al tanque de almacenamiento(Coello Zambrano, 2017).

El esquema operativo general del bombeo hidráulico, se presentan en la **Figura 2. 14** .



**Figura 2. 14. Esquema operativo del bombeo hidráulico.**

**Fuente:** Rengifo, J., 2017.

#### **2.2.4 Ventajas y desventajas del bombeo hidráulico**

En la .

Tabla I se da cabida a una comparación de las ventajas y desventajas que se tiene en Bombeo Hidráulico utilizando la unidad MTU.

**Tabla I. Resumen de las Ventajas y Desventajas del Bombeo Hidráulico tipo jet con MTU.**

| <b>VENTAJAS</b>  | <b>DESVENTAJAS</b>   |
|--|--|
| El uso de MTU, permite operaciones que se pueden controlar de manera remota.                             | Inversión inicial elevada y diseño complejo.   |
| El SLA, hidráulico, no solicita de workover, al recuperar el equipo de fondo.                            | Costos de reparación elevados.   |
| Buena opción para pozos desviados, direccionales y sitios inaccesibles.                                  | Riesgo operativo en superficie, por la presencia de elevadas presiones en la MTU.          |
| En el SLA hidráulico se pueden operar y controlar varios pozos por medio de una instalación central.     | Susceptible a problemas por presencia de gas, en los instrumentos del dispositivo Venturi. |
| El SLA hidráulico opera en presencia baja de arenas.   | Problemas de corrosión.  |
| Se puede recuperar la bomba de fondo con una reconfiguración en el sistema de inyección.                 |  |
| Usando MTU se pueden correr pruebas de producción, o dejar un pozo en producción.                        |  |
| La MTU permite sistematizar toda la operación, en función de presiones, por medio de paneles de control. |  |

**Fuente:** Rengifo, J., Tobar, K., 2017



### **2.3 Unidad Móvil Horizontal / Horizontal Pump System(HPS).**

La unidad móvil horizontal consiste en un sistema de bombeo centrífugo utilizado en superficie, que optimiza el rendimiento del bombeo por desplazamiento positivo utilizado en la MTU, para la inyección de fluido motriz en el levantamiento artificial hidráulico. Aprovecha el sistema multi-etapas de la bomba centrífuga, para elevar la presión de inyección al igual que el caudal, de esta manera se puede aplicar en sistemas centralizados que actúan en más de un pozo(Chiriboga, 2015).

#### **2.3.1 Componentes de la HPS:**

##### **2.3.1.1 Plataforma.**

Es la estructura sobre la cual se encuentran montados los elementos que componen la HPS, brindando el soporte y la estabilidad a todo el sistema de bombeo(Chiriboga, 2015).

Ver **Figura 2. 15..**



**Figura 2. 15 Plataforma de la HPS.**  
**Fuente:** (Sertecpet, 2015)

#### **2.3.1.2 Variador.**

Denominado VFD (Variable Frequency Drive), es un equipo de potencia que está sujeto a controlar la velocidad que posee un motor de inducción al modificar su frecuencia y el voltaje, en una constante relación (V/Hz) con la finalidad de sostener y obtener las mejores condiciones de operación(Chiriboga, 2015).

El funcionamiento del variador consiste en obtener corriente a una frecuencia constante para modificarla a una corriente de frecuencia variante y poder suministrarla al equipo de bombeo, al proporcionar un incremento en la frecuencia se realiza un incremento en la velocidad y se obtiene un mayor caudal por parte de la bomba(Chiriboga, 2015). Ver **Figura 2. 16.**



**Figura 2. 16. Variador (VFD).**  
Fuente: Rengifo, J., 2017

### **2.3.1.3 Distribuidor de energía eléctrica.**

Encargado de suministrar la energía requerida por el motor de la bomba booster y de la bomba centrífuga. Ver **Figura 2. 17.**



**Figura 2. 17 Distribuidor de energía eléctrica**  
Fuente: Rengifo, J., 2017

#### 2.3.1.4 Bomba Booster.

Se alimenta del fluido motriz proveniente del separador, y le aplica la presión requerida por la bomba centrífuga para desempeñar su labor(Chiriboga, 2015). Ver **Figura 2. 18.**



**Figura 2. 18 Bomba Booster.**  
Fuente: (Chiriboga, 2015)

### 2.3.1.5 Motor de eléctrico.

Encargados de suministrar la energía requerida para la óptima labor de la bomba horizontal y de la bomba Booster.(Chiriboga, 2015). Ver **Figura 2. 19** y **Figura 2. 20**.



**Figura 2. 19 Motor de inducción para la bomba horizontal.**

Fuente: Rengifo, J., 2017



**Figura 2. 20 Motor de inducción para la bomba Booster.**

Fuente: Rengifo, J., 2017

### 2.3.1.6 Cámara de empuje.

Es el responsable de conectar el eje del motor con la bomba centrífuga, **Figura 2. 21**, y propagar el torque originado en el motor a la bomba; además sirve de sello para el fluido proveniente de la bomba Booster(Chiriboga, 2015).



**Figura 2. 21 Cámara de empuje.**  
Fuente: Rengifo, J., 2014

### 2.3.1.7 Bomba Horizontal.

Es una bomba centrífuga multi-etapa, **Figura 2. 22**, que eleva el caudal y la presión de inyección, dependiendo de la geometría de las etapas y el número de las mismas respectivamente (Chiriboga, 2015).

Cada etapa está compuesta de un impulsor y un difusor, encargados de suministrar presión al fluido que ingresa y luego entregarlo a la siguiente etapa(Chiriboga, 2015).



**Figura 2. 22 Bomba Horizontal centrífuga.**  
Fuente: Rengifo, J., 2017

#### **2.4.1.8 Medidores de flujo y presión**

El equipo de medición de flujo consiste en un dispositivo MC-II que analiza los pulsos registrados por el contador tipo turbina con el paso del caudal en la descarga de la bomba horizontal; y los equipos de medición de presión consisten en transmisores de presión alta y baja que toman la lectura de presión en la línea de descarga de la bomba centrífuga y en la línea de descarga de la bomba Booster, respectivamente. Las **Figura 2. 23** y **Figura 2. 24** muestran los equipos mencionados.



**Figura 2. 23 Medidor de turbina (Izq.) Analizador MCII acoplado a la turbina**

**Fuente:** Rengifo, J., 2017



**Figura 2. 24 Transmisores de alta y baja presión (Izq –Derch.)**

**Fuente:** (Chiriboga, 2015)

#### 2.4.1.9 Líneas de descarga y de succión

- Las líneas de descarga ( **Figura 2. 25**) son las encargadas de transportar el fluido, desde la salida de la bomba centrífuga hasta el cabezal de pozo, a elevada presión(Cano Delgado & Sarmiento Ordóñez, 2017).





**Figura 2. 25 Línea de descarga**  
Fuente: (Sertecpet, 2015)

- Las líneas de succión ( **Figura 2. 26**) se encargan de dirigir los fluidos, desde el separador hacia la bomba Booster o hacia el tanque de almacenamiento, a presiones bajas(Cano Delgado & Sarmiento Ordóñez, 2017).



**Figura 2. 26 Línea de succión**  
Fuente: (Sertecpet, 2015)

### 2.3.2 Proceso operativo de la HPS

El proceso del bombeo horizontal inicia en el distribuidor de energía eléctrica, que transmite la energía al motor de inducción de la bomba

Booster y a al motor de la bomba centrífuga. La bomba Booster comienza la succión del fluido motriz proveniente del tanque de producción y eleva su presión inicial, a la requerida por la bomba centrífuga, enviando el fluido impulsor hacia la primera etapa de la bomba centrífuga(Bearden, 2006).

La etapa inicial de la centrífuga succionará el fluido motriz proveniente de la bomba Booster dado a la caída de presión que se genera en el centro del impulsor debido a la velocidad rotacional (elevada) que imparte la cámara de empuje, al impulsor, desde el motor de inducción.

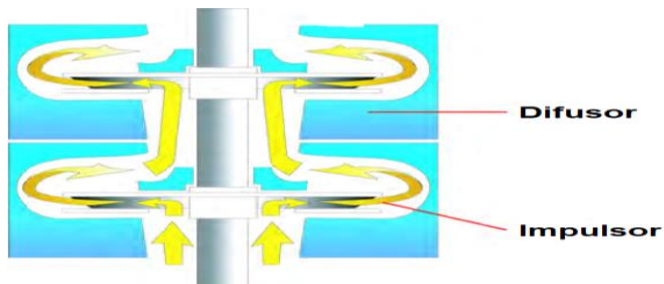
El fluido motriz es disparado a gran velocidad hacia las paredes del difusor, debido a la fuerza centrífuga, donde su energía cinética se convierte en energía de presión (mayor a la de la entrada de la etapa) por la disminución de la velocidad, y es dirigido por el difusor hacia el impulsor de la siguiente etapa(Bearden, 2006).

Luego de repetir el proceso n-etapas veces, el fluido motriz es descargado a presión alta hacia el manifold y posteriormente a los pozos a ser intervenidos (Bearden, 2006).

La cantidad de presión obtenida al final de la bomba centrífuga va a depender del número de etapas utilizadas; de igual forma, la curva de rendimiento de la bomba centrífuga depende de la curva de

eficiencia de la etapa utilizada. El caudal de descarga dependerá de la dimensión de la etapa; es decir, del tamaño del difusor y del impulsor en cuestión.

El paso del flujo motriz, a través de las etapas de la bomba, se muestra en la **Figura 2. 27**, con una sección de dos etapas como ejemplo.



**Figura 2. 27** Bomba centrífuga de dos etapas  
Fuente: (Bearden, 2006)

## **CAPÍTULO 3**

### **METODOLOGÍA**

El trabajo se fundamenta en la aplicación de bombas centrífugas, utilizadas comúnmente en el levantamiento electro sumergible, presentes en la unidad HPS en reemplazo de las unidades MTU, para alimentar con fluido motriz a tres pozos que producen en un mismo PAD por medio de levantamiento artificial hidráulico.

El estudio realizado en los tres pozos permitió determinar las características de la unidad HPS y los beneficios de su aplicación como sistema power oil móvil, y una comparación de sus opciones operativas en relación a la unidad MTU convencional; lo cual, se refleja con ventajas en el ámbito económico, técnico-operacional y ambiental.

### **3.1 Metodología de Investigación**

Se realizaron diversos estudios por parte de la empresa Sertecpet para promover el cambio de las bombas de desplazamiento positivo, ubicadas en las unidades de pruebas móviles, por las bombas empleadas para el levantamiento de crudo (eléctricas) con la finalidad de optimizar sus procesos y de poder alimentar una cantidad superior de pozos dentro de una misma locación.

Para realizar este tipo de innovación se diseña la geometría de la bomba jet claw de los pozos, partiendo de la carga que podrá generar la bomba

horizontal que se implementará en la unidad de bombeo y de las condiciones de formación.

### **3.2 Metodología de Campo**

El proyecto requiere la obtención de datos o parámetros propios de la locación y de cada pozo a ser intervenido, como lo son: las facilidades de superficie disponibles, fuente de energía eléctrica, la presión de la formación productora, los valores de permeabilidad y viscosidad, los porcentajes de BSW, el grado API del crudo, historial de producción, entre otros; para analizar el comportamiento y aporte que cada uno de los mismos desarrolla durante el proyecto y los requerimientos adicionales que podrían presentarse durante el mismo.

### **3.3 Desarrollo**

Desde hace unos años las perforaciones en los bloques petrolero en el Ecuador se han realizado por medio de PADs, haciendo más eficiente las operaciones por motivos de: movilización, costos operativos, espacio de operación, entre otros.

Se procedió a la localización de un PAD candidato que sea conforme a los requerimientos para poder utilizar la unidad HPS en los pozos que están presentes en dicho PAD, de los cuales se encontró un PAD con 3 pozos, con completaciones de levantamiento hidráulico, dichos pozos se

encuentran ubicados en el campo Isabella, los cuales se llaman Isabella 01, Isabella 02 e Isabella 03.

Se optó por realizar el estudio en el PAD A del campo, dado que todos los pozos mencionados estaban produciendo por medio de una estación centralizada, en la cual las bombas de inyección para suministrar el sistema de levantamiento artificial hidráulico entraron a mantenimiento. La empresa operadora en este campo no podía suspender la producción, por lo que decidieron emplear las unidades móviles (MTU); sin embargo, cada unidad móvil servía para un pozo, por lo cual se planteó usar una unidad móvil HPS que sirva para los 3 pozos y económicamente resulte más rentable en comparación a las 3 MTU.

Analizando las observaciones previamente establecidas, se decidió realizar los estudios proyectados a la aplicación de la unidad HPS, con el fin de alimentar el PAD completo y ejecutar la producción de los pozos como un sistema centralizado cerrado.

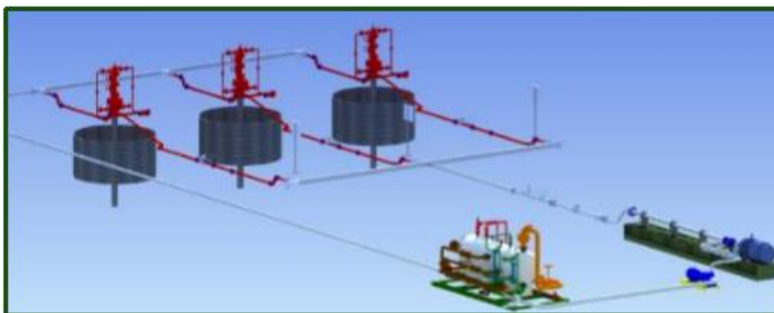
Entre las primeras consideraciones se determinó que el uso de la HPS eliminó la necesidad de varias unidades MTU para la producción del PAD, dado que una sola HPS puede alimentar los 3 pozos debido al caudal de inyección que genera este tipo de bomba; adicionalmente eliminó el requerimiento de más facilidades en superficie, debido a que el PAD completo está conectado a las facilidades preexistentes.

De esta forma todo apuntó a un ahorro en: el consumo de energía, herramienta humana necesaria para el manejo y control de la unidad; es decir, a primeras instancias el proyecto representaría beneficios operativos y económicos. Por lo tanto, se comenzaron los estudios para la implementación del sistema power oil móvil, por medio de la unidad HPS, en los pozos con levantamiento artificial hidráulico del PAD.

Teniendo claro el análisis realizado previamente, se identificó las facilidades existentes en la locación del PAD, para determinar un arreglo de equipos que cumplan con el requerimiento de presión por parte de las bombas presentes en la unidad HPS, y ésta suministre la energía óptima para la producción de crudo de una manera rentable.

El arreglo del separador y la unidad HPS, para producir los pozos del PAD A, se presenta en la

**Figura 3. 1.**



**Figura 3. 1 Sistema Power Oil, PAD A, usando HPS**  
**Fuente:** Sertecpet, 2017



Dentro de las facilidades se encontró:

- Líneas de producción con orientación al manifold.
- Líneas de inyección con orientación al cabezal.
- Línea de retorno con orientación al cabezal.
- Separador bifásico.
- Bomba centrífuga en la succión.
- Cabezales de Producción.
- Acometida eléctrica.

El siguiente paso fue determinar la presencia de una fuente eléctrica en las proximidades de la locación debido que la unidad HPS demanda este tipo de energía; por ende, era prioridad la obtención de una fuente de alimentación y en caso que no exista se debía colocar un generador de energía eléctrica, lo cual no era deseable porque se produciría un gasto económico extra debido a: mantenimiento del generador, cambios de aceite regulares, combustible para su funcionamiento además del ruido generado por el mismo. Finalmente, éste requerimiento se pudo satisfacer ya que se encontró una línea de alta en las proximidades a la locación, proveniente de la estación de producción.

La recolección de datos de cada pozo fue el siguiente paso que se llevó a cabo, en el cual se obtuvieron los siguientes datos, con ayuda de la empresa Sertecpet:

**Pozo Isabella 01**

**Parámetros Mecánicos.** Ver **Tabla II.**

**Tabla II Parámetros Mecánicos del pozo Isabella-01**

|                      |       |     |
|----------------------|-------|-----|
| ID Tubería           | 2.992 | In  |
| OD Tubería           | 3.50  | In  |
| ID Revestimiento     | 6.276 | In  |
| Prof. Punzados (TVD) | 9027  | Ft  |
| Presión de Cabeza    | 80    | Psi |

**Fuente:** Sertecpet, 2016

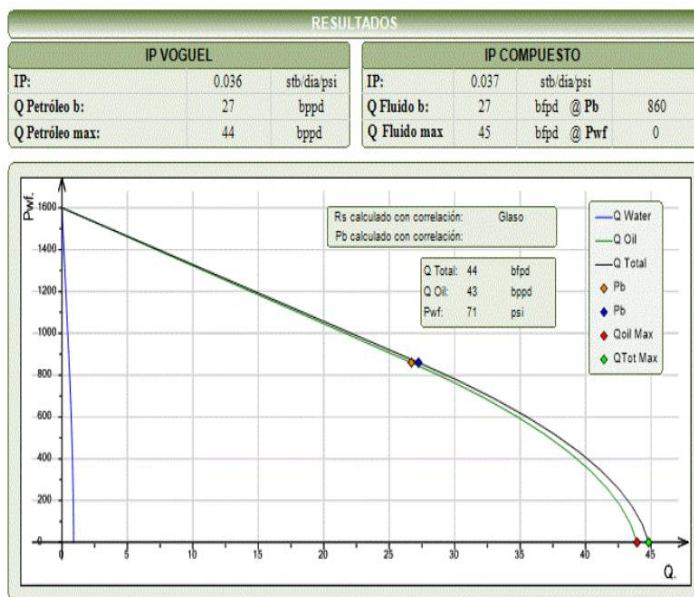
**Parámetros de Reservorio.** Ver **Tabla III.**

**Tabla III Parámetros de formación productora, Isabella-01**

|                           |      |         |
|---------------------------|------|---------|
| Presión de Reservorio     | 1600 | Psi     |
| Presión Punto de Burbuja  | 860  | Psi     |
| Presión de Fondo Fluyente | 126  | Psi     |
| API                       | 22.6 | API     |
| GOR                       | 160  | Scf/stb |
| Corte de Agua (BS&W)      | 2.00 | %       |
| Temp. Reservorio          | 205  | °F      |
| Temp. Superficie          | 110  | °F      |
| Grav. Especifica Gas      | 1.14 | Adm     |
| Grav. Especifica Agua     | 1.00 | Adm     |

**Fuente:** Sertecpet, 2016

Resultados del reporte de índice de productividad (IPR), por el método de Vogel a profundidad del reservorio para el pozo Isabella 01, se presentan en la **Figura 3. 2**.



**Figura 3. 2 Diagrama IPR pozo Isabella 01.**  
 Fuente: Tobar, K., 2017

**Pozo Isabella 02**

**Parámetros Mecánicos.** Ver **Tabla IV.**

**Tabla IV Parámetros mecánicos, Isabella-02**

|                      |       |     |
|----------------------|-------|-----|
| ID Tubería           | 2.992 | In  |
| OD Tubería           | 3.50  | In  |
| ID Revestimiento     | 6.276 | In  |
| Prof. Punzados (TVD) | 8,384 | Ft  |
| Presión de Cabeza    | 68    | Psi |

**Fuente:** Sertecpet, 2016

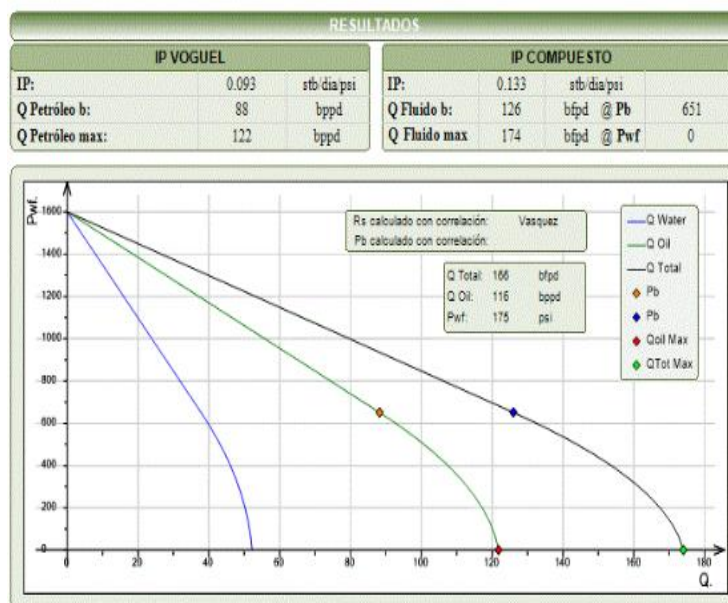
**Parámetros de Reservorio.** Ver **Tabla V**

**Tabla V Parámetros de formación productora, Isabella-02**

|                             |      |         |
|-----------------------------|------|---------|
| Presión de formación        | 1600 | Psi     |
| Presion de Punto de Burbuja | 651  | Psi     |
| Presion de Fondo Fluyente   | 208  | Psi     |
| API                         | 20.0 | API     |
| GOR                         | 101  | scf/stb |
| Corte de Agua (BS&W)        | 30.0 | %       |
| Temp. Reservorio            | 220  | °F      |
| Temp. Superficie            | 110  | °F      |
| Grav. Especifica Gas        | 1.10 | Adm     |
| Grav. Especifica Agua       | 1.00 | Adm     |

**Fuente:** Sertecpet, 2016

Resultados del reporte de índice de productividad (IPR), por el método de Vogel a profundidad del reservorio para el pozo Isabella 02, se aprecian en la **Figura 3. 3**.



**Figura 3. 3 Diagrama IPR pozo Isabella 02.**

Fuente: Tobar, K., 2017

**Pozo Isabella 03**

**Parámetros Mecánicos.** Ver **Tabla VI.**

**Tabla VI Parámetros mecánicos, Isabella-03**

|                      |         |     |
|----------------------|---------|-----|
| ID Tubería           | 2.992   | In  |
| OD Tubería           | 3.50    | In  |
| ID Revestimiento     | 6.276   | In  |
| Prof. Punzados (TVD) | 9,360.5 | ft  |
| Presion de Cabeza    | 80      | Psi |

**Fuente:** Sertecpet, 2016

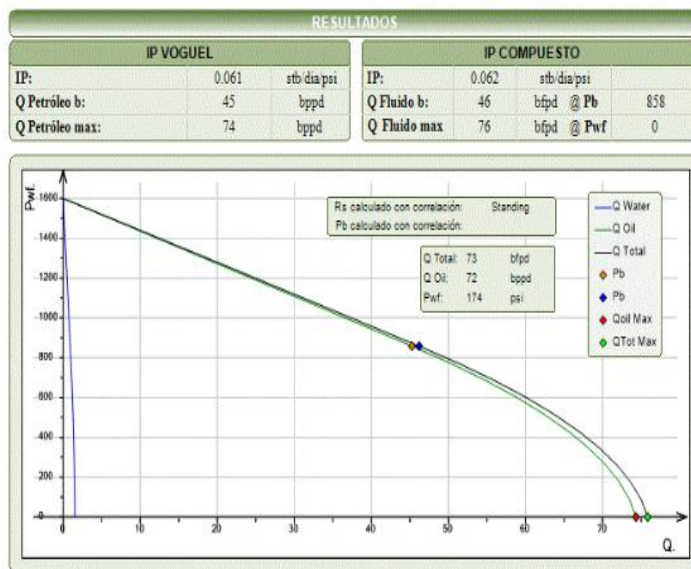
**Parámetros de Reservorio.** Ver **Tabla VII.**

**Tabla VII Parámetros de formación productora, Isabella-03**

|                             |      |         |
|-----------------------------|------|---------|
| Presion de Reservorio       | 1600 | Psi     |
| Presion de Punto de Burbuja | 858  | Psi     |
| Presion de Fondo Fluyente   | 178  | Psi     |
| API                         | 22.6 | API     |
| GOR                         | 160  | scf/stb |
| Corte de Agua (BS&W)        | 2.00 | %       |
| Temp. Reservorio            | 205  | °F      |
| Temp. Superficie            | 110  | °F      |
| Grav. Especifica Gas        | 1.14 | Adm     |
| Grav. Especifica Agua       | 1.00 | Adm     |

**Fuente:** Sertecpet, 2016

Resultados del reporte de índice de productividad (IPR), por el método de Vogel a profundidad del reservorio para el pozo Isabella 03, son mostrados en la **Figura 3. 4.**



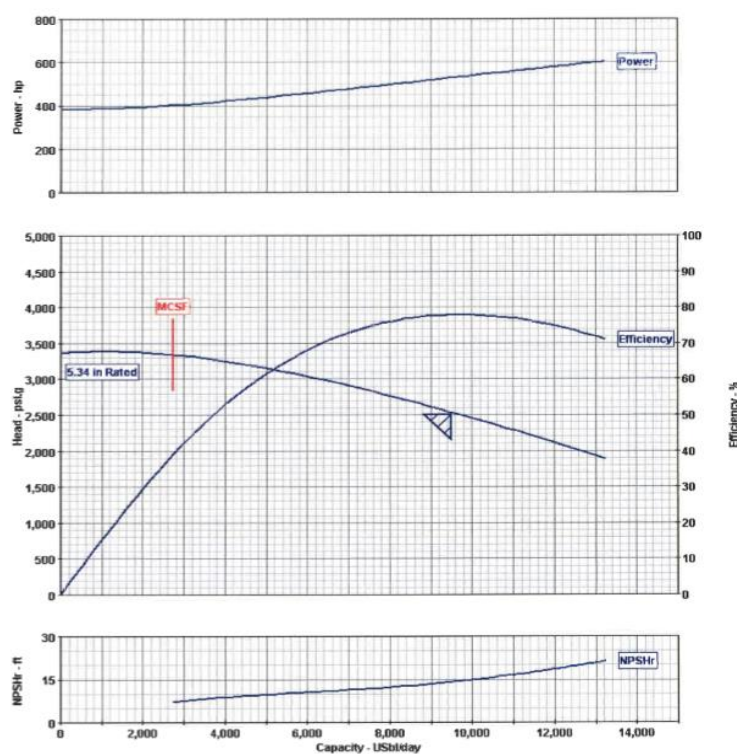
**Figura 3. 4 Diagrama IPR pozo Isabella 03.**  
Fuente: Tobar, K., 2017

#### Parámetros de los equipos a seleccionar.

Los equipos que se implementaron en el proceso se diseñaron dependiendo de las características de la bomba horizontal, por lo que primero se realizó el estudio de la eficiencia de la bomba disponible en el

inventario de Sertecpet, su capacidad, y finalmente la curva de rendimiento de la misma.

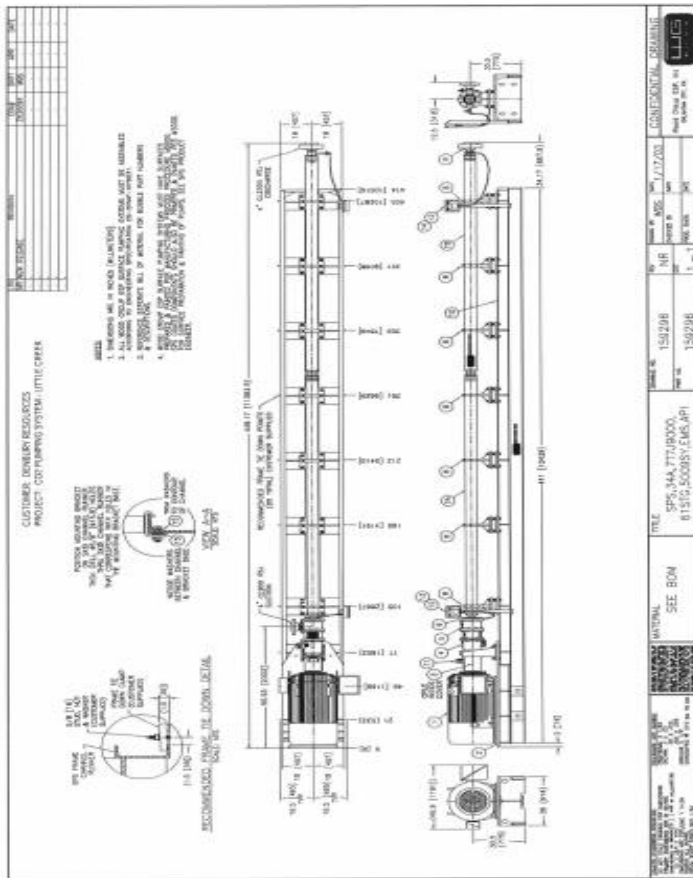
La **Figura 3. 5** presenta la curva de rendimiento de la bomba centrífuga de 64 etapas a 60 Hz, con gráfica de Cabeza vs. Caudal, sus respectivas potencias de freno y cabeza neta de succión positiva.



**Figura 3. 5** Curva de capacidad de levantamiento vs caudal.  
Fuente: Sertecpet, 2017



**Bomba Horizontal:** Marca GPS tipo 76STG 675-9000, se presenta su diagrama en **Figura 3. 6** junto a sus respectivas especificaciones y sus datos de diseño.



**Figura 3. 6 Diagrama mecánico de la bomba.**  
**Fuente:** Sertecpet, 2017

La **Tabla VIII** detalla las características de la bomba horizontal, y la **Tabla IX** muestra las características del motor que da la potencia a la bomba, con su respectivo variador de frecuencia.

**Tabla VIII Características de Bomba Horizontal.**

| <b>Bomba Horizontal</b> |                |
|-------------------------|----------------|
| Marca                   | GPS            |
| Tasa de flujo           | 8000 BPD       |
| Presión de descarga     | 2800 psi       |
| Etapas                  | 64             |
| Tipo                    | 76STG 675-9000 |

**Fuente:** Sertecpet, 2017

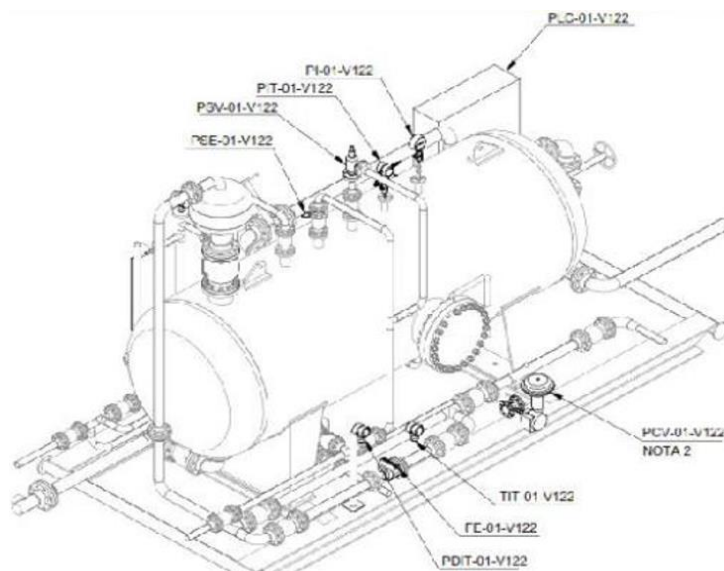
**Tabla IX Características de motor y variador (VFD)**

| <b>Motor</b>             | <b>Variador de Frecuencia (VFD)</b> |
|--------------------------|-------------------------------------|
| SIEMENS INDUCTION MOTOR  | Soft Starter Controler (SSC)        |
| Revolutions: 3600 rpm    | Hertz: 50-60                        |
| Volts: 480      AMP: 866 | Volts: 480 Kva 746                  |
| Salida: 800 HP           | AMP: 944                            |

**Fuente:** Sertecpet, 2017

Con los datos proporcionados por la bomba se pueden generar las especificaciones de diseño de las demás herramientas destinadas a la producción como:

Separador Bifásico: Mostrado en **Figura 3. 7**, con sus elementos e instrumentos en la **Tabla X**, y los datos de diseño y capacidad de proceso en la **Tabla XI**.



**Figura 3. 7 Diagrama del separador bifásico.**  
Fuente: Sertecpet, 2017

**Tabla X Elementos de seguridad, Instrumentación y Control**

| Elementos de seguridad.                | Instrumentación y Control                                     |
|--|---|
| Válvula de seguridad de presión. (PSV) | PI-PIT-PDIT-FE-TIT-PCV<br>Válvula de control de Gas y Fluidos |
| Disco de ruptura.                      | PLC   |

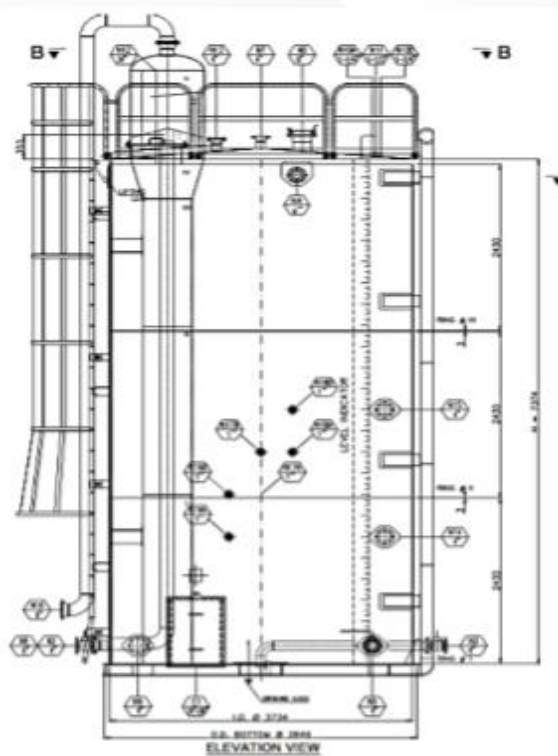
Fuente: Sertecpet, 2017

**Tabla XI Diseño y Capacidad del separador bifásico**

| Datos de diseño                        |       |        |
|--|-------|--------|
| Max. presión de trabajo permisible     | 250   | Psi    |
| Max. temperatura de trabajo permisible | 200   | °F     |
| Presión de Prueba Hidrostática         | 325   | Psi    |
| Tipo                                   | 2     | Fases  |
| Capacidades                            |       |        |
| Capacidad Dinámica de fluido           | 8.000 | BFDP   |
| Capacidad Dinámica del gas             | 1     | MMSCFD |
| Tiempo de residencia                   | 2     | MIN    |

Fuente: Sertecpet, 2017

- **Tanque Bota:** Con código API650/API12F se presenta su diagrama en **Figura 3. 8**, especificaciones y grados del material de fabricación, y sus datos de diseño en. Probado Hidrostaticamente.



**Figura 3. 8 Diagrama del tanque bota.**  
Fuente: Sertecpet, 2017

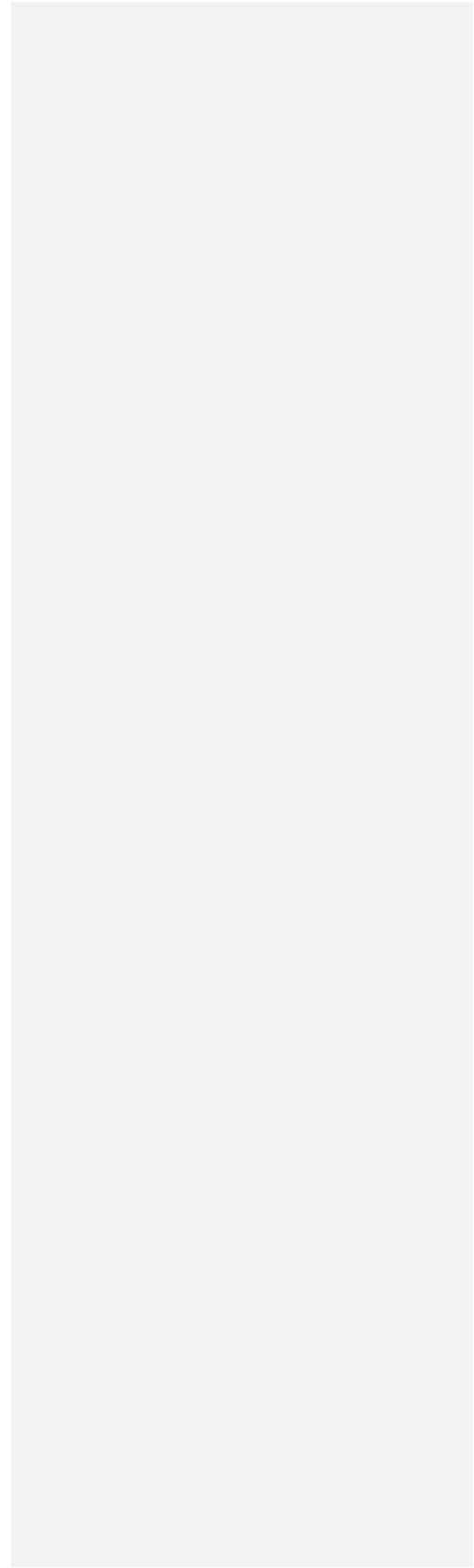
**Tabla XII Conexiones, Grado de materiales y diseño.**

| Conexiones                  | Grado de materiales de fabricación. |             |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------|
| Descarga del Fluido: NPS 4" | Cuerpo: A-36                        | Fondo: A-36 |
| Ingreso del Fluido: NPS 4". | Techo: A-36                         |             |
| Datos del diseño            |                                     |             |
| Presion de Diseño           | 1                                   | oz/in2      |
| Presion de Trabajo          | Atmosférica                         | oz/in2      |
| Temp. de Diseño             | 150                                 | F           |
| Capacidad                   | 500                                 | Bls         |
| Altura                      | 23.83                               | Ft          |

**Fuente:** Sertecpet,2017

# **CAPÍTULO 4**

## **ANÁLISIS Y RESULTADOS**



El presente capítulo recopila el estudio técnico, económico y ambiental en torno a la aplicación de la unidad HPS, realizando cálculos para la determinación de nuevas configuraciones nozzle/garganta de la bomba jet, que permitan mantener la producción inicial de los pozos en base a la nueva presión de inyección en superficie aportada por la bomba horizontal.

Se realiza el análisis respectivo de las tres opciones de power oil en torno a los pozos en cuestión (estación centralizada, tres unidades MTU convencionales, una unidad HPS), para determinar cuál de las tres opciones es la más recomendada como solución y se aplique al sistema.

#### **4.1 Análisis técnico.**

En esta sección se procederá a analizar la producción de los pozos con la inyección desde la central para considerar los cambios que deban efectuarse en el sistema de levantamiento, acoplados a la unidad móvil que abastecerá a los pozos, sin que sufran cambios en su producción.

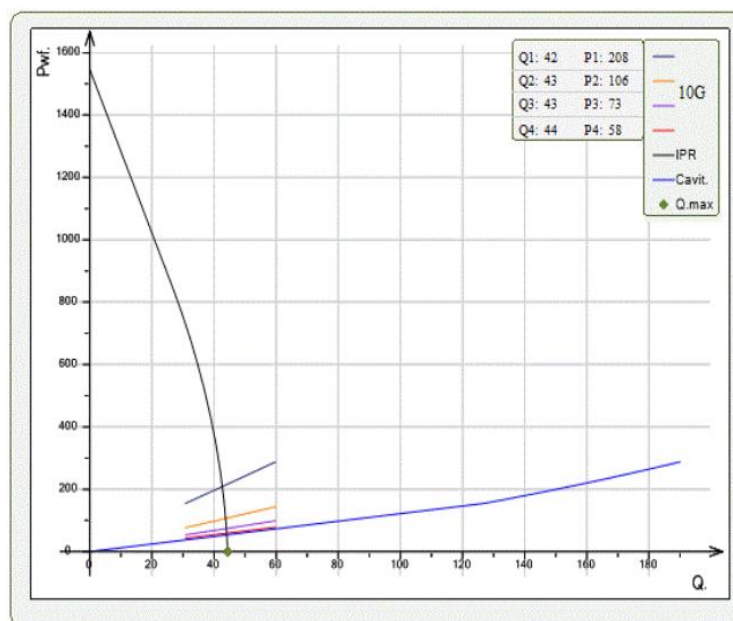
Las condiciones iniciales, se estudiarán acorde a los reportes diarios de producción de los tres pozos de estudio. Dichos reportes se detallan en las **Figura A- 1, Figura A- 2 y Figura A- 3** del anexo A.

##### **Pozo Isabella 01**

Se procedió a realiza el análisis nodal del pozo Isabella 01 a profundidad de la bomba para obtener información de producción, tomando en cuenta



la bomba seleccionada, con los resultados mostrados en la **Figura 4. 1**; los cuales se obtienen del análisis realizado en el software CLAW como se detalla para el pozo Isabella en la **Figura A- 4** y **Figura A- 5** del anexo A.



**Figura 4. 1 Diagrama IPR para el pozo Isabella 01.**

Fuente: Tobar, K., 2017

Los valores correspondientes a 3050 psig, desde la estación central, en la inyección se muestran a continuación en la **Tabla XIII**.

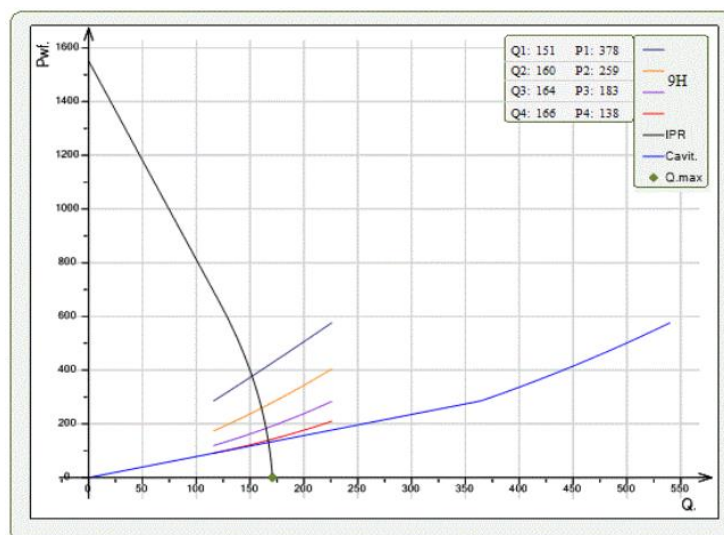
**Tabla XIII Resultados del diagrama IPR pozo Isabella 01**

| GEO | PINY | QINY | PIP | PROD | Q CAV |
|-----|------|------|-----|------|-------|
| 10G | 3050 | 1707 | 58  | 44   | 75    |

Fuente: Tobar, K., 2017

### Pozo Isabella 02

Se procedió a realiza el análisis nodal del pozo Isabella 02 a profundidad de la bomba para obtener información de producción, considerando la bomba seleccionada, se obtuvieron los resultados presentes en la **Figura 4. 2**; los cuales se obtienen del análisis realizado en el software CLAW como se detalla para el pozo Isabella en la **Figura A- 6** y **Figura A- 7** del anexo A.



**Figura 4. 2 Diagrama IPR el pozo Isabella 02.**

Fuente: Tobar, K., 2017

Los valores correspondientes a 3100 psig, desde la estación central, en la inyección se muestran en la

**Tabla XIV.**

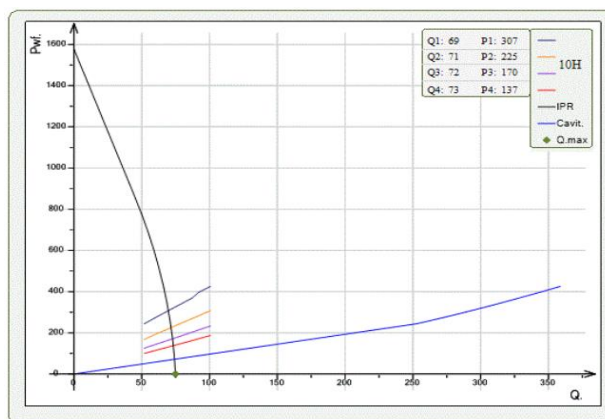
**Tabla XIV Resultados del diagrama IPR pozo Isabella 02**

| GEO | PINY | QINY | PIP | PROD | Q CAV |
|-----|------|------|-----|------|-------|
| 9H  | 3100 | 1468 | 138 | 166  | 259   |

Fuente: Tobar, K., 2017

#### **Pozo Isabella 03**

Se procedió a realiza el análisis nodal del pozo Isabella 03 a profundidad de la bomba para obtener información de producción, tomando en cuenta la bomba seleccionada, con los resultados presentes en la **Figura 4. 3**; los cuales se obtienen del análisis realizado en el software CLAW como se detalla para el pozo Isabella en la **Figura A- 8** y **Figura A- 9** del anexo A.



**Figura 4. 3 Diagrama IPR para el pozo Isabella 03.**  
Fuente: Tobar, K., 2017

Los valores correspondientes a 3050 psig, desde la estación central, en la inyección se detallan en la **Tabla XV**, a continuación.

**Tabla XV Resultados del diagrama IPR pozo Isabella 03**

| GEO  | PINY | QINY | PIP | PROD | Q CAV |
|------|------|------|-----|------|-------|
| 10 H | 3050 | 1725 | 137 | 73   | 187   |

Fuente: Tobar, K., 2017

#### 4.1.1 Sustitución de geometrías actuales

Dada la condición de presión máxima de descarga de la unidad HPS, en superficie, era necesario determinar nuevas configuraciones nozzle/garganta (geometría) que generen el mismo diferencial de

presión en subsuelo requerido para mantener la producción de los pozos con la estación central.

Luego de probar con diferentes combinaciones nozzle/ garganta, se consiguió sustituir las geometrías actuales por otras equivalentes.

### Pozo Isabella 01

Se realizaron los análisis respectivos de los parámetros de la nueva bomba a usar dentro del pozo Isabella 01, de lo cual se obtuvo los datos que se muestran en la **Figura 4. 4**.

| PARAMETROS MECANICOS |         |      | PARAMETROS DE RESERVOIRIO  |       |         | PARAMETROS DE DISEÑO     |       |       |
|----------------------|---------|------|----------------------------|-------|---------|--------------------------|-------|-------|
| ID Tubería:          | 2.992   | pulg | Presión de reservorio:     | 1.600 | psi     | Producción Deseada:      | 44    | bbl/d |
| OD Tubería:          | 3.500   | pulg | API:                       | 22.6  | °API    | Presión de Inyección:    | 2.000 | psi   |
| ID Revestimiento:    | 6.276   | pulg | GOR:                       | 144   | scf/stb | Presión de Entrada:      | 72    | psi   |
| Prof. Pozo (TVD):    | 9.027   | pies | Corte de Agua (BSW):       | 2.00  | %       | Tipo De Fluido Motriz:   | Agua  |       |
| Presión de Cabeza:   | 60      | psi  | Temperatura de Reservorio  | 205   | °F      | API Inyección:           | 22.4  | °API  |
| Tipo de Bomba:       | Directa |      | Temperatura de Superficie: | 110   | °F      | Prof. de la Bomba (TVD): | 8.892 | pies  |
|                      |         |      | Grav. Espec. Gas:          | 1.138 | act/m   | Longitud de la Tubería:  | 8.890 | pies  |
|                      |         |      | Grav. Espec. Agua:         | 1.000 | act/m   |                          |       |       |

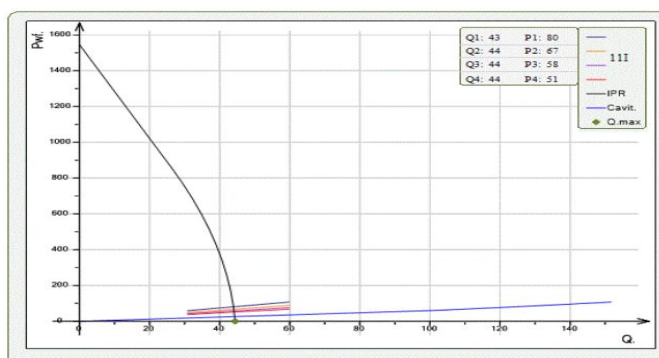
**Figura 4. 4 Parámetros de operación de la nueva bomba para el pozo Isabella 01.**

Fuente: Tobar, K., 2017

Con los parámetros anteriormente descritos se procedió a realiza un análisis nodal y de sensibilidad en el pozo Isabella 01 a la profundidad de la bomba con las adecuaciones en la geometría de la

bomba Jet para mantener la producción inicial del pozo, y los resultados se presentan en la **Figura 4. 5**.

La **Figura A- 10** y **Figura A- 11** del anexo A, muestran la selección de geometría de la jet realizada con el software Claw y el análisis de sensibilidad ejecutado para confirmar la producción deseada.



**Figura 4. 5 Diagrama IPR con la nueva geometría de bomba para el pozo Isabella 01.**

Fuente: Tobar, K., 2017

La **Tabla XVI** presenta los resultados de producción con la nueva geometría de la bomba jet, establecida para mantener la producción inicial con la implementación de la unidad HPS en superficie.

**Tabla XVI Resultados del diagrama IPR pozo Isabella 01**

| GEOM | PINY | QINY | PIP | PROD | Q CAV |
|------|------|------|-----|------|-------|
| 111  | 2800 | 2283 | 51  | 44   | 109   |

Fuente: Tobar, K., 2017

### Pozo Isabella 02

Se realizaron los análisis respectivos de los parámetros de la nueva bomba a usar dentro del pozo Isabella 02 de lo cual se obtuvo los datos que se muestran en la **Figura 4. 6**.

| PARAMETROS MECANICOS |         |      | PARAMETROS DE RESERVORIO   |           |          | PARAMETROS DE DISEÑO     |       |      |
|----------------------|---------|------|----------------------------|-----------|----------|--------------------------|-------|------|
| ID Tubería:          | 2.992   | pulg | Presión de reservorio:     | (TRIAL)1, | psi      | Producción Deseada:      | 166   | bpd  |
| OD Tubería:          | 3.500   | pulg | API:                       | 20.0      | *API     | Presión de Inyección:    | 2.000 | psi  |
| ID Revestimiento:    | 6.276   | pulg | GOR:                       | 91        | scf/stbl | Presión de Entrada:      | 150   | psi  |
| Prof. Puzados(TVD):  | 0.389   | pies | Corte de Agua (BSW):       | 30.00     | %        | Tipo De Fluido Motor:    | Agua  |      |
| Presión de Cabeza:   | 60      | psi  | Temperatura de Reservorio  | 220       | °F       | API Inyección:           | 14.9  | *API |
| Tipo de Bomba:       | Directa |      | Temperatura de Superficie: | 110       | °F       | Prof. de la Bomba (TVD): | 0.265 | pies |
|                      |         |      | Grav. Espec. Gas:          | 1.000     | adim     | Longitud de la Tubería:  | 0.270 | pies |
|                      |         |      | Grav. Espec. Agua:         | 1.000     | adim     |                          |       |      |

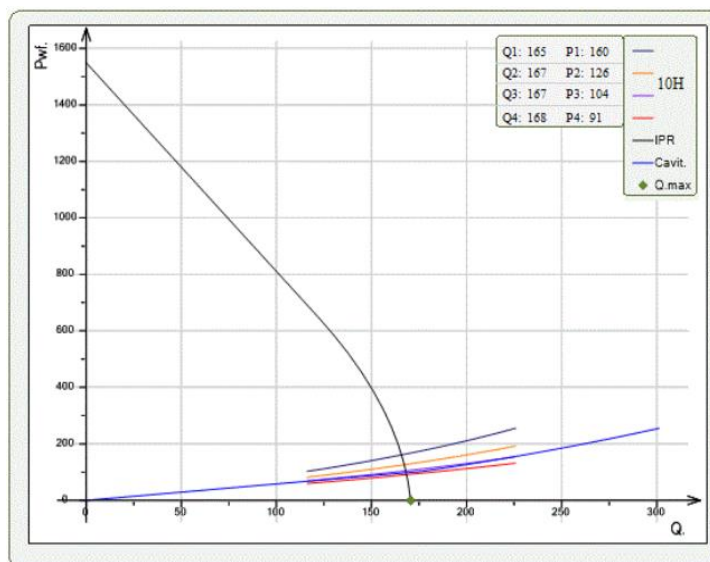
**Figura 4. 6 Parámetros de operación de la nueva bomba para el pozo Isabella 02.**

Fuente: Tobar, K., 2017

Con los parámetros anteriormente establecidos se procedió a realiza un análisis nodal en el pozo Isabella 02 a la profundidad de la bomba con las adecuaciones en la geometría de la bomba Jet para mantener la producción inicial del pozo, y los resultados se muestran en la **Figura 4. 7**.

La Figura A- 12 y **Figura A- 13**Figura A- 11 del anexo A, muestran la selección de geometría de la jet realizada con el software Claw y el

análisis de sensibilidad ejecutado para confirmar la producción deseada.



**Figura 4. 7 Diagrama IPR con la nueva geometría de bomba para el pozo Isabella 02.**

Fuente: Tobar, K., 2017



En la **Tabla XVII** se detallan los parámetros que resultan con la nueva geometría y el aporte que genera la HPS.

**Tabla XVII Resultados del diagrama IPR pozo Isabella 02**

| GEOM | PINY | QINY | PIP | PROD | Q CAV |
|------|------|------|-----|------|-------|
| 10H  | 2800 | 1694 | 91  | 168  | 198   |

Fuente: Tobar, K., 2017

### Pozo Isabella 03

Se realizaron los análisis respectivos de los parámetros de la nueva bomba a usar dentro del pozo Isabella 03 de lo cual se obtuvo los datos que se muestran en la **Figura 4. 8**.

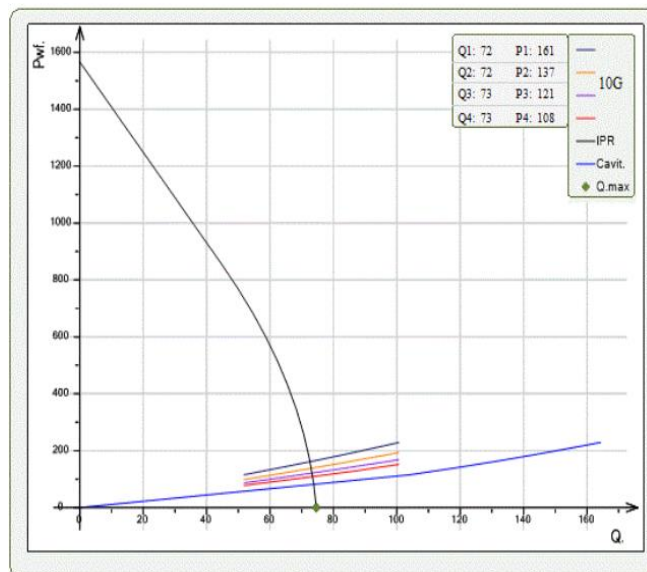
| PARAMETROS MECANICOS |         |      | PARAMETROS DE RESERVOIRIO  |       |         | PARAMETROS DE DISEÑO     |       |      |
|----------------------|---------|------|----------------------------|-------|---------|--------------------------|-------|------|
| ID Tubería:          | 2.992   | puig | Presión de reservorio:     | 1.600 | psi     | Producción Deseada:      | 74    | bbpd |
| OD Tubería:          | 3.500   | puig | API:                       | 22.6  | *API    | Presión de Inyección:    | 2.800 | psi  |
| ID Revestimiento:    | 6.276   | puig | GOR:                       | 143   | scf/stb | Presión de Entrada:      | 138   | psi  |
| Prof. Pozando(TVD):  | 9.042   | pies | Corte de Agua (BSW):       | 2.00  | %       | Tipo De Fluido Motoriz:  | Agua  |      |
| Presión de Cabeza:   | 80      | psi  | Temperatura de Reservorio: | 205   | °F      | API Inyección:           | 22.4  | *API |
| Tipo de Bomba:       | Directa |      | Temperatura de Superficie: | 110   | °F      | Prof. de la Bomba (TVD): | 8.957 | pies |
|                      |         |      | Grav. Espec. Gas:          | 1.138 | adim    | Longitud de la Tubería:  | 9.302 | pies |
|                      |         |      | Grav. Espec. Agua:         | 1.000 | adim    |                          |       |      |

**Figura 4. 8 Parámetros de operación de la nueva bomba para el pozo Isabella 03.**

Fuente: Tobar, K., 2017

Con los parámetros anteriormente descritos se procedió a realiza un análisis nodal en el pozo Isabella 03 a la profundidad de la bomba con las adecuaciones en la geometría de la bomba Jet para mantener la producción inicial del pozo, y los resultados se muestran en la **Figura 4. 9.**

La **Figura A- 14** y **Figura A- 15**Figura A- 13Figura A- 11 del anexo A, muestran la selección de geometría de la jet realizada con el software Claw y el análisis de sensibilidad ejecutado para confirmar la producción deseada.



**Figura 4. 9 Diagrama IPR con la nueva geometría de bomba para el pozo Isabella 03.**

Fuente: Tobar, K., 2017

Los valores resultantes con la nueva geometría y aporte de la HPS para el pozo Isabella 03 se detallan en la **Tabla XVIII**.

**Tabla XVIII Resultados del diagrama IPR pozo Isabella 03**

| GEOM | PINY | QINY | PIP | PROD | Q CAV |
|------|------|------|-----|------|-------|
| 10G  | 2800 | 1670 | 108 | 73   | 119   |

**Fuente:** Tobar, K., 2017

En resumen, según este análisis técnico se requiere un caudal de 5 647 BIPD a 2800 psig de presión de inyección, para abastecer con fluido motriz a los tres pozos considerados, utilizando la unidad HPS.

#### 4.2 Análisis Económico

En la presente sección se lleva a cabo un análisis de relaciones entre las geometrías utilizadas en el Campo Isabella, desde el análisis de consumo de combustible por el motor de combustión interna que es la principal fuente generadora de potencia de la unidad de prueba móvil (MTU).

La distribución de la potencia inicia en la energía presente en el combustible, la misma que pasa a transformarse en potencia mecánica en el interior del motor, luego esta potencia se dirige hacia la caja de cambios del motor, posteriormente ingresa al reductor de velocidades, y culmina en la bomba de desplazamiento positivo lugar en el que se convierte en potencia hidráulica.

Para obtener información acerca del consumo de combustible es primordial realizar un análisis de la secuencia descrita anteriormente, desde su última conversión de potencia hasta llegar a la fuente de energía el combustible, para las condiciones de operación son conocidos dos parámetros que son el caudal y la presión. Desde estos datos se parte para determinar la potencia hidráulica que se generará y de igual manera la potencia mecánica que el motor suministrará, factor que a su vez es proporcional al consumo de combustible, sin olvidar las consideraciones de las eficiencias que se debe tener en cuenta para cada elemento, debido a las pérdidas que se presentarán en forma de calor.

En esta sección se detallarán los valores obtenidos partiendo de las mediciones extraídas en los instrumentos y fórmulas en general que se aplican a la cadena de transformación de energía, omitiendo sus deducciones, se mostrarán las consideraciones generales para tener en cuenta dentro de los cálculos.

#### **Consumo específico de combustible para un sistema con bomba de desplazamiento positivo y su motor de combustión interna.**

Inicialmente se debe calcular la potencia requerida, por una bomba de desplazamiento positivo recíprocas de simple efecto; dado que, es un valor requerido en el cálculo del consumo específico de combustible. La

potencia requerida por la bomba se determina utilizando la **Ec.1**, cuyas unidades son los caballos de fuerza ( $H_p$ ).

$$h_p = \frac{(Q \times P_d)(100)}{(1714)(E_{ff})} - \frac{(Q \times P_s)(E_{ff}-5)}{(1714)(100)} \quad [Hp] \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

$Q \rightarrow$  Caudal de succión  $\left[\frac{Gal}{minuto}\right]$

$P_d \rightarrow$  Presión de descarga [PSI]

$P_s \rightarrow$  Presión de succión [PSI]

$E_{ff} \rightarrow$  Eficiencia de la bomba [%]

$E_{ff} - 5 \rightarrow$  Eficiencia del la carrera de succión [%]

Así, el consumo específico de combustible ( $C_e$ ), se determina aplicando la **Ec.2**, y sus unidades resultantes son los gal/hr.

$$C_e = \frac{(10^6)(2\,546,14398)(h_p)}{(\rho_c)(PCI)(E_c \times E_{red} \times E_m)} ; \left[\frac{Gal}{hr}\right] \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

$h_p \rightarrow$  Potencia requerida por la bomba [Hp]

$\rho_c \rightarrow$  Densidad del diesel  $\left[\frac{lb}{Gal}\right]$

$PCI \rightarrow$  Poder calorico inferior del diesel  $\left[\frac{BTU}{lb}\right]$

$E_c \rightarrow$  Eficiencia mecánica de la caja de cambios [%]

$E_{red} \rightarrow$  Eficiencia mecánica del reductor de velocidad [%]

$E_m \rightarrow$  Eficiencia global del motor de combustión interna [%]

De igual manera, hay constantes que son sugeridas en el cálculo de consumo específico de combustible, tomando en cuenta el uso de diésel como combustible.

$$\rho_c = 6,901 \left[\frac{lb}{Gal}\right]$$

$$PCI = 18390 \left[\frac{BTU}{lb}\right]$$

$$E_c = 96 \text{ [%]}$$

$$E_{red} = 98 \text{ [%]}$$

$$E_m = 33 \text{ [%]}$$

$$E_{ff} = 90 \text{ [%]}.$$

#### 4.2.1 Consumo específico de combustible en un sistema centralizado.

##### (condiciones actuales del pozo)

El cálculo de consumo específico de combustible, requerido por la unidad de la operadora para el Campo Isabella, se desarrolla con los valores iniciales por parte de la central de inyección que alimenta el PAD del campo Isabella con el sistema centralizado.

##### Datos:

$$Q = 4900 \text{ BPD} \text{ o } Q = 142,917 \text{ GPM}$$

$$P_s = 60 \text{ PSI}$$

$$P_d = 3100 \text{ PSI}$$

##### Desarrollo:

Se calculó el requerimiento de potencia en el sistema centralizado.

$$h_p = \frac{(Q \times P_d)(100)}{(1714)(E_{ff})} - \frac{(Q \times P_s)(E_{ff} - 5)}{(1714)(100)} \text{ [Hp]}$$

$$h_p = \frac{(142,917 \times 3100)(100)}{(1714)(90)} - \frac{(142,917 \times 60)(90 - 5)}{(1714)(100)} \text{ [Hp]}$$

$$h_p = 282,953 \text{ [Hp]}$$

Siguiente, se obtuvo el calor de consumo específico de combustible.

$$C_e = \frac{(10^6)(2\,546,14398)(h_p)}{(\rho_c)(PCI)(E_c \times E_{red} \times E_m)} \left[ \frac{Gal}{hr} \right]$$

$$C_e = \frac{(10^6)(2\,546,14398)(282,953)}{(6,901)(18390)(96 \times 98 \times 33)} \left[ \frac{Gal}{hr} \right]$$

$$C_e = 18,285 \left[ \frac{Gal}{hr} \right]; \text{ Valor validado en campo Isabella}$$

Partiendo del requerimiento de combustible por parte del motor, se procede a determinar el costo por cada hora, obteniendo información del precio de Galón de Diesel 1 para el sector petrolero por parte de Gerencia de Comercialización Nacional de la Empresa Petroecuador EP., el mismo que tiene un valor de \$1,626336 el Galón, como se muestra en la **Anexo B**

#### 4.2 ANÁLISIS ECONÓMICO

Figura B- 16 del anexo B.

Para definir el precio de combustible consumido por el motor, en cada hora, se realizó el siguiente cálculo:

$$\text{Costo} = C_e \times \text{Valor del Galon}$$

$$\text{Costo} = 18,285 \left[ \frac{Gal}{hr} \right] \times 1,626336 \left[ \frac{\$}{Gal} \right]$$

$$\text{Costo} = 29,73755 \left[ \frac{\$}{hr} \right]$$



El precio del combustible consumido por el motor en el centralizado, en el día, se obtuvo por medio del siguiente cálculo:

$$\text{Costo por Dia} = 29,73755 \left[ \frac{\$}{\text{hr}} \right] \times 24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{d}} \right]$$

$$\text{Costo por Dia} = 713,701 \left[ \frac{\$}{\text{d}} \right]$$

#### **4.2.2 Consumo específico de combustible, individual, con unidad MTU. (OPCION UNO)**

##### **1. POZO ISABELLA 01.**

Cálculo de consumo específico de combustible, requerido por la unidad MTU de la operadora.

##### **Datos:**

$$Q = 1707 \text{ BPD o } Q = 49,7875 \text{ GPM}$$

$$P_s = 60 \text{ PSI}$$

$$P_d = 3050 \text{ PSI}$$

##### **Desarrollo:**

Se determina la potencia requerida y luego el consumo específico de combustible.

$$h_p = \frac{(Q \times P_d)(100)}{(1714)(E_{ff})} - \frac{(Q \times P_s)(E_{ff} - 5)}{(1714)(100)} \text{ [Hp]}$$

$$h_p = \frac{(49,7875 \times 3050)(100)}{(1714)(90)} - \frac{(49,7875 \times 60)(90 - 5)}{(1714)(100)} \text{ [Hp]}$$

$$h_p = 96,957 \text{ [Hp]}$$

$$C_e = \frac{(10^6)(2\,546,14398)(h_p)}{(\rho_c)(PCI)(E_c \times E_{red} \times E_m)} \left[ \frac{\text{Gal}}{\text{hr}} \right]$$

$$C_e = \frac{(10^6)(2\,546,14398)(96,957)}{(6,901)(18390)(96 \times 98 \times 33)} \left[ \frac{\text{Gal}}{\text{hr}} \right]$$

$$C_e = 6,265 \left[ \frac{\text{Gal}}{\text{hr}} \right]; \text{ Valor validado para el pozo Isabella 01}$$

Partiendo del requerimiento de combustible por parte del motor, se procede a determinar el costo por cada hora, obteniendo información del precio de Galón de Diesel 1 para el sector petrolero por parte de Gerencia de Comercialización Nacional de la Empresa Petroecuador EP., el mismo que tiene un valor de \$1,626336 el Galón.

Para obtener el precio de combustible consumido por el motor en cada hora se realizó el siguiente calculo:

$$\text{Costo} = C_e \times \text{Valor del Galon}$$

$$\text{Costo} = 6,265 \left[ \frac{\text{Gal}}{\text{hr}} \right] \times 1,626336 \left[ \frac{\$}{\text{Gal}} \right]$$

$$\text{Costo} = 10,18899 \left[ \frac{\$}{\text{hr}} \right]$$

Para obtener el precio de combustible consumido por el motor en el día se realizó el siguiente calculo:

$$\text{Costo por Dia} = 10,18899 \left[ \frac{\$}{\text{hr}} \right] \times 24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{d}} \right]$$

$$\text{Costo por Dia} = 244,5710 \left[ \frac{\$}{\text{d}} \right]$$

## 2. POZO ISABELLA 02.

Cálculo de consumo específico de combustible, requerido por la unidad MTU de la operadora.

### Datos:

$$Q = 1468 \text{ BPD o } Q = 42,816 \text{ GPM}$$

$$P_s = 60 \text{ PSI}$$

$$P_d = 3100 \text{ PSI}$$

### Desarrollo:

$$h_p = \frac{(Q \times P_d)(100)}{(1714)(E_{ff})} - \frac{(Q \times P_s)(E_{ff} - 5)}{(1714)(100)} \text{ [Hp]}$$

$$h_p = \frac{(42,816 \times 3100)(100)}{(1714)(90)} - \frac{(42,816 \times 60)(90 - 5)}{(1714)(100)} \text{ [Hp]}$$

$$h_p = 84,77 [Hp]$$

$$C_e = \frac{(10^6)(2\,546,14398)(h_p)}{(\rho_c)(PCI)(E_c \times E_{red} \times E_m)} \left[ \frac{Gal}{hr} \right]$$

$$C_e = \frac{(10^6)(2\,546,14398)(84,77)}{(6,901)(18390)(96 \times 98 \times 33)} \left[ \frac{Gal}{hr} \right]$$

$$C_e = 5,478 \left[ \frac{Gal}{hr} \right]; \text{ Valor validado para el pozo Isabella 02}$$

Para obtener el precio de combustible consumido por el motor en cada hora se realizó el siguiente calculo:

$$\text{Costo} = C_e \times \text{Valor del Galon}$$

$$\text{Costo} = 5,478 \left[ \frac{Gal}{hr} \right] \times 1,626336 \left[ \frac{\$}{Gal} \right]$$

$$\text{Costo} = 8,909 \left[ \frac{\$}{hr} \right]$$

Para obtener el precio de combustible consumido por el motor en el día se realizó el siguiente calculo:

$$\text{Costo por Día} = 8,909 \left[ \frac{\$}{hr} \right] \times 24 \left[ \frac{hr}{d} \right]$$

$$\text{Costo por Día} = 213,816 \left[ \frac{\$}{d} \right]$$

### 3. POZO ISABELLA 03.

Cálculo de consumo específico de combustible, requerido por la unidad MTU de la operadora.

**Datos:**

$$Q = 1725 \text{ BPD o } Q = 50,313 \text{ GPM}$$

$$P_s = 60 \text{ PSI}$$

$$P_d = 3050 \text{ PSI}$$

**Desarrollo:**

$$h_p = \frac{(Q \times P_d)(100)}{(1714)(E_{ff})} - \frac{(Q \times P_s)(E_{ff} - 5)}{(1714)(100)} \text{ [Hp]}$$

$$h_p = \frac{(50,313 \times 3050)(100)}{(1714)(90)} - \frac{(50,313 \times 60)(90 - 5)}{(1714)(100)} \text{ [Hp]}$$

$$h_p = 97,979 \text{ [Hp]}$$

$$C_e = \frac{(10^6)(2\,546,14398)(h_p)}{(\rho_c)(PCI)(E_c \times E_{red} \times E_m)} \left[ \frac{\text{Gal}}{\text{hr}} \right]$$

$$C_e = \frac{(10^6)(2\,546,14398)(97,979)}{(6,901)(18390)(96 \times 98 \times 33)} \left[ \frac{\text{Gal}}{\text{hr}} \right]$$

$$C_e = 6,332 \left[ \frac{\text{Gal}}{\text{hr}} \right]$$

Para obtener el precio de combustible consumido por el motor en cada hora se realizó el siguiente calculo:

$$\text{Costo} = C_e \times \text{Valor del Galon}$$

$$\text{Costo} = 6,332 \left[ \frac{\text{Gal}}{\text{hr}} \right] \times 1,626336 \left[ \frac{\$}{\text{Gal}} \right]$$

$$\text{Costo} = 10,29795 \left[ \frac{\$}{\text{hr}} \right]$$

Para obtener el precio de combustible consumido por el motor en el día se realizó el siguiente calculo:

$$\text{Costo por Dia} = 10,29795 \left[ \frac{\$}{\text{hr}} \right] \times 24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{d}} \right]$$

$$\text{Costo por Dia} = 247,151 \left[ \frac{\$}{\text{d}} \right]$$

#### **Costo del Alquiler de la unidad móvil de prueba.**

Es muy importante conocer el valor del alquiler de cada unidad móvil de prueba (MTU), por lo que la empresa Sertecpet proporcionó los valores.

Datos que fueron tomados de la lista de precios de servicios eventuales, bajo llamada, para actividades de evaluación de pozos, instalación y puesta en marcha de facilidades tempranas y/o

temporales y actividades relacionadas con la producción y provisión de bienes para todos los bloques operados por Petroamazonas EP.

Donde detalla lo que se muestra en la **Figura 4. 10.**

|  |      |        |
|--|------|--------|
| Tarifa de servicio de evaluación de pozos con MTU de 22 días en adelante | HORA | 100.39 |
|--|------|--------|

**Figura 4. 10 Tarifa del alquiler de la MTU por hora.**

Fuente: Sertecpet., 2017

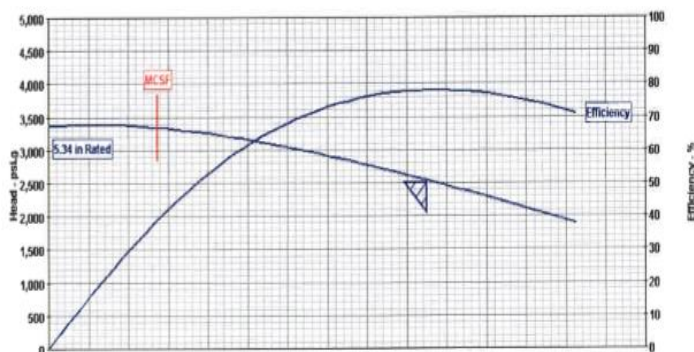
Donde su precio en días sería de **\$ 2,409.36.**

#### **4.2.3 Precio final con la implementación de las unidades móviles de prueba.**

Dentro del Campo Isabella se necesita alimentar 3 pozos para no perder la producción y cada unidad móvil de prueba cuenta con la capacidad para alimentar un pozo por lo que para cumplir este requerimiento se necesitaran de tres unidades móviles y su precio final será de **\$ 7 933.62**

#### 4.2.4 Consumo específico de electricidad para la producción del campo Isabella con el uso de las unidades de bombeo horizontal(HPS), sistema centralizado (OPCIÓN DOS).

Para realizar los cálculos respectivos, es necesario conocer la eficiencia de la bomba, por lo cual utilizamos la gráfica presente en la **Figura 4. 11**.



**Figura 4. 11** Diagrama de la curva de rendimiento de la bomba.

Fuente: Sertecpet., 2017

Así, utilizando la **Ec.3**, determinamos la potencia requerida en Horse Power.

$$h_p = \frac{(Q \times P_d)(100)}{(1714)(E_{ff})} [Hp] \quad \text{Ec.3}$$

**Datos:**

$$Q = 5647 \text{ BPD} \text{ o } Q = 164,70 \text{ GPM}$$



$$P_s = 60 \text{ PSI}$$

$$P_d = 2800 \text{ PSI}$$

**Desarrollo:**

$$h_p = \frac{(Q \times P_d)(100)}{(1714)(E_{ff})} [\text{Hp}]$$

$$h_p = \frac{(164,70 \times 2800)(100)}{(1714)(68)} [\text{Hp}]$$

$$h_p = 395,67 [\text{Hp}]$$

Usando la equivalencia de 1 Hp = 0,7457 kw; convertimos de Hp a Kw

$$hp = 395,67 [\text{Hp}] \times 0,7457 \left[ \frac{\text{kw}}{\text{Hp}} \right]$$

$$hp = 295,05 [\text{kw}]$$

Ahora, usando la **Ec.4**, se determina la energía requerida diariamente.

$$E = hp [\text{kw}] \times t [\text{hr}] \quad \text{Ec.4}$$

Se va a evaluar en un tiempo de 24 horas:

$$E = 295,05 [\text{kw}] \times 24 [\text{hr}]$$

$$E = 7081,26 \text{ [kw/día]}$$

#### 4.2.5 Costo del consumo Energético diario.

Para determinar el consumo energético se procedió a consultar el valor de kW-h, valor establecido por la Agencia de Control y Regulación de Electricidad, la misma que establece que el valor de cada kW-h es de \$0,090 para la zona petrolera.

$$\text{Costo} = E \text{ [kw - hr]} \times \$/[\text{kw - hr}] \quad \text{Ec.5}$$

##### Desarrollo

$$\text{Costo} = E \text{ [kw/día]} \times \$/[\text{kw/hr}]$$

$$\text{Costo} = 7081,23 \text{ [kw/día]} \times 0,090 \text{ $/}[kw/hr]$$

$$\text{Costo} = 637,31 \frac{\$}{\text{día}}$$

##### Costo del Alquiler de la unidad de bombeo horizontal.

Al igual que el conocer el alquiler de la MTU es de vital importancia dentro de este análisis conocer el valor del alquiler de la HPS para realizar el análisis de la factibilidad de usar una unidad móvil de prueba a tener que usar tres unidades móviles de prueba.

Datos también obtenidos por la empresa Sertecpet de la lista de precios servicios eventuales bajo llamada para actividades de

evaluación de pozos, instalación y puesta en marcha de facilidades tempranas y/o temporales y actividades relacionadas con la producción y provisión de bienes para todos los bloques operados por Petroamazonas EP.

Donde detalla lo que se muestra en la siguiente **Figura 4. 12**.

|   |              |          |
|---|--------------|----------|
| Unidad de Bombeo Horizontal HPS (centrifuga) con motor eléctrico, variador de frecuencia, con capacidad de 9001 a 12000 BFPD a una presión de 2800 psi, incluye 2 operadores (turnos de 12 horas c/u) y mantenimiento preventivo. | DÍA/FRACCIÓN | 4,256.00 |
|---|--------------|----------|

**Figura 4. 12 Tarifa del alquiler de la HPS por día.**  
Fuente: Sertecpet., 2017

#### 4.2.6 Precio final con la implementación de la unidad de bombeo horizontal HPS.

El precio final para la operadora será el valor del alquiler diario de la UNIDAD más el precio del consumo energético

$$\text{Costo total} = \$ 637,31 + \$4256,00$$

$$\text{Costo total} = \$ \mathbf{4893.31}$$

Así, se concluye, que en el marco económico existe un ahorro diario de  $\$7933,62 - \$4893,31 = \$3040,31$  al implementar la unidad HPS como sistema power oil centralizado.

### 4.3 Análisis Ambiental.

En esta sección del proyecto se procederá a cuantificar los efectos positivos relacionados al cambio de motor de combustión interna que es el encargado de generar la potencia en una unidad móvil de prueba (MTU), por un motor eléctrico de inducción que es el que genera la potencia en la unidad de bombeo horizontal (HPS), desde un punto de vista ambiental.

Lo más relevante de esta sección será cuantificar las toneladas de emisiones tóxicas que se evitan emanar al ambiente, al sustituir el motor de combustión interna por un motor eléctrico y establecer los aspectos positivos que se generan al evitar la emanación de CO<sub>2</sub> al ambiente.

#### Cálculo de emisiones CO<sub>2</sub> producidas con unidad MTU

Para realizar el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> por las MTU se parte con el consumo anual de combustible por parte de los motores de combustión interna de generaran la potencia requerida.

$$C_e = C_e(\text{Isabella01}) + C_e(\text{Isabella02}) + C_e(\text{Isabella03}) = 18,285 \left[ \frac{\text{Gal}}{\text{hr}} \right]$$

Se procedió a multiplicarla por la densidad del Diesel.

$$C_e = 18,285 \left[ \frac{\text{Gal}}{\text{hr}} \right] \times 6,901 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{Gal}} \right]$$

$$C_e = 126,184 \left[ \frac{lb}{hr} \right]$$

Luego se convierte en Kilogramos por hora.

$$C_e = 126,184 \left[ \frac{lb}{hr} \right] \times 2,20462 \left[ \frac{Kg}{lb} \right]$$

$$C_e = 278,187 \left[ \frac{Kg}{hr} \right]$$

Ahora se lo deja expresado en Kilogramos por año.

$$C_e = 278,187 \left[ \frac{Kg}{hr} \right] \times 24 \left[ \frac{hr}{D} \right] \times 365 \left[ \frac{D}{Año} \right]$$

$$C_e = 2\,436\,918,12 \left[ \frac{Kg}{Año} \right]$$

Se transforma el consumo de combustible en toneladas por año.

$$C_e = 2\,436\,918,12 \left[ \frac{Kg}{Año} \right] \times 1/1000 \left[ \frac{Tn}{Kg} \right]$$

$$C_e = 2\,436,918,12 \left[ \frac{Tn}{Año} \right]$$

Para finalizar se calcula las toneladas de emisión de CO<sub>2</sub>, utilizando la

**Ec.6.**

$$Tn CO2 = Tn Ce \left[ \frac{Tn}{Año} \right] x Fc [adm] \quad \text{Ec.6}$$

Desarrollo:

$$Tn CO2 = Tn Ce \left[ \frac{Tn}{Año} \right] x Fc [adm]$$

$$Tn CO2 = 2\,436,918,12 \left[ \frac{Tn}{Año} \right] x 3,053 [adm]$$

$$Tn CO2 = 7441,5607 \left[ \frac{Tn}{Año} \right]$$

Las emisiones de CO2 producida en 1 años del ejemplo anterior equivale al volumen ocupado por **7442 viviendas** con las dimensiones que se muestran en la **Figura 4. 13**.



**Figura 4. 13 Referencia, del volumen de CO2, en referencia a las dimensiones de una casa.**

**Fuente:** Sertecpet, 2017

Realizando la sustitución de un motor de combustión interna que es motor que genera la potencia en la MTU por un motor eléctrico de inducción que el motor utilizado por la HPS se eliminan las emisiones de CO2, rangos

que son posibles cuantificarlos teniendo los parámetros de operación de las MTU.

Para calcular el consumo de combustible y emisiones producidas, el punto de partida es determinar la potencia hidráulica requerida por la bomba de subsuelo, luego se calcula en función a este valor la potencia mecánica necesaria (la eficiencia media de un motor de combustión interna entre 25 - 35% es decir sólo la tercera parte de la energía calórica se transforma en energía mecánica) el caudal de combustible requerido es directamente proporcional a las emisiones de CO<sub>2</sub>.

**Esta empresa está en capacidad de cumplir con los requerimientos establecidos por ISO 50001 estándar** que permite a las organizaciones mejorar continuamente la eficiencia, los costos relacionados con energía, y reducir la emisión de gases de efecto invernadero.

# **CAPÍTULO 5**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**



## CONCLUSIONES

El trabajo realizado permite concluir que, el uso de una unidad HPS como unidad de bombeo en un sistema centralizado para varios pozos, en reemplazo de unidades MTU, es ventajosa desde el punto de vista económico, operacional y ambiental.

Económicamente se concluyó que el uso de energía eléctrica por parte del motor de inducción que alimenta a la bomba horizontal, permite reducir costos diarios por cantidad de \$3040,31, lo cual se refleja como un beneficio para la operadora.

Desde el punto operacional se concluyó que la configuración y capacidades de la bomba horizontal permite reemplazar el trabajo requerido por las 3 unidades MTU. A pesar de que su capacidad de presión de inyección es menor a la original, su cualidad para manejar caudales elevados permite solventar la presión requerida y mantener la producción deseada.

En el aspecto ambiental, se concluye que el uso de la unidad HPS reduce la emisión de CO<sub>2</sub> que el motor de combustión interna conlleva en su operación,

lo cual se traduce como un aporte al medio ambiente al utilizar energía eléctrica en su motor de inducción; además, reduce la contaminación por ruido.

La unidad HPS es un sistema que permite optimizar operaciones de producción en pozos con levantamiento artificial hidráulico, elevando su presión de inyección proporcionalmente al número de etapas que posee y la presión de cabeza que genera cada una de las mismas; o variando el caudal por medio de cambios en las frecuencias suministradas al eje de la bomba.

En función de los parámetros de producción establecidos por el sistema centralizado presente en los pozos usados en el estudio, y, de la presión disponible en superficie con la bomba centrífuga se determinaron las nuevas configuraciones de nozzle/garganta para las bombas jet en subsuelo. De esa manera, se concluyó que la unidad HPS sí satisface los requerimientos de presión y caudal que demandan los 3 pozos analizados, acorde a las nuevas geometrías, para mantener la producción original de los pozos.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda que la locación a utilizar el sistema de bombeo horizontal cuente con líneas de fuente eléctrica, para poder alimentar el motor de inducción utilizado en la unidad HPS. Caso contrario, se debería recurrir al uso de un generador eléctrico, lo cual significaría un aumento en los costos operacionales.

En el caso de la bomba horizontal disponible, se tiene una presión de inyección de 2800 psig, lo cual se resuelve con el incremento del caudal de inyección por parte de la bomba para solventar los requerimientos de producción; por ende, es recomendable contar con tanques de almacenamiento para el fluido motriz, que puedan suplir los requerimientos de volumen a inyectar.

Se recomienda que la unidad HPS sea utilizada como sistema power oil centralizado, en el caso de alimentar más de dos pozos que cuenten con las completaciones requeridas en el levantamiento artificial hidráulico.

# ANEXOS

## Anexo A

### 4.1 ANÁLISIS TÉCNICO

**Figura A- 1 Reporte diario de producciones del pozo Isabella 01**

| SERTECPET                              |           | DATOS DE EVALUACION DE POZO ISABELLA 01- REPORTE DE EVALUACION HORA POR HORA |      |                    |           |       |                     |             |     |      |                  |     |      | FECHA: 2017-12-29 |              |             |               |             |             |
|--|-----------|--|------|--------------------|-----------|-------|---------------------|-------------|-----|------|------------------|-----|------|-------------------|--------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| CAMPO: Isabella                        |           | POZO: Isabella 01  |      |                    |           |       |                     |             |     |      |                  |     |      |                   |              |             |               |             |             |
| ESTACION: Isabella                     |           | ARENA: U   |      |                    |           |       |                     |             |     |      |                  |     |      |                   |              |             |               |             |             |
| TIPO DE BOMBA: 11 G. MET. CLAW         |           | TASA DNE: 50   |      |                    |           |       |                     |             |     |      |                  |     |      |                   |              |             |               |             |             |
| FECHA: viernes 29 de diciembre de 2017 |           |  |      |                    |           |       |                     |             |     |      |                  |     |      |                   |              |             |               |             |             |
| HORA                                   | PRESIONES |  |      | PRODUCCION REAL MH |           |       |                     | BBLs, INTEG |     |      | PRODUCCION TOTAL |     |      | RECUPERADOS       |              |             | COMENTARIOS   |             |             |
|  | P1act     | P1ay   | P.C. | BFPD               | BOPD      | BWPD  | API <sup>2</sup> ca | BIPD        | BSW | API  | BFPOR            | BSW | API  | BBLs              | AGUA         | OIL         |               |             | TOTAL       |
|  | PSI       | PSI  | PSI  | BLS/D              | BLS/D     | BLS/D |                     | BLS/D       | z   |      | BLS/D            | z   | 4seg | BBL/D             | BBL/D        | BBL/D       |               |             |             |
| viernes 29 de diciembre de 2017        |           |  |      |                    |           |       |                     |             |     |      |                  |     |      |                   |              |             |               |             |             |
| 5:00                                   | 2100      | 3050   | 10   | 41                 | 40        | 1     |                     | 0.41        | 2   |      | 0.12             | 0.2 |      | 1.70              | 0.00         | 1.70        | 1.70          |             |             |
| 6:00                                   | 2100      | 3050   | 10   | 46                 | 45        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.17             | 0.2 |      | 1.90              | 0.10         | 2.00        | 2.00          |             |             |
| 7:00                                   | 2100      | 3050   | 10   | 41                 | 40        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.12             | 0.2 |      | 1.70              | 0.10         | 1.80        | 1.80          |             |             |
| 8:00                                   | 2100      | 3050   | 10   | 41                 | 40        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.12             | 0.2 |      | 1.70              | 0.10         | 1.80        | 1.80          |             |             |
| 9:00                                   | 2100      | 3050   | 10   | 43                 | 42        | 1     | 22.4                | 0.41        | 2.0 | 22.4 | 0.14             | 0.2 | 22.4 | 1.00              | 0.20         | 1.20        | 1.20          |             |             |
| 10:00                                  | 2100      | 3050   | 10   | 45                 | 44        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.16             | 0.2 |      | 2.10              | 0.20         | 1.90        | 1.90          |             |             |
| 11:00                                  | 2100      | 3050   | 10   | 46                 | 45        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.17             | 0.2 |      | 1.90              | 0.20         | 2.10        | 2.10          |             |             |
| 12:00                                  | 2100      | 3050   | 10   | 46                 | 45        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.17             | 0.2 |      | 1.90              | 0.20         | 2.10        | 2.10          |             |             |
| 13:00                                  | 2100      | 3050   | 10   | 46                 | 45        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.17             | 0.2 |      | 1.90              | 0.20         | 2.10        | 2.10          |             |             |
| 14:00                                  | 2100      | 3050   | 10   | 46                 | 45        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.17             | 0.2 |      | 1.90              | 0.40         | 1.50        | 1.50          |             |             |
| 15:00                                  | 2100      | 3050   | 10   | 46                 | 45        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.17             | 0.2 |      | 1.90              | 0.40         | 2.00        | 2.00          |             |             |
| 16:00                                  | 2100      | 3050   | 10   | 43                 | 42        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.11             | 0.2 |      | 2.50              | 0.50         | 2.00        | 2.00          |             |             |
| 17:00                                  | 2100      | 3050   | 10   | 35                 | 35        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.17             | 0.2 |      | 1.50              | 0.50         | 2.00        | 2.00          |             |             |
| 18:00                                  | 2100      | 3050   | 10   | 35                 | 35        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.17             | 0.2 |      | 1.50              | 0.50         | 2.00        | 2.00          |             |             |
| 19:00                                  | 2100      | 3050   | 10   | 35                 | 35        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.17             | 0.2 |      | 1.50              | 0.60         | 1.90        | 1.90          |             |             |
| 20:00                                  | 2100      | 3050   | 10   | 46                 | 45        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.17             | 0.2 |      | 1.90              | 0.60         | 2.50        | 2.50          |             |             |
| 21:00                                  | 2100      | 3050   | 10   | 46                 | 45        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.17             | 0.2 |      | 1.90              | 0.60         | 2.50        | 2.50          |             |             |
| 22:00                                  | 2100      | 3050   | 10   | 46                 | 45        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.17             | 0.2 |      | 1.90              | 0.70         | 3.00        | 3.00          |             |             |
| 23:00                                  | 2100      | 3050   | 10   | 35                 | 35        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.17             | 0.2 |      | 1.50              | 0.70         | 2.20        | 2.20          |             |             |
| 0:00                                   | 2100      | 3050   | 10   | 41                 | 40        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.12             | 0.2 |      | 1.70              | 0.70         | 2.40        | 2.40          |             |             |
| 1:00                                   | 2100      | 3050   | 10   | 41                 | 40        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.12             | 0.2 |      | 1.70              | 0.80         | 2.50        | 2.50          |             |             |
| 2:00                                   | 2100      | 3050   | 10   | 41                 | 40        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.12             | 0.2 |      | 1.70              | 0.80         | 2.50        | 2.50          |             |             |
| 3:00                                   | 2100      | 3050   | 10   | 46                 | 45        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.17             | 0.2 |      | 1.90              | 0.80         | 2.70        | 2.70          |             |             |
| 4:00                                   | 2100      | 3050   | 10   | 43                 | 42        | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.14             | 0.2 |      | 1.80              | 0.90         | 2.70        | 2.70          |             |             |
| <b>PROMEDIO</b>                        | 2100      | 3050   | 10   | 44                 | 43.000000 | 1     |                     | 0.41        | 2.0 |      | 0.15000000       | 0.2 |      | 1.83              | 0.46         | 2.29        | 2.29          |             |             |
|  |           |  |      |                    |           |       |                     |             |     |      |                  |     |      | <b>GAS</b>        | <b>5.24</b>  | <b>GOR</b>  | <b>122.45</b> |             |             |
|  |           |  |      |                    |           |       |                     |             |     |      |                  |     |      | <b>BFPD</b>       | <b>44.00</b> | <b>BOPD</b> | <b>43.12</b>  | <b>BWPD</b> | <b>4.81</b> |
|  |           |  |      |                    |           |       |                     |             |     |      |                  |     |      |                   |              |             |               | <b>BSW</b>  | <b>2.40</b> |

Fuente: Sertecpet, 2017

**Figura A- 2 Reporte diario de producciones del pozo Isabella 02**

| SERTECPET                              |           | DATOS DE EVALUACION DE POZO ISABELLA 02- REPORTE DE EVALUACION HORA POR HORA |      |                    |       |       |          |             |      |      |                  |     |      |       |             |        | FECHA: 2017-12-29 |             |              |              |
|--|-----------|--|------|--------------------|-------|-------|----------|-------------|------|------|------------------|-----|------|-------|-------------|--------|-------------------|-------------|--------------|--------------|
| CAMPO: Isabella                        |           | POZO: Isabella02   |      |                    |       |       |          |             |      |      |                  |     |      |       |             |        |                   |             |              |              |
| ESTACION: Isabella                     |           | ARENA: B1  |      |                    |       |       |          |             |      |      |                  |     |      |       |             |        |                   |             |              |              |
| TIPO DE BOMBA: 3HJET CLAW              |           | TASA DMH: 60   |      |                    |       |       |          |             |      |      |                  |     |      |       |             |        |                   |             |              |              |
| FECHA: viernes 29 de diciembre de 2017 |           |  |      |                    |       |       |          |             |      |      |                  |     |      |       |             |        |                   |             |              |              |
| HORA                                   | PRESIONES |  |      | PRODUCCION REAL MH |       |       |          | BBLs, INTEC |      |      | PRODUCCION TOTAL |     |      |       | RECUPERADOS |        |                   | COMENTARIOS |              |              |
|  | Planta    | Fluj   | P.C. | BFPD               | BOPD  | BWPD  | API/Inch | BIPD        | BS4W | API  | BFPDR            | BSW | API  | BBLs  | AGUA        | OIL    | TOTAL             |             |              |              |
|  | PSI       | PSI  | PSI  | BLS/D              | BLS/D | BLS/D | ca       | BLS/D       | %    |      | BLS/D            | %   | days | BBL/D | BBL/D       | BBL/D  |                   |             |              |              |
| <b>viernes 29 de diciembre de 2017</b> |           |  |      |                    |       |       |          |             |      |      |                  |     |      |       |             |        |                   |             |              |              |
| 5:00                                   | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 2.10  | 4.90        | 7.00   |                   |             |              |              |
| 6:00                                   | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1534 | 30               |     | 7.00 | 4.20  | 5.80        | 14.00  |                   |             |              |              |
| 7:00                                   | 3200      | 3100   | 60   | 164                | 101   | 42    | 0375     | 30          |      | 1519 | 30               |     | 6.00 | 6.00  | 16.00       | 20.00  |                   |             |              |              |
| 8:00                                   | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 6.10  | 11.90       | 27.00  |                   |             |              |              |
| 9:00                                   | 3200      | 3100   | 60   | 164                | 101   | 42    | 28.0     | 0375        | 30   | 28.0 | 1519             | 30  | 28.0 | 6.00  | 9.90        | 23.00  | 33.00             |             |              |              |
| 10:00                                  | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 12.00 | 21.00       | 40.00  |                   |             |              |              |
| 11:00                                  | 3200      | 3100   | 60   | 164                | 101   | 42    | 0375     | 30          |      | 1519 | 30               |     | 6.00 | 13.10 | 32.20       | 46.10  |                   |             |              |              |
| 12:00                                  | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 15.90 | 37.00       | 53.00  |                   |             |              |              |
| 13:00                                  | 3200      | 3100   | 60   | 162                | 124   | 53    | 0375     | 30          |      | 1517 | 30               |     | 8.00 | 10.20 | 42.70       | 61.00  |                   |             |              |              |
| 14:00                                  | 3200      | 3100   | 60   | 164                | 101   | 42    | 0375     | 30          |      | 1519 | 30               |     | 6.00 | 20.10 | 46.90       | 67.00  |                   |             |              |              |
| 15:00                                  | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 22.20 | 51.00       | 74.00  |                   |             |              |              |
| 16:00                                  | 3200      | 3100   | 60   | 162                | 124   | 53    | 0375     | 30          |      | 1517 | 30               |     | 8.00 | 24.60 | 57.40       | 82.00  |                   |             |              |              |
| 17:00                                  | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 26.70 | 62.20       | 89.00  |                   |             |              |              |
| 18:00                                  | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 28.80 | 67.20       | 96.00  |                   |             |              |              |
| 19:00                                  | 3200      | 3100   | 60   | 162                | 124   | 53    | 0375     | 30          |      | 1517 | 30               |     | 8.00 | 31.20 | 72.00       | 104.00 |                   |             |              |              |
| 20:00                                  | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 33.30 | 77.30       | 111.00 |                   |             |              |              |
| 21:00                                  | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 35.40 | 82.60       | 118.00 |                   |             |              |              |
| 22:00                                  | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 37.50 | 87.50       | 125.00 |                   |             |              |              |
| 23:00                                  | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 39.60 | 92.40       | 132.00 |                   |             |              |              |
| 0:00                                   | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 41.70 | 97.20       | 139.00 |                   |             |              |              |
| 1:00                                   | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 43.80 | 102.20      | 146.00 |                   |             |              |              |
| 2:00                                   | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 45.90 | 107.10      | 153.00 |                   |             |              |              |
| 3:00                                   | 3200      | 3100   | 60   | 163                | 110   | 50    | 0375     | 30          |      | 1543 | 30               |     | 7.00 | 48.00 | 112.00      | 160.00 |                   |             |              |              |
| 4:00                                   | 3200      | 3100   | 60   | 164                | 101   | 42    | 0375     | 30          |      | 1519 | 30               |     | 6.00 | 49.80 | 116.20      | 166.00 |                   |             |              |              |
| <b>PROMEDIO</b>                        | 3200      | 3100   | 60   | 165                | 116   | 50    | 0375     | 30          |      | 1541 |                  |     | 6.92 | 25.82 | 61.93       | 84.00  |                   |             |              |              |
|  |           |  |      |                    |       |       |          |             |      |      |                  |     |      |       |             |        | <b>GAS</b>        | <b>GOR</b>  | <b>77.91</b> |              |
|  |           |  |      |                    |       |       |          |             |      |      |                  |     |      |       |             |        | <b>BFPD</b>       | <b>BOPD</b> | <b>BWPD</b>  |              |
|  |           |  |      |                    |       |       |          |             |      |      |                  |     |      |       |             |        | <b>114.00</b>     | <b>116</b>  | <b>50</b>    | <b>39.00</b> |

Fuente: Sertecpet, 2017

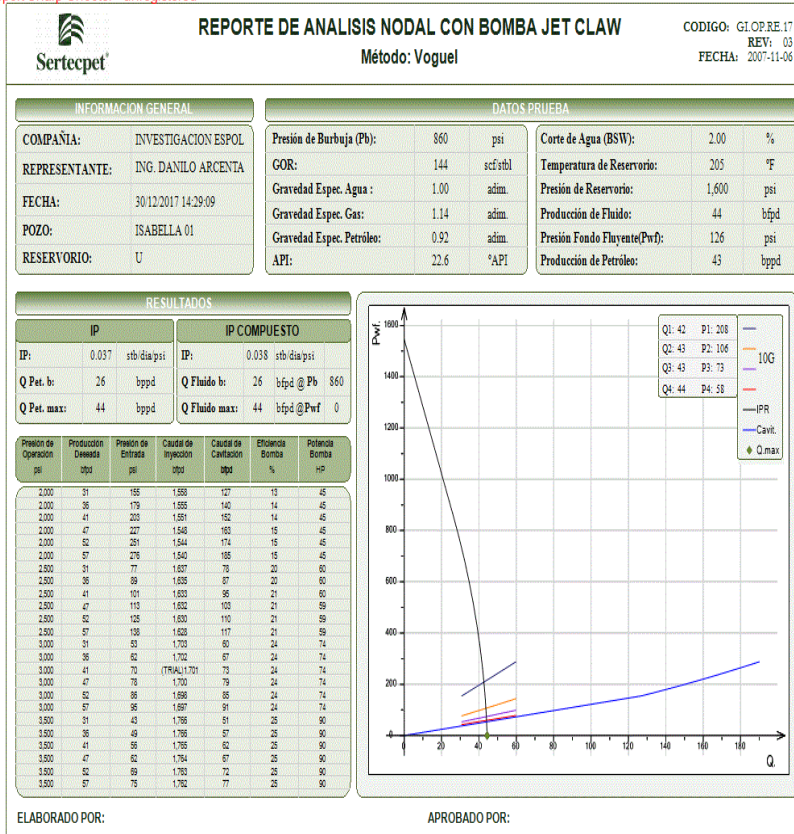
**Figura A- 3 Reporte diario de producciones del pozo Isabella 03**

| DATOS DE EVALUACION DE POZO ISABELLA 03- REPORTE DE EVALUACION HORA POR HORA |           |      |      |                    |       |       |          |             |      |                  |                  |     |      |      | FECHA: 2017-12-29 |              |             |               |  |  |
|--|-----------|------|------|--------------------|-------|-------|----------|-------------|------|------------------|------------------|-----|------|------|-------------------|--------------|-------------|---------------|--|--|
| CAMPO: Isabella  |           |      |      |                    |       |       |          |             |      | POZO: Isabella03 |                  |     |      |      |                   |              |             |               |  |  |
| ESTACION: Isabella   |           |      |      |                    |       |       |          |             |      | ARENA: U         |                  |     |      |      |                   |              |             |               |  |  |
| TIPO DE BOMBA: 114,471CLAW   |           |      |      |                    |       |       |          |             |      | TASA DNM: 100    |                  |     |      |      |                   |              |             |               |  |  |
| FECHA: viernes 29 de diciembre de 2017                                       |           |      |      |                    |       |       |          |             |      |                  |                  |     |      |      |                   |              |             |               |  |  |
| HORA   | PRESIONES |      |      | PRODUCCION REAL MN |       |       |          | BBLs, INTEC |      |                  | PRODUCCION TOTAL |     |      |      | RECUPERADOS       |              |             | COMENTARIOS   |  |  |
|  | Plante    | Play | P.C. | BFPD               | BOPD  | BWPD  | API/Inch | BIPD        | BSAW | API              | BFPDR            | BSW | API  | BBLs | AGUA              | OIL          | TOTAL       |               |  |  |
|  | PSI       | PSI  | PSI  | BLS/D              | BLS/D | BLS/D | z        | BLS/D       | z    | z                | BLS/D            | z   | z    | z    | BBL/D             | BBL/D        | BBL/D       |               |  |  |
| viernes 29 de diciembre de 2017  |           |      |      |                    |       |       |          |             |      |                  |                  |     |      |      |                   |              |             |               |  |  |
| 5:00   | 3000      | 3160 | 00   | 36                 | 35    | 2     |          | 1459        | 2    |                  | 1545             | 2   |      | 3.60 | 87.50             | 3.50         | 91.00       |               |  |  |
| 6:00   | 3000      | 3160 | 00   | 36                 | 35    | 2     |          | 1459        | 2    |                  | 1545             | 2   |      | 3.60 | 87.50             | 7.00         | 94.60       |               |  |  |
| 7:00   | 3000      | 3160 | 00   | 77                 | 75    | 2     |          | 1459        | 2    |                  | 1536             | 2   |      | 3.20 | 87.60             | 10.20        | 97.80       |               |  |  |
| 8:00   | 3000      | 3160 | 00   | 67                 | 66    | 1     |          | 1459        | 2    |                  | 1526             | 2   |      | 2.80 | 87.70             | 12.90        | 100.60      |               |  |  |
| 9:00   | 3000      | 3160 | 00   | 77                 | 75    | 2     | 22.6     | 1459        | 2    | 22.6             | 1536             | 2   | 22.6 | 3.20 | 87.70             | 16.10        | 103.00      |               |  |  |
| 10:00  | 3000      | 3160 | 00   | 74                 | 71    | 2     |          | 1459        | 2    |                  | 1530             | 2   |      | 3.20 | 87.80             | 19.30        | 107.10      |               |  |  |
| 11:00  | 3000      | 3160 | 00   | 77                 | 75    | 2     |          | 1459        | 2    |                  | 1536             | 2   |      | 3.20 | 87.90             | 22.40        | 110.20      |               |  |  |
| 12:00  | 3000      | 3160 | 00   | 77                 | 75    | 2     |          | 1459        | 2    |                  | 1536             | 2   |      | 3.20 | 87.90             | 25.60        | 113.50      |               |  |  |
| 13:00  | 3000      | 3160 | 00   | 77                 | 75    | 2     |          | 1459        | 2    |                  | 1536             | 2   |      | 3.20 | 88.00             | 28.70        | 116.70      |               |  |  |
| 14:00  | 3000      | 3160 | 00   | 77                 | 75    | 2     |          | 1459        | 2    |                  | 1536             | 2   |      | 3.20 | 88.00             | 31.90        | 120.00      |               |  |  |
| 15:00  | 3000      | 3160 | 00   | 36                 | 35    | 2     |          | 1459        | 2    |                  | 1545             | 2   |      | 3.60 | 88.00             | 35.40        | 123.50      |               |  |  |
| 16:00  | 3000      | 3160 | 00   | 36                 | 35    | 2     |          | 1459        | 2    |                  | 1545             | 2   |      | 3.60 | 88.20             | 38.90        | 127.00      |               |  |  |
| 17:00  | 3000      | 3160 | 00   | 60                 | 59    | 1     |          | 1459        | 2    |                  | 1519             | 2   |      | 2.50 | 88.20             | 41.40        | 129.60      |               |  |  |
| 18:00  | 3000      | 3160 | 00   | 62                 | 60    | 2     |          | 1459        | 2    |                  | 1541             | 2   |      | 3.40 | 88.20             | 44.70        | 133.00      |               |  |  |
| 19:00  | 3000      | 3160 | 00   | 60                 | 59    | 1     |          | 1459        | 2    |                  | 1519             | 2   |      | 2.50 | 88.40             | 47.80        | 135.50      |               |  |  |
| 20:00  | 3000      | 3160 | 00   | 72                 | 71    | 1     |          | 1459        | 2    |                  | 1531             | 2   |      | 3.00 | 88.40             | 50.80        | 138.50      |               |  |  |
| 21:00  | 3000      | 3160 | 00   | 72                 | 71    | 1     |          | 1459        | 2    |                  | 1531             | 2   |      | 3.00 | 88.50             | 53.00        | 141.50      |               |  |  |
| 22:00  | 3000      | 3160 | 00   | 72                 | 71    | 1     |          | 1459        | 2    |                  | 1531             | 2   |      | 3.00 | 88.50             | 56.00        | 144.50      |               |  |  |
| 23:00  | 3000      | 3160 | 00   | 55                 | 54    | 1     |          | 1459        | 2    |                  | 1514             | 2   |      | 2.20 | 88.60             | 58.20        | 146.50      |               |  |  |
| 0:00   | 3000      | 3160 | 00   | 60                 | 59    | 1     |          | 1459        | 2    |                  | 1519             | 2   |      | 2.50 | 88.60             | 60.70        | 149.20      |               |  |  |
| 1:00   | 3000      | 3160 | 00   | 62                 | 61    | 1     |          | 1459        | 2    |                  | 1521             | 2   |      | 2.60 | 88.70             | 63.20        | 151.90      |               |  |  |
| 2:00   | 3000      | 3160 | 00   | 72                 | 71    | 1     |          | 1459        | 2    |                  | 1531             | 2   |      | 3.00 | 88.80             | 66.20        | 155.00      |               |  |  |
| 3:00   | 3000      | 3160 | 00   | 60                 | 59    | 1     |          | 1459        | 2    |                  | 1519             | 2   |      | 2.50 | 88.80             | 68.60        | 157.40      |               |  |  |
| 4:00   | 3000      | 3160 | 00   | 72                 | 71    | 1     |          | 1459        | 2    |                  | 1531             | 2   |      | 3.00 | 88.90             | 71.50        | 160.40      |               |  |  |
| <b>PROMEDIO</b>  | 3000      | 3160 | 00   | 73                 | 71    | 1.2   |          | 1450        | 2    |                  | 1532             |     |      | 3.04 | 89.20             | 70.88        | 152.43      |               |  |  |
|  |           |      |      |                    |       |       |          |             |      |                  |                  |     |      |      | <b>GAS</b>        | <b>4.73</b>  | <b>GOR</b>  | <b>122.43</b> |  |  |
|  |           |      |      |                    |       |       |          |             |      |                  |                  |     |      |      | <b>BFPD</b>       | <b>BOPD</b>  | <b>BWPD</b> | <b>BSW</b>    |  |  |
|  |           |      |      |                    |       |       |          |             |      |                  |                  |     |      |      | <b>73.80</b>      | <b>71.54</b> | <b>1.41</b> | <b>2.40</b>   |  |  |

Fuente: Sertecpet, 2017

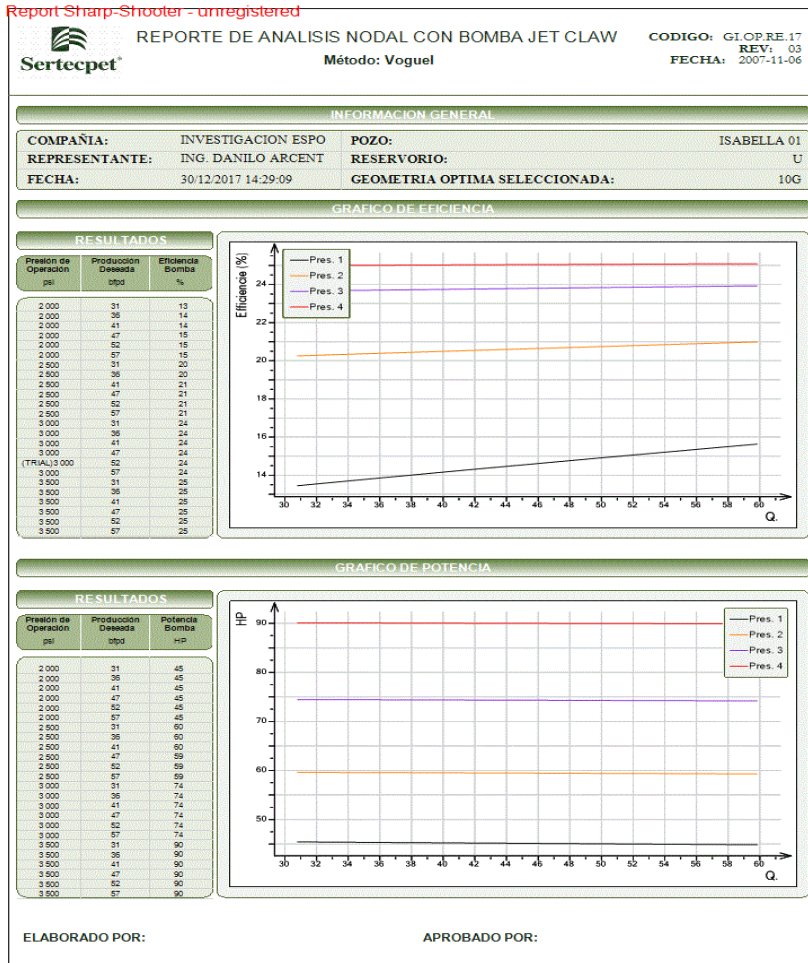
**Figura A- 4 Reporte de análisis nodal con bomba Jet Claw para el pozo Isabella 01.**

Report Sharp-Shooter - unregistered



Fuente: Software Claw – Setecpet, 2017.

**Figura A-5 Análisis de sensibilidad para la bomba jet claw del pozo Isabella 01.**

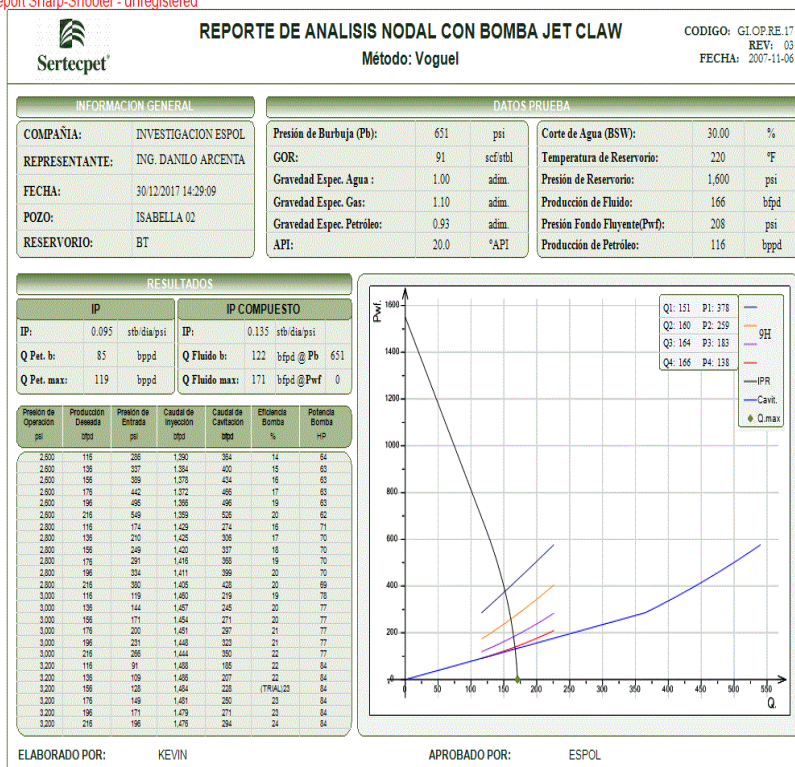


Fuente: Software Claw – Sertecpet , 2017.



**Figura A- 6 Reporte de análisis nodal con bomba Jet Claw para el pozo Isabella 02.**

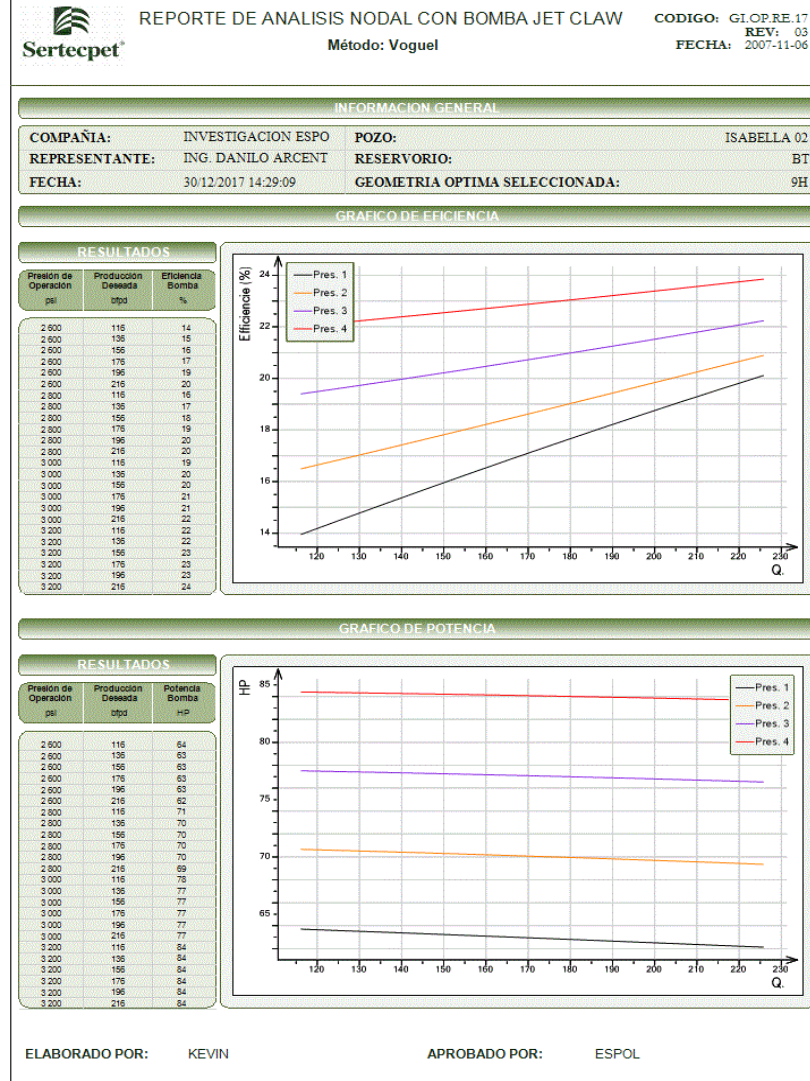
Report Sharp-Shooter - unregistered



Fuente: Software Claw – Sertecpet , 2017.

**Figura A- 7. Análisis de sensibilidad para la bomba jet Claw del pozo Isabella 02.**

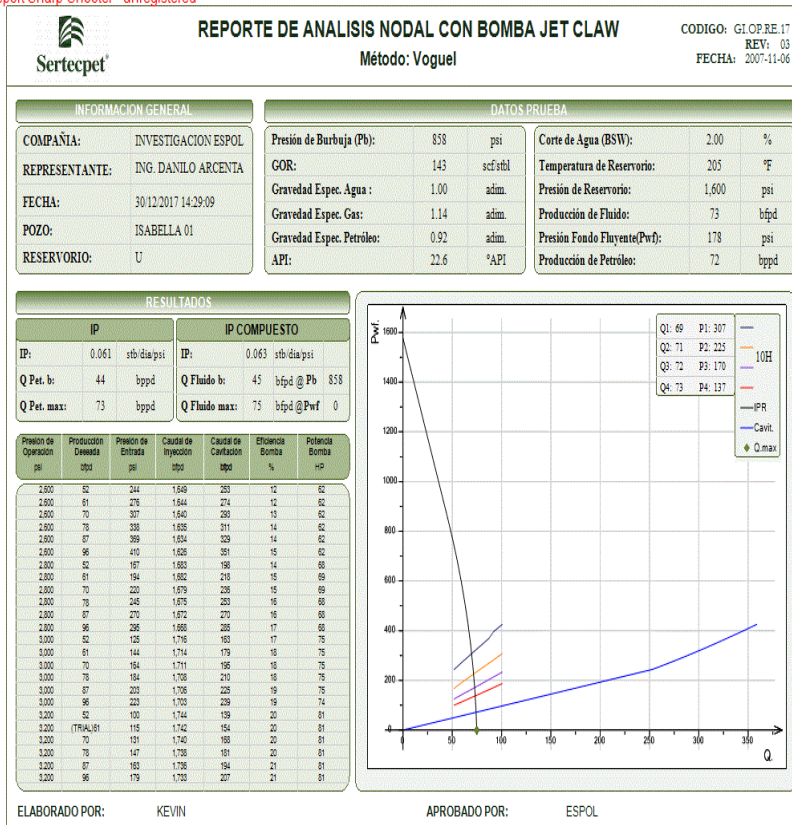
Report Sharp-Shooter - unregistered



Fuente: Software Claw – Sertecpet , 2017.

**Figura A- 8 Reporte de análisis nodal con bomba Jet Claw para el pozo Isabella 03.**

Report Sharp-Shooter - unregistered

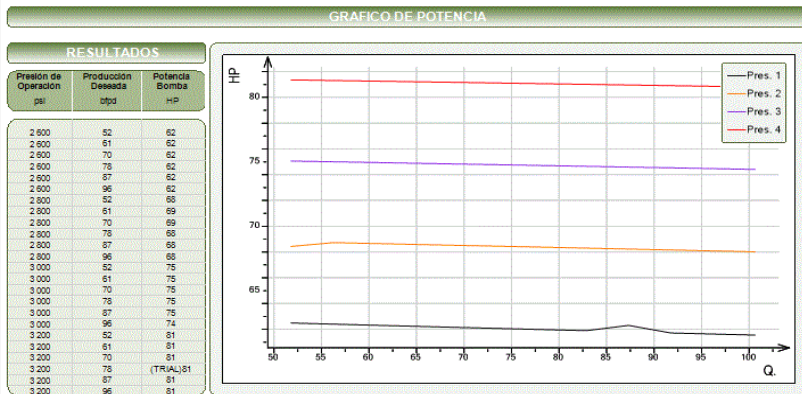
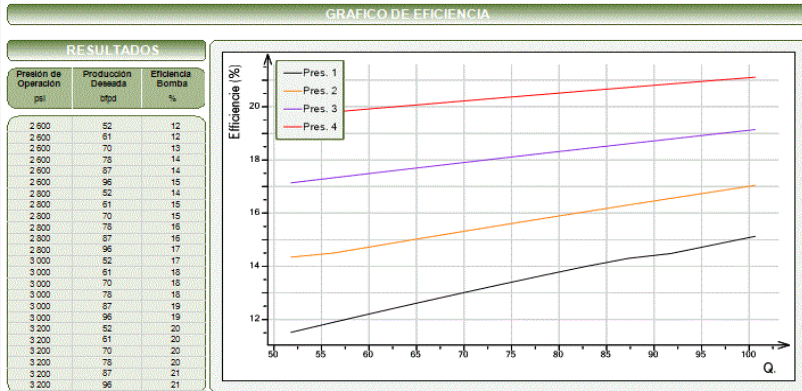


Fuente: Software Claw – Sertecpet , 2017.

**Figura A- 9 Análisis de sensibilidad para la bomba jet Claw del pozo Isabella 03**

Report Sharp-Shooter - unregistered

| INFORMACION GENERAL |                     |                                |             |
|---------------------|---------------------|--------------------------------|-------------|
| COMPAÑIA:           | INVESTIGACION ESPO  | POZO:                          | ISABELLA 01 |
| REPRESENTANTE:      | ING. DANILO ARCENT  | RESERVORIO:                    | U           |
| FECHA:              | 30/12/2017 14:29:09 | GEOMETRIA OPTIMA SELECCIONADA: | 10H         |



ELABORADO POR: KEVIN

APROBADO POR: ESPOL

Fuente: Software Claw – Sertecpet , 2017.



**Figura A- 11 Análisis de sensibilidad para la bomba jet Claw del pozo Isabella 01, con nueva configuración.**

Report Sharp-Shooter - unregistered



REPORTE DE ANALISIS NODAL CON BOMBA JET CLAW

CODIGO: GLOPRE.17

REV: 03

Método: Vogel

FECHA: 2007-11-06

INFORMACION GENERAL

|                |                     |                                |             |
|----------------|---------------------|--------------------------------|-------------|
| COMPañIA:      | INVESTIGACION ESPO  | POZO:                          | ISABELLA 01 |
| REPRESENTANTE: | ING. DANILO ARCENT  | RESERVORIO:                    | U           |
| FECHA:         | 30/12/2017 14:29:09 | GEOMETRIA OPTIMA SELECCIONADA: | 111         |

GRAFICO DE EFICIENCIA

RESULTADOS

| Presión de Operación<br>psi | Producción<br>Deseadas<br>cfpd | Eficiencia<br>Bomba<br>% |
|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 2800                        | 31                             | 19                       |
| 2800                        | 36                             | 19                       |
| 2800                        | 41                             | 19                       |
| 2800                        | 47                             | 19                       |
| 2800                        | 52                             | 20                       |
| 2800                        | 57                             | 20                       |
| 2800                        | 31                             | 21                       |
| 2800                        | 36                             | 21                       |
| 2800                        | 41                             | 21                       |
| 2800                        | 47                             | 22                       |
| 2800                        | 52                             | 22                       |
| 2800                        | 57                             | 22                       |
| 3000                        | 31                             | 23                       |
| 3000                        | 36                             | 23                       |
| 3000                        | 41                             | 23                       |
| 3000                        | 47                             | 23                       |
| 3000                        | 52                             | 23                       |
| 3000                        | 57                             | 23                       |
| 3200                        | 31                             | 24                       |
| 3200                        | 36                             | 24                       |
| 3200                        | 41                             | 24                       |
| 3200                        | 47                             | 24                       |
| 3200                        | 52                             | 24                       |
| 3200                        | 57                             | 24                       |

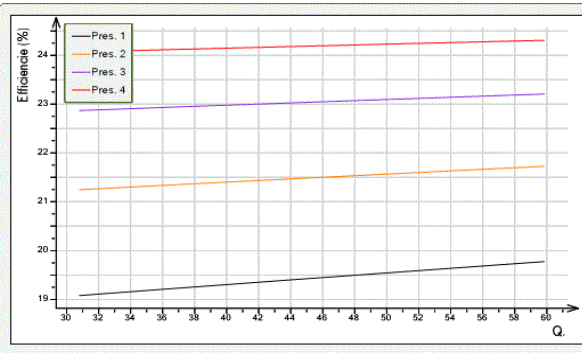
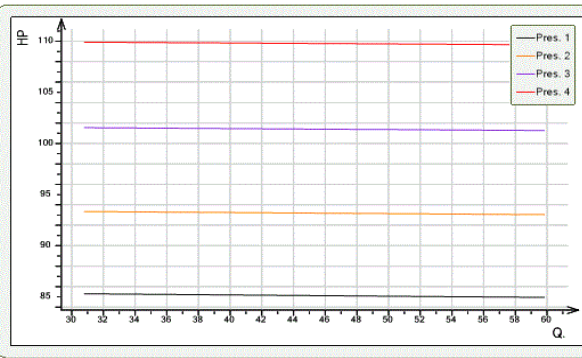


GRAFICO DE POTENCIA

RESULTADOS

| Presión de Operación<br>psi | Producción<br>Deseadas<br>cfpd | Potencia<br>Bomba<br>HP |
|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 2800                        | 31                             | 85                      |
| 2800                        | 36                             | 85                      |
| 2800                        | 41                             | 85                      |
| 2800                        | 47                             | 85                      |
| 2800                        | 52                             | 85                      |
| 2800                        | 57                             | 85                      |
| 2800                        | 31                             | 93                      |
| 2800                        | 36                             | 93                      |
| 2800                        | 41                             | 93                      |
| 2800                        | 47                             | 93                      |
| 2800                        | 52                             | 93                      |
| 2800                        | 57                             | 93                      |
| 3000                        | 31                             | 102                     |
| 3000                        | 36                             | 101                     |
| 3000                        | 41                             | 101                     |
| 3000                        | 47                             | 101                     |
| 3000                        | 52                             | 101                     |
| 3000                        | 57                             | (TRAIL)101              |
| 3200                        | 31                             | 110                     |
| 3200                        | 36                             | 110                     |
| 3200                        | 41                             | 110                     |
| 3200                        | 47                             | 110                     |
| 3200                        | 52                             | 110                     |
| 3200                        | 57                             | 110                     |



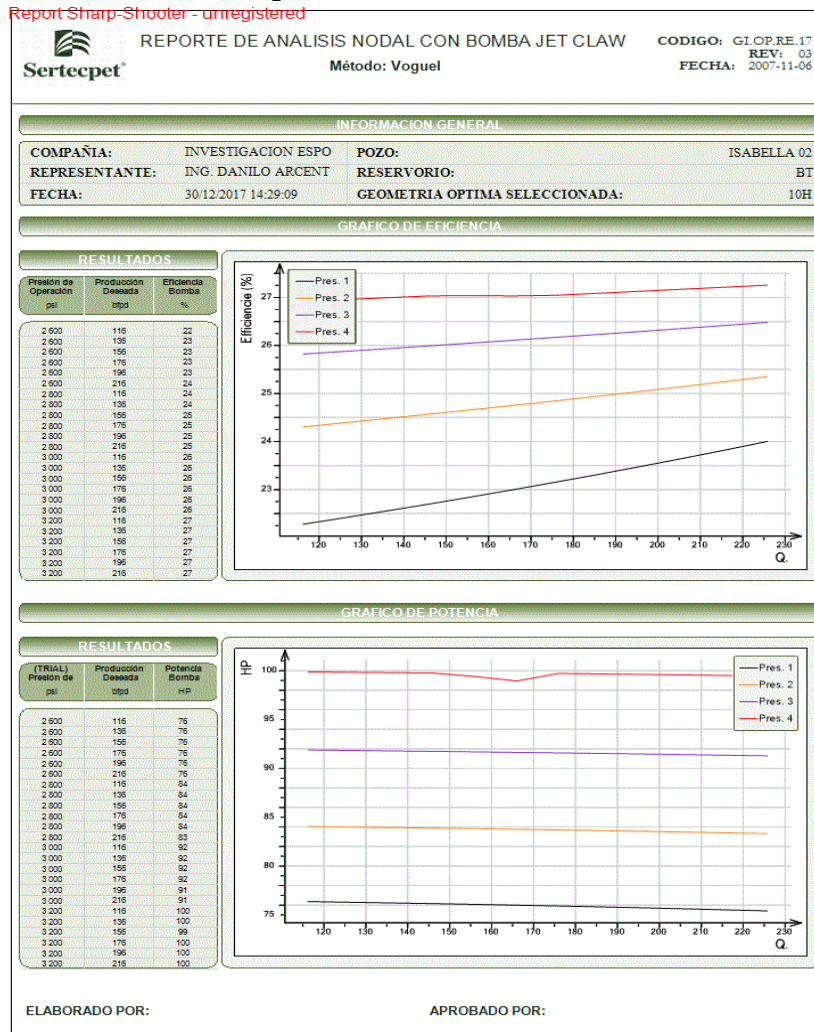
ELABORADO POR:

APROBADO POR:

Fuente: Software Claw – Sertecpet , 2017.



**Figura A- 13 Análisis de sensibilidad para la bomba jet Claw del pozo Isabella 02, con nueva configuración.**



Fuente: Software Claw – Sertecpet , 2017.





**Figura A- 15 Análisis de sensibilidad para la bomba jet Claw del pozo Isabella 03, con nueva configuración.**

Report Sharp-Shooter - unregistered



REPORTE DE ANALISIS NODAL CON BOMBA JET CLAW

CODIGO: GLOPRE.17

REV: 03

Método: Voguel

FECHA: 2007-11-06

INFORMACION GENERAL

|                |                     |                                |             |
|----------------|---------------------|--------------------------------|-------------|
| COMPañIA:      | INVESTIGACION ESPO  | POZO:                          | ISABELLA 01 |
| REPRESENTANTE: | ING. DANIL0 ARCENT  | RESERVORIO:                    | U           |
| FECHA:         | 30/12/2017 14:29:09 | GEOMETRIA OPTIMA SELECCIONADA: | 10G         |

GRAFICO DE EFICIENCIA

RESULTADOS

| Presión de Operación psi | Producción Deseada t/d | Eficiencia Bomba % |
|--------------------------|------------------------|--------------------|
| 2800                     | 52                     | 21                 |
| 2800                     | 61                     | 22                 |
| 2800                     | 70                     | 22                 |
| 2800                     | 78                     | 22                 |
| 2800                     | 87                     | 22                 |
| 2800                     | 96                     | 22                 |
| 2800                     | 52                     | 23                 |
| 2800                     | 61                     | 23                 |
| 2800                     | 70                     | 23                 |
| 2800                     | 78                     | 23                 |
| 2800                     | 87                     | 23                 |
| 2800                     | 96                     | 23                 |
| 3000                     | 52                     | 24                 |
| 3000                     | 61                     | 24                 |
| 3000                     | 70                     | 24                 |
| 3000                     | 78                     | 24                 |
| 3000                     | 87                     | 24                 |
| 3000                     | 96                     | 24                 |
| 3200                     | 52                     | 24                 |
| 3200                     | 61                     | 25                 |
| 3200                     | 70                     | 25                 |
| 3200                     | 78                     | 25                 |
| 3200                     | 87                     | 25                 |
| 3200                     | 96                     | 25                 |

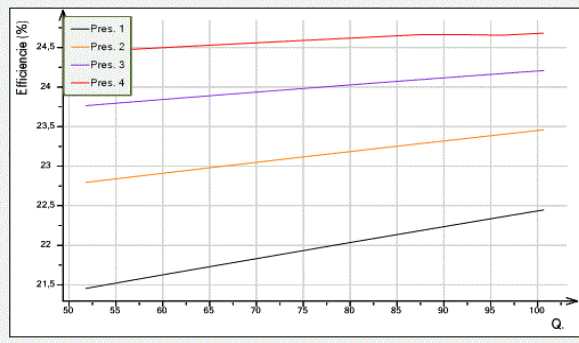
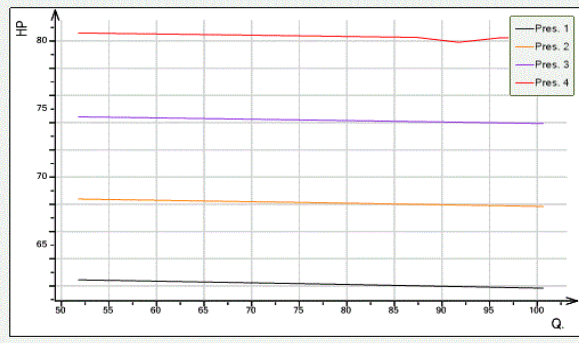


GRAFICO DE POTENCIA

RESULTADOS

| Presión de Operación psi | Producción Deseada t/d | Potencia Bomba HP |
|--------------------------|------------------------|-------------------|
| 2800                     | 52                     | 62                |
| 2800                     | 61                     | 62                |
| 2800                     | 70                     | 62                |
| 2800                     | 78                     | 62                |
| 2800                     | 87                     | 62                |
| 2800                     | 96                     | 62                |
| 2800                     | 52                     | 68                |
| 2800                     | 61                     | 68                |
| 2800                     | 70                     | 68                |
| 2800                     | 78                     | 68                |
| 2800                     | 87                     | 68                |
| 2800                     | 96                     | 68                |
| 3000                     | 52                     | 74                |
| 3000                     | 61                     | 74                |
| 3000                     | 70                     | 74                |
| 3000                     | 78                     | 74                |
| 3000                     | 87                     | 74                |
| 3000                     | 96                     | 74                |
| 3200                     | 52                     | 81                |
| 3200                     | 61                     | 81                |
| 3200                     | 70                     | 80                |
| 3200                     | 78                     | 80                |
| 3200                     | 87                     | 80                |
| 3200                     | 96                     | 80                |




ELABORADO POR: KEVIN

APROBADO POR: ESPOL

Fuente: Software Claw – Sertecpet , 2017.

Anexo B  
4.2 ANÁLISIS ECONÓMICO

Figura B- 16 Lista de precios de venta a nivel de terminal

|  <b>EP PETROECUADOR GERENCIA DE COMERCIALIZACION NACIONAL</b><br>PRECIOS DE VENTA A NIVEL DE TERMINAL PARA LAS COMERCIALIZADORAS<br>CALIFICADAS Y AUTORIZADAS A NIVEL NACIONAL |                  |  |
|---|------------------|--|
| PERIODO DE VIGENCIA: SEPTIEMBRE 2017  |                  |  |
| DECRETO EJECUTIVO No. 799   |                  |  |
| Ley de Solidaridad y Corresponsabilidad Ciudadana   |                  |  |
| PRODUCTO  | Unidad de medida | PRECIO EN TERMINAL<br>(Incluye el 12% del I.V.A.)<br>Expresado en US\$ |
| <b>SECTOR PETROLERO MINERO</b>  |                  |  |
| ABSORBER PETROLERO  | Galones          | \$ 1.626336  |
| DIESEL 1 PETROLERO  | Galones          | \$ 1.626336  |
| DIESEL 2 PETROLERO  | Galones          | \$ 1.626336  |
| DIESEL PREMIUM PETROLERO  | Galones          | \$ 1.800768  |
| FUEL OIL PETROLERO  | Galones          | \$ 1.086382  |
| GASOLINA EXTRA PETROLERO  | Galones          | \$ 1.826219  |
| EXTRA CON ETANOL PETROLERO  | Galones          | \$ 1.826219  |
| GASOLINA SUPER PETROLERO  | Galones          | \$ 1.862293  |
| <b>SECTOR INDUSTRIAL</b>  |                  |  |
| DIESEL 1 INDUSTRIAL   | Galones          | \$ 1.626336  |
| DIESEL 2 INDUSTRIAL   | Galones          | \$ 1.626336  |
| DIESEL PREMIUM INDUSTRIAL   | Galones          | \$ 1.800768  |
| EXTRA INDUSTRIAL  | Galones          | \$ 1.826219  |
| EXTRA CON ETANOL INDUSTRIAL   | Galones          | \$ 1.826219  |
| SUPER INDUSTRIAL  | Galones          | \$ 1.862293  |
| FUEL OIL LIVIANO  | Galones          | \$ 1.086382  |
| GAS LIQUIDO DE PETROLEO (GLP) INDUSTRIAL  | Kilogramos       | \$ 0.704871  |
| RESIDUO CEMENTERO   | Galones          | \$ 1.086382  |
| RESIDUO INDUSTRIAL  | Galones          | \$ 1.086382  |
| <b>SECTOR NAVIERO US \$ / TM.</b>   |                  |  |
| DIESEL PREMIUM MARINO   | Galones          | \$ 1.800768  |
| DIESEL PREMIUM TURISTA  | Galones          | \$ 1.800768  |
| FUEL OIL 5000   | Toneladas        | \$ 276.198414  |
| FUEL OIL 4900   | Toneladas        | \$ 276.681538  |
| FUEL OIL 4800   | Toneladas        | \$ 277.125272  |
| FUEL OIL 4700   | Toneladas        | \$ 277.515758  |
| FUEL OIL 4600   | Toneladas        | \$ 278.066729  |
| FUEL OIL 4500   | Toneladas        | \$ 278.549914  |
| FUEL OIL 4400   | Toneladas        | \$ 279.033098  |
| FUEL OIL 4300   | Toneladas        | \$ 279.484071  |
| FUEL OIL 4200   | Toneladas        | \$ 279.993488  |
| FUEL OIL 4100   | Toneladas        | \$ 280.708139  |
| FUEL OIL 4000   | Toneladas        | \$ 281.352385  |
| FUEL OIL 3900   | Toneladas        | \$ 282.028944  |
| FUEL OIL 3800   | Toneladas        | \$ 282.673696  |
| FUEL OIL 3700   | Toneladas        | \$ 283.317537  |
| FUEL OIL 3600   | Toneladas        | \$ 284.122645  |
| FUEL OIL 3500   | Toneladas        | \$ 285.024590  |
| MDO 1 (MARINE GASOIL)   | Toneladas        | \$ 508.260315  |
| MDO 2 (MARINE GASOIL)   | Toneladas        | \$ 508.260315  |
| <b>SECTOR AEROCOMBUSTIBLES</b>  |                  |  |
| AVGAS INTERNACIONAL   | Galones          | \$ 3.937227  |
| AVGAS NACIONAL  | Galones          | \$ 2.484900  |
| JET FUEL  | Galones          | \$ 1.787617  |
| <b>SECTOR USO PARTICULAR Y PESCA DEPORTIVA</b>  |                  |  |
| DIESEL 2 INTERNACIONAL  | Galones          | \$ 1.626336  |
| DIESEL PREMIUM INTERNACIONAL  | Galones          | \$ 1.800768  |
| EXTRA CON ETANOL INTERNACIONAL  | Galones          | \$ 1.826219  |
| EXTRA INTERNACIONAL   | Galones          | \$ 1.826219  |
| SUPER INTERNACIONAL   | Galones          | \$ 1.862293  |
| DECRETOS EJECUTIVOS No. 338 y 799   |                  |  |
| PRODUCTO  | Unidad de medida | PRECIO EN TERMINAL<br>(Incluye el 12% del I.V.A.)<br>Expresado en US\$ |
| CRUDO REDUCIDO ELECTRICO S.000 S.R.   | Galones          | \$ 0.422673  |
| DIESEL 2 PESQUERO   | Galones          | \$ 0.900704  |
| DIESEL 2 CAMARONERO   | Galones          | \$ 0.900704  |
| DIESEL 2 CUANTIA DOMESTICA  | Galones          | \$ 0.900704  |
| DIESEL 2 ELECTRICO  | Galones          | \$ 0.900704  |
| DIESEL PREMIUM AUTOMOTRIZ   | Galones          | \$ 0.900704  |
| DIESEL PREMIUM CUANTIA DOMESTICA  | Galones          | \$ 0.900704  |
| DIESEL PREMIUM TRANSPORTE PUBLICO   | Galones          | \$ 0.900704  |
| FUEL OIL 4 ELECTRICO LIBERTAD   | Galones          | \$ 0.517496  |
| GAS LIQUIDO DE PETROLEO (G.L.P.) AGRICOLA US\$ / KG.  | Kilogramos       | \$ 0.188384  |
| GAS LIQUIDO DE PETROLEO (G.L.P.) DOMESTICO US\$ / KG.   | Kilogramos       | \$ 0.106867  |
| GAS LIQUIDO DE PETROLEO (G.L.P.) TAXIS US\$ / KG.   | Kilogramos       | \$ 0.188384  |
| GAS EXTRA CUANTIA DOMESTICA   | Galones          | \$ 1.309188  |
| GASOLINA EXTRA AUTOMOTRIZ   | Galones          | \$ 1.309188  |
| GASOLINA EXTRA CAMARONERO   | Galones          | \$ 1.309188  |
| GASOLINA EXTRA PESQUERO   | Galones          | \$ 1.309188  |
| GASOLINA PESCA ARTESANAL  | Galones          | \$ 0.799126  |
| GASOLINA SUPER AUTOMOTRIZ   | Galones          | \$ 1.680000  |
| SOLVENTES INDUSTRIALES  | Galones          | \$ 1.635200  |
| SPRAY OIL   | Galones          | \$ 1.030000  |
| SUPER S.P. CUANTIA DOMESTICA  | Galones          | \$ 1.680000  |
| CEMENTOS ASFALTICOS NO OBRA PUBLICA (Kgs.)  | Kilogramos       | \$ 0.298480  |
| ASFALTOS INDUSTRIALES NO OBRA PUBLICA (Kgs.)  | Kilogramos       | \$ 0.298480  |
| CEMENTOS ASFALTICOS OBRA PUBLICA  | Kilogramos       | \$ 0.298480  |
| ASFALTOS INDUSTRIALES OBRA PUBLICA  | Kilogramos       | \$ 0.298480  |
| DECRETO EJECUTIVO No. 799   |                  |  |
| PRODUCTO  | Unidad de medida | PRECIO DE VENTA AL PUBLICO<br>Expresado en US\$                        |
| <b>TRANSPORTE DE CARGA PESADA CON PLACA INTERNACIONAL</b>   |                  |  |
| DIESEL TRANSPORTE DE CARGA PESADA PLACA INTERNACIONAL   | Galones          | \$ 3.557453  |

Fuente: Decretos Ejecutivos 338 y 799

Fuente: Sertecpet, 2017

## **BIBLIOGRAFIA**

- Aracely, T., & Játiva, R. (2007). *Actualización de reservas y ubicación de pozos de desarrollo en el Campo Tapi-Tetete*. QUITO/EPN/2007.
- Armijos Honores, A. E., & Yépez Pazmiño, D. F. (2013). *Estudio técnico-económico de la perforación de pozos tipo re-entry en los campos Tetete-Tapi-Frontera*. Quito, 2013.
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (2004). *La cuenca Oriente: geología y petróleo* (Vol. 144): Institut français d'études andines.
- Bearden, J. (2006). Electrical Submersible Pumps. In J. D. Clegg (Ed.), *Petroleum Engineering Handbook* (Vol. IV): Society of Petroleum Engineers.
- Cano Delgado, C. A., & Sarmiento Ordóñez, J. E. (2017). *Optimización de la Producción Del Pozo fict-01, Mediante el Análisis de Los Sistemas de Levantamiento Artificial Por Bombeo Hidráulico y Electrosumergible*. Espol.
- Castillo, F. E. L. (2016). *Evaluación del Sistema de Levantamiento Artificial en el Campo Palo Azul*. Universidad Central del Ecuador.
- Coello Zambrano, A. H. (2017). *Manual de operaciones para levantamiento artificial por bombeo hidráulico tipo JET con unidad móvil de evaluación*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Chiriboga, C. (2015). [Unidad Móvil Horizontal (HPS)].

Fretwell, J. (2006). Hydraulic Pumping in Oil Wells. In L. W. Lake (Ed.), *Petroleum Engineering Handbook* (Vol. IV): Society of Petroleum Engineers.

Lake, L. W. (2006). *Petroleum Engineering Handbook*, Volume IV (pp. 714-757).

Perlaza Diaz, G. X., & Beltrán Apolo, V. J. (2016). *Levantamiento Hidráulico con Bomba Jet Para Evaluar y Producir Pozos en el Oriente Ecuatoriano*. Espol.

PETROAMAZONAS. (2017). *CAMPOS MENORES 2017*. Retrieved from QUITO: <http://www.petroamazonas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/06/Brochure-Campos-Menores.pdf>

Sertecpet. (2015). *Bombeo Hidráulico Sertecpet \_ Español*: Sertecpet.

Sertecpet. (2017a). *CATÁLOGO DE SERVICIOS Y PRODUCTOS*. In Sertecpet (Ed.), (pp. 94): Sertecpet.

Sertecpet. (2017b). *Unidad móvil Horizontal UMH/ HPS*. Retrieved from <http://www.sertecpet.net/jetclaw.html>

SIERRA, L. *GEOLOGIA GENERAL DEL NORORIENTE ECUATORIANO*.

Código de campo cambiado