

**EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE  
SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBA  
ELECTROSUMERGIBLE DE TORNILLOS GEMELOS EN EL CAMPO CAÑO  
LIMÓN**

**CÉSAR CASTAÑO GARCÍA  
CARLOS ALBERTO ÁLVAREZ COHEN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
ESPECIALIZACIÓN DE PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS**

**2011**

**EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE  
SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBA  
ELECTROSUMERGIBLE DE TORNILLOS GEMELOS EN EL CAMPO CAÑO  
LIMÓN**

**CÉSAR CASTAÑO GARCÍA  
CARLOS ALBERTO ÁLVAREZ COHEN**

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

**DIRECTOR  
Zuly Calderón Carrillo**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
ESPECIALIZACIÓN DE PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS**

**2011**

## DEDICATORIA

De Carlos Álvarez ...

A mis hijas Sharon Alexandra y Brigitte Paola...

A mi esposa Zulma

Yo Creo, que no me alcanza el corazón

para adorarte mi amor

por lo buena que tú has sido conmigo

tú, me dedicaste sin temor lo mejor de ti, tu valor

allí esta Dios de testigo

quiero agradecerte por haberme dado tanto amor

por comprender toda mi realidad

por aceptarme tal cual como soy

con errores y virtudes gracias corazón te doy

me siento amado amado de verdad

yo creo que el hombre más feliz yo soy (Iván Villazón)

## AGRADECIMIENTOS

Carlos Alvarez autor del presente trabajo se permite expresar sus agradecimientos a las siguientes personas:

A Dios todopoderoso, quien reconozco que sin el no somos nada.

A Olga Patricia Ortiz, coordinadora de este programa, por su organización y su empuje para ser de mis sueños toda una realidad.

Al equipo humano de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, pues su deseo de hacer crecer a la industria petrolera colombiana ha permitido la creación de grandes programas de posgrado que redundan en el bienestar del país.

A los docentes de la Especialización en Producción de Hidrocarburos por su esmero, dedicación y sapiencia, compartida con todo el cariño a sus estudiantes.  
A Zuly Calderón por su orientación en el planteamiento de este trabajo.

A Doña Vicky, siempre tuvo para mi el agua aromática y un tinto cuando mis ojos se caían de sueño, su sonrisa y su voz de mando que era la única capaz de interrumpir una clase.

A Mónica Hernández, María Isabel, Laidy, pues soportaron con paciencia cada uno de nuestros caprichos en procura de brindarnos un mejor servicio... y no olvidar sus oraciones en la oficina del ingeniero Samuel.

A mi amigo, el ingeniero Luis Fernando Ararat, por sus consejos, sus palabras que llegan en el momento en que uno las necesitas.

A mi pana, amigo y compañero de trabajo Cesar Castaño, su apoyo y conocimiento técnico fue fundamental en el desarrollo de este proyecto, eres panita un 18K.

A los jugadores, entrenadores y directivos del Junior de Barranquilla, el hecho de que durante los dos años de esta especialización no ganaran ningún título hizo que me alejara del fútbol y me acercara a la lectura.

A mis padres, Orlando Álvarez y Elba Judith, cada paso, cada triunfo, cada logro, es sin duda alguna el mejor homenaje que les puedo hacer a ustedes... los amo.

## **DEDICATORIA**

De Cesar Castaño ...

A mi hija Laura Sofía Castaño, que siempre estuvo en mis pensamientos para no desfallecer nunca.

A mis Padres por su acompañamiento silencioso pero siempre poderoso y eterno.

## **AGRADECIMIENTOS**

Cesar Castaño, autor del presente trabajo se permite expresar sus agradecimientos a las siguientes personas:

Al ingeniero Luis Fernando Ararat por toda su colaboración y comprensión para con nosotros en la consecución de este proyecto, también un agradecimiento especial a Monica Hernandez por todo su colaboración y paciencia.

A la Universidad Industrial de Santander ya que gracias a su conocimiento de la industria pudo hacer posible este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	15
1 MARCO TEÓRICO.....	19
1.1 MARCO CONCEPTUAL .....	19
2. GENERALIDADES DEL CAMPO CAÑO LIMÓN. ....	20
2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	20
2.2 ESTADO ACTUAL DEL CAMPO .....	22
2.3 UBICACIÓN GEOGRÁFICA .....	22
2.4 GEOLOGÍA.....	23
2.4.1 UBICACIÓN GEOLÓGICA.....	24
2.4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	24
ESTRUCTURA CAÑO LIMÓN - LA YUCA:.....	25
ESTRUCTURA MATANEGRA:.....	27
ESTRUCTURA CAÑO YARUMAL:.....	27
ESTRUCTURA CAÑO REDONDO:.....	27
ESTRUCTURA CAÑO VERDE:.....	27
2.5 ESTRATIGRAFÍA.....	27
CRETÁCEO:.....	31
TERCIARIO:.....	31
2.6 GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO.....	31

ROCA GENERADORA: .....	31
ROCA ALMACENADORA: .....	32
ROCA SELLO:.....	32
2.7 PROPIEDADES PETROFÍSICAS .....	32
2.8 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.....	34
2.9 CARGA DE CONSUMO DE ENERGÍA.....	35
3. SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE ...	37
EQUIPOS DE SUBSUELO: .....	37
EQUIPOS DE SUPERFICIE: .....	38
3.1 DESVENTAJAS Y PROBLEMAS OPERACIONALES DEL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE. ....	41
4.0 TECNOLOGÍA TORNILLOS GEMELOS .....	43
4.1 CARACTERÍSTICAS .....	44
4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE FONDO.....	50
5.0 COMPARACIÓN TÉCNICA DEL COMPORTAMIENTO DE DE LOS SISTEMAS..	56
5.1 PARÀMETROS DE DISEÑO .....	57
5.2 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CONVENCIONAL. ....	58
5.3 PARÀMETROS DE SIMULACIÓN PROPUESTA TECNICA BOMBA CON SISTEMA DE TORNILLOS GEMELOS.....	61
5.4 CONDICIONES ACTUALES BES CONDICIONES EN LY-064.....	64
6.0 EVALUACIÓN DE RESULTADOS .....	65

7. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	67
7.1 CASO 1: BOMBA DE TORNILLOS GEMELOS CAN-K.....	72
7.2 CASO 2: BOMBA ELECTROSUMERGIBLES.....	75
7.3 ANALISIS DE LOS VALORES PRESENTES NETOS. ....	77
CONCLUSIONES.....	80
BIBLIOGRAFIA.....	81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Geográfica del Bloque Cravo Norte.....	23
Figura 2. Distribución de los Campos y Áreas del Boque Cravo Norte.....	26
Figura 3. Sección Estructural de la Cuenca Llanos Área Cravo Norte. ....	28
Figura 4. Columna Estratigráfica de Campo Caño Limón. ....	29
Figura 5. Clasificación de los aceites provenientes del área Cravo Norte. ....	32
Figura 6. Consumo históricos de energía del área Cravo Norte.....	35
Figura 7. Torta Consumo de energía del área Cravo Norte. ....	36
Figura 8. Variador de Frecuencia.....	40
Figura 9. Trasnformador .....	41
Figura 9. Dirección de Flujo en una Bomba de Tornillo Gemelo .....	44
Figura 10. Etapa de una Bomba de Tornillo Gemelo. ....	44
Figura 3. Figura 11. Aumento de la presión en función de la longitud de la bomba.....	46

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las Propiedades de los Fluidos y Yacimiento	34
Tabla No 2. Parámetros diseño	58
Tabla No 3. Resultados simulación diseño BES para LY-064	59
Tabla No 4. Resultados simulación diseño Tornillos gemelos para LY-064	61
Tabla No 5. Resultados simulación condiciones actuales	64
Tabla No 6. Comparación resultados entre los dos sistemas de levantamiento para LY-064.	65
Tabla No 7. Comparación entre el uso del sistema de levantamiento artificial tipo tornillo gemelo y el sistema de levantamiento artificial ESP.	66
Tabla 8. Costo tratamiento del agua.	69
Tabla 9. Costo tratamiento de crudo.	69
Tabla 10. Servicio de pozo.	70
Tabla 11. Producción acumulada	73
Tabla 12. Producción acumulada	75
Tabla 13. Tabla de análisis económico	79

## RESUMEN

**TITULO:** EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBA ELECTROSUMERGIBLE DE TORNILLOS GEMELOS EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN<sup>1</sup>

**AUTOR:** CESAR AUGUSTO CASTAÑO GARCÍA / CARLOS ALBERTO ÁLVAREZ COHEN<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Caño Limón, recobro, acuífero activo, electrosumergible, fluido, crudo, agua, costos de levantamiento.

El campo Caño es uno de los campos con mayor factor de recobro del mundo esto debido a la presencia de acuífero activo el que se convierte en su principal mecanismo de levantamiento. Al trascurrir de los años la entrada de este acuífero ha sido vital para mantener niveles de presión de yacimiento considerables para continuar utilizando bombeo electrosumergible como sistema de levantamiento principal, a su vez también esto ha implicado incrementar los volúmenes de fluido de producción para poder sostener los volúmenes de crudo actuales, cada vez se hace mas estrecho el margen operativo entre el barril producido y los costos de levantamiento, esto como se menciona anteriormente debido a los grandes volúmenes y por ende los grandes consumos de energía necesarios para levantar dichos volúmenes. Ha su vez por la complejidad del yacimiento también se han encontrado zonas donde la presión es bastante baja si tenemos en cuenta el sistema electrosumergible.

El departamento de Producción e Ingeniería de Occidental de Colombia (PAE), constantemente le apuesta a el desarrollo de proyectos de optimización de producción y la implementación de nuevos sistemas de levantamiento, que se adapten a las cambiantes condiciones de operación de los pozos del campo, debido a la normal declinación de la presión del yacimiento y a los nuevos retos económicos desde el punto de vista operativo en el campo caño limón. Este trabajo presenta un análisis técnico y económico para la implementación del sistema de levantamiento artificial tipo tornillo gemelo en el campo Caño Limón, teniendo en cuenta las condiciones mecánicas y de operación de los pozos.

---

<sup>1</sup> Monografía.

<sup>2</sup> Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Producción. Director: Ing. Zuly Calderón Carrillo, M.Sc.

## ABSTRACT

**TITLE: TECHNICAL ECONOMIC EVALUATION FOR THE IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL LIFT SYSTEM TWIN SCREW ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPS IN THE CAÑO LIMÓN FIELD<sup>3</sup>**

**AUTHOR: CARLOS ALBERTO ÁLVAREZ COHEN / CESAR CASTAÑO\***

**KEYWORDS:** Caño Limón, recovery, active aquifer, electrosumergible, fluid, oil, water, lifting costs,

The Caño Limón field is one of the areas with the highest recovery factor in the world due to the presence of an active aquifer that becomes the main mechanism for lifting. Over the passing years the entry of this aquifer has been vital to maintain reservoir pressure levels to continue using pumping considerable electrosumergible as primary lifting system, also turn this has meant increased volumes of fluid production in order to sustain current volume of crude oil,

It is becoming narrower operating margin between the barrel produced and rising costs, that as mentioned above due to the large volumes and therefore large energy consumption required to raise those figures. Has in turn by the complexity of the site have also found areas where the pressure is quite low if we consider the system electrosumergible.

The Production and Engineering department of Occidental of Colombia (PAE), his constant commitment to the development of production optimization projects and implementing of new lift systems that adapt to changing operating conditions of wells in the field normal due to the decline in reservoir pressure and the new economic challenges from the standpoint of operating in the Cano Limon field. This paper presents a technical and economic analysis for the implementation of artificial lift system in the twin screw Cano Limon field, taking into account the mechanical and operating conditions of wells.

---

<sup>1</sup> Monograph.

<sup>2</sup> Universidad Industrial de Santander. Petroleum Engineering Faculty. Specializing in Oil Production. Director: Mr. Zuly Calderón Carrillo, M.Sc.

## INTRODUCCIÓN

La rentabilidad de las operaciones de explotación de los campos petrolíferos disminuidos por su explotación, se ve afectada por diversos factores que la colocan en riesgo, los cuales, al no ser manejados adecuadamente y pueden convertir esta actividad del negocio en poco atractiva para invertir, como es el caso de algunos sectores del campo Caño Limón.

Las mayores pérdidas de la productividad están determinadas por los elevados costos de operaciones en la utilización de equipos y sistemas tornados inadecuados con el tiempo.

Dentro de los campos que conforman el contrato de Asociación Cravo Norte, el bombeo electro-sumergible es el sistema de levantamiento artificial mas empleado por la empresa Occidental de Colombia, este sistema sin duda ha dado excelentes resultados teniendo en cuenta su gran capacidad de extracción lo que ha permitido mantener un factor de recobro bastante alto, ahora el reto es como mantener las grandes bondades de este sistema tratando de reducir el consumo de energía, que es ahí donde los costos de operación en este sistema se hace muy grandes, atentando cada vez más con el limite economico de los pozos.

Teniendo en cuenta lo anterior y los precios actuales del crudo, se hace conveniente probar nuevas tecnologías de levantamiento artificial, para mejorar la producción y evitar los problemas antes mencionados.

El sistema de levantamiento artificial de bombeo tipo “tornillo gemelo”, representa una buena opción en el mercado, para un alto rendimiento (técnico y económico) del proyecto mencionado. Algunas ventajas de este sistema de levantamiento, son:

- Ofrece las ventajas de una bomba de desplazamiento positivo.
- Capacidad para manejar gas.
- Resistente a la abrasión generada por la arena.
- Diseñada para manejar altas velocidades.
- Puede ser instalado en pozos verticales, desviados y horizontales.
- Capacidad para trabajar a altas temperaturas.
- No necesita mucho sumergimiento de la bomba en el fluido de producción, comparada con una ESP.

## **1 MARCO TEÓRICO**

Desde 1930, las bombas de tornillo gemelo han sido utilizadas en la industria petroquímica para usos siempre en superficie, tales como: transporte de fluidos de alta viscosidad, operaciones en oleoductos, procesos de altas temperaturas en refinerías, etc. Can - K Process & Mining Equipment Ltd. Ha desarrollado un sistema de levantamiento artificial basado en una bomba de tornillo gemelo totalmente metálica, la cual tiene como principales características, el manejo de altas cantidades de gas (hasta un 100%), altas cantidades de arena, y a altas temperaturas, reduciendo a su vez, el consumo de energía. El sistema de levantamiento Artificial tipo tornillo gemelo (Twin Screw Pumping), es un sistema de bombeo rotativo de desplazamiento positivo en el cual el flujo a través de la bomba (tornillos) es de manera axial, el fluido es llevado a través de los espacios dejados por los dos tornillos sin fin y es desplazado axialmente mediante la rotación combinada de los mismos; estos tornillos están alineados de manera que generan una serie de sellos que se mueven entre la succión y la descarga de la bomba. Este juego de sellos actúa como un laberinto y provee a la bomba de tornillo gemelo la capacidad de mantener presión positiva llevando así continuamente fluido desde la succión hasta la descarga

### **1.1 MARCO CONCEPTUAL**

El bombeo electrosumergible ESP, es uno de los sistemas de levantamiento artificial más versátiles y es considerado como un medio efectivo y económico para levantar grandes volúmenes de fluido. Este sistema tiene mayor aplicación en yacimientos con empuje de agua y baja relación gas aceite; es aplicable a grandes

profundidades y bajo gran variedad de condiciones de pozo, se basa en la extracción de petróleo mediante el uso de bombas centrífugas, similares a las utilizadas para la producción de agua.

## **2. GENERALIDADES DEL CAMPO CAÑO LIMÓN.**

### **2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS**

La compañía multinacional *Occidental International Exploration and Production Corporation* inició en Colombia estudios y exploraciones de posibles áreas prospectivas en la región del Magdalena Medio a finales de la década de los años 70.

A mediados de 1980 Occidental inició la primera fase exploratoria con la firma de contratos de Asociación con ECOPETROL, sobre los bloques exploratorios Cravo Norte, Cinaruco, Rondón, Orocué y Guarrojo de un millón de hectáreas cada uno. En este periodo Occidental produjo 2,800 Km. de datos sísmicos y perforó 19 pozos estratigráficos y 2 pozos exploratorios.

En Abril de 1983 se inició la perforación del pozo direccional Caño Limón-01, y en julio del mismo año se confirmó la productividad del yacimiento, después de la producción de 10,690 BOPD<sup>[4]</sup> de 31° API, proveniente de dos zonas de Carbonera Inferior. En 1985, ECOPETROL reconoció comercialidad sobre las reservas de mil millones de barriles.

Inicialmente se creyó que el campo Caño Limón estaba conformado por una sola estructura, pero mediante un estudio sísmico adicional, se pudo determinar la presencia de estructuras prospectivas contiguas posiblemente conectadas al pliegue de Caño Limón. Mediante la perforación de los pozos La Yuca 1 y

---

<sup>4</sup>[1] Barriles de Aceite por Día

Matanegra 1 se demostró la existencia de tres cierres estructurales, identificados actualmente como las áreas productivas de Caño Limón, La Yuca y Matanegra.

El 7 de diciembre de 1985 se inició la producción de petróleo proveniente de las estructuras del campo Caño Limón. Durante los años siguientes, a través del análisis de la información sísmica recopilada, se descubrió el Campo Redondo en la parte sur occidental de la estructura del campo Caño Limón. La producción de este campo comenzó en junio de 1987 con los pozos Redondo 1 y Caño Verde 1.

De igual manera, en enero de 1989 se inició la producción de otro campo de la asociación Cravo Norte denominado Caño Yarumal, el cual se encuentra adyacente a la estructura de Matanegra en la parte norte del campo Caño Limón.

En los últimos años se han perforado varios pozos exploratorios en pequeñas estructuras aledañas a los campos anteriormente definidos, dando como resultado dos pequeños campos llamados la Yuca Este y Redondo Este, los cuales tienen un pozo productor cada uno de ellos.

De esta forma el bloque Cravo Norte está compuesto actualmente por tres campos principales: Caño Limón, que produce de las estructuras Caño Limón, Matanegra y La Yuca; Campo Redondo, que produce de las estructuras Redondo y Caño Verde; y Campo Caño Yarumal con una sola estructura del mismo nombre. Adicionalmente, tiene pequeños campos secundarios llamados La Yuca Este y Redondo Este.

En el año de 1986 empezó la utilización del sistema de bombeo electrosumergible, como consecuencia de los altos caudales y altos cortes de agua esperados. Adicionalmente se experimentó a través de un pozo piloto con bombeo hidráulico, sin resultados satisfactorios.

## **2.2 ESTADO ACTUAL DEL CAMPO**

En la actualidad<sup>[5]</sup>, en la totalidad del área Cravo Norte existen 385 pozos productores, 7 inyectoros y 32 observadores de presión; de estos pozos 95 se encuentran en el área correspondiente a la estructura La Yuca, 22 en el área de Caño Limón, 32 en Matanegra, 6 en Redondo, 5 en Caño Verde, 22 en Caño Yarumal.

Los completamientos finales de los pozos del campo se efectúan a profundidades que van desde los 2440 metros (8000 pies) hasta los 2750 metros (9000 pies), con sartas de revestimiento de 9 5/8 de pulgada, aunque recientemente se están completando con sartas de 7 pulgadas. Los intervalos de cañoneo oscilan entre los 2130 metros (7000 pies) y los 2440 metros (8000 pies).

Durante el año 2010 de los 185 pozos productores del área de Cravo Norte, el 91% de los pozos tuvieron instaladas bombas electrosumergibles. De estas instalaciones, 117 fueron sacadas en el transcurso del año estableciendo una vida promedio de las bombas en operación de 9 meses (103 de estas unidades fueron sustituidas por falla).

## **2.3 UBICACIÓN GEOGRÁFICA**

Los campos de Caño Limón, Caño Yarumal y Redondo, se encuentran localizados en el extremo norte de los llanos Orientales, en el departamento de Arauca, entre la población de Arauquita y el caserío de La Yuca. (Ver Figura 1.)

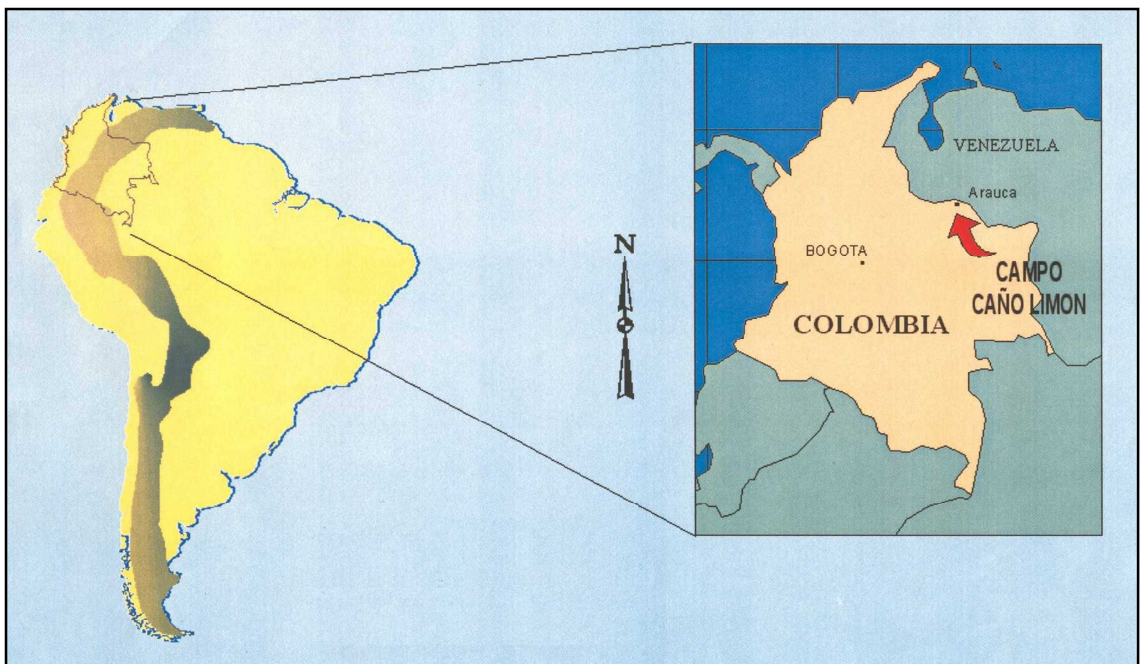
Estos campos están ubicados en el área del contrato de la Asociación Cravo Norte, sobre una extensión aproximada de 260,000 hectáreas, a 50 kilómetros al oeste de la ciudad de Arauca. El bloque Cravo Norte está limitado al norte y al

---

<sup>5[2]</sup> 1 de Marzo de 2001.

este por el río Arauca, al sur por el río Casanare y al oeste por el piedemonte de la Cordillera Oriental.

Figura 1. Ubicación Geográfica del Bloque Cravo Norte.



Fuente: Occidental de Colombia.

## 2.4 GEOLOGÍA

Los fluidos de producción de los campos provienen de las formaciones rocosas comprendidas entre el Cretáceo y el Oligoceno; son arenas de origen deltáico pobremente consolidadas, con una profundidad promedio de 7600 pies (2315

metros) cuyo mecanismo de producción es debido a un fuerte y activo empuje hidráulico natural.

**2.4.1 Ubicación Geológica.** La estructura Geológica de los campos está situada sobre el arco de Arauca en el flanco Norte de la Cuenca de los Llanos Orientales; al este de esta cuenca se encuentra ubicado el escudo granítico de Guyana, al oeste la cordillera de los Andes y hacia el norte se encuentran las cuencas de Barinas y Apure (Venezuela).

La región norte de los Llanos es un flanco monoclinal de cuenca que desciende en dirección oeste con buzamientos muy leves. La formación estructural general consiste principalmente en un fallamiento de tipo normal con dirección noreste-suroeste cuyo origen parece ser paleozoico con reactivaciones subsiguientes que involucran incluso sedimentos Terciarios. La cuenca de los Llanos se caracteriza también por una historia tectónica estable lo que ha favorecido una sedimentación cíclica relativamente constante.

**2.4.2 Geología Estructural.** Debido al movimiento lateral de la falla Caño Limón, que secciona la estructura anticlinal principal de noreste a suroeste, las Fallas sellantes, Matanegra y la Yuca dividen el Campo Caño Limón en dos estructuras productoras. El bloque más grande, limitado por las fallas de Caño Limón y la Yuca, se denomina bloque Caño Limón-La Yuca; el bloque adicional denominado Matanegra está limitado por las fallas de Caño Limón y Matanegra.

Complementariamente, el campo Caño Limón está vinculado con la falla de Arauca, la cual es de corta extensión y es paralela al río Arauca en la parte norte del Campo, y lo separa del campo Caño Yarumal. Las fallas Matanegra, Arauca y La Yuca circundan el campo definiendo sus límites noroeste, norte y sureste respectivamente, siendo el límite suroeste del campo el contacto agua-aceite.

Por otra parte, el campo Caño Yarumal se encuentra situado dentro del cierre estructural de la parte norte del bloque Cravo Norte, siendo la falla de Arauca su límite estructural sur y parte de la falla Matanegra su límite noroeste.

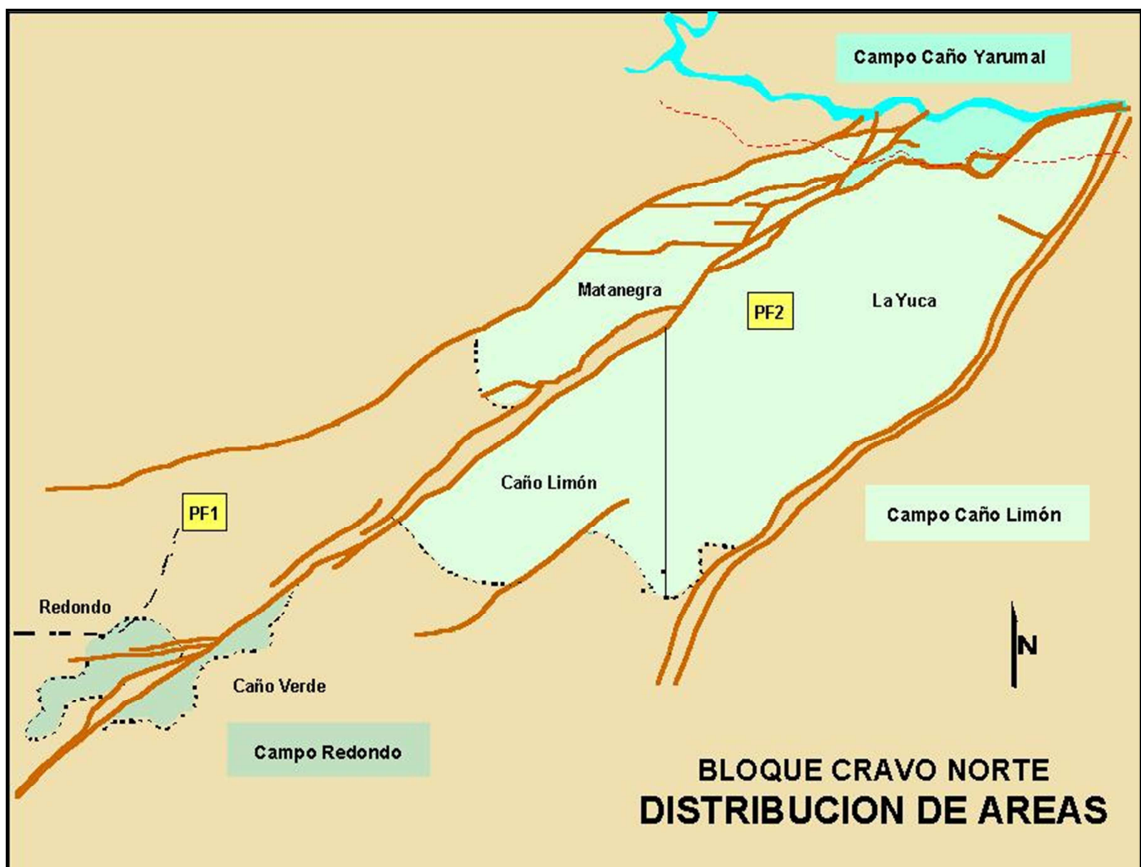
El campo Redondo se encuentra ubicado en la parte suroeste del bloque Cravo Norte separadamente de los campos Caño Limón y Caño Yarumal. Debido a la falla Caño Limón se encuentra dividido en dos estructuras Caño Verde y Redondo.

En la figura 2 se pueden visualizar en distintos colores, las diferentes áreas que conforman cada uno de los tres campos del bloque Cravo Norte y adicionalmente la localización de las dos facilidades de producción PF1 y PF2.

A continuación se describen las principales características de las Estructuras que conforman el sector Cravo Norte.

**Estructura Caño Limón - La Yuca:** Está compuesta por pliegues anticlinales con cabeceo suroeste unidos entre sí por un área sinclinal. El pliegue anticlinal de Caño Limón, está truncado por las fallas de Pastora y Caño Limón y cabecea ligeramente hacia el sur-oeste. El pliegue de La Yuca es un anticlinal que está truncado en su parte superior por la Falla de Arauca. Ambos pliegues son estructuras con buzamientos leves.

Figura 2. Distribución de los Campos y Áreas del Boque Cravo Norte.



Fuente: Occidental de Colombia.

**Estructura Matanegra:** Está conformada por el bloque norte del campo Caño Limón, el cual está limitado por las fallas Matanegra y Caño Limón, constituye el rasgo estructural más alto del campo. Al nivel de la formación Carbonera Inferior y de la Unidad K1 Inferior, la estructura tiene forma de un domo elongado en dirección Noreste-Suroeste. Está cortada por fallas normales que tienen una dirección Este-Oeste.

**Estructura Caño Yarumal:** Principalmente está compuesta por un anticlinal truncado longitudinalmente por la acción de la falla de Arauca, esta comprendida entre los límites del río Arauca al norte, por la falla Matanegra al noroeste y por la falla de Arauca en el sur. Está ubicada en la parte más norte del bloque Cravo Norte.

**Estructura Caño Redondo:** Esta constituido por un domo anticlinal que se encuentra al sur del área Cravo Norte, al costado izquierdo de la falla Caño Limón la cual lo separa del sector de la estructura Caño Verde. En su parte sur se encuentra levemente fallado por pequeñas fallas que acompañan la falla Caño Limón.

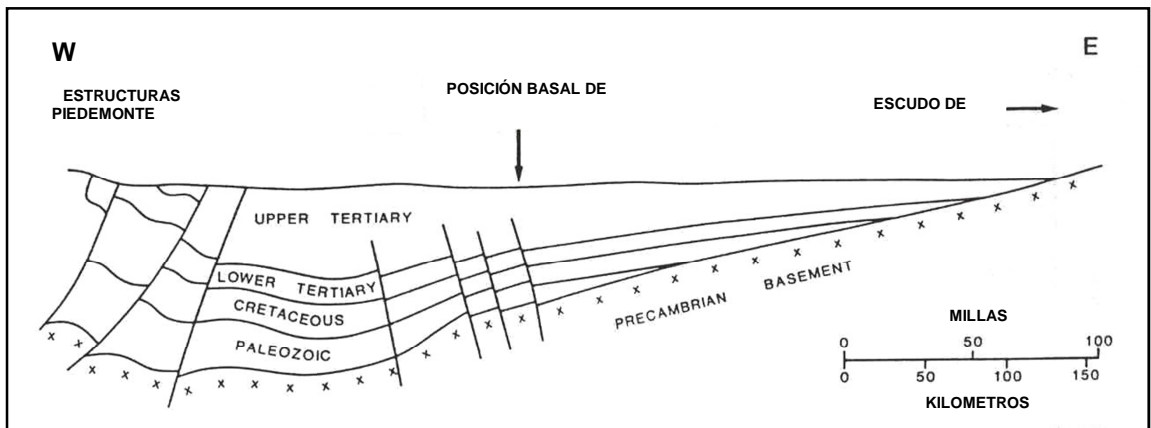
**Estructura Caño Verde:** Está conformada por un anticlinal elongado en dirección noreste-suroeste, el cual está truncado por la falla Caño Limón en la misma dirección, siendo el resultado del bloque de la parte sureste bajo la falla. Tiene un buzamiento medio y es más bajo estructuralmente que el bloque Redondo.

**2.5 Estratigrafía.** En la cuenca de los Llanos Orientales, se han reconocido aproximadamente 9150 metros (30,000 pies) de espesor de rocas sedimentarias depositadas sobre basamento Precámbrico, que comprenden rocas desde el Paleozoico inferior, capas rojas del Tríasico-Jurásico y sedimentitas del Cretácico y Terciario comúnmente divididas en unidades operacionales informales; dichas unidades pueden observarse en la figura 3, en la que se presenta una sección

estructural de la cuenca llanos y se puede identificar el basamento precámbrico junto con las diferentes unidades sedimentarias y la porción correspondiente al campo Caño Limón.

La sección estratigráfica de interés se extiende desde el Precretáceo al Cretáceo reciente, comprende 2804 metros (9200 pies) de columna sedimentaria. (Ver Figura 4.) En esta sección se encuentran los estratos productores que comprenden cuatro formaciones sedimentarias: la formación Carbonera Inferior/Mirador de edad Eoceno que contiene el 80% del petróleo total in situ del Campo, las formaciones productoras K1, K2A (Según la nomenclatura de la Compañía) de edad Cretácea tardía (cenoniano) y la formación Carbonera Superior de edad Oligoceno.

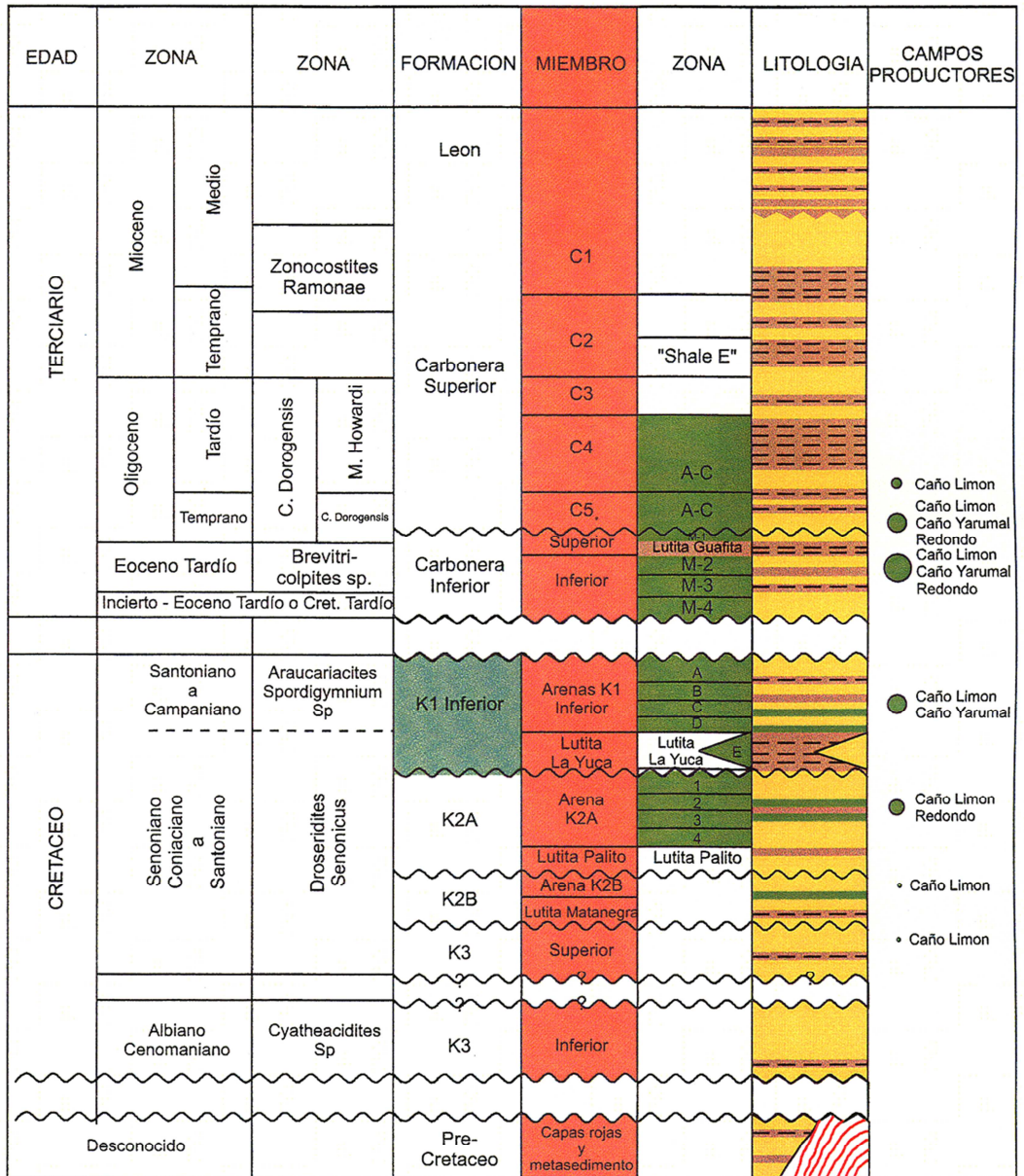
Figura 3. Sección Estructural de la Cuenca Llanos Área Cravo Norte.



Fuente: Occidental de Colombia

Figura 4. Columna Estratigráfica de Campo Caño Limón.

## CAMPOS CAÑO LIMON, CAÑO YARUMAL Y REDONDO COLUMNA ESTRATIGRAFICA



98101990  
010496LIL

Fuente: Occidental de Colombia.

**Cretáceo:**Esta sección está compuesta principalmente por areniscas finas, con alto contenido de cuarzo acompañada con intercalaciones de arcillolitas. Su espesor es superior a 150 metros (500 pies).

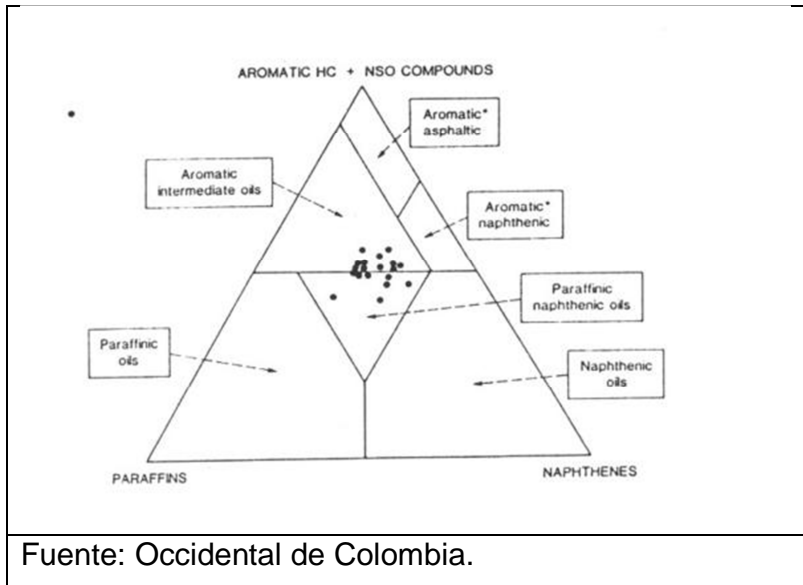
El Cretáceo se ha dividido en el área Cravo Norte en cuatro unidades operacionales limitadas por discordancias, estas son la base del K3, K2A, K2B y K1. La división del Cretácico en los miembros K3, K2 y K1 es de carácter práctico, por tal razón no se relacionan con otras unidades del Cretácico en regiones cercanas.

**Terciario:**En el área Cravo Norte esta sección se encuentra conformada por cuatro formaciones a saber: Carbonera Inferior, Carbonera Superior, León y Guayabo; compuestas generalmente por areniscas arcillosas, areniscas arcósicas, cuarcíticas, arcillolitas y algunas intercalaciones de lutitas. Su espesor promedio aproximado es de 2320 metros (7600 pies).

## **2.6 GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO**

**Roca generadora:**Según los análisis geoquímicos realizados sobre las muestras de los pozos del campo, los aceites de los campos Caño Limón, Caño Yarumal y Redondo, fueron generados por lutitas cretácicas provenientes de sedimentos marinos ricos en materia orgánica. Esta fuente de generación probablemente puede estar localizada en sedimentos profundos hacia el oeste de la cuenca del Piedemonte Llanero o en las cuencas vecinas de Venezuela. El petróleo del bloque Cravo Norte se ha clasificado como aromático intermedio a parafínico nafténico. La figura 5 muestra la ubicación de varias muestras de Caño Limón en el gráfico de clasificación de Tissot & Welte. Adicionalmente debido a su moderada densidad y viscosidad y a la presencia de elementos volátiles en su composición, se define como moderadamente maduro.

Figura 5. Clasificación de los aceites provenientes del área Cravo Norte.



**Roca almacenadora:** En los campos del bloque Cravo Norte, los estratos productores se subdividen de acuerdo a las propiedades litológicas y petrofísicas características. Se distinguen como unidades almacenadoras los estratos K1 y K2 del Cretáceo y Carbonera Inferior/Mirador y Superior.

**Roca sello:** La formación que proporciona el sello de los campos está conformada por las arcillas de la formación Carbonera Superior. Aunque el entrapamiento de aceite en el área de Caño Limón está controlado en general por las fallas; a pesar de esto, algunas acumulaciones de hidrocarburos son de carácter sedimentario.

## 2.7 PROPIEDADES PETROFÍSICAS

La porosidad promedio de las formaciones productoras de las estructuras del área Cravo Norte es de 24% y su rango varía desde 12% hasta 32%. El corte económico para la compañía se ha establecido en 14%. Esta porosidad,

determinada de los registros y corazones convencionales, corresponde en su totalidad a la porosidad intergranular primaria.

La permeabilidad para las facies productivas del área tiene un promedio de 1450 md y su rango varia desde 10 hasta 8000 md. El límite económico es aproximadamente 10 md. La medición de la permeabilidad ha sido obtenida de corazones convencionales, pero se ha demostrado que debido a la migración de finos, la medición en laboratorio es errática, adicionalmente durante las pruebas de presión realizadas se han interpretado valores cercanos a 10,000 md, lo que sugiere que en los corazones provenientes de las zonas más permeables, ocurre deformación no elástica al ser traídos a superficie.

La saturación de agua promedio de las formaciones productoras es de 30% pero el rango varía desde 5% hasta 70%, dependiendo de la Zona. La saturación de aceite promedio es de 23% pero varía igualmente de acuerdo al sector. Las curvas de presión capilar han sido derivadas de medición sobre corazones para cada ambiente de depositación.

Las principales propiedades de las diferentes estructuras que conforman el bloque Cravo Norte, guardan una relativa similitud por lo que pueden prácticamente tratadas como similares para efectos practicos. (Ver Tabla 1.)

Tabla 1. Resumen de las Propiedades de los Fluidos y Yacimiento

PROPIEDADES	VALOR
<i>Gravedad API</i>	29°API
<i>Densidad</i>	0.88 gr/cc
<i>Profundidad Aproximada</i>	7,600 pies
<i>Área Productiva</i>	9,070 acres
<i>Presión Original del Yacimiento</i>	3,213 lppc @ 7100 pies
<i>Presión de Burbuja</i>	50 lppca
<i>Relación Gas-Petróleo (GOR)</i>	8 PCN/BF
<i>Relación Agua-Aceite (WOR)</i>	90%
<i>Viscosidad @ 207°F 3200 Psia</i>	4 cP @ 207 °F y 3,200 lppc
<i>Factor Volumétrico @ 207°F Y 3200 Psia</i>	1.05 BLS/BF

Fuente: Occidental de Colombia.

## 2.8 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Los análisis PVT realizados sobre las muestras de los fluidos del campo demuestran que estos se encuentran a una presión superior a la presión de saturación (50 lppca), razón por la cual únicamente se espera la presencia de fases líquidas (petróleo y agua) en la producción y no se presenta gas libre en el yacimiento. Debido a lo anterior, el yacimiento de Caño Limón es clasificado como subsaturado.

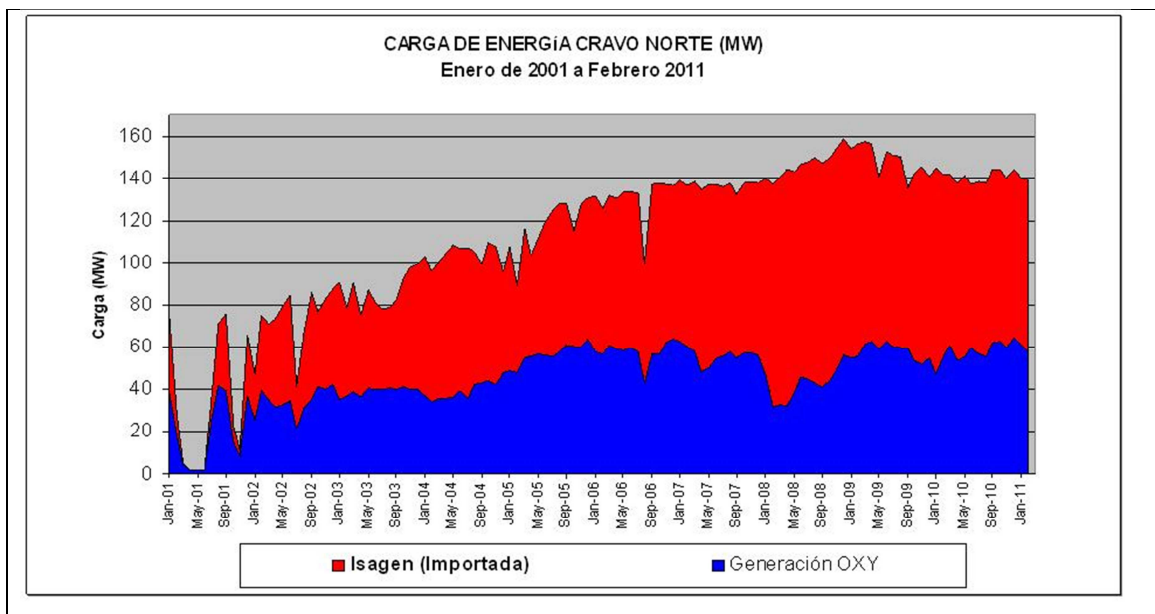
Adicionalmente a lo anterior, la relación de gas en solución ( $R_s$ ) es inferior a 15 PCN/BN, factor que contribuye a la baja compresibilidad del petróleo y a su vez a un mínimo aporte de energía de presión al yacimiento por expansión del petróleo.

La viscosidad del petróleo a condiciones iniciales del yacimiento (3200 lpc, 200° F) se encuentra entre un rango de valores desde 2.4 hasta 6.9 cp dependiendo de la zona específica de drenaje. La gravedad API, tiene valores que oscilan entre 26.9 y 32.4° a condiciones estándar de superficie. (Ver Tabla 1.)

## 2.9 CARGA DE CONSUMO DE ENERGÍA

El consumo de energía de los pozos que tienen instaladas bombas electrosumergibles (ESPs), históricamente han reflejado un alto costo en el OPEX, siendo este del 75% de los costos de operación. (Ver Figura 6.), un 65% del consumo de energía es comprada a Interconexión Eléctrica S.A. (ISA) y un 35% es generada por OXY.

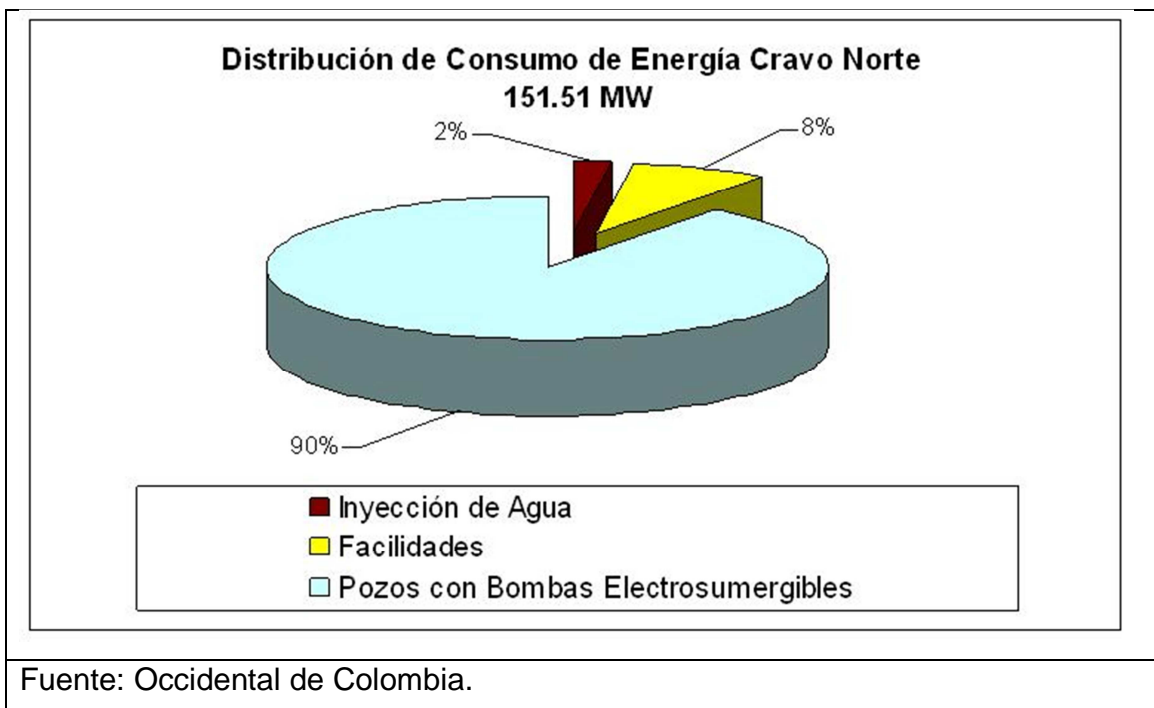
Figura 6. Consumo históricos de energía del área Cravo Norte.



Fuente: Occidental de Colombia.

La distribución del consumo de energía en el campo, está compuesta por un 10% entre las facilidades de PF1 y PF2 y la planta de inyección de agua, mientras que los pozos con bombas electrosumergibles es del 90%.

Figura 7. Torta Consumo de energía del área Cravo Norte.



### **3. SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE**

Para los volúmenes manejados en un campo como Caño Limón se hace necesario un sistema de levantamiento que pueda operar a grandes tasa y altos índices de productividad, el bombeo electrosumergible ESP, es uno de los sistemas de levantamiento artificial más versátiles y es considerado como un medio efectivo para levantar grandes volúmenes de fluido, necesidad inherente ala operación en caño limón.

Este sistema tiene mayor aplicación en yacimientos con empuje de agua y baja relación gas aceite; es aplicable a grandes profundidades y bajo gran variedad de condiciones de pozo.

**Equipos de Subsuelo:** Son aquellas piezas o componentes que operan instalados en el subsuelo, el corazón del sistema de bombeo electrosumergible es la BOMBA Centrifuga: Estas bombas son del tipo Multi- Etapas y el número de estas depende de cada aplicación específica. Cada “ETAPA” esta formada por un impulsor y un difusor, el impulsor da al fluido ENERGÍA CINÉTICA, el difusor cambia esta energía cinética en ENERGIA POTENCIAL (Altura de elevación o cabeza)

*Motor:* Este es un motor trifasico, de inducción tipo Jaula de ardilla, de dos polos, similar. Las tres fases son conectadas al bobinado del motor, el que termina en una estrella en el interior de este, la cual trata de estabilizar un punto neutro.

*Sello:* Estos equipos también se reconocen con el nombre de Protectores o eculizadores, según los distintos fabricantes. Esto se debe a que los sellos cumplen con más de una función:

- Evitar el ingreso de fluidos del pozo al interior del Motor (Sellar)
- Absorber los empujes descendentes y ascendentes de la bomba (Proteger)
- Equilibrar la presión interna del motor con la presión del pozo (Ecuilizar)
- Además, sirve de vínculo mecánico entre el motor y la bomba

*Succión:* Esta es la puerta de acceso de los fluidos del pozo hacia la bomba, para que esta pueda desplazarlos hasta la superficie.

*Cable:* La unión eléctrica entre los equipos descritos, instalados en el subsuelo, y los equipos de control en superficie son los cables. Existen varios tipos de cables en una instalación de bombeo electrosumergible:

- Extensión de Cable Plano
- Cable de Potencia
- Conectores de Superficie

La extensión de cable plano, es una cola de cable de características especiales que en uno de sus extremos posee un conector especial para acoplarlo al motor. En el otro extremo este se empalma al cable de potencia, la diferencia entre ambos es que este posee las mismas propiedades mecánicas y eléctricas que los cables de potencia pero son de un tamaño inferior.

### **Equipos de Superficie:**

*Caja de venteo:* Este equipo en superficie cumple tres funciones principales

- Conectar los cables de energía con la bomba.
- Ventila con la atmósfera los gases que puedan estar atrapados en los cables del motor de la bomba.
- Permite un rápido chequeo de los voltajes y las corrientes.

*Controlador:* Existen tres tipos básicos de controladores de motor: el Interruptor Directo, el Arrancador Suave y el Controlador de Velocidad Variable (VSC ó VSD).

Algunos controladores de motor poseen un diseño simple, mientras que otros son extremadamente complejos. Estos fueron diseñados para mejorar los métodos de control, protección y monitoreo de la operación del equipo de fondo. La selección de uno de ellos depende de la aplicación, los costos y el método de control que se prefiera.

*Interruptor Directo:* (Velocidad fija). El controlador permite iniciar y apagar el motor brindándole una protección eléctrica tanto al motor como al cable.

*Arrancador suave:* Su función principal es la de bajar el voltaje del motor durante la arrancada del mismo, una vez el motor alcance la máxima velocidad empieza a normalizar el nivel, de esta forma el torque y la corriente inicial en el arranque pueden ser reducidos.

*Controlador de velocidad variable (VSD):* Además de ser un controlador de motor también como un variador de velocidad, convierte la corriente alterna del sistema de 60Hz y lo convierte en una señal de pulsos senosoidales a la frecuencia requerida. Las ventajas de utilizar un variador de velocidad se pueden reflejar en la mayor duración del equipo de fondo ya que se obtendrá un arranque suave y una velocidad controlada automáticamente.

Figura 8. Variador de Frecuencia



Fuente: Centrilif.

*Transformadores:* El suministro de energía a un pozo petrolero se realiza mediante una red de alta tensión, o mediante un generador, de acuerdo con la ubicación del pozo; ésta señal se baja a un voltaje determinado mediante un transformador reductor para alimentar el variador.

Existen dos tipos de transformadores: Los transformadores reductores y los transformadores elevadores. Los transformadores reductores son empleados cuando el suministro de energía se realiza mediante red de alta tensión, la cual puede generar voltajes de 13800V y 34500 V. De esta manera, el transformador debe bajar dichos valores, hasta 3300V en caso de trabajar con Interruptor Directo, o hasta 480 cuando se utiliza VSD u otros equipos. Este tipo de transformador también se emplea, para bajar el voltaje de salida del interruptor directo, llevándolo hasta el requerido por el motor.

Figura 9. Trasnformador



Fuente: Archivos del autor.

### **3.1 DESVENTAJAS Y PROBLEMAS OPERACIONALES DEL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE.**

Teniendo en cuenta la operación del equipo electrosumergible en el campo Caño Limón, se han enumerado las siguientes desventajas y limitaciones presentadas por este tipo de sistema de levantamiento.

1. La fuente de energía sólo puede ser eléctrica, requiere del uso de alto voltaje (Alto consumo de energía).
2. Para la reparación del equipo de subsuelo, es necesario sacar la tubería de producción.

3. La arena es un problema, por la abrasión del equipo.
4. El sistema está limitado hasta profundidades de 10.000 pies, por el costo del cable y la inhabilidad de conducir potencia al fondo.
5. El tamaño del revestimiento limita el uso de bombas de mayor dimensión y la utilización de accesorios tales como herramienta "Y".

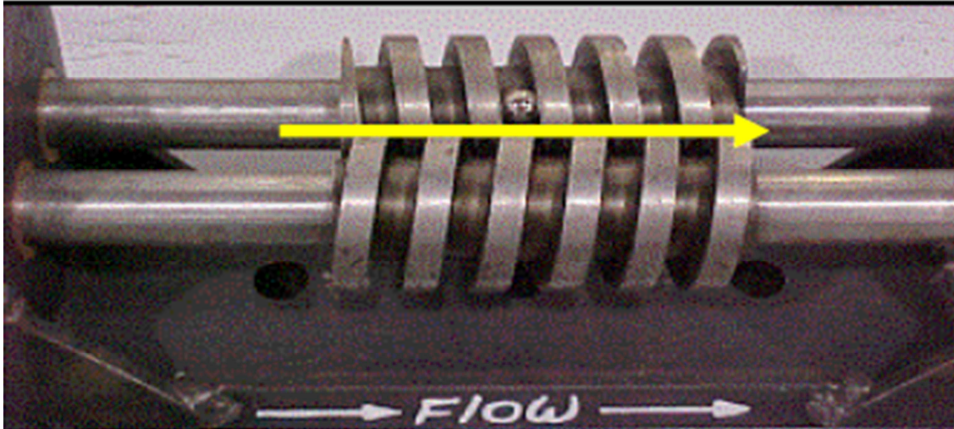
Así también, los problemas operacionales más comunes que daños del equipo electrosumergible son:

1. Excesiva carga para un periodo extendido de tiempo.
2. Fugas en el sello o en la sección de protección.
3. Condiciones de pozo:
  - Insuficiente fluido en movimiento.
  - Altas temperaturas.
4. Corrosión y Abrasión en la línea del fluido.
5. Instalación defectuosa o fallando.
6. Fallas en el controlador del motor.
7. Equipo imperfecto.
8. Desgaste
9. Tormentas eléctricas.
10. Sistema eléctrico defectuoso.
11. Doblamiento del eje debido a que se haya tapado la bomba.
12. Desgaste de la bomba a causa de la producción de material abrasivo.
13. Taponamiento de las etapas debido a la depositación de material desplazado.
14. Desgaste del sello por vibración de la bomba.
15. Rompimiento o fracturamiento de las partes cerámicas de los sellos mecánicos.

#### **4.0 TECNOLOGÍA TORNILLOS GEMELOS**

Desde 1930, las bombas de tornillo gemelo han sido utilizadas en la industria petroquímica para usos siempre en superficie, tales como: transporte de fluidos de alta viscosidad, operaciones en oleoductos, procesos de altas temperaturas en refinerías, etc. Can - K Process & Mining Equipment Ltd. Ha desarrollado un sistema de levantamiento artificial basado en una bomba de tornillo gemelo totalmente metálica, la cual tiene como principales características, el manejo de altas cantidades de gas (hasta un 100%), altas cantidades de arena, y a altas temperaturas, reduciendo a su vez, el consumo de energía. El sistema de levantamiento Artificial tipo tornillo gemelo (Twin Screw Pumping), es un sistema de bombeo rotativo de desplazamiento positivo multifásico (Figura 9 y 10.) en el cual el flujo a través de la bomba (tornillos) es de manera axial, como lo muestra la figura 1. El fluido es llevado a través de los espacios dejados por los dos tornillos sin fin y es desplazado axialmente mediante la rotación combinada de los mismos; estos tornillos están alineados de manera que generan una serie de sellos que se mueven entre la succión y la descarga de la bomba. Este juego de sellos actúa como un laberinto y provee a la bomba de tornillo gemelo la capacidad de mantener presión positiva llevando así continuamente fluido desde la succión hasta la descarga.

Figura 9. Dirección de Flujo en una Bomba de Tornillo Gemelo



Fuente: Can-K

Figura 10. Etapa de una Bomba de Tornillo Gemelo.



Fuente: Can-K

#### 4.1 CARACTERISTICAS

Debido a la relativa baja inercia de sus partes rotativas, las bombas de tornillo gemelo pueden manejar altas velocidades, sin generar vibraciones o turbulencias las cuales generan daños a la instalación y a la misma bomba. Es importante

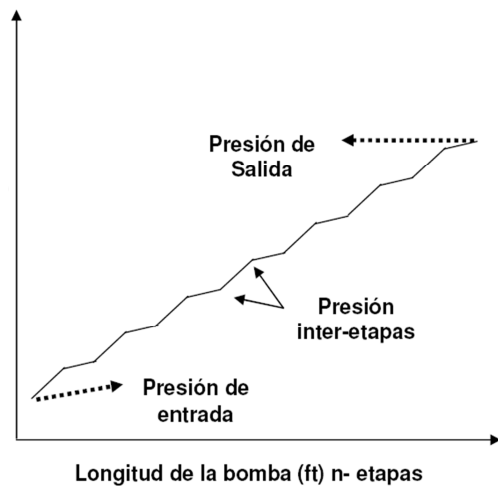
anotar que las posibles vibraciones que se puedan presentar son causadas por el manejo de altos contenidos de gas a altas velocidades.

Gracias a que los tornillos nunca se tocan, existe menos fricción entre sus partes rotativas, lo cual permite afirmar que la bombas de tornillos gemelo requieren menos energía que una bomba convencional de cavidades progresivas; también gracias a esta propiedad estas bombas pueden manejar altas cantidades de gas.

En una bomba de cavidades progresivas el tornillo rota dentro de un elastómero el cual se puede quemar si trabaja con 100% de gas en ella, por su propiedades de flujo axial y bajas velocidades internas, las bombas de tornillo gemelo reducen la agitación del fluido, evitando la formación de emulsiones más estables y facilitando la separación del agua y el aceite en superficie.

La descarga es constante y depende directamente al tamaño de la bomba, a las revoluciones de sus rotores internos (tornillos), a la viscosidad del fluido desplazado y es independiente a la presión o cabeza dada por el sumergimiento de la bomba en el fluido. Además pueden manejar un rango de viscosidades que van desde fluidos del alta viscosidad (ej. bitumen) hasta fluidos de muy baja viscosidad (Ej. Etanol), y un rango de presiones desde 50 a 5000 psi, dependiendo del fluido. La presión de descarga es proporcional a la longitud y al número de etapas de la bomba, de hecho, la presión en cada movimiento de las cavidades formadas por el espaciamiento entre los tornillo aumenta gradualmente y uniformemente desde la succión hasta la descarga de la bomba, este aumento de presión es denominado “presión por etapas”

Figura 3. Figura 11. Aumento de la presión en función de la longitud de la bomba.



Fuente: Can-K

Los líquidos gruesos y viscosos pueden limitar la capacidad de la bomba en altas velocidades debido a que el líquido no puede fluir entre los tornillos con la rapidez necesaria para llenar completamente el espacio entre sus roscas. La potencia requerida aumenta con la viscosidad del líquido. Esto puede ser verdad, naturalmente, con otras clases de bombas. Pero, ya que las bombas rotatorias de desplazamiento positivo tienen un uso general para líquidos viscosos, es importante recordar estas características.

El deslizamiento o pérdida (slip) en el caudal desplazado por los espacios entre la carcasa y los elementos rotatorios, se deben a las bajas viscosidades y al incremento del diferencial de presión de operación; para reducir las pérdidas es necesario hacer un rediseño del tornillo incrementado el número de hilos del tornillo (figura 10) por cada pie (screw pitches); en el caso de tener fluido gaseoso en la línea, estas pérdidas de fluido se incrementan y es necesario aumentar la

velocidad o la frecuencia de operación para compensar las pérdidas. Para tener en cuenta las pérdidas por deslizamiento, la eficiencia volumétrica sería calculada dividiendo el caudal real, entre el caudal teórico de la bomba a esa frecuencia de operación sin pérdidas.

Gracias a las características anteriormente nombradas, estas bombas ha resultado una buena opción cuando el fluido de producción contiene sólidos en suspensión (arena).

El efecto abrasivo es principalmente dependiente de la forma y dureza de los sólidos en suspensión; además de la viscosidad del crudo del fluido, es decir, entre mas viscoso sea el fluido que se esta bombeando, el efecto de abrasión se verá disminuido; pero desafortunadamente para el caso del campo Caño Limón la viscosidad es baja debido al corte de agua manejado y a la temperatura de operación.

Las partículas que entran al sistema de bombeo, pueden ser clasificadas en tres categorías:

- a. Aquellas que tienen un tamaño aproximado a uno de los Hilo del tornillo (pitch).
- b. Aquellas que tienen un tamaño aproximado a la mitad de uno de los hilos del tornillo.
- c. Aquellas que tienen un tamaño cercano o menor a los pequeños espacios dejados por los tornillos, por donde los cuales se presenta el fenómeno de deslizamiento o slip.

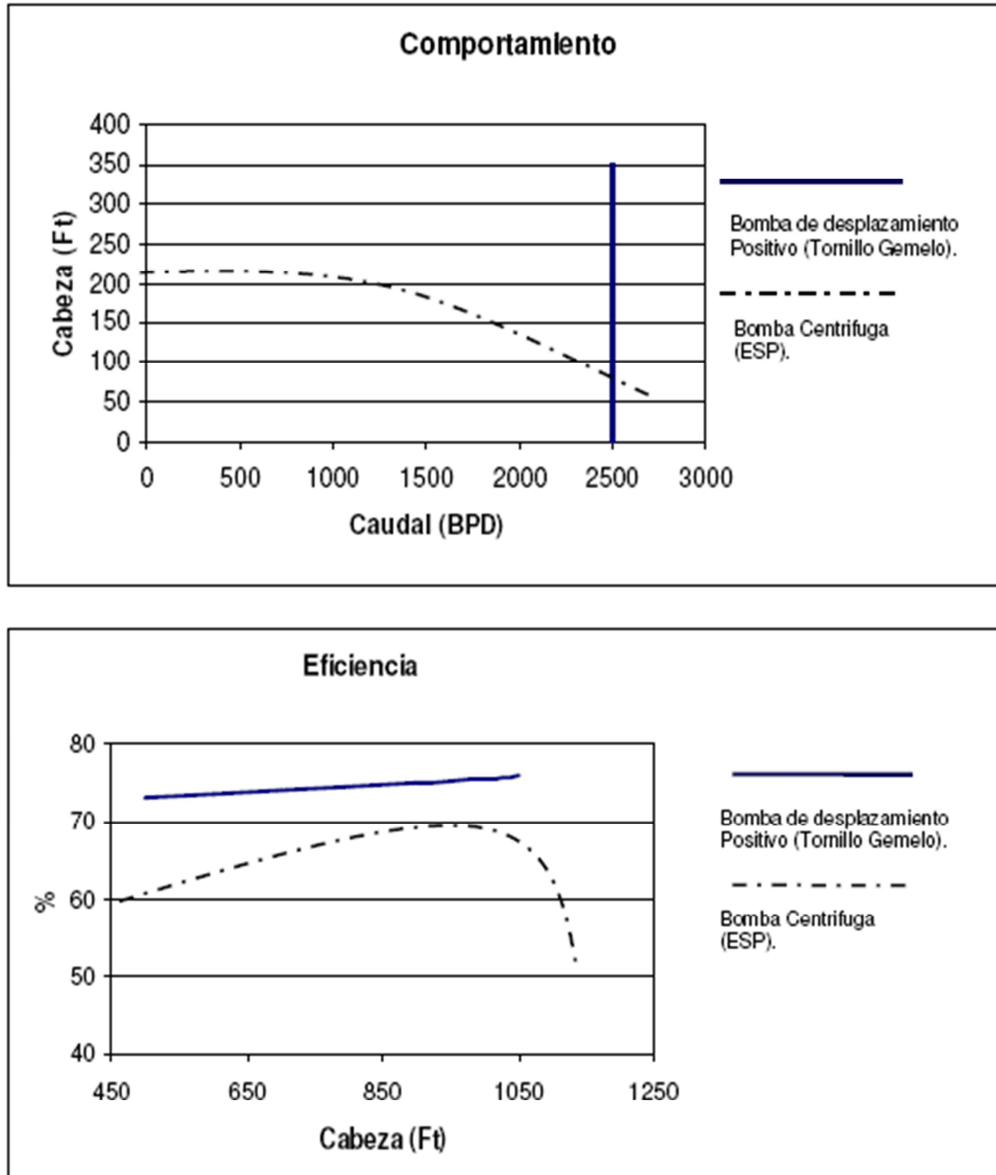
De acuerdo con la anterior clasificación, las partículas nombradas en el ítem a y b, son aquellas que viajan generalmente a la misma velocidad del fluido de producción, y generan un ligero efecto de abrasión mediante el roce o contacto con algunas partes de la bomba; estas partículas generan también, mas adelante

taponamiento al disminuir su velocidad, pero no representan un mayor peligro para la integridad de la bomba.

Las partículas que son mas pequeñas (c) son aquellas que representan un peligro mayor a la integridad de las partes de la bomba, debido que ellas pueden viajar varias veces entre las partes en movimiento de la bomba logrando crear en poco tiempo un considerable efecto abrasivo en los siguientes lugares de la bomba:

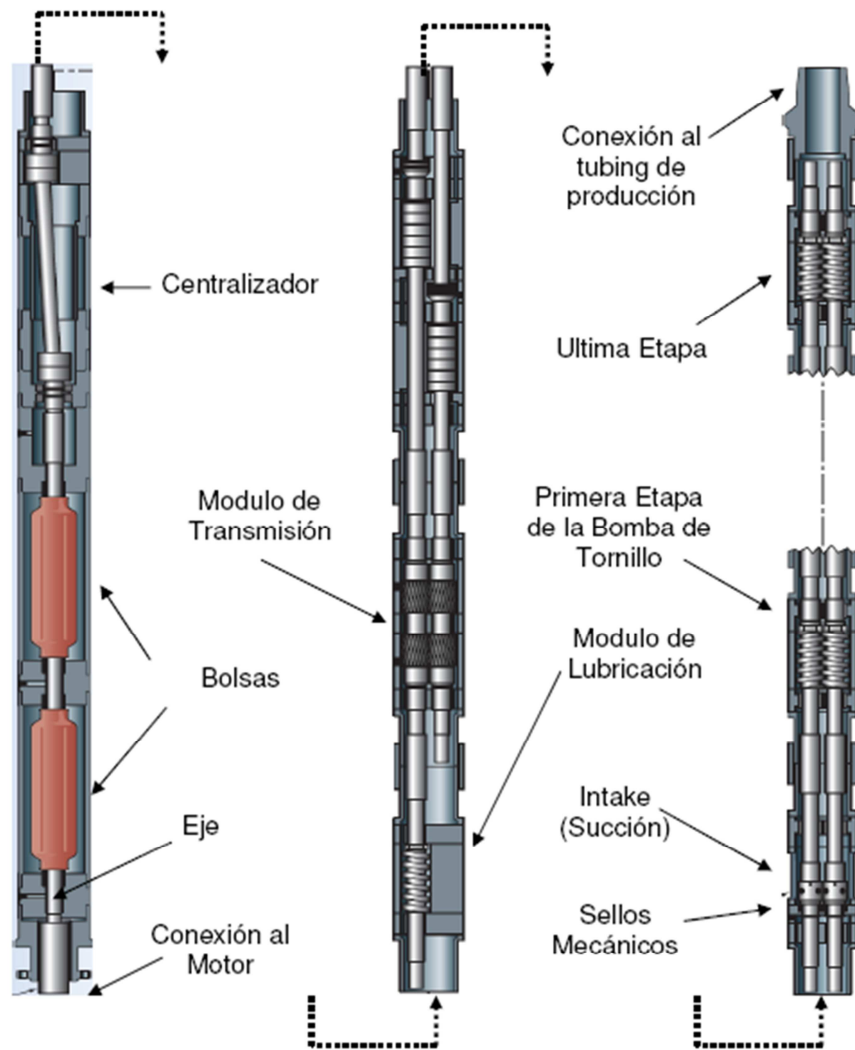
- En las puntas de los hilos de los tornillos y en las camisas o liner en donde se encuentra ubicadas las etapas de las bombas.
- En las primeras y ultimas etapas de la bomba (succión y descarga).

Figura 12. Curva de Comparación



Fuente: Pump Handbook

Figura 13. Partes de Una bomba de tornillo gemelo.



Fuente: Can-K

## 4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE FONDO

*Motor:* El sistema de levantamiento artificial tipo tornillo gemelo utiliza un motor eléctrico trifásico, de dos polos, jaula de ardilla y de tipo inductivo.

Por ser motores de dos polos operan entre 3450 y 3600 revoluciones por minuto cuando se encuentran a una frecuencia de 60 Hz. Estos son llenados con aceite mineral altamente refinado el cual posee una considerable rigidez dieléctrica. Estos motores están constituidos por rotores, los cuales se encuentran montados sobre un eje localizado en un campo eléctrico (estator) y ensamblados dentro de una carcasa de acero.

*Cable:* Es el encargado de transportar el voltaje desde el controlador del motor, localizado en superficie, hasta el motor. El daño del cable es también una parte crítica de la instalación; es por esto, que se debe tener cuidado especial durante la instalación y recuperación del mismo.

Existen dos tipos de cable, el cable de potencia, que es trifásico y va paralelo a la tubería de producción, sujetado a esta por medio de bandas; y el cable plano de extensión al motor, que se extiende al lado del sello y la bomba y generalmente es convertido a un cable de potencia regular, pocos pies arriba del tope de la bomba.

*Sección Sellante.* Se instala entre el motor y el intake. El propósito principal de la sección sellante o sello es aislar el aceite del motor de los fluidos del pozo mientras balancea la presión del fondo del pozo con la presión interna del motor. Existen dos tipos de sellos; el sello positivo o bolsas de expansión y el sello de cámaras laberínticas. El diseño del sello positivo se basa en una barrera elástica conformada por un fluido contenido en una bolsa, para permitir la expansión térmica del aceite dieléctrico del motor cuando está en operación y solo aislar los fluidos del pozo del aceite del motor. El sello de cámaras laberínticas utiliza el diferencial de las gravedades específicas del fluido del pozo y del aceite dieléctrico del motor, para prevenir la entrada del primero en el motor.

- *Sellos mecánicos*, Poseen una parte estacionaria y otra móvil que van aseguradas a los dos ejes de la bomba de tornillo gemelo y sostenidas por un resorte. Las partes se encuentran en contacto permanente (metal - metal) y perfectamente engrasadas, lo cual le da la propiedad a la bomba de correr en seco, sin generar ningún daño a los sellos. Su función principal es sellar la interfase entre los ejes (principal y secundario) y los componentes fijos (guías).
- *Bolsas de expansión*, brinda un espacio para la expansión y contracción del aceite dieléctrico. Cuando el motor está en marcha el aceite se expande debido al aumento de temperatura. El volumen de la bolsa es suficiente para contener la expansión desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación, sin ejercer presión sobre la misma. Cuando el motor se detiene y se enfría, el aceite se contrae y la bolsa elástica absorbe este cambio de volumen sin mayor esfuerzo.

El sello desempeña cuatro funciones básicas:

1. Expansión del aceite dieléctrico del motor debido al calentamiento generado durante la operación.
2. Equilibrar la presión anular con la presión interna del motor y permitir que exista una pequeña presión a través de los sellos de los ejes.
3. Aislar el aceite dieléctrico del motor del fluido del pozo.
4. Absorber el empuje descendente de la bomba mediante una zapata de empuje impregnada con una película hidrodinámica de aceite para su lubricación durante la operación.

*Ejes:* La bomba de tornillos gemelos cuenta con dos ejes (principal y secundario), el eje principal tiene como función principal transmitir el torque generado por el motor al eje secundario y a su vez, a los tornillos de la bomba. Adicionalmente, también se encarga de transmitir el empuje axial generado por la bomba a la zapata de empuje de la sección sellante.

*Centralizador :* La función del centralizador es:

- Conectar el eje del motor al eje del tornillo principal.
- Ubicar el eje del motor en posición axial del cuerpo de la sarta.
- transmitir la potencia del motor hacia el eje del tornillo principal.

*Modulo de transmisión:* Es responsable de transmitir el movimiento rotacional al eje del tornillo secundario, esto se logra mediante una serie de piñones o engranajes que debidamente instalados por encima del modulo de lubricación. Esta es una de las partes mas criticas de la instalación debido a la importancia de su función, por esta razón es necesaria su lubricación constante.

*Entrada de fluido a la bomba "Intake" :* El "Intake" es la primera parte de la bomba que tiene contacto directo con el fluido del pozo, (Ver figura 14). Por éste ensamblaje mecánico pasa el fluido del pozo al interior de la bomba.

Figura 14. Intake de una bomba de tornillo gemelo



Fuente: Can-K

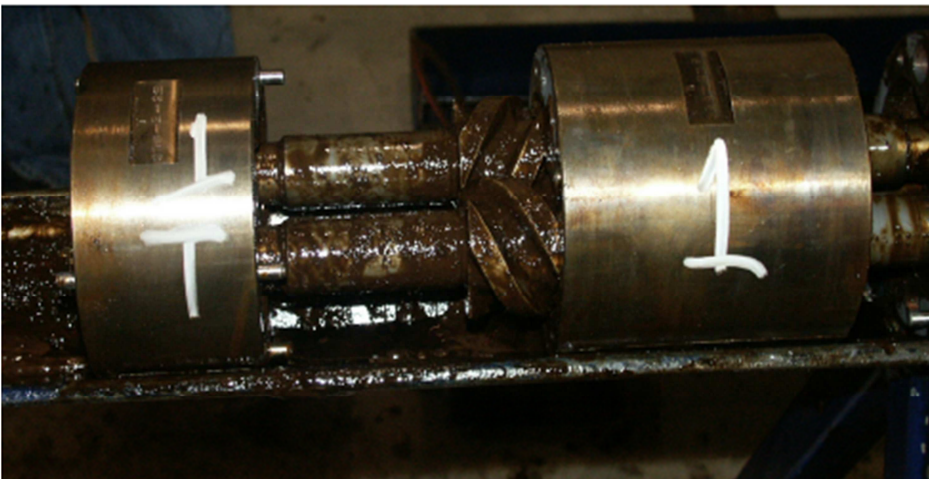
*Bomba:* La bomba esta conformada, al igual que en el bombeo Electrosumergible, por varias etapas conformadas por dos tornillos montados en dos ejes diferentes (uno principal y otro secundario), alineados de tal manera que los dos tornillos nunca se toquen; la longitud de la bomba de tornillos depende de la cantidad de diferencial de presión que pueda generar (figura 15), de hay, que la presión es una función casi lineal con la distancia

Figura 15. Etapas de una bomba



Fuente: Can-K

Figura 16. Conjunto bomba tornillo gemelos



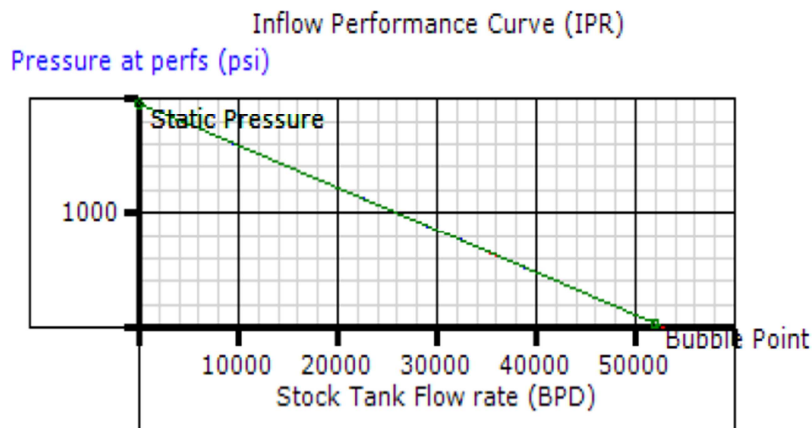
Fuente: Can-K

## **5.0 COMPARACIÓN TÉCNICA DEL COMPORTAMIENTO DE DE LOS SISTEMAS**

Para este proposito se tomo un pozo tipico de caño limón y se realizó una evaluaciòn desde el punto de vista tècnico(simulaciòn) con un sotware conocido para simulaciòn ESP, adicionalmente se interralaciom'o con la compaõia que suministra las bombas de tornillos gemelos (Can K) y se evaluó un diseõo con este sistema para este mismo pozo.

Para poder realizar la evaluaciòn tècnica de los sistemas es necesario conocer los parametros de Yacimientos y el estado mecanico actual para el pozo. Cabe notar que los pozos en el campo caño limón no producen gas y su comportamiento en cuanto al règeimen de producciòn es normalmente descrito con el metodo IP.

Figura 17. IPR del Pozo LY-064



Se debe determinar o estimar la productividad del pozo a la profundidad de operación de la bomba; de modo que este régimen de bombeo no debe producir una condición de agotamiento de nivel, ni tampoco un excesivo nivel de fluido sobre la bomba, la cual debe fijarse por encima del intervalo productor, ya que el motor está diseñado para ser enfriado por el paso de fluido en el pozo.

Índice de Productividad (IP). Cuando  $P_{wf}$  es mayor que  $P_b$ , el flujo de fluido es similar al flujo de una sola fase, y la curva de comportamiento de afluencia es una línea recta con pendiente  $J$ , dada por el IP:

Donde:

$Q$  = caudal de producción de fluidos (Bbls/ Día).

$P_{st}$  = Presión estática de yacimiento (psi).

$P_{wf}$  = Presión de fondo fluyendo a un Caudal  $Q$  (psi).

## 5.1 PARÀMETROS DE DISEÑO

Para realizar la evaluación técnica se escogio el pozo LY-064, pozo que representa muy bien las condiciones actuales de producción del campo caño limòn

Tabla No2. Parámetros diseño

Input Parameters:

Fluid Properties:

Oil Gravity = 30.0 °API  
 Water Cut = 94.0 %  
 SG water = 1.01 rel to H2O  
 SG gas = 0.6 rel to air  
 Prod GOR = 7.0 scf/STB  
 Bot Hole Temp = 215 °F  
 Surf Fluid Temp = 202 °F

Gas Impurities:

N2 = 0 %  
 H2S = 0 %  
 CO2 = 0 %

Bubble Point Pressure

Pb = 50.0psia

Inflow Performance:

Datum = 7380 ft  
 Perfs V. Depth = 7380 ft  
 Datum Static P = 1959 psi  
 PI = 27.0 BPD/psi  
 IPR Method = Composite IPR

Target:

Pump Setting Depth  
 (vertical) = 4500 ft  
 Desired Flow = 10010 BPD  
 Gas Sep Eff = 0 %  
 Tbg Surf Press = 150 psi  
 Csg Surf Press = 150 psi

Casing & Tubing: Roughness = 0.0006 in

Casing ID (in) 8.681  
 Tubing ID (in) 3.957  
 Vertical Depth (ft) 7380  
 Measured Depth (ft) 7380

Correlations PVT:

Dead Visc:  
 Beggs & Robinson

Saturated Visc:  
 Beggs & Robinson

UnderSaturated:  
 Vasquez & Beggs

Gas Visc:  
 Lee

Oil Compress:  
 Kartoatmodjo

Formation Vol:  
 Standings

Z factor:  
 Hall & Yarborough

Bubble Point P:  
 Standings

Correlations Multiphase:

Tubing Flow: Hagedorn & Brown  
 Casing Flow: Hagedorn & Brown

Comments:

No comments

Fuente: Yacimientos Occidental de Colombia

## 5.2 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CONVENCIONAL.

Para esta evaluación técnica se realizó simulación con un software típico para diseño en bombeo electrosumergible convencional, se realizó simulación de diseño del sistema operando con sistema de tornillos gemelos y se evaluó las condiciones de operación actuales del pozo en mención.

Tabla No3. Resultados simulación diseño BES para LY-064

Operating Parameters / Selection:

Design Point:

Desired flow (total) = 10010 BPD  
 % water = 94.0 %  
 % Gas into pump = 0.0 %

Frequency = 53.0 Hz  
 GOR into pump = 7.0 scf/STB  
 TDH = 4141 FT  
 Friction Losses = 83.63 psi

Pump Selection:

Intake  
 Pressure = 386 psi  
 Flowrate = 10437 BPD  
 Specific Gravity = 0.961 rel-H2O  
 Viscosity = 0.433Cp

Discharge

2114 psi  
 10383 BPD  
 0.966 rel-H2O  
 0.56Cp

Pump Selected:

CENTURION 161-538P100SXD  
 Pshaft RPM = 3095  
 Shft HP @ 53.0 Hz = 481  
 Shaft load =(Std 151 %) / (HS 99 %)  
 Required Motor HP at 60.0 Hz = 546

No comments

Seal Selection:

Well angle (set depth)= 0Deg fm vert.  
 No sand present  
 Pump uses floater-type stages  
 Motor/Seal Oil type = CLB  
 Seal Selected : GSCT3 [ 513 Series]  
 Options : None  
 No comments

Oil temperature at thrust chamber = 297°F  
 Chamber Cap Used (Top to Bot)=  
 32% 49% 46% 24% 36% 33 %  
 Thrust bearing load =39 %  
 Shaft load = 109 %

Motor Selection:

Terminal Voltage =3110.3 V  
 Motor Current =94.6 A  
 Load acc to N.P. =95.8 %  
 Shaft Load =57.5 %

Fluid Speed =2.724ft/s  
 Eff/PF =86.11 % / 82.47 %  
 Internal Temp =289°F  
 Motor Selected: KMH  
 570HP 3560V 98A [562Series]

No comments \*NOTE: Motor ratings at 60Hz

Cable Selection:

Surface Length = 50.0ft  
 Tubing Length = 4410ft  
 MLE length = 90.0ft  
 Surface Temp = 202°F

Wellhead Voltage = 3289.4V  
 Wellhead kVA = 539.2kVA  
 Voltage Drop = 179.1V  
 Cond Temp (main) = 260°F  
 Temp Rating = 300°F

Surface Cable  
 #6 CEER5.0kV 50.0ft  
 No comments

Main Cable  
 #2 CEER5.0kV 4410ft

MLE Cable  
 #5 MLE-KT33.0kV 90.0ft

Controller Selection:

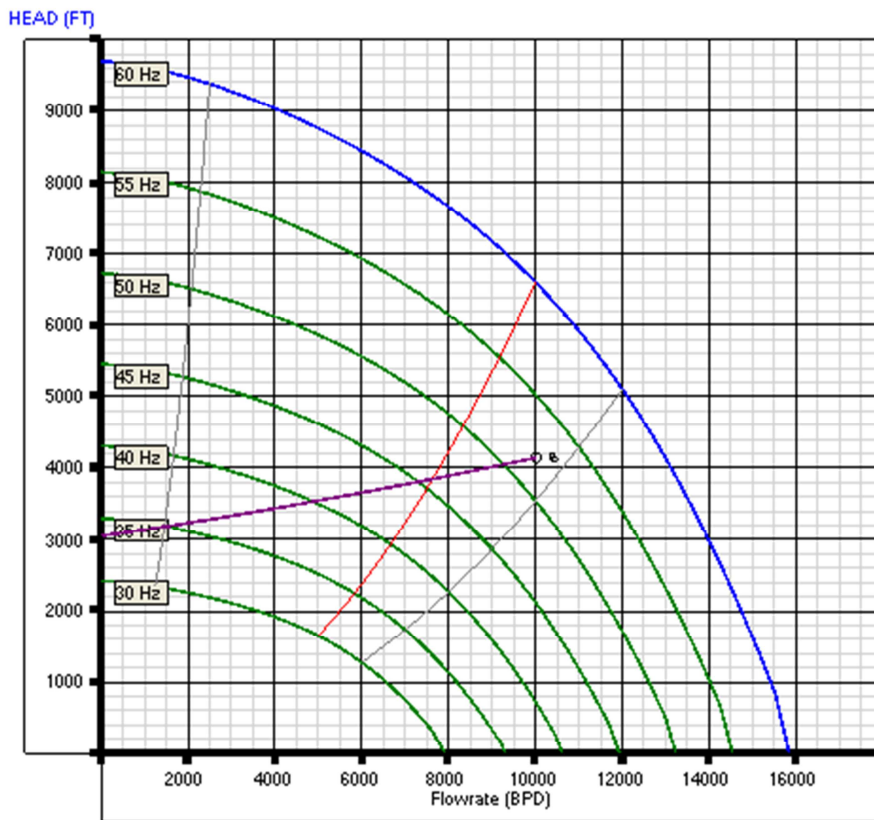
Input kVA = 550.6kVA  
 System kW = 476.6kW  
 Max Ctrl Current = 719.3A  
 Power Cost/kWH = 0.05\$/kWH  
 Total Power Cost = \$17157/month

Voltage Input = 480V  
 Max Well Head Volts = 3289V  
 Max Frequency = 53.0Hz (9.05V/Hz)  
 Start Frequency = 10.0Hz  
 Step-up Trafo = 7.6 ratio  
 Selected: VSD 8600-VT 624kVA 480V 750A

No comments

Fuente: Los Autores

Figura 18. Curva de comportamiento de BES



Fuente: Los Autores.

### 5.3 PARÀMETROS DE SIMULACIÓN PROPUESTA TECNICA BOMBA CON SISTEMA DE TORNILLOS GEMELOS

Para la evaluación de la propuesta hecha por la compañía que suministra las bombas de tornillos gemelos se mantuvieron los mismos parámetros de diseño y estado mecánico utilizados para la evaluación del sistema de bombeo electrosumergible convencional, la modificación importante solo se realizó en la bomba ya que es ahí donde está el valor agregado de esta tecnología.

Tabla No4. Resultados simulación diseño Tornillos gemelos para LY-064

<u>Operating Parameters / Selection:</u>			
<b>Design Point:</b>			
Desired flow (total)	= 10900 BPD	Frequency	= 60.4 Hz
% water	= 94.0 %	GOR into pump	= 7.0 scf/STB
% Gas into pump	= 0.0 %	TDH	= 4141 FT
		Friction Losses	= 83.88 psi
<b>Pump Selection:</b>			
	<b>Intake</b>	<b>Discharge</b>	<b>Pump Selected:</b>
Pressure	= 387 psi	2114 psi	37-675HC7800
Flowrate	= 10427 BPD	10373 BPD	Ps shaft RPM = 4118
Specific Gravity	= 0.961 rel-H2O	0.966 rel-H2O	Slip HP @ 70.4 Hz = 50.1
Viscosity	= 0.432Cp	0.562Cp	Shaft load =(Std 53%) / (HS 34%)
			Required Motor HP at 60.0 Hz = 430
<b>Seal Selection:</b>			
Well angle (set depth) = 9Deg fm vert.		Oil temperature at thrust chamber = 292°F	
No sand present		Chamber Cap Used (Top to Bot)=	
Pump uses fixed-type stages		32% 50% 47% 35% 36% 33%	
Motor/Seal Oil type = CL5		Thrust bearing load =239 %	
Seal Selected : GST3 [ 513 Series]		Shaft load = 86 %	
Options = None			
<b>Motor Selection:</b>			
Terminal Voltage	= 2405.2 V	Fluid Speed	= 2.721ft/c
Motor Current	= 87.2 A	Eff/PF	= 86.16% / 83.21%
Load acc to N.P.	= 87.1 %	Internal Temp	= 294°F
Shaft Load	= 45.2 %	Motor Selected:	KMH
			494HP 3085V 98A [562Series]
<b>Cable Selection:</b>			
Surface Length	= 50.0ft	Wellhead Voltage	= 3650.3V
Tubing Length	= 4410ft	Wellhead kVA	= 551.5kVA
MLE length	= 90.0ft	Voltage Drop	= 155.0V
Surface Temp	= 202°F	Cond Temp (main)	= 252°F
		Temp Rating	= 300°F
<b>Surface Cable</b>	<b>Main Cable</b>	<b>MLE Cable</b>	
#7 CERFES 0kV 50 off	#7 CERFES 0kV 4410ft	#7 MLE-K1HTS 0kV 90 off	
<b>Controller Selection:</b>			
Input kVA	= 438.4 kVA	Voltage Input	= 480V
System kW	= 420 kW	Max Well Head Volts	= 3650V
Max Ctrl Current	= 663.3A	Max Frequency	= 70.4Hz (6.82V/Hz)
Power Cost/kWH	= 0.05\$/kWH	Start Frequency	= 10.0Hz
Total Power Cost	= \$. 15152 /month	Step-up Trafo	= 7.605 ratio
		Selected: VSD 8600-VT 634kVA/ 480V/ 756A	

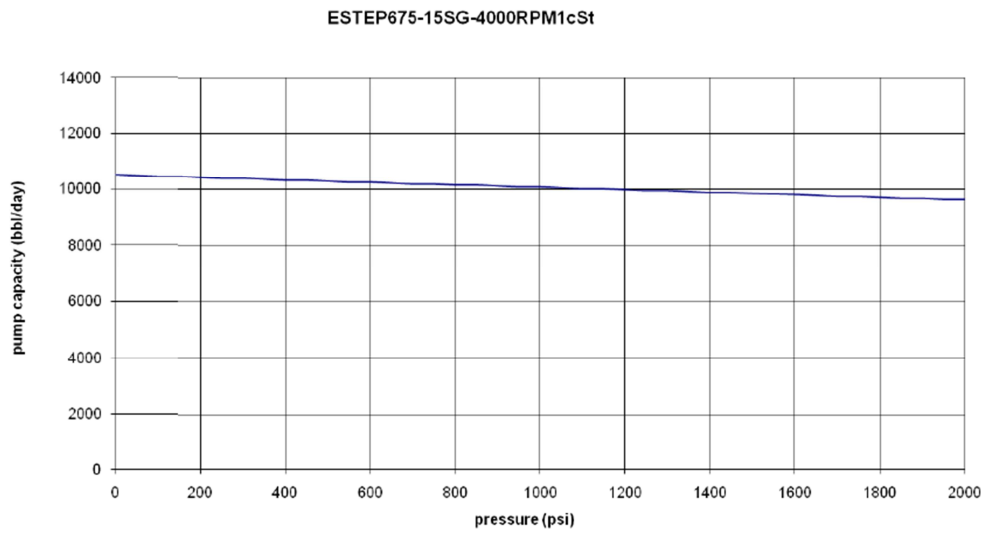
Fuente: Los Autores

Figura No.19. Esquemático de diseño suministrado por la empresa Can-K

Pump Length - Occidental Petroleum - Columbia LA YUCA 64 CAN-K Group of Companies ESTSP System						
Item #	Description	Length(ft)	Top Depth(ft)	OD(in)	Length(in)	Weight (kg)
1	Casing, 95/8" 47 lb/ft.	7382.00	0.00	9.625	-	47 lb / ft
2	Perforations @ 7320 ft.	7320.00	0.00	-	-	-
3	Tubing - Pump landing depth 4500 ft.	4500.00	0.00	4.500	-	18.97 lb/ft
4	Discharge Sub	0.79	4500.00	6.750	9.50	0.00
5	Reverse Thrust Module	0.83	4500.79	6.750	10.00	16.31
6	Pump Stage # 15	1.79	4501.62	6.750	21.43	81.71
7	Pump Stage # 14	1.79	4503.41	6.750	21.43	81.71
8	Pump Stage # 13	1.79	4505.19	6.750	21.43	81.71
9	Pump Stage # 12	1.79	4506.98	6.750	21.43	81.71
10	Pump Stage # 11	1.79	4508.77	6.750	21.43	81.71
11	Pump Stage # 10	1.79	4510.55	6.750	21.43	81.71
12	Pump Stage # 9	1.79	4512.34	6.750	21.43	81.71
13	Pump Stage # 8	1.79	4514.12	6.750	21.43	81.71
14	Pump Stage # 7	1.79	4515.91	6.750	21.43	81.71
15	Pump Stage # 6	1.79	4517.69	6.750	21.43	81.71
16	Pump Stage # 5	1.79	4519.48	6.750	21.43	81.71
17	Pump Stage # 4	1.79	4521.27	6.750	21.43	81.71
18	Pump Stage # 3	1.79	4523.05	6.750	21.43	81.71
19	Pump Stage # 2	1.79	4524.84	6.750	21.43	81.71
20	Pump Stage # 1	1.79	4526.62	6.750	21.43	81.71
21	Intake Module	3.33	4528.41	6.750	40.00	140.59
22	Main Thrust Module	2.52	4531.74	6.750	30.25	120.18
23	Gate Thrust Module	2.52	4534.26	6.750	30.25	119.61
24	Timing Module	2.52	4536.78	6.750	30.25	109.75
25	Centralizer Module	3.11	4539.30	6.750	37.27	138.32
26	Equalizer Module	3.48	4542.41	6.750	41.78	93.42
27	Motor Connector Module	2.04	4545.89	6.750	24.44	77.10
<b>Pump Length</b>		<b>47.93</b>			<b>Pump Total Weight</b>	<b>2040.93</b>
28	Seal - Centrilt GST3 Tandem 513 Series Seal	12.60	4547.93	5.130	151.20	238.00
29	Motor-Centrilt 562 Series KMH 494 Hp 3085 V/98A	42.30	4560.53	5.620	507.60	1674.00
30						
31	Guide - Drift Diameter	0.50	0.00	8.525	6.00	8.00
32	Cable, MLE #2 MLE-KLHt Two Piece monel	90.00	-	-	1080.00	26.80
33	Main Cable #2 CEBER Round Cable (1.53 lb/ft. or 2.28 kg/m)	4500.00	-	-	54000.00	3119.00
<b>Pumping System Total Length</b>		<b>103.33</b>			<b>Pump System Total Wt + Cable</b>	<b>5303.80</b>

Fuente: Can-K

Figura No 20. Curva de comportamiento de bomba de tornillos gemelos escogida para la evaluación.



Fuente: Can-K

## 5.4 CONDICIONES ACTUALES BES CONDICIONES EN LY-064

Se realizó simulación de las condiciones actuales del pozo para compararlas con los datos de simulación.

Tabla No 5. Resultados simulacion condiciones actuales

### Operating Parameters / Selection:

#### Design Point:

Desired flow (total) = 10000 BPD  
 % water = 94.5 %  
 % Gas into pump = 0.0 %

Frequency = 63.1 Hz  
 GOR into pump = 5.0 scf/STB  
 TDH = 3784 FT  
 Friction Losses = 93.9 psi

#### Pump Selection:

Intake  
 Pressure = 334 psi  
 Flowrate = 10400 BPD  
 Specific Gravity = 0.955 rel-H2O  
 Viscosity = 0.422Cp

#### Discharge

1902 psi  
 10371 BPD  
 0.958 rel-H2O  
 0.437Cp

#### Pump Selected:

CENTURION 70-562P110SXD  
 Pshaft RPM = 3663  
 Shaft HP @63.1 Hz = 484  
 Shaft load =(Std 58%) / (HS 37%)  
 Required Motor HP at 60.0 Hz = 462

#### Seal Selection:

Well angle (set depth)= 0Deg fm vert.  
 Sand present  
 Pump uses floater-type stages  
 Motor/Seal Oil type = CL5  
 Seal Selected : GST3 [513 Series]  
 Options : H6 HL

Oil temperature at thrust chamber = 316°F  
 Chamber Cap Used (Top to Bot)=  
 33% 49% 46% 36% 32% 29%  
 Thrust bearing load =33 %  
 Shaft load = 65 %

#### Motor Selection:

Terminal Voltage =2228 V  
 Motor Current =135.2 A  
 Load acc to N.P. =110.6 %  
 Shaft Load =48.9 %

Fluid Speed =2.721ft/s  
 Eff/PF =85.79% / 81.45 %  
 Internal Temp =306°F  
 Motor Selected: KMH  
 418HP 2070V/123A [562Series]

#### Cable Selection:

Surface Length = 50.0ft  
 Tubing Length = 3930ft  
 MLE length = 70.0ft  
 Surface Temp = 200°F

Wellhead Voltage = 2412.3V  
 Wellhead kVA = 564.9kVA  
 Voltage Drop = 184.3V  
 Cond Temp (main) = 282°F  
 Temp Rating = 400°F

#### Surface Cable

#1 CEBER-HT5.0kV/50.0ft

#### Main Cable

#1 CEBER-HT5.0kV/3930ft

#### MLE Cable

#4 MLE-KHT5.0kV/70.0ft

#### Controller Selection:

Input kVA = 444.1kVA  
 System kW = 489.2kW  
 Max Ctrl Current = 592.2A

Voltage Input = 480V  
 Max Well Head Volts = 2412V  
 Max Frequency = 63.1Hz (7.60V/Hz)

Fuente: Los Autores

## 6.0 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Al comparar los resultados de diseño de los dos casos se observa un decremento de consumo en el sistema lo que implica un ahorro de 4,000 US al mes en costos de energía del sistema.

Tabla No6. Comparación resultados entre los dos sistemas de levantamiento para LY-064.

LY-064		Comentarios del diseño			
Asentamiento Bomba (TVD)	4500' (TVD)	Se observa un disminución en el consumo de energía de mas de 2,000 US mensuales			
Tubing	5 1/2"				
Casing	9 5/8"				
PARAMETRO	BES CONVENCIONAL	TORNILLOS GEMELOS	CONDICIONES ACTUALES	UNIDADES	
Indice de Productividad	27.00	27.00	27.00	BFPD/PSI	
Corte de Agua	94.0	94.0	94.0	%	
Producción Estimada Fluido	10000	10000	10000	BFPD	
Producción Estimada de Aceite Neto	600	600	600	BOPD	
Frecuencia de Operación	53.0	60.0	63.0	HZ	
TDH	4141	4141	3800	FT	
Presión estática a PMP	1959	1959	1959	PSI	
Presión en Cabeza de Pozo	150	150	150	PSI	
Voltaje en las Terminales del Motor	3110	3400	3110	V	
Corriente del Motor	95	87	135	A	
Carga del Amperaje del Motor	96%	87%	96%	%	
Carga en la Zapata del Sello	100%	86%	65%	%	
Carga del Variador	94%	89%	100%	%	
Consumo Variador	551	438	444	KVA	
Consumo del sistema ESP	477	421	490	Kwh	
Costo de la Energía	\$27,475	\$24,250	\$28,224	US\$/M	

Fuente: Los Autores

Tabla No 7.Comparación entre el uso del sistema de levantamiento artificial tipo tornillo gemelo y el sistema de levantamiento artificial ESP.

Tipo Tornillo Gemelo	ESP Convencional
Utiliza bombas de desplazamiento positivo (twin screw)	Utiliza bombas centrifugas
Capacidad de manejar altas presiones	Capacidad de manejar altas presiones
Capacidad de manejar altas y bajas viscosidades	No es aconsejable para altas viscosidades
Pueden trabajar a altas velocidades	Pueden trabajar a altas velocidades
Alta eficiencia por ser una bomba de desplazamiento positivo	Baja eficiencia por ser una bomba centrifuga
Pueden manejar 100% de gas	No pueden manejar mas del 40% de gas en la mayoría de los casos
Puede ser instalado separador de gas	Puede ser instalado separador de gas
Excelente para problemas de emulsión, debido a su baja agitación	Alta agitación del fluido de producción
Excelente para altas temperaturas (operaciones de recobro térmico)	Limitada por altas temperaturas
Dos ejes en movimiento (mas partes en movimiento)	Solo un eje en movimiento
Mas de un 40% menos de consumo de energía (HP)	Requiere altos consumos de energía (HP)
Aplicable para pozos de baja presión de Yacimiento	No es aplicable a bajas presiones, ya que su rendimiento es dependiente de la sumersión que tenga
La protección a la abrasión se da por recubrimientos con cobalto, zirconio, tungsteno.	La protección a la abrasión se da por recubrimientos con cobalto, zirconio, tungsteno.
Maneja altos caudales (dependiendo de las revoluciones y otros parámetros)	Capacidad de manejar altos caudales
Nueva Tecnología	ha sido usado por años
Expectativas de captar el mercado del sistema ESP, en los próximos años. Reemplazando los sistemas ESP existentes, usando el mismo motor y sistemas sellantes	

Fuente: Los Autores

## 7. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Con el fin de realizar una evaluación, desde el punto de vista económico, de la utilización de bombas de tornillos gemelos CAN-K comparada con las bombas Electrosomergibles con sello, se implementa su uso en el pozo LY-064, como se explica a continuación:

Este pozo tiene una producción inicial de 600 bbls de aceite. Se simula implementar una bomba de tornillos gemelos CAN-K con un valor de US\$ 140,000. Para el cálculo del NPV y de establecer su rentabilidad, se simulará la instalación de una bomba electrosomergible con sello que tiene un costo de 135,000.

A cada uno de los dos casos, se le realiza una evaluación de rentabilidad, con el objeto de compararlos y verificar si se obtiene beneficio con la reducción de los costos de energía.

Para este estudio, como se menciona anteriormente se trabaja solo con el pozo LY-064, para el cual se asume una tasa inicial de 379 bbls de aceite, una declinación (Di) de 14% y un periodo de 24 meses.

Para comparar los dos casos, se emplea como indicador de rentabilidad, el Valor Presente Neto, que es el más adecuado a la hora de comparar la implementación de los dos tipos de bombas. Por otra parte, es necesario fijar un horizonte de tiempo de la misma magnitud, ya que se están comparando equipos con diferentes vidas útiles; para esto se buscó un mínimo común múltiplo aproximado, de dichas vidas útiles. Este valor fue 730 días aproximadamente o 24 meses.

De acuerdo a lo anterior, se supone que las inversiones se repiten en las mismas condiciones hasta alcanzar los 730 días.

En la evaluación económica, es necesario tener en cuenta todos aquellos aspectos, que intervienen en la obtención de los flujos de fondos para cada caso. Dichos aspectos se explican a continuación:

**Inversión inicial:** Se refiere al capital necesario para adquirir el equipo de fondo. Este incluye el costo de la bomba de tornillos gemelos CAN-K y de la bomba electrosumergible que incluye el motor, el costo del sello y el costo de la bomba. Es necesario aclarar que la tubería, el cable y demás accesorios no se incluyen, pues se asume que no son reemplazadas a la hora de instalar la bomba.

**Costos de operación:** En este se incluyen aquellos gastos generados por la operación del equipo; estos son:

- **Costos de energía eléctrica:** En Caño Limón, el 35 % de la energía consumida es auto generada en el campo, y el restante 65% se compra al sistema de interconexión eléctrica ISA; en la actualidad, el valor promedio de las tarifas para la energía durante los próximos 2 años es de US\$ 30.3 por Megavatio hora consumido (este valor es promedio entre las tarifas de compra de energía y los costos de generación en el campo). Los requerimientos de energía eléctrica, están determinados por los MWH que requieren los variadores para suministrar a los equipos de fondo y a la postre, este consumo es el que se considera como costo de levantamiento.
- **Costos de tratamiento de los fluidos en superficie:** Se tiene calculado un valor de US \$ 0.0024 por cada barril de agua tratado en superficie y de US \$ 0.00297 por barril de aceite tratado.

Tabla 8. Costo tratamiento del agua.

<b>Químico</b>	<b>Costo US\$/Mil Barriles</b>
Clarificador	1.67
Rompedor Inverso	0.89
Total	2.56

Fuente: Occidental de Colombia.

Tabla 9. Costo tratamiento de crudo.

<b>Químico</b>	<b>Costo US\$/Mil Barriles</b>
Desemulsificante	2.67
Total	2.67

Fuente: Occidental de Colombia

- **Servicio de pozos.** Bajo esta denominación se incluyen todos los gastos necesarios cuando se saca una instalación y se baja otra nueva. No forman parte del capital de la nueva instalación, pues se toman como costos de operación de la instalación extraída. En la siguiente tabla se muestran los diferentes componentes que intervienen en un servicio de pozo, con su respectivo valor.

Tabla 10. Servicio de pozo.

Descripción	Costo Global US\$
Variador y reparación equipo superficie, mantenimiento o remplazo	\$ 1,197
Tubing (Nuevo, inspeccionado)	\$ 5,568
Accesorios (Y tool, X overs, Over Couplings, Couplings)	\$ 11,265
Operación Rig	\$ 48,457
Broca	\$ 1,276
Fluidos de Perforación y químicos	\$ 750
Servicio de pesca	\$ 1,828
Slick Line	\$ 3,149
Spooler	\$ 3,692
Tag Botton	\$ 3,000
Renta, Movilización de equipo	\$ 25,431
<b>TOTAL OTROS</b>	<b>\$ 105,613</b>

Descripción	Costo Global
Reparaciones	\$ 7,010
Kit + consumibles	\$ 1,579
Cable, Splices y MLE	\$ 2,257
Servicio en Campo + cargo fijos Vehículos	\$ 3,796
Arrendamiento de equipo de fondo	\$ 48,745
<b>TOTAL ESP</b>	<b>\$ 63,387</b>

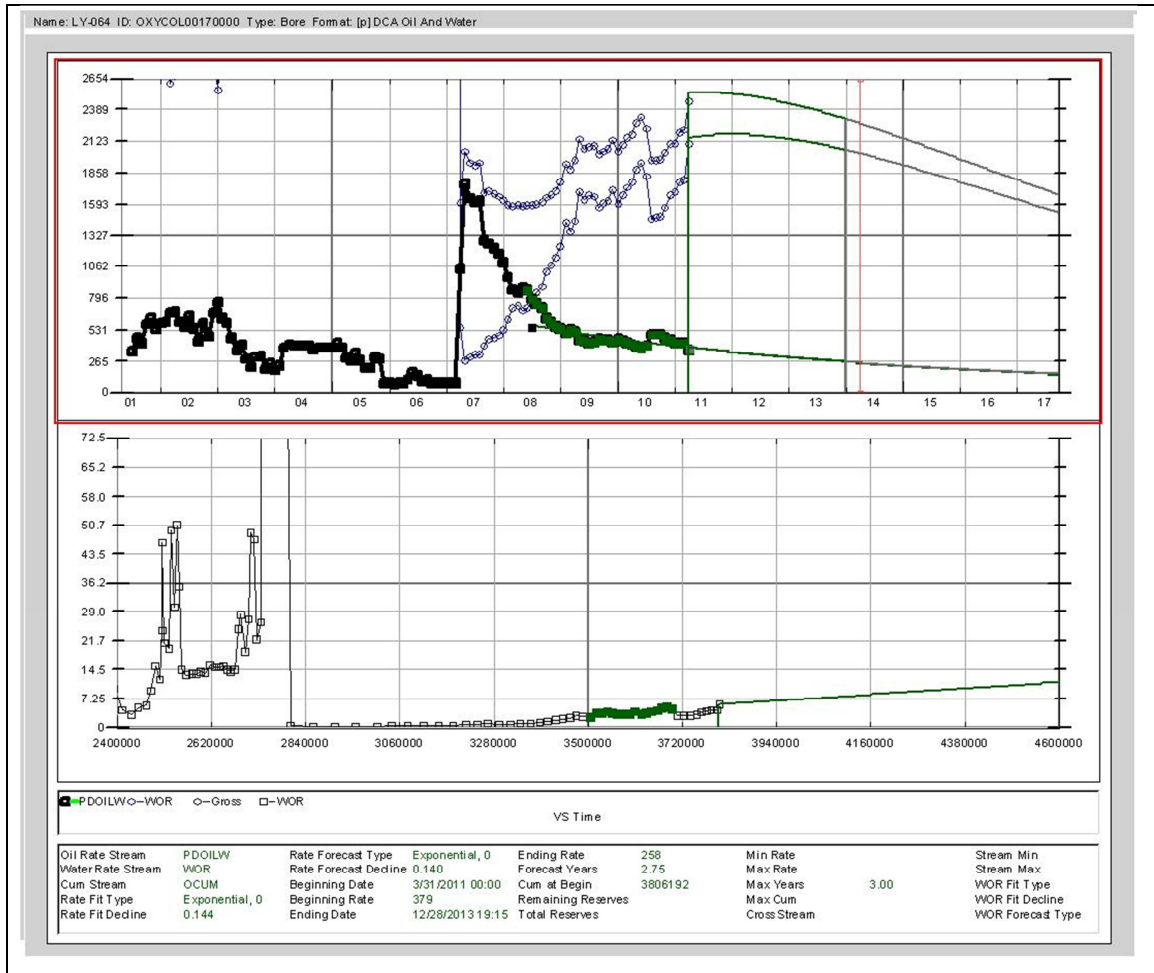
<b>TOTAL PROMEDIO WS CRAVO NORTE</b>	<b>\$ 169,000</b>
--------------------------------------	-------------------

Fuente: Occidental de Colombia.

Descuentos e impuestos: el otro aspecto que se tiene en cuenta para los análisis, es el de los descuentos y los impuestos que paga la compañía a las diferentes partes del contrato de asociación. Estos hacen referencia a:

- Regalías: 20% de la producción.
  - Retenciones: 35% de los ingresos netos antes de impuestos.
  - Remesas: 7% de los ingresos netos antes de impuestos.
  - Impuestos en Estados Unidos: 9.8% de los ingresos netos antes de impuestos.
  - Ahorro de energía por Instalación bomba CAN-K: 30%
- 
- **Declinación del Pozo LY-064.** Con la utilización del Software DSS (Dynamic Surveillance System), se ejecuta la declinación del pozo LY-064, con una declinación  $D_i=14\%$  que corresponde a la declinación utilizada por Occidental de Colombia en su plan de desarrollo, un tiempo límite de 24 meses, unas reservas remanentes de 315,600 bbls y se mantiene casi constante la producción de agua teniendo en cuenta el comportamiento del WOR.

Figura 21. Curva de declinación del pozo LY-064 del Bloque Cravo Norte.



Fuente: Los Autores

A continuación se presentan los análisis para cada caso.

### 7.1 CASO 1: BOMBA DE TORNILLOS GEMELOS CAN-K.

Este es un caso simulado, referido a la instalación número 1 del pozo LY-064; esta es una tipo estándar, y su corrida es una simulación desde Enero de 2010.

Para cubrir los 760 días establecidos como horizonte de tiempo, se consideran 1 corridas de la instalación, los cuales son repartidos en 24 meses para la determinación de su valor presente neto. Para cada uno de estos períodos se determinó:

- Producción Total de Agua.
- Producción Total de Aceite.
- Consumo de Potencia.

Los datos para cada período se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11. Producción acumulada

PERIODO (AÑOS)	PRODUCCIÓN TOTAL DE AGUA (BWPD)	PRODUCCIÓN TOTAL DE ACEITE (BOPD)	CONSUMO DE POTENCIA (MW-H)
1	787968	131159	0.25
2	787968	115212	0.25

Fuente: Los autores.

Una vez se cuenta con toda la información, se procede a determinar el capital de inversión y los ingresos netos, para luego obtener el valor presente neto.

**Capital de inversión:** Se obtiene de la suma de: Costo del Motor, Costo del Sello y Costo de la Bomba

**Ingresos netos:** se calculan de la siguiente manera:

- A la producción total de aceite se le resta un 20% correspondiente a regalías y se le suma un 18.75% correspondiente al porcentaje de asociación, obteniendo los ingresos brutos.

- A los ingresos brutos se les resta el total de los costos de operación, y se obtienen los ingresos netos antes de impuestos.
- A los ingresos netos antes de impuestos se les resta un 35% de retención, un 7% de remesa y un 15% de impuestos que cobra Estados Unidos a la compañía. El valor resultante es el ingreso neto después de impuestos.

Finalmente, cada una de estas utilidades se trae a dinero de hoy, mediante el valor presente neto, partiendo de una tasa de interés de oportunidad del 15%. Vale la pena aclarar que como se está trabajando en dólares, no se tienen en cuenta factores como la devaluación.

Figura 22. Resultados económicos del pozo LY-064 con Bombas CAN-K.

<b>MODELO ECONOMICO</b>		
CORRIDA PARA CONTRATO SOLO RIESGO?	LY-064	
REGALIAS	Cravo Norte	
	No	
	20% Fixed	
CASO	Oxy Net	
TASA DE DESCUENTOS	15%	
	Year	Month
FECHA DE DESCUENTO	2011	4
CORTE AL LIMITE ECONOMICO	Yes	
<b>COMENTARIOS</b>		
Resultados Económicos corridos para la bomba de tornillos gemelos CAN-K		
<b>RESUMEN DE INDICADORES ECONOMICOS</b>		
ATCF - ROR	N/A	
NPV@15%	M\$ 667.37	
DPI@15%	13.10	
Retorno desde Inversión Inicial	1.00 Months	
Flujo de Caja @2010	US\$ 2,009,373	
Fecha de límite económico	Feb-2013	

Fuente: Los autores

Aplicando la fórmula del valor presente neto para los 24 mese se obtiene:

NPV@15%	M\$ 667.37
---------	------------

## 7.2 CASO 2: BOMBA ELECTROSUMERGIBLES.

Este es un caso real, referido a la instalación número 8 del pozo LY-064; esta es una bomba P110 de 70 etapas, instalada desde Enero de 2010, durante los cuales la bomba no presenta daño.

Para cubrir los 760 días establecidos como horizonte de tiempo, se consideran 1 corrida de la instalación, los cuales son repartidos en 24 meses para la determinación de su valor presente neto. Para cada uno de estos períodos se determinó:

- Producción Total de Agua.
- Producción Total de Aceite.
- Consumo de Potencia.

Los datos para cada período se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 12. Producción acumulada

PERIODO (Años)	PRODUCCIÓN TOTAL DE AGUA (BWPD)	PRODUCCIÓN TOTAL DE ACEITE (BOPD)	CONSUMO DE POTENCIA (MW-H)
1	787968	131159	0.36
2	787968	115212	0.36

Fuente: Los autores.

Una vez se cuenta con toda la información, se procede a determinar el capital de inversión y los ingresos netos, para luego obtener el valor presente neto.

**Capital de inversión:** Se obtiene de la suma de: Costo del Motor, Costo del Sello y Costo de la Bomba

**Ingresos netos:** se calculan de la siguiente manera:

- A la producción total de aceite se le resta un 20% correspondiente a regalías y se le suma un 18.75% correspondiente al porcentaje de asociación, obteniendo los ingresos brutos.
- A los ingresos brutos se les resta el total de los costos de operación, y se obtienen los ingresos netos antes de impuestos.
- A los ingresos netos antes de impuestos se les resta un 35% de retención, un 7% de remesa y un 15% de impuestos que cobra Estados Unidos a la compañía. El valor resultante es el ingreso neto después de impuestos.

Finalmente, cada una de estas utilidades se trae a dinero de hoy, mediante el valor presente neto, partiendo de una tasa de interés de oportunidad del 15%. Vale la pena aclarar que como se está trabajando en dólares, no se tienen en cuenta factores como la devaluación.

Figura 23. Resultados económicos del pozo LY-064 con Bombas CAN-K.

LLANOS STAND ALONE ECONOMIC MODEL		
CORRIDA PARA CONTRATO SOLO RIESGO?	Test	
REGALIAS	Cravo Norte	
	No	
	20% Fixed	
CASO	Oxy Net	
TASA DE DESCUENTOS	15%	
FECHA DE DESCUENTO	Year	Month
	2011	4
CORTE AL LIMITE ECONOMICO	Yes	
<b>COMENTARIOS</b>		
Resultados Económicos corridos para la bomba Electrosumergible Run #8 P110.		
<b>RESUMEN DE INDICADORES ECONOMICOS</b>		
ATCF - ROR	N/A	
NPV@15%	M\$ 665.79	
DPI@15%	13.52	
Retorno desde Inversión Inicial	1.00 Months	
Flujo de Caja @2010	US\$ 2,000,676	
Fecha de límite económico	Feb-2013	

Fuente: Los autores

Aplicando la fórmula del valor presente neto para los 24 mese se obtiene:

NPV@15%	M\$ 665.79
---------	------------

### 7.3 ANALISIS DE LOS VALORES PRESENTES NETOS.

Al analizar el valor presente neto obtenido de la simulación de la bomba de tornillos gemelos CAN-K contra el real de la instalación de la bomba P-110, se observa el beneficio económico que se obtiene cuando se instala una bomba de tornillos gemelos. La mayor magnitud del valor presente neto de la instalación del a bomba CAN-K demuestra que a pesar de tener una valor presente neto muy cercano al de la bomba electrosumergible, se obtiene un mayor benéfico económico debido al gran número de pozos que actualmente operan con bomba electrosumergible.

Dicho número de pozos admite dos aspectos; El primero, es que a pesar de que el valor del equipo y de la instalación es el mismo para los dos casos, la inversión de capital en instalaciones es menor a través del tiempo. Y el segundo es que al evitar el desgaste severo el valor del caudal producido se mantiene por más tiempo, con lo cual la producción no obtenida inicialmente queda como diferida.

Al evaluar el caso de la instalación de la bomba CAN-K contra el caso de la instalación de la bomba Electrosumergible, es posible visualizar como el valor presente neto de la bomba CAN-K es mayor que de la instalación Electrosumergible. De lo anterior es posible razonar que el mayor valor de la instalación CAN-K queda cubierto por la reducción de los costos de energía y el mayor tiempo de vida obtenido.

Un análisis adicional que se puede establecer entre las magnitudes del valor presente neto obtenidas para el caso primero y el caso segundo, permite advertir la importancia de instalar las bombas de tornillos gemelos en el 100% de los pozos de Cravo Norte. La diferencia entre los VPN de la bomba CAN-K y la bomba electrosumergible es de US\$ 9000 por pozo por año, cifra que demuestra la gran importancia de la aplicación de esta nueva tecnología.

El anterior análisis puede ser visualizado con mayor facilidad en el siguiente cuadro comparativo entre los valores presentes netos obtenidos.

Tabla 13. Tabla de análisis económico

<b>CRITERIO</b>	<b>CASO 1</b>	<b>CASO 2</b>
Valor Presente Neto	667.4 MUS\$	665.8 MUS\$
Tiempo de vida	> 760 días	< 760 días
Tipo de Bomba	CAN-K	Estándar
# de instalaciones	Simulada	8
# de periodos mensuales	24	24
Concepto VPN	VPN Mayor	VPN Menor
Concepto tiempo de vida	Mayor al promedio	Igual al Promedio
Inversión de capital	Mayor	Menor
Operación	Baja frecuencia, menor consumo y igual producción	Frecuencia óptima, mayor consumo y producción diferida.
Diferencia	-----	9 MUS\$ al caso 1 por pozo por año

Fuente: Los autores

## CONCLUSIONES

- La Tecnología de tornillos gemelos es sistema versatil y con una gran variedad de rangos de caudal, debido que no usa el principio de fuerza cetrifuga lo que evita tener problemas de Down thrust y Upthrust.
- El consumo de energía, el cual es uno de los factores operacionales mas importantes en el campo Caño Limón, debido al gran numero de instalaciones, es también uno de las características mas importantes de este sistema; ya que presenta un consumo menor que el de el sistema ESP a las mismas condiciones de operación.
- Para lograr una mejor evaluación técnica de la aplicación en pozos del Campo Caño Limón se debería realizar una evaluación conjunta en varios pozos con rangos de producccón y presión de fondo diferentes, lo que demostraría que esta tecnología de tornillos gemelos, también puede ser usada en pozos de baja presión donde las ESP no tienen operabilidad.
- Para el caso especifico evaluado se observa un ahorro de energía de un poco más de 4,000 mensuales/ pozo
- Aparentemente no se observa un gran ahorro al usar las bombas de tornillos gemelos en u pozo, pero si se dimenciona el ahorro teniendo en cuenta la gran cantidad de pozos en Cravanorte, el ahorro si sería significativo

## BIBLIOGRAFIA

DEVELOPMENT OF A TWIN SCREW PUMP FOR MULTIPHASE DUTIES, P.J Dolan, R.A. Goodridge and J.S Leggate, SPE 62932, 1988.

DOMINGUEZ, G. & et al. Caño Limón Field, Colombia: The Lastest Giant Oil Reservoir in South America. RIVERO, R., SPE 15153, 1988.

FIELD TESTS OF THE POSEIDON PUMP, P Gie, SPE 23624.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC. Normas Colombianas para la presentación de Tesis de Grado. Bogotá 2005.

MULTIPHASE – PUMP FIELD TRIAL DEMONSTRATE PRACTICAL APPLICATIONS FOR THE TECHNOLOGY, D.F. Dal Porto and L.A. Larson; SPE 36590, 1997.

OCCIDENTAL DE COLOMBIA, Inc. OPERATION SYSTEMS: Production Reporting, Well Monitoring System, Field Data Gathering System. Base de Datos Corporativos. Caño Limón - Arauca – Colombia 2006.

OIL PRODUCTION USING PUMPED MULTIPHASE SYSTEMS, J.S. Leggate, W.N Iball and S. MacJarrow; SPE 15725.

PUMP HANDBOOK. Joseph P. Messina, MC Graw Hill Book, 1985.

SAND HANDLING DURING MULTIPHASE OPERATIONS WITH TWIN-SCREW PUMPS, SPE 69846.