

**EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE SISTEMA DE LEVANTAMIENTO DE
BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS ELECTROSUMERGIBLE (ESPCP)
EN CAMPO GUANDO.**

HUGO JAMIR VAQUIRO CHILATRA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA
2014**

**EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE SISTEMA DE LEVANTAMIENTO DE
BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS-ELECTROSUMERGIBLE (ESPCP)
EN CAMPO GUANDO.**

HUGO JAMIR VAQUIRO CHILATRA

**TRABAJO DE MONOGRAFÍA PARA OPTAR TÍTULO
DE ESPECIALISTA EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS**

**DIRECTOR
MARTHA CLAUDIA SAIZ ORTIZ
Ingeniera de Petróleos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA
2014**

DEDICATORIA

A Dios, por darme una segunda oportunidad en la vida, de avanzar laboralmente y profesionalmente y no desfallecer en los momentos difíciles.

A mi madre por los valores infundidos, la vida y que desde el cielo me sigue acompañando.

Hugo Jamir

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a Petrobras de Colombia y Baker Hugues, que proporcionaron la información técnica y disposición, para cumplir los objetivos propuestos.

En especial este agradecimiento va dirigido: a la Directora de la monografía, Ingeniera Martha Claudia Saiz Ortiz (Ecopetrol S.A) y a los Ingenieros Osnidio Cerquera (Ingeniero de Yacimientos – Petrobras de Colombia), Omaira Torrado (Ingeniera Baker Hugues); por su apoyo desinteresado e incondicional y ante todo por su sabia y eficiente asesoría en el proceso de elaboración de esta Monografía.

A la Universidad Industrial de Santander, por la oportunidad que me brindo de adquirir nuevos conocimiento y crecer profesionalmente en mis proyectos de vida.

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN

1. SISTEMA DE BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS ELECTROSUMERGIBLE- ESPCP.....	16
1.1. Componentes del sistema de levantamiento ESPCP.....	18
1.1.1. Componentes subsuelo.....	18
1.1.2. Componente superficie.....	21
1.2. Ventajas y desventajas.....	22
2. DISEÑO DE BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS ELECTROSUMERGIBL-ESPCL POZO GUANDO 021.....	24
2.1. Selección de pozos.....	24
2.2. Diseño.....	25
2.2.1. Datos de entrada.....	26
2.2.2. Determinación de capacidad de producción.....	27
2.2.3. Determinación de entrada de gas.....	27
2.2.4. Determinación de cabeza total dinámica –TDH.....	31
2.2.5. Selección bomba y caja reductora.....	33
2.2.6. Selección motor.....	34
2.2.7. Selección sello.....	35

2.2.8. Selección cable.....	36
2.2.9. Selección controlador.....	37
3. EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA ESPCP.....	38
3.1. Evaluación técnica.....	38
3.1.1. Información general pozos Guando 021 y Guando 079.....	38
3.1.2. Evaluación pozo Guando 021.....	39
3.1.3. Evaluación pozo Guando 079.....	40
3.2. Evaluación económica.....	41
3.2.1. VPN- Valor presente neto pozo Guando 021.....	42
3.2.2. TIR-Tasa interna de retorno pozo Guando 021.....	44
3.2.3. Tiempo de repago pozo Guando 021.....	44
3.2.4. Relación beneficio-costos pozo Guando 021.....	44
3.2.5. VPN-Valor presente neto pozo Guando 079.....	45
3.2.6. TIR-Tasa interna de retorno pozo Guando 079.....	47
3.2.7. Tiempo de repago pozo Guando 079.....	47
3.2.8. Relación beneficio-costos pozo Guando 079.....	47
4. CONCLUSIONES.....	48
RECOMENDACIONES.....	50
BIBLIOGRAFIA.....	51
ANEXOS.....	52

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Comparación de sistema de levantamiento artificial.....	16
Tabla 2. Determinación de índice de frecuencia de falla Guando 021.....	24
Tabla 3. Determinación de índice de frecuencia de falla Guando 079.....	25
Tabla 4. Datos de entrada pozo Guando 079.....	26
Tabla 5. Descripción general pozos Guando 021 y Guando 079.....	38
Tabla 6. Producción pozos Guando 021 y Guando 079.....	39
Tabla 7. Descripción de fallas pozo Guando 021.....	39
Tabla 8. Flujo de caja pozo Guando 021.....	43
Tabla 9. Flujo de caja pozo Guando 079.....	46

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diseño de diferentes estructuras ESPCP.....	17
Figura 2. Componentes del sistema de levantamiento ESPCP.....	18
Figura 3. Motor eléctrico ESPCP.....	19
Figura 4. Caja reductora.....	19
Figura 5. Vista transversal eje flexible.....	20
Figura 6. Bomba de cavidades progresivas.....	20
Figura 7. Entrada software autograph-PC.....	26
Figura 8. Índice de productividad pozo Guando 079.....	27
Figura 9. Entrada de datos y resultados software autograph-PC.....	32
Figura 10. Selección de bomba y caja reductora software autograph-PC.....	33
Figura 11. Selección motor software autograph-PC.....	34
Figura 12. Selección de sello software autograph-PC.....	35
Figura 13. Selección cable software autograph-PC.....	36
Figura 14. Selección de controlador software autograph-PC.....	37
Figura 15. Comportamiento producción pozo Guando 021.....	40
Figura 16. Comportamiento producción pozo Guando 079.....	41
Figura 17. Flujo de caja pozo Guando 021.....	43
Figura 18. Flujo de caja pozo Guando 079.....	46

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Datos de entrada pozo Guando 021 en software Autograph-PC.....	52
ANEXO B. Pantallazo de cómputo de datos de entrada en software Autograph-PC del pozo Guando-021.....	53
ANEXO C. Pantallazo de selección de bomba en software Autograph-PC del pozo Guando-021.....	54
ANEXO D. Pantallazo de selección de motor en software Autograph-PC del pozo Guando-021.....	55
ANEXO E. Pantallazo de selección de sello en software Autograph-PC del pozo Guando-021.....	56
ANEXO F. Pantallazo de selección de cable en software Autograph-PC del pozo Guando-021.....	57
ANEXO G. Pantallazo de selección de controlador en software Autograph-PC del pozo Guando-021.....	58
ANEXO H. Estado Mecánico Pozo Guando-021.....	59
ANEXO I. Estado Mecánico Pozo Guando-079.....	60
ANEXO J. Producción año 2012-2013 pozos Guando-021 y Guando-079.....	61
ANEXO K. Curva de declinación pozo Guando-079.....	62
ANEXO L. Regalías Campo Guando periodo 2012-2013.....	63
ANEXO M. Registro direccional pozo Guando-021.....	64
ANEXO N. Registro direccional pozo Guando-079.....	65

GLOSARIO

Transformador SDT: Equipo de superficie, que permite reducir el voltaje de 13,2 KV (kilovoltios) de una línea eléctrica a 480 VAC (voltios de corriente alterna).

Transformador SUT: Equipo de superficie, que permite aumentar el voltaje de salida del controlador de 480 VAC (voltios de corriente alterna), al voltaje requerido por el motor de fondo, que oscila entre 1.100 a 4.100 voltios.

ESPCP: Sistema de bombeo de cavidades progresivas electrosumergible.

PCP: Sistema de bombeo de cavidades progresivas.

Índice de productividad (J): Es la relación entre la tasa de influjo del pozo y la caída de presión (drawdown) del yacimiento en la cara de la formación del pozo; expresado en unidades STB/día-psi.

BES: Sistema de bombeo electrosumergible.

Movimiento Concéntrico: Que Gira alrededor de su propio centro geométrico.

Excéntrico: Elemento cuyo eje de rotación no es su centro geométrico.

BM: Sistema de bombeo mecánico.

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN TÉCNICO - ECONÓMICA DE SISTEMA DE LEVANTAMIENTO DE CAVIDADES PROGRESIVAS ELECTROSUMERGIBLE- ESPCP EN CAMPO GUANDO.*

AUTOR: HUGO JAMIR VAQUIRO CHILATRA**

PALABRAS CLAVES: EVALUACION, BOMBEO CAVIDADES PROGRESIVAS ELECTROSUMERGIBLE, TECNICO-ECONÓMICA, SISTEMA DE LEVANTAMIENTO.

CONTENIDO:

La presente monografía, describe la finalidad del sistema de levantamiento artificial de bombeo de cavidades progresiva electrosumergible-ESP, ventajas y desventajas frente a los sistemas de bombeo de cavidades progresiva-PCP y bombeo electrosumergible-ESP, presenta las configuraciones estructurales del sistema ESPCP, aplicado en la producción de pozos y los diferentes componentes que consta en superficie y subsuelo.

Explica la metodología llevada a cabo en la selección de los pozos Guando 021 y Guando 079, en donde se instaló el sistema de bombeo de cavidades progresivas electrosumergible-ESP y el procedimiento que se debe llevar a cabo en la selección del diseño más óptimo, mediante el software autograph-PC.

Finalmente se realiza la evaluación técnico- económica del sistema, presentando el comportamiento de la producción, fallas y determinación de las diferentes variables económicas, en el periodo comprendido entre noviembre-2012 hasta junio del 2013.

De acuerdo a los resultados obtenidos del piloto desarrollado en el campo Guando, se concluye que la implementación del bombeo de cavidades progresivas electrosumergible-ESP es viable en el campo; el sistema se deberá instalar en pozos que tengan el registro direccional hasta su profundidad final y la caja reductora que es el componente más sensible deberá instalarse en dogleg no mayor a 1°/100 ft de grado de inclinación del pozo.

*Monografía

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Ing. Martha Claudia Saiz

SUMMARY

TITLE: TECHNICAL ECONOMIC EVALUATION THE ELECTRICAL SUBMERSIBLE PROGRESSIVE CAVITY PUMP- ESPCP IN FIELD GUANDO.*

AUTHOR: HUGO JAMIR VAQUIRO CHILATRA**

KEYWORDS: EVALUATION, SUBMERSIBLE PROGRESSIVE CAVITY PUMP, TECHNICAL ECONOMIC, LIFT SYSTEM.

DESCRIPTION:

This monograph describes the purpose of the electrical submersible progressive cavity pump-ESPSP, advantages and disadvantages compared to progressive cavity pump-PCP and electric submersible pump-ESP, presents different structural design-ESPSP system, applied in producing wells and the different components in surface and subsurface.

Explains the methodology used in the selection the Guando 021 and Guando 079 wells, where the electrical submersible progressive cavity pump-ESPSP was installed and describes the procedure to be performed in the selection of the optimal design by the autograph-PC software.

Finally, the technical and economic evaluation of the system is carried out, showing the behavior of production wells, failures and identification of different economic variables, in the period from November 2012 until June 2013.

According to the results of the pilot developed in Guando field, it is concluded that the implementation of electric submersible progressive cavity pump-ESPSP is feasible in the field; the system shall be installed in wells having the directional survey to final depth and the gearbox is the most sensitive component, must be installed on dogleg no larger than $1^\circ / 100$ ft of inclination well.

*Monograph

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Ing. Martha Claudia Saiz

INTRODUCCIÓN

A medida que un yacimiento produce fluidos, su energía “presión” disminuye en el tiempo, a tal punto que es demasiado baja para levantar la columna hidrostática de fluido a través del pozo en producción, una forma de suplir la energía es utilizar sistemas de levantamiento artificial.

No existe un procedimiento exacto en la selección del sistema de levantamiento artificial, ya que involucra varios factores: propiedades del yacimiento, propiedades de los fluidos, configuración y estado mecánico del pozo, ubicación geográfica y disposición de energía para el funcionamiento del sistema; razones por las cuales pueden existir más de un sistema de levantamiento en un campo productor de hidrocarburos, sin embargo no garantizan que sea el más óptimo en costos y funcionamiento.

La producción del campo Guando se lleva a cabo mediante tres (3) sistemas de levantamiento artificial: Bombeo Mecánico (BM), Bombeo de Cavidades Progresivas (PCP) y Bombeo Electrosumergible (BES); el sistema de bombeo de cavidades progresivas (PCP), correspondiente al 80% de los sistemas implementados, en unos pozos está presentando un alto índice de frecuencia de falla (IFF), debido a fallas de integridad de la tubería de producción, varilla partida, rotor partido, motor y controlador en fuera de servicio.

Con el fin de disminuir la producción diferida, la intervención de pozos y el aumento de los costos de operación, la empresa Petrobras de Colombia inició un piloto de cambio de sistema de levantamiento artificial de bombeo de cavidades progresivas (PCP) a bombeo de cavidades progresivas electrosumergible (ESPCP) en los pozos Guando 021 y Guando 079.

Por lo anterior, el objetivo de la presente monografía es evaluar técnica y económicamente el piloto desarrollado, el cual permitirá al Departamento de producción del Campo Guando, tomar la decisión de implementar el nuevo sistema en pozos con problemas y características similares.

1. SISTEMA DE BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS ELECTROSUMERGIBLE (ESPCP)

El bombeo de cavidades progresivas electrosumergible (ESPCP), consiste en una bomba de cavidades, operada por un motor en el fondo del pozo como el Sistema de Bombeo Electrosumergible (ESP), el cual elimina las pérdidas de fricción del fluido entre la tubería y las varillas.

¹El sistema de levantamiento integra las ventajas del bombeo electrosumergible y el bombeo de Cavidades Progresivas, el cual es utilizado en la producción de fluidos altamente viscosos y de alto contenido de sólidos, como también apropiado en pozos desviados y horizontales. La tabla 1. compara las ventajas y desventajas de los sistemas de levantamiento descritos.

Tabla 1. Comparación de sistema de levantamientos artificiales

DESCRIPCIÓN	PCP	ESP	ESPCP
CRUDO PESADO	* * * * *	*	* * * * *
ARENA	* * * * *	*	* * * * *
POLIMERO	* * * * *	*	* * * * *
POZOS DESVIADO	*	* * * * *	* * * * *
CAUDAL	**	* * * * *	* * * *
PROFUNDIDAD BOMBA	**	* * * * *	* * * *
RESISTENCIA A LA TEMPERATURA	* * *	* * * *	* * *
EFICIENCIA BOMBA	* * * * *	**	* * * * *
TRANSFERENCIA EFICIENCIA	**	* * * * *	* * * *
HSE	* * *	* * * * *	* * * * *
CONFIABILIDAD	* * *	* * * * *	* * * *
COSTO (FONDO DE POZO)	* * * *	* * *	**

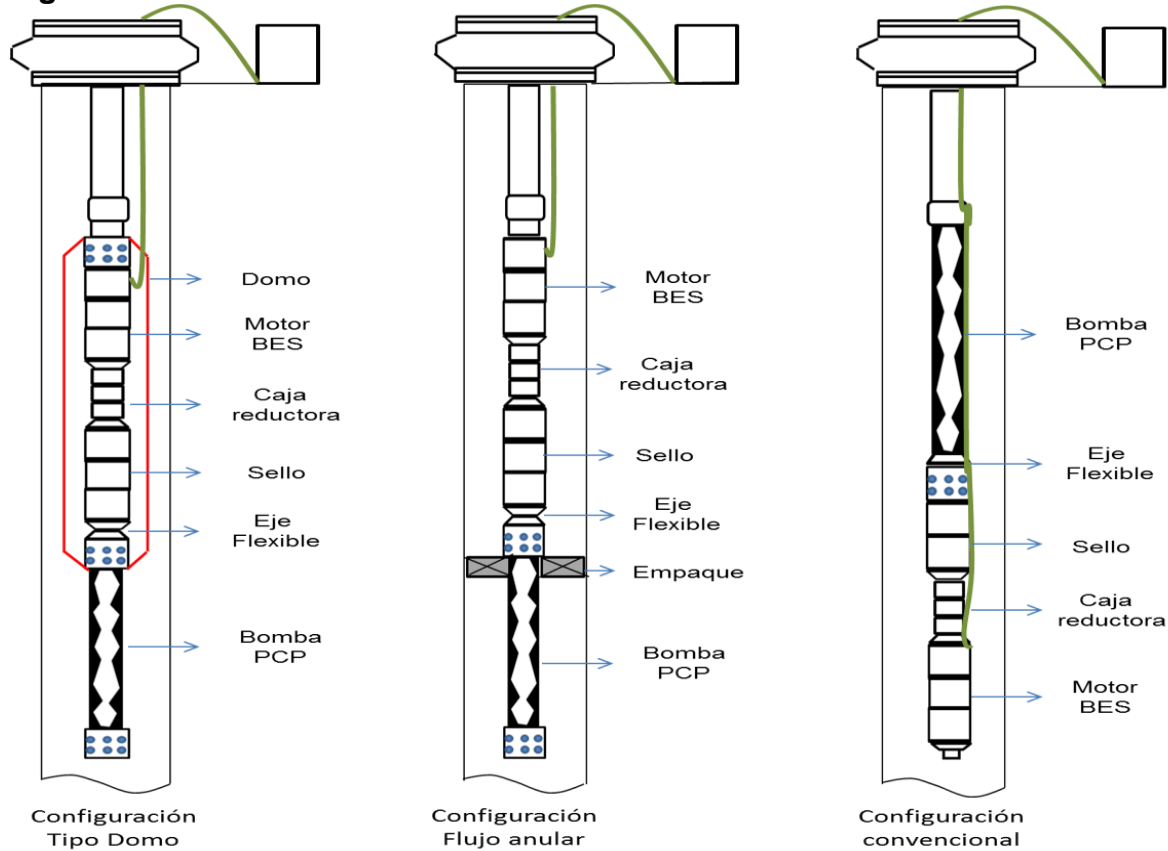
Fuente: Publicación SPE, aplicación de ESPCP en campos costa afuera de China, año 2010.

Más *, significa mucho mejor

¹ Bao Feng, Sanyang Co. Ltd., Weibin Meng, Indonesio Company CNOOC, Anxia Li, Company SINOPEC. Aplicación de bombeo de cavidades progresivas electrosumergible en campos costa afuera de China. Publicación SPE, año 2010; pág. 1

²De acuerdo a la configuración estructural del sistema de bombeo de cavidades progresivas electrosumergible (ESPCP), existen dos tipos de configuración: convencional e invertida; la invertida se divide en tipo domo y tipo flujo anular; la figura 1, presenta las diferentes configuraciones y características.

Figura 1. Diseño de diferentes estructura ESPCP



TIPO		OBJETIVO	CARACTERISTICAS
Invertido	Domo	Caudales muy bajos	Aumenta la velocidad del fluido mediante el motor
	Flujo anular	Casos especiales	Disponibilidad de mayor tamaño radial
Convencional		Comunmente usado	La misma estructura con ESP

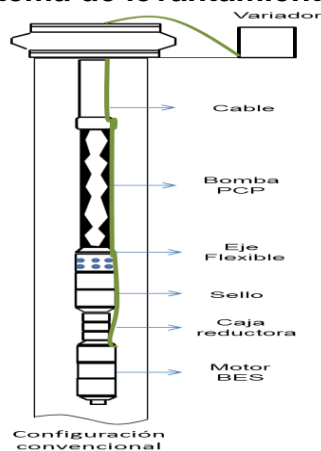
Fuente: Publicación SPE, aplicación de ESPCP en campos costa afuera de China, año 2010.

² Bao Feng, Sanyang Co. Ltd., Weibin Meng, Indonesio Company CNOOC, Anxia Li, Company SINOPEC. Aplicación de bombeo de cavidades progresivas electrosumergible en campos costa afuera de China. Publicación SPE, año 2010; pág. 3

1.1. Componentes del Sistema de Levantamiento ESPCP

³La configuración estructural de ESPCP más utilizada es la convencional, el cual está compuesto en subsuelo por un motor, una caja reductora, un sello, un eje flexible y una bomba PCP; en superficie por una fuente eléctrica, un transformador SDT (Shift Down transformer), un variador de frecuencia, un transformador SUT (shift up transformer), una caja de venteo y el patín, como se observa en la figura 2.

Figura 2. Componentes Sistema de levantamiento ESPCP



Fuente: Publicación SPE, Aplicación de bombeo de cavidades progresivas electrosumergible en pozos horizontales Kulin. Publicación SPE, año 2005.

1.1.1. Componentes Subsuelo

- **Motor eléctrico**

Es un motor estándar ESP de dos polos 60 Hz y 50 Hz, que cumple la función de proveer giro y torque a todo el sistema ESPCP; el motor es un estator bobinado lubricado por aceite, en donde se encuentran rotores y cojinetes ensamblados a lo largo de un eje, como se observa en la figura 3.

³ Bao Feng, Sanyang Co. Ltd., Weibin Meng, Indonesia Company CNOOC, Anxia Li, Company SINOPEC. Aplicación de bombeo de cavidades progresivas electrosumergible en campos costa afuera de China. Publicación SPE, año 2010; pág. 4

Figura 3. Motor eléctrico ESPCP



Fuente: Componentes y aplicaciones sistema ESPCP; Centrilift Baker-Hughes

- **Caja Reductora**

Es un equipo de diseño de doble planetario⁴ “rodamiento”, que cumple dos (2) funciones: reducir la velocidad desarrollada por el motor eléctrico, a una velocidad aceptable en la bomba PCP, el cual puede reducir entre 9 – 11 veces las revoluciones por minuto “rpm” del motor; la otra función es aumentar el torque, necesario para vencer el ajuste de interferencia entre el rotor y estator de la bomba PCP. El diseño interior de la caja reductora se observa en la figura 4.

Figura 4. Caja reductora ESPCP



REDUCCIÓN 9:1

(60 Hz) 3500 rpm Entrada= 389 rpm salida

(50 Hz) 2917 rpm Entrada= 324 rpm salida

REDUCCIÓN 11:5:1

(60 Hz) 3500 rpm Entrada= 304 rpm salida

(50 Hz) 2917 rpm Entrada= 254 rpm salida

Fuente: Componentes y aplicaciones sistema ESPCP; Centrilift Baker-Hughes

- **Sello**

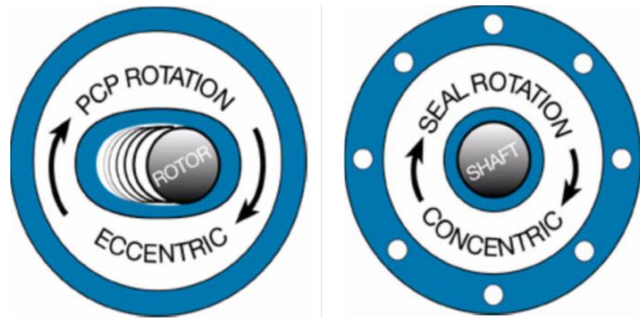
Este componente tiene como objetivos, evitar que los fluidos del pozo y contaminantes entren al motor y caja reductora, permitir la expansión y contracción del aceite dieléctrico del motor y caja reductora a medida que la temperatura y presión cambia, igualar la presión interna del motor y caja reductora con la presión del pozo y recibir la carga de la bomba.

⁴Componentes y aplicaciones sistema ESPCP; Centrilift Baker-Hughes; pág. 12

- **Eje Flexible**

Este componente convierte el movimiento concéntrico del eje a movimiento excéntrico del rotor de la bomba PCP y transfiere la carga del eje a la bomba de cavidades progresivas.

Figura 5. Vista transversal eje flexible

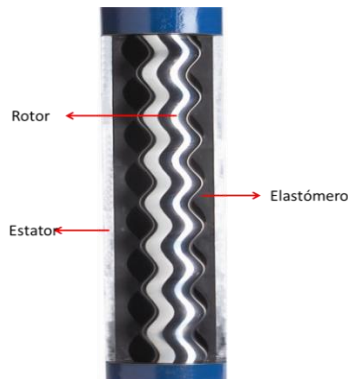


Fuente: Componentes y aplicaciones sistema ESPCP; Centrilift Baker-Hughes

- **Bomba PCP**

La Bomba de cavidades progresivas (PCP), es una hélice (rotor) que gira excéntricamente dentro de un cuerpo en acero (Estator) moldeado en forma de hélice doble, el cual está recubierto internamente por el elastómero, como se observa en la figura 6.

Figura 6. Bomba de cavidades progresivas PCP



Fuente: Componentes y aplicaciones sistema ESPCP; Centrilift Baker-Hughes

Cuando el rotor gira dentro del estator, el fluido se mueve dentro de la bomba, de cavidad en cavidad; cuando una cavidad cierra, la opuesta abre de la misma forma, el resultado será flujo constante no pulsante.

El elastómero, es la parte más delicada, limitada por la temperatura del fondo del pozo y resistencia química a los aromáticos, razón por la cual su correcta determinación permite en gran medida la vida útil de la bomba PCP; está compuesto por un polímero de alto peso molecular, con propiedad de deformarse y recuperarse elásticamente (resiliencia), el cual permite la interferencia entre el rotor y estator, originando la hermeticidad de las cavidades contiguas y por consiguiente la eficiencia de la bomba.

1.1.2. Componentes de superficie

- **Fuente de poder eléctrico**

Tiene como fin alimentar eléctricamente el controlador en superficie, de acuerdo a los KVA (kilo voltios alterno) que requiera el equipo ESPCP; si la fuente es un generador, debe suministrar 480 VAC (voltios de corriente alterna) y si utiliza una línea eléctrica debe disponer de un voltaje de mediana tensión entre 13,2 y 34 KV (kilo voltios).

- **Transformador SDT (Transformador de reducción de voltaje)**

Este componente se utiliza en una línea eléctrica de mediana tensión, su objetivo es reducir el voltaje de la línea a 480 VAC para alimentar el controlador, pero si utiliza un generador, no se requiere este componente, porque directamente suministra el voltaje requerido (480 VAC).

- **Transformador SUT (Transformador de elevación de voltaje)**

Se utiliza para elevar el voltaje de salida del controlador de 480 VAC al voltaje requerido por el motor de fondo, que oscila entre 1100 a 4100 voltios.

- **Caja de venteo**

Permite conectar eléctricamente el cable del equipo de fondo, con el equipo de superficie, su función es ventear cualquier migración de gas proveniente del pozo a través del cable de potencia.

- **Cable de potencia**

Tiene como fin suministrar energía eléctrica al motor de fondo, desde el sistema de control de superficie; el cable puede ser redondo o plano, el redondo tiene mejores propiedades eléctricas, pero en algunos casos por el diámetro del pozo, se debe utilizar el cable plano para conservar la integridad del mismo.

- **VSD (Controlador de velocidad variable)**

Tiene como objetivo controlar la frecuencia del motor de fondo y por consiguiente el caudal del pozo; al igual protege todo el sistema, mediante detección de condiciones cambiantes, como por ejemplo el caudal o presión.

Permite programar alarmas y límites al variador, con el fin de optimizar la producción y condiciones de operación:

1.2. Ventajas y desventajas

Las principales ventajas y desventajas obtenidas con el sistema de levantamiento de cavidades progresivas electrosumergible son:

Ventajas

- El sistema ofrece alta eficiencia volumétrica, permitiendo reducir gastos operacionales por el menor consumo de energía eléctrica.

- Sistema sin varillas, elimina el desgaste mecánico entre la tubería de producción y las varillas, haciéndolo ideal en pozos horizontales y desviados.
- Aumenta la capacidad de torque, a través de la caja reductora, haciendo flexible el uso de motores más pequeños para manejar el sistema ESPCP.
- Sistema de alta eficiencia en manejo de fluidos viscosos y recomendado en la producción de crudo pesado y con alto contenido de sólidos.

Desventajas

- Limitación de temperatura, opera a una máxima Temperatura de 300 grados farehein (°F), con el fin de no afectar el elastómero.
- No se recomienda instalar en pozos altamente profundos, porque la cabeza total dinámica (TDH) está limitada entre 5.500 – 7.500 pies.
- Rango de producción bajo, entre 25 – 5.000 barriles de flujo/día
- Requiere un alto torque en el arranque, mayor al 200 por ciento (%) normal de operación, debido a la interferencia entre el rotor y estator dela bomba.
- limitaciones del elastómero a la presencia de agentes contaminantes del crudo, como aromáticos y gas, los cuales le producen hinchamiento y deterioro.

2. DISEÑO DE BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS ELECTROSUMERGIBLE (ESPCP)

El capítulo describe la metodología que se utilizó en la selección de los pozos para la implementación del sistema de levantamiento de cavidades progresivas electrosumergible (ESPCP) y el procedimiento que se debe llevar a cabo para seleccionar el diseño más óptimo, a través del software autograph-PC, de propiedad de la empresa Baker Hughes, presentando como ejemplo el pozo Guando 079.

2.1. Selección de pozos

La elección de los pozos se realizó mediante la determinación del índice de frecuencia de falla (IFF), el cual en el periodo 2011-2012, para el pozo Guando 21 fue de 3,6 y del pozo Guando 79 fue de 4,8; valores muy superiores al promedio del campo Guando, determinado en 0,5. El Índice de frecuencia de falla es definido por la siguiente relación:

$$IFF = \frac{N^{\circ} \text{ TOTAL DE FALLAS}}{\text{TIEMPO TOTAL ACTIVO}}$$

Tabla 2. Determinación de índice de frecuencia de falla Pozo Guando 21.

FALLA	CANTIDAD		DIAS INACTIVOS	
	AÑO 2011	AÑO 2012	AÑO 2011	AÑO 2012
ROTURA DE VARILLA	1	1	15	
FALLA MOTOR	1	1	2	
DAÑO INTEGRIDAD TUBING	1	1	5	5
FALLA VSD	1		1	
TOTAL	4	3	23	5

AÑO	DIAS ACTIVOS	DIAS ACTIVOS/DIAS TOTALES	TOTAL FALLAS	IFF
2011	342	0,936986301	7	3,6
2012	360	0,98630137		
TOTAL		1,923287671		

Fuente: Autor

Tabla 3. Determinación de índice de frecuencia de falla Pozo Guando 79

FALLA	CANTIDAD		DIAS INACTIVOS	
	AÑO 2011	AÑO 2012	AÑO 2011	AÑO 2012
ROTURA DE VARILLA	5	1	17	4
FALLA MOTOR	0	1	0	1
DAÑO INTEGRIDAD TUBING	1	0	10	1
ROTOR PARTIDO	0	1	0	12
TOTAL	6	3	27	18

AÑO	DIAS ACTIVOS	DIAS ACTIVOS/DIAS TOTALES	TOTAL FALLAS	IFF
2011	338	0,926027397	9	4,80
2012	347	0,950684932		
TOTAL		1,876712329		

Fuente: Autor

2.2. Diseño

Para el diseño del sistema ESPCP, el software autograph PC, establece nueve (9) pasos, que a continuación se describe para el pozo Guando 079.

Figura 7. Entrada Software Autograph PC



Fuente: Manual de operación software autograph-PC; Baker Hughes.

2.2.1. Datos de entrada.

Consiste en recolectar información actualizada y confiable del yacimiento, estado mecánico del pozo, propiedades de los fluidos y posibles problemas de temperatura, abrasión, corrosión y gas; los datos de entrada constituyen la base principal para seleccionar el diseño apropiado. La información recolectada e ingresada en el software autograph-PC se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. Datos de entrada Pozo Guando 079

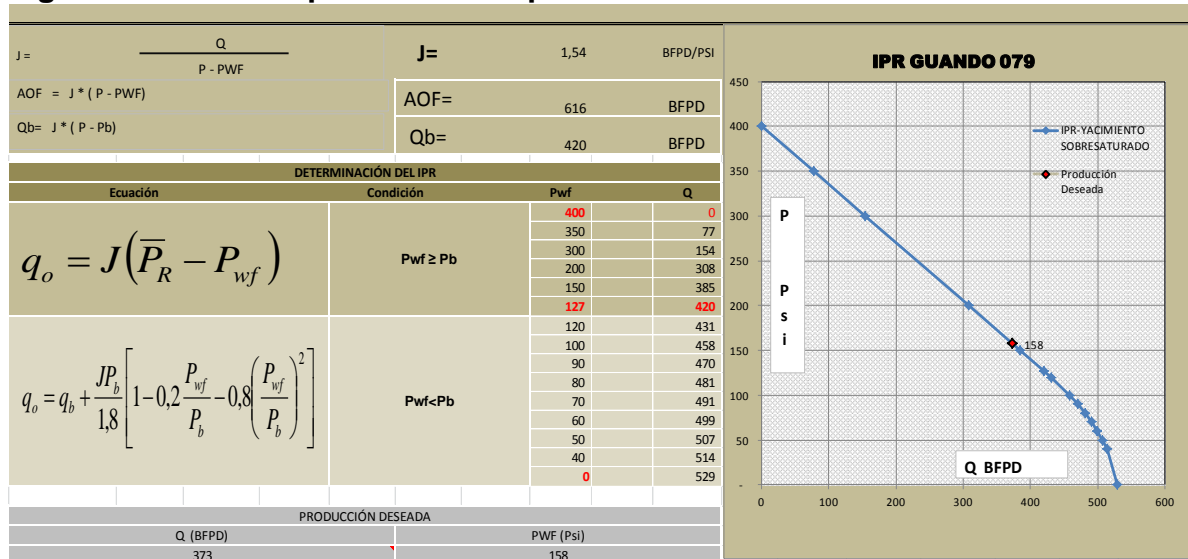
DATOS DE ENTRADA											
DATOS DE YACIMIENTO											
PRESIÓN ESTÁTICA DEL YACIMIENTO										400	psi
PROFUNDIDAD DE LAS PERFORACIONES										3.323	ft
PRESIÓN DE BURBUJA										127	psi
DATOS DEL POZO											
CASING 7 K-55										7	in
TUBERÍA EUE 9,3 # N-80										3 1/2	in
PRESIÓN EN CABEZA DE POZO- WHP										80	psi
PRESIÓN EN CASING DE POZO- CHP										5	psi
TEMPERATURA FONDO POZO- BHT										105	°F
TEMPERATURA FLUIDO EN SUPERFICI-WHT										80	°F
PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS											
BSW										89	%
γ _w										1	
°API										27	
γ _o										0,89	
γ _g										0,10	
GOR SCF/STB										47	
Z										0,85	
CASING & TUBING											
Casing ID (in)	6094	6094	6094	6094	6094	6094	6094	6094	6094	6094	6094
Tubing ID (in)	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992
TVD (ft)	409	901	1.154	1.566	1.973	2.305	2.897	3.026	3.280	3.496	3.621
MD (ft)	410	908	1.171	1.612	2.047	2.402	3.014	3.147	3.411	3.633	3.763
POSIBLES PROBLEMAS											
	Favorable	Normal	Alto	Severo	Extremo						
Temperatura											
Abrasión											
Corrosión											
Gas											

Fuente: Petrobras de Colombia-Campo Guando

2.2.2. Determinación capacidad de producción.

El siguiente paso consiste en determinar productividad del pozo, el cual permite predecir el comportamiento de la producción del pozo, determinar la producción deseada y asentamiento de la bomba; con el fin de no valerse solamente del software autograph-PC, se desarrolló una hoja de cálculo en Excel, para graficar el comportamiento del índice de productividad compuesto (IPR).

Figura 8. Índice de productividad pozo Guando 079



Fuente: Autor

Para la realización de la gráfica, el Departamento de Producción del Campo Guando, proporcionó para el pozo Guando 079, el índice de productividad (J) de 1,54 BFPD/psi y una producción deseada de 373 BFPD; se obtuvo como resultado un caudal máximo de 616 BFPD, un caudal de 420 BFPD a la presión de burbuja y una presión de flujo de la formación (Pwf) de 158 psi.

2.2.3. Determinación de entrada de gas.

La cantidad de gas libre que entra en la bomba, constituye un factor importante, debido a que un gran volumen de gas bloquea la bomba, por diseño el volumen de gas libre que debe entrar a la bomba no debe ser mayor al 15% del volumen total del fluido. A continuación se presenta el cálculo del gas libre:

Gas en solución - Rs

$$R_s = \gamma_g \left(\frac{pb}{18} * \frac{10^{0,0125*API}}{10^{0,00091*T}} \right)^{1,2048} \quad 2,06 \text{ pc/bls} \quad \text{EC. 1}$$

Dónde:

R_s = Relación gas/petróleo en solución, pc / bls

γ_g = Gravedad específica del gas

PB = Presión de burbuja, psi

°API = Gravedad específica del petróleo

°T = Temperatura de fondo °F (Fahrenheit)

Factor volumétrico de gas - Bg

$$B_g = 5,04 \left(\frac{ZT}{P} \right) \quad 18,62 \text{ bls/kpc} \quad \text{EC.2}$$

Donde:

B_g = Factor de gas, bls/kpc

Z = Factor de compresibilidad del gas

T = Temperatura de fondo, °R (Rankine)

P = Presión de entrada en la bomba, psi

$$PIP = P_{wf} - \left[\frac{(\text{Profund. Intervalos} - \text{Profund. Bomba}) * SGL}{2,31 \text{ ft/Psi}} \right] \quad 115,31 \text{ psi} \quad \text{EC. 3}$$

Dónde:

PIP = Presión de entrada en la bomba, psi

PWF = Presión del pozo fluyendo, psi

Profundidad de los intervalos = ft

Profundidad de la bomba = ft

SGL = Gravedad específica de la mezcla líquida

Factor volumétrico del petróleo - Bo

$$F = R_s \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_o} \right)^{0,5} + 1,25 * ^\circ T \quad 131,94 \quad \text{EC.4}$$

$$Bo = 0,972 + (0,000147 * F^{1,172}) \quad 1,02 \text{ BY / STB} \quad \text{EC. 5}$$

Dónde:

Bo = Barriles de yacimiento/Barriles a condiciones estandar

Rs = Relación gas/petróleo en solución, pc / bls

γo = Gravedad específica del petróleo

γg = Gravedad específica del gas

T = Temperatura de fondo, °F (Farehein)

Calculo de porcentaje gas libre

$$\text{Gas total} = \frac{\text{GOR} * \text{BOPD}}{1,000} \quad 1,9 \text{ kpcd} \quad \text{EC.6}$$

$$\text{Gas en solución} = \frac{\text{Rs} * \text{BOPD}}{1,000} \quad 0,08 \text{ kpcd} \quad \text{EC.7}$$

Dónde:

GOR = Relación gas/petróleo, scf/stb

Rs = Relación gas/petróleo en solución, pc/bls

$$\text{Gas libre} = \text{Gas total} - \text{Gas en solución} \quad 1,84 \text{ kpcd} \quad \text{EC.8}$$

$$Q_o = B_o * B_{FPD} * (1 - \text{BSW}/100) \quad 41,72 \text{ bls} \quad \text{EC.9}$$

$$Q_g = B_g * \text{Gas Libre} \quad 34,33 \text{ bls} \quad \text{EC.10}$$

$$Q_w = \text{BFPD} * \text{BSW} \quad 331,97 \text{ bls} \quad \text{EC.11}$$

|

$$Q_t = Q_o + Q_w + Q_g \quad 408,02 \text{ bls} \quad \text{EC.12}$$

$$\% \text{ Gas libre} = Q_g / Q \text{ total} \quad 8,41 \% \quad \text{EC.13}$$

Dónde:

Q_o = Caudal de petróleo, bls/día

Q_g = Caudal de gas diario kpc/día

Q_w = Caudal de agua, bls/día

Q_t = Caudal total, bls/día

BSW = Cantidad de agua en el crudo, %

BFPD = Barriles de flujo por día, bls/día

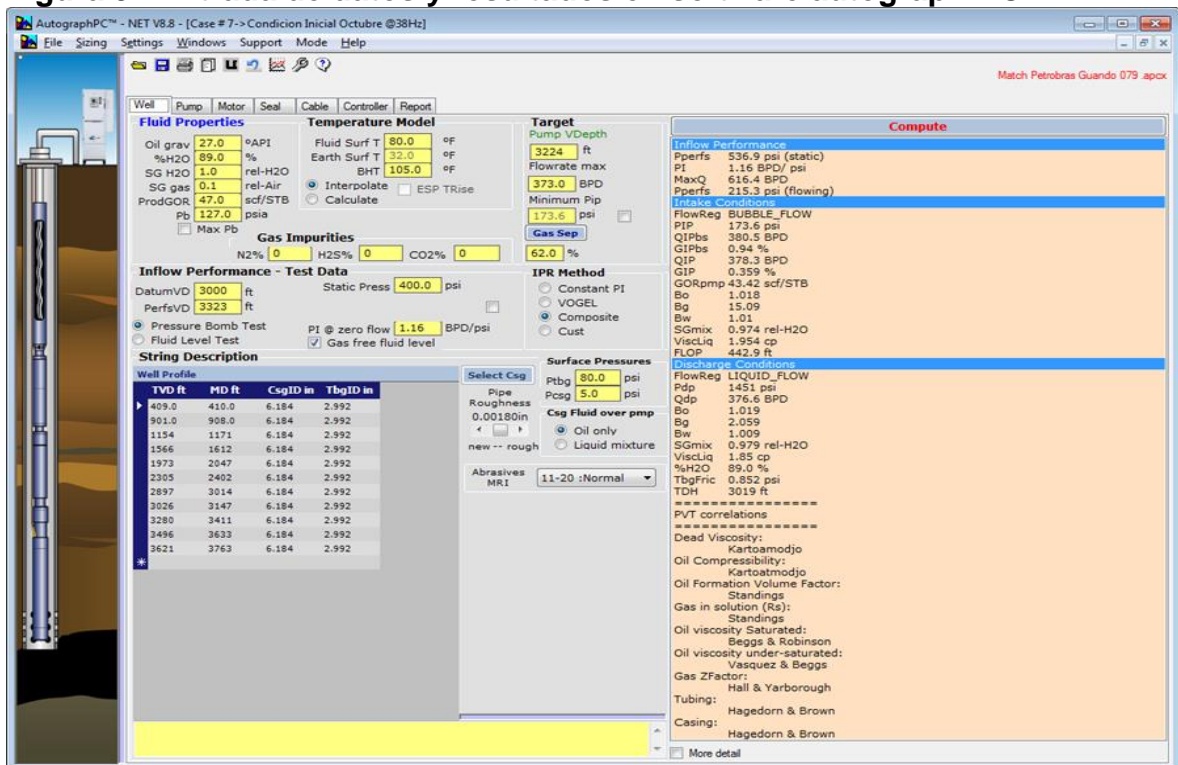
De acuerdo al resultado de porcentaje (%) de gas libre que entra a la bomba, no es un problema para el diseño del pozo Guando 079, ya que es inferior al 15 %.

2.2.4. Determinación de Cabeza total dinámica – TDH

El cálculo de la cabeza total dinámica, constituye el punto de partida en la determinación de los equipos de subsuelo del sistema de levantamiento ESPCP.

$\text{level fluid} = h_{\text{perf}} - P_{wf} / (0,433 \times \gamma_w)$	h=	2.959	ft
$\text{Depth pump} = h_{\text{perf}} - 43 / (0,433 \times \gamma_w)$	deph pump=	3.224	ft
$F = 2,083 \times \left(\frac{100}{94}\right)^{1,85} \times \left(\frac{Q}{34,3}\right)^{1,85} \times \left(\frac{1}{ID}\right)^{4,8655}$	Fricción=	8,00	ft/1000
$\Delta P_{\text{fricción}} = 0,433 \times \text{Depth Pump} \times \text{Fricción} / 1000$	$\Delta P_{\text{fricción}}=$	11	psi
$\Delta P_h = \text{Depth Pump} \times 0,433 \times (\gamma_w \times \text{BSW} + \gamma_o \times (1-\text{BSW}))$	$\Delta P_h=$	1.379	psi
$\Delta P_{\text{ha}} = (\text{Depth Pump} - \text{level fluid}) \times 0,433 \times (\gamma_w \times \text{BSW} + \gamma_o \times (1-\text{BSW}))$	$\Delta P_h=$	113	psi
$\Delta P_h = \text{level fluid} \times 0,433 \times \gamma_g$	$\Delta P_{fg}=$	45	psi
WHP=	WHP=	80	psi
CHP=	CHP=	5	Psi
$\text{TDH} = \text{WHP} + \Delta P_{\text{fricción}} + \Delta P_h - (\text{CHP} + \Delta P_{fg} + \Delta P_{\text{ha}}) / 0,433$	TDH=	3.019	ft

Figura 9. Entrada de datos y resultados en software autograph-PC



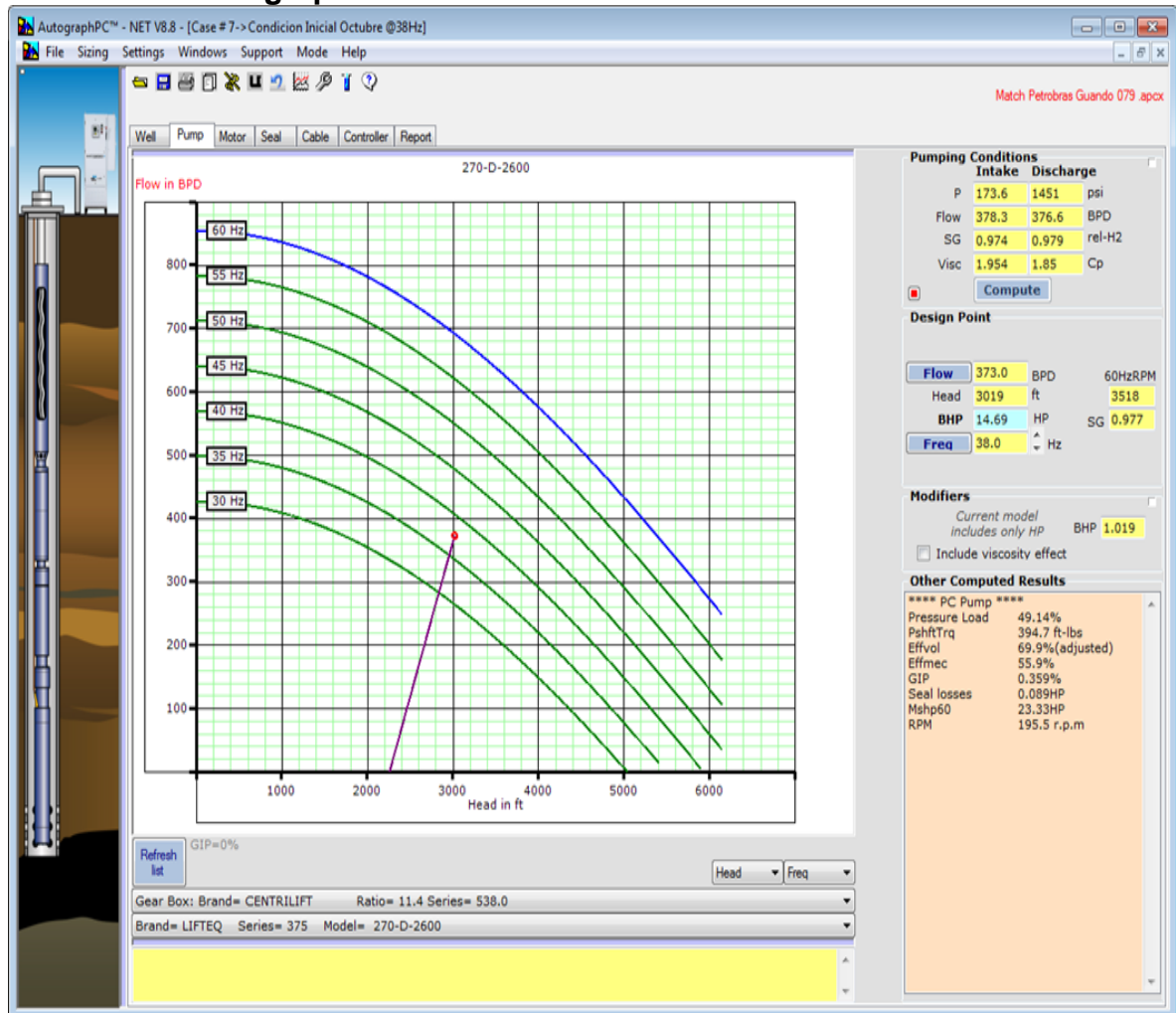
Fuente: Manual de operación software autograph-PC; Baker Hughes.

2.2.5. Selección de la Bomba y la caja reductora

Teniendo en cuenta el diámetro del revestimiento de producción, los resultados de la ventana de entrada y resultados del pozo en el software autograph (caudal deseado y la cabeza total dinámica-TDH), se seleccionó la bomba Serie 375 Modelo 270-D-2600 y la caja reductora serie 538 de reducción 11:4:1.

La selección, está supeditada al inventario que tenga a disposición la empresa, si existe más de una opción, se elige la bomba que tenga una alta eficiencia volumétrica y menor carga de presión.

Figura 10. Vista de selección de la bomba y la caja reductora en software autograph-PC



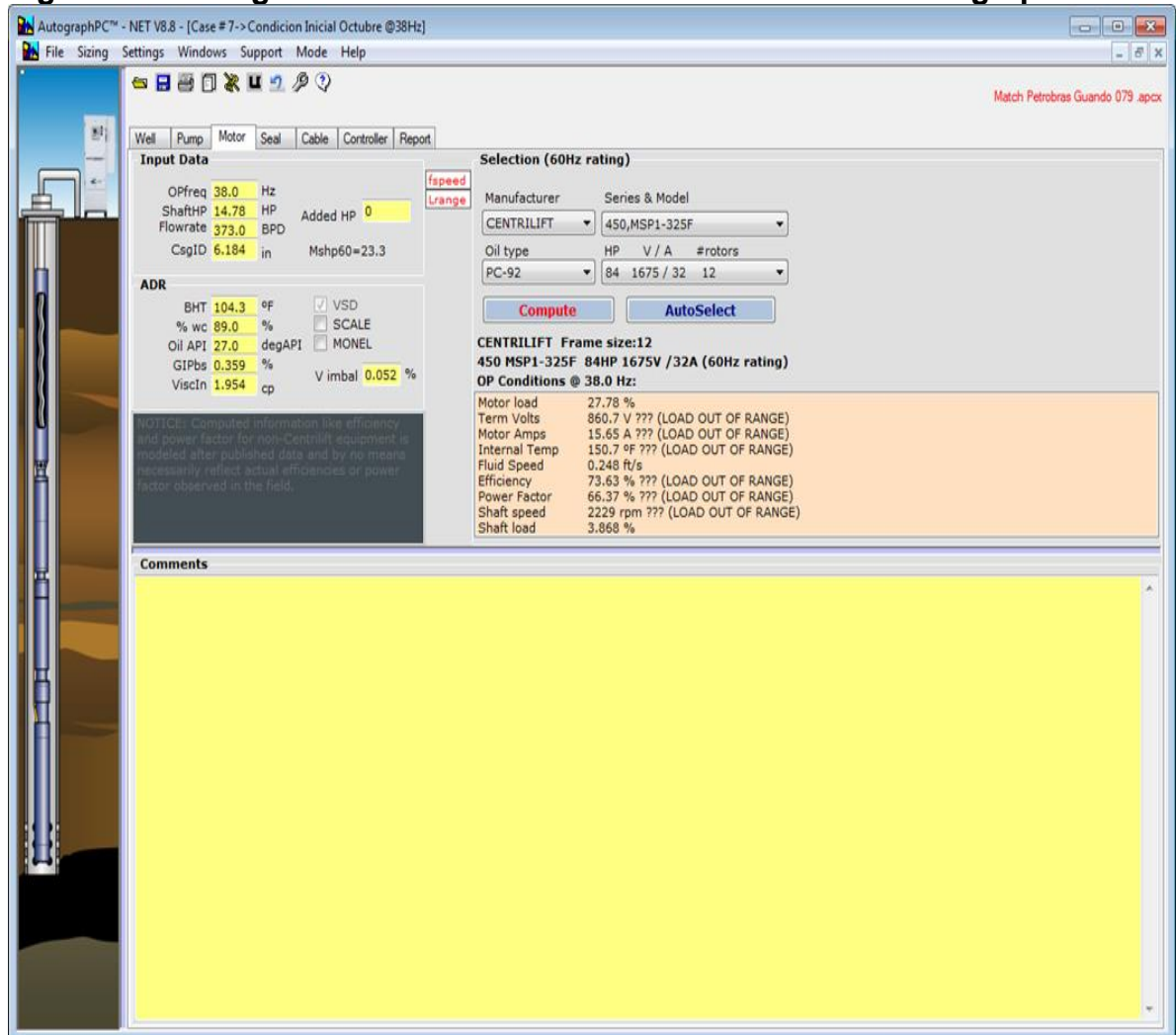
Fuente: Manual de operación software autograph-PC; Baker Hughes.

2.2.6. Selección de Motor

La selección del motor se realiza teniendo en cuenta el diámetro del revestimiento de producción, la potencia requerida en la selección de la bomba; el tamaño debe ser del mismo diámetro o mayor que la caja reductora y deberá tener una carga entre 25 – 40 %; en el pozo Guando 079, se seleccionó el motor de Serie 450 Modelo MSP1-325F.

Si existe otra opción, se elige el motor que presente una mayor eficiencia y menor carga, siempre y cuando se encuentre en el límite establecido.

Figura 11. Vista general de selección de motor en software Autograph-PC



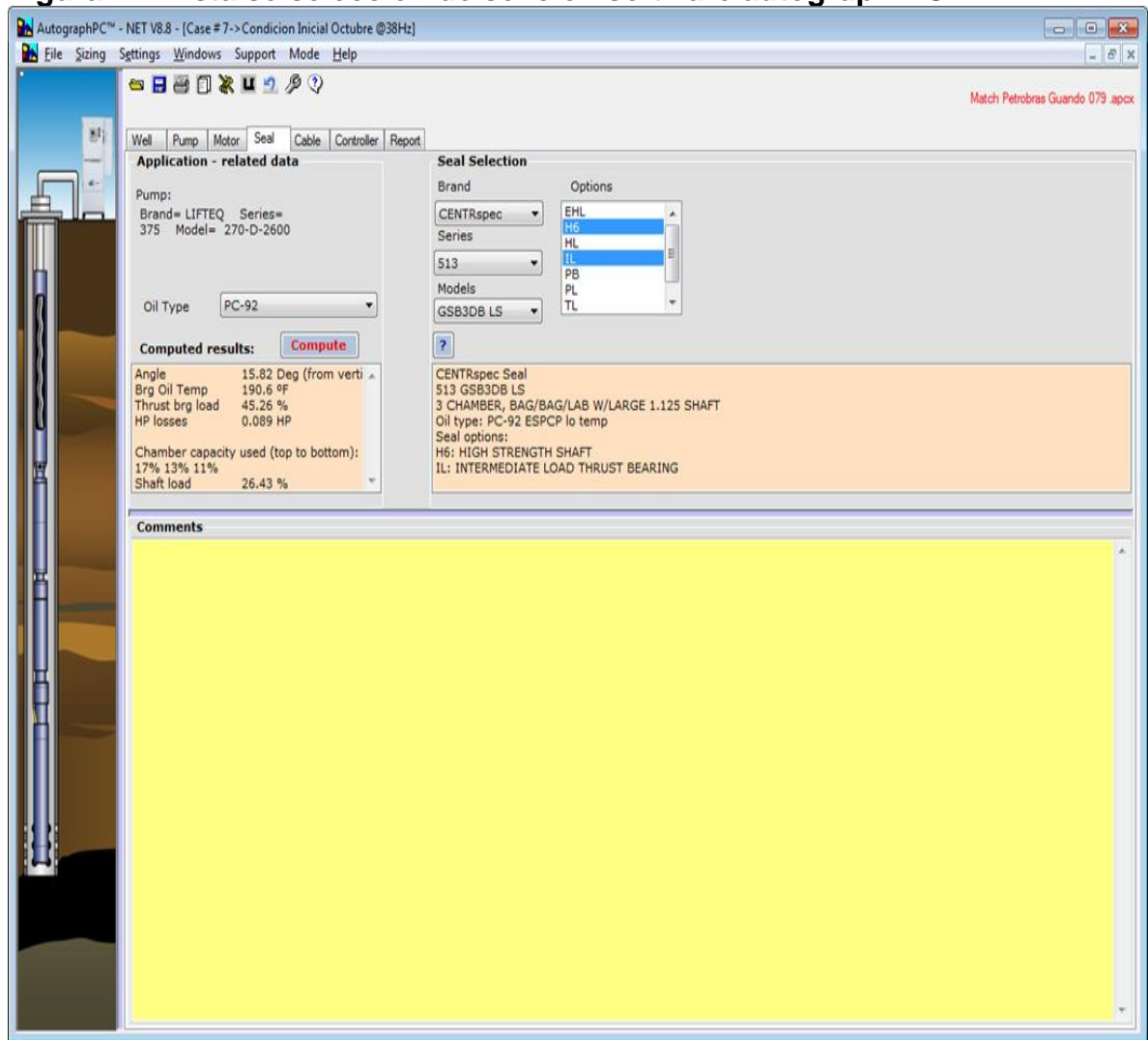
Fuente: Manual de operación software autograph-PC; Baker Hughes.

2.2.7. Selección del Sello

La Selección del sello, se realiza teniendo en cuenta la misma dimensión de la caja reductora, que contenga tres (3) cámaras y dos (2) bolsas, con el fin de evitar la contaminación del sello, por la diferencia de densidades que se genera entre los fluidos del pozo y aceite de lubricación. En el software seleccionan el Sello de serie 513 Modelo GSB3DB LS.

Si existe más de una opción, se seleccionará el sello que presente una menor carga en el cojinete o rodamiento y menor carga en el eje.

Figura 12. Vista de selección de sello en software autograph-PC



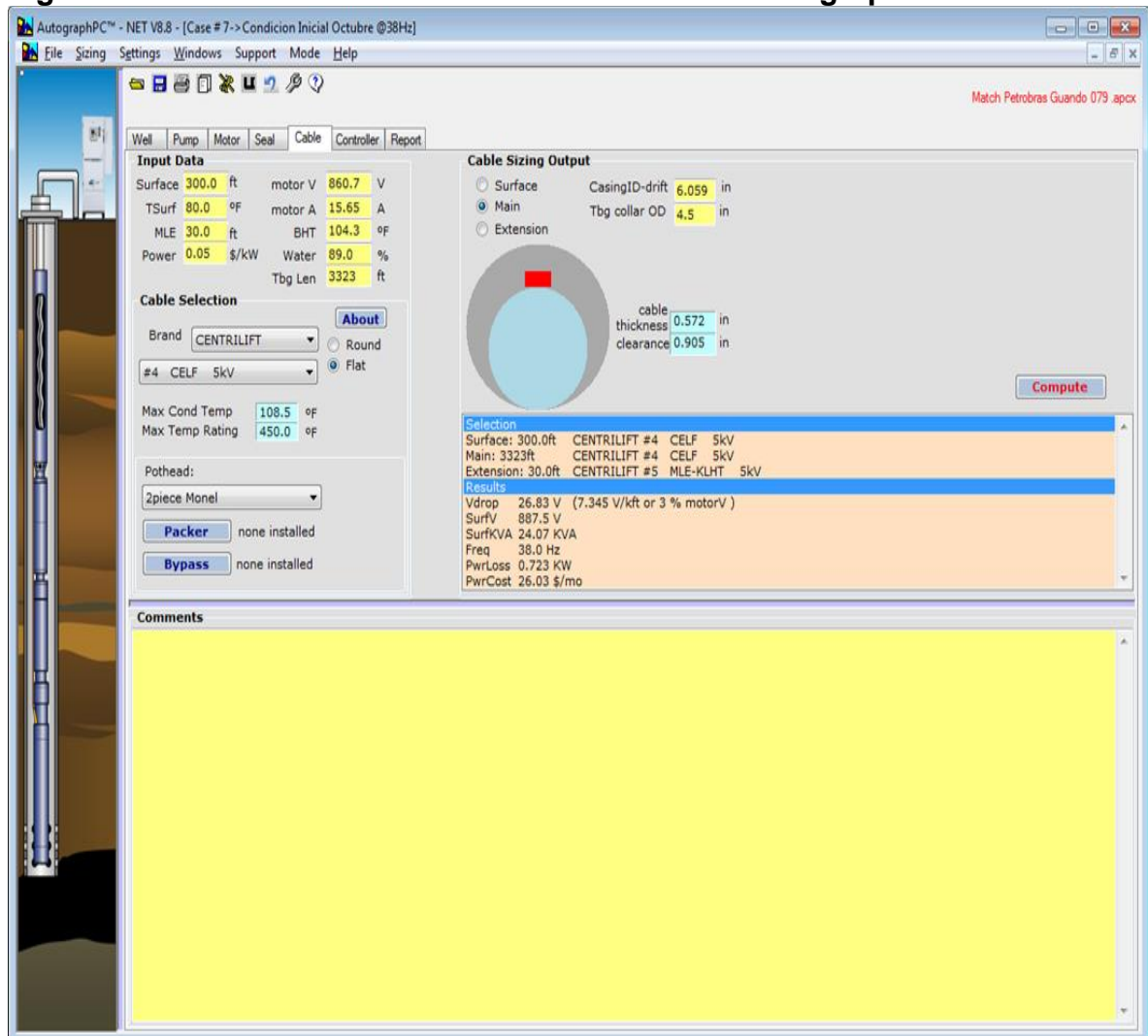
Fuente: Manual de operación software autograph-PC; Baker Hughes.

2.2.8. Selección del cable

El cable puede ser plano o redondo, se identifican por números y entre menor sea, mayor será su diámetro; la selección del tipo y tamaño depende del espacio disponible entre la tubería de producción, collares y revestimiento de producción.

Principalmente la selección se basa en las condiciones del fluido y temperatura de operación; el cable seleccionado deberá tener una caída de voltaje menor de 30 volts/1000 pies; para el pozo Guando 079 seleccionan el cable # 4 CELF 5KV.

Figura 13. Vista de selección de cable en software autograph-PC



Fuente: Manual de operación software autograph-PC; Baker Hughes.

2.2.9 Selección del Controlador

El controlador se selecciona de acuerdo al voltaje y potencia necesario para la operación de todo el sistema ESPCP; seleccionan el VSD 2250-VT 250 KVA/480/313A.

Figura 14. Vista de selección de controlador en software autograph-PC

The screenshot displays the AutographPC software interface for controller selection. The window title is "AutographPC™ - NET V8.8 - [Case #7->Condicion Inicial Octubre @38Hz]". The menu bar includes File, Sizing, Settings, Windows, Support, Mode, and Help. The main interface is divided into several sections:

- Input Data:** Shows Vin 480.0 V, Vsurf 887.5 V, MAmps 15.65 A, PwrCost 0.05 \$/KWH, Vout 334.8 V, Freq 38.0 Hz, strtfreq 10.0 Hz, and Vboost 0 V.
- Controller Selection:** Includes radio buttons for VSD (selected) and SWBD, checkboxes for PWM and Filter, a V rating of 480.0, and a Brand dropdown set to CENTRILIFT. A table lists selected models: Model 2250-VT, KVA 260.0, and Amps 313.0. An AutoSelect button is present.
- Transformer:** A diagram shows a transformer with a primary of 480V and a secondary of 334.8V. A table lists two transformer options: KVA 260.0 and Z (%) 5.0. An SU ratio button is also shown.
- Controller Sizing Output:** A "Compute" button is at the top. The output lists:
 - Selected equipment:** CENTRILIFT 480.0V Variable Speed Drive, Model 2250-VT 260.0 KVA / 313.0 A.
 - Operating Conditions:** StepUp Trafo ratio 2.651, Surface KVA 24.07, Surface KW 16.21, Output Current 41.5 A, Output Voltage 334.8 V (required V/Hz 8.81V/Hz or 528.6 'Volts at 60Hz' drive setting), Cntr KVA Load 9.256 %, Cntr Amps Load 13.26 %, Controller In 26.49 KVA, System Power 16.63 KW, Sys Power Cost 598.6\$/mo.
 - Motor Startup conditions:** Startup volts 176.5 V, Startup Amps 47.94 A.
- Comments:** A large yellow text area at the bottom.

Fuente: Manual de operación software autograph-PC; Baker Hughes.

3. EVALUACIÓN TÉCNICO – ECONÓMICA SISTEMA ESPCP PILOTO CAMPO GUANDO

3.1. Evaluación técnica

A continuación se presenta el comportamiento de la producción y fallas ocurridas en los pozos seleccionados para la implementación del sistema ESPCP, en el periodo comprendido de Noviembre del 2012 y Junio del 2013.

3.1.1. Información general de los pozos Guando 021 y Guando 079

Los pozos seleccionados, se encuentra ubicados en el Municipio de Melgar, Departamento del Tolima y adscrito al contrato de asociación Boquerón. En la tabla 5, se presenta la información general más relevante de los pozos.

Tabla 5. Información general de los pozos Guando 021 y Guando 079

POZO	GUANDO 021	GUANDO 079
Clasificación Lahee	Desarrollo	Desarrollo
Estado final	Productor	Productor
Fecha de inicio de perforación	18 Junio del 2002	14 septiembre del 2004
Fecha de terminación de perforación	20 Julio del 2002	16 Febrero del 2005
Formación	Guadalupe	Guadalupe
Profundidad Total (MD)	3.213 ft	3.823 ft
Profundidad Total (TVD)	3.176 ft	3.680 ft
Formación productora	Guadalupe	Guadalupe
Intervalos cañoneados	2932-2950; 2720-2792; 2658-2710	3450-3460;3380-3400;3260-3280
	2522-2542;2334-2374; 2250-2270	3150-3170;3070-3090;2960-2980
		2385-2400;2350-2370;2285-2295
Estado actual	En producción	En producción

Fuente: Autor

A corte del mes de junio del 2013, mes en que se evaluó el sistema de levantamiento, los pozos tenían las siguientes producciones de aceite, agua y gas:

Tabla 6. Producción pozos Guando 021 y Guando 079

ITEM	NOV DEL 2012		JUNIO DEL 2013		TOTAL PRODUCCIÓN PERIODO	
	GUANDO 021	GUANDO 079	GUANDO 021	GUANDO 079	GUANDO 021	GUANDO 079
ACEITE ACUMULADO, BBL	2.759.279	504.669	2.820.965	526.857	61.686	22.188
AGUA ACUMULADA, BBL	993.915	685.455	1.148.038	762.736	154.123	77.281
GAS ACUMULADO, KPC	309.070	219.466	311.642	236.907	2.572	17.441
BFPD	1.143	456	974	393	1.018	469
BOPD	319	80	262	52	291	105
BWPD	824	376	712	341	727	365
KPCD	21	110	22	69	12	82
BSW	72	83	73	87	71	78
°API	28	28	28	28	28	28

Fuente: Autor

3.1.2. Evaluación pozo Guando 021

El cambio de sistema de levantamiento a bombeo de cavidades progresivas electrosumergible, se realizó entre el 20 y 24 de Noviembre del 2012 e inició con una frecuencia de 54 Hertz, sin embargo no se logró llegar a la frecuencia de diseño de 59,7 Hertz, debido a una serie de fallas del sistema de levantamiento que a continuación se relacionan en la tabla 7.

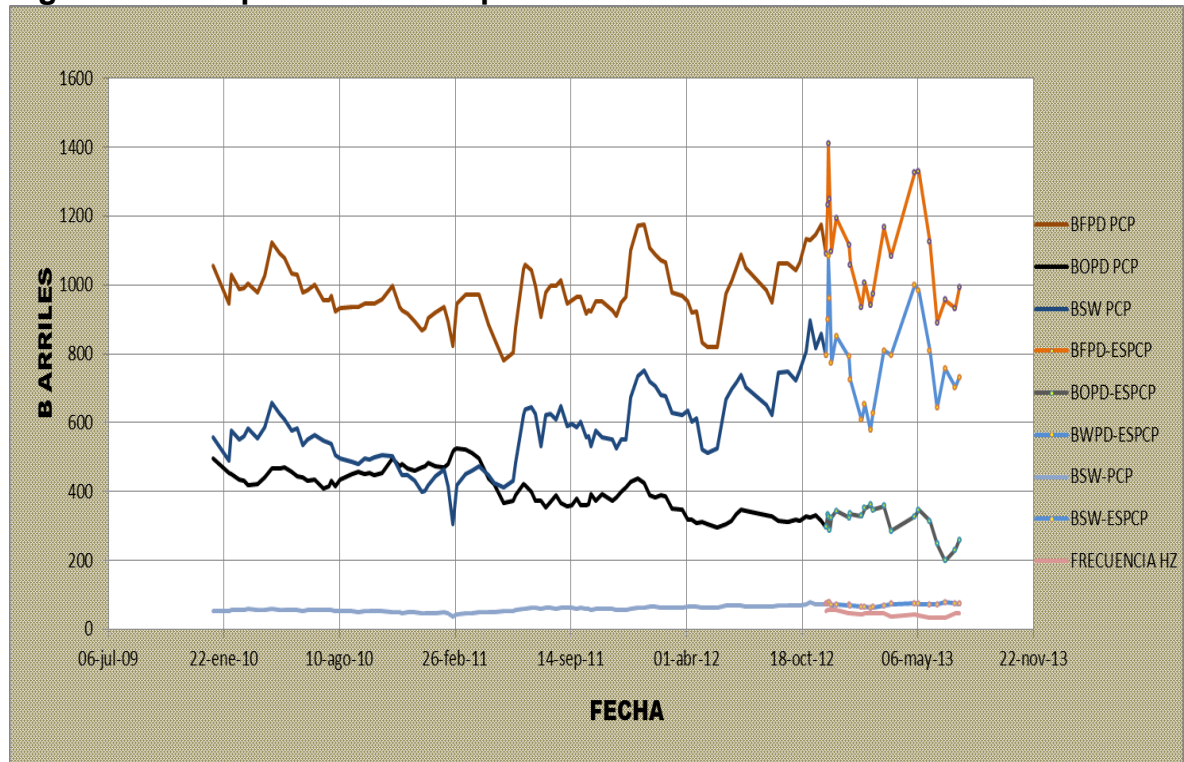
Tabla 7. Descripción de fallas presentadas pozo Guando 021

FECHA DE PARADA	FALLA	DESCRIPCIÓN	DIAS	PRODUCCIÓN DIFERIDA (bis)
18 - 24 Enero/2013	Bomba	Shut down motor, intento arrancar en varias ocasiones sin éxito, realizaron servicio de W/O, cambiando todo el sistema ESPCP	7	2.317
03 de Febrero del 2013	VSD	Shut down motor, por falla controlador VSD	1	347
05 - 06 de Abril del 2013	Bomba	Fuera de servicio por bajo torque en bomba	2	554
27 de Abril del 2013	Bomba	Fuera de servicio por bajo torque en bomba	1	277
30 de Abril del 2013	Bomba	Fuera de servicio por bajo torque en bomba	1	277
02 de Mayo del 2013	Bomba	Fuera de servicio por bajo torque en bomba	1	334
20 - 30 de Junio del 2013	Bomba	Fuera de servicio por bajo torque en bomba; deciden cambiar sistema a BES	11	2.882
TOTAL PRODUCCIÓN DIFERIDA			24	6.988

Fuente: Autor

El pozo operó hasta el día 23 de junio del 2013, con el sistema de bombeo de cavidades progresivas ESPCP, fecha en el cual quedó inactivo y en espera equipo de servicio de pozo; finalmente el Departamento de Producción, decidió cambiar el sistema de levantamiento, reactivando el pozo el 03 de Agosto del 2013 en bombeo electrosumergible (BES).

Figura 15. Comportamiento de producción Pozo Guando 021.



Fuente: Autor

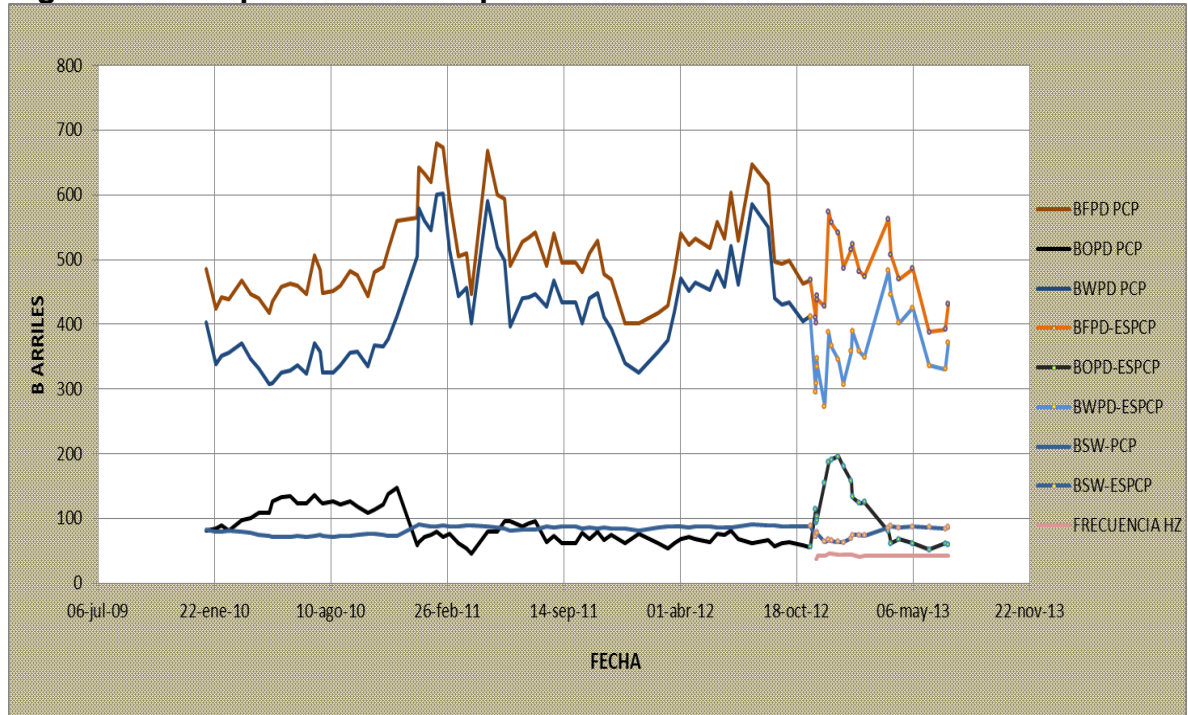
Durante el periodo de evaluación, la producción del pozo fue variable, debido a que no se logró estabilizar la frecuencia del motor de fondo del pozo, causado por las fallas descritas en la tabla 7.

3.1.3. Evaluación pozo Guando 079

El cambio de sistema de levantamiento a bombeo de cavidades progresivas electrosumergible ESPCP, se realizó entre el 13 y 19 de Noviembre del 2012, iniciando con la frecuencia de diseño de 38 Hertz y estabilizándose al final del periodo de evaluación en 42 Hertz.

En el periodo evaluado, el sistema de levantamiento ESPCP, no presento fallas; obteniendo a fecha de 30 de Junio del 2013, 223 días sin fallas.

Figura 16. Comportamiento de producción Guando 079



Fuente: Autor

El pozo con el nuevo sistema de levantamiento, en los dos (2) primeros meses (noviembre y diciembre) del año 2012, aumento el potencial de producción, debido a la reducción del corte de agua (BSW) e incremento de la frecuencia hasta 45 Hertz; sin embargo la producción comenzó a declinar a partir de Enero del 2013, por aumento del corte de agua (BSW), lo cual hizo a que se redujera la frecuencia a 42 Hertz.

3.2. Evaluación económica

En la evaluación económica de un proyecto, intervienen varias variables como son: el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR), el tiempo de repago (Payback) y la relación Costo-Beneficio (RCB); para el piloto desarrollado en el Campo Guando, se evaluó individualmente para cada pozo.

En la evaluación económica de cada pozo, se asumió las siguientes premisas:

Proyección con Sistema ESPCP (3 años):

- 0 varilleos / año
- 1 servicio de pozo (workover) en 3 años
- 4 días / servicio de pozo (workover)
- 5 días / Cambio a ESP
- Inversión Inicial: KUS \$320 CAPEX - Este costo contempla el equipo ESPCP de fondo y superficie
- Inversión Inicial: KUS \$170 OPEX
- KUS \$300/servicio de reparación(workover)

3.2.1. Valor presente neto (VPN) Pozo Guando 021.

La inversión que se realiza para reemplazar el sistema de levantamiento PCP por ESPCP es de 490 KUS dólares y los ingresos corresponden a la producción de crudo, obtenida entre noviembre del 2012 hasta el mes Junio del 20, periodo que opero el pozo con el sistema de bombeo ESPCP. El VPN, se determina con una tasa de riesgo de 12,5 % (tasa de interés aplicada por Petrobras) y un DTF (tasa de interés de captación) de 4.05% efectivo anual (EA). El flujo de caja se presenta en la figura 17.

$$i = ((1+DTF) * (1+0,125)) - 1$$

$$i = (1,0405 * 1,125) - 1$$

$$i = 17,05 \% \text{ E.A}$$

$$\begin{aligned} \text{VPN} &= \sum (V / (1 + i)^n) - V_0 \\ \text{VPN} &= 2.093 / (1 + 0,1705)^1 - 490 \text{ KUS} \\ \text{VPN} &= 1.298 \text{ KUSD\$} \end{aligned}$$

Dónde:

i = Interés efectivo anual (EA)

DTF= Tasa de interés de captación

VPN = Valor presente neto, KUSD\$

V = Ingresos, KUSD\$

Vo = Egresos, KUSD\$

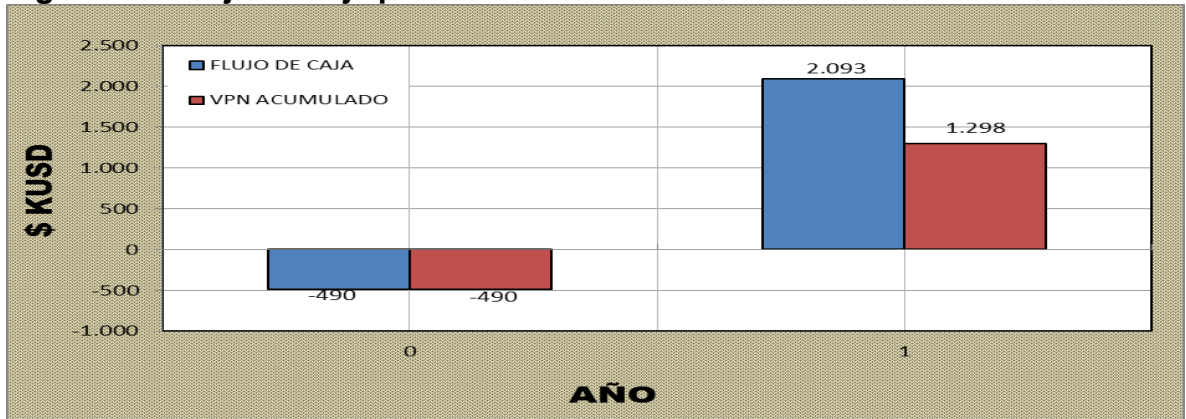
n = Período

Tabla 8. Flujo de caja pozo Guando 021

FLUJO DE CAJA		AÑO		0	1
IMPUESTO DE RENTA 33%					
WACC 17,05%					
INGRESOS					
Producción Total	BLS/AÑO				63.317
Porcentaje de regalías	%				5,03
Regalía	BLS				3.187
Producción neta	BBL/AÑO				60.130
Precio venta	USD\$/BL				76,16
TOTAL INGRESOS	KUSD\$			-	4.579
EGRESOS					
Costos de levantamiento barril	USD\$/BL				9,61
Costos de levantamiento anual	KUSD\$				608
Costo producción diferida	KUSD\$				452
TOTAL EGRESOS	KUSD\$				1.061
MARGEN OPERATIVO	KUSD\$				3.519
DEDUCCIONES					
Amortizaciones y Depreciaciones	KUSD\$				106,7
Otras Deducciones	KUSD\$				0
TOTAL DEDUCCIONES	KUSD\$				106,7
IMPUESTOS					
Base gravable	KUSD\$				3.412
IMPUESTO DE RENTA	KUSD\$				1.126
ÚTILIDAD DESPUÉS DE IMPUESTOS	KUSD\$			0	2.286
INVERSIÓN					
Inversión Inicial Capex	KUSD\$		320		0
Inversión Inicial Opex	KUSD\$		170		300
TOTAL INVERSIÓN	KUSD\$		490		300
FLUJO DE CAJA LIBRE					
Flujo de caja acumulado	KUSD\$			-490	2.093
VPN ACUMULADO	KUSD\$			-490	1.298
VPN	KUSD\$				1.298
TIR	%				327,1%

Fuente: Autor

Figura 17. Flujo de caja pozo Guando 021



Fuente: Autor

3.2.2. TIR – Tasa interna de retorno pozo Guando 021

Es la tasa de interés producida por el proyecto de inversión, para el pozo Guando 021 es de 327,1 %; se determinó cuando el VPN es igual a cero (0).

$$0 = \sum (V / (1 + TIR)^n) - V_0$$

Donde:

TIR = Tasa interna de retorno, %

V = Ingresos, KUSD\$

V₀ = Egresos, KUSD\$

n = Período

$$0 = 2.093 / (1 + TIR)^1 - 490 \text{ KUSD\$}$$

Realizando iteración:

$$TIR = 327,1 \%$$

3.2.3. Tiempo de repago pozo Guando 021

Consiste en establecer en cuánto tiempo se recupera la inversión, para el pozo Guando 021 que es de 490 KUSD\$, el tiempo de repago del cambio de sistema artificial ESPCP del pozo, de acuerdo con el flujo de caja se recupera en el siguiente año (2013).

3.2.4. Relación beneficio – costo pozo Guando 021

Es la relación que existe entre los egresos y los ingresos, al tener un valor mayor de 1, significa que el proyecto es viable.

$$\text{Relación beneficio/costo} = 2.093 \text{ KUSD\$} / 490 \text{ KUSD\$}$$

$$\text{Relación beneficio/costo} = 4,27$$

El valor significa que la inversión se recupera cuatro (4) veces en el periodo evaluado, correspondiente a 8 meses.

3.2.5. Valor presente neto (VPN) pozo Guando 079.

La inversión que se realiza para reemplazar el sistema de levantamiento PCP por ESPCP es de 490 dólares y los ingresos corresponden a la producción obtenida entre noviembre del 2012 hasta el mes octubre del 2015; la producción correspondiente al periodo agosto 2013 a octubre 2015, se obtiene por curva de declinación. El VPN, se determina con una tasa de riesgo de 12,5% (tasa de interés aplicada por Petrobras) y un DTF (tasa de interés de captación) de 4.05% efectivo anual (EA). El flujo de caja se presenta en la figura 18.

$$i = ((1+DTF) * (1+12,5 \text{ Puntos})) - 1$$

$$i = (1,0405 * 1,125) - 1$$

$$i = 17,05 \% \text{ E.A}$$

Dónde:

i = Interés efectivo anual (EA)

DTF= Tasa de interés de captación

$$VPN = \sum (V / (1 + i)^n) - V_0$$

Dónde:

VPN = Valor presente neto, KUSD\$

V = Ingresos, KUSD\$

Vo = Egresos, KUSD\$

n = Período

$$VPN = 1.264 / (1 + 0,0142)^1 + 813 / (1 + 0,0142)^2 + 415 / (1 + 0,0142)^3 - 490$$

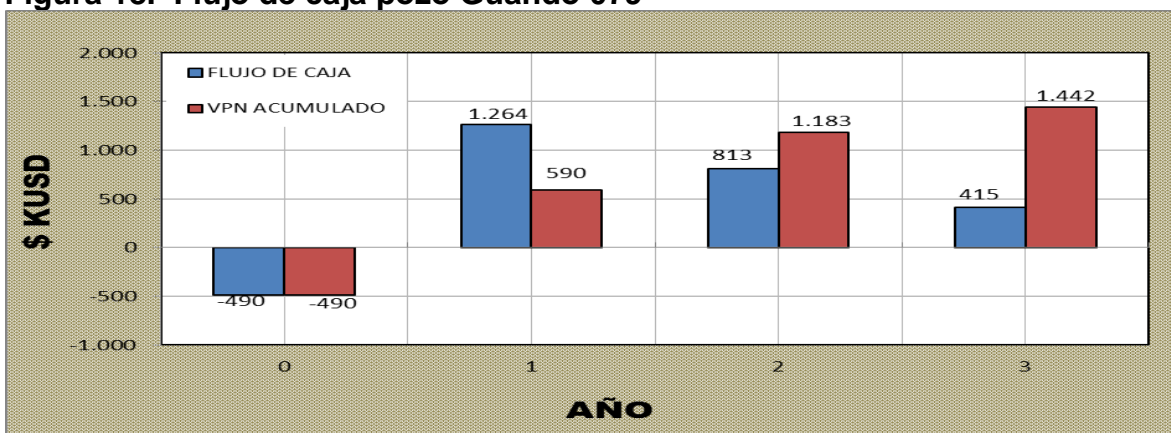
$$VPN = 1.442 \text{ KUSD\$}$$

Tabla 9. Flujo de caja pozo Guando 079

IMPUESTO DE RENTA		33%					
WACC		17,05%					
FLUJO DE CAJA		AÑO		0	1	2	3
INGRESOS							
Producción Total	BLS/AÑO			29.335	18.549	15.998	
Porcentaje de regalías	%			5,06	5,01	5,01	
Regalía	BBL			1.484	929	801	
Producción neta	BBL/AÑO			27.851	17.620	15.197	
Precio venta	USD\$/BL			75,96	76,07	77,01	
TOTAL INGRESOS	KUSD\$			-	2.116	1.340	1.170
EGRESOS							
Costos de levantamiento barril	USD\$/BL			9,58	9,68	9,72	
Costos de levantamiento	KUSD\$			281	180	156	
Costo producción diferida	KUSD\$			0	0	0	
TOTAL EGRESOS	KUSD\$			281	180	156	
MARGEN OPERATIVO	KUSD\$			0	1.835	1.161	1.015
DEDUCCIONES							
Amortizaciones y Depreciaciones	KUSD\$			0,0	106,7	106,7	106,7
Otras Deducciones	KUSD\$			0			
TOTAL DEDUCCIONES	KUSD\$			0,0	106,7	106,7	106,7
IMPUESTOS							
Base gravable	KUSD\$			0	1.728	1.054	908
IMPUESTO DE RENTA	KUSD\$			0	570	348	300
ÚTILIDAD DESPUÉS DE IMPUESTOS	KUSD\$			0	1.158	706	608
INVERSIÓN							
Inversión Inicial Capex	KUSD\$			320	0	0	0
Inversión Inicial Opex	KUSD\$			170	0	0	300
TOTAL INVERSIÓN	KUSD\$			490	0	0	300
FLUJO DE CAJA LIBRE							
Flujo de caja acumulado	KUSD\$			-490	1.264	813	415
VPN ACUMULADO	KUSD\$			-490	590	1.184	1.442
VPN	KUSD\$			1.442			
TIR	%			218,5%			

Fuente: Autor

Figura 18. Flujo de caja pozo Guando 079



Fuente: Autor

3.2.6. TIR – Tasa interna de retorno Pozo Guando 079

La tasa de interés producida, por el cambio de sistema de levantamiento del pozo Guando 079 es de 218,5 %.

$$0 = \sum (V / (1 + TIR)^n) - V_0$$

Donde:

TIR = Tasa interna de retorno, %

V = Ingresos, KUSD\$

Vo = Egresos, KUSD\$

n = Período

$$0 = 1.264 / (1 + TIR)^1 + 813 / (1 + TIR)^2 + 415 / (1 + TIR)^3 - 490$$

Realizando iteración:

$$TIR = 218,15 \%$$

3.2.7. Tiempo de repago Pozo Guando 079

El tiempo de repago del cambio de sistema artificial ESPCP del pozo, de acuerdo con el flujo de caja es de un año; es decir que se recupera la inversión en el 2013.

3.2.8. Relación beneficio - costo

Es la relación que existe entre los egresos y los ingresos, al tener un valor mayor de 1, significa que el proyecto es viable.

$$\text{Relación Beneficio/costo} = (1264 + 813 + 415) \text{ KUSD\$} / 490 \text{ KUSD\$}$$

$$\text{Relación Beneficio/costo} = 2492 / 490$$

$$\text{Relación Beneficio/Costo} = 5,08$$

El valor significa que la inversión se recupera cinco (5) veces en el periodo evaluado, correspondiente a 3 años.

4. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los indicadores económicos, la implementación del sistema de levantamiento de cavidades progresivas electrosumergible en Campo Guando es viable, porque en el pozo de menor potencial de producción (Guando 079), el valor presente neto (VPN) es positivo, la tasa interna de retorno (TIR) es mayor que la tasa de interés de riesgo, la inversión se recupera en el primer año y se obtienen ingresos, cinco (5) veces más que lo invertido en el periodo de tres (3) años.
- El sistema de levantamiento ESPCP, funciono sin ninguna falla en el pozo Guando 079; sin embargo en el pozo Guando 021 se presentaron fallas por fuera de servicio de la bomba y el controlador, que ocasionaron una producción diferida de 6.988 barriles en 24 días de inactividad.
- Se encontró que el pozo Guando 021, solo tiene registro direccional hasta 2.159 ft de profundidad vertical (TVD); información que no hacía viable la instalación del sistema en el pozo, debido al desconocimiento direccional de 1.017 ft de profundidad del pozo, el cual fue perforado hasta 3.176 ft de profundidad vertical (TVD).
- Aunque el sistema ESPCP, no funciono en el pozo Guando 021, se recuperó la inversión y se obtuvo mayor rentabilidad que el Pozo Guando 079, debido al mayor potencial de producción del pozo.
- De todo el sistema ESPCP, la caja reductora es el equipo de subsuelo más sensible y el sistema deberá ser instalado en dogleg no mayor a 1°/ 100 ft de grado de declinación en el pozo.
- El sistema de bombeo ESPCP, consiste en una bomba de cavidades progresivas, operada por un motor en el fondo del pozo como el del Sistema de Bombeo Electrosumergible (ESP), el cual prescinde de la sarta de varillas y reduce la fricción del fluido entre la tubería y las varillas.

- El sistema de levantamiento de cavidades progresivas electrosumergible, es el ideal en la producción de hidrocarburos de alta viscosidad, de alto contenido de sólidos, pozos desviados y horizontales.
- Al diseñar el sistema de bombeo de cavidades progresivas electrosumergible, además de disponer información de las propiedades del yacimiento, propiedades de los fluidos, estado mecánico y disposición de energía; el registro direccional, constituye la base fundamental de instalación del sistema, debido a que se debe tener hasta la profundidad final del pozo.

RECOMENDACIONES

- En la futura implementación del sistema de bombeo electrosumergible en el Campo Guando, cada pozo deberá contar con su registro direccional hasta su profundidad final.
- En la instalación del sistema ESPCP en Campo Guando, tener en cuenta que la caja reductora deberá ser ubicada, a una profundidad que no sobrepase el porcentaje de declinación 1°/100 pies del pozo.
- Realizar el ensamble de la bomba con el eje flexible, con grúa e izarlo en cuatro (4) puntos, con el fin de evitar deformaciones en las cavidades del elastómero de la bomba por contacto con el rotor.
- En la puesta en marcha del sistema, confirmar la correcta rotación de la bomba, para lo cual se deberá llenar la tubería de producción y confirmar el correcto sentido de rotación. Sí el sentido de rotación no es el correcto, la bomba trabajaría seca, tendería a desenroscarse y dañaría el estator y rotor.

BIBLIOGRAFIA

- M. Taufan, R. Adriansyah y D. Santriana. Aplicación de bombeo de cavidades progresivas electrosumergible en pozos horizontales Kulin. Publicación SPE, año 2005.
- Bao Feng, Sanyang Co. Ltd., Weibin Meng, Indonesio Company CNOOC, Anxia Li, Company SINOPEC. Aplicación de bombeo de cavidades progresivas electrosumergible en campos costa afuera de China. Publicación SPE, año 2010.
- Rico Serrano Naydú Yesenia. Estudio de prefactibilidad para la implementación del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible con cavidades progresivas (ESPCP) en un campo de Ecopetrol S.A. Bucaramanga: Trabajo de grado UIS, Año 2012.
- Buitrago Esparza José Rodrigo y Masías Manquillo Henry Giovanny. Análisis técnico y económico de la implementación del sistema del sistema de bombeo por cavidades progresivas (BCP) para crudo pesado en campo colombiano. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Año 2012.
- F Okassa, H Malonga, L. Tealdi, G obondoko y M. Rampoldi. Carcasa del motor: un sistema innovador de mejoramiento de eficiencia para ESP-PCP, en yacimiento de crudo pesado. Publicación SPE, conferencia de tecnología costa afuera, Año 2008.

ANEXO A. DATOS DE ENTRADA POZO GUANDO 021 EN SOFTWARE AUTOGRAPH-PC

DATOS DE ENTRADA											
DATOS DE YACIMIENTO											
PRESIÓN ESTÁTICA DEL YACIMIENTO										550	PSI
PROFUNDIDAD DE LAS PERFORACIONES										2.564	FT
PRESIÓN DE BURBUJA										127	PSI
DATOS DEL POZO											
CASING 7 K-55										7	Pulg.
TUBERIA EUE 9,3 # N-80										3 1/2	Pulg.
PRESIÓN EN CABEZA DE POZO- WHP										100	PSI
PRESIÓN EN CASING DE POZO- CHP										10	PSI
TEMPERATURA FONDO POZO- BHT										115	°F
TEMPERATURA FLUIDO EN SUPERFICI-WHT										93	°F
PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS											
BSW										71,2	%
γ _w										1	
°API										29	
γ _o										0,88	
γ _g										0,10	
GOR SCF/STB										80	
Z										0,85	
CASING & TUBING											
Casing ID (in)	6,366	6,366	6,366	6,366	6,366	6,366	6,366	6,366	6,366	6,366	6,366
Tubing ID (in)	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992
TVD (ft)	263	568	716	1.127	1.551	1.705	1.766	1.984	2.142	3.176	3.176
MD (ft)	263	567	747	1.158	1.582	1.738	1.800	2.020	2.178	3.213	3.213
POSIBLE PROBLEMAS		Favorable	Normal	Alto	Severo	Extremo					
Temperatura											
Abrasión											
Corrosión											
Gas											

Fuente: Autor

ANEXO B. PANTALLAZO DE COMPUTO DE DATOS DE ENTRADA EN SOFTWARE AUTOGRAPH-PC DEL POZO GUANDO 021

AutographPC™ - NET V8.8 - [Case #6->Condicion Inicial Octubre [P3]

Petrobras Guando-021.apcx

Well | Pump | Motor | Seal | Cable | Controller | Report

Fluid Properties

Oil grav	29.0	°API
%H2O	71.2	%
SG H2O	1.0	rel-H2O
SG gas	0.1	rel-Air
ProdGOR	80.0	scf/STB
Pb	127.0	psia

Temperature Model

Fluid Surf T	93.0	°F
Earth Surf T	32.0	°F
BHT	115.0	°F

Target

Pump VDepth	2913	ft
Flowrate max	1400	BPD
Minimum Pip	218.9	psi
Gas Sep	57.4	%

Inflow Performance - Test Data

DatumVD	2564	ft
PerfsVD	2564	ft
Static Press	550.0	psi
PI @ zero flow	3.0	BPD/psi

String Description

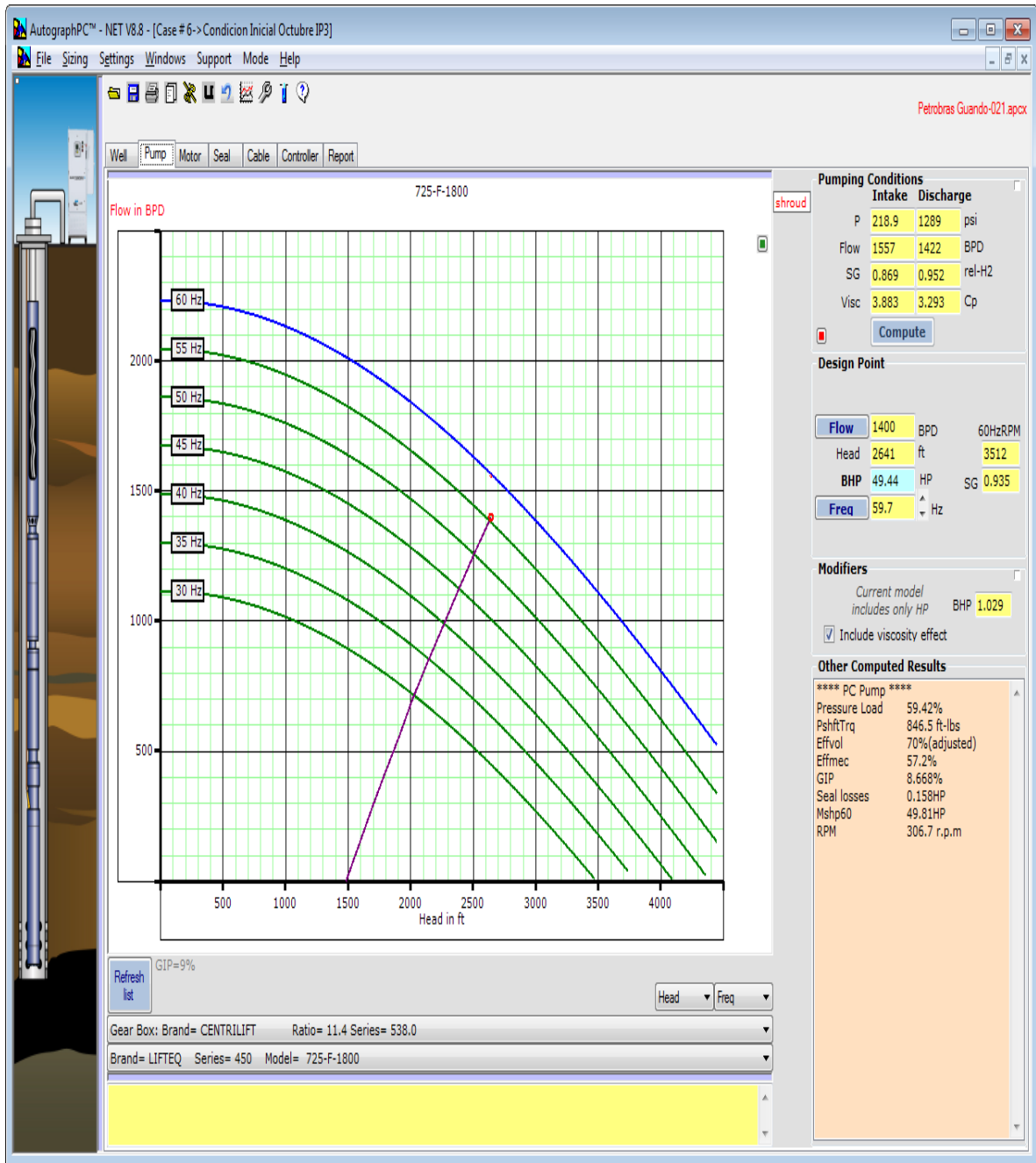
TVD ft	MD ft	CsgID in	TbgID in
263.0	263.0	6.366	2.992
568.0	567.0	6.366	2.992
716.0	747.0	6.366	2.992
1127	1158	6.366	2.992
1551	1582	6.366	2.992
1705	1738	6.366	2.992
1766	1800	6.366	2.992
1984	2020	6.366	2.992
2142	2178	6.366	2.992
3176	3213	6.366	2.992

Discharge Conditions

FlowReg	LIQUID_FLOW	
Pdp	1289	psi
Qdp	1422	BPD
Bo	1.026	
Bg	2.309	
Bw	1.011	
SGmix	0.952	rel-H2O
ViscLiq	3.293	cp
%H2O	71.36	%
TbgFric	8.861	psi
TDH	2641	ft

Fuente: Baker Hughes

ANEXO C. PANTALLAZO DE SELECCIÓN DE BOMBA EN SOFTWARE AUTOGRAPH-PC DEL POZO GUANDO 021



Fuente: Baker Hughes

ANEXO D. PANTALLAZO DE SELECCIÓN DE MOTOR EN SOFTWARE AUTOGRAPH-PC DEL POZO GUANDO 021

The screenshot displays the AutographPC software interface for motor selection. The window title is "AutographPC™ - NET V8.8 - [Case #6->Condicion Inicial Octubre IP3]". The menu bar includes File, Sizing, Settings, Windows, Support, Mode, and Help. The toolbar contains icons for file operations and help. The main interface is divided into several sections:

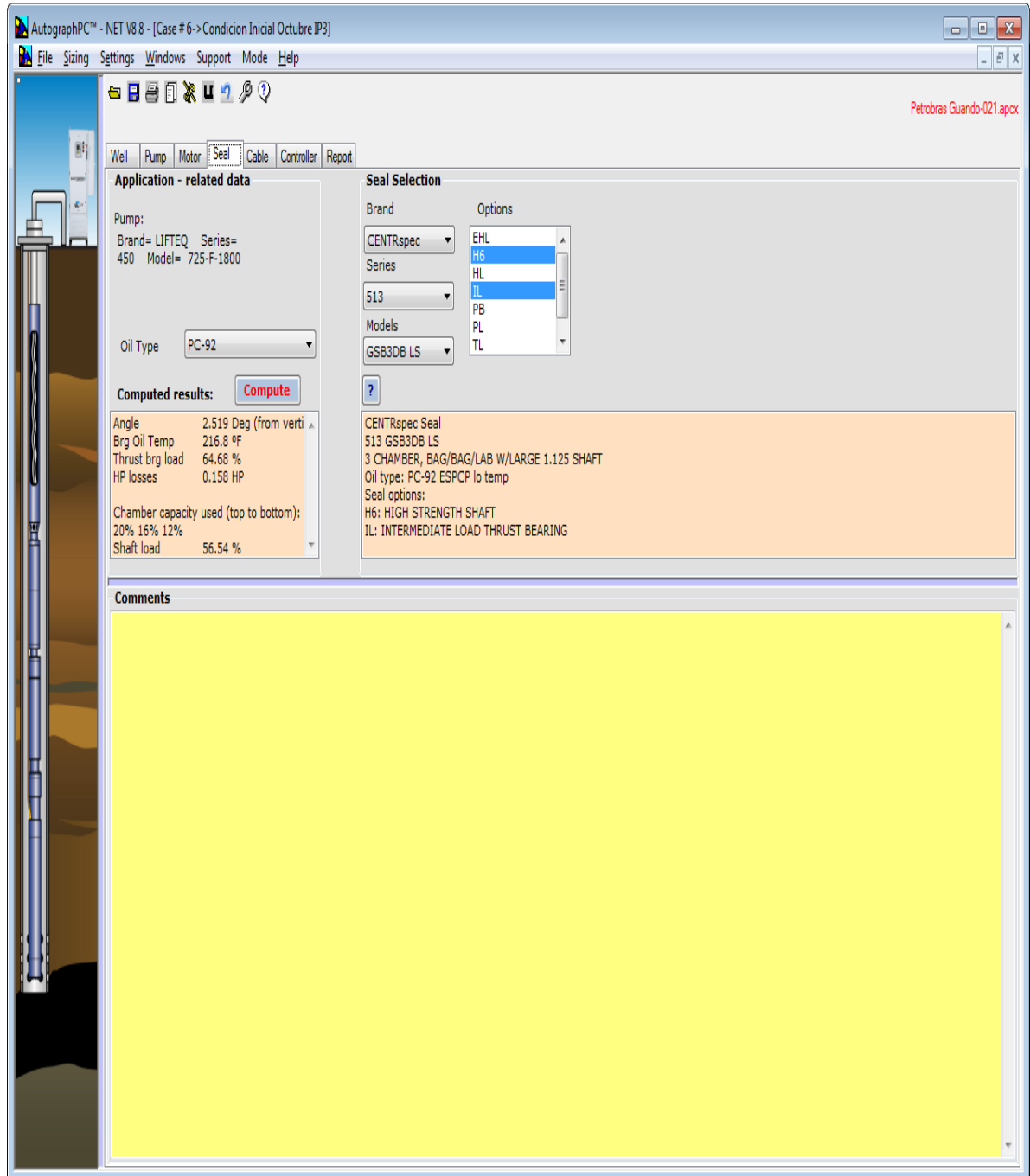
- Well:** Petrobras Guando-021.apcx
- Navigation:** Well, Pump, Motor (selected), Seal, Cable, Controller, Report
- Input Data:**
 - OPfreq: 59.7 Hz
 - ShaftHP: 49.6 HP
 - Flowrate: 1400 BPD
 - CsgID: 6.366 in
 - Mshp60=49.8
 - Added HP: 0
- ADR:**
 - BHT: 115.0 °F
 - % wc: 71.36 %
 - Oil API: 29.0 degAPI
 - GIP: 7.93 %
 - ViscIn: 3.87 cp
 - V imbal: 0.052 %
 - Options: VSD, SCALE, MONEL
- Selection (60Hz rating):**
 - Manufacturer: CENTRILIFT
 - Series & Model: 450_MSP1-325F
 - Oil type: PC-92
 - HP: 119, V: 1300, #rotors: 59, 17
 - Buttons: Compute, AutoSelect
- Motor Selection Summary:**

CENTRILIFT Frame size:17
450 MSP1-325F 119HP 1300V /59A (60Hz rating)
OP Conditions @ 59.7 Hz:

Motor load	41.86 %
Term Volts	1080 V
Motor Amps	32.68 A
Internal Temp	169.7 °F
Fluid Speed	0.893 ft/s
Efficiency	79.78 %
Power Factor	77.17 %
Shaft speed	3497 rpm
Shaft load	8.274 %
- Comments:** A large yellow text area for user notes.
- Notice:** Computed information like efficiency and power factor for non-Centrilift equipment is modeled after published data and by no means necessarily reflect actual efficiencies or power factor observed in the field.

Fuente: Baker Hughes

ANEXO E. PANTALLAZO DE SELECCIÓN DE SELLO EN SOFTWARE AUTOGRAPH-PC DEL POZO GUANDO 021



Fuente: Baker Hughes

ANEXO F. PANTALLAZO DE SELECCIÓN DE CABLE EN SOFTWARE AUTOGRAPH-PC DEL POZO GUANDO 021

The screenshot displays the AutographPC software interface for well Petrobras Guando-021. The interface is divided into several sections:

- Input Data:**
 - Surface: 300.0 ft, motor V: 1080 V
 - TSurf: 93.0 °F, motor A: 32.68 A
 - MLE: 30.0 ft, BHT: 115.0 °F
 - Power: 0.05 \$/kW, Water: 71.2 %
 - Tbg Len: 2920 ft
- Cable Selection:**
 - Brand: CENTRILIFT
 - Style: Flat (selected)
 - Size: #4 CELF 5kV
 - Max Cond Temp: 136.2 °F
 - Max Temp Rating: 450.0 °F
 - Pothead: 2piece Monel
 - Packer: none installed
 - Bypass: none installed
- Cable Sizing Output:**
 - Surface: CasingID-drift 6.241 in
 - Main: Tbg collar OD 4.5 in
 - Extension: (unselected)
 - Diagram shows cable thickness 0.572 in and clearance 1.084 in.
- Selection Summary:**
 - Surface: 300.0ft CENTRILIFT #4 CELF 5kV
 - Main: 2920ft CENTRILIFT #4 CELF 5kV
 - Extension: 30.0ft CENTRILIFT #5 MLE-KLHT 5kV
- Results:**
 - Vdrop: 52.99 V (16.3 V/kft or 5 % motorV)
 - SurfV: 1133 V
 - SurfKVA: 64.15 KVA
 - Freq: 59.74 Hz
 - PwrLoss: 2.96 KW
 - PwrCost: 106.6 \$/mo
- Comments:** A large empty yellow text area for user notes.

Fuente: Baker Hughes

ANEXO G. PANTALLAZO DE SELECCIÓN DE CONTROLADOR EN SOFTWARE AUTOGRAPH-PC DEL POZO GUANDO 021

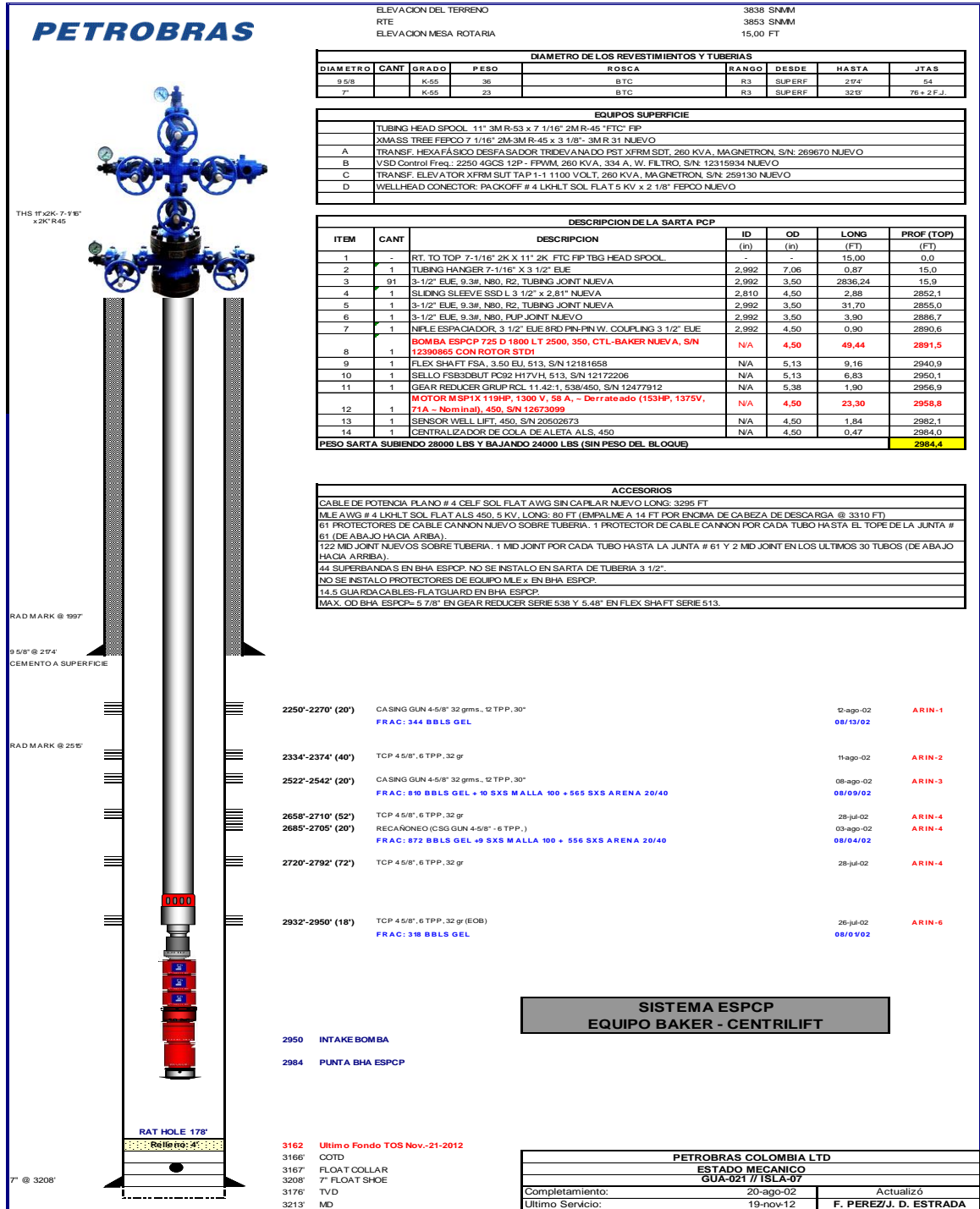
The screenshot displays the AutographPC software interface for well Petrobras Guando-021. The interface is divided into several sections:

- Input Data:**
 - Vin: 480.0 V
 - Vsurf: 1133 V
 - Mamps: 32.68 A
 - PwrCost: 0.05 \$/KWH
 - Vout: 475.1 V
 - Freq: 59.7 Hz
 - strFreq: 10.0 Hz
 - Vboost: 16.66 V
- Controller Selection:**
 - Selected: VSD (Variable Speed Drive)
 - Brand: CENTRILIFT
 - Model: 2250-VT
 - KVA: 260.0
 - Amps: 313.0
- Transformer:**
 - Configuration: S/U and S/D
 - Table of Transformer Data:

KVA	Z (%)
260.0	5.0
260.0	5.0
- Controller Sizing Output:**
 - Selected equipment: CENTRILIFT 480.0V Variable Speed Drive
 - Model: 2250-VT 260.0 KVA / 313.0 A
 - Operating Conditions:
 - StepUp Trafo ratio: 2.386
 - Surface KVA: 64.15 KVA
 - Surface KW: 50.15 KW
 - Output Current: 77.96 A
 - Output Voltage: 475.1 V (required V/Hz: 7.952V/Hz or 477.1 'Volts at 60Hz' drive setting)
 - Cntr KVA Load: 24.67 %
 - Cntr Amps Load: 24.91 %
 - Controller In: 58.13 KVA
 - System Power: 51.78 KW
 - Sys Power Cost: 1864\$/mo
 - Motor Startup conditions:
 - Startup volts: 121.2 V
 - Startup Amps: 78.21 A

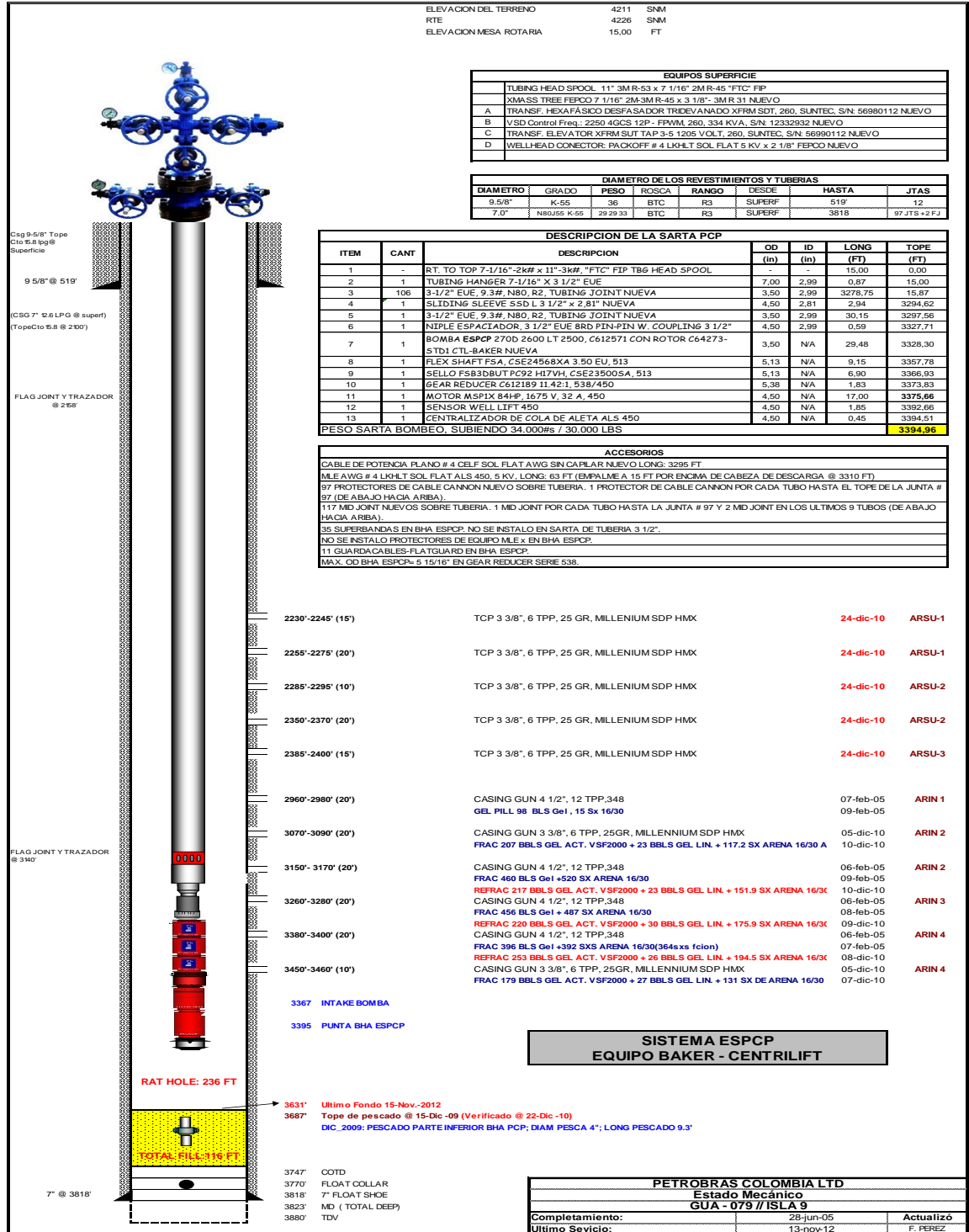
Fuente: Baker Hughes

ANEXO H. ESTADO MEÁNICO POZO GUANDO 021



Fuente: Baker Hughes

ANEXO I. ESTADO MEÁNICO POZO GUANDO 079



Fuente: Baker Hughes

**ANEXO I. PRODUCCIÓN AÑO 2012 -2013
POZOS GUANDO 021 Y GUANDO 079**

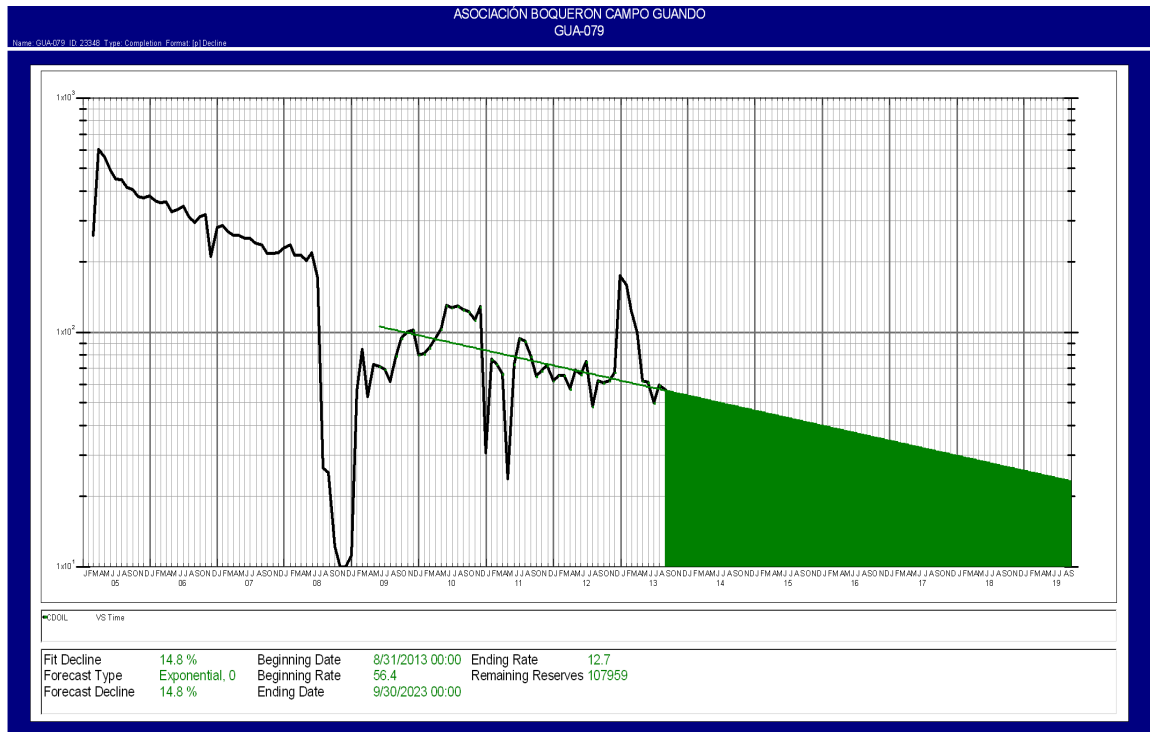
POZO GUANDO 021							
PRODUCCIÓN AÑO 2012			PRODUCCIÓN AÑO 2013			DIFERIDA	
FECHA	BLS	BOPD	FECHA	BLS	BOPD	DIAS	BBLS
nov-12	1.632	272	ene-13	8.211	331	7	2317
dic-12	10.187	329	feb-13	9.702	347	1	347
			mar-13	9.201	317	-	-
			abr-13	8.083	277	4	1108
			may-13	10.276	334	1	334
			jun-13	6.025	262	7	1834
TOTAL	11.819	601		51.498	1.868	20	5.940

Fuente: Autor

POZO GUANDO 079					
PRODUCCIÓN AÑO 2012			PRODUCCIÓN AÑO 2013		
FECHA	BLS	BOPD	FECHA	BLS	BOPD
nov-12	2.020	67	ene-13	4.938	159
dic-12	5.423	175	feb-13	3.471	124
			mar-13	3.085	106
			abr-13	1.860	63
			may-13	1.906	61
			jun-13	1.507	52
			jul-13	1.846	60
TOTAL	7.443	242		16.767	567

Fuente: autor

ANEXO K. CURVA DE DECLINACIÓN POZO GUANDO 079



Fuente: Petrobras de Colombia

AÑO 2013		AÑO 2014		AÑO 2015		
BOPD	BLS	BOPD	BLS	MES	BOPD	BLS
56	1748	54	1631	nov-14	47	1406
56	1671	54	1664	dic-14	46	1435
55	1706	53	1644	ene-15	46	1418
		52	1467	feb-15	45	1265
		52	1604	mar-15	45	1383
		51	1533	abr-15	44	1322
		50	1565	may-15	44	1349
		50	1496	jun-15	43	1290
		49	1527	jul-15	42	1317
		49	1508	ago-15	42	1300
		48	1441	sep-15	41	1243
		47	1471	oct-15	41	1269
TOTAL	5.125	TOTAL	18.549			15.998

Fuente: Autor

**ANEXO L. REGALIAS
CAMPO GUANDO AÑO 2012 - 2013**

FECHA	UNIDAD	nov-12	dic-12	ene-13	feb-13	mar-13	abr-13	may-13	jun-13	jul-13	ago-13
PRODUCCIÓN	BBLS	398.300	422.965	408.297	363.190	367.505	370.836	393.178	366.160	374.097	366.613
BOPD	BBLS	13.277	13.644	13.171	12.971	11.855	12.361	12.683	12.205	12.068	13.093
REGALIAS	%	6,03	6,08	6,02	6,00	5,86	5,92	5,96	5,90	5,88	6,01

Fuente: Autor

$$\% \text{ REGALÍAS} = 5 + \left[\left(\frac{BOPD}{1.000} \right) * 0,125 \right]$$

ANEXO M. REGISTRÓ DIRECCIONAL POZO GUANDO 021

Petrobras Colombia Ltd
Colombia
PETROBRAS

HALLIBURTON

Proposal Report for Guando-21/Ver1.0 Guando

Measured Depth (ft)	Incl.	Azim.	Sub-Sea Depth (ft)	Vertical Depth (ft)	Local Coordinates Northings (ft) Eastings (ft)	Bogota Main, Meters Northings (m) Eastings (m)	Dogleg Rate (°/100ft)	Vertical Section	Comment
0.00	0.000	0.000	-3853.00	0.00	0.00 N 0.00 E	944839.00 N 944839.00 E	0.00	0.00	
15.00	0.000	0.000	-3838.00	15.00	0.00 N 0.00 E	944839.00 N 944839.00 E	0.00	0.00	Villeta
350.00	0.000	0.000	-3503.00	350.00	0.00 N 0.00 E	944839.00 N 944839.00 E	0.00	0.00	KOP at 350.00ft
400.00	1.900	58.073	-3453.01	399.99	0.44 N 0.70 E	944839.21 N 944840.93 E	3.80	0.83	
500.00	5.700	58.073	-3353.25	499.75	3.94 N 6.33 E	944840.93 E	3.80	7.46	
600.00	9.500	58.073	-3254.14	598.86	10.94 N 17.55 E	944844.35 N 944849.47 E	3.80	20.88	Build Rate = 3.80°/100ft
700.00	13.300	58.073	-3156.13	696.87	21.39 N 34.32 E	944849.51 N 944854.97 E	3.80	40.44	
782.85	16.448	58.073	-3076.07	776.93	32.63 N 52.37 E	944854.97 N 944856.23 E	3.80	61.70	End of Build at 782.85ft
800.00	16.448	58.073	-3059.62	793.38	35.20 N 56.49 E	944856.23 N 944856.96 E	0.00	66.56	
810.03	16.448	58.073	-3050.00	803.00	36.70 N 58.90 E	944856.96 N 944863.55 E	0.00	69.40	F. Boqueron/Guaduas
900.00	16.448	58.073	-2963.72	889.28	50.17 N 80.52 E	944863.55 N 944870.88 E	0.00	94.88	
1000.00	16.448	58.073	-2867.81	985.19	65.15 N 104.55 E	944870.88 N 944878.21 E	0.00	123.19	Hold Angle at 16.448°
1100.00	16.448	58.073	-2771.90	1081.10	80.12 N 128.59 E	944878.21 N 944885.54 E	0.00	151.51	
1200.00	16.448	58.073	-2675.99	1177.01	95.10 N 152.62 E	944885.54 N 944892.86 E	0.00	179.82	
1300.00	16.448	58.073	-2580.08	1272.92	110.07 N 176.65 E	944892.86 N 944906.13 E	0.00	208.14	
1306.02	16.448	58.073	-2574.31	1278.69	110.97 N 178.10 E	944906.13 N 944911.64 E	0.00	209.84	Drop to Vertical at 1306.02ft
1400.00	14.851	58.073	-2483.82	1369.18	124.38 N 199.61 E	944911.64 N 944920.40 E	1.70	235.19	
1500.00	13.151	58.073	-2386.79	1466.21	137.17 N 220.14 E	944920.40 N 944929.98 E	1.70	259.38	Guadalupe Aren. Superior
1537.73	12.509	58.073	-2350.00	1503.00	141.60 N 227.25 E	944929.98 N 944936.13 E	1.70	267.76	
1600.00	11.451	58.073	-2289.09	1563.91	148.44 N 238.22 E	944936.13 N 944942.13 E	1.70	280.69	
1700.00	9.751	58.073	-2190.80	1662.20	158.17 N 253.84 E	944942.13 N 944949.29 E	1.70	299.08	
1800.00	8.051	58.073	-2092.01	1760.99	166.35 N 266.97 E	944949.29 N 944956.98 E	1.70	314.55	Drop Rate = 1.70°/100ft
1900.00	6.351	58.073	-1992.80	1860.20	172.98 N 277.61 E	944956.98 N 944963.13 E	1.70	327.09	Guadalupe Chert Interm.
1993.24	4.766	58.073	-1900.00	1953.00	177.75 N 285.27 E	944963.13 N 944972.84 E	1.70	336.12	
2000.00	4.651	58.073	-1893.27	1959.73	178.05 N 285.74 E	944972.84 N 944982.86 E	1.70	336.67	
2100.00	2.951	58.073	-1793.49	2059.51	181.55 N 291.37 E	944982.86 N 944990.00 E	1.70	343.30	End of Drop at 2273.57ft
2200.00	1.251	58.073	-1693.56	2159.44	183.49 N 294.48 E	944990.00 N 944992.00 E	1.70	346.90	Target - Guadalupe Inferior
2273.57	0.000	0.000	-1620.00	2233.00	183.91 N 295.16 E	944992.00 N 944999.00 E	1.70	347.77	82.02 Radius, Current Target
2700.00	0.000	0.000	-1193.57	2659.43	183.91 N 295.16 E	944999.00 N 944999.00 E	0.00	347.77	Hold Angle at 0.000°
2793.57	0.000	0.000	-1100.00	2753.00	183.91 N 295.16 E	944999.00 N 944999.00 E	0.00	347.77	Guadalupe Inferior Caliza

ANEXO N. REGISTRÓ DIRECCIONAL POZO GUANDO 079

Guando 079 Rev A0 Proposal



<p>Report Date: June 9, 2004 Client: Petrobras Colombia Ltd Field: PETROBRAS_Guando Structure / Slot: Isala L-009 / GU 079 (Provisional INI 2) Well: Guando 079 Borehole: G079 CH UWAP/PA: Survey Name / Date: G079 Rev A0 / June 9, 2004 Tort / AHD / DD / ERD ratio: 15.149 / 869.60 ft / 4.132 / 0.225 Grid Coordinate System: CG - Bogota Origin, TM, Meters, Bogota Location Lat/Long: N 4 11 30.267, W 74 34 3.047 Location Grid NIE YXL: N 954976.000 m, E 945973.500 m Grid Convergence Angle: -0.03556835° Grid Scale Factor: 1.00003611</p>	<p>Survey / DLS Computation Method: Minimum Curvature / Lubinski Vertical Section Azimuth: 74.150° Vertical Section Origin: N 0.000 ft, E 0.000 ft TVD Reference Datum: KB TVD Reference Elevation: 4226.0 ft relative to MSL Sea Bed / Ground Level Elevation: 4211.000 ft relative to MSL Magnetic Declination: -5.089° Total Field Strength: 31773.714 nT Magnetic Dip: 29.506° Declination Date: August 01, 2004 Magnetic Declination Model: BGM 2003 North Reference: True North True Reference: -5.089° Total Corr Mag North -> True North: Local Coordinates Referenced To: Well Head</p>
--	--

Comments	Measured Depth (ft)	Inclination (deg)	Azimuth (deg)	TVD (ft)	Sub-Sea TVD (ft)	Vertical Section (ft)	NS (ft)	EW (ft)	DLS (deg/100 ft)	Northing (m)	Easting (m)	Latitude	Longitude
Tie-in	0.00	0.00	76.69	0.00	4226.00	0.00	0.00	0.00	0.00	954976.00	945973.50	N 4 11 30.267	W 74 34 3.047
KOP	100.00	0.00	76.69	100.00	4126.00	0.00	0.00	0.00	0.00	954976.00	945973.50	N 4 11 30.267	W 74 34 3.047
	200.00	0.00	76.69	200.00	4026.00	0.00	0.00	0.00	0.00	954976.00	945973.50	N 4 11 30.267	W 74 34 3.047
	300.00	0.00	76.69	300.00	3926.00	0.00	0.00	0.00	0.00	954976.00	945973.50	N 4 11 30.267	W 74 34 3.047
	400.00	0.00	76.69	400.00	3826.00	0.00	0.00	0.00	0.00	954976.00	945973.50	N 4 11 30.267	W 74 34 3.047
	500.00	3.00	76.69	499.95	3728.05	2.81	0.60	2.55	3.00	954976.18	945974.28	N 4 11 30.273	W 74 34 3.022
EOC (Curve-Hold) 9 5/8" Csg point	600.00	6.00	76.69	599.63	3626.37	10.45	2.41	10.19	3.00	954976.73	945976.60	N 4 11 30.291	W 74 34 2.946
	700.00	9.00	76.69	698.77	3527.23	23.49	5.41	22.88	3.00	954977.55	945980.88	N 4 11 30.321	W 74 34 2.821
	800.00	12.00	76.69	797.08	3428.92	41.70	9.61	40.61	3.00	954978.92	945985.88	N 4 11 30.362	W 74 34 2.645
	900.00	15.00	76.69	894.31	3331.69	65.01	14.98	63.33	3.00	954980.55	945992.81	N 4 11 30.416	W 74 34 2.421
	904.95	15.15	76.69	899.09	3328.91	66.30	15.28	64.58	3.00	954980.64	945993.19	N 4 11 30.419	W 74 34 2.408
	910.00	15.15	76.69	903.66	3322.04	67.62	15.58	65.87	0.00	954980.74	945993.58	N 4 11 30.422	W 74 34 2.396
	1000.00	15.15	76.69	990.83	3235.17	91.12	21.00	88.75	0.00	954991.53	946000.56	N 4 11 30.475	W 74 34 2.170
	1100.00	15.15	76.69	1087.56	3138.64	117.22	27.01	114.18	0.00	954994.21	946008.31	N 4 11 30.535	W 74 34 1.918
	1200.00	15.15	76.69	1183.89	3042.11	143.33	33.03	139.61	0.00	954998.04	946016.06	N 4 11 30.595	W 74 34 1.667
	1300.00	15.15	76.69	1280.41	2945.59	169.44	39.05	165.04	0.00	954987.87	946023.81	N 4 11 30.654	W 74 34 1.416
1400.00	15.15	76.69	1378.94	2849.06	195.55	45.08	190.47	0.00	954989.70	946031.57	N 4 11 30.714	W 74 34 1.164	
1500.00	15.15	76.69	1473.46	2752.54	221.65	51.08	215.90	0.00	954991.53	946039.32	N 4 11 30.774	W 74 34 0.913	
1600.00	15.15	76.69	1569.99	2656.01	247.76	57.09	241.33	0.00	954993.36	946047.07	N 4 11 30.834	W 74 34 0.662	
1700.00	15.15	76.69	1666.51	2559.49	273.87	63.11	266.77	0.00	954995.19	946054.82	N 4 11 30.893	W 74 34 0.410	
1800.00	15.15	76.69	1763.04	2462.96	299.98	69.13	292.20	0.00	954997.02	946062.58	N 4 11 30.953	W 74 34 0.159	
1900.00	15.15	76.69	1859.56	2366.44	326.08	75.14	317.63	0.00	954998.84	946070.33	N 4 11 31.013	W 74 33 59.908	
2000.00	15.15	76.69	1956.09	2269.91	352.19	81.16	343.06	0.00	955000.67	946078.08	N 4 11 31.072	W 74 33 59.656	
2100.00	15.15	76.69	2052.61	2173.39	378.30	87.18	368.49	0.00	955002.50	946085.84	N 4 11 31.132	W 74 33 59.405	
2200.00	15.15	76.69	2149.14	2076.86	404.40	93.19	393.92	0.00	955004.33	946093.59	N 4 11 31.192	W 74 33 59.154	
Fm Guadalupe (Arenisca Superior)	2300.00	15.15	76.69	2245.66	1980.34	430.51	99.21	419.35	0.00	955006.16	946101.34	N 4 11 31.251	W 74 33 58.902
	2383.23	15.15	76.69	2326.00	1900.00	452.24	104.22	440.51	0.00	955007.68	946107.79	N 4 11 31.301	W 74 33 58.693
	2400.00	15.15	76.69	2342.19	1883.81	456.62	105.23	444.78	0.00	955007.99	946109.09	N 4 11 31.311	W 74 33 58.651
	2500.00	15.15	76.69	2438.71	1787.29	482.73	111.24	470.21	0.00	955009.82	946116.85	N 4 11 31.371	W 74 33 58.400
	2600.00	15.15	76.69	2535.24	1690.76	508.83	117.26	495.64	0.00	955011.65	946124.60	N 4 11 31.430	W 74 33 58.148
Fm Guadalupe (Chart Intermedia)	2700.00	15.15	76.69	2631.76	1594.24	534.94	123.27	521.07	0.00	955013.48	946132.35	N 4 11 31.490	W 74 33 57.897
	2776.91	15.15	76.69	2706.00	1520.00	555.02	127.90	540.63	0.00	955014.88	946138.31	N 4 11 31.536	W 74 33 57.704
	2800.00	15.15	76.69	2728.29	1497.71	561.05	129.29	546.50	0.00	955015.31	946140.10	N 4 11 31.550	W 74 33 57.646
	2900.00	15.15	76.69	2824.81	1401.19	587.16	135.31	571.93	0.00	955017.13	946147.86	N 4 11 31.610	W 74 33 57.394
	3000.00	15.15	76.69	2921.34	1304.66	613.26	141.32	597.36	0.00	955018.96	946155.61	N 4 11 31.669	W 74 33 57.143
Fm Guadalupe (Arenisca Inferior) G079_Fm Guadalupe Inferior	3056.63	15.15	76.69	2976.00	1250.00	628.05	144.73	611.76	0.00	955020.00	946160.00	N 4 11 31.703	W 74 33 57.001
	3100.00	15.15	76.69	2976.00	1250.00	628.05	144.73	611.76	0.00	955020.00	946160.00	N 4 11 31.703	W 74 33 57.001
	3100.00	15.15	76.69	3017.86	1208.14	639.37	147.34	622.79	0.00	955020.79	946163.38	N 4 11 31.729	W 74 33 56.892
	3200.00	15.15	76.69	3114.39	1111.61	665.48	153.36	648.22	0.00	955022.62	946171.11	N 4 11 31.789	W 74 33 56.640
	3300.00	15.15	76.69	3210.91	1015.09	691.59	159.37	673.65	0.00	955024.45	946178.87	N 4 11 31.848	W 74 33 56.389
Fm Guadalupe (Caliza)	3400.00	15.15	76.69	3307.44	918.56	717.69	165.39	699.08	0.00	955026.28	946186.62	N 4 11 31.908	W 74 33 56.138
	3500.00	15.15	76.69	3403.96	822.04	743.80	171.40	724.51	0.00	955028.11	946194.37	N 4 11 31.968	W 74 33 55.886
	3600.00	15.15	76.69	3500.49	725.51	769.91	177.42	749.94	0.00	955029.94	946202.12	N 4 11 32.027	W 74 33 55.635
	3626.43	15.15	76.69	3526.00	700.00	778.81	179.01	756.66	0.00	955030.42	946204.17	N 4 11 32.043	W 74 33 55.669
	3700.00	15.15	76.69	3597.01	628.99	796.02	183.44	775.37	0.00	955031.77	946209.88	N 4 11 32.087	W 74 33 55.384
Base Arenisca Productora	3792.19	15.15	76.69	3686.00	540.00	820.08	188.98	798.81	0.00	955033.45	946217.02	N 4 11 32.142	W 74 33 55.152
	3800.00	15.15	76.69	3693.54	532.46	822.12	189.45	800.80	0.00	955033.60	946217.63	N 4 11 32.147	W 74 33 55.132
	3900.00	15.15	76.69	3790.06	435.94	848.23	195.47	828.23	0.00	955035.42	946225.38	N 4 11 32.207	W 74 33 54.861
TD	3978.67	15.15	76.69	3866.00	380.00	868.77	200.20	846.24	0.00	955036.86	946231.48	N 4 11 32.254	W 74 33 54.683

Survey Type: Raw Proposal

Survey Error Model: SLB ISCWSA version 16 *** 3-D 95.00% Confidence 2.7955 sigma
 Surveying Prog:
 MD From (ft) 0.00
 MD To (ft) 0.00
 EDU Freq Survey Tool Type 1/100.00 ft SLB_ZERO
 3978.67 1/100.00 ft SLB_MWD-STD

Schlumberger Confidential

Fuente: Petrobras de Colombia