

EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA INSTALACIÓN DE UNIDADES DE SUPERFICIE
DE BOMBEO MECÁNICO PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN
Y COSTOS DE OPERACIÓN DE LOS POZOS NUEVOS EN EL CAMPO LA CIRA
INFANTAS

LINA MARÍA PATIÑO TRIANA
DANIELA TRUJILLO MONTENEGRO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2016

EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA INSTALACIÓN DE UNIDADES DE SUPERFICIE
DE BOMBEO MECÁNICO PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN
Y COSTOS DE OPERACIÓN DE LOS POZOS NUEVOS EN EL CAMPO LA CIRA
INFANTAS

LINA MARÍA PATIÑO TRIANA
DANIELA TRUJILLO MONTENEGRO

Proyecto Integral de grado para optar el título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director
JOSÉ LUIS MARTIN RAMÍREZ
Ingeniero de Petróleos

Orientador
CARLOS ALBERTO ESPINOSA MORA
Ingeniero de Petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2016

Nota de aceptación

Ingeniero Carlos Alberto Espinosa Mora

Ingeniero Alejandro Contreras

Ingeniero Juan Carlos Castro

Bogotá D.C., Agosto 8 de 2016

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA

Vicerrectora Académica de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA

Decano General de Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director (E) Programa de Ingeniería de Petróleos

Ing. EDGAR DAVID CEDEÑO LIGARRETO

Las Directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

A:

“Dios, por darme la oportunidad de vivir y acompañarme en cada paso dado, por colocar en mi camino aquellas personas que han sido un soporte y compañía durante todo el período de estudio.

Mis padres, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo. Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

Mi compañera Daniela por su paciencia y dedicación, el crédito es tuyo, te esperan muchas bendiciones y éxitos en el camino que construyes día a día.”

Lina María Patiño Triana.

Agradezco a Dios y a la Virgen María, por ayudarme en el comienzo de mi trabajo, en dirigir su progreso para coronar de manera satisfactoria.

A mis padres y mis hermanos los motores de mi vida, por su amor, comprensión y apoyo incondicional en la culminación de mis carreras.

A todos mis seres queridos que están en el cielo, que me han llevado de la mano y guiado por el mejor camino. Los extraño!

A mi compañera Lina por su amistad, paciencia y por levantarme aún en los momentos más difíciles.

Al resto de mi familia y todas aquellas personas que de una y otra forma me apoyaron en este proceso.

Daniela Trujillo Montenegro.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente:

A OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC por abrirnos sus puertas y permitirnos realizar este proyecto de grado, facilitando instalaciones, equipos y personal de apoyo durante el tiempo en que se realizó este trabajo.

Al Ingeniero José Luis Martín Ramírez, Ingeniero de Petróleos, por aceptar los papeles de director del Proyecto y que con su conocimiento, experiencia y disponibilidad de tiempo, nos brindó la asesoría necesaria para guiarnos en el desarrollo del trabajo de grado.

A los Ingenieros Manuela Posada Henao y Manuel Monroy, por habernos brindado su conocimiento, dedicación, disponibilidad de tiempo, grandes contribuciones y capacitaciones recibidas que lograron la culminación satisfactoria del proyecto.

Al Ingeniero Jahir Gutiérrez, por su conocimiento, tiempo y dedicación en la visita a Campo y por todas las enseñanzas entregadas.

Al Ingeniero Juan Carlos López, por brindar su confianza y sugerirnos como candidatas para el desarrollo del presente trabajo de grado.

Al Ingeniero Alex Fabián Nieto, por su tiempo e información suministrada para el desarrollo de este proyecto.

A nuestro orientador, el Ingeniero Carlos Alberto Espinosa, por su conocimiento, tiempo y apoyo incondicional en los aspectos técnicos del estudio.

Al asesor Pedro Pablo Moreno, por el apoyo en los aspectos financieros del proyecto.

A todas aquellas personas que colaboraron de una u otra manera en el desarrollo de este proyecto.

A las Directivas, Cuerpo Docente y Personal Administrativo de la Universidad de América por el apoyo y capacitación recibida durante nuestra preparación como Ingenieras de Petróleos.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	26
OBJETIVOS	27
1. CARACTERÍSTICAS E HISTORIA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS	28
1.1 HISTORIA	28
1.2 LOCALIZACIÓN	31
1.3 CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO Y DE LOS FLUIDOS DEL CAMPO LA CIRA-INFANTAS.	32
1.3.1 Propiedades del yacimiento del Campo La Cira-Infantas.	32
1.3.2 Caracterización del fluido del Campo La Cira-Infantas.	33
1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN	34
2. GENERALIDADES DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBEO MECÁNICO	36
2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	36
2.2 UNIDAD MOTRIZ	39
2.2.1 Motores Eléctricos.	40
2.2.2 Motores de Ultra Alto Deslizamiento.	40
2.2.3 Motores a Gas.	40
2.3 UNIDADES DE BOMBEO	41
2.3.1 Diseño de la Unidad.	41
2.3.2 Geometría de las Unidades de Superficie.	42
2.3.3 Distribución de las Unidades de Superficie.	48
3. ELEMENTOS DE FONDO DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBEO MECÁNICO Y CARACTERÍSTICAS DEL POZO TIPO	49
3.1 BOMBAS DE SUBSUELO	49
3.1.1 Bomba de Tubería.	50
3.1.2 Bombas de varilla o de inserción.	52
3.1.3 Designación de las Bombas.	54
3.2 SARTA DE VARILLAS	55
3.2.1 Varillas convencionales	55
3.2.2 Varillas COROD.	56
3.3 ACCESORIOS	57
3.3.1 Ancla de gas.	57
3.3.2 Ancla de tubería	58
3.3.3 Asentamientos.	58
3.3.4 Válvula antibloqueo de gas (VGA).	58
3.3.5 Barras de peso.	58

3.4 CARACTERÍSTICAS Y DATOS DEL POZO TIPO	58
4. SIMULACIÓN DE LAS UNIDADES DE SUPERFICIE DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBEO MECÁNICO	64
4.1 SIMULACIONES UNIDADES DE SUPERFICIE CON SROD CON CONDICIONES ACTUALES	64
4.1.1 Simulación con software Srod de la Unidad Rotaflex.	66
4.1.2 Simulación con software Srod de la Unidad Mark II.	70
4.1.3 Simulación con software Srod de la Unidad Maximizer II.	74
4.1.4 Simulación con software Srod de la Unidad Convencional.	77
4.1.5 Simulación con software Srod de la Unidad Hidráulica.	81
4.1.6 Comparación de resultados de las Unidades de Superficie con Srod a condiciones actuales.	84
4.2 SIMULACIONES UNIDADES DE SUPERFICIE CON SROD CON MÁXIMAS CONDICIONES	86
4.2.1 Comparación de resultados de las Unidades de Superficie con Srod a máximas condiciones.	87
4.3 SIMULACIÓN UNIDADES DE SUPERFICIE CON RODSTAR CON CONDICIONES ACTUALES	90
5. MATRIZ DE EVALUACIÓN DE LAS UNIDADES DE SUPERFICIE DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBEO MECÁNICO	94
6. ANÁLISIS FINANCIERO	99
6.1 COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX)	99
6.2 COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX)	102
6.3 EVALUACIÓN FINANCIERA	105
6.3.1 Tasa de interés de oportunidad (TIO).	105
6.3.2 Flujo de efectivo.	106
6.4 CONCLUSIÓN DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA	107
7. CONCLUSIONES	108
8. RECOMENDACIONES	110
BIBLIOGRAFÍA	111
ANEXOS	114

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Rendimiento Histórico de La Cira-Infantas	29
Figura 2. Distribución de los ALS en La Cira-Infantas	31
Figura 3. Ubicación Geográfica	32
Figura 4. Sistema de Bombeo Mecánico	37
Figura 5. Rango de aplicación del Bombeo Mecánico	38
Figura 6. Designación Unidades de Superficie	41
Figura 7. Partes de la bomba de subsuelo	50
Figura 8. Partes básicas de una Bomba de tubería	51
Figura 9. Partes básicas de una bomba de varillas	53
Figura 10. Designación API 11B de las bombas de subsuelo	54
Figura 11. Perfil del Pozo Tipo	59
Figura 12. Datos del Pozo Cira 2842	60
Figura 13. Cálculos de la capacidad del Bombeo Mecánico	62
Figura 14. Cartas dinamométricas de fondo y superficie software RODSTAR	92
Figura 15. Tendencia al Buckling de las Unidades en el software RODSTAR	93

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades del Yacimiento del Campo La Cira-Infantas	33
Tabla 2. Propiedades del fluido del Campo La Cira-Infantas	34
Tabla 3. Rango de aplicación Sistema de Bombeo Mecánico.	38
Tabla 4. Distribución Unidades de Superficie.	48
Tabla 5. Vida útil de la varilla con respecto a las unidades de superficie	90
Tabla 6. Costo de instalación de las Unidades de Superficie	100
Tabla 7. Campaña de Perforación	100
Tabla 8. Porcentaje de participación histórica de las Unidades de Superficie	101
Tabla 9. Proyección Unidades de Superficie escenario actual	101
Tabla 10. Costos totales de inversión escenario actual	101
Tabla 11. Costos totales de inversión escenario propuesto	102
Tabla 12. Costos por cada intervención de las Unidades de Superficie	102
Tabla 13. Número de intervenciones por Unidad en 5 años	103
Tabla 14. Costos totales de operación del escenario actual	104
Tabla 15. Costos totales de operación del escenario propuesto	105

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Histórico producción de crudo e inyección de agua 2005-2015	35
Gráfico 2. Carta dinamométrica del Pozo Tipo	61
Gráfico 3. Carta dinamométrica en Unidad Rotaflex	67
Gráfico 4. Tendencia al Buckling en Unidad Rotaflex	69
Gráfico 5. Cargas laterales en Unidad Rotaflex	69
Gráfico 6. Dogleg Severity en Unidad Rotaflex	70
Gráfico 7. Carta dinagráfica en Unidad Mark II	72
Gráfico 8. Tendencia al Buckling en Unidad Mark II	73
Gráfico 9. Cargas laterales en Unidad Mark II	73
Gráfico 10. Carta dinagráfica en Unidad Maximizer II	75
Gráfico 11. Tendencia al Buckling en Unidad Maximizer II	76
Gráfico 12. Cargas laterales en Unidad Maximizer II	77
Gráfico 13. Carta dinagráfica en Unidad Convencional	79
Gráfico 14. Tendencia al Buckling en Unidad Convencional	80
Gráfico 15. Cargas laterales en Unidad Convencional	81
Gráfico 16. Carta dinagráfica en Unidad Hidráulica	82
Gráfico 17. Tendencia al Buckling en Unidad Hidráulica	83
Gráfico 18. Cargas laterales en Unidad Hidráulica	84
Gráfico 19. Buckling en Unidad Mark II a máximas condiciones de operación	89
Gráfico 20. Resultados de la Matriz de evaluación	98
Gráfico 21. Flujo de caja escenario actual	106
Gráfico 22. Flujo de caja escenario propuesto	107

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Capacidad Volumétrica de la Bomba	62
Ecuación 2. Cálculo de la capacidad volumétrica de la bomba escenario ideal	63
Ecuación 3. Cálculo de la capacidad volumétrica de la bomba escenario real	63
Ecuación 4. Cálculo de la eficiencia volumétrica de la bomba	63
Ecuación 5. Cálculo de los ciclos por año de la varilla en la Unidad Rotaflex	86
Ecuación 6. Cálculo de la vida útil de la varilla en años Unidad Rotaflex	86
Ecuación 7. Determinación matemática del Valor Presente Neto	105
Ecuación 8. Valor Presente Neto escenario actual	106
Ecuación 9. Valor Presente Neto escenario propuesto	107

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Ventajas y desventajas Bombeo Mecánico	39
Cuadro 2. Unidades de Superficie de Bombeo Mecánico	43
Cuadro 3. Ventajas y Desventajas de las Bombas de Tubería	51
Cuadro 4. Ventajas y Desventajas de las Bombas Insertas	52
Cuadro 5. Ventajas y Desventajas de las Varillas COROD	57
Cuadro 6. Datos de entrada del simulador Srod	64
Cuadro 7. Comparación de resultados Unidades de Superficie	84
Cuadro 8. Tiempo de duración de la Varilla según tipo de Unidad de Superficie	85
Cuadro 9. Datos de entrada al simulador Srod con la Unidad Rotaflex con máximas condiciones	87
Cuadro 10. Resultados Simulación Unidades de Superficie con Máximas condiciones de operación en simulador Srod	87
Cuadro 11. Resultados Simulación Unidades de Superficie con condiciones de operación actuales en simulador RODSTAR	90
Cuadro 12. Parámetros evaluados en la Matriz de selección	94
Cuadro 13. Comparación de criterios de evaluación	95
Cuadro 14. Pesos de los criterios de evaluación	96
Cuadro 15. Resumen de resultados Matriz de Evaluación	97

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Distribución Unidades de Superficie	115
Anexo B. Estado Mecánico del Pozo Cira 2842	120
Anexo C. Survey del Pozo Cira 2842	123
Anexo D. Resultados de la simulación del Pozo Tipo con la Unidad de Superficie Rotaflex en Software Srod	127
Anexo E. Resultados de la Simulación del Pozo Tipo con la Unidad de Superficie Mark II a condiciones actuales en Software Srod	146
Anexo F. Resultados de la Simulación del Pozo Tipo con la Unidad de Superficie Maximizer II a condiciones actuales en Software Srod	165
Anexo G. Resultados de la Simulación del Pozo Tipo con la Unidad de Superficie Convencional a condiciones actuales en Software Srod	184
Anexo H. Resultados de la Simulación del Pozo Tipo con la Unidad de Superficie Hidráulica a condiciones actuales en Software Srod	203
Anexo I. Resultados de la Simulación del Pozo Tipo con la Unidad de Superficie Rotaflex a condiciones actuales en Software Rodstar	216
Anexo J. Resultados de la Simulación del Pozo Tipo con la Unidad de Superficie Mark II a condiciones actuales en Software Rodstar	218
Anexo K. Resultados de la Simulación del Pozo Tipo con la Unidad de Superficie Maximizer II a condiciones actuales en Software Rodstar	220
Anexo L. Resultados de la Simulación del Pozo Tipo con la Unidad de Superficie Convencional a condiciones actuales en Software Rodstar	222
Anexo M. Resultados de la Simulación del Pozo Tipo con la Unidad de Superficie Hidráulica a condiciones actuales en Software Rodstar	224

GLOSARIO

ANÁLISIS CINEMÁTICO: técnica matemática para calcular la posición, velocidad y aceleración de cualquier parte del mecanismo de la unidad de bombeo. Este suele ser usado con un modelo de ecuación de onda de la sarta de varillas para simular con la ayuda de software, el sistema completo de bombeo.

ANCLA DE LODO: Tubería de gran diámetro colocada fuera del ancla de gas para reducir la cantidad de sólidos transportados por el líquido de formación que ingresa en la bomba de varilla de succión del subsuelo.

ANCLA DE TUBERÍA: es un artefacto tipo empacadura usado para anclar el extremo inferior de la tubería al revestimiento y mantenerlo firmemente en sitio.

ASFALTENOS: son compuestos aromáticos y nafténicos de alto peso molecular, que se encuentran en dispersión coloidal en algunos crudos. Se definen como fracciones que se encuentran en el crudo, solubles en solventes aromáticos como el benceno, tolueno y xileno, pero insoluble en n-alcanos de cadena corta de bajo peso molecular.

BALANCÍN: es el accesorio de la unidad que mediante un permanente balanceo, acciona una bomba en el fondo del pozo que succiona el petróleo hacia la superficie.

BARRA PULIDA: barra lisa y uniforme de acero o de aleaciones que trabaja a través del prensa estopa de un pozo. Corresponde a la sección superior de la sarta de varillas, unida a la viga viajera de la unidad de superficie.

BARRIL DE TRABAJO: es un cilindro de la bomba que se encuentra en el fondo del pozo que ayuda a sus demás elementos sean protegidos y realicen su movimiento ascendente o descendente.

BOMBA DE FONDO: equipo que da la energía necesaria para producir los fluidos del fondo del pozo a superficie. Funciona bajo el principio de desplazamiento positivo y es de tipo pistón. Sus partes básicas son el cilindro, el émbolo y dos válvulas de bola.

BUCKLING O PANDEO: es un fenómeno de inestabilidad elástica que puede darse en elementos comprimidos y que se manifiesta por la aparición de desplazamientos transversales a la dirección principal de compresión.

CABEZAL DE TUBERÍA: tope de la sarta de tubería con válvulas de control y de flujo unidas a él. Este soporta la sarta de tubería en el pozo y provee de conexiones en superficie para controlar la producción de gas o petróleo.

CAJA REDUCTORA DE ENGRANAJES: caja de la unidad de bombeo que contiene los engranajes que convierten la alta velocidad y bajo torque de la unidad motriz en baja velocidad y alto torque necesarios para manejar la unidad de bombeo. Estos tienen típicamente una relación de reducción de 30:1.

CARGA PERMISIBLE: carga en la barra pulida ejercida sobre la caja de engranaje a su máxima capacidad de torque para una posición. Si la carga real en la barra pulida es menor que la carga permisible para ese punto, se dice que la caja no está sobrecargada.

CARTA DINAGRÁFICA: es un gráfico de cargas vs. Posición de la barra pulida durante un ciclo completo de bombeo. La medición directa se conoce como carta dinagráfica de superficie y se obtiene con un dinamómetro bien sea análogo o digital.

CARTA DINAMOMÉTRICA DE FONDO: es un gráfico de cargas vs. Posición donde el principal factor es el peso de la columna de fluido. Esto usualmente se calcula con programas que incluyan modelos de la ecuación de onda.

CONTRAPESAS: fundición de metal pesado para balancear las unidades de bombeo. La mayoría de las unidades son balanceadas por brazos.

DINAMÓMETRO: instrumento equipado que registra los datos de las cargas de la barra pulida contra las posiciones de esta en un pozo. Consiste en una caja registradora, un transductor de posición y una celda de carga. La celda y el transductor se unen a la barra pulida para registrar cartas dinagráficas.

DESVIACIÓN: es el ángulo con el cual un pozo diverge de la vertical. A menudo, los pozos son desviados o dirigidos en dirección horizontal para incrementar la exposición a las zonas productoras, intersectar un mayor número de fracturas o seguir una estructura compleja.

DESLIZAMIENTO: diferencia entre la velocidad del motor sin carga y su velocidad cuando está completamente cargado, expresado como porcentaje de cero carga. Al aumentar el torque en el motor, su velocidad disminuye y el motor desarrolla más torque.

DESBALANCE ESTRUCTURAL: la fuerza necesaria en la barra pulida para mantener la viga viajera horizontal con los brazos del pitman desconectados del pin. Esta fuerza es positiva cuando actúa hacia abajo y negativa cuando actúa hacia arriba.

DRENAJE GRAVITACIONAL: Mecanismo de recuperación primaria menos común, en el cual la fuerza de gravedad empuja a los hidrocarburos fuera del yacimiento, hacia el pozo y hacia la superficie. La fuerza de gravedad está

siempre presente en el yacimiento, pero su efecto es mayor en yacimientos gruesos de gas condensado y en yacimientos superficiales con buzamientos abruptos y de alta permeabilidad.

DOGLEG SEVERITY: es el grado de severidad del cambio angular, normalmente referida a una sección del pozo que cambia de dirección con más rapidez que la deseada, produciendo en general efectos colaterales

ECUACIÓN DE ONDA: modelo matemático usado para simular el comportamiento de la sarta de varillas. Usualmente se combina con un modelo de análisis cinemático de la unidad de bombeo para permitir el modelaje computarizado del sistema de bombeo de varillas.

EFFECTO DE CONTRABALANCEO: es usualmente la carga necesaria en la barra pulida para mantener los brazos de la unidad de bombeo en su ángulo correspondiente.

EFICIENCIA VOLUMÉTRICA: número que expresa porcentualmente la comparación entre la producción actual de un pozo y la producción teórica esperada por la bomba.

EMPACADURA DE PRODUCCIÓN: es un artefacto expandible pseudo-sellante usado para aislar el espacio anular entre el revestimiento y la tubería expandiéndose por medios mecánicos o hidráulicos.

GOLPE DE FLUIDO: Fenómeno que se produce cuando la tasa de la bomba de fondo de pozo supera la tasa de producción de la formación. También se puede deber a la acumulación de gas a baja presión entre las válvulas.

ÍNDICE DE PRODUCTIVIDAD (IPR): indicador que evalúa el rendimiento del pozo al representar gráficamente la tasa de producción con la presión de flujo del fondo del pozo.

INTERFERENCIA DE GAS: Fenómeno que se produce cuando el gas ingresa a la bomba de varilla de succión del subsuelo. No causa fallas prematuras en el equipo pero puede indicar poca eficiencia de la bomba.

JUNTAS: es un tramo de tubería que se ensambla para proporcionar un conducto a través del cual se producirá petróleo o gas de un pozo. Estos tienen en general 30 pies de largo con una conexión roscada en cada extremo.

KILOVATIO-HORA: unidad de energía eléctrica que indica el uso de mil vatios durante una hora.

LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL: sistema de equipos utilizados para asegurar la producción de fluidos desde el fondo del pozo hasta la superficie cuando esta no es suficiente para que el pozo fluya por sí solo. Ejemplos de estos sistemas son: bombeo mecánico, bombeo electrosumergible, levantamiento asistido con gas, bombeo hidráulico, bombeo de cavidades progresivas y/o la combinación de estos.

LONGITUD DE RECORRIDO O EMBOLADA: distancia de la barra pulida entre la base y el tope de una embolada. Depende del agujero del brazo de la unidad y en algunos casos estas tienen de dos a cinco posibles longitudes.

MALTENOS: es la fracción soluble de hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición que le da la calidad a un asfalto. Están constituidos por anillos aromáticos, nafténicos y con muy pocas cadenas parafínicas.

MOTOR: es la fuente de energía de la unidad de superficie y del sistema. Su comportamiento se da en la carrera ascendente, desacelerando para ayudar a disminuir el torque de la caja reductora reduciendo así las cargas altas en la barra pulida y durante la carrera descendente la unidad acelera para producir cargas mínimas en la barra pulida.

MOVIMIENTO RECIPROCANTE: es un movimiento repetitivo hacia arriba y hacia abajo o hacia adelante y hacia atrás, lo que permite que se puedan operar los motores alternativos y bombas.

NAFTÉNICOS: es un tipo de compuesto orgánico de carbono e hidrógeno que contiene una o más estructuras cíclicas saturadas. Los compuestos nafténicos a veces son llamados naftenos, cicloparafinas o bencenos hidrogenados.

NEMA: Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos, organización sin fines de lucro apoyada y organizada por fabricantes de equipos y piezas eléctricas. Establece sus normas según rangos de HP, velocidad, tamaño y dimensiones de ensamblaje, anexos, entre otros.

NIPLE DE ASENTAMIENTO: es un componente de la terminación de un pozo fabricado como una sección corta de tubería de paredes gruesas con una superficie interna trabajada que proporciona un área de sello y un perfil de fijación.

PARAFINAS: Un compuesto de hidrocarburo que a menudo precipita en los componentes de producción como resultado de los cambios de temperaturas y presiones producidos en el sistema de producción.

PISTÓN: es el accesorio de una bomba que mediante al movimiento que este genera, desaloja un mismo volumen de fluido equivalente al volumen ocupado por el pistón durante la carrera del mismo.

PRENSA ESTOPA: caja de empaque o cámara para mantener el material de empaque comprimido alrededor de la barra pulida en movimiento y prevenir la fuga de gas o líquido.

PITMAN: pieza que conecta los brazos de la manivela a la viga viajera en una unidad de bombeo.

REVESTIMIENTO: el tubo de acero usado en pozos para aislar los fluidos del hoyo y prevenir el derrumbe de las paredes de este. Además es usado en subsuelo para bloquear una formación de agua o gas y poder continuar la perforación.

ROTADOR DE VARILLAS: artefacto unido a la barra pulida que gira la sarta de varillas en cada recorrido para dar un desgaste más parejo.

SARTA DE VARILLAS: serie de varillas que conectan la barra pulida a la bomba de subsuelo en un pozo con bombeo por varillas. Es la línea de transición que transfiere energía desde la unidad de superficie a la bomba.

SUMERGENCIA: Diferencia en carga hidrostática entre la profundidad de la bomba y el nivel de fluido dinámico por encima de la bomba. Esta se monitorea continuamente para ajustar la tasa de flujo y evitar una condición de nivel agotado de la bomba.

TORQUE: fuerza de giro o fuerza que produce rotación o torsión, en la caja reductora, este depende de las cargas en la barra pulida y el momento de contrabalanceo.

UNIDAD DE BOMBEO: es el mecanismo que convierte el movimiento rotatorio del motor primario en movimiento vertical recíprocante necesario en la barra pulida.

UNIDAD MOTRIZ: cualquier fuente de movimiento o de poder, en la industria petrolera referente a máquinas y motores eléctricos.

VÁLVULA VIAJERA: es un tipo de válvula de bola y asiento que está fija al pistón, y viaja con este cuando realiza la carrera ascendente y descendente.

VARILLAS DE BOMBEO: varillas de acero, unidas para formar una sarta que conecta la bomba de subsuelo dentro de la tubería de producción con la unidad de bombeo en superficie.

VIGA VIAJERA: es la viga larga de acero sobre el poste que sostiene a las unidades convencionales, en el caso de las Unidades Mark II esta se mueve del lado opuesto a la cabeza del balancín.

ABREVIATURAS

”	Pulgadas
%	Por Ciento
°	Grados
°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ALS	Sistema de Levantamiento Artificial
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
API	<i>American Petroleum Institute</i> -Unidad calidad del crudo
AUTO.	Automatizado
BFPD	Barriles de fluido por día
BOPD	Barriles de petróleo por día
BP	Bombeo Mecánico
BPD	Barriles por día
bped	Barriles de petróleo equivalentes por día
BSW	Porcentaje de Agua libre y Sedimentos
BWIPD	Barriles de agua inyectados por día
CAPEX	Costos de Inversión
CHP	Presión en el Casing
Cp	Centipoise
CO₂	Dióxido de carbono
COROD	Varilla Continua
ECP	Ecopetrol
ESP	Bombeo Electrosumergible
ESPCP	Bombeo Electrosumergible por cavidades progresivas
FAP	<i>Fluid above pump</i>
FLAP	Columna de fluido por encima de la bomba
ft	Pies
G.E	<i>General Electric</i>
h	Espesor
HP	<i>Horse power</i> (Caballos de fuerza)
ICP	Instituto Colombiano de Petróleo
ID	Diámetro interno
IPR	Índice de productividad
KBOPD	Kilo barriles de petróleo por día
KBWIPD	Kilo barriles de agua inyectada por día
KBWPD	Kilo barriles de agua por día

Km	Kilómetros
Km²	Kilómetros cuadrados
KVA	Kilovoltio amperio
Kw	kilowatts
lb	Libra
lbs	Libras
LCI	La Cira Infantas
LLC	<i>Limited Liability Company</i>
LOWIS	<i>Life of Well Information Software</i>
MBIs	Miles de Barriles
md	Milidarcy
ml	Mililitros
MPY	<i>Mils per year</i>
N	Norte
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
OD	Diámetro externo
OPEX	Gastos de operación
Oxy	Occidental de Colombia LLC.
PCP	Bombeo de Cavidades Progresivas (<i>Progressive Cavity Pump</i>)
ppm	Partes por millón
PPRL	Carga máxima en la barra pulida
Ps	Presión de saturación
psi	<i>Pound Square Inch</i>
pulg	Pulgadas
PVT	Presión-Volumen-Temperatura
Py	Presión de yacimiento
RB	<i>Reservoir Barrels</i>
rpm	Revoluciones por minuto
Rs	Razón gas-petróleo en solución
S.A	Sociedad Anónima
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SCF	<i>Standard Cubic Feet</i>
So	Saturación de petróleo
So_i	Saturación inicial de petróleo
So_r	Saturación residual de petróleo
SPM	Strokes por minuto
STB	<i>Stock Tank Barrels</i>

Sw_i	Saturación de agua Inicial
Sw_{irr}	Saturación de agua residual
TIO	Tasa interna de oportunidad
TIR	Tasa interna de retorno
TTO	Tratamiento
VGA	Válvula antibloqueo de gas
VPN	Valor presente neto
USD	Dólar estadounidense
W	Oeste
WF	<i>Waterflooding</i>

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA INSTALACIÓN DE UNIDADES DE SUPERFICIE DE BOMBEO MECÁNICO PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN Y COSTOS DE OPERACIÓN DE LOS POZOS NUEVOS DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS.

DESCRIPCIÓN

Actualmente, el Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico es el método de producción más usado en el Campo La Cira Infantás, su principal característica es la de emplear una Unidad de Superficie para accionar un arreglo de bomba de fondo de pozo. De acuerdo con estudios realizados se tienen en cuenta las ventajas y desventajas que tienen las Unidades de largo recorrido, como lo son las Hidráulicas y Rotaflex, y las demás Unidades instaladas en el Campo como la Convencional, Mark II y Maximizer II.

En este proyecto se buscan alternativas para solucionar el problema que trae consigo la corta vida útil de los equipos de fondo del Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico. Para lograr lo propuesto, se tienen en cuenta las características e historial de producción del Campo y se establece un marco teórico de este sistema, que incluye información acerca de los equipos de superficie como los de fondo. Posteriormente, se evalúa técnicamente diseños del sistema por medio de los simuladores SROD y RODSTAR, para una Unidad Convencional, Hidráulica, Rotaflex, Mark II y Maximizer II con relación a una configuración de un Pozo Tipo establecido por la Empresa soporte. Esta evaluación permite definir unos criterios de selección usados para comparar las Unidades de Superficie entre sí por medio de una Matriz de evaluación.

Finalmente, se realiza la evaluación de la viabilidad financiera del proyecto por medio de la metodología del Valor Presente Neto que permite analizar la reducción en los costos de inversión y operativos asociados a los Pozos Nuevos del Campo La Cira Infantás.

PALABRAS CLAVES:

Instalación Unidades Superficie
Bombeo Mecánico
Pozos Nuevos
Campo Cira Infantás
Cuenca Valle Medio Magdalena.

INTRODUCCIÓN

Durante el último año la fuerte caída de los precios del petróleo en más del 50% ha afectado negativamente a las empresas de la industria y la economía de diferentes países productores. Ante éste panorama las compañías han optado por dar prioridad a proyectos que ayuden a aumentar o, por lo menos, mantener su rentabilidad sin afectar los niveles de producción.

Occidental de Colombia LLC., como ejecutor del Campo La Cira Infantas, busca reducir los costos en las operaciones sobre todo aquellas que influyen en la corta vida útil de los Sistemas de Levantamiento Artificial. Un aumento de fallas en estos, se traduce en un incremento de intervenciones en los equipos de fondo, lo cual lleva a tener costos de operación más altos y una diferida de producción significativa.

Por parte de la compañía ya se han evaluado e implementado acciones que permitan dar solución a las principales causas de falla presentadas en dicho sistema tales como corrosión, procedimientos operacionales y manufactura. Una nueva aproximación ha permitido identificar la necesidad de evaluar técnica y financieramente la instalación de las Unidades de Superficie para los Pozos Nuevos de las próximas campañas de perforación, con el propósito de establecer por medio de una simulación y matriz de evaluación, cómo sería el comportamiento de los componentes de fondo con el equipo de superficie y cuáles son las más viables para mitigar dicho problema en los pozos completados con bombeo mecánico.

Para la Empresa es de vital importancia este estudio, el cual puede ser una alternativa adicional a las evaluaciones que ya han sido estudiadas anteriormente y es importante para optimizar costos, maximizar recursos y mejorar las operaciones que involucran un aumento en la productividad de los pozos.

Por lo anterior la Unidad de Superficie seleccionada para los Pozos Nuevos del Campo La Cira Infantas de acuerdo con la evaluación técnica y financiera, se constituye en una alternativa atractiva para futuros proyectos y operaciones que pueda tener la Compañía a través de la información obtenida en el trabajo de grado.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar técnicamente la instalación de Unidades de Superficie de Bombeo Mecánico para la reducción de costos de inversión y costos de operación de los Pozos Nuevos en el Campo La Cira Infantas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las características y la historia de producción del Campo La Cira Infantas.
- Explicar el principio de funcionamiento del Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico.
- Especificar las características de las Unidades de Superficie que actualmente están instaladas en el Campo La Cira Infantas y las propuestas para los Pozos Nuevos.
- Describir los elementos de fondo del Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico usados en el Campo La Cira Infantas.
- Describir las características de un Pozo Tipo que establezca los parámetros necesarios para la simulación.
- Evaluar las Unidades de Superficie que actualmente están instaladas en el Campo La Cira Infantas y las propuestas para los Pozos Nuevos por medio de una simulación.
- Realizar una matriz para la selección de la Unidad de Superficie de Bombeo Mecánico de acuerdo con los resultados obtenidos en la simulación.
- Evaluar la viabilidad financiera de la instalación de la Unidad de Superficie de Bombeo Mecánico seleccionada para los Pozos Nuevos en el Campo La Cira Infantas por medio de la metodología Valor Presente Neto (VPN).

1. CARACTERÍSTICAS E HISTORIA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS

En este capítulo se hace una descripción de las características del Campo La Cira Infantas, haciendo énfasis en aspectos como la historia, ubicación geográfica, características del yacimiento y fluidos producidos así como el historial de producción del Campo.

1.1 HISTORIA

La historia del Campo La Cira Infantas, como lo documenta Vásquez¹, inicia en el año 1541 donde se mencionan los manaderos de petróleo utilizados por los indios en Latora, cerca de Barrancabermeja y donde solo en el Siglo XX, Bohórquez, De Mares y Barco aprovechan comercialmente la presencia de estos y otros manaderos naturales.

Hasta el año 1916 se iniciaron los trabajos de perforación, con el Pozo Infantas I, perforado por la Tropical Oil Company siendo completado el 11 de Noviembre de 1918 y cerrado temporalmente. El pozo Infantas II, es considerado como el pozo descubridor del Campo, perforado el 12 de Diciembre de 1917 y completado el 17 de Abril de 1918, alcanzando una profundidad de 1580 pies. La Tropical Oil Company se convirtió en un afiliado de la Standard Oil Company (New Jersey) en 1919, hasta que la concesión fue revertida por el gobierno de Colombia el 25 de Agosto de 1951 dando origen a la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), que había sido creada en 1948 mediante la ley 165 de ese año.

Como se muestra en la Figura 1, para el año 1940, la producción del Campo había alcanzado los 65,000 BOPD apoyándose en mecanismos de accionamiento naturales. Parte del gas producido fue reinyectado desde 1929 a 1972, pero estos volúmenes no medidos tuvieron poco impacto en las reservas y tasas de petróleo. Adicionalmente, se observó muy poco aporte acuífero. La inyección de agua inició en la mitad norte del Campo La Cira en 1957, mostrando resultados favorables, y siendo ampliado con éxito en otras áreas del Campo.²

Ecopetrol³ preparó e integró estudios para el desarrollo del potencial del Campo. Desde el primer momento se reconoció que para darle una nueva vida a La Cira-Infantas era necesario adelantar cuantiosas inversiones para la incorporación de

¹VÁSQUEZ C., Hernán. La historia del petróleo en Colombia. En: Revista Universidad Eafit [en línea]. No. 93 <<http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/download/1418/1290>>. [citado el 19 de Diciembre de 2015].

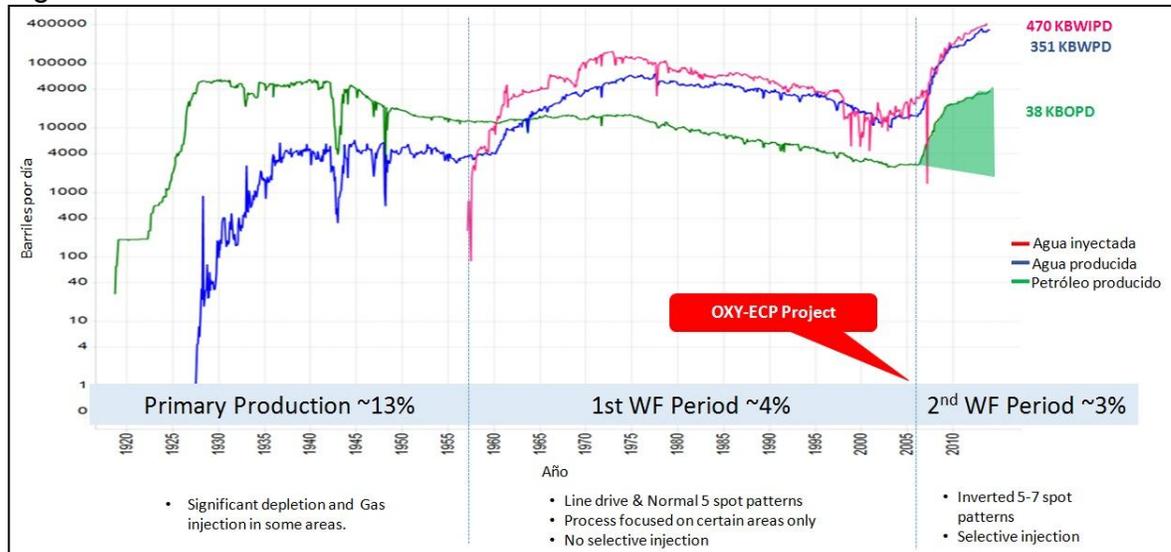
²PRIETO, María Elizabeth, et. al. Redevelopment Progress for Colombia's La Cira-Infantas Field. Paper: Society of Petroleum Engineers. 120794-MS SPE. 2009. p. 1.

³ECOPETROL. Carta Petrolera. [en línea] Edición 108. <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera108/rev_produccion2.htm>. [citado el 19 de Diciembre de 2015].

tecnologías que permitieran aumentar su factor de recobro y realizar actividades exploratorias en áreas aledañas. Es decir, la idea es aprovechar más lo que ya se tiene en subsuelo y, además, buscar nuevas reservas en los alrededores.

Para el año 2003, el Campo estaba produciendo solamente alrededor de 5,000 BOPD de 500 pozos productores. Un programa de abandono se puso en marcha desde el 2003 hasta el 2005. En diciembre de 2003, Occidental de Colombia, LLC y Ecopetrol comenzaron a trabajar en el desarrollo del Campo. Estos acordaron seguir un enfoque gradual en la asociación, la cual empezó en Septiembre 6 de 2005. Los resultados iniciales fueron buenos, y para Enero 15 del 2007, el acuerdo alcanzó la tercera y la última fase. Ecopetrol sirve como operador, y Occidental sirve como ejecutor de las inversiones para el desarrollo.⁴

Figura 1. Rendimiento Histórico de La Cira-Infantas



Fuente: Gutiérrez, Jahir. et. al. Documento de Power Point: Failure Index Reduction Strategy for Artificial Lift Systems in La Cira-infantas Field. 2015. p. 4.

El Campo LCI ha sido marcado por diferentes etapas importantes a través de la historia. Entre ellas están la producción primaria; con significantes reducciones de la producción, inicios de inyección de gas en ciertas áreas del Campo y además se alcanzó el máximo de producción de este con 64.970 BOPD; también el Campo ha estado sujeto a diferentes métodos de recuperación secundaria, inyección de gas y de agua, esta última establecida en dos etapas diferenciadas una de la otra por el tipo de arreglo con el fin de aumentar la producción. En el 2006 empezó el desarrollo de la inyección de agua con la optimización del sistema de inyección,

⁴PRIETO, Op. cit., p. 2-3.

incrementando la producción de petróleo de 4.500 BOPD a 9.800 BOPD y la inyección de 12.000 BWIPD a 36.000 BWIPD.⁵

A partir de diciembre de 2014, el Campo tiene aproximadamente 1.000 pozos productores y 408 inyectoros. El sistema de levantamiento artificial más común es el Bombeo Mecánico (BP) con 760 pozos, seguido por el Bombeo de Cavidades Progresivas (PCP) con 135 pozos, el Bombeo Electrosumergible (ESP) con 99 pozos y el Bombeo Electrosumergible de Cavidades Progresivas (ESPCP) con 6 pozos. Las principales causas de fallas están asociadas con producción de arena, corrosión (CO_2 presente), y procedimientos de operación, entre otros.⁶

Históricamente, el Campo fue producido usando solamente Sistemas de Bombeo Mecánico con tasas promedio de producción menores a 200 BFPD. Con el nuevo desarrollo del Campo en 2006, las nuevas condiciones de producción desafiaron los Sistemas de Bombeo Mecánico para lograr las tasas de producción requeridas, abriendo camino para implementar diferentes tipos de Sistemas de Levantamiento Artificial.

Debido al aumento de producción de sólidos, el Sistema de Bombeo de Cavidades Progresivas fue probado e implementado en 2006, y estos sistemas se incrementaron rápidamente a casi 100 pozos en tres años. Regulaciones sociales y ambientales limitaron la disponibilidad de nuevas plataformas de pozos, reduciendo la opción de perforar pozos verticales, como consecuencia de esto. La tortuosidad de los pozos genera un incremento de número de fallas debido al desgaste en varillas y tuberías por la fricción combinado con la corrosión. En 2009, El Sistema de Bombeo Electrosumergible fue instalado en pozos con altas tasas de flujo (1.500 BFPD) como una solución a estos problemas. En 2011, el Sistema de Bombeo Electrosumergible de Cavidades Progresivas fue evaluado e implementado en pozos que tienen fallas asociadas con la producción de arena.⁷

Desde el comienzo de la actividad en el Campo La Cira-Infantas, hace alrededor de 100 años, varios Sistemas de Levantamiento Artificial (ALS) han sido usados en orden para producir fluidos de cada pozo. Después del 2005, el Campo ofrece diferentes condiciones dependiendo del estado maduro de la inyección de agua, el alto porcentaje de agua, las altas y bajas tasas de flujo, el gas libre y los fluidos corrosivos.

⁵MONROY, Manuel, et. al. Failure Index Reduction Strategy for Artificial Lift Systems in Cira Infantas Field. Paper: Society of Petroleum Engineers. 173950-MS SPE. 2015. p. 1.

⁶Ibid., p.1.

⁷Ibid., p.1-2.

Normalmente, los Sistemas de Levantamiento Artificial como BP, PCP, ESP y ESPCP, son los sistemas usados para producir los fluidos totales del Campo. La distribución por cada ALS, a partir del 2015 se muestra en la Figura 2, teniendo el Bombeo Mecánico una mayor participación en cuanto a los demás Sistemas de Levantamiento Artificial.⁸

Figura 2. Distribución de los ALS en La Cira-Infantas

System	Wells	%
BP	760	76%
PCP	135	14%
ESP	99	10%
ESPCP	6	1%

Fuente: RUBIANO, Edward, et. al. Run Life Improvement by Implementation of Artificial Lift Systems Failure Classification and Root Cause Failure Classification. Paper: Society of Petroleum Engineers. 173913-MS SPE. 2015. p. 3.

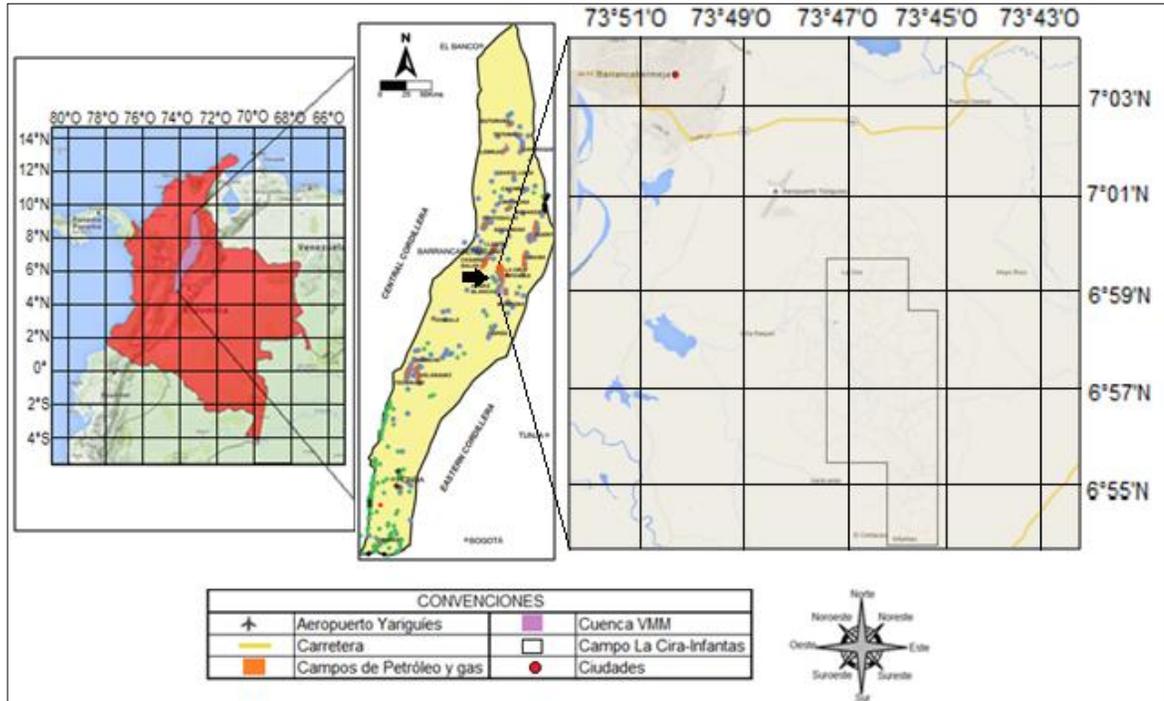
1.2 LOCALIZACIÓN

El Campo La Cira Infantas es el primer Campo petrolero descubierto en Colombia, Sur América, considerado el más importante del país hasta el descubrimiento del Campo Caño Limón, ubicado en los Llanos Orientales en 1984. El Campo se encuentra en el Valle Medio del Magdalena, cerca del centro del país, con coordenadas 7°04'N, 73°47'O. Se puede acceder por vía terrestre a una distancia de 22 km de Barrancabermeja al Nor-Oeste, 450 km de la Costa Caribe de Barranquilla, 250 Km al Norte de Bogotá, la capital de Colombia y 12 Km Nor-Oeste se encuentra el Aeropuerto de Yariguíes como se muestra en la Figura 3. El Campo abarca un área de aproximadamente 160 km² y se ha caracterizado por ser el de mayor producción a lo largo de la historia en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.⁹

⁸RUBIANO, Edward, et. al. Run Life Improvement by Implementation of Artificial Lift Systems Failure Classification and Root Cause Failure Classification. Paper: Society of Petroleum Engineers. 173913-MS SPE. 2015. p. 2.

⁹SOLANO DÍAZ, Álvaro Andrés. Análisis de información obtenida de registros de pozos y del modelo petrofísico y su integración con la geología del yacimiento para soportar el plan de desarrollo del Campo La Cira Infantas. Bucaramanga, 2011, p. 21. Trabajo de grado (Geólogo). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Disponible en el catálogo en línea de la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander: <<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1134/2/139130.pdf>>

Figura 3. Ubicación Geográfica



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Base de información petrolera EPIS. [En línea]. <<http://migep.anh.gov.co:3021/InicioGeoVisor.aspx>>. Modificado por autores.

1.3 CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO Y DE LOS FLUIDOS DEL CAMPO LA CIRA-INFANTAS.

El Campo La Cira-Infantas se encuentra dividido en diferentes zonas, en las cuales las propiedades del yacimiento y las características del fluido difieren entre cada una de ellas. Las propiedades de yacimiento más importantes se observan en la Tabla 1, tales como el área, tope de formación, espesor, temperatura, presión de saturación y propiedades petrofísicas como la porosidad, permeabilidad y saturación de agua inicial (S_{wi}), en zonas específicas del Campo La Cira-Infantas. En la Tabla 2 se muestran las diferentes características del fluido producido del Campo en las mismas zonas, así como el tipo de crudo.

1.3.1 Propiedades del yacimiento del Campo La Cira-Infantas.¹⁰ En el Campo se realizó la evaluación petrofísica de las Formaciones Mugrosa y Colorado en

¹⁰ECOPETROL-ICP. Evaluación Integrada de Yacimientos del Campo La Cira-Infantas. 1999. Citado por: GARZÓN CAMACHO, Joel. Análisis de distribución y eficiencia de la inyección de agua en un sector del área 3W del Campo La Cira-Infantas a través de trazadores radioactivos. Bucaramanga, 2009, p. 23. Trabajo de grado (Ingeniero de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Disponible en el catálogo en línea de la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander: <<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/742/2/132304.pdf>>

823 pozos, que permitieron realizar el cálculo de porosidad y permeabilidad a partir de los perfiles disponibles para cada pozo. Además se establecieron las correlaciones para el cálculo de permeabilidades relativas y saturaciones originales basadas en datos de presión capilar, permitiendo definir zonas acuíferas y zonas afectadas por inyección de agua dulce para los pozos perforados después de la inyección, procedimiento que actualmente solo está enfocado en la Zona C del Campo.

Tabla 1. Propiedades del Yacimiento del Campo La Cira-Infantas

PARÁMETROS	ZONA				
	LA CIRA			INFANTAS	
	A	B	C	B	C
Área (acres)	1492	3444	7438	1171	2778
Tope (ft)	820	1600	3070	900	2390
Espesor neto (ft)	227	257	290	257	290
Porosidad promedio (%)	24	21	22	21	22
Permeabilidad promedio (md)	111	40	95	40	95
Temperatura de Yacimiento, °F	92	98	105	85	95
Presión de Saturación, psi	640	715	1570	500	945
Swi (%)	45	45	45	45	45
Mecanismo de producción	Gas Disuelto			Drenaje Gravitacional Gas Disuelto	

Fuente: ECOPELROL. Base de Archivos del Campo La Cira-Infantas: El Centro. 2005.

1.3.2 Caracterización del fluido del Campo La Cira-Infantas.¹¹ El crudo del Campo es un aceite negro que se encuentra en el rango de los medianos a pesados y no presenta grandes diferencias entre zonas. Las principales características de los crudos por zona se resumen en la Tabla 2. Se conoce que el crudo contiene compuestos de alto peso molecular como parafinas, asfaltenos y maltenos, los cuales pueden precipitar en las vecindades del pozo, constituyéndose en potenciales causas de daño de formación.

¹¹Ibíd., p. 23-24.

Tabla 2. Propiedades del fluido del Campo La Cira-Infantas

PROPIEDAD	ZONAS				
	LA CIRA			INFANTAS	
	A	B	C	B	C
Factor Volumétrico @ Ps y Py RB/STB	1,067	1,075	1,08	-	1,0
Solubilidad Rs, SCF/STB	70	93	181	93	200
Gravedad API	18-24	20-27	16-25	25	24-28
Viscosidad, cp	50 cps @100°F	11,4 cps @ 98°F y 650psi	19 cps @105°F y 1570psi	11,4 cps @ 98°F y 650psi	5,5cps
Salinidad, ppm NaCl	(10-15)ml	(15-25)ml	(25-40)ml	(15-25)ml	(20-40)ml
Tipo de crudo	Nafténico			Nafténico-Parafínico	

Fuente: ECOPETROL. Base de archivos del Campo La Cira-Infantas: El Centro. 2005

1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN

Según Ecopetrol S.A.¹², en 2005 firmó una alianza con Oxy, empresa líder en operaciones de campos maduros, para invertir en la propuesta de recuperación y crecimiento del Campo La Cira-Infantas. Desde entonces, esta alianza se ha convertido en una gran oportunidad para crecer, ya que en 2005, el Campo producía tan solo 5.000 barriles de petróleo equivalente por día (bped). En contraste, cuando culminó la fase III del contrato con Oxy, el 31 de mayo de 2008, la producción superaba los 9.000 bped. Esto es, una tasa de incremento de más de 1.000 bped.

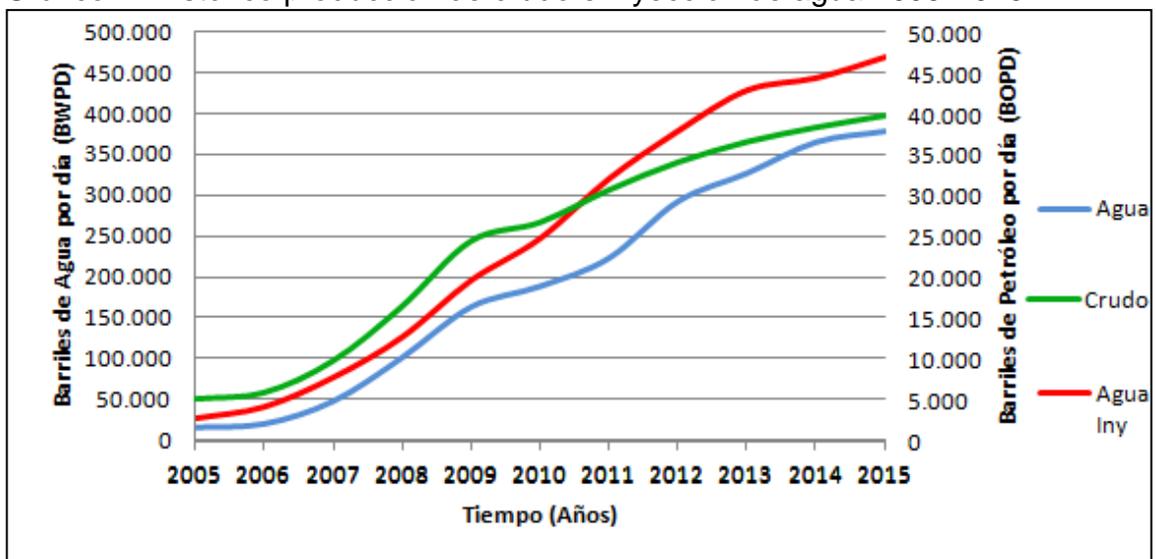
A lo largo de la historia, desde la firma del acuerdo de colaboración empresarial, se han profundizado los trabajos basados en recobro secundario por inyección de agua e incremento de la presión. Al 2005, el Campo tenía un factor de recobro aproximado del 17%. A partir de la alianza y el proyecto de optimización, el Campo podría llegar a incrementar dicho factor hasta un 35%. La Cira-Infantas pasó a producir 35.000 barriles de petróleo diarios, cifra histórica al 31 de Mayo del 2012, donde se habían perforado 31 pozos productores de crudo y 22 pozos inyectoros de agua en la fase de desarrollo, además de 254 actividades de optimización de fondo y superficie y cambios en los Sistemas de Levantamiento.

¹²ECOPETROL. Carta Petrolera: La Cira-Infantas casi un siglo después. El Campo de la eterna juventud. [en línea] Edición 129 <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera_129/produccion.html>. [citado el 26 de enero de 2016].

Para el 30 de Agosto del 2012, el Campo tuvo una producción puntual de 36.561 bped superando los 35.000 bped del 31 de Mayo del mismo año. En el Gráfico 1 se puede observar el histórico de producción de crudo, agua e inyección de agua promedio anual del Campo desde el inicio del contrato de colaboración empresarial de Ecopetrol con Oxy, es decir, en el año 2005. A partir de la firma de ese contrato se han desarrollado estrategias para aumentar la producción basado en la mejora de procesos incluyendo la cadena de suministros, el diseño y los procedimientos de instalación, que ha permitido incrementar la producción de La Cira-Infantas a más de 34.000 bped. Para Diciembre de 2015 se han producido aproximadamente 38.000 bped de crudo, así como 351.000 bped de agua y 470.000 bped de agua inyectada.

En las primeras tres fases del contrato de producción incremental con Occidental de Colombia, esta última realizaba 100% de las inversiones y recibía 48% de la producción. En la Fase IV del contrato, la fase de desarrollo, Ecopetrol invierte el 48% y recibe el 52% de la producción.¹³

Gráfico 1. Histórico producción de crudo e inyección de agua 2005-2015



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Base de datos La Cira Infantas: Producción. 2015

¹³ECOPETROL, Op. cit.

2. GENERALIDADES DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBEO MECÁNICO

El Bombeo Mecánico es el sistema más común de los Métodos de Levantamiento Artificial. Es el más antiguo y usualmente el más económico, debido a su fácil mantenimiento cuando es diseñado y operado apropiadamente. En este capítulo se describe el principio de funcionamiento de la Unidad Motriz y las diferentes Unidades de Superficie del Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico necesarias para el desarrollo del trabajo de grado, en cumplimiento del segundo y tercer objetivo de este.

2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El Bombeo Mecánico es uno de los sistemas que ha mostrado su versatilidad en la explotación de pozos con diferentes características como la geometría, fluido, manejo de sólidos, entre otros. Su función es extraer fluidos mediante un movimiento recíprocante originado por una unidad de bombeo superficial, que transmite la energía por medio de la sarta de varillas a la bomba, colocada dentro de la tubería de producción en el fondo, cerca del yacimiento. La bomba, transporta el fluido que va desde la formación hasta el fondo del pozo, disminuyendo la presión en el fondo de este. Un diferencial de presión grande entre la formación y el fondo del pozo incrementa la tasa de producción.¹⁴

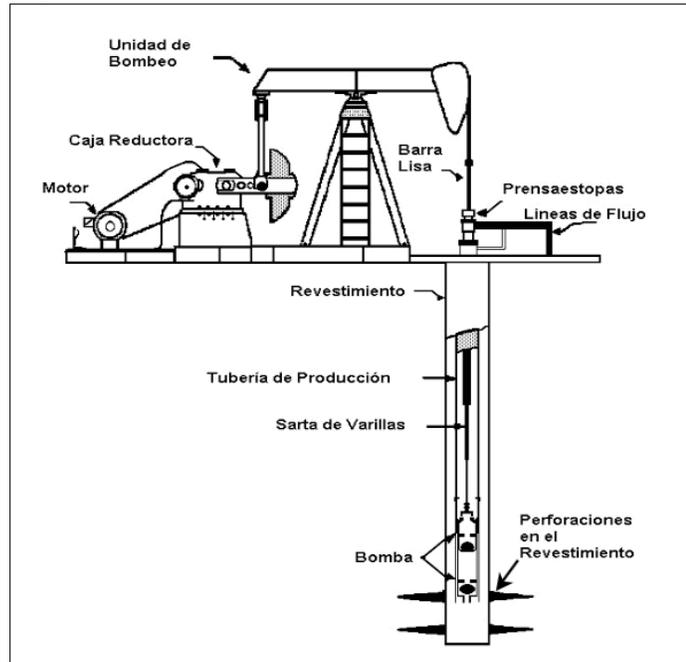
Como se muestra en la Figura 4, el sistema de bombeo por varillas consiste en un equipo de superficie y de fondo. El equipo de superficie incluye la unidad motriz; motor eléctrico o motor a gas, unidad de bombeo, barra pulida o lisa, prensa estopa o caja de empaques, cabezal y líneas de flujo. El equipo de fondo incluye el revestimiento, tubería de producción, sarta de varillas, bomba de fondo y de algunos accesorios que se abarcarán en el Capítulo 3.

Durante muchos años se fueron efectuando mejoras a este sistema, especialmente en lo que hace referencia a los materiales empleados, lo que mejoró su diseño para hacerlo adaptable a cualquier tipo de yacimiento y fluido que se desee levantar.¹⁵

¹⁴VILLEGAS MONTIEL, David Vicente. Aplicación de un nuevo sistema de bombeo mecánico no convencional con tubería flexible para la explotación de pozos de crudo pesado. México D.F., 2014, p. 4. Trabajo de grado (Ingeniero Petrolero). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Disponible en el catálogo en línea de la Biblioteca de la Universidad Nacional Autónoma de México: <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/3276>>

¹⁵THETA ENTREPRISE, INC. Manual de Bombeo Mecánico: Optimización de Bombeo Mecánico. 2 ed. California-USA. 2005. p. 27.

Figura 4. Sistema de Bombeo Mecánico



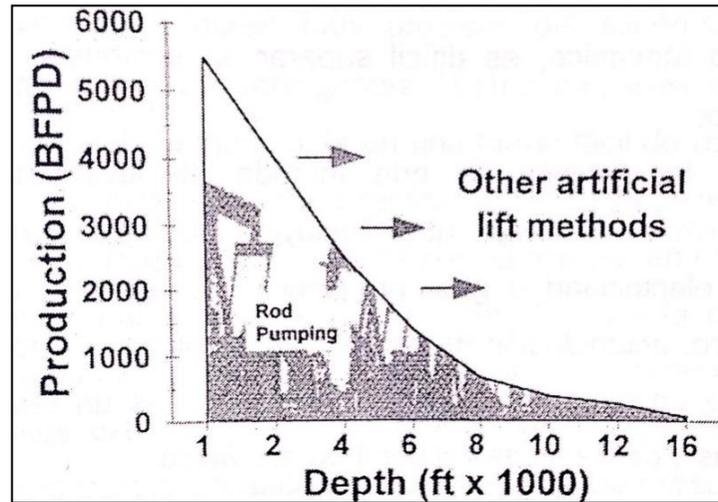
Fuente: Theta Enterprise, Inc. Manual de Bombeo Mecánico: Optimización de Bombeo Mecánico. 2005. p. 28.

Como cualquier otro método de levantamiento artificial, el bombeo mecánico tiene sus ventajas y desventajas que son importantes cuando se determina qué método de levantamiento usar para una aplicación en particular. Uno de los factores más importantes a considerar es la máxima tasa de producción que se desean en los pozos. La Figura 5 muestra el rango de aplicación del bombeo mecánico, el cual dependiendo de la profundidad de la bomba, el sistema puede no cumplir con la capacidad de producción deseada. La capacidad de producción del bombeo mecánico cae rápidamente con la profundidad de asentamiento de la bomba. Sin embargo, en el rango en el que puede usarse el Bombeo Mecánico, es difícil superar su eficiencia, versatilidad y facilidad de servicio.¹⁶

Además de la capacidad de producción y de la profundidad, existen otros rangos de aplicación del Sistema de Bombeo Mecánico referente a la temperatura de operación y la desviación que se tienen en los pozos, como se muestra en la Tabla 3. La necesidad de producir pozos más profundos con volúmenes más grandes de líquido, ha requerido la evolución de unidades de carrera larga para varillas de succión, con la característica de utilizar las mismas bombas y varillas comunes pero con longitudes de carrera sustancialmente más largas que reduzcan las causas de falla del sistema.

¹⁶Ibíd., p. 19.

Figura 5. Rango de aplicación del Bombeo Mecánico



Fuente: Theta Enterprise, Inc. Manual de Bombeo Mecánico: Optimización de Bombeo Mecánico. 2005. p. 20.

Tabla 3. Rango de aplicación Sistema de Bombeo Mecánico.

RANGO TÍPICO DE APLICACIÓN		
	Mínimo	Máximo
Profundidad (ft)	102-11000	16000
Volumen (BPD)	5-1500	5000
Temperatura (°F)	100-350	550
Desviación (°)	0-20	0-90

Fuente: VILLEGAS MONTIEL, David Vicente. Aplicación de un nuevo sistema de bombeo mecánico no convencional con tubería flexible para la explotación de pozos de crudo pesado. 2014. p. 5.

La decisión de qué método de levantamiento utilizar depende de muchos factores que incluyen: localización geográfica, disponibilidad de electricidad o gas, producción de arena u otros sólidos, desviación del pozo, acumulación de escamas y parafinas, costos del equipo, entre otros. Una correcta selección es fundamental para la rentabilidad a largo plazo de un pozo o un grupo de ellos, ya que un error en esta puede reducir sustancialmente la producción y aumentar los costos de explotación. Las principales ventajas y desventajas del bombeo mecánico se muestran en el Cuadro 1.¹⁷

¹⁷Ibíd., p. 19.

Cuadro 1. Ventajas y desventajas Bombeo Mecánico

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil operación y servicios. • Puede cambiarse fácilmente la tasa de producción, cambiando la velocidad de bombeo o la longitud de carrera. • Se puede disminuir la presión de entrada de la bomba para maximizar la producción. • Usualmente es el método de levantamiento artificial más eficiente. • Pueden intercambiarse fácilmente las unidades de superficie. • Pueden utilizarse motores a gas si no hay disponibilidad eléctrica. • Puedes usar controladores de bombeo para minimizar golpe de fluido, costos de electricidad y fallas de varillas. • Puede ser monitoreado de manera remota con un sistema controlador de bombeo. • Se pueden usar modernos análisis dinámicos de computadora para optimizar el sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es problemático en pozos desviados (inclinación >35° y dogleg severity 6°/100ft), debido a la fricción de las piezas que conduce a fallas mecánicas. • No puede usarse costa afuera por el tamaño del equipo de superficie ya que requiere gran espacio para su instalación y la limitación en la capacidad de producción comparado con otros métodos. • No puede manejar producción excesiva de arena. • La eficiencia volumétrica cae drásticamente cuando se maneja gas libre. • La profundidad de bombeo es limitada, principalmente por la resistencia mecánica del material de la varilla de succión. • No es oportuno en áreas urbanas.

Fuente: Theta Enterprise, Inc. Manual de Bombeo Mecánico: Optimización de Bombeo Mecánico. 2005. p. 19-20.

2.2 UNIDAD MOTRIZ¹⁸

La unidad motriz es típicamente un motor eléctrico o a gas. La función de la unidad motriz es suministrar la potencia que el sistema de bombeo necesita. Esta afecta el consumo de energía y las cargas de la caja de engranaje. Los caballos de fuerza (HP) del motor dependen de la profundidad, el nivel de fluido, velocidad de bombeo y balanceo de la unidad. El tamaño de la unidad motriz puede tener un impacto significativo en la eficiencia del sistema. Esto garantiza que estarán disponibles suficientes caballos de fuerza en el sistema pero al precio de bajar la eficiencia. Motores eléctricos alcanzan sus eficiencias más altas (90-95%) cuando las cargas están cercanas a la placa del motor. Cuando un motor está poco cargado la eficiencia es menor.

¹⁸Ibíd., p. 27-31.

Los motores eléctricos y a gas son componentes de bajo torque y altas revoluciones por minuto (>700 rpm). La variación de la unidad motriz afecta la caja de engranaje, las cargas en las varillas y también la velocidad de bombeo. Variaciones de velocidad altas (> 8SPM) de la unidad motriz reducen el torque neto en la caja de engranaje. En carrera ascendente, la barra pulida soporta las mayores cargas y el motor se desacelera. Debido a esta reducción de velocidad, la inercia de los contrapesos ayuda a reducir el torque de la caja de engranaje liberando energía cinética almacenada. En la carrera descendente la unidad acelera resultando en cargas mínimas sobre la barra pulida. Por lo tanto, variaciones de velocidad altas (>30%) en la unidad motriz aplanan las cartas dinamoográficas al compararse con unidades motrices de baja variación de velocidad (<10%). Esto resulta en rangos bajos de tensión hasta 149,20 kW (200 hp) y por ende en disminución de la fatiga en las varillas.

2.2.1 Motores Eléctricos. Son principalmente motores de inducción de tres fases. NEMA clasifica los motores según el deslizamiento y las características de torque durante el arranque. NEMA D es el motor de unidad de bombeo más ampliamente reconocido. Su rango de deslizamiento va desde 5% hasta 13%. Otros motores en el campo petrolero incluyen NEMA C con un máximo deslizamiento de 5% y NEMA B con un máximo deslizamiento de 3%.

2.2.2 Motores de Ultra Alto Deslizamiento. Son motores eléctricos con deslizamiento mayor al 13%. Estos son diseñados para variaciones altas de velocidad y pueden ayudar a reducir los altos torques (>320.000 pulg/lb) en la caja de engranaje y las cargas de las varillas. Se pueden calibrar en diferentes modos dependiendo del deslizamiento y torque en el arranque deseado.

Un dimensionamiento correcto del motor de ultra alto deslizamiento podría tener una variación de velocidad de hasta un 50%. Usualmente esto resulta en torques más bajos en la caja de engranaje y cargas en las varillas comparado con sistemas con unidades motrices de bajo deslizamiento. Este debe ser correctamente dimensionado y aplicado para las condiciones correctas del pozo para reducir el torque a través de las altas variaciones de velocidad. Un motor sobre diseñado puede no cargarse lo suficiente para variar la velocidad y podría realmente comportarse como un motor NEMA D.

2.2.3 Motores a Gas. Existen dos tipos, los motores de baja velocidad con uno o dos cilindros y los motores multicilindros de alta velocidad. Los motores de baja velocidad tienen velocidades de 700rpm o menores y alto torque. Los motores multicilindros pueden tener altas variaciones de velocidad hasta de un 35%.

Los motores a gas típicamente queman gas rentado y son utilizados en locaciones remotas sin disponibilidad de electricidad.

2.3 UNIDADES DE BOMBEO

La función de la unidad de bombeo es convertir el movimiento rotacional de la unidad motriz al movimiento ascendente y descendente de la barra pulida. Una unidad de bombeo apropiadamente diseñada tiene el tamaño exacto de caja de engranaje y estructura, también tiene suficiente capacidad de carrera para producir el fluido que se desea.

Todas las unidades de bombeo tienen características comunes, estas también tienen diferencias que podrían influenciar significativamente el comportamiento del sistema. Para maximizar la eficiencia del sistema, es necesario entender las ventajas y desventajas de las diferentes geometrías de las unidades de bombeo para las condiciones de los pozos. Esto puede hacerse simulando el sistema de bombeo con un moderno programa de diseño como el RODSTAR o SROD que pueden asertivamente modelar toda la geometría de las unidades de bombeo. Con tales programas de computadora puede predecirse la producción, cargas, tensión, torque y consumo de energía para diferentes geometrías de unidades de bombeo. Esta es la forma precisa de comparar unidades.¹⁹

Actualmente en el Campo La Cira-Infantas se encuentran instaladas Unidades de Bombeo Convencional, Mark II, Maximizer II y Rotaflex de diferentes designaciones. La Unidad de Superficie que ha sido propuesta para la evaluación es la Unidad Hidráulica. Por esta razón, más adelante se describen las características de los diferentes tipos de unidades a evaluar.

2.3.1 Diseño de la Unidad. El American Petroleum Institute (API) ha desarrollado un método estándar para describir las unidades de bombeo como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Designación Unidades de Superficie



Fuente: Theta Enterprise, Inc. Manual de Bombeo Mecánico: Optimización de Bombeo Mecánico. 2005. p. 32.

La letra **C** de la figura 6, indica el tipo de unidad, en este caso significa Unidad Convencional. Otros tipos pueden ser **M** que significa Mark II **A** referida a las unidades balanceadas por aire y **B** correspondiente a Balancín. También pueden

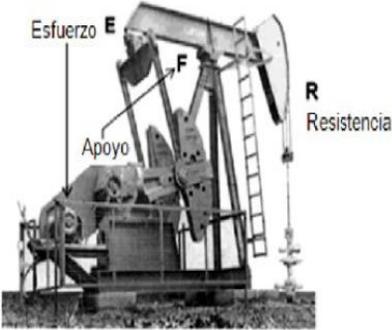
¹⁹Ibíd., p. 20.

verse otras combinaciones de letras simples o dobles para nuevos tipos de unidades de bombeo tales como **RM** para unidades Lufkin Mark Reversas. El primer número indica la capacidad de carga de la caja de engranaje o torque máximo en Mils de pulg-lb. El segundo número es la capacidad de la estructura en cientos de libras. El último número muestra la longitud máxima de carrera de la unidad en pulgadas. Las unidades de bombeo usualmente tienen desde 2 hasta 5 longitudes de carrera.²⁰ Algunas Unidades como la Maximizer II, Rotaflex e Hidráulicas no son designadas por el API para describirlas en el diseño de la Unidad, aunque su denotación se ajusta al mismo significado que establece la norma.

2.3.2 Geometría de las Unidades de Superficie. En el Cuadro 2, se observan las diferentes Unidades de Superficie de Bombeo Mecánico instaladas y propuestas en el Campo La Cira para la evaluación técnica y financiera. Cada una de estas describe su funcionamiento y objetivo principal de operación, junto con ventajas o desventajas propias de la Unidad, así como una imagen ilustrativa de cada una.

²⁰Ibíd., p. 32-33.

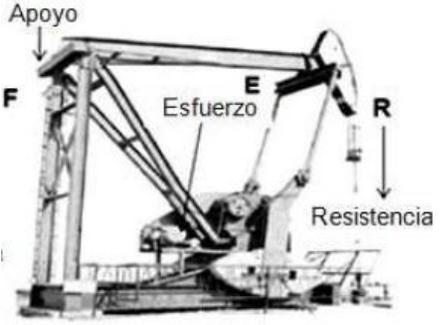
Cuadro 2. Unidades de Superficie de Bombeo Mecánico

UNIDAD DE BOMBEO	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS Y DESVENTAJAS	IMAGEN
Convencional	<p>Es la más antigua y la más usada debido a su fácil manejo y mínimo mantenimiento. Su balanceo es a través de contrapesos y su rotación es en contra de las manecillas del reloj, aunque puede operar en sentido contrario.</p> <p>Como se muestra en la imagen, la unidad convencional se caracteriza por ser de clase I, la cual cuenta con el apoyo F, el esfuerzo E se da en el motor principal y la resistencia R de la carga del pozo se aplica sobre la cabeza del machín.</p> <p>Estas Unidades, usualmente son instaladas a profundidades que oscilan entre los 197 y 9843 pies y a temperaturas máximas de 550.4°F, por esto es altamente utilizado en pozos de crudos pesados.²¹</p>	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Costos de mantenimiento bajos. • Cuesta menos que otras unidades. • Usualmente es mejor con sarta de varillas de fibra de vidrio. • Puede bombear más rápido que las Unidades Mark II sin problemas. • Requiere menos contrabalanceo que las Mark II. <p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • En varias aplicaciones no es tan eficiente como la Unidad Mark II u otros tipos de Unidades. • Podría requerir cajas de engranaje más grandes que otros tipos de unidad, especialmente con varillas de acero.²² 	 <p>Fuente: VILLEGAS MONTIEL, David Vicente. Aplicación de un nuevo sistema de bombeo mecánico no convencional con tubería flexible para la explotación de pozos de crudo pesado. 2014. p. 76.</p>

²¹VILLEGAS, Op. cit., p. 76-77.

²²THETA ENTERPRISE, Op. cit., p. 33.

Cuadro 2. (Continuación)

UNIDAD DE BOMBEO	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS Y DESVENTAJAS	IMAGEN
Mark II	<p>Es un sistema de palanca clase III, el principal objetivo de este tipo de unidad es disminuir el torque y los requerimientos de potencia de las Unidades Convencionales. Como se muestra en la imagen, el reductor de engranajes es colocado al frente. Además el esfuerzo E y la resistencia R se aplican en un mismo extremo del balancín con relación al apoyo F, que se encuentra en el otro extremo.²³ Las contrapesas están colocadas en una manivela de dos brazos separados y opuestos a la manivela de los pines con un ángulo de desfase que oscila entre 19 y 28°, este desfase hace que el torque de las pesas se atrase respecto al de la carga de fluidos al comienzo de la carrera ascendente y que se adelante al comienzo de la descendente Esta característica exclusiva garantiza una variación más uniforme del torque neto durante todo el ciclo completo de bombeo.²⁴</p>	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tiene menor torque en la mayoría de los casos. • Podría costar menos (-5-10%) comparada con otras unidades. • Es más eficiente que las Unidades Convencionales. • Mejor llenado del barril de trabajo. <p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • En varias aplicaciones no puede bombear tan rápido como una convencional debido a su velocidad en la carrera descendente. • La Unidad es unidireccional y siempre debe ser impulsada en una dirección específica. • En caso de existir golpe de fluido, podría causar más daño a la sarta de varillas y la bomba. • Puede colocar la base de la sarta de varillas en severa compresión causando fallas por pandeo y experimentar torques altos cuando se usan varillas de fibra de vidrio.²⁵ 	 <p>Fuente: VILLEGAS MONTIEL, David Vicente. Aplicación de un nuevo sistema de bombeo mecánico no convencional con tubería flexible para la explotación de pozos de crudo pesado. 2014. p. 76.</p>

²³VILLEGAS, Op. cit., p. 76.

²⁴TAKÁCS, Op. cit., p. 101.

²⁵THETA ENTERPRISE, Op. cit., p. 33.

Cuadro 2. (Continuación)

UNIDAD DE BOMBEO	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS Y BENEFICIOS	IMAGEN
Maximizer II ²⁶	<p>La Unidad Maximizer II ofrece diferentes beneficios a través de sus características de diseño únicas, obteniendo una mayor eficiencia mecánica que permite una mayor rotación del cigüeñal durante la carrera ascendente de la bomba. Esto crea un torque neto menor que cualquier otra unidad de bombeo en la mayoría de las condiciones del pozo. La geometría mejorada ofrece más levantamiento con menos caballos de potencia además de mayor productividad y eficiencia.</p> <p>En el diagrama de cargas permisibles, la forma más horizontal y el amplio rango permisible de carga para cualquier valor dado de contrapeso hacen que esta unidad sea más favorable para diferentes condiciones de operación.</p> <p>Como se muestra en la imagen, esta unidad es una geometría mejorada de la clasificación API; clase I, de montaje trasero con contrapeso por etapas, lo que resulta en versatilidad y energía eficiente que maximiza la producción y minimiza los costos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • El torque reductor en la caja de engranajes es menor en algunos casos, lo que permite una unidad más pequeña con mayor eficiencia mecánica. • Bajos requerimientos de caballos de fuerza permite el uso de un motor primario más pequeño para reducir los costos de levantamiento. • Una carrera ascendente más lenta permite más tiempo para el llenado de la bomba. • Mayor distancia a la cabeza de pozo hace así el mantenimiento más fácil y seguro. • La aceleración de la barra pulida se reduce sustancialmente durante el primer 40% de la carrera descendente. • Los efectos del golpe de fluido se reducen, lo que resulta en un levantamiento más largo de la varilla y menos tiempo de inactividad. • La Unidad por lo general requiere de 6 a 8% menos de energía para levantar la misma cantidad de líquido. 	

²⁶WEATHERFORD. Pumping Units: Reciprocating Rod-Lift Systems. 2005-2007. p. 12-13.

Cuadro 2. (Continuación)

UNIDAD DE BOMBEO	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS Y DESVENTAJAS	IMAGEN
Rotaflex ²⁷	<p>Es un sistema de carrera larga; de hasta 366 pulg, lo que permite levantar la producción de pozos más profundos o de aceites viscosos. El movimiento lineal ascendente-descendente se realiza mediante una correa que se desliza por un cilindro y que está acoplada por un extremo a la barra pulida y por el otro a una caja de contrapeso que permite balancear la unidad.</p> <p>Esta Unidad utiliza las innovaciones tecnológicas y de diseño probado para proporcionar una excelente eficacia y rentabilidad para pozos profundos, problemáticos y de alto volumen. La Unidad prácticamente no tiene la velocidad mínima para garantizar una mayor flexibilidad. Utilizar velocidades más bajas con carreras más largas se traduce en un completo llenado de la bomba. Informes de análisis de pozos indican que la Unidad Rotaflex registra repetidamente un nivel de eficiencia del 61,2%, además de que puede reducir sustancialmente los costos de energía entre un 15 y 20%.</p>	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La velocidad constante y pocos strokes por barril aumentan la vida útil de la Unidad, la bomba de fondo y la sarta de varillas. • La extendida longitud de la carrera, permite un menor número de ciclos, lo que resulta en una mayor eficiencia y fiabilidad del sistema. • La carrera más larga de fondo de pozo, proporciona una mejor relación de compresión de la bomba que ayuda a eliminar los problemas por bloqueo de gas. • El corto radio del brazo de torsión, reduce la demanda necesaria de torque y permite el uso de un motor y reductor de engranajes más pequeño. <p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rutina preventiva más costosa, de hasta un 16% más. • Mantenimiento correctivo más frecuente, traduciéndose en costos más altos. • Su instalación es riesgosa. • La banda elástica es sensible a la ruptura. 	

²⁷Ibíd., p. 14-15

Cuadro 2. (Continuación)

UNIDAD DE BOMBEO	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	IMAGEN
Hidráulica ²⁸	<p>El principio de funcionamiento está asociado con el empuje de fluido hidráulico sobre pistones en carrera ascendente y descendente. Por debajo del primer pistón; parte superior del mástil, actúa un fluido hidráulico, el cual está conectado al acumulador de presión que en su parte superior contiene nitrógeno y en la parte inferior aceite hidráulico, el nitrógeno provee la presión necesaria para amortiguar el peso en carrera descendente y aportar potencia hidráulica en la carrera ascendente, logrando disminuir hasta en 2/3 la energía requerida para levantar el peso sobre la barra pulida. El segundo pistón ubicado en el mástil, es dirigido por una bomba hidráulica que aporta potencia por debajo de este en carrera ascendente y por encima en carrera descendente. El sentido de empuje del aceite hidráulico es direccionado por una válvula ubicada en la bomba, la cual recibe señales de los sensores de proximidad ubicados en el mástil, cambiando con esto el sentido de la carrera.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo de instalación. • Tiempo mínimo de instalación. • Patín de potencia disponible a gas, diesel o eléctrico. • Impacto ambiental mínimo. • No se requieren cables guía. Ajustes rápidos y fáciles de velocidad y de longitud de carrera. • Carreras ascendentes y descendentes balanceadas a través del patín de acumuladores. • La velocidad variable de la carrera permite un llenado óptimo de la bomba. 	

²⁸WEATHERFORD INTERNATIONAL LTD. Unidades Hidráulicas de velocidad variable 2. 2005. p. 2-4

2.3.3 Distribución de las Unidades de Superficie. Las unidades de superficie que se encuentran instaladas en el Campo, son las Unidades Convencionales, Mark II, Maximizer II y Rotaflex. Por su parte la Unidad propuesta para la evaluación es la Unidad Hidráulica.

En el Campo la Cira infantas, las diferentes Unidades de Superficie de Bombeo Mecánico han tenido un comportamiento durante el último año, en cuanto a la cantidad y distribución de instalación. En la Tabla 4, se observa la distribución que estas han tenido, independientemente del tipo de referencia que se encuentra instalada.

Tabla 4. Distribución Unidades de Superficie.

Unidades	Cantidad de pozos
Convencional	105
Mark II	360
Maximizer II	176
Rotaflex	4
Total	645

Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA LLC., Base DINASON. Hoja 1. 2015

En el Anexo A se observa un mapa de distribución de cada una de las Unidades de Superficie que se encuentran instaladas en el Campo, con el fin de identificar las zonas del Campo en las cuales se encuentran las Unidades de referencia evaluadas en el proyecto. Como se observa, la instalación de las diferentes unidades no depende de la zona que se evalúe, sino de las características que tenga el pozo a perforar.

3. ELEMENTOS DE FONDO DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBEO MECÁNICO Y CARACTERÍSTICAS DEL POZO TIPO

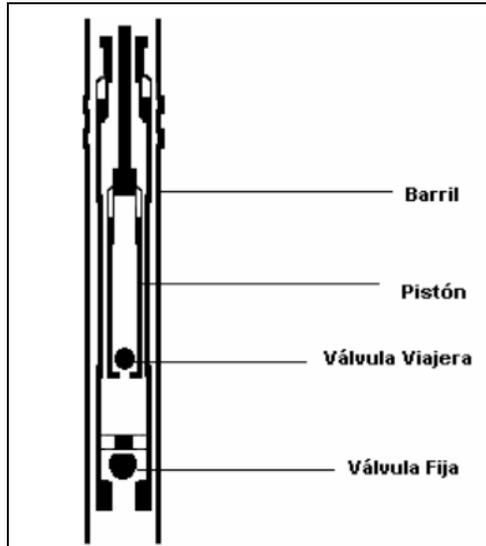
En este capítulo se describen los diferentes elementos de fondo empleados en el Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico, como lo son, las bombas de subsuelo con sus diferentes tipos, la sarta de varillas y algunos accesorios necesarios para la operación. Además se detallan los parámetros del pozo tipo seleccionado por la Empresa Occidental de Colombia para realizar la simulación, que permitirá seleccionar la Unidad de Superficie adecuada según las características de los Pozos Nuevos a perforar en el Campo La Cira Infantas, así como la configuración de este para la evaluación de las Unidades de Superficie, en cumplimiento del cuarto y quinto objetivo del trabajo de grado.

3.1 BOMBAS DE SUBSUELO

Las bombas de subsuelo utilizadas en el Bombeo Mecánico trabajan sobre el principio del desplazamiento positivo y son del tipo cilindro-pistón. Como se observa en la Figura 7, sus partes básicas son el barril de trabajo o cilindro, el émbolo o pistón y las dos válvulas de bola, viajera y fija. La válvula que viene agarrada al barril de trabajo actúa como una válvula de succión y se denomina válvula fija. La otra válvula contenida en el émbolo, actúa como una válvula de descarga y se llama válvula viajera. Dichas válvulas operan como válvulas tipo cheque y sus movimientos de apertura y cierre por diferencia de presiones, durante el movimiento alterno del émbolo, proporcionan un medio para desplazar los fluidos del pozo hasta la superficie.²⁹

²⁹TAKÁCS, Op. cit., p. 47.

Figura 7. Partes de la bomba de subsuelo



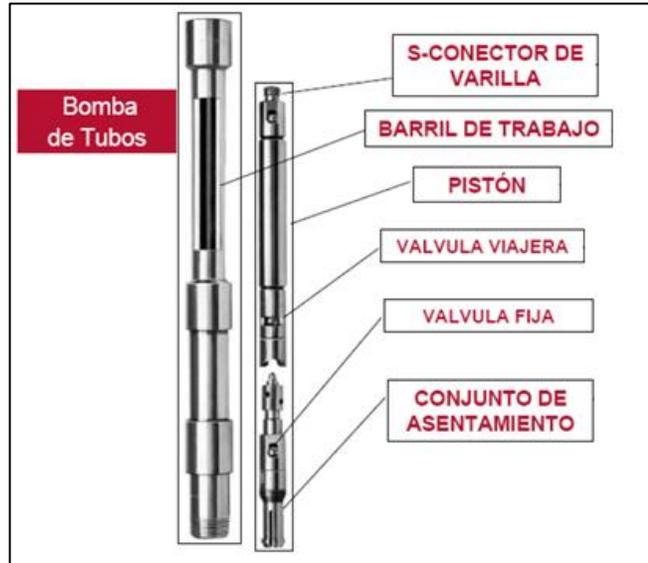
Fuente: Theta Enterprise, Inc.
Manual de Bombeo Mecánico:
Optimización de Bombeo
Mecánico. 2005. p. 32.

Existen básicamente dos tipos de bombas que son, las de tubería y las insertables o de varillas. Sus diferencias básicas radican en la forma como está instalado en el pozo el barril de trabajo.

3.1.1 Bomba de Tubería. Como se observa en la Figura 8, en esta bomba el barril de trabajo forma parte integral de la sarta de la tubería de producción, la cual está conectada al fondo de la tubería. Esta construcción permite utilizar un barril con un diámetro ligeramente inferior al diámetro interno de la tubería de producción. Su principal desventaja está en el que el barril solo puede servir sacando la sarta completa de la tubería.³⁰

³⁰Ibíd., p. 47.

Figura 8. Partes básicas de una Bomba de tubería



Fuente: TAKACS, Gábor. Bombeo Mecánico Moderno. Bucaramanga. 2009. p. 24.

A continuación en el Cuadro 3, se muestran algunas ventajas y desventajas del uso de Bombas de Tubería en el Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico.

Cuadro 3. Ventajas y Desventajas de las Bombas de Tubería

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • El conjunto del barril de este tipo de bomba es roscado con la tubería y se convierte en parte de ésta. • Mayor diámetro que una bomba insertable, por lo tanto produce un mayor volumen de fluido en cualquier diámetro de tubería dado. • Es una buena bomba cuando el petróleo es viscoso y presenta un bajo nivel de fluido. • Maximiza el área de flujo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario sacar tanto la varilla como la tubería para reparar el barril. • La relación de compresión es menor que en las insertas, no es buena para producción de gas. • Mayor costo a medida que el tamaño sea mayor y para retirar la bomba. • Es posible dañar el pistón al bajarlo dentro de la tubería. • El calibre mayor de este tipo de bomba origina mayores cargas en la sarta de varillas y en la unidad de bombeo.

Fuente: Weatherford. Documento de power point: Bombas mecánicas de subsuelo. p. 65.

3.1.2 Bombas de varilla o de inserción. Como se observa en la Figura 9, es un ensamble completo de bombeo que va dentro del pozo, sobre la sarta de varillas. El ensamble contiene el barril de trabajo, el embolo dentro del barril y las dos válvulas: la fija y la viajera. Solo el niple de asentamiento va con la sarta de la tubería de producción a la profundidad de bombeo deseada. Luego, el montaje de la bomba va sobre la sarta de varillas y se utiliza un agarre tipo copa o mecánico para asegurarlo en su lugar. La válvula fija de una bomba de varillas es parte del barril.³¹ A continuación en el Cuadro 4, se muestran algunas ventajas y desventajas del uso de Bombas de inserta en el Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico.

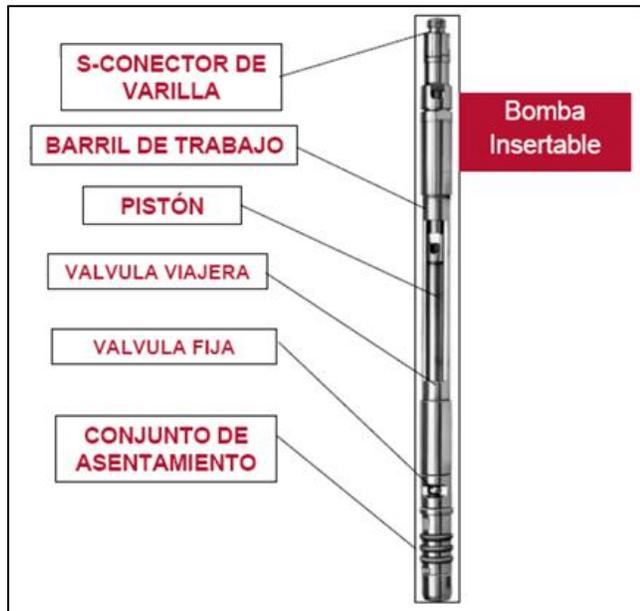
Cuadro 4. Ventajas y Desventajas de las Bombas Insertas

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • La bomba completa es conectada e insertada dentro de la tubería del pozo con la sarta de varillas. • Como una unidad completa, la bomba puede ser retirada del pozo sin sacar la tubería. • Apropiaada para pozos profundos. • Menos propensa a ruptura del barril. • Mejor manejo de gas que la bomba de tubería. 	<ul style="list-style-type: none"> • La varilla de recorrido constituye una conexión débil. • El barril puede pegarse por arena cuando es de anclaje inferior. • El barril está expuesto a la corrosión.

Fuente: Weatherford. Documento de power point: Bombas mecánicas de subsuelo. p. 64.

³¹Ibíd., p. 47.

Figura 9. Partes básicas de una bomba de varillas



Fuente: TAKÁCS, Gábor. Bombeo Mecánico Moderno. Bucaramanga. 2009. p. 24.

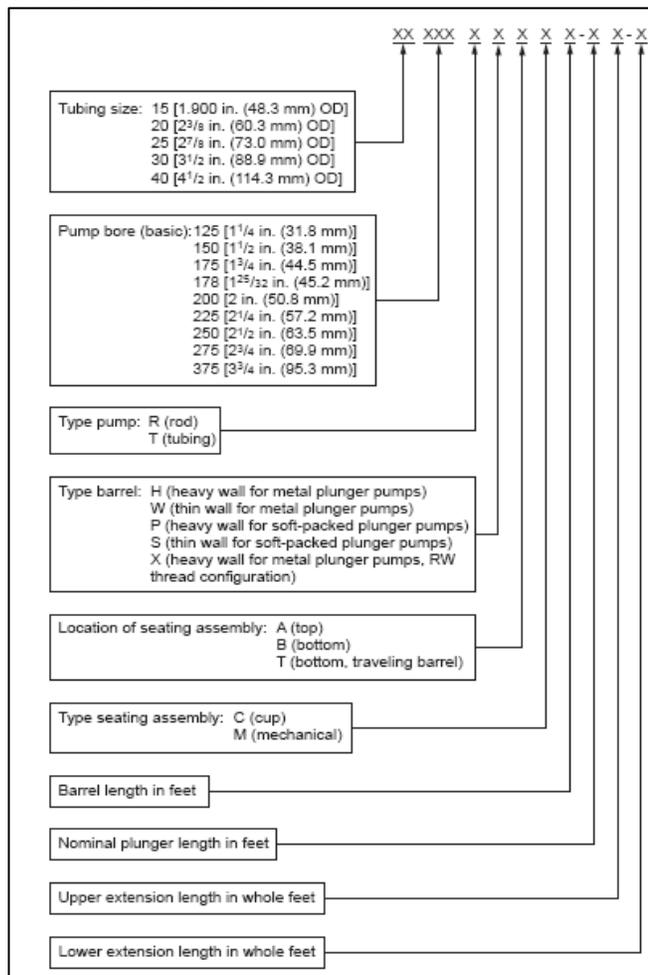
Existen varios tipos de bombas insertables dependiendo de las condiciones del pozo, tasa de producción y profundidad del pozo. A continuación se muestra las diferentes bombas de varillas o insertables más comunes:

- Bombas de barril estacionario anclado en el fondo: Se usa en pozos con bajo nivel de fluido, pozos con gas o pozos con bajo nivel estático. Esta bomba con un pistón móvil y carrera metal-metal es también recomendada para pozos profundos y cuando el pozo produce yeso o bario. Esta es la más común de las bombas.
- Bomba de Barril viajero anclado en el fondo: Este tipo de bombas se usa en pozos con problemas de arena, pozos que utilizan temporizadores o controladores de bombeo y en pozos que presentan una frecuencia alta de fallas del barril. Esta bomba es también recomendada en pozos con problemas de corrosión.
- Bomba de Barril estacionario anclada en el tope: Se usa en pozos con problemas de arena o bajo nivel de fluido, pozos con gas. Debido a que el pozo está anclado en el tope, solo una pequeña cantidad de arena podría acumularse alrededor de la bomba. Debido a esta característica, esta bomba es recomendada por encima de la de barril viajero cuando la producción de arena es un gran problema.

- Bombas de Revestimiento: Se utiliza en pozos someros que producen altas tasas de producción, baja corte de gas y no están desviados.³²

3.1.3 Designación de las Bombas.³³ Al igual que las Unidades de superficie el API ha desarrollado un método para designar y describir las bombas de subsuelo. En la Figura 10 se observa la definición de la bomba con relación a la designación que se tenga de esta.

Figura 10. Designación API 11B de las bombas de subsuelo



Fuente: Theta Enterprise, Inc. Manual de Bombeo Mecánico: Optimización de Bombeo Mecánico. 2005. p. 64.

³²SVINOS G, John. Software Avanzado de Optimización para Bombeo por Cabillas Consultaría y Entrenamiento. Theta Enterprise, Inc. 2005. p. 67-69.

³³THETA ENTERPRISE, Op cit., p. 63-64.

3.2 SARTA DE VARILLAS

La sarta de varillas es la parte más vital del Sistema de Bombeo ya que transmiten el movimiento de la Unidad de Bombeo de Superficie a la bomba de subsuelo. Es el sistema más crítico del Bombeo Mecánico. El comportamiento de esta puede tener un impacto fundamental sobre la eficiencia del levantamiento del fluido y su eventual falla origina una pérdida total de producción. Por consiguiente una sarta de varillas apropiadamente diseñada no solo asegura buenas condiciones de operación, sino que también puede reducir considerablemente los costos totales de producción. Existen diferentes varillas de succión disponibles en el mercado, entre grandes grupos encontramos: las convencionales y la COROD.³⁴

3.2.1 Varillas convencionales. Dentro de las convencionales existen las varillas clasificadas por la norma API 11B en cinco grados, además de la Norma AISI/SAE que determina los principales elementos aleantes Níquel, Cromo y Molibdeno, también se encuentran las varillas de servicio especial: No API, dependiendo de cada fabricante y las varillas de fibra de vidrio. A continuación se describen cada una de las varillas establecidas por el API como lo son:³⁵

- Varillas grado C: AISI 1536 con aleación de carbón-manganeso, con un mínimo límite de elasticidad de 85.000 psi, y un mínimo y máximo de fuerza extensible de 115.000 psi a 140.000 psi respectivamente.
- Varillas grado K: AISI 4623 de acero con aleación de níquel-molibdeno, con un mínimo límite de elasticidad de 60.000 psi, y un mínimo y máximo de fuerza extensible de 90.000 psi a 115.000 psi respectivamente.
- Varillas grado D: AISI 1541MV con aleación de carbón-manganeso, con un mínimo límite de elasticidad de 85.000 psi, y un mínimo y máximo de fuerza extensible de 115.000 psi a 140.000 psi respectivamente.
- Varillas grado aleación D: AISI 4142 de acero con aleación de cromo-molibdeno, con un mínimo límite de elasticidad de 85.000 psi, y un mínimo y máximo de fuerza extensible de 115.000 psi a 140.000 psi respectivamente.
- Varillas grado especial D: AISI 4720SR de acero con aleación níquel-cromo-molibdeno, con un mínimo límite de elasticidad de 85.000 psi, y un mínimo y máximo de fuerza extensible de 115.000 psi a 140.000 psi respectivamente.

³⁴TAKÁCS, Op. cit., p. 71.

³⁵WEATHERFORD. Documento de power point: Varillas de bombeo. p. 31.

Estas varillas convencionales establecidas por el API tienen su respectiva catalogación en cuanto a la marca, el grado, el monograma API, el diámetro de la varilla y además de acuerdo a su lote de fabricación con número del mes y año que fueron realizadas.

Otras varillas convencionales que se encuentran en la industria, son las varillas especiales dentro de las cuales se clasifican en:³⁶

- Varillas grado S88 templado y revenido: AISI 3130M con aleación de níquel-cromo, con un mínimo límite de elasticidad de 130.000 psi, y un mínimo y máximo de fuerza extensible de 140.000 psi a 155.000 psi respectivamente.
- Varillas grado XD Normalizado y templado: AISI 4138M especial con aleación de cromo-molibdeno, con un mínimo límite de elasticidad de 115.000 psi, y un mínimo y máximo de fuerza extensible de 140.000 psi a 150.000 psi respectivamente.
- Varillas grado HD: AISI 4332SRX especial con aleación de níquel-cromo-molibdeno, con un mínimo límite de elasticidad de 115.000 psi, y un mínimo y máximo de fuerza extensible de 140.000 psi a 150.000 psi respectivamente.
- Varillas grado EL: AISI 4138M especial con aleación de cromo-molibdeno.

Dentro de las varillas convencionales también podemos encontrar las varillas de fibra de vidrio, las cuales se han creado porque son ideales para ambientes corrosivos y reducen las cargas máximas en la barra pulida (PPRL). La diferencia con respecto a las varillas de acero, es que son más costosas y su superficie puede ser más susceptible a daños.

Las diferentes varillas denominadas por la norma API 11B tienen ciertas características necesarias para su identificación, entre las más importantes están las dimensiones, que varían de 25 a 30 ft, cada varilla cuenta con un pin en cada extremo, sus conexiones son con coupling y sus tamaños varían de 5/8" hasta 1-1/2" con incrementos de 1/8".³⁷

3.2.2 Varillas COROD.³⁸ Este tipo de varillas fueron fabricadas con el fin de obtener un mejoramiento de la producción y un ahorro de los costos para diversas aplicaciones de la sarta de varillas. A diferencia de varillas de bombeo convencionales que están acopladas cada 25 o 30 pies, las varillas de bombeo continuas COROD sólo requieren acoplamientos en la parte superior e inferior de la sarta, independientemente de la profundidad del pozo. Con un menor número

³⁶Ibíd., p. 44.

³⁷Ibíd., p. 27.

³⁸WEATHERFORD., ALS7501.01 sucker rods brochure. 2003. p. 3.

de juntas, esta longitud sólida de acero es más ligera y mejora la vida de la tubería debido a un contacto más uniforme entre los tubos y las varillas de bombeo. También se ocupa de muchos desgastes prematuros de la tubería, especialmente en pozos direccionales y horizontales. Su aplicación especial está dirigida a pozos altamente desviados con producción de petróleo pesado, es decir, de alta viscosidad, son excelentes oportunidades debido a su alta capacidad de resistencia y torque en el sistema.

A continuación en el Cuadro 5, se muestran algunas ventajas y desventajas del uso de Bombas de inserta en el Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico.

Cuadro 5. Ventajas y Desventajas de las Varillas COROD

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Existe menos fallas en pines y couplings. • Mínimo desgaste de varillas y tubos en pozos desviados. • Mínimo requerimiento de torque y potencia debido a que es más ligera que la sarta convencional. • Simple instalación y servicio de campo rápidos. 	<ul style="list-style-type: none"> • El costo podría ser más de dos veces mayor que la varilla convencional. • El equipo de servicio y la unidad de soldadura, deberán estar disponibles en el área para el servicio.

Fuente: Weatherford. Documento de power point: Bombeo mecánico. p. 80.

3.3 ACCESORIOS

Los equipos de fondo normalmente necesitan de accesorios, tanto las bombas como la sarta de varillas, para una correcta operación de acuerdo al tipo de fluido producido y a las características del pozo. Entre ellas encontramos el ancla de gas, el ancla de tubería, los asentamientos, la válvula antibloqueo de gas y las barras de peso descritas a continuación.

3.3.1 Ancla de gas.³⁹ Es un instrumento para la separación en subsuelo del petróleo y el gas en un pozo. La presencia de gas en el líquido producido reduce la eficiencia de la bomba. En la carrera descendente, la bomba comprime el gas hasta que la presión dentro del barril es lo suficientemente alta para abrir la válvula viajera. En la carrera ascendente, como el gas entra a la bomba, este ocupa una gran parte del volumen reduciendo la cantidad de líquido que puede entrar a la bomba. Las anclas de gas ayudan a reducir la cantidad de gas libre que entra en la bomba.

³⁹ THETA ENTERPRISE. Op cit., p. 52.

3.3.2 Ancla de tubería.⁴⁰ Es un artefacto tipo empaadura usado para anclar el extremo inferior de la tubería al revestimiento y mantenerlo firmemente en sitio. El ancla de tubería previene el movimiento cíclico arriba y debajo de la sección inferior de la tubería mientras el pozo es bombeado.

3.3.3 Asentamientos.⁴¹ Emplea un elemento de empaque de goma que actúa por compresión automáticamente cuando la bomba es sentada y provee sello, además amplía la aplicación de las bombas insertas con anclaje inferior en pozos profundos con aporte de sólidos.

3.3.4 Válvula antibloqueo de gas (VGA).⁴² Dispositivo que mejora la eficiencia de las bombas insertas en pozos que manejan fluido gaseoso, además permite a la bomba reducir la interferencia por gas o también actúa como cheque de arena cuando hay una parada de pozo.

3.3.5 Barras de peso.⁴³ Son accesorios de gran diámetro diseñadas para añadir peso al final de la sarta de varillas y mantenerlas en tensión durante la carrera descendente. Los diámetros de estas barras van desde 1-1/4" a 2", siendo limitada su selección de diámetro máximo al tamaño de la tubería. Además, estas son usadas para reducir el desgaste de la varilla y tubería al mantenerlas en tensión y para evitar problemas de pandeo o buckling al final de la sarta.

3.4 CARACTERÍSTICAS Y DATOS DEL POZO TIPO

El pozo tipo para la respectiva evaluación de las Unidades de Superficie es el Cira 2842, el cual fue elegido por medio de diferentes parámetros de selección estipulados por la empresa Occidental de Colombia que se ajustan a las características de los Pozos Nuevos, entre ellos encontramos la tasa de producción; que para el pozo seleccionado es de 400-800 BPD, y la dificultad que presenta el pozo con respecto a la desviación y tortuosidad que recorta la vida útil de las varillas debido al desgaste generado por la fricción.

De acuerdo con la información suministrada por Oxy⁴⁴, el pozo tipo se encuentra en el área Este del Campo La Cira-Infantas. En el anexo B, se observa el estado mecánico del pozo Cira 2842 que está perforado en dos secciones, la primera sección comprendida desde una profundidad medida de 16 ft hasta 379 ft con broca de 12.25", fue revestida con casing de 9 5/8" hasta una profundidad del

⁴⁰Ibíd., p. 272

⁴¹WEATHERFORD. Bombas mecánicas de subsuelo. Op cit., p. 74.

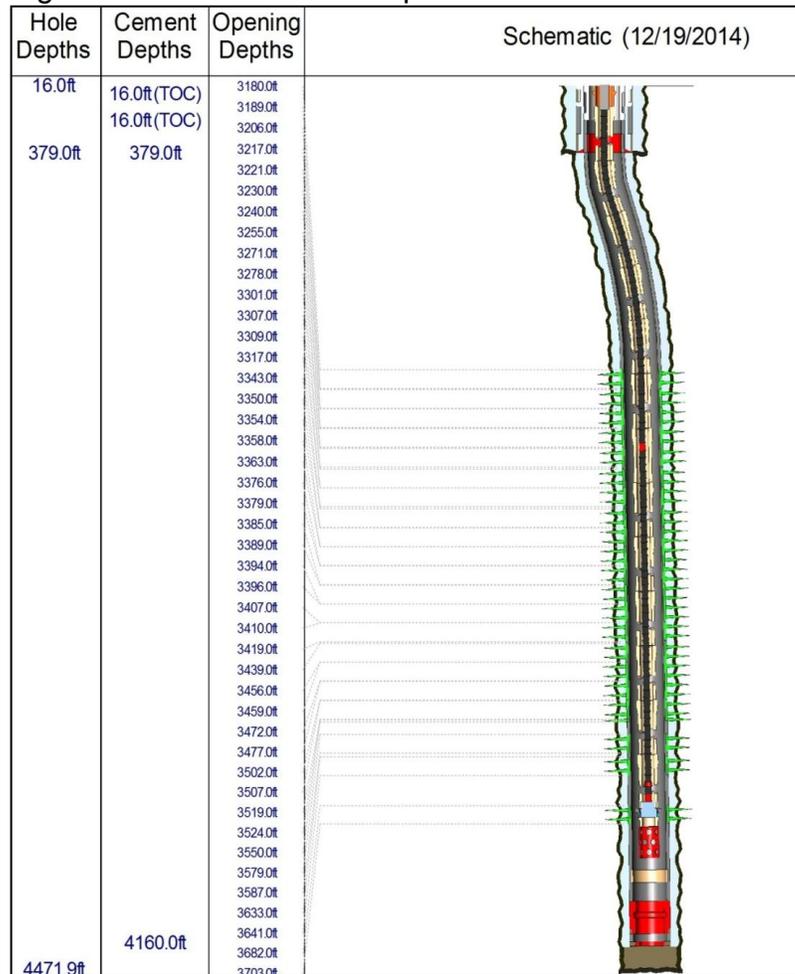
⁴²Ibíd., p. 75.

⁴³WEATHERFORD. Varillas de bombeo. Op cit., p. 49

⁴⁴OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Base de datos Occidental de Colombia. Pozo Tipo Profile. 2014. p. 1-2

zapato de 369 ft, dejando 10ft de bolsillo. La segunda sección está comprendida desde una profundidad medida de 379 ft hasta 4471.9 ft con broca de 8.5". Fue revestida con casing de producción de 7" desde la superficie hasta una profundidad de 4146 ft. Después de ser cementado el pozo, se realizó el cañoneo con unidad de Wireline y con una densidad de disparo de 6 disparos/pie. Como se observa en la Figura 11, se hicieron aproximadamente 22 perforados en el pozo tipo que se encuentran desde una profundidad medida de 3180 ft hasta 3703 ft, con un promedio de intervalo aproximado de 12 ft.

Figura 11. Perfil del Pozo Tipo



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Pozo Tipo Profile. 2014. p. 1

Por ser un pozo perforado en un Campo Maduro como lo es La Cira-Infantas, su método de recuperación primaria es por medio del Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico. Este sistema consta de un equipo de superficie con una Unidad Rotaflex, de referencia R900 con una carga de la estructura o en la barra lisa de 36.000 libras y una longitud de recorrido de 288 pulgadas.

Por su parte, el equipo de fondo cuenta con una sarta de tubería y de varillas. La sarta de tubería correspondiente al perfil del pozo tipo cuenta con un colgador de tubería, 124 juntas de tubería recubierta, un acople de tubería y un niple de asentamiento que van de una profundidad medida de 16 ft a 3749 ft. La sarta de varillas consta de una barra pulida o lisa, de una varilla continua de 1.156 pulg de diámetro nominal y con esta está instalada la bomba de fondo con una referencia de 30-250-RXBC-32-3, que según la designación API el número 30 se refiere al tamaño de la tubería siendo de 3 ½ pulg de OD, el 250 se refiere al diámetro de la bomba siendo de 2 ½ pulg, la letra R representa al tipo de bomba, siendo inserta o de varillas, la X se refiere al tipo de barril de trabajo, que para este caso es de pared gruesa con rosca interna, la letra B significa la localización del ensamblaje de asentamiento, que para este tipo de bomba es en fondo, la letra C expresa el tipo de ensamblaje de asentamiento, siendo por copas, el siguiente número se refiere a la longitud del barril siendo de 32 pies y el último número significa la longitud nominal del pistón siendo de 3 pies.

A Marzo de 2016⁴⁵, como se muestra en la Figura 12, el Pozo Tipo está produciendo 521 BFPD con un BSW de 92,5%, es decir que produce 39 BOPD. Este análisis se hace en base a lo que ha sucedido en el campo y a estudios que ha realizado la Empresa Occidental de Colombia, pero realmente se tiene en cuenta es el comportamiento actual del pozo que es la realidad del Campo.

Otros datos importantes para resaltar, es que el pozo tiene un FLAP de 553ft, es decir, los pies de fluido sobre el asentamiento de la bomba. Se requiere que esta sea de al menos 100 ft para evitar que exista golpe de fluido. Además de esto, el pozo es altamente corrosivo, con una velocidad de corrosión de 7.6 MPY, por esta razón es necesario realizar un tratamiento químico quincenal.

Figura 12. Datos del Pozo Cira 2842

DATOS DEL POZO									
ULTIMO REGISTRO				POTENCIAL		BALANCE DE PRODUCCION			
	VALOR	FECHA	TIEMPO	BFPD		BFPD			
BFPD	521	10-Mar-16	5	BFPD	510	BFPD	11		2.2%
BSW	92.5 %	10-Mar-16	5	BSW	91.0 %	BSW	1.5 %		1.7%
BOPD	39			BOPD	46	BOPD	-6.9		-15%
FLAP	553 ft	DINAMICO							
FAP	36 ft	21-Feb-16	23	IPR		ULTIMA FALLA			
ARENA	34.4 ppm	25-Mar-15	356	BFPD	497	FECHA FALLA	11-Dec-14		644
CHP	26.5 psi	Sep Gas 3 (LCI-03A)		BSW	86.0	FECHA PULL	19-Dec-14		451
MPY	7.6			BOPD	70	TRABAJO	Beam Pump		
TTO	QUINCENAL		ALTO	FECHA	23-Dec-13	MOTIVO	Scale		
AUTO.	SAMRPC			DIF.	-30.5	UNIDAD	Model 900		

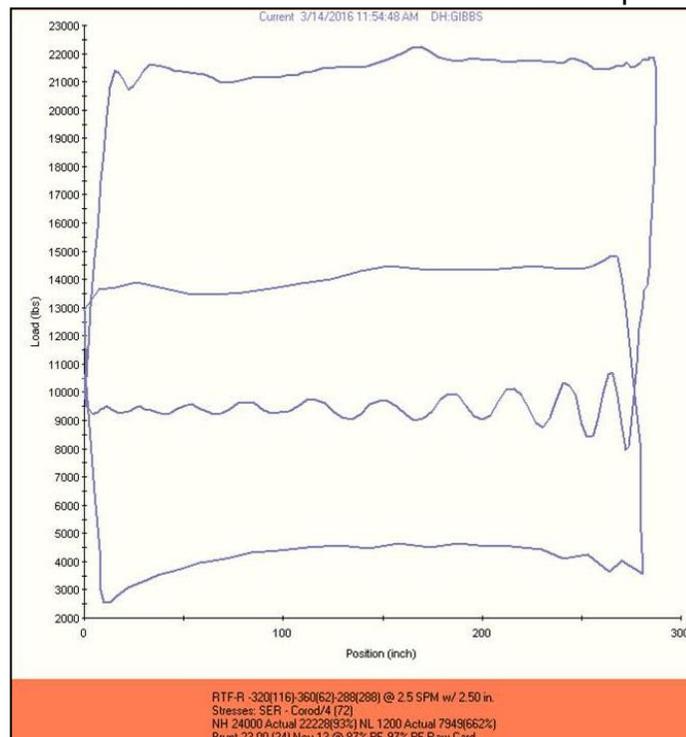
Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Base de datos. 2016.

⁴⁵OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Documento de Excel: Base de datos pozo Cira 2842. Hoja 1. 2016

En el Gráfico 2, se observa la carta dinamométrica actual del pozo tipo tanto la de superficie como la de fondo el cual es un gráfico que registra las cargas sobre la barra pulida como una función de la posición de la barra. De acuerdo a la Unidad de Superficie instalada, esta puede soportar hasta 36.000 libras de carga de la barra pulida o estructura, y en el dinamograma de superficie se observa que llega aproximadamente hasta las 22.000 libras de carga, es decir, que no se encuentra sobrecargada debido a que no supera el porcentaje de carga siendo del 61%.

En cuanto a la carta dinamométrica de fondo el principal factor es el peso de la columna de fluido y el recorrido de la bomba. Se observa que este último es menor a la capacidad de recorrido que tiene la unidad de superficie siendo de 280 pulgadas aproximadamente comparada con las 288 pulgadas de recorrido que debe tener la bomba, esto se debe a la elongación que existe en las varillas por el peso que estas soportan y la carga del fluido que hacen que el recorrido no sea total, lo que genera una capacidad volumétrica y eficiencia menor a la esperada.

Gráfico 2. Carta dinamométrica del Pozo Tipo



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC.
Software LOWIS™ Weatherford. 2016

Además, el Gráfico 2; obtenido del Software LOWIS™ propiedad de la Empresa Occidental de Colombia, muestra el comportamiento actual del pozo tipo, teniendo en cuenta la velocidad de la bomba a 2,5 SPM y su diámetro de 2,5 in. Siendo

estos datos, variables de entrada importantes para la simulación de las unidades de superficie.

En la Figura 13, se tienen los datos necesarios para calcular la capacidad volumétrica de la bomba, teniendo en cuenta que esta depende de la velocidad de bombeo en SPM, el diámetro del pistón en pulgadas, el tiempo de recorrido en horas, la longitud del recorrido de la bomba en pulgadas; asumiendo para este el escenario ideal y real del Campo dado por la carta dinamométrica de superficie y fondo del pozo tipo, y la eficiencia es asumida al 100% debido a que trabaja en óptimas condiciones. Para el cálculo de la capacidad volumétrica se tiene en cuenta la Ecuación 1 mostrada a continuación:

Ecuación 1. Capacidad Volumétrica de la Bomba

$$\frac{\text{Capacidad volumétrica}}{\text{(BFPD)}} = 0,1166 * D_p^2 * S * N * E$$

Fuente: RIVERO, José L. Análisis nodal y explotación de petróleo. 2007. P. 10

Donde:

D_p : Diámetro del pistón en pulgadas.

S: Longitud de la carrera en fondo, pulgadas.

N: La velocidad de bombeo en SPM.

E: La eficiencia volumétrica de la bomba, porcentaje.

Figura 13. Cálculos de la capacidad del Bombeo Mecánico

BOMBEO MECANICO	
Diam. Pistón	2.50
Long. Recorrido	288
SPM	2.5
Run Time	24.0

Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Base de datos La Cira-Infantas. 2016.

Reemplazando los datos en la Ecuación 1, se puede obtener la capacidad volumétrica de la bomba siendo esta de 524,7 barriles de fluido por día de acuerdo al escenario ideal del pozo a una longitud de recorrido en fondo de 288 pulgadas

como se muestra en la Ecuación 2.

Ecuación 2. Cálculo de la capacidad volumétrica de la bomba escenario ideal

$$\frac{\text{Capacidad volumétrica}}{\text{(BFPD)al 100\%}} = 0,1166 * 2,5in^2 * 288in * 2,5SPM = 524.7$$

Para el escenario real del pozo; donde la longitud de recorrido en fondo es de 280 pulgadas, debido a la elongación que se tiene de la sarta de varillas por el peso que estas soportan y la carga de fluido, la capacidad volumétrica de la bomba es de 510,1 barriles de fluido por día, cálculo que se observa en la Ecuación 3.

Ecuación 3. Cálculo de la capacidad volumétrica de la bomba escenario real

$$\frac{\text{Capacidad volumétrica}}{\text{(BFPD)al 100\%}} = 0,1166 * 2,5in^2 * 280in * 2,5SPM = 510.1$$

Los correspondientes cálculos muestran una diferencia de 14,6 BFPD que se están perdiendo debido a que la bomba no realiza un recorrido completo de 288 pulgadas permitidas por la Unidad de Superficie. Además, la eficiencia volumétrica que se tiene con respecto a la cantidad de barriles producidos en el último registro del pozo (521 BFPD), es menor a la asumida para el cálculo de la capacidad volumétrica, siendo de 97,9% como se observa en la Ecuación 4.

Ecuación 4. Cálculo de la eficiencia volumétrica de la bomba

$$\frac{\text{Eficiencia volumétrica}}{\text{(\%)}} = \frac{510,1 \text{ BFPD}}{521 \text{ BFPD}} * 100 = 97,9\%$$

Esta eficiencia de la bomba para desplazar el fluido, a pesar que disminuye con respecto al escenario ideal, sigue estando en el rango de eficiencias excelentes para la bomba que va desde el 75% al 95%. Una alta eficiencia volumétrica, sugiere que la bomba está en buenas condiciones mecánicas y que bombea poca o ninguna proporción de gas libre.

4. SIMULACIÓN DE LAS UNIDADES DE SUPERFICIE DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBEO MECÁNICO

Para llevar a cabo la simulación de las diferentes Unidades de Superficie se usaron los Software de diseño Rodstar y Srod, ambos permiten predecir el efecto de los cambios de las Unidades de Superficie con respecto los equipos de fondo instalados en el Pozo Tipo. Los resultados obtenidos por medio de estas simulaciones y su respectivo análisis abarcan el sexto objetivo del proyecto.

Las simulaciones de las Unidades de Superficie se realizaron con las condiciones de producción actuales del Pozo Tipo hasta el 27 de Abril del 2016, es decir, a 482 BFPD aproximadamente y a las condiciones máximas de operación con respecto a la velocidad de la Bomba de cada Unidad de Superficie. Además se tuvieron en cuenta que las Unidades del mismo tipo fueran de similar referencia, es decir, que tanto la capacidad de la caja reductora, la capacidad de la estructura como el recorrido fueran de igual dimensión para el tipo de Unidades Convencionales y para las de largo recorrido.

4.1 SIMULACIONES UNIDADES DE SUPERFICIE CON SROD CON CONDICIONES ACTUALES

A continuación se exponen los resultados de las simulaciones obtenidos con el software Srod. En el Cuadro 6, se observan las variables de entrada del simulador, de las cuales por cada Unidad de Superficie solamente difieren los valores de la velocidad, motor y tipo de Unidad de Bombeo teniendo en cuenta para este caso la Unidad Rotaflex que es la que se encuentra actualmente instalada en el pozo.

Cuadro 6. Datos de entrada del simulador Srod

Variables de Entrada	Valores
Tipo de Varilla	COROD SER
Diámetro de la Varilla	1.156 in
Factor de Servicio de la Varilla	0.9
Profundidad del Pozo	3686 ft
Eficiencia de la Bomba	95%
Diámetro de la Bomba	2.5 in
Porcentaje de Llenado de la Bomba	90%
Velocidad de la Unidad de Bombeo	2.5 SPM
Survey del pozo ⁴⁶	Se encuentra en el Anexo C
Motor de la Unidad de Bombeo	G.E 100 hp
Tipo de Unidad de Bombeo	ROTAFLEX RH900-360-288
Presión de entrada de la Bomba	239 psi
Presión de la tubería	120 psi
Diámetro de la tubería	3 1/2 in

⁴⁶OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Base de datos: Survey Pozo Tipo. Documento de Excel: Hoja 1. 2016

Los datos suministrados de inicio al Simulador fueron obtenidos de acuerdo a los equipos de fondo instalados en el Pozo Tipo que fueron descritos anteriormente en el Capítulo 3. La designación de las diferentes Unidades de Superficie de acuerdo con la capacidad de la caja reductora, la carga de la estructura y el recorrido fueron definidos por la Empresa Occidental de Colombia, LLC; así como el motor de la Unidad, basados en la operación de los demás equipos instalados en el Campo. El porcentaje de llenado de la bomba se asume que es de un 90% debido a la realidad y condiciones de operación que ha mostrado el comportamiento del Campo, es decir, que el 10% de la embolada se desperdicia expandiendo gas en lugar de producir más líquido convirtiéndose en un problema que detecta las cartas dinamométricas de fondo por interferencia de gas.

Para los siguientes casos de simulación, se tiene en cuenta la misma configuración en fondo del Pozo Tipo, debido a que el objeto de análisis es el comportamiento de las diferentes Unidades de Superficie con dicha configuración. Adicionalmente, se evalúan en las secciones “*Prime Mover*”, la potencia requerida, con el fin de establecer si el tamaño del motor seleccionado es coherente con la potencia que requiere el sistema; en la sección “*Pumping Unit*”, la carga de la estructura, para establecer que la carga máxima en la barra pulida no exceda el rango estructural de la unidad y que se mantenga por debajo del 100% para evitar daños o fallas estructurales en la Unidad de Bombeo; en la sección “*Summary of Reduced loading*”, el porcentaje de carga en la caja reductora, con el fin de que esta se mantenga por debajo del 100% para maximizar su vida útil; en la sección “*Rod Loading*”, la carga en la sarta de varillas, la cual para que esta no sufra daños en el sistema por rompimiento o desgaste debe mantenerse al igual que las anteriores por debajo del 100%; en la sección “*Downhole Performance*”, la producción, que es mantenida al último registro en función de la velocidad de bombeo, con el fin de que esta se mantenga a los niveles de producción ya establecidos; en la sección “*Non-Dimensional Variables*”, las variables $F_d/S/K_r$ y N/N_o , para establecer si existe o no elongación de las varillas debido a la carga que estas soportan o si su recorrido es igual, mayor o menor en superficie con respecto al fondo; en la sección “*Electric and power summary*”, el consumo de energía, para determinar la cantidad de energía eléctrica consumida por cada configuración del sistema; en la sección “*Dyno Graph*”, las cartas dinamométricas, para establecer las condiciones operativas de bombeo tanto en superficie como en fondo; en la sección “*Axial load and Buckling Tendency*”, la tendencia al buckling, con el fin de establecer si la varilla se encuentra en fuerte compresión que hace que tenga desplazamientos transversales; y por último en la sección “*Side/Drag load*”, las cargas laterales, con el fin de establecer los esfuerzos aplicados a la varilla por la desviación que el pozo presente, siendo factor clave de desgaste de la sarta. Todas estas variables son importantes para la evaluación debido a que definen el mejor diseño para el Bombeo Mecánico.

4.1.1 Simulación con software Srod de la Unidad Rotaflex. Los resultados obtenidos por medio de la Simulación de la Unidad de Superficie Rotaflex se encuentran consignados en el Anexo D. A continuación se explican detalladamente los resultados más relevantes de la simulación, los cuales son usados para la Matriz de selección que permite definir la Unidad de Superficie más conveniente para los Pozos Nuevos del Campo La Cira-Infantas.

De la sección "*Prime Mover*" se destaca la potencia mínima requerida por la unidad motriz basado en las condiciones existentes, siendo esta de 28,91 HP lo cual es coherente con el tamaño escogido para la Unidad de un motor G.E de 100 HP, teniendo en cuenta que el valor para el criterio de selección del motor debe superar el doble de la potencia mínima requerida o de la potencia de la barra pulida; que es de 21,58 HP, las cuales dependen de la profundidad y condición de la bomba, el nivel de fluido, el tamaño del pistón, y la fricción entre las varillas y tubería. Además, este resultado, es proporcional al área de la carta dinográfica de superficie medida.

En la sección "*Pumping Unit*" se observa el tamaño y tipo de la Unidad de Bombeo, la longitud de recorrido calculada, la velocidad de bombeo y como resultado de análisis el porcentaje de carga máximo en la estructura de la Unidad siendo de 68,5%. Esto indica que la carga máxima en la barra pulida no excede el rango estructural de la unidad, por esta razón se debe mantener por debajo del 100% para evitar daños o fallas estructurales en la Unidad de Bombeo.

En la sección de "*Summary of Reduced loading*" se observa el máximo torque calculado para la caja de engranaje, el momento máximo de contrabalanceo y como resultado de análisis el porcentaje de carga en la caja reductora siendo este de 45.7%, lo que indica que bajo las condiciones de entrada seleccionadas no se encuentra sobrecargada. Para maximizar la vida de la caja de engranaje se debe mantener la carga en menos del 100%. Además se puede usar el momento máximo de contrabalanceo en condiciones balanceadas para determinar hacia dónde mover las contrapesas y así poder balancear apropiadamente la Unidad de Bombeo en caso de que esta se encuentre en desbalance.

En la sección de "*Rod loading*", se muestra el tipo de varilla instalada en el Pozo, correspondiente a la varilla de tipo COROD SER. Para el análisis se tiene en cuenta el factor de servicio de la varilla que depende de la utilidad que se ha tenido con esta, es decir, si es nueva o usada. En este caso, con respecto al estado mecánico del pozo, por ser una varilla nueva su factor de servicio es del 0.9. En relación a este factor y al tipo de varilla usada la carga en la sarta de varillas es del 39%; valor que se encuentra por debajo del 100% indicando que no se va a tener problema por daño o rompimiento de la varilla debido a una sobrecarga.

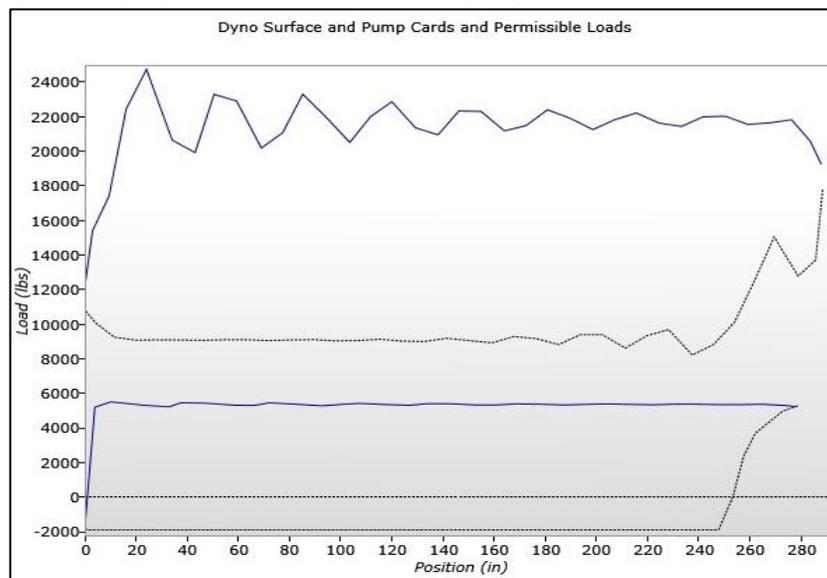
La sección “*Downhole Performance*” entrega el volumen de fluido producido en BPD a una eficiencia de la bomba del 100% y del 95%, siendo respectivamente de 507 BPD y 482 BPD. En este caso, se mantuvo la tasa de producción al último registro del pozo establecido para la simulación, con base en la velocidad de bombeo de 2,5 SPM para la unidad actualmente instalada en el Pozo Tipo.

En la sección “*Non-Dimensional Variables*” se observan dos variables adimensionales, $F/S/K_r$ correspondiente a la elongación adimensional de las varillas causada por la aplicación de cargas de fluido estáticas como un porcentaje del recorrido de la barra pulida. Y N/N_o' que es la relación de la velocidad de bombeo a la frecuencia natural de la sarta de varillas de diferentes diámetros. Para este caso la relación que existe entre esas variables es igual a 1, lo que significa que el recorrido o embolada de la bomba es igual a la de superficie para esta unidad.

La sección de resultados de “*Electric and power summary*” muestra el dato de los kilovatio amperios (KVA) consumidos por la unidad durante su funcionamiento, que en este caso es de 39.7 KVA; dato proveniente de la relación de los kw consumidos; 18,1 kw, entre el factor promedio de potencia del motor; 0.455.

La sección de “*Dyno Graph*” muestra la carta dinamométrica del pozo que identifica las condiciones operativas de bombeo o problemas con el pozo durante la operación. Las formas de las cartas de fondo y superficie dependen de las condiciones de la bomba, profundidad, tamaño del pistón, velocidad de bombeo y compresibilidad del fluido.

Gráfico 3. Carta dinamométrica en Unidad Rotaflex



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod.

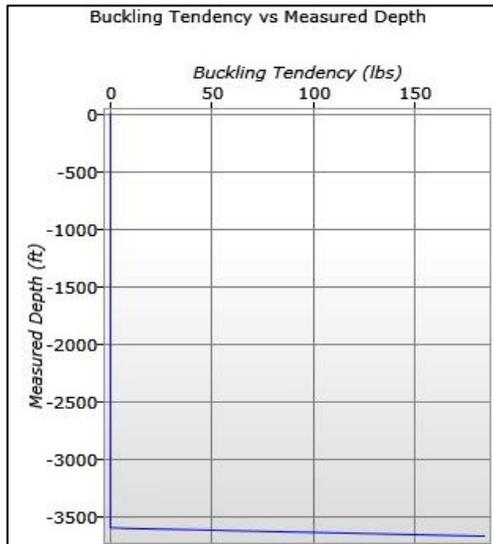
En el Gráfico 3, se observa el dinagrama de superficie y de fondo. Las líneas azules corresponden a la carrera ascendente del pistón y las líneas negras punteadas a la carrera descendente. El dinagrama de superficie, indica las cargas sobre la barra pulida en función de su posición. Al inicio del recorrido se observa que estas son altas pero no superan las cargas permitidas por la Unidad.

Por su parte el dinagrama de fondo muestra un diagnóstico de los problemas que se presentan en las bombas de subsuelo. En este caso, se observa que existe una interferencia de gas debido al porcentaje de llenado establecido para la bomba del 90%. Esto quiere decir, que la presión de entrada a la bomba no es suficientemente mayor que la presión en el barril de trabajo, lo que impide que la válvula fija se abra tan pronto el pistón comience a subir, perdiendo así parte significativa del recorrido y expandiendo el gas en lugar de producir más líquido mientras la válvula fija se abre. En la carrera descendente, el pistón ha bajado y ha comprimido la mezcla de gas y líquido en la bomba, pero no se ha producido líquido debido a que la diferencia de presión no ha sido suficiente para abrir la válvula viajera, lo que hace que se reduzcan aún más las cargas en las varillas.

Además; en el mismo dinagrama de la bomba de subsuelo, se observa que el recorrido en fondo no se está realizando completamente, debido al espacio perdido en el recorrido del pistón por el gas libre, siendo este menor. Otro problema que se aprecia en el gráfico pero muy levemente, es la inclinación de este a la derecha, demostrando que la tubería no se encuentra anclada en el fondo, ya que en las variables de entrada del simulador y debido a las condiciones actuales de operación del pozo tipo, no se tenía anclaje para la tubería.

En la sección de "*Axial load and Buckling Tendency*" se observa la tendencia al buckling. En el Gráfico 4, se observa que esta empieza a profundidades altas, es decir, a 3612 ft; una profundidad muy cercana a la profundidad total medida del pozo, que es 3686 ft. Además un valor máximo de 200 lbs no tiene un impacto sobre la operación teniendo en cuenta que este empieza a ser representativo a partir de 400 lbs.

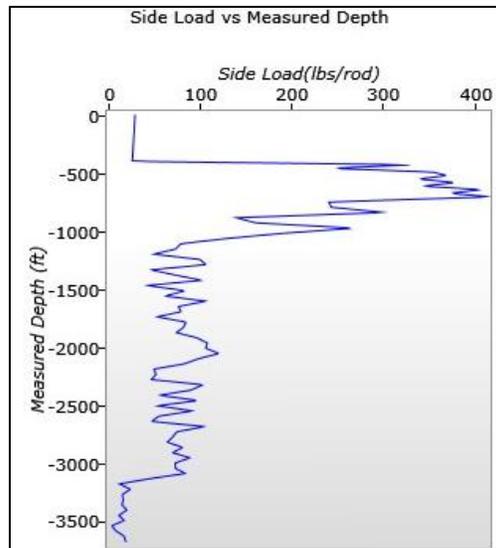
Gráfico 4. Tendencia al Buckling en Unidad Rotaflex



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod.

La sección de “*Side/ Drag load*” muestra el efecto de las cargas laterales en la varilla. En el Gráfico 5 se observa que entre una profundidad de 500 ft a 1000 ft las cargas laterales sobre la varilla aumentan significativamente; siendo la máxima de 410 lbs/rod, debido a que en este punto es donde ocurre el máximo grado de desviación del pozo por cada 100 ft.

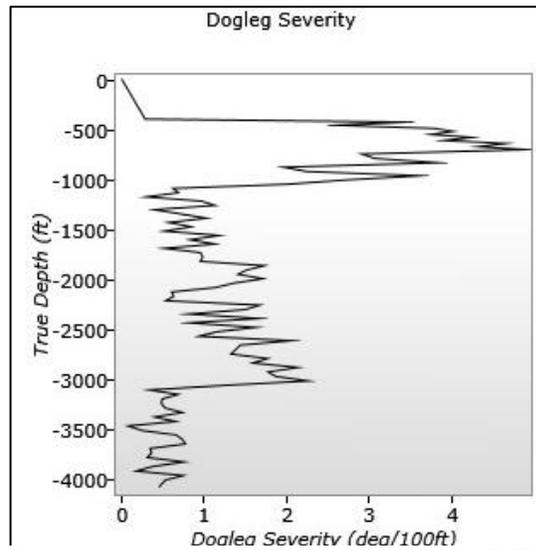
Gráfico 5. Cargas laterales en Unidad Rotaflex



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod.

El simulador también proporciona como parte de los resultados la profundidad vertical verdadera junto con el Dogleg Severity de acuerdo a los datos de inclinación y azimuth suministrados por el Survey del Pozo Tipo. Estos resultados son constantes para todas las Unidades de Superficie simuladas debido a que se está hablando del mismo pozo. En el Gráfico 6 se observa que el máximo dogleg Severity es $4,88^\circ/100\text{ft}$ a una profundidad de 710 ft constituyéndose en el punto más crítico de desviación y de soporte de cargas laterales de la varilla.

Gráfico 6. Dogleg Severity en Unidad Rotaflex



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod

Además de los datos analizados anteriormente, es importante tener en cuenta la eficiencia total del sistema que para la Unidad Rotaflex es del 48,8%, dado que es un indicador importante de las condiciones operativas del sistema, ya que muestra qué tan eficientemente el Sistema de Bombeo Mecánico convierte la energía eléctrica en el trabajo necesario para llevar a superficie el fluido producido. Una eficiencia del sistema del 40% al 50% es excelente⁴⁷, aunque en pozos más profundos puede llegar a ser menor debido a que presentan más pérdidas por fricción.

4.1.2 Simulación con software Srod de la Unidad Mark II. Los resultados obtenidos por medio de la Simulación de la Unidad de Superficie Mark II se encuentran consignados en el Anexo E. Para llevar a cabo la simulación con esta Unidad de Superficie se mantuvieron las mismas condiciones de entrada al simulador exceptuando el tipo de unidad de superficie; siendo la Mark II de

⁴⁷ THETHA ENTERPRISE, Op. cit., p. 243.

referencia M-912-427-192, y la velocidad de bombeo a 3,85 SPM, con el fin de mantener el volumen de fluido producido igual para todas las Unidades.

En la sección "*Prime Mover*", la potencia mínima requerida por el motor tiene un resultado de 32,44 HP lo cual cumple con el criterio de selección del tamaño del motor escogido para la Unidad G.E de 100 HP.

En la sección "*Pumping Unit*" se observa que el porcentaje de carga máximo de la Unidad es del 56,7% lo que indica que la estructura se encuentra estable ya que no supera el valor del 100%.

En la sección de "*Summary of reduced loading*" se observa que el porcentaje de carga de la caja reductora es del 89% lo que indica que esta no se encuentra sobrecargada, aunque a comparación de la Unidad Rotaflex su carga está muy cercano al límite de 100%, es decir, que existen menos posibilidades de maximizar su vida útil.

En la sección de "*Rod loading*", muestra que a un factor de servicio de la varilla COROD SER de 0.9 la carga de la sarta es del 41% indicando que no se va a tener problema por daño de la varilla debido a una sobrecarga.

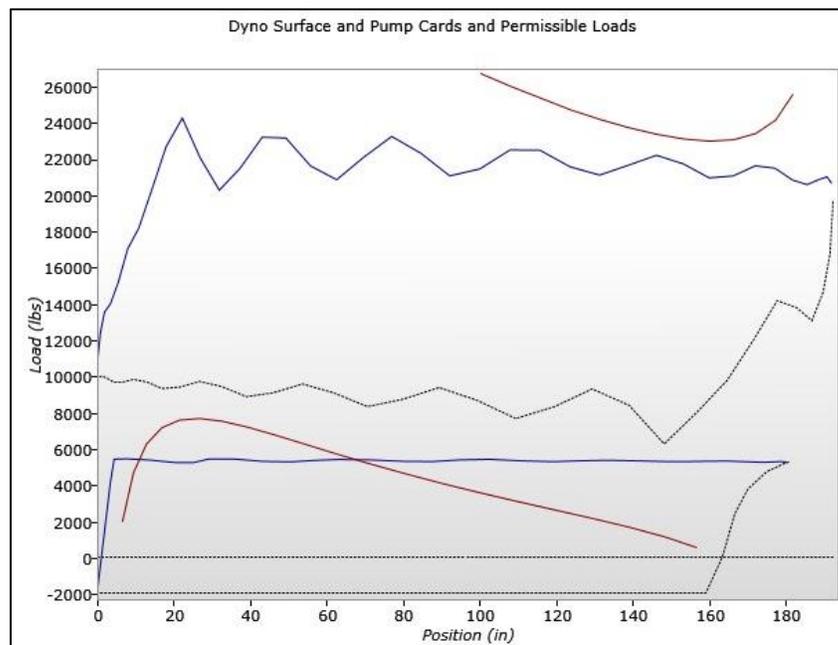
La sección "*Downhole Performance*" entrega el volumen de fluido producido en BPD con una eficiencia de la bomba de 100% y de 95%, siendo respectivamente de 507 BPD y 482 BPD. Esto confirma el objeto de análisis de mantener constante la producción para determinar la velocidad de operación de la bomba que permite analizar la vida útil de las varillas en cada Unidad de Superficie, obteniendo por medio de simulaciones por ensayo y error una velocidad de 3,85 SPM.

En la sección "*Non-Dimensional Variables*" se observan dos variables adimensionales, $F_o/S/K_r$ y N/N_o , la relación que existe entre estas variables es menor a 1, lo que significa que existe un viaje menor en la bomba debido a la elongación de las varillas.

La sección de resultados de "*Electric and power summary*" muestra el dato de los kilovatio amperios (KVA) consumidos por la unidad durante su funcionamiento, que en este caso es de 38.9 KVA; dato proveniente de la relación de los kw consumidos; 20 kw, entre el factor promedio de potencia del motor; 0.515. En comparación con la Unidad Rotaflex, esta Unidad consume menos KVA, pero su demanda de potencia es mayor por lo que consume más energía para la operación.

La sección de "*Dyno Graph*" muestra la carta dinográfica del pozo que corresponde a las condiciones operativas de bombeo o problemas con el pozo.

Gráfico 7. Carta dinagráfica en Unidad Mark II



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod

En el Gráfico 7

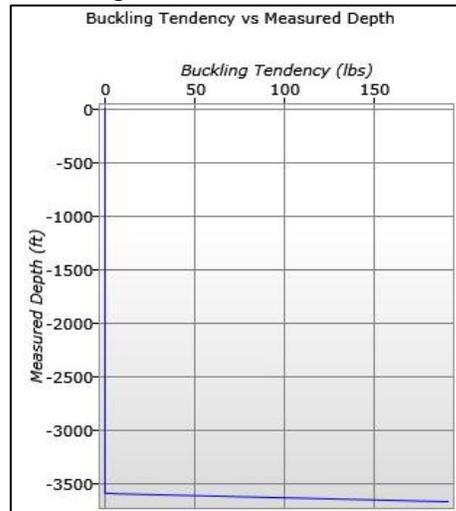
Gráfico 7, se observa el dinagrama de superficie y de fondo. El dinagrama de superficie de esta unidad, indica las cargas sobre la barra pulida en función de su posición. Las cuales en todo el recorrido muestra una tendencia de variación por algún esfuerzo a la barra pero no superan las cargas permitidas por la Unidad.

Por su parte el dinagrama de fondo muestra un diagnóstico de los problemas que se presentan en las bombas de subsuelo. En este caso, sucede lo mismo que la Unidad Rotaflex debido al porcentaje de llenado de la bomba, resultando como problema la interferencia de gas. Además se observa que el recorrido en fondo no se está realizando completamente debido al espacio perdido en el recorrido del pistón por el gas libre, siendo este menor. Otro problema que se aprecia en el gráfico pero muy levemente, es la inclinación de este a la derecha, demostrando que la tubería no se encuentra anclada en el fondo, ya que en las variables de entrada del simulador y debido a las condiciones actuales de operación del pozo tipo, no se tenía anclaje para la tubería.

En la sección de “*Axial load and Buckling Tendency*” se observa la tendencia al buckling que se puede presentar en el pozo por incidencia del bombeo mecánico. En el Gráfico 8, se observa que esta empieza a profundidades altas, es decir, a 3606 ft; una profundidad muy cercana a la profundidad total medida del pozo, que es de 3686 ft. Además un valor de pandeo máximo de 205 lbs no tiene un impacto

significativo sobre la operación teniendo en cuenta que este empieza a ser representativo a partir de 400 lbs.

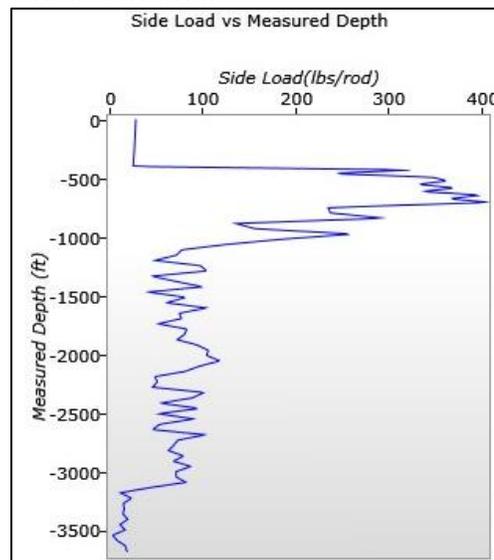
Gráfico 8. Tendencia al Buckling en Unidad Mark II



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod

La sección de “*Side/Drag load*” muestra el efecto de las cargas laterales en la varilla. En el Gráfico 9 se observa que entre una profundidad de 500 ft a 1000 ft las cargas laterales sobre la varilla aumentan significativamente; siendo la máxima de 402 lbs/rod, debido a que en este punto es donde ocurre el máximo grado de desviación del pozo por cada 100 ft.

Gráfico 9. Cargas laterales en Unidad Mark II



Fuente: OCCIDENTAL DE
COLOMBIA, LLC. Software Srod

Para este caso, también es importante analizar la eficiencia total del sistema dado que es un indicador importante de las condiciones operativas de este, siendo para la Unidad Mark II del 43,7%, un porcentaje un poco menor comparado con la Unidad Rotaflex pero que sigue estando en el rango de lo excelente.

4.1.3 Simulación con software Srod de la Unidad Maximizer II. Los resultados obtenidos por medio de la Simulación de la Unidad de Superficie Maximizer II se encuentran consignados en el Anexo F. Para llevar a cabo la simulación con esta Unidad de Superficie se mantuvieron las mismas condiciones de entrada al simulador exceptuando el tipo de unidad de superficie; siendo la Maximizer II de referencia MAX II-912-427-192, y la velocidad de bombeo a 3,86 SPM, con el fin de mantener el volumen de fluido producido igual para todas las Unidades.

En la sección "*Prime Mover*", la potencia mínima requerida por el motor tiene un resultado de 28,6 HP lo cual cumple con el criterio de selección del tamaño del motor escogido para la Unidad G.E de 100 HP.

En la sección "*Pumping Unit*" se observa que el porcentaje de carga máximo de la Unidad es del 58% lo que indica que la estructura se encuentra estable ya que no supera el valor del 100%.

En la sección de "*Summary of reduced loading*" se observa que el porcentaje de carga de la caja reductora es del 76,2% lo que indica que esta no se encuentra sobrecargada, ya que no supera el 100% de carga permisible.

En la sección de "*Rod loading*", muestra que a un factor de servicio de la varilla COROD SER de 0.9 la carga de la sarta es del 42% indicando que no se va a tener problema por daño de la varilla debido a una sobrecarga.

La sección "*Downhole Performance*" entrega el volumen de fluido producido en BPD con una eficiencia de la bomba de 100% y de 95%, siendo respectivamente de 507 BPD y 482 BPD. Esto confirma el objeto de análisis de mantener constante la producción para determinar la velocidad de operación de la bomba que permite analizar la vida útil de las varillas en cada Unidad de Superficie, obteniendo por medio de simulaciones por ensayo y error una velocidad de 3,86 SPM.

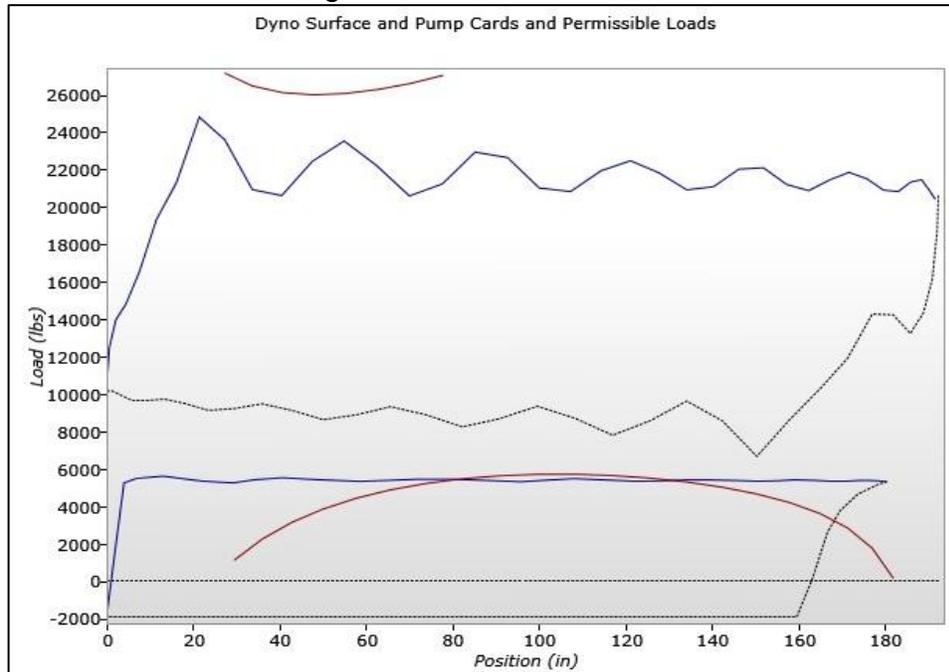
En la sección "*Non-Dimensional Variables*" se observan dos variables adimensionales, $F_o/S/K_r$ y N/N_o' , la relación que existe entre estas variables es menor a 1, lo que significa que existe un viaje menor en la bomba debido a la elongación de las varillas.

La sección de resultados de "*Electric and power summary*" muestra el dato de los kilovatio amperios (KVA) consumidos por la unidad durante su funcionamiento,

que en este caso es de 39,6 KVA; dato proveniente de la relación de los kw consumidos; 19,1 kw, entre el factor promedio de potencia del motor; 0,483. En comparación con la Unidad Mark II, esta consume más KV.

La sección de “*Dyno Graph*” muestra la carta dinagráfica del pozo que corresponde a las condiciones operativas de bombeo o problemas con el pozo.

Gráfico 10. Carta dinagráfica en Unidad Maximizer II



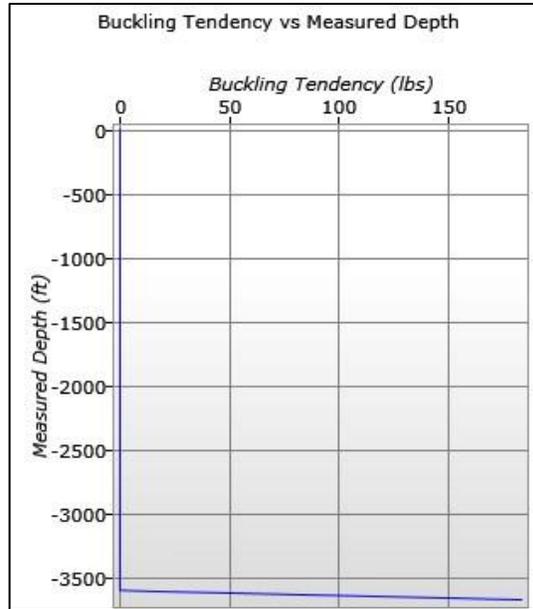
Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod

En el Gráfico 10, se observa el dinagrama de superficie y de fondo. El dinagrama de superficie de esta unidad, indica las cargas sobre la barra pulida en función de su posición. Las cuales en todo el recorrido muestra una tendencia de variación por algún esfuerzo a la barra pero no superan las cargas permitidas por la Unidad.

Por su parte el dinagrama de fondo muestra un diagnóstico de los problemas que se presentan en las bombas de subsuelo. En este caso, sucede lo mismo que la Unidad Rotaflex y Mark II, que debido al porcentaje de llenado de la bomba asumido se tiene como problema la interferencia de gas en la bomba. Además se observa que el recorrido en fondo no es el mismo que en superficie. Otro problema que se aprecia en el gráfico pero muy levemente, es la inclinación de este a la derecha, demostrando que la tubería no se encuentra anclada en el fondo, ya que en las variables de entrada del simulador y debido a las condiciones actuales de operación del pozo tipo, no se tenía anclaje para la tubería.

En la sección de “*Axial load and Buckling Tendency*” se observa la tendencia al buckling que se puede presentar en el pozo por incidencia del bombeo mecánico. En el Gráfico 11, se observa que esta empieza a profundidades altas, es decir, a 3612 ft; una profundidad muy cercana a la profundidad total medida del pozo, que es de 3686 ft. Además un valor de pandeo máximo de 198 lbs el cual no tiene un impacto significativo sobre la operación.

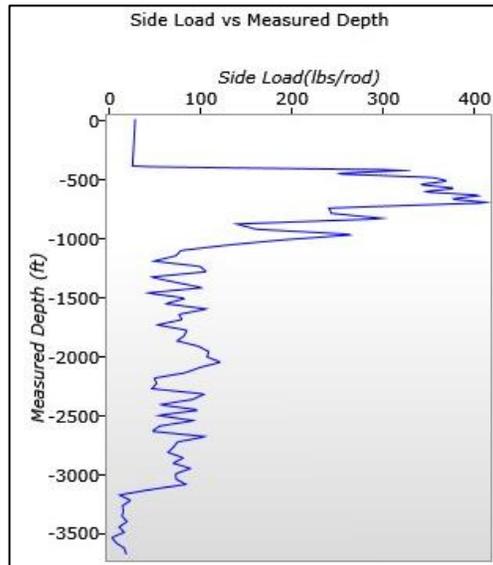
Gráfico 11. Tendencia al Buckling en Unidad Maximizer II



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod

La sección de “*Side/Drag load*” muestra el efecto de las cargas laterales en la varilla. En el Gráfico 12 se observa que entre una profundidad de 500 ft a 1000 ft las cargas laterales sobre la varilla aumentan significativamente; siendo la máxima de 412 lbs/rod, debido a que en este punto es donde ocurre el máximo grado de desviación del pozo por cada 100 ft.

Gráfico 12. Cargas laterales en Unidad Maximizer II



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Srod

Para este caso, también es importante analizar la eficiencia total del sistema dado que es un indicador importante de las condiciones operativas de este, siendo para la Unidad Maximizer II del 45,8%, un porcentaje un poco mayor comparado con la Unidad Mark II pero menor que la Unidad Rotaflex, aunque sigue estando en el rango ideal.

4.1.4 Simulación con software Srod de la Unidad Convencional. Los resultados obtenidos por medio de la Simulación de la Unidad de Superficie Convencional se encuentran consignados en el Anexo G. Para llevar a cabo la simulación con esta Unidad de Superficie se mantuvieron las mismas condiciones de entrada al simulador exceptuando el tipo de unidad de superficie; siendo la Convencional de referencia C-912-365-192, y la velocidad de bombeo a 3,83 SPM, con el fin de mantener el volumen de fluido producido igual para todas las Unidades. En este caso, se usa una capacidad de estructura menor a las demás unidades, ya que para este tipo de unidad, esa referencia no es fabricada en el mercado. Además se prioriza mantener la longitud del recorrido y la capacidad de la caja reductora para el estudio.

En la sección “*Prime Mover*”, la potencia mínima requerida por el motor tiene un resultado de 32,94 HP lo cual cumple con el criterio de selección del tamaño del motor escogido para la Unidad G.E de 100 HP.

En la sección “*Pumping Unit*” se observa que el porcentaje de carga máximo de la Unidad es del 69,1% lo que indica que la estructura se encuentra estable ya que no supera el valor del 100%.

En la sección de “*Summary of reduced loading*” se observa que el porcentaje de carga de la caja reductora es del 102,3% lo que indica que se encuentra sobrecargada bajo las condiciones de entrada al simulador, ya que supera el 100% de carga permisible, además que se puede esperar que el sistema falle prematuramente.

En la sección de “*Rod loading*”, muestra que a un factor de servicio de la varilla COROD SER de 0.9 la carga de la sarta es del 43% indicando que no se va a tener problema por daño de la varilla debido a una sobrecarga.

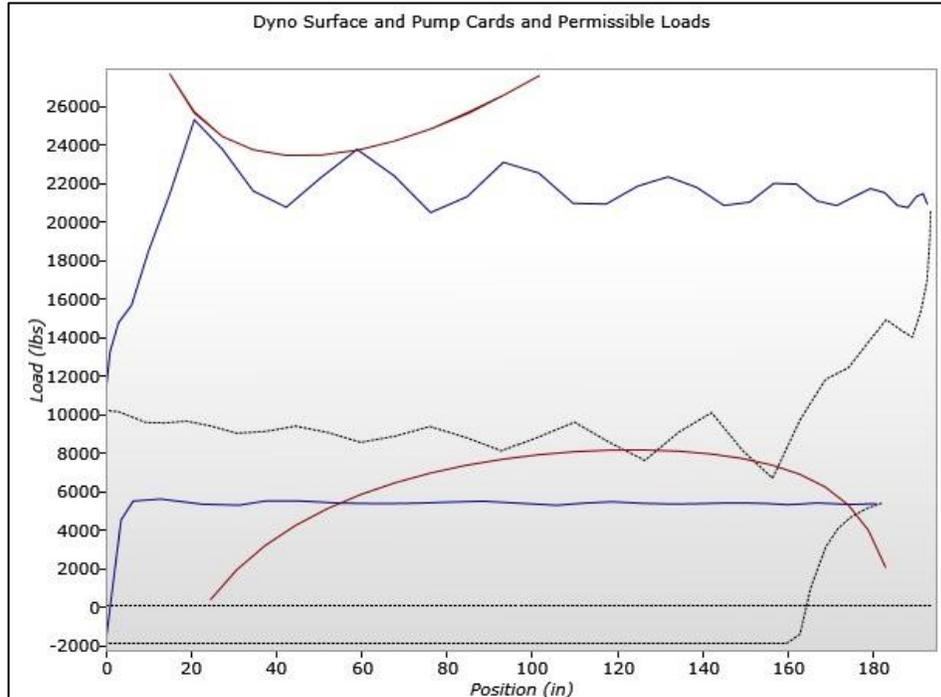
La sección “*Downhole Performance*” entrega el volumen de fluido producido en BPD con una eficiencia de la bomba de 100% y de 95%, siendo respectivamente de 508 BPD y 483 BPD. Esto confirma el objeto de análisis de mantener constante la producción para determinar la velocidad de operación de la bomba que permite analizar la vida útil de las varillas en cada Unidad de Superficie, obteniendo por medio de simulaciones ensayo y error una velocidad de 3,83 SPM.

En la sección “*Non-Dimensional Variables*” se observan dos variables adimensionales, $F_o/S/K_r$ y N/N_o' , la relación que existe entre estas variables es menor a 1, lo que significa que existe un viaje menor en la bomba debido a la elongación de las varillas.

La sección de resultados de “*Electric and power summary*” muestra el dato de los kilovatio amperios (KVA) consumidos por la unidad durante su funcionamiento, que en este caso es de 38,9 KVA; dato proveniente de la relación de los kw consumidos; 19,9 kw, y el factor promedio de potencia del motor; 0,511.

La sección de “*Dyno Graph*” muestra la carta dinográfica del pozo que corresponde a las condiciones operativas de bombeo o problemas con el pozo.

Gráfico 13. Carta dinagráfica en Unidad Convencional

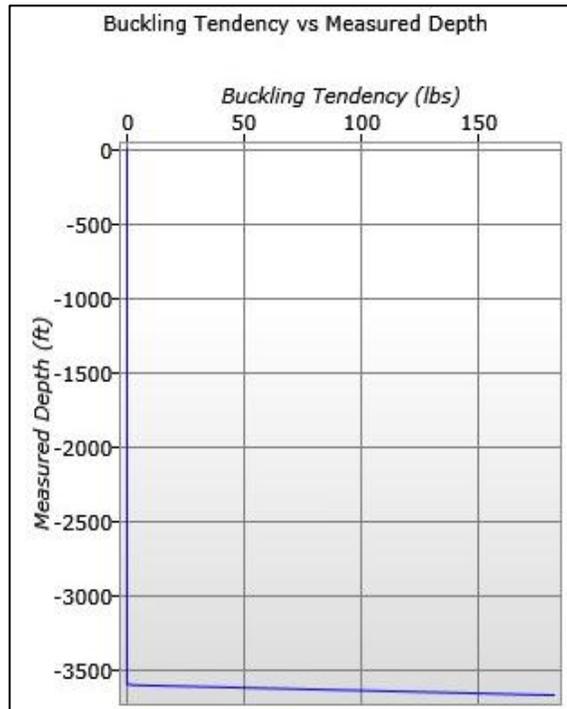


Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod

En el Gráfico 13, se observa el dinagrama de superficie y de fondo. El dinagrama de superficie de esta unidad, indica las cargas sobre la barra pulida en función de su posición. Las cuales en todo el recorrido muestra una tendencia de variación por algún esfuerzo a la barra pero no superan las cargas permitidas por la Unidad. Por su parte el dinagrama de fondo muestra un diagnóstico de los problemas que se presentan en las bombas de subsuelo. En este caso, sucede lo mismo que la Unidad Rotaflex, Mark II y Maximizer II.

En la sección de “*Axial load and Buckling Tendency*” se observa la tendencia al buckling que se puede presentar en el pozo por incidencia del bombeo mecánico. En el Gráfico 14, se observa que tiene el mismo comportamiento de la Maximizer II, con un valor de pandeo máximo de 198 lbs el cual no tiene un impacto significativo sobre la operación.

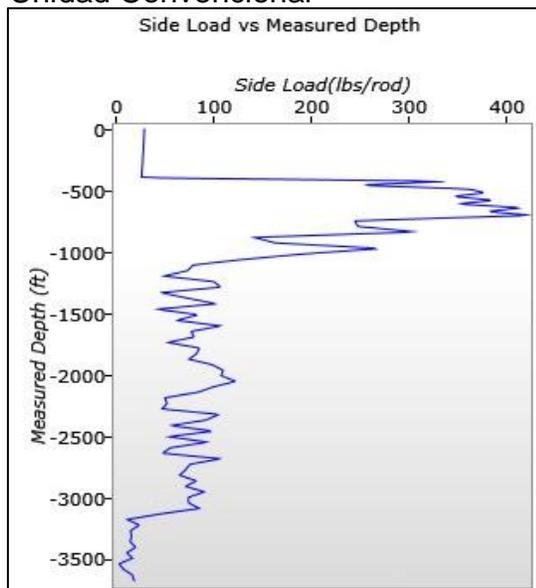
Gráfico 14. Tendencia al Buckling en Unidad Convencional



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod

La sección de “*Side/Drag load*” muestra el efecto de las cargas laterales en la varilla. En el Gráfico 15 se observa que entre una profundidad de 500 ft a 1000 ft las cargas laterales sobre la varilla aumentan significativamente; siendo la máxima de 418 lbs/rod, debido a que en este punto es donde ocurre el máximo grado de desviación del pozo por cada 100 ft.

Gráfico 15. Cargas laterales en Unidad Convencional



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod

Para este caso, también es importante analizar la eficiencia total del sistema dado que es un indicador importante de las condiciones operativas de este, siendo para la Unidad Convencional del 44,1%, un porcentaje un poco menor comparado con la Unidad Maximizer II y la Rotaflex pero mayor que la Unidad Mark II, aunque sigue estando en el rango ideal.

4.1.5 Simulación con software Srod de la Unidad Hidráulica. Los resultados obtenidos por medio de la Simulación de la Unidad de Superficie Hidráulica se encuentran consignados en el Anexo H. Para llevar a cabo la simulación con esta Unidad de Superficie se mantuvieron las mismas condiciones de entrada al simulador exceptuando el tipo de unidad de superficie; siendo la Hidráulica con una capacidad de la estructura de 40000 in y una longitud de recorrido de 288 in; la velocidad de bombeo a 2,53 SPM, y la potencia de motor requerida de 150 HP con el fin de mantener el volumen de fluido producido igual para todas las Unidades.

En la sección “*Prime Mover*”, la potencia mínima requerida por el motor tiene un resultado de 43,19 HP lo cual cumple con el criterio de selección del tamaño del motor escogido para la Unidad G.E de 150 HP ya que debe superar el doble de los HP requeridos.

En la sección “*Pumping Unit*” se observa que el porcentaje de carga máximo de la Unidad es del 61,7% lo que indica que la estructura se encuentra estable ya que no supera el valor de la carga permisible del 100%.

La Unidad de Superficie Hidráulica, no posee caja reductora, debido a que su sistema de potencia funciona en base a botellas de nitrógeno que dan la energía necesaria al sistema para levantar el fluido.

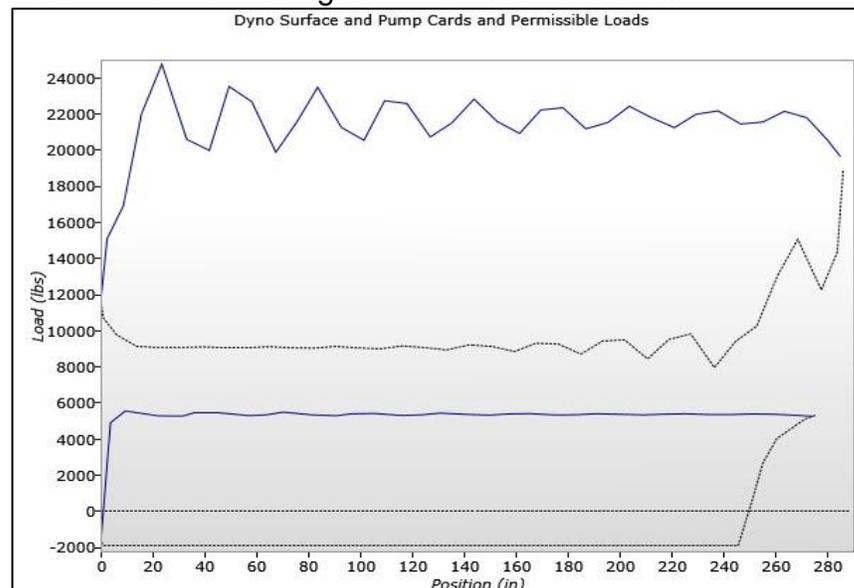
En la sección de “*Rod loading*”, muestra que a un factor de servicio de la varilla COROD SER de 0.9 la carga de la sarta es del 40% indicando que no se va a tener problema por daño de la varilla debido a una sobrecarga.

La sección “*Downhole Performance*” entrega el volumen de fluido producido en BPD con una eficiencia de la bomba de 100% y de 95%, siendo respectivamente de 508 BPD y 483 BPD. Esto confirma el objeto de análisis de mantener constante la producción para determinar la velocidad de operación de la bomba que permite analizar la vida útil de las varillas en cada Unidad de Superficie, obteniendo por medio de simulaciones de ensayo y error una velocidad de 2,53 SPM.

En la sección “*Non-Dimensional Variables*” se observan dos variables adimensionales, $F_o/S/K_r$ y N/N_o , la relación que existe entre estas variables es igual a 1, lo que significa que el recorrido de la bomba es la misma que la de superficie.

La sección de “*Dyno Graph*” muestra la carta dinagráfica del pozo que corresponde a las condiciones operativas de bombeo o problemas con el pozo.

Gráfico 16. Carta dinagráfica en Unidad Hidráulica

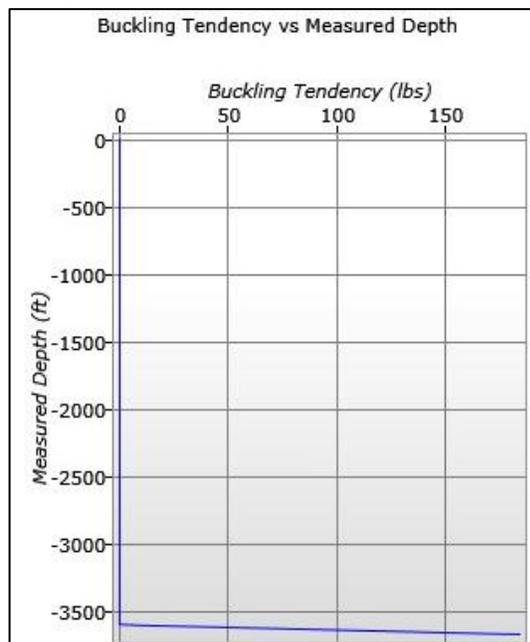


Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod

En el Gráfico 16, se observa el dinagrama de superficie y de fondo, mostrando el mismo comportamiento de las demás Unidades de Superficie analizadas anteriormente tanto en la carta de superficie como la de fondo.

En la sección de “*Axial load and Buckling Tendency*” se observa la tendencia al buckling que se puede presentar en el pozo por incidencia del bombeo mecánico. En el Gráfico 17, se observa que tiene el mismo comportamiento de Unidad Rotaflex II, con un valor de pandeo máximo de 200 lbs a una profundidad de 3612 ft siendo esta muy cercana a la total del pozo, el cual no tiene un impacto significativo sobre la operación.

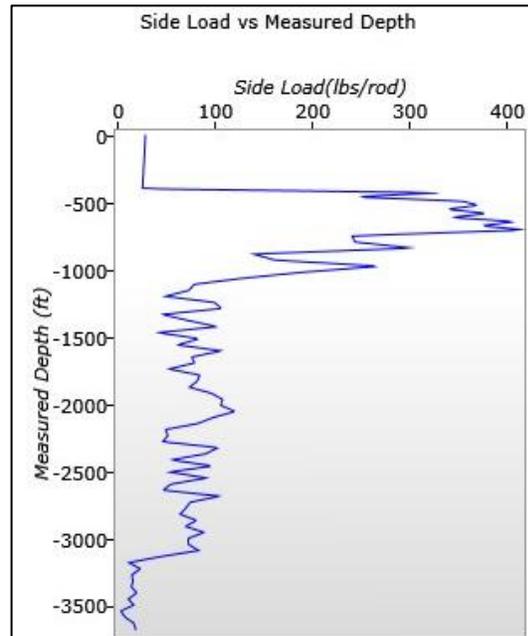
Gráfico 17. Tendencia al Buckling en Unidad Hidráulica



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod

La sección de “*Side/Drag load*” muestra el efecto de las cargas laterales en la varilla. En el Gráfico 18 se observa que entre una profundidad de 500 ft a 1000 ft las cargas laterales sobre la varilla aumentan significativamente; siendo la máxima de 411 lbs/rod, debido a que en este punto es donde ocurre el máximo grado de desviación del pozo por cada 100 ft.

Gráfico 18. Cargas laterales en Unidad Hidráulica



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod

4.1.6 Comparación de resultados de las Unidades de Superficie con Srod a condiciones actuales. Los resultados obtenidos por medio de la Simulación de las Unidades de superficie se encuentran expuestos en el Cuadro 7 mostrado a continuación. Los resultados resaltados en color rojo, son valores que presentan una sobrecarga o que el resultado es representativo con respecto al nivel permisible.

Cuadro 7. Comparación de resultados Unidades de Superficie

UNIDAD	POTENCIA REQUERIDA MOTOR (hp)	CARGA DE LA UNIDAD (%)	CARGA DE LA CAJA (%)	VELOCIDAD SPM	BFPD	KVA	BUCKLING (lbs)	CARGA DE LA VARILLA (%)	CARGAS LATERALES (lbs)
R	28.91	68.5	45.7	2.5	482	39.7	200	39	410
M II	32.44	56.7	89	3.85	482	38.9	205	41	402
MAX II	28.58	58	76.2	3.86	482	39.6	198	42	412
C	32.94	69.1	102.3	3.83	483	38.9	198	43	418
H	43.19	61.7	-	2.53	483	-	200	40	411

De los resultados expuestos en el Cuadro 7 se puede concluir que todas las Unidades de Superficie cumplen con el tipo de motor seleccionado en relación con la potencia requerida de este, debido a que los HP establecidos para cada Unidad, superan el doble de lo que cada una requiere para la operación, que en este caso fue de 100 HP para todas las Unidades a excepción de la Unidad de Superficie Hidráulica que tiene un motor de 150 HP.

En ninguna de las Unidades de Superficie se observa que la carga máxima en la barra pulida o lisa exceda el rango estructural de la Unidad, ya que estas están por debajo de la carga permisible, siendo el 100%. Cumpliendo este parámetro se evita que existan daños, fallas estructurales o sobrecargas en las Unidades de Bombeo. Valores por debajo del 50%, demuestran que la Unidad está sobredimensionada para esa aplicación; pero ninguna excede ese límite inferior.

Para maximizar la vida de la caja de engranaje, se debe mantener la carga en menos del 100%. En el caso de la Unidad de Superficie Convencional, muestra una sobrecarga del 2,3% en la caja reductora. En algunos casos los fabricantes manejan un 10% de factor de seguridad de sobrecarga, por lo que valores como el de esta Unidad no dificultan la operación. Sin embargo, si la caja reductora presenta fallos prematuros, es necesario utilizar una Unidad de referencia más grande, en este caso sería la C-1280-365-192, con el fin de que se cumplan las condiciones de entrada seleccionadas en cuanto a la velocidad de la Unidad, ya que si esta se desgasta, implicaría un mantenimiento correctivo a corto plazo.

Las Unidades de Superficie simuladas operan a distintas velocidades con respecto a la cantidad de barriles de fluido producidos en el Pozo Tipo. Las Unidades de carrera larga, como lo son la Rotaflex y la Hidráulica trabajan normalmente a bajas velocidades < 2,6SPM. Por su parte las Unidades Convencionales, Mark II y Maximizer II operan a altas velocidades que conllevan a un mayor desgaste de la sarta de varillas.

En el Cuadro 8 se muestra el tiempo de duración de la varilla de cada Unidad de Superficie con respecto a la velocidad de la bomba en SPM, teniendo en cuenta que teóricamente el tiempo de vida útil de la varilla es de 10 millones de ciclos.

Cuadro 8. Tiempo de duración de la Varilla según tipo de Unidad de Superficie

UNIDAD DE SUPERFICIE	VELOCIDAD DE LA BOMBA (SPM)	VIDA ÚTIL VARILLA (AÑOS)
Rotaflex	2,5	7,6
Mark II	3,85	4,9
Max II	3,86	4,9
Convencional	3,83	5,0
Hidráulica	2,53	7,5

Se concluye que con las Unidades de alto recorrido y baja velocidad la vida útil de la varilla va a ser mayor con respecto a otro tipo de Unidades de Superficie, superando el 39,9% de la vida útil cuando se opera con Unidades Convencionales, Mark II y Maximizer II.

En la Ecuación 5 y 6 se detalla el cálculo de la vida útil de la varilla para la Unidad de Superficie Rotaflex, realizando de la misma manera para las demás unidades.

Ecuación 5. Cálculo de los ciclos por año de la varilla en la Unidad Rotaflex

$$\frac{\text{Ciclos/año}}{(\text{Rotaflex})} = 2,5 \text{ SPM} * \frac{525600 \text{ min}}{1 \text{ año}} = 1'314000 \text{ ciclos/año}$$

Ecuación 6. Cálculo de la vida útil de la varilla en años Unidad Rotaflex

$$\frac{\text{Vida útil Varilla}}{(\text{Años})\text{Rotaflex}} = \frac{10 \text{ MMciclos}}{1'314000 \text{ ciclos/año}} = 7,6 \text{ años}$$

La Unidad de Superficie que requiere mayor energía para su correcto funcionamiento es la Unidad de Superficie Rotaflex, sin embargo la diferencia de este consumo en KVA no difiere en grandes proporciones de las otras Unidades de Superficie evaluadas.

Para las condiciones normales de simulación, ninguna de las Unidades de Superficie evaluadas causa efecto buckling en el Pozo Tipo, es decir, que la varilla se encuentra en suficiente tensión y no genera movimientos en la tubería ya que valores por debajo de 400 lbs son insignificantes.

En este caso de simulación, ninguna de las Unidades de Superficie evaluadas causa una sobrecarga en la varilla, de este resultado se puede resaltar que los dos valores de porcentaje de carga más bajos corresponden a las Unidades de Superficie Rotaflex e Hidráulica que son las que trabajan con largos recorridos y bajas velocidades.

Todas las Unidades de Bombeo evaluadas, muestran grandes cargas laterales en la varilla generadas por la desviación del pozo. A 710 ft de profundidad se encuentra el punto más crítico de desviación; con un dogleg severity de 4,88°/100 ft y de soporte de cargas, de las cuales no difieren en gran manera por el tipo de Unidad.

4.2 SIMULACIONES UNIDADES DE SUPERFICIE CON SROD CON MÁXIMAS CONDICIONES

En este apartado se muestran los resultados de las simulaciones de las Unidades de Superficie realizadas en el software Srod a condiciones máximas de operación en cada una de estas. Para esto las condiciones iniciales en cuanto a la velocidad de operación son cambiadas para cada Unidad. En el Cuadro 9 se observan los datos de entrada del simulador para la Unidad Rotaflex con su máxima condición de operación.

Cuadro 9. Datos de entrada al simulador Srod con la Unidad Rotaflex con máximas condiciones

Variables de Entrada	Valor
Diámetro de la Varilla	1.156 in
Profundidad del Pozo	3686 ft
Eficiencia de la Bomba	95%
Diámetro de la Bomba	2.5 in
Porcentaje de Llenado de la Bomba	90%
Velocidad de la Unidad de Bombeo	4.8 SPM
Survey del pozo ⁴⁸	Se encuentra en el Anexo C
Motor de la Unidad de Bombeo	G.E 100 hp
Tipo de Unidad de Bombeo	ROTAFLEX RH900-360-288
Presión de la Bomba	239 psi
Presión de cabeza	120 psi
Diámetro de la tubería	3 1/2 in

Es necesario tener en cuenta que para las unidades convencionales, Mark II y Maximizer II se asume una máxima velocidad de operación de 8 SPM de acuerdo a lo que ya se ha trabajado en Campo. Así mismo las Unidades de largo recorrido tienen una máxima velocidad de bombeo de 4,8 SPM.

4.2.1 Comparación de resultados de las Unidades de Superficie con Srod a máximas condiciones. Los resultados obtenidos por medio de la Simulación de las Unidades de superficie se encuentran expuestos en el cuadro que se observa a continuación. Los resultados resaltados en color rojo, son valores que presentan una sobrecarga o que el resultado es representativo con respecto al nivel permisible.

Cuadro 10. Resultados Simulación Unidades de Superficie con Máximas condiciones de operación en simulador Srod

UNIDAD	POTENCIA REQUERIDA MOTOR (hp)	CARGA DE LA UNIDAD (%)	CARGA DE LA CAJA (%)	VELOCIDAD SPM	BFPD	KVA	BUCKLING (lbs)	CARGA DE LA VARILLA (%)	CARGAS LATERALES (lbs)
R	46.74	70.9	57.2	4.8	960	55.3	200	48	430
M II	68.12	67.4	93.1	8	1008	62.4	861	57	482
MAX II	67.5	67.7	112.7	8	1115	61.8	684	56	483
C	79.89	82.3	142.2	8	1010	65.4	439	59	502
H	46.16	64.6	-	4.8	950	-	200	49	435

De los resultados expuestos en el Cuadro 10 se puede concluir que el motor de las Unidades Mark II, Maximizer II, puede llegar a tener daños prematuros debido a que la potencia requerida está muy cerca del valor seleccionado de 100 HP. Por esta razón algunas de las Unidades presentan sobrecarga en la caja reductora ya que tienen que realizar más esfuerzo. Por su parte, la Unidad Hidráulica y Rotaflex

⁴⁸ OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Base de datos: Survey Pozo Tipo. Documento de Excel: Hoja 1. 2016

si cumplen el criterio de selección del tipo de motor, ya que la potencia requerida no supera el doble de la establecida en la simulación debido a que trabaja con un motor de 150 HP y 100 HP respectivamente.

En ninguna de las Unidades de Superficie se observa que la carga máxima en la barra pulida o lisa exceda el rango estructural de la Unidad, ya que estas están por debajo de la carga permisible, siendo del 100%. Cumpliendo este parámetro se evita que existan daños, fallas estructurales o sobrecargas en las Unidades de Bombeo. Cabe resaltar que el porcentaje de carga de la Unidad de Superficie hidráulica es menor que las demás unidades trabajando a unas condiciones máximas de operación.

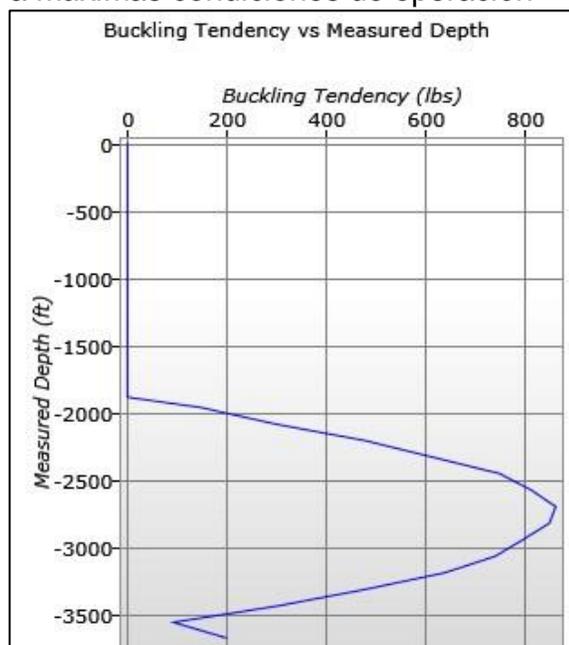
Para maximizar la vida de la caja de engranaje, se debe mantener la carga en menos del 100%. En el caso de la Unidad de Superficie Convencional y Maximizer II, muestran una sobrecarga significativa en la caja reductora. Para estos casos específicos se puede disminuir el diámetro de la bomba o la velocidad a la que la unidad realiza su recorrido o puede ser necesario utilizar una Unidad de referencia más grande, es decir de 1280, correspondiente a 1280000 pulgadas-libra de torque, con el fin de que estas no sufran sobrecargas. Pero el cambio de la caja reductora a una más grande, contribuye en un aumento de los costos por el consumo de energía de más que requiere el sistema para la operación óptima, y en el caso de reducir el diámetro y bajar la velocidad, puede que no se cumpla con los requerimientos de producción del Campo.

En este caso, las Unidades de Superficie simuladas operan a velocidades máximas de bombeo, con el fin de establecer la producción a estas condiciones. Según los resultados obtenidos, se puede observar que un aumento en la velocidad de operación, genera un incremento en la producción; pero en algunas unidades se está sacrificando el funcionamiento completo del sistema, es decir, que no se puede obtener una gran cantidad de barriles producidos, cuando el sistema en su mayoría se encuentra sobrecargado.

Los KVA de cada Unidad de Superficie son datos poco verídicos, debido a que dependen de la potencia requerida por el motor, y esta para cada una de las unidades se encuentra sobrecargada. En el caso de la Unidad Hidráulica, no es posible evaluar esta variable ya que el simulador no arroja el resultado correspondiente de este.

Como se observa en Gráfico 19, La simulación de las condiciones máximas de operación con respecto al comportamiento de los equipos de fondo para la Unidad de Superficie Mark II muestra un gran efecto de buckling en el Pozo Tipo.

Gráfico 19. Buckling en Unidad Mark II a máximas condiciones de operación



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Software Srod

Este efecto se da, debido a que la sarta de varillas se encuentra en una compresión tan fuerte que hace que esta se pandee o que tenga desplazamientos transversales generando más desgastes en la varilla y corta vida útil en estas.

El buckling se observa que empieza desde una profundidad de 1892 ft localizando su máxima carga de 861 lbs a una profundidad de 2703 ft. Este efecto se da debido a que en la carrera descendente, las unidades Mark II por tener una velocidad variable, tienden a bajar más rápido lo que genera esfuerzos de compresión en la varilla aumentando el desgaste de esta. Este mismo efecto a condiciones máximas de operación se presenta en las Unidades de superficie Maximizer II y en la Convencional teniendo un valor de buckling de 684 lbs y de 439 lbs respectivamente, ambos datos superan el límite de evaluación del buckling establecido a 400 lbs.

De acuerdo a un estudio del índice de fallas realizado con información suministrada por Oxy de la base de datos de los pozos del Campo, se analizan las diferentes fallas asociadas a la fricción que generan el cambio de los elementos de fondo especialmente la varilla; con respecto a cada unidad de superficie instalada en los pozos, para determinar la vida útil que estas han tenido y asociarlas con los períodos de tiempo en los que es necesario realizar intervenciones. Con los resultados obtenidos como se muestra en la Tabla 5, también se concluye que la Unidad Mark II es la que ha tenido más fallas en la varilla, y que a una razón de

cada 8 meses aproximadamente es necesario intervenir los pozos por daño o desgaste en la varilla generados por el buckling. Con esta Unidad se confirma lo que dice la teoría, ya que es menos eficiente en comparación a una Unidad Convencional.

Tabla 5. Vida útil de la varilla con respecto a las unidades de superficie

Unidad	Vida útil (años)
Convencional	1,11
Mark II	0,83
Maximizer II	0,90
Rotaflex	3,3
Hidráulica	3,3

Las Unidades Rotaflex que se encuentran instaladas en el Campo no han tenido fallas asociadas al desgaste de la varilla, pero según la Empresa se prevé que la vida útil sea de 3,3 años aproximadamente. Por su parte, las Unidades Hidráulicas como no se encuentran instaladas en el Campo, se asumen para el estudio que tienen el mismo comportamiento de las Rotaflex, por ser del mismo tipo, es decir, unidades de carrera larga.

4.3 SIMULACIÓN UNIDADES DE SUPERFICIE CON RODSTAR CON CONDICIONES ACTUALES

Con el fin de constatar los resultados obtenidos con el software Srod se realiza la simulación de las diferentes Unidades de Superficie en el software Rodstar, que al igual que el otro, es un software especializado en Diseño de Unidades de Superficie donde las variables de entrada tenidas en cuenta para la simulación son las mismas utilizadas en el software Srod para condiciones actuales del Pozo. En los anexos del I al M se encuentran los resultados de estas simulaciones.

Cuadro 11. Resultados Simulación Unidades de Superficie con condiciones de operación actuales en simulador RODSTAR

UNIDAD	POTENCIA REQUERIDA MOTOR (hp)	CARGA DE LA UNIDAD (%)	CARGA DE LA CAJA (%)	VELOCIDAD SPM	BFPD	KWH	BUCKLING (lbs)	EFICIENCIA DEL SISTEMA (%)
Rotaflex	30	70	47	2.5	454	496	800	44
Mark II	40	58	94	3.85	446	547	800	39
Maximizer II	75	60	153	3.86	447	810	800	27
Convencional	40	71	111	3.83	446	554	800	40
Hidráulica	40	64	-	2.53	454	502	800	44

En el Cuadro 11, se observa los resultados obtenidos en la simulación en el software RODSTAR. Con las mismas variables de entrada del otro software se encuentra una diferencia, en cuanto a la potencia requerida del motor, que en este

caso, es menor a los resultados anteriores obtenidos que estaban por el orden de 60 HP, solo en el caso de la Unidad Maximizer II se tiene un valor por encima de este. Estos resultados dependen de la profundidad y condición de la bomba, el nivel de fluido, el tamaño del pistón, y la fricción entre las varillas y tubería. De acuerdo a la cantidad de potencia que los elementos del sistema de levantamiento artificial requieran esta puede aumentar o disminuir.

Por su parte, la carga en la estructura de las diferentes unidades está acorde a lo establecido, es decir, que la carga máxima en la barra pulida no debe exceder el rango estructural de la unidad, por esta razón se mantiene por debajo del 100% para evitar daños o fallas estructurales en la Unidad de Bombeo, lo que se cumple en todas las referencias y en relación a la simulación del otro software tienen valores similares.

Para maximizar la vida de la caja de engranaje se debe mantener la carga en menos del 100%, para el caso de las Unidades Maximizer II y Convencional, muestran una sobrecarga significativa en la caja reductora. Para estos casos específicos se puede disminuir el diámetro de la bomba o la velocidad a la que la unidad realiza su recorrido o puede ser necesario utilizar una Unidad de referencia más grande, es decir de 1280, correspondiente a 1'280.000 pulgadas-libra de torque, con el fin de que estas no sufran sobrecargas. Pero el cambio de la caja reductora a una más grande, contribuye en un aumento de los costos por el consumo de energía de más que requiere el sistema para la operación óptima, y en el caso de reducir el diámetro y bajar la velocidad, puede que no se cumpla con los requerimientos de producción del Campo.

La velocidad de las Unidades de bombeo, se tienen constantes como parámetro de entrada al simulador, de acuerdo a los datos del software Srod. En este caso, se observa una gran diferencia en los barriles de fluido producidos, ya que estos son menores a las condiciones actuales del Pozo Tipo, que se esperaban que fueran de 482 BFPD. Esto se debe a que este software de diseño, tiene en cuenta factores como los efectos de inercia en el fluido de acuerdo a la compresibilidad que este tiene. Además el software arroja un mensaje de alerta que para las unidades que se trabajen a una velocidad menor de 5 SPM, que en este caso, aplicaría para todas, es necesario el uso de un conjunto limpiador de atornillado en el tren de engranajes de alta velocidad ajustada para asegurar suficiente lubricación.

El software RODSTAR calcula el consumo de energía eléctrico diario que requiere el sistema, siendo menor para las Unidades de Superficie de carrera larga, es decir, Rotaflex e Hidráulica. Este parámetro no es posible evaluarlo con el otro software debido a que la unidad de medida de la energía difiere el uno del otro.

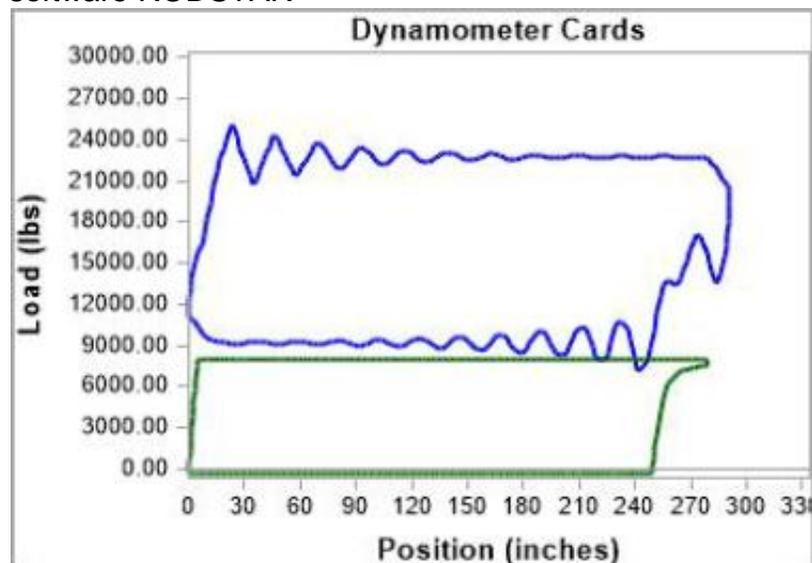
La carta dinamométrica del pozo identifica las condiciones operativas de bombeo o problemas con el pozo durante la operación. Las formas de estas cartas

dependen de las condiciones de la bomba, profundidad, tamaño del pistón, velocidad de bombeo y compresibilidad del fluido. El dinagrama de fondo muestra un diagnóstico de los problemas que se presentan en las bombas de subsuelo.

Como se muestra en la Figura 14, existe una interferencia de gas debido al porcentaje de llenado establecido para la bomba del 90%. Esto quiere decir, que la presión de entrada a esta no es lo suficientemente mayor a la presión en el barril de trabajo, lo que impide que la válvula fija se abra para el paso de los fluidos, perdido recorrido por el gas libre. Otro problema que se aprecia en el gráfico pero muy levemente, es la inclinación de este a la derecha, demostrando que la tubería no se encuentra anclada en el fondo, ya que en las variables de entrada del simulador y debido a las condiciones actuales de operación del Pozo Tipo, no se tiene anclaje para la tubería.

Este mismo comportamiento, se presenta en todas las Unidades de Superficie evaluadas en el estudio, y comparando con los resultados obtenidos en el otro software, tienden a llevar la misma tendencia debido a que las cargas principalmente dependen de las variables ingresadas al simulador que para los dos software fueron las mismas en condiciones actuales.

Figura 14. Cartas dinamométricas de fondo y superficie software RODSTAR

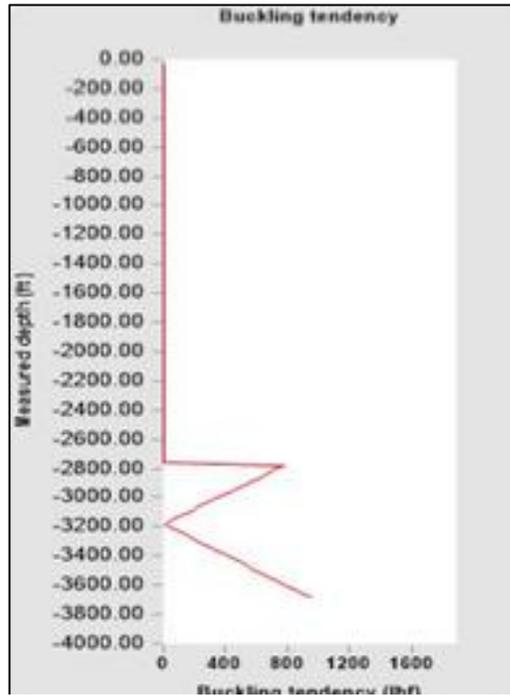


Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA LLC. Software RODSTAR

En la Figura 15 se observa la tendencia al buckling que se puede presentar en el pozo por incidencia del bombeo mecánico, empezando a profundidades altas, es decir, a 2800 ft aproximadamente. Este efecto se da debido a que la sarta de varillas se encuentra en una compresión tan fuerte que hace que esta se pandee o

que tenga desplazamientos transversales generando más desgastes y corta vida útil en estas. Aproximadamente, se observa que su máxima carga es de 800 lbs.

Figura 15. Tendencia al Buckling de las Unidades en el software RODSTAR



Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA LLC. Software RODSTAR

Este mismo comportamiento, se observan en todas las Unidades de Superficie evaluadas, y en comparación al otro software muestra significantes valores en condiciones actuales; esto puede deberse a las cargas de fluido que asume el sistema en cuanto a los efectos de inercia. Aunque es un valor muy alto, el fenómeno se encuentra a profundidades bajas y la tendencia no va en un aumento constante, es decir, que tiende a cambios bruscos se estabiliza.

5. MATRIZ DE EVALUACIÓN DE LAS UNIDADES DE SUPERFICIE DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBEO MECÁNICO

En este capítulo se encuentra desarrollada una matriz de evaluación, en esta se comparan diferentes criterios seleccionados de acuerdo a los resultados obtenidos con las simulaciones de las Unidades de superficie evaluadas a lo largo de este proyecto. El desarrollo de esta matriz da cumplimiento al séptimo objetivo establecido en el proyecto.

En colaboración con Oxy se usó una matriz para toma de decisiones proporcionada por la empresa, que trabaja por medio de macros programados. A continuación se describe el paso a paso realizado que permitió tomar la decisión sobre la Unidad de superficie que se desempeña eficientemente en el Campo La Cira Infantas de acuerdo a parámetros técnicos definidos.

Cuadro 12. Parámetros evaluados en la Matriz de selección

Unidad Criterios	Convencional	Mark II	Maximizer II	Rotaflex	Hidráulica
Run Life Varillas (años)	1.11	0.83	0.9	3.3	3.3
Buckling (lbs)	439	861	684	200	200
Costo Unidad (USD)	\$110.000	\$160.000	\$120.000	\$170.000	\$150.000
Velocidad (SPM)	8	8	8	4.8	4.8
Longitud de Recorrido (in)	192	192	192	288	288
Potencia Requerida (HP)	79.89	68.12	67.5	46.74	46.16
Cargas en la Varilla (%)	59	57	56	49	48
Cargas laterales (lbs)	502	482	483	430	435

En el Cuadro 12 se observan los parámetros seleccionados que permitieron evaluar las diferentes Unidades de Superficie, estos fueron seleccionados de acuerdo a los resultados obtenidos por medio de las simulaciones expuestas en el capítulo anterior, en total se evaluaron ocho parámetros los cuales fueron organizados de acuerdo a un orden relevante, esto con el fin de darle una mayor importancia a la vida útil de la varilla seguida del buckling, el costo de la unidad de superficie, la velocidad de la Unidad de Superficie, la longitud del recorrido, la potencia requerida para el correcto funcionamiento de la Unidad, las cargas de la varilla y por último las cargas laterales de esta.

Cabe resaltar que para este estudio, cada parámetro depende de su definición con respecto al valor obtenido, es decir, que tanto para la vida útil de las varillas como para la longitud de recorrido de las Unidades de Superficie, entre más alto sea el valor obtenido en la simulación se va a obtener un mejor desempeño en las Unidades de Superficie. Por su parte, las demás variables se evalúan de acuerdo a que su resultado sea menor.

Se definieron unos porcentajes de participación para cada parámetro evaluado, teniendo en cuenta el comportamiento de una variable con respecto a otra debido al grado de importancia que estas tienen, donde el número 1 establece que son de igual importancia, el número 3 evalúa la importancia moderada que un parámetro tiene de más con respecto a otro y el número 5 significa el grado de importancia fuerte en comparación a dos parámetros. En el Cuadro 13 se observa cómo se compararon los parámetros seleccionados para realizar la evaluación de la Unidad de Superficie y su nivel de importancia.

Cuadro 13. Comparación de criterios de evaluación

COMPARACIÓN DE CRITERIOS	IMPORTANCIA
Que tan importante es el Run Life Varillas frente al Buckling	1
Que tan importante es el Run Life Varillas frente al Costo Unidad	1
Que tan importante es el Run Life Varillas frente a la Velocidad	3
Que tan importante es el Run Life Varillas frente al Recorrido	3
Que tan importante es el Run Life Varillas frente a la Potencia Requerida	3
Que tan importante es el Run Life Varillas frente a las Cargas en la Varilla	5
Que tan importante es el Run Life Varillas frente a las Cargas laterales	5
Que tan importante es el Buckling frente al Costo Unidad	3
Que tan importante es el Buckling frente a la Velocidad	3
Que tan importante es el Buckling frente al Recorrido	3
Que tan importante es el Buckling frente al Potencia Requerida	3
Que tan importante es el Buckling frente al Cargas en la Varilla	5
Que tan importante es el Buckling frente a las Cargas laterales	5
Que tan importante es el Costo Unidad frente a la Velocidad	3
Que tan importante es el Costo Unidad frente al Recorrido	3
Que tan importante es el Costo Unidad frente a la Potencia Requerida	3
Que tan importante es el Costo Unidad frente a las Cargas en la Varilla	5
Que tan importante es el Costo Unidad frente a las Cargas laterales	5
Que tan importante es la Velocidad frente al Recorrido	1
Que tan importante es la Velocidad frente a la Potencia Requerida	1
Que tan importante es la Velocidad frente a las Cargas en la Varilla	3
Que tan importante es la Velocidad frente a las Cargas laterales	3
Que tan importante es el Recorrido frente a la Potencia Requerida	1
Que tan importante es el Recorrido frente a las Cargas en la Varilla	3
Que tan importante es el Recorrido frente a las Cargas laterales	3
Que tan importante es la Potencia Requerida frente a las Cargas en la Varilla	3
Que tan importante es la Potencia Requerida frente a las Cargas laterales	3
Que tan importante son las Cargas en la Varilla frente a las Cargas laterales	1

En el cuadro de comparación de los parámetros uno con respecto a otro, se establece por ejemplo que el Run life de las varillas con respecto al buckling y a los costos de las Unidades es de igual importancia debido a que son los parámetros que definen el estudio del proyecto de grado.

Otro caso puede ser la importancia que tiene el efecto de buckling con respecto a la velocidad de la Unidad de superficie que es igual a 3, esto quiere decir que el efecto del buckling tiene una importancia moderadamente más alta que la velocidad de la Unidad ya que el buckling define un fenómeno asociado a la compresión de las varillas que hacen que cuando este sea mayor, los esfuerzos sean más grandes y genere desgastes continuos y daños prematuros en la varilla, mientras que la velocidad puede ser manejable dependiendo el tipo de Unidad y el nivel establecido de producción.

En este estudio, el hecho de haber definido que unas variables son de menos importancia con respecto a las otras no quiere decir que no son objeto de evaluación, solo que los resultados técnicos obtenidos para estas en las simulaciones arrojaron datos muy cercanos entre las Unidades y que cumplen con la definición de límites permisibles, por lo cual no se les asigna demasiado porcentaje de participación.

De acuerdo con la comparación de los criterios propuestos para evaluar las Unidades de Superficie y la importancia de estos definida, se calculó un porcentaje de participación para cada criterio a evaluar, los pesos asignados a cada parámetro de evaluación se encuentran expuestos en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Pesos de los criterios de evaluación

Criterio de Evaluación	Pesos (%)
Run Life Varillas	21.8
Buckling	25.7
Costo Unidad	19.6
Velocidad	8.6
Recorrido	8.6
Potencia Requerida	8.6
Cargas en la Varilla	3.6
Cargas laterales	3.6
TOTAL	100%

Estos pesos fueron definidos en relación a la comparación de cada criterio de evaluación propuesto de acuerdo al grado de importancia. Se observa que las variables más importantes a tener en cuenta en la selección, son el buckling, seguida de la vida útil de las varillas y posteriormente el costo de la unidad las cuales definen el objeto de estudio.

Después, es definido el ranking de posiciones de las diferentes Unidades de Superficie de acuerdo a los criterios evaluados anteriormente, la matriz de evaluación establece puntajes a cada parámetro de selección teniendo en cuenta el valor real y el valor ideal, siendo este último el más bajo o más alto de los datos obtenidos en las simulaciones para cada unidad, dependiendo si la variable se está maximizando o minimizando.

De acuerdo a los porcentajes de peso expuestos en el Cuadro 14 y a los valores de cada variable seleccionada según cada Unidad de Superficie a evaluar que se encuentran en el Cuadro 13, se obtuvieron los siguientes resultados para cada Unidad de Superficie.

Cuadro 15. Resumen de resultados Matriz de Evaluación

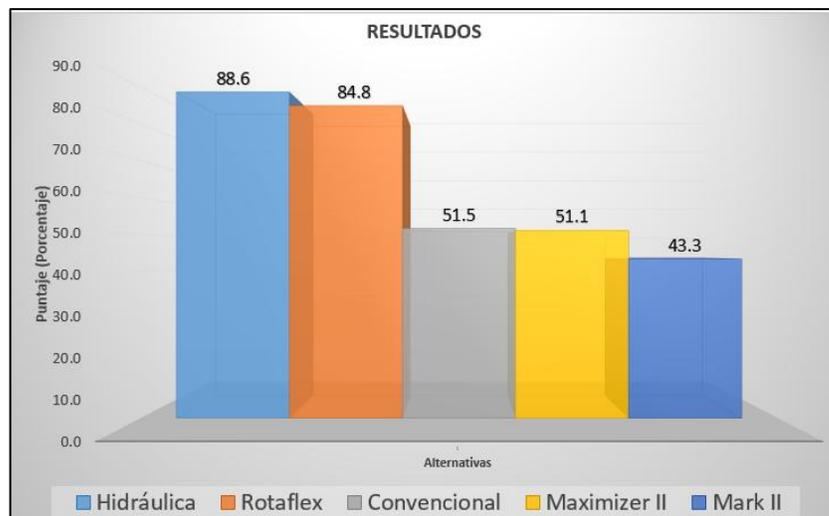
POSICIÓN	NOMBRE	PUNTAJE (%)
1	Hidráulica	88.6
2	Rotaflex	84.8
3	Convencional	51.2
4	Maximizer II	51.1
5	Mark II	43.3

De acuerdo con el Cuadro 15 que contiene los resultados de la matriz de selección para cada Unidad, se concluye que la Unidad de Superficie que tiene mayor puntaje es la Unidad Hidráulica lo cual es coherente con los resultados que se obtuvieron por medio de la simulación para cada uno de los criterios evaluados, Además, se tiene en cuenta el ranking de las tres Unidades de Superficie más viables para los Pozos Nuevos es decir, que las Unidades Rotaflex y Convencionales también son mobjeto de selección para la Campaña de Perforación establecida.

La Unidad de Superficie Hidráulica muestra en estadísticas que tiene que ser intervenida debido a problemas en los equipos de fondo cada 3.3 años, lo cual significa que prolonga por más tiempo la vida útil de las varillas, al igual que las Rotaflex, además el efecto de buckling cuando esta es operada a condiciones máximas no supera las 200 lbs estando por debajo del límite establecido de 400 lbs. Para los pozos en el Campo la Cira Infantas, la Unidad de superficie Hidráulica cumple con el principio que las de largo recorrido y una baja velocidad de operación preservan la vida útil de las varillas puesto que maneja un recorrido de 288 in y una velocidad a condiciones máximas de operación de 4.8 SPM. La potencia requerida para el funcionamiento de la Unidad Hidráulica cuando esta opera a condiciones máximas es la menor en comparación a las otras Unidades evaluadas lo cual significa que tiene un costo de operación más bajo, en cuanto al

consumo de energía. El resultado de las cargas en la varilla y la cargas laterales son valores que se encuentran muy cercanos entre sí para todas las Unidades de Superficie evaluadas y el costo de la Unidad Hidráulica supera el costo de la Unidad Convencional y Maximizer II sin embargo esta diferencia se ve compensado con todos los beneficios y garantías que se pueden obtener cuando la Unidad de Superficie Hidráulica se encuentre en funcionamiento en cuanto a fácil instalación y cuando requiere mantenimiento es menos tedioso de efectuar y sus costos son menores. En el Gráfico 20, se observa la representación gráfica de los resultados obtenidos en la simulación, confirmando que las Unidades de Superficie de carrera larga, tienen mejores ventajas técnicas en cuanto a los resultados obtenidos en la simulación.

Gráfico 20. Resultados de la Matriz de evaluación



6. ANÁLISIS FINANCIERO

Actualmente, en la Empresa Occidental de Colombia LLC., la necesidad de perforar pozos direccionales, el manejo de altas velocidades en las Unidades de Superficie y los problemas de arenamiento en los pozos, está causando una corta vida útil en los componentes de fondo del Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico, que tiene como efectos principales un aumento de fallas en el sistema y por ende un incremento de intervenciones, lo cual lleva a tener costos de operación más altos. Con este proyecto se quiere dar una alternativa de solución buscando unas nuevas unidades de superficie que mitiguen estos daños y hagan que estos procesos sean menos costosos. Por esta razón, se realizó una evaluación técnica de las diferentes Unidades de Superficie; por medio de una simulación en un software de diseño en cada una de estas, teniendo en cuenta que los niveles de producción que tiene la compañía no se vieran afectados por las demás variables de estudio, con el propósito de establecer cuáles son las Unidades de Superficie más viables para los Pozos Nuevos del Campo La Cira-Infantas. De los resultados obtenidos, se selecciona la mejor opción a través de una matriz de evaluación, teniendo como la mejor alternativa la Unidad de Superficie Hidráulica que fue propuesta para el proyecto.

Para la evaluación de la viabilidad financiera del proyecto, es necesario tener en cuenta diferentes aspectos como son: que la unidad monetaria de valor constante; es el Dólar Americano (USD), el período de tiempo de evaluación del proyecto tiene una duración de 5 años con períodos anuales, la tasa de interés de oportunidad (TIO) establecida por la Empresa Occidental de Colombia LLC., es del 15% anual, se utiliza la metodología del Valor Presente Neto (VPN), adicionalmente se realiza un análisis de los costos de inversión (CAPEX) y los costos de operación (OPEX) y por último se establecen dos escenarios de evaluación; el actual, que obedece al comportamiento que tiene la Compañía en sus procesos de instalación de Unidades de Superficie correspondientes a la Unidad Mark II, Maximizer II, Convencional y Rotaflex, y el propuesto; que obedece a la alternativa que se está evaluando en el proyecto para que se instale la Unidad de Superficie Hidráulica.

6.1 COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX)

Según OXY⁴⁹, las inversiones de CAPEX en esencia están estrechamente relacionadas con el concepto capitalizable, las cuales son todos los valores de las compras, construcciones, ampliaciones, adiciones, mejoras y mantenimientos correspondientes a equipos y/o componentes mayores de los mismos, que conforman un activo fijo en uso, y que son necesarias para cumplir con el objeto y alcance del contrato.

⁴⁹Equipo integrado Ecopetrol-Oxy LCI. Proyecto La Cira Infantas; criterios sobre inversiones de capital y gastos de operación. 2010. p. 1.

En este proyecto representa los costos requeridos para la adquisición de las diferentes Unidades de Superficie instaladas y la propuesta para el Campo La Cira-Infantas. En la Tabla 6 se muestran los costos de inversión requeridos para cada una de las Unidades de Superficie del Campo suministrados por la Empresa Occidental de Colombia LLC., y de los cuales se tienen considerados los demás costos asociados a su instalación y transporte.

Tabla 6. Costo de instalación de las Unidades de Superficie

Unidad de Superficie	USD
Convencional	110.000
Mark II	160.000
Maximizer II	120.000
Rotaflex	170.000
Hidráulica	150.000

Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA LLC., Base de datos. 2016

Para el análisis de los escenarios evaluados, la Compañía establece la Campaña de Perforación de los Pozos Nuevos del Campo para los siguientes años, como se muestra en la Tabla 7, para los demás años restantes no se tiene establecido debido a las variaciones que ha tenido el precio del crudo los últimos años y que su determinación dependen de este factor.

Tabla 7. Campaña de Perforación

Período (años)	No. de Pozos
0	60
1	40

Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA LLC. 2016

• **Escenario actual.** Siguiendo el mismo comportamiento que se ha tenido en el Campo durante el último año en cuanto a la cantidad y tipo de Unidades de Superficie instaladas, en la Tabla 8 se establece un porcentaje de participación histórica para luego definir el número de unidades a instalar en las próximas Campañas de Perforación para los períodos 1 y 2 con respecto a cada referencia.

Tabla 8. Porcentaje de participación histórica de las Unidades de Superficie

Unidades	Cantidad de pozos	% de Instalación
Convencional	105	16
Mark II	360	56
Maximizer II	176	27
Rotaflex	4	1
Total	645	100%

Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA LLC., Base DINASON. Hoja 1. 2015

En la Tabla 9 se realiza la respectiva proyección de las Unidades de Superficie del escenario actual teniendo en cuenta el número de pozos a perforar en cada período, ajustando los datos obtenidos por exceso o defecto de cinco.

Tabla 9. Proyección Unidades de Superficie escenario actual

Período (Años)	Unidad	Base	% de instalación	Cantidad
0	Convencional	60	16	10
	Mark II	60	56	33
	Maximizer II	60	27	16
	Rotaflex	60	1	1
1	Convencional	40	16	6
	Mark II	40	56	22
	Maximizer II	40	27	11
	Rotaflex	40	1	1

De acuerdo a los datos obtenidos anteriormente; en la Tabla 10, se calculan los costos totales de inversión del escenario actual para cada período según las Unidades de Superficie a instalar teniendo en cuenta que la inversión se realiza en el período cero y uno. Los demás períodos no se tienen en cuenta ya que no hay Campaña de Perforación establecida para esos años.

Tabla 10. Costos totales de inversión escenario actual

ESCENARIO ACTUAL				Costos por unidad (USD)
Período (Años)	Unidad	Cantidad	Precio (USD)	
0	Convencional	10	110.000	1.100.000
	Mark II	33	160.000	5.280.000
	Maximizer II	16	120.000	1.920.000
	Rotaflex	1	170.000	170.000
Total período		60		8.470.000

Tabla 10. (Continuación)

ESCENARIO ACTUAL				Costos por unidad (USD)
Período (Años)	Unidad	Cantidad	Precio (USD)	
1	Convencional	6	110.000	660.000
	Mark II	22	160.000	3.572.093
	Maximizer II	11	120.000	1.309.767
	Rotaflex	1	170.000	170.000
Total período		40		5.711.860

• **Escenario propuesto.** En la Tabla 11, se calcula los costos totales de inversión para cada período según las Unidades de Superficie a instalar. Al igual que el otro escenario, los tres períodos restantes no se tienen en cuenta ya que no hay Campaña de Perforación establecida para esos años.

Tabla 11. Costos totales de inversión escenario propuesto

ESCENARIO PROPUESTO				Costos por unidad (USD)
Período (Años)	Unidad	Cantidad	Precio (USD)	
0	Hidráulica	60	150.000	9.000.000
1	Hidráulica	40	150.000	6.000.000

6.2 COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX)

Según OXY⁵⁰, Las demás actividades no sujetas a ser capitalizables son consideradas como OPEX, las cuales no están encaminadas al aumento de la vida útil, del nivel de reservas, capacidad productiva o eficiencia operativa de los bienes o activos por encima de los niveles establecidos inicialmente. Además, son los costos recurrentes necesarios para el óptimo funcionamiento de un negocio o producto. Como se muestra en la Tabla 12, en este proyecto es necesario evaluar los costos por cada intervención de las Unidades teniendo en cuenta la vida útil del equipo de fondo, además estos corresponden para los dos escenarios, el actual y propuesto.

Tabla 12. Costos por cada intervención de las Unidades de Superficie

Descripción	USD
Intervención equipo de fondo	100.000
Total	100.000

Fuente: OCCIDENTAL DE COLOMBIA LLC. 2016

⁵⁰Equipo integrado Ecopetrol-Oxy LCI. Proyecto La Cira Infantas; criterios sobre inversiones de capital y costos de operación. 2010. p. 1.

Para establecer los costos totales de operación de las Unidades, es necesario determinar el número de intervenciones que estas requieren en cinco años. En la Tabla 13 se observan los resultados obtenidos y también se aprecia que la vida útil cambia dependiendo del tipo de unidad que se encuentre en superficie. En el caso de la Unidad Hidráulica como no se encuentra instalada en el Campo, se asume la misma vida útil de la Unidad Rotaflex debido a que son del mismo tipo, es decir, unidades de recorrido largo.

Tabla 13. Número de intervenciones por Unidad en 5 años

Unidad	Vida útil (años)	No. de intervenciones
Convencional	1,11	4
Mark II	0,83	5
Maximizer II	0,9	5
Rotaflex	3,3	1
Hidráulica	3,3	1
Total		16

En relación a los resultados obtenidos, se establece los costos totales de intervención por cada escenario establecido, además es necesario tener en cuenta el número de pozos estipulados en las Campañas de Perforación por cada Unidad debido a que estos se acumulan por período dependiendo de la vida útil de la varilla en cada uno de los equipos.

• **Escenario actual.** En la Tabla 14, se establecen los costos totales de operación que para el período uno, corresponden a la unidad Mark II y Maximizer II debido a que su vida útil es menor a un año, por su parte para el período dos presenta intervención; además de las anteriores, la Unidad Convencional, y en el caso de las Unidades Mark II y Maximizer II es necesario considerar el número de pozos a intervenir tanto en la Campaña de Perforación 1 como en la 2 debido a que presentan fallas simultáneamente. Así mismo se realiza para los demás períodos de evaluación teniendo en cuenta los pozos a perforar en cada Campaña.

Tabla 14. Costos totales de operación del escenario actual

ESCENARIO ACTUAL					
Período (Años)	Unidad	No. De pozos a perforar	Cantidad de Intervenciones	Precio por intervención (USD)	Costos totales (USD)
1	Convencional	10	-	100.000	-
	Mark II	33	33	100.000	3.300.000
	Maximizer II	16	16	100.000	1.600.000
	Rotaflex	1	-	100.000	-
Total período					4.900.000
2	Convencional	6	10	100.000	1.000.000
	Mark II	22	55	100.000	5.500.000
	Maximizer II	11	27	100.000	2.700.000
	Rotaflex	1	-	100.000	-
Total período					9.200.000
3	Convencional		16	100.000	1.600.000
	Mark II		55	100.000	5.500.000
	Maximizer II		27	100.000	2.700.000
	Rotaflex		1	100.000	100.000
Total período					9.900.000
4	Convencional		16	100.000	1.600.000
	Mark II		55	100.000	5.500.000
	Maximizer II		27	100.000	2.700.000
	Rotaflex		1	100.000	100.000
Total período					9.900.000
5	Convencional		16	100.000	1.600.000
	Mark II		55	100.000	5.500.000
	Maximizer II		27	100.000	2.700.000
	Rotaflex		-	100.000	-
Total período					9.800.000

- **Escenario propuesto.** En la Tabla 15, se establecen los costos totales de operación, en este debido a que la Unidad Hidráulica presenta un índice de fallas de cada 3,3 años, solamente se realiza intervenciones en el período tres para la Campaña de Perforación establecida en el primer año y en el período cuatro para la Campaña establecida del siguiente, de acuerdo al número de pozos perforados en cada una de estas.

Tabla 15. Costos totales de operación del escenario propuesto

ESCENARIO PROPUESTO			Cantidad de Unidades a intervenir	Precio por intervención (USD)	Costos totales (USD)
Período (Años)	Unidad	No. De intervenciones			
3	Hidráulica	1	60	100.000	6.000.000
4	Hidráulica	1	40	100.000	4.000.000

6.3 EVALUACIÓN FINANCIERA

Para realizar la evaluación financiera del proyecto se considera la metodología del Valor Presente Neto (VPN) debido a que el estudio está enfocado a una evaluación de los costos asociados a la instalación de las Unidades de Superficie en el Campo La Cira-Infantas y también porque el proyecto no genera ingresos. El VPN según lo describe Baca⁵¹, es la diferencia entre el equivalente de valores actuales de todos los ingresos y egresos futuros del proyecto; lo que facilita la decisión desde el punto de vista financiero, de realizar o no uno de estos.

Desde el punto de vista matemático, el VPN es la sumatoria de los flujos de caja al valor actual representado por la Ecuación 7 mostrada a continuación:

Ecuación 7. Determinación matemática del Valor Presente Neto

$$VPN(i) = \sum F_n(1+i)^{-n} = F_0 + F_1(1+i)^{-1} + F_2(1+i)^{-2} + \dots + F_n(1+i)^{-n}$$

Fuente: BACA C., Guillermo. Ingeniería Económica: Valor presente neto. Editorial educativa. Octava edición. 2005. p. 197

Donde i es la tasa a la cual son descontados los flujos de caja, denominada tasa de interés de oportunidad (TIO), F son los flujos netos de efectivo en cada período y n corresponde al período de tiempo.

En este proyecto, se determina el valor presente neto para cada uno de los escenarios anteriormente mencionados, con el fin de observar su beneficio financiero y establecer a dólares de hoy cuánto vale el proyecto.

6.3.1 Tasa de interés de oportunidad (TIO). Esta tasa representa la rentabilidad mínima que exige la Compañía en todos los proyectos que desarrolla con relación al riesgo de la misma y de esta manera se espera que el retorno cubra la totalidad de la inversión realizada.

⁵¹BACA C., Guillermo. Ingeniería Económica: Valor presente neto. Editorial educativa. Octava edición. 2005. p. 197

Occidental de Colombia LLC., maneja para sus proyectos de inversión una TIO del 15% efectivo anual.

6.3.2 Flujo de efectivo. Es una representación gráfica que se emplea en el análisis financiero de un proyecto y permite relacionar los ingresos y los egresos del mismo en un periodo dado. Ya que el proyecto no genera ingresos, solo se relacionan los egresos teniendo en cuenta los costos de adquisición de las Unidades y los costos de intervención de las mismas.

• **Escenario actual.** A continuación en el Gráfico 21, se representa gráficamente el flujo de caja para la instalación de las Unidades de Superficie.

Gráfico 21. Flujo de caja escenario actual

	Años						USD	Total
Ingresos								-
Inversión	8.470.000	5.711.860						14.181.860
Costos de operación		4.900.000	9.200.000	9.900.000	9.900.000	9.800.000		43.700.000
Egresos Totales	8.470.000	10.611.860	9.200.000	9.900.000	9.900.000	9.800.000		57.881.860

A continuación en la Ecuación 8 se observa el procedimiento del cálculo del VPN, como es un estudio de costos donde no se tienen ingresos, se discrimina el signo negativo correspondiente a los egresos.

Ecuación 8. Valor Presente Neto escenario actual

$$\begin{aligned}
 VPN(0,15) = & (8.470.000) + \left(\frac{10.611.860}{(1 + 0,15)^1} \right) + \left(\frac{9.200.000}{(1 + 0,15)^2} \right) + \left(\frac{9.900.000}{(1 + 0,15)^3} \right) \\
 & + \left(\frac{9.900.000}{(1 + 0,15)^4} \right) + \left(\frac{9.800.000}{(1 + 0,15)^5} \right) = 41'696.325 \text{ USD}
 \end{aligned}$$

• **Escenario propuesto.** A continuación en el Gráfico 22, se representa gráficamente el flujo de caja para la instalación de las Unidades de Superficie.

Gráfico 22. Flujo de caja escenario propuesto

	Años					USD	Total
Ingresos							-
Inversión	9.000.000	6.000.000					15.000.000
Costos de operación			6.000.000	4.000.000			10.000.000
Egresos Totales	9.000.000	6.000.000	6.000.000	4.000.000			25.000.000

A continuación en la Ecuación 9 se observa el procedimiento del cálculo del VPN, para este escenario.

Ecuación 9. Valor Presente Neto escenario propuesto

$$\begin{aligned}
 VPN(0,15) &= (9.000.000) + \left(\frac{6.000.000}{(1 + 0,15)^1} \right) + \left(\frac{6.000.000}{(1 + 0,15)^3} \right) + \left(\frac{4.000.000}{(1 + 0,15)^4} \right) \\
 &= 20'449.501 \text{ USD}
 \end{aligned}$$

6.4 CONCLUSIÓN DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA

Desde el punto de vista financiero la mejor opción para que la Compañía lleve a cabo su próxima Campaña de Perforación es utilizar el escenario propuesto, es decir, la instalación de Unidades de Superficie Hidráulicas, debido a que estas implican un ahorro en costos de 21'246.824 USD que corresponden al 50,9% de ahorro frente al escenario actual que tiene la Compañía en sus procesos de instalación de Unidades de Superficie originado en una disminución en los costos de operación.

7. CONCLUSIONES

- Las Unidades de Superficie del Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico de largo recorrido y baja velocidad, como lo son la Unidad Hidráulica y la Unidad Rotaflex, ayudan a preservar la vida útil de los equipos de fondo instalados en el pozo debido a que reducen las fallas en este, ya que a una baja velocidad, es decir a 2,5 SPM, las varillas tienen a resistir más de 7 años en relación a las otras unidades que manejan velocidades altas, es decir mayores a 3,5 SPM, donde la vida útil de estas está representada en menos de 5 años.
- Las unidades de superficie que se encuentran instaladas en el Campo la Cira Infantas son las Unidades Convencionales, Mark II, Maximizer II y Rotaflex con 105, 360, 176 y 4 unidades respectivamente.
- El pozo tipo utilizado para la evaluación de las Unidades de Superficie fue el Cira 2842, el cual fue elegido por medio de diferentes parámetros de selección estipulados por la empresa Occidental de Colombia que se ajustan a las características de los Pozos Nuevos, entre ellos se encuentran la tasa de producción de 521 BPD, la profundidad del pozo que es de 3703 ft y el sistema de levantamiento artificial Bombeo Mecánico con el que opera actualmente.
- La Unidad de Superficie Hidráulica a pesar de que tiene un costo de inversión alto, es decir 150.000 USD en comparación a las demás Unidades de Superficie evaluadas que tienen un costo de instalación promedio de 140.000 USD, cumple con los criterios seleccionados de evaluación, estas cuentan con un alto recorrido de 288 in, una baja velocidad de 2.53 SPM y cuando es operada en condiciones máximas no causa efectos negativos sobre los equipos de fondo además compensa su costo de adquisición manteniendo la producción del pozo en 950 BFPD y preservando la vida útil de estos
- Para maximizar la vida de la caja de engranaje, se debe mantener la carga en menos del 100%. En los dos casos de simulación, condiciones actuales y condiciones máximas, la Unidad de Superficie Convencional, muestra una sobrecarga de 102% y 111% respectivamente, lo que es necesario simular con una Unidad de capacidad más grande, pero incurriría en mayores costos de inversión.
- El uso de un software con respecto al otro, permite realizar discernimiento de los resultados comparando cada simulación, en este caso se observa que el software Rodstar es más viable, ya que tiene en cuenta más variables tales como los kilowatts por día correspondientes al consumo de energía, los efectos de inercia del fluido, las fuerzas para desanclar la bomba y el tamaño de la polea del motor y longitud de la correa.

- Los criterios más relevantes a evaluar cuando se busca una Unidad de Superficie para el Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico, son la velocidad de la Unidad, el recorrido de la Unidad, la potencia requerida para su funcionamiento, el efecto de buckling que puede causar durante su operación, la preservación de la vida útil del equipo de fondo y las cargas sobre la varilla o cargas laterales que se presentan sobre esta.
- El efecto de compresión o buckling sobre la varilla además de las cargas aplicadas a estas son parámetros importantes que definen la vida útil, estas se reflejan en el número de intervenciones realizadas a los equipos de fondo en relación a las Unidades de Superficie instaladas, las cuales, las de largo recorrido no han presentado fallas o se estima que su intervención sea de cada 3 años, en comparación a las demás que máximo cada año presentan fallas en la varilla debido a la fricción lo que aumenta sus costos de operación.
- La evaluación de la viabilidad financiera de este proyecto realizada por medio de la metodología del valor presente neto dio como resultado que para la próxima Campaña de Perforación que la compañía lleve a cabo, la instalación de Unidades de Superficie Hidráulicas para el sistema de levantamiento artificial Bombeo Mecánico corresponderá a un ahorro del 50,9% lo que se traduce en 21'.246.824 USD con respecto a la instalación de las Unidades de superficie que actualmente se encuentran en el Campo.

8. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis detallado sobre el consumo de energía de las Unidades de Superficie evaluadas teniendo en cuenta el torque de la caja reductora de la Unidad y la distribución de cargas sobre esta.
- Evaluar la viabilidad del proyecto por medio del VPN teniendo en cuenta la producción incremental de los Pozos Nuevos en el Campo definiendo este dato como ingreso del proyecto.
- Simular las Unidades de Superficie evaluadas en este proyecto modificando características de estas como el recorrido y el tamaño de la caja reductora obteniendo más a fondo las conclusiones realizadas a partir de la elaboración de este proyecto.
- Realizar la simulación de las Unidades de Superficie evaluadas en el software Rodstar usando la sección del programa que simula diferentes casos en modo lote simultáneamente, comparando inmediatamente los resultados obtenidos para todas las Unidades.
- Realizar las respectivas simulaciones de las Unidades de Superficie que presentan sobrecarga en alguno de sus parámetros, estipulando sus variables reales de operación óptima.
- Adaptar las condiciones y características del pozo tipo para que estas sean lo más cercanas posibles a la realidad del Campo La Cira Infantas, en cuanto a problemas como un golpe severo de fluido que muestra efectos más acertados del desgaste de los equipos de fondo.
- Evaluar la instalación de las Unidades de Superficie seleccionadas por la matriz de acuerdo al ranking de las tres mejores, teniendo en cuenta sus costos de operación y mantenimiento cuando estas se implementen en el Campo.

BIBLIOGRAFÍA

BACA C., Guillermo. Ingeniería Económica: Valor presente neto. Editorial educativa. Octava edición. 2005. 411 p.

CAICEDO, M.R., HERRERA, J.F. (C&C Energy Group) and SARMIENTO, D.B (Weatherford). "Operational Cost Saving through Artificial Lift Optimization with Long Stroke Pumping Units in Fields of Cravo Viejo Block". Paper: Society of Petroleum Engineers. 165048-MS SPE. 2013. 8 p.

DIAZ C., José A., LÓPEZ U., Juan E. Análisis y mejoramiento de la producción de pozos en Bombeo Mecánico con alta relación gas aceite aplicación Campo Payoa. Bucaramanga, Colombia. 2007. [en línea]. [citado el 19 de Octubre de 2015]. Disponible en: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/597/2/122783.pdf>.

ECOPETROL. Carta Petrolera. [En línea] Edición 108. <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera108/rev_produccion2.htm>. [citado el 19 de Diciembre de 2015].

_____. Carta Petrolera: La Cira-Infantas casi un siglo después. El Campo de la eterna juventud. [En línea] Edición 129 <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera_129/produccion.html>. [citado el 26 de enero de 2016].

ECOPETROL-ICP. Evaluación Integrada de Yacimientos del Campo La Cira-Infantas. 1999. Citado por: GARZÓN CAMACHO, Joel. Análisis de distribución y eficiencia de la inyección de agua en un sector del área 3W del Campo La Cira-Infantas a través de trazadores radioactivos. Bucaramanga, 2009, 150 p. Trabajo de grado (Ingeniero de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Disponible en el catálogo en línea de la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander: <<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/742/2/132304.pdf>>.

EQUIPO INTEGRADO ECOPETROL-OXY LCI. Proyecto La Cira-Infantas: criterios sobre inversiones de capital y gastos de operación. 2010. 4 p.

ENTREVISTA con Manuel Monroy. Occidental de Colombia Inc. Bogotá D.C 21 de Septiembre de 2015.

E.W. Metters. "A New Concept in Pumping Unit Technology" Paper: Society of Petroleum Engineers. 3193-MS SPE. 1970.

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA. Guía Metodológica General Opciones de Grado. 2014. 103 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 1486: presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos escritos. Bogotá: ICONTEC 2008. 13 p.

_____. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 4490. Bogotá: El instituto, 1998, 12 p.

_____. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 5613. Bogotá: El instituto. 1998, 8 p.

MONROY, Manuel, et. al. Failure Index Reduction Strategy for Artificial Lift Systems in Cira Infantas Field. Paper: Society of Petroleum Engineers. 173950-MS SPE. 2015. 8 p.

OCCIDENTAL DE COLOMBIA, LLC. Base de datos Occidental de Colombia. Pozo Tipo Profile. 2014. 2 p.

PDVSA. Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. Venezuela. 2002. 70 p.

PRIETO, María Elizabeth, et. al. Redevelopment Progress for Colombia's La Cira-Infantas Field. Paper: Society of Petroleum Engineers. 120794-MS SPE. 2009. 9 p.

RAGA, Juan Adolfo. Manual de selección de unidades de bombeo mecánico del activo de producción poza rica región norte. Pozarica Veracruz. 2001. 206 p.

RIVERO, José L. Análisis nodal y explotación de petróleo. 2007. 337 p.

ROY D., Ewing, Oilwell Div. of United States Steel Corp. "Long Stroke Pumping Unit". Paper: American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc. 3186-MS SPE. 1970. 7 p.

RUBIANO, Edward, et. al. Run Life Improvement by Implementation of Artificial Lift Systems Failure Classification and Root Cause Failure Classification. Paper: Society of Petroleum Engineers. 173913-MS SPE. 2015. 18 p.

SOLANO DÍAZ, Álvaro Andrés. Análisis de información obtenida de registros de pozos y del modelo petrofísico y su integración con la geología del yacimiento para soportar el plan de desarrollo del Campo La Cira Infantas. Bucaramanga, 2011, 126 p. Trabajo de grado (Geólogo). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Disponible en el catálogo en línea de la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander: <<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1134/2/139130.pdf>>.

SVINOS G, John. Software Avanzado de Optimización para Bombeo por Cabillas Consultaría y Entrenamiento. Theta Enterprise, Inc. 2005. 165 p.

TAKÁCS, Gábor. BOMBEO MECANICO MODERNO. 2 ed. Bucaramanga 2009. 289 p.

THETA ENTERPRISE, INC. Manual de Bombeo Mecánico: Optimización de Bombeo Mecánico. 2 ed. California-USA. 2005. 292 p.

VÁSQUEZ C., Hernán. La historia del petróleo en Colombia. En: Revista Universidad Eafit [en línea]. No. 93 <<http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/download/1418/1290>>. [Citado el 19 de Diciembre de 2015].

VILLEGAS MONTIEL, David Vicente. Aplicación de un nuevo sistema de bombeo mecánico no convencional con tubería flexible para la explotación de pozos de crudo pesado. México D.F., 2014, 235 p. Trabajo de grado (Ingeniero Petrolero). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Disponible en el catálogo en línea de la Biblioteca de la Universidad Nacional Autónoma de México: <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/3276>>.

WEATHERFORD INTERNATIONAL LTD. Unidades Hidráulicas de velocidad variable 2. 2005. 5 p.

_____. Artificial lift systems: ALS7501.01 sucker rods brochure. 2003. 8 p.

_____. Documento de power point: Bombas mecánicas de subsuelo. 84 p.

_____. Documento de power point: Varillas de bombeo. 117 p.

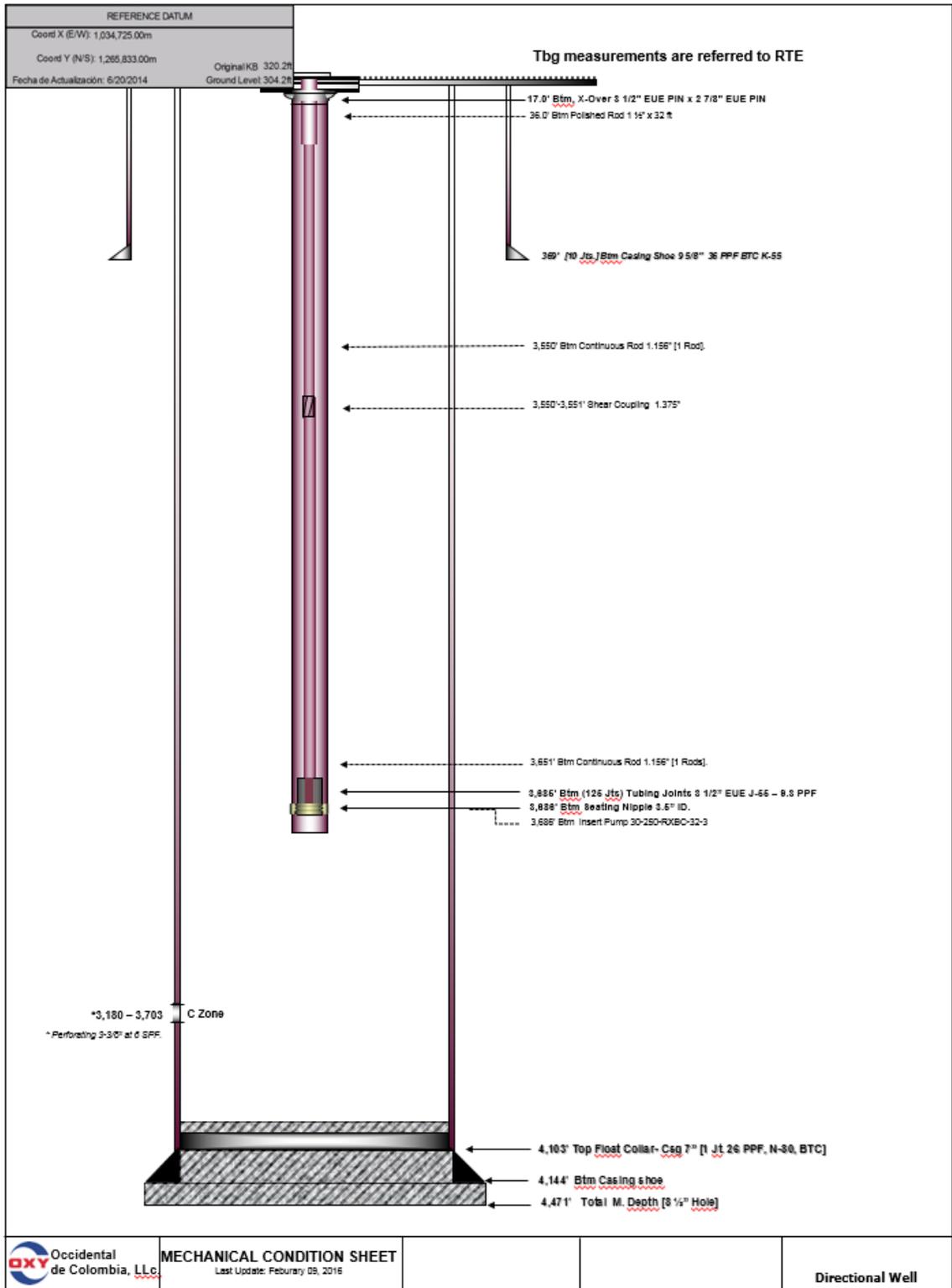
_____. Pumping Units: Reciprocating Rod-Lift Systems. 2005-2007. 14 p.

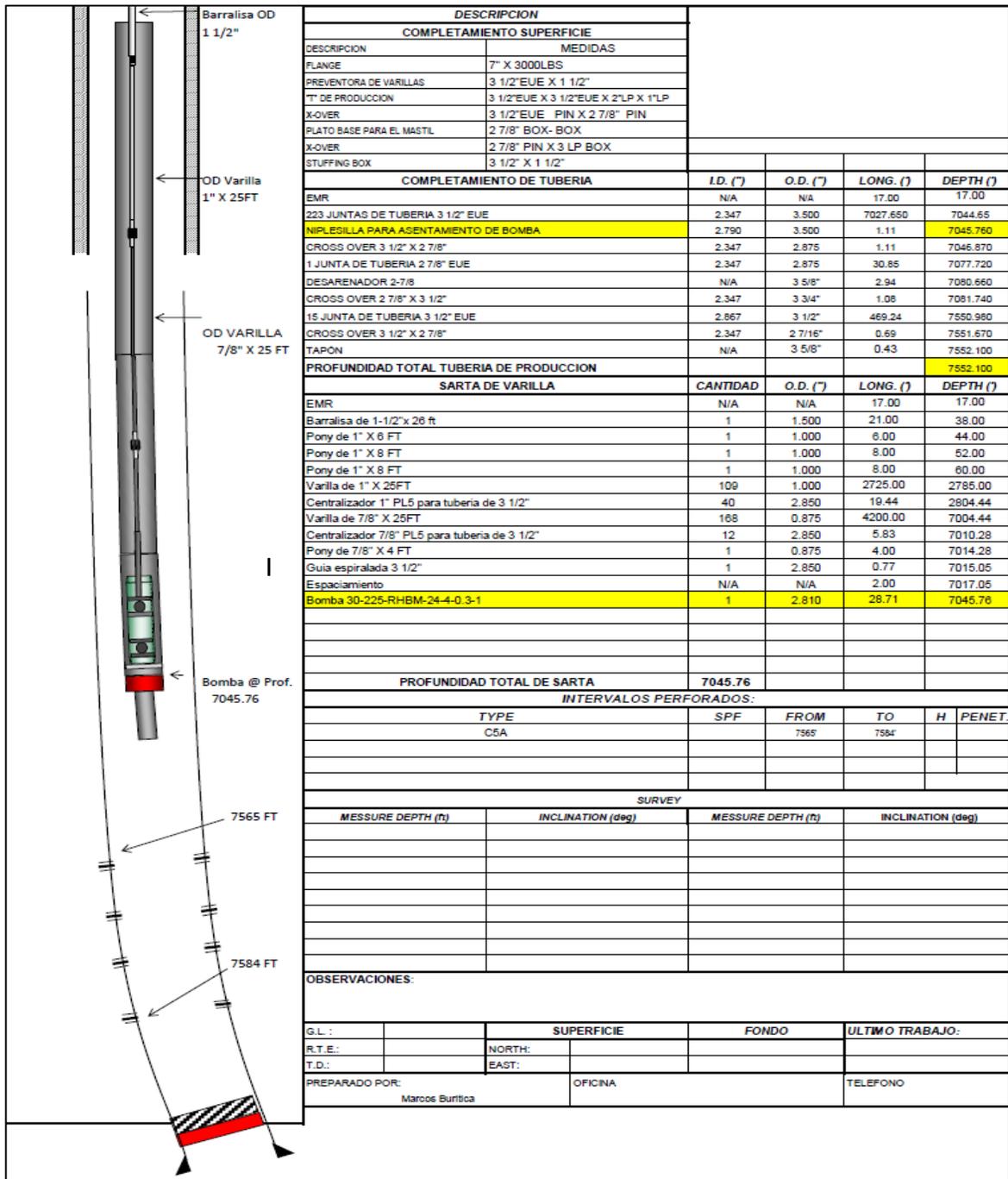
ANEXOS

ANEXO A.
DISTRIBUCIÓN UNIDADES DE SUPERFICIE

ANEXO B.

ESTADO MECÁNICO DEL POZO CIRA 2842



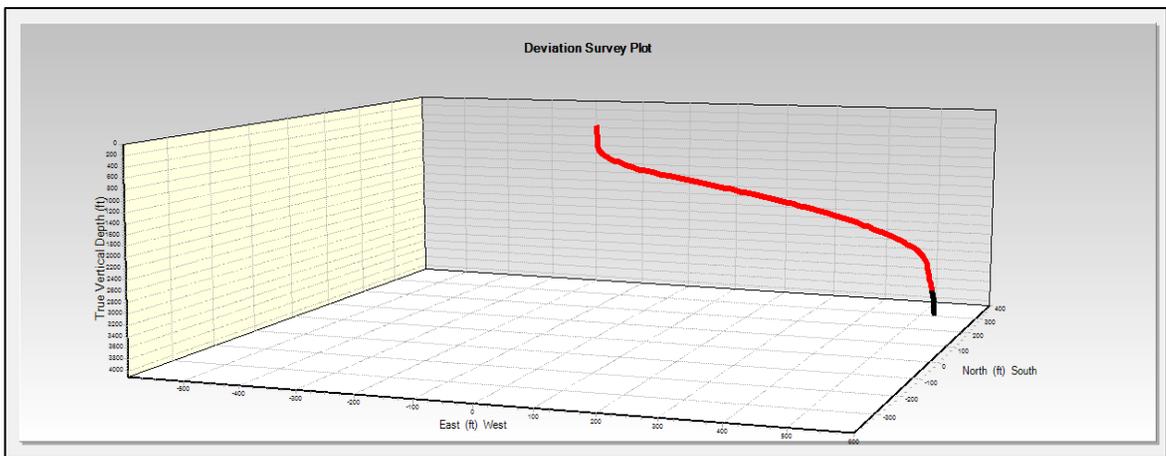


ANEXO C.
SURVEY DEL POZO CIRA 2842

Measured Depth	Inclination	Azimuth
0	0	0
369	1,053	41,38
403	1,15	41,38
433	1,85	11,44
464	2,54	0,74
496	3,4	17,37
526	4,35	28,32
556	5,46	30,01
587	6,7	34,03
617	7,73	38,37
648	8,84	44,73
679	9,74	50,84
710	10,9	56,28
755	11,71	61,48
800	13	63,68
845	14,67	65,44
890	15,55	65,62
935	16,47	64,14
980	17,93	61,76
1025	19,09	60,59
1046	19,51	60,518
1070	19,99	60,44
1115	19,71	60,44
1160	19,55	59,65
1205	19,45	59,38
1250	19,07	60,03
1295	18,71	58,92
1340	18,66	58,39
1385	18,46	59,18
1430	18	59,39
1475	18,07	58,59
1520	17,74	57,98
1566	17,51	57,78
1611	16,98	57,92
1656	16,71	58,81
1701	16,7	57,04
1746	16,56	56,39
1791	16,17	57,04
1797	16,126	57,18
1836	15,84	58,11
1881	15,63	59,49
1926	15,98	62,04

Measured Depth	Inclination	Azimuth
1971	15,54	63,96
2016	14,91	63,68
2061	14,16	64,35
2106	13,55	64,43
2151	13,09	65,39
2196	12,9	64,52
2241	12,66	65,21
2286	12,44	64,76
2331	11,81	62,8
2377	11,3	60,5
2422	11	61,55
2467	10,28	62,7
2512	9,97	63,86
2557	9,24	64,15
2602	9,25	60,92
2647	9,18	58,32
2692	8,28	56,77
2737	7,64	57,41
2782	7,02	56,97
2827	6,5	59,44
2872	5,73	61,38
2917	5,14	65,65
2962	4,29	71,11
3007	3,5	72,79
3052	2,66	73,01
3097	1,65	75,9
3113	1,476	72,481
3142	1,18	63,79
3150,19	1,175	62,47
3187	1,16	56,43
3233	0,88	48,36
3278	1	59,73
3323	0,83	51,31
3368	1,04	44,48
3413	1,3	54,62
3458	1,32	46,74
3503	1,45	57,72
3548	1,44	56,33
3593	1,35	53,67
3638	1,27	41,1
3683	1,06	53,79
3700,15	0,974	48,096

Measured Depth	Inclination	Azimuth
3728	0,86	36,64
3773	0,94	45,18
3818	0,79	40,85
3863	0,91	35,91
3908	0,57	34,85
3953	0,72	27,39
3999	0,76	21,75
4044	0,5	1,72
4089	0,68	346,19
4160	0,617	318,137



ANEXO D.

**RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL POZO TIPO CON LA UNIDAD DE
SUPERFICIE ROTAFLEX EN SOFTWARE SROD**



GE Oil & Gas
 Well Performance Services
 Automation & Optimization
 T +1 281 495 1100 (Automat
 www.lufkin.com

SROD v7.0.1259 - PREDICTION OF ROD PUMPING SYSTEM PERFORMANCE

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:17:26 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (BASE WELL TYPE : Deviated
 CASE)
 COMMENTS : TESIS

**** PRIME MOVER ****

Mfgr and Type : G.E. 100 HP KOF
 Max Speed (rpm) : 1202 Speed Variation (%) : 2.6
 Min Speed (rpm) : 1170 Cyclic Load Factor : 1.071
 Power Required (hp) : 28.91 Peak Regenerative Power (hp) : -2.36
 Motor Load (% of Rating) : 28.9 Prime Mover Output (hp) : 23.97
 Sheave Ratio (Unit/Prime Mover) : 2.753

**** PUMPING UNIT ****

Mfgr and Type : ROTAFLEX RH900-360-288
 Actual Max Load (lbs) : 24668 Actual Min Load (lbs) : 8180
 Average Pumping Speed (spm) : 2.5 Max Load (% of Rating) : 68.5
 Polished Rod Power (hp) : 21.58 Unit and Drive Train Loss (hp) : 2.4
 Computed Surface Stroke (in) : 291.5

**** SUMMARY OF REDUCER LOADING ****

IN BALANCE

Max Torque (m in-lbs) : 146.4
 Min Torque (m in-lbs) : -12.4
 Counterbalance Moment (lbs) : 16319
 Percent of Reducer Rating : 45.7

**** ROD LOADING ****

	<u>Diameter (in)</u>	<u>Length (ft)</u>	<u>Modulus (psi)</u>	<u>MM Fr Coeff</u>	<u>Guides</u>	<u>Loading</u>
1)	1.156	3686	29	0.2	N (0)	39

Max Stress (surf.) (psi) : 23408 Min Stress (surf.) (psi) : 7889

ROD LOADING AT SURFACE AS % OF RATING

<u>Service Factor</u>	<u>Class C,K</u>	<u>Class D</u>	<u>COROD SER</u>
1	81	61	34
0.9	95	71	39
0.8	114	83	45
0.7	141	101	53

**** DOWNHOLE PERFORMANCE ****

	<u>Stroke (in)</u>	<u>BPD at 100% eff.</u>	<u>BPD at 95% eff.</u>
Gross :	278.4	507 (24h/d)	482 (24h/d)
Net :	247.1	450 (24h/d)	428 (24h/d)
Tubing Stretch (in) :	4	Lost Displacement (bpd) :	7
Loss Along Rod String (hp) :	9.76	Pump Power (hp) :	11.82
Tubing Size (in) :	3.5	Tubing Anchor Location (ft) :	0
Pump Spacing Guide (in) :	N/A	Pump Fillage (%) :	90

**** Non-Dimensional Variables ****

Fo/S/Kr :	0.04	N/No'	: 0.04
-----------	------	-------	--------

**** OTHER BASIC DATA ****

Reducer Rating (in-lbs) :	320	Crank Rotation :	N/A
Overall Speed Ratio :	85.5	Rod Damping Factors (up/down) :	0.05 / 0.15
Min/Max Tubing Head Press. (psi) :	N/A	Buoyant Rod Weight (lbs) :	11122
Total Load on Pump (lbs) :	7090	Pump Bore Size (in) :	2.5
Pump Load Adjustment (lbs) :	0	Tubing Gradient (psi/ft) :	0.433
Pump Depth (ft) :	3686	Pump Intake Pressure (psi) :	239
Pump Friction (lbs) :	200	SV Load (lbs) :	10822
TV Load (lbs) :	18512		

**** ROD LOADING AT SPECIAL DEPTHS (Top of Lower Interval) ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:17:27 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (BASE WELL TYPE : Deviated
 CASE)
 COMMENTS : TESIS

Interval : 1

Depth (ft) : 0 Rod Diameter (in) : 1.156
 Max Stress (psi) : 23408 Min Stress (psi) : 7889
 Min Stress at : -1874 Rod Weight : 3.57
 Bottom (psi) (lbs/ft)

ROD LOADING AS % OF RATING

<u>Service Factor</u>	<u>Class C,K</u>	<u>Class D</u>	<u>COROD SER</u>
1	81	61	34
0.9	95	71	39
0.8	114	83	45
0.7	141	101	53

**** Electric and Power Summary ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:17:27 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (BASE WELL TYPE : Deviated CASE)
 COMMENTS : TESIS

Prime Mover Description : G.E. 100 HP KOF (118 Amps)
 Output of Motor (hp) : 23.97
 Input to Motor (true hp) : 24.21 Input to Motor (detent : 24.38 hp)
 Peak Upstroke Amps : 56.5 Peak Downstroke Amps : 56.2
 Thermal Current (amps) : 50.7 Average Power Factor : 0.455
 Max Power Factor : 0.611 Min Power Factor : -0.116
 Demand (kw) (100% run in : 18.1 Motor Load (% of rated : 43
 15 min.) amps)
 Electrical CLF : 1.0048 Rated Voltage (volts) : 460
 KVA (kilovolt amps) : 39.7 Run Time (h/d) : 24

Cost (\$/kwh)	Basis	Monthly Bills(\$)		Cost/Barrel/1000ft(\$)	
		Non-Detent	Detent	Non-Detent	Detent
0.01		132	133	0.0028	0.0028
0.02		264	265	0.0056	0.0057
0.04		527	531	0.0113	0.0114
0.06		791	796	0.0169	0.0171
0.08		1054	1062	0.0226	0.0227
0.1		1318	1327	0.0282	0.0284

Power costs do not include transformer and surface transmission line losses. Also, power factor penalty and demand charges, if any, are not considered. Lifting cost is based on net pump stroke and BPD at 100% efficiency.

Fixed Capacitors for Power Factor Correction

Max Power Factor Desired	KVAR Required	Resulting Average Power Factor
0.611	0	0.455
0.724	9.4	0.571
0.837	17.6	0.713
0.95	26.6	0.899

Losses in Surface Unit and Drive Train : 2.4 (hp)
 Polished Rod Power (hp) : 21.58
 Losses Along Rod String (hp) : 9.76

Useful Downhole Pump Output (hp) : 11.82
Overall Surface Equipment Efficiency : 89.1
(%)
Motor Efficiency (%) : 99
Rod Efficiency (%) : 54.8
Overall System Efficiency (%) : 48.8

Caution: A good electrical power prediction requires a good prediction of polished rod power. Motor manufacturers may not always use the same rating criteria. Thus, electrical comparisons between different manufacturers should be used with caution.

**** INPUT DATA SUMMARY ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:17:27 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e WELL TYPE : Deviated
 (BASE CASE)
 COMMENTS : TESIS

WELL NAME : CIRA2842
 ANALYST : AMERICA
 COMPANY : OXY
 PUMPING UNIT ID : EVI900-360-288
 (Description) ROTAFLEX RH900-360-288
 MOTOR ID : GE100HP
 (Description) (G.E. 100 HP KOF)
 'C'BAL OPTION : SROD Defined
 COUNTERBALANCE WEIGHT (lbs) : 0
 CRANK HOLE : 1 - 291.5 (in)
 ROTATION OF UNIT : C'WISE
 SPEED VARIATION : VARIED
 PUMP DEPTH (ft) : 3686
 PUMP DIAMETER (in) : 2.5
 PUMP INTAKE PRESSURE (psi) : 239
 PUMPING SPEED (SPM) : 2.5
 PERCENT COMPLETE PUMP FILLAGE : 90
 TUBINGHEAD PRESSURE (psi) : 120
 TUBING ANCHOR DEPTH (ft) : 0
 TUBING GRADIENT (psi/ft) : 0.433
 TUBING SIZE : 4 - 3 1/2 in.

Rod/Taper Information:

ROD STRING DESIGN OPTION : SPECIFY ROD DESIGN

	<u>Diameter (in)</u>	<u>Length (ft)</u>	<u>Tensile (psi)</u>	<u>Modulus (MM psi)</u>	<u>Weight (lbs/ft)</u>	<u>Guide Type</u>
1) COROD	SER 3686	140000	29	3.57	N	
	1.15625					

SERVICE FACTOR : 0.9
 ELECTRIC COST (cents/kwh) : 10
 UPSTROKE DAMPING FACTOR : 0.05
 DOWNSTROKE DAMPING FACTOR : 0.15
 PUMP FRICTION (lbs) : 200
 STUFFING BOX FRICTION (lbs) : 100
 PUMP LOAD ADJUSTMENT (lbs) : 0
 BUOYANT WEIGHT ADJUSTMENT (lbs) : 0
 PUMP LOAD COEFFICIENT (lbs/ft/sec) : 5
 Run Time (h/d) : 24
 MAX SIDE LOAD FOR BASE ROD : 50
 (lbs/rod)
 MAX SIDE LOAD FOR MOLDED GUIDE : 40
 (lbs/rod)

MAX SIDE LOAD FOR WHEELED GUIDE : 200
(lbs/rod)
ROD FRICTION COEFFICIENT : 0.2
MOLDED GUIDE FRICTION RATIO : 1.5
WHEELED GUIDE FRICTION RATIO : 0.1
OTHER GUIDE FRICTION RATIO : 2
WELL DEVIATION SURVEY : See Well Deviation Report
User Input Rod Guide Weights
**** WARNINGS / NOTIFICATIONS ****

**** DYN0 GRAPH ****

WELL NAME : Pozo Tipo

DATE/TIME : 4/27/2016 5:17:28 PM

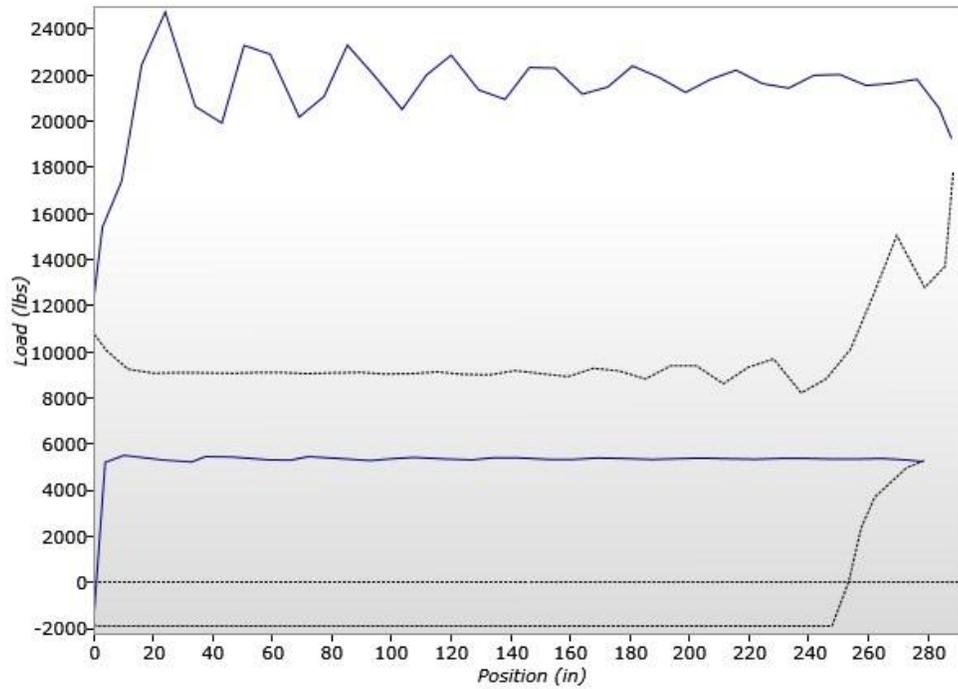
ANALYST : AMERICA

COMPANY : OXY

DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (BASE WELL TYPE : Deviated
CASE)

Comments : TESIS

Dyno Surface and Pump Cards and Permissible Loads



**** WELL DEVIATION ****

WELL NAME : Pozo Tipo

DATE/TIME : 4/27/2016 5:17:28 PM

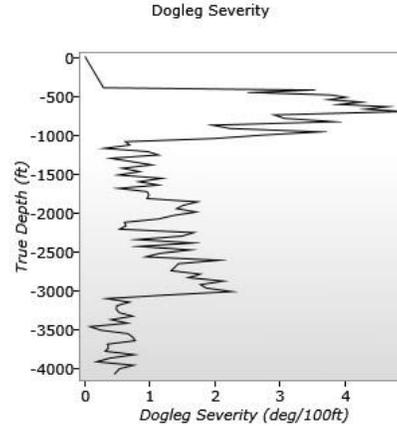
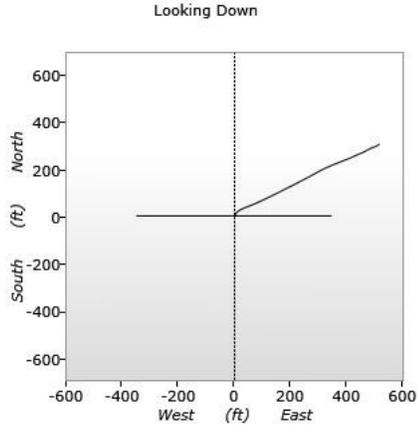
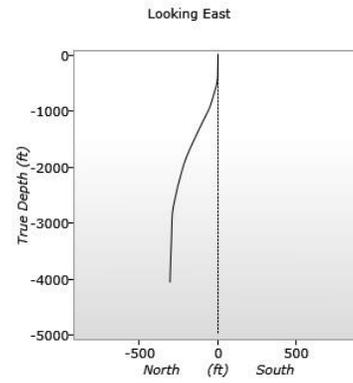
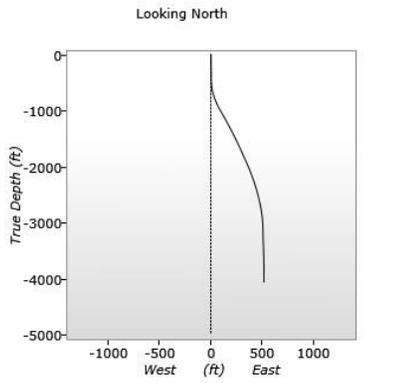
ANALYST : AMERICA

COMPANY : OXY

DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (BASE CASE)

WELL TYPE : Deviated

Comments : TESIS



MD (ft)	INC (deg)	Azimuth (deg)	TVD (ft)	N-S (ft)	E-W (ft)	Dogleg (deg/100ft)	Severity
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00N	0.00E	0.00	
403.00	1.15	41.38	402.97	3.03N	2.67E	0.29	
433.00	1.85	11.44	432.96	3.74N	2.97E	3.43	
464.00	2.54	0.74	463.94	4.91N	3.08E	2.58	
496.00	3.40	17.37	495.90	6.53N	3.37E	3.78	
526.00	4.35	28.32	525.83	8.38N	4.17E	4.00	
556.00	5.46	30.01	555.72	10.62N	5.43E	3.73	
587.00	6.70	34.03	586.54	13.39N	7.18E	4.23	
617.00	7.73	38.37	616.31	16.42N	9.41E	3.88	
648.00	8.84	44.73	646.98	19.75N	12.38E	4.64	
679.00	9.74	50.84	677.58	23.10N	16.09E	4.30	
710.00	10.90	56.28	708.08	26.38N	20.56E	4.88	
755.00	11.71	61.48	752.20	30.92N	28.11E	2.89	
800.00	13.00	63.68	796.16	35.35N	36.66E	3.05	
845.00	14.67	65.44	839.85	39.96N	46.38E	3.83	
890.00	15.55	65.62	883.30	44.82N	57.06E	1.96	
935.00	16.47	64.14	926.55	50.09N	68.29E	2.24	
980.00	17.93	61.76	969.54	56.15N	80.14E	3.60	
1025.00	19.09	60.59	1012.21	63.04N	92.65E	2.71	
1070.00	19.99	60.44	1054.62	70.45N	105.75E	2.00	
1115.00	19.71	60.44	1096.94	77.99N	119.04E	0.62	
1160.00	19.55	59.65	1139.33	85.54N	132.14E	0.69	
1205.00	19.45	59.38	1181.75	93.16N	145.08E	0.30	
1250.00	19.07	60.03	1224.23	100.65N	157.90E	0.97	
1295.00	18.71	58.92	1266.81	108.05N	170.45E	1.13	
1340.00	18.66	58.39	1309.43	115.55N	182.76E	0.39	
1385.00	18.46	59.18	1352.09	122.97N	195.01E	0.71	
1430.00	18.00	59.39	1394.83	130.16N	207.11E	1.03	
1475.00	18.07	58.59	1437.62	137.34N	219.05E	0.57	
1520.00	17.74	57.98	1480.44	144.61N	230.82E	0.84	
1566.00	17.51	57.78	1524.29	152.01N	242.62E	0.52	
1611.00	16.98	57.92	1567.26	159.11N	253.91E	1.18	
1656.00	16.71	58.81	1610.33	165.95N	265.02E	0.83	

1701.00	16.70	57.04	1653.43	172.82N	275.97E	1.13
1746.00	16.56	56.39	1696.55	179.89N	286.74E	0.52
1791.00	16.17	57.04	1739.73	186.85N	297.34E	0.96
1836.00	15.84	58.11	1782.98	193.50N	307.81E	0.98
1881.00	15.63	59.49	1826.30	199.82N	318.25E	0.95
1926.00	15.98	62.04	1869.60	205.81N	328.94E	1.73
1971.00	15.54	63.96	1912.90	211.36N	339.83E	1.52
2016.00	14.91	63.68	1956.33	216.57N	350.43E	1.41
2061.00	14.16	64.35	1999.88	221.52N	360.59E	1.71
2106.00	13.55	64.43	2043.58	226.18N	370.30E	1.36
2151.00	13.09	65.39	2087.36	230.57N	379.69E	1.13
2196.00	12.90	64.52	2131.21	234.86N	388.86E	0.61
2241.00	12.66	65.21	2175.10	239.09N	397.87E	0.63
2286.00	12.44	64.76	2219.02	243.22N	406.73E	0.53
2331.00	11.81	62.80	2263.02	247.39N	415.21E	1.67
2377.00	11.30	60.50	2308.09	251.76N	423.32E	1.49
2422.00	11.00	61.55	2352.24	255.98N	430.93E	0.80
2467.00	10.28	62.70	2396.46	259.87N	438.27E	1.67
2512.00	9.97	63.86	2440.76	263.42N	445.34E	0.82
2557.00	9.24	64.15	2485.13	266.72N	452.09E	1.63
2602.00	9.25	60.92	2529.55	270.05N	458.50E	1.15
2647.00	9.18	58.32	2573.97	273.69N	464.72E	0.94
2692.00	8.28	56.77	2618.44	277.35N	470.48E	2.07
2737.00	7.64	57.41	2663.01	280.74N	475.71E	1.44
2782.00	7.02	56.97	2707.64	283.85N	480.54E	1.38
2827.00	6.50	59.44	2752.33	286.64N	485.04E	1.32
2872.00	5.73	61.38	2797.07	289.02N	489.20E	1.77
2917.00	5.14	65.65	2841.87	290.92N	493.01E	1.59
2962.00	4.29	71.11	2886.72	292.30N	496.44E	2.13
3007.00	3.50	72.79	2931.61	293.25N	499.34E	1.77
3052.00	2.66	73.01	2976.55	293.96N	501.65E	1.87
3097.00	1.65	75.90	3021.52	294.42N	503.28E	2.26
3142.00	1.18	63.79	3066.50	294.79N	504.32E	1.23
3187.00	1.16	56.43	3111.49	295.24N	505.12E	0.34

3233.00	0.88	48.36	3157.49	295.74N	505.77E	0.68
3278.00	1.00	59.73	3202.48	296.16N	506.37E	0.49
3323.00	0.83	51.31	3247.47	296.57N	506.96E	0.48
3368.00	1.04	44.48	3292.47	297.06N	507.50E	0.53
3413.00	1.30	54.62	3337.46	297.65N	508.21E	0.74
3458.00	1.32	46.74	3382.45	298.30N	509.00E	0.40
3503.00	1.45	57.72	3427.43	298.96N	509.86E	0.66
3548.00	1.44	56.33	3472.42	299.57N	510.81E	0.08
3593.00	1.35	53.67	3517.41	300.20N	511.71E	0.25
3638.00	1.27	41.10	3562.39	300.89N	512.46E	0.66
3683.00	1.06	53.79	3607.39	301.51N	513.13E	0.74
3728.00	0.86	36.64	3652.38	302.03N	513.66E	0.77
3773.00	0.94	45.18	3697.37	302.56N	514.13E	0.35
3818.00	0.79	40.85	3742.37	303.06N	514.59E	0.36
3863.00	0.91	35.91	3787.36	303.58N	515.00E	0.31
3908.00	0.57	34.85	3832.36	304.05N	515.34E	0.76
3953.00	0.72	27.39	3877.36	304.49N	515.60E	0.38
3999.00	0.76	21.75	3923.35	305.03N	515.85E	0.18
4044.00	0.50	1.72	3968.35	305.50N	515.96E	0.75
4089.00	0.68	346.19	4013.35	305.96N	515.90E	0.53
4160.00	0.62	318.14	4084.34	306.65N	515.55E	0.45

LEGAL NOTICE: Because of the uncertainty of variable well conditions and the necessity of relying on facts, information and supporting services furnished by others, GE Oil & Gas is unable to guarantee the accuracy of any chart interpretation, research analysis, or recommendations contained herein. While best efforts should be used in gathering and interpreting such information, USERS OF THIS REPORT AGREE THAT GE OIL & GAS SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY DAMAGES ARISING FROM THE USE OF THIS REPORT. Produced by Lufkin. Copyright © 2009 - 2015 by GE Oil & Gas - Confidential & Proprietary. SROD is a trademark of Lufkin Industries, LLC.

ANEXO E.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL POZO TIPO CON LA UNIDAD DE SUPERFICIE MARK II A CONDICIONES ACTUALES EN SOFTWARE SROD



GE Oil & Gas
 Well Performance Services
 Automation & Optimization
 T +1 281 495 1100 (Automat
 www.lufkin.com

SROD v7.0.1259 - PREDICTION OF ROD PUMPING SYSTEM PERFORMANCE

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:25:54 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
 1)
 COMMENTS : TESIS- MarkII

**** PRIME MOVER ****

Mfgr and Type : G.E. 100 HP KOF
 Max Speed (rpm) : 1207 Speed Variation (%) : 4.4
 Min Speed (rpm) : 1155 Cyclic Load Factor : 1.302
 Power Required (hp) : 32.44 Peak Regenerative Power (hp) : -10.16
 Motor Load (% of Rating) : 32.4 Prime Mover Output (hp) : 24.69
 Sheave Ratio (Unit/ Prime Mover) : 10.661

**** PUMPING UNIT ****

Mfgr and Type : LUFKIN M912-427-192 (CC'WISE)
 Actual Max Load (lbs) : 24209 Actual Min Load (lbs) : 6255
 Average Pumping Speed (spm) : 3.85 Max Load (% of Rating) : 56.7
 Polished Rod Power (hp) : 22.22 Unit and Drive Train Loss (hp) : 2.47
 Computed Surface Stroke (in) : 192

**** SUMMARY OF REDUCER LOADING ****

IN BALANCE

Max Torque (m in-lbs) : 811.5
 Min Torque (m in-lbs) : -158.4
 Counterbalance Moment (m in-lbs) : 2186.8
 Counterbalance Effect (X100 lbs) : 182.47
 Percent of Reducer Rating : 89

**** ROD LOADING ****

	<u>Diameter (in)</u>	<u>Length (ft)</u>	<u>Modulus (psi)</u>	<u>(MM Fr Coeff)</u>	<u>Guides</u>	<u>Loading</u>
1)	1.156	3686	29	0.2	N (0)	41

Max Stress (surf.) (psi) : 22971 Min Stress (surf.) (psi) : 6055

ROD LOADING AT SURFACE AS % OF RATING

<u>Service Factor</u>	<u>Class C,K</u>	<u>Class D</u>	<u>COROD SER</u>
1	85	65	37
0.9	98	74	41
0.8	115	86	47
0.7	140	103	55

**** DOWNHOLE PERFORMANCE ****

	<u>Stroke (in)</u>	<u>BPD at 100% eff.</u>	<u>BPD at 95% eff.</u>
Gross :	180.5	507 (24h/d)	482 (24h/d)
Net :	158.9	446 (24h/d)	424 (24h/d)

Tubing Stretch (in) :	4	Lost Displacement (bpd) :	11
Loss Along Rod String (hp) :	10.5	Pump Power (hp) :	11.71
Tubing Size (in) :	3.5	Tubing Anchor Location (ft) :	0
Pump Spacing Guide (in) :	N/A	Pump Fillage (%) :	90

**** Non-Dimensional Variables ****

Fo/S/Kr : 0.05 N/No' : 0.06

**** OTHER BASIC DATA ****

Reducer Rating (in-lbs) :	912	Crank Rotation :	(CC'WISE) -
Overall Speed Ratio :	306.2	Rod Damping Factors (up/down) :	0.05 / 0.15
Min/Max Tubing Head Press. (psi) :	N/A	Buoyant Rod Weight (lbs) :	11122
Total Load on Pump (lbs) :	7090	Pump Bore Size (in) :	2.5
Pump Load Adjustment (lbs) :	0	Tubing Gradient (psi/ft) :	0.433
Pump Depth (ft) :	3686	Pump Intake Pressure (psi) :	239
Pump Friction (lbs) :	200	SV Load (lbs) :	10822
TV Load (lbs) :	18512		

**** ROD LOADING AT SPECIAL DEPTHS (Top of Lower Interval) ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:25:55 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
 1)
 COMMENTS : TESIS- MarkII

Interval : 1

Depth (ft) : 0 Rod Diameter (in) : 1.156
 Max Stress (psi) : 22971 Min Stress (psi) : 6055
 Min Stress at : -1874 Rod Weight : 3.57
 Bottom (psi) (lbs/ft)

ROD LOADING AS % OF RATING

<u>Service Factor</u>	<u>Class C,K</u>	<u>Class D</u>	<u>COROD SER</u>
1	85	65	37
0.9	98	74	41
0.8	115	86	47
0.7	140	103	55

**** Electric and Power Summary ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:25:56 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
 1)
 COMMENTS : TESIS- MarkII

Prime Mover Description : G.E. 100 HP KOF (118 Amps)
 Output of Motor (hp) : 24.69
 Input to Motor (true hp) : 26.8 Input to Motor (detent : 27.71 hp)
 Peak Upstroke Amps : 69 Peak Downstroke Amps : 69.1
 Thermal Current (amps) : 53.2 Average Power Factor : 0.515
 Max Power Factor : 0.803 Min Power Factor : -0.202
 Demand (kw)(100% run in : 20 Motor Load (% of rated : 45.1
 15 min.) amps)
 Electrical CLF : 1.022 Rated Voltage (volts) : 460
 KVA (kilovolt amps) : 38.9 Run Time (h/d) : 24

Cost (\$/kwh)	Basis	Monthly Bills(\$)		Cost/Barrel/1000ft(\$)	
		Non-Detent	Detent	Non-Detent	Detent
0.01		146	151	0.0032	0.0033
0.02		292	302	0.0063	0.0065
0.04		584	603	0.0126	0.013
0.06		875	905	0.0189	0.0196
0.08		1167	1206	0.0252	0.0261
0.1		1459	1508	0.0316	0.0326

Power costs do not include transformer and surface transmission line losses. Also, power factor penalty and demand charges, if any, are not considered. Lifting cost is based on net pump stroke and BPD at 100% efficiency.

Fixed Capacitors for Power Factor Correction

Max Power Factor Desired	KVAR Required	Resulting Average Power Factor
0.803	0	0.515
0.852	5.6	0.586
0.901	11.5	0.676
0.95	18.3	0.799

Losses in Surface Unit and Drive Train : 2.47 (hp)
 Polished Rod Power (hp) : 22.22
 Losses Along Rod String (hp) : 10.5

Useful Downhole Pump Output (hp) : 11.71
Overall Surface Equipment Efficiency : 82.9
(%)
Motor Efficiency (%) : 92.1
Rod Efficiency (%) : 52.7
Overall System Efficiency (%) : 43.7

Caution: A good electrical power prediction requires a good prediction of polished rod power. Motor manufacturers may not always use the same rating criteria. Thus, electrical comparisons between different manufacturers should be used with caution.

**** INPUT DATA SUMMARY ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:25:56 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e WELL TYPE : Deviated
 (CASE 1)
 COMMENTS : TESIS- MarkII

WELL NAME : CIRA2842
 ANALYST : AMERICA
 COMPANY : OXY
 PUMPING UNIT ID : LM912-427-192
 (Description) LUFKIN M912-427-192
 MOTOR ID : GE100HP
 (Description) (G.E. 100 HP KOF)
 'C'BAL OPTION : SROD Defined
 COUNTERBALANCE MOMENT (in-lbs) : 0
 CRANK HOLE : 1 - 192.0 (in)
 ROTATION OF UNIT : CC'WISE
 SPEED VARIATION : VARIED
 PUMP DEPTH (ft) : 3686
 PUMP DIAMETER (in) : 2.5
 PUMP INTAKE PRESSURE (psi) : 239
 PUMPING SPEED (SPM) : 3.85
 PERCENT COMPLETE PUMP FILLAGE : 90
 TUBINGHEAD PRESSURE (psi) : 120
 TUBING ANCHOR DEPTH (ft) : 0
 TUBING GRADIENT (psi/ft) : 0.433
 TUBING SIZE : 4 - 3 1/2 in.

Rod/Taper Information:

ROD STRING DESIGN OPTION : SPECIFY ROD DESIGN

	<u>Diameter (in)</u>	<u>Length (ft)</u>	<u>Tensile (psi)</u>	<u>Modulus (MM psi)</u>	<u>Weight (lbs/ft)</u>	<u>Guide Type</u>
1) COROD	SER 3686		140000	29	3.57	N
	1.15625					

SERVICE FACTOR : 0.9
 ELECTRIC COST (cents/kwh) : 10
 UPSTROKE DAMPING FACTOR : 0.05
 DOWNSTROKE DAMPING FACTOR : 0.15
 PUMP FRICTION (lbs) : 200
 STUFFING BOX FRICTION (lbs) : 100
 PUMP LOAD ADJUSTMENT (lbs) : 0
 BUOYANT WEIGHT ADJUSTMENT (lbs) : 0
 PUMP LOAD COEFFICIENT (lbs/ft/sec) : 5
 Run Time (h/d) : 24
 MAX SIDE LOAD FOR BASE ROD : 50
 (lbs/rod)
 MAX SIDE LOAD FOR MOLDED GUIDE : 40
 (lbs/rod)

MAX SIDE LOAD FOR WHEELED GUIDE : 200
(lbs/rod)
ROD FRICTION COEFFICIENT : 0.2
MOLDED GUIDE FRICTION RATIO : 1.5
WHEELED GUIDE FRICTION RATIO : 0.1
OTHER GUIDE FRICTION RATIO : 2
WELL DEVIATION SURVEY : See Well Deviation Report
User Input Rod Guide Weights
**** WARNINGS / NOTIFICATIONS ****

**** DYN0 GRAPH ****

WELL NAME : Pozo Tipo

DATE/TIME : 4/27/2016 5:25:56 PM

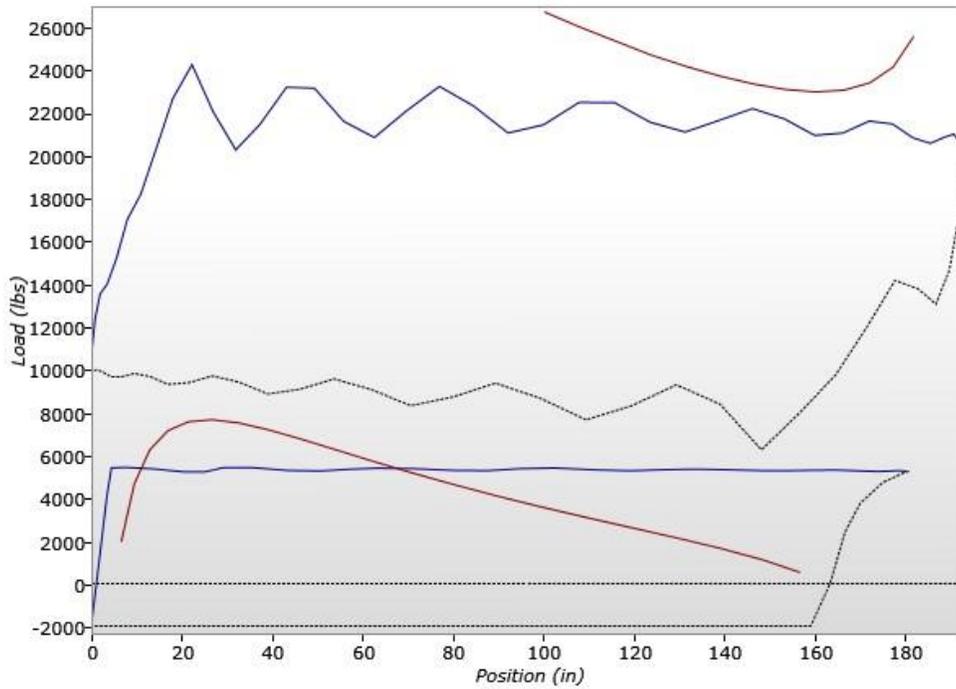
ANALYST : AMERICA

COMPANY : OXY

DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
1)

Comments : TESIS- MarkII

Dyno Surface and Pump Cards and Permissible Loads



**** REDUCER TORQUE ****

WELL NAME : Pozo Tipo

DATE/TIME : 4/27/2016 5:25:57 PM

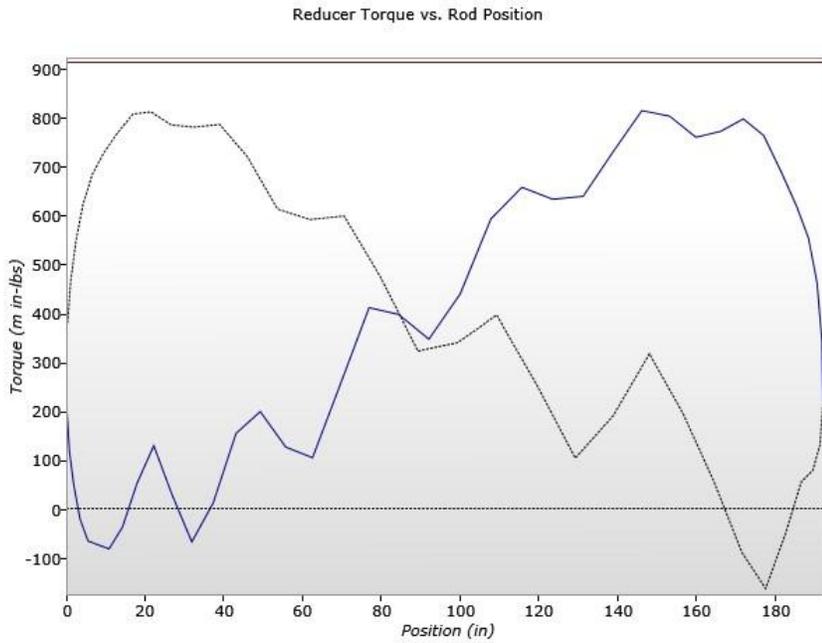
ANALYST : AMERICA

COMPANY : OXY

DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE 1)

WELL TYPE : Deviated

Comments : TESIS- MarkII

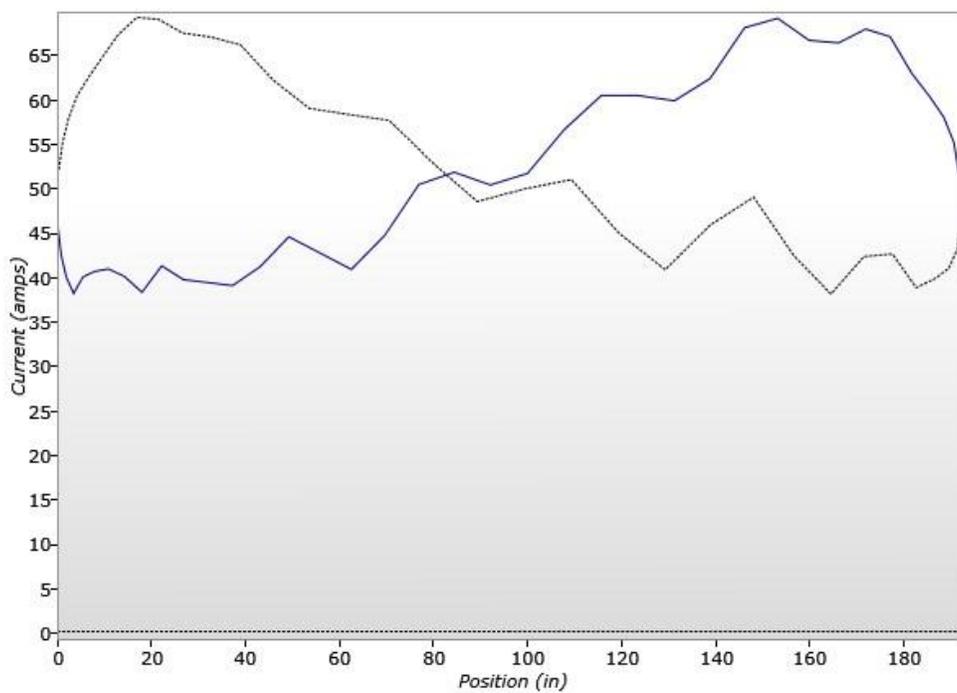


**** MOTOR CURRENT ****

WELL	NAME Pozo Tipo	DATE/TIME	4/27/2016 5:25:57 PM
:	:	:	:
ANALYST	AMERICA	COMPANY	OXY
:	:	:	:
DATA	FILE Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE 1)	WELL	TYPE Deviated
:	:	:	:

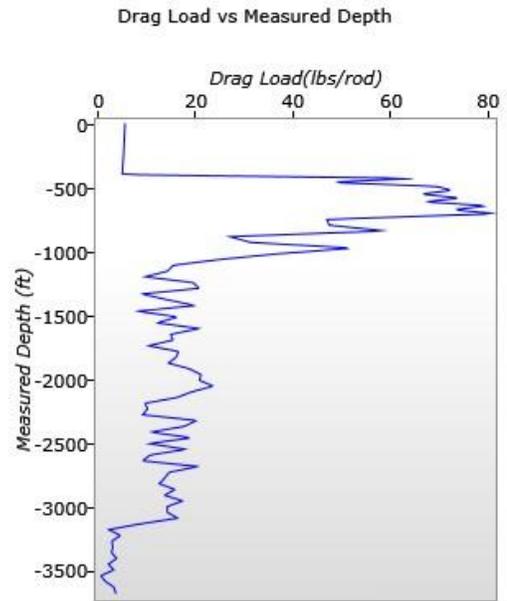
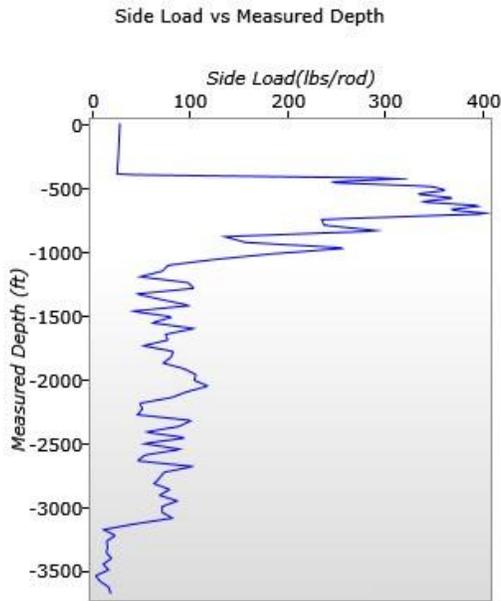
Comments : TESIS- MarkII

Current vs. Rod Position



**** SIDE/DRAG LOAD ****

WELL NAME :	Pozo Tipo	DATE/TIME :	4/27/2016 5:25:57 PM
ANALYST :	AMERICA	COMPANY :	OXY
DATA FILE :	Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE 1)	WELL TYPE :	Deviated
Comments :	TESIS- MarkII		



Max Side Load (lbs/rod)	:	402
Max Drag Load (lbs/rod)	:	80
Rod Length for Steel/Fiberglass (ft/ft)	:	25/37.5

**** WELL DEVIATION ****

WELL NAME : Pozo Tipo

DATE/TIME : 4/27/2016 5:25:57 PM

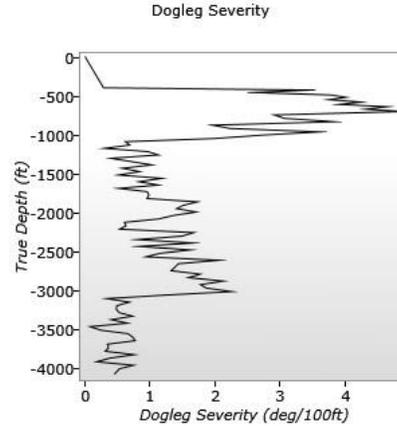
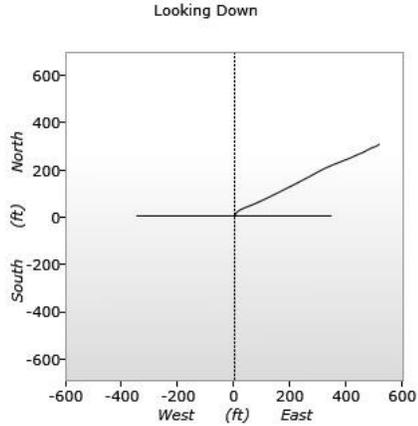
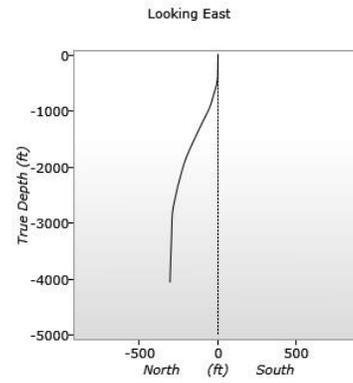
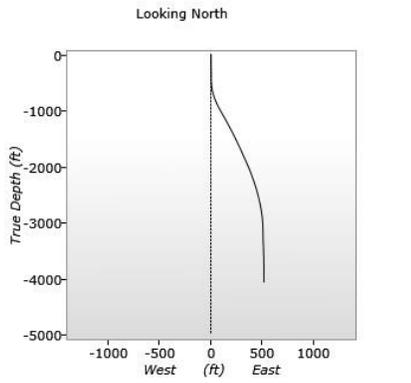
ANALYST : AMERICA

COMPANY : OXY

DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE 1)

WELL TYPE : Deviated

Comments : TESIS- MarkII



MD (ft)	INC (deg)	Azimuth (deg)	TVD (ft)	N-S (ft)	E-W (ft)	Dogleg (deg/100ft)	Severity
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00N	0.00E	0.00	
403.00	1.15	41.38	402.97	3.03N	2.67E	0.29	
433.00	1.85	11.44	432.96	3.74N	2.97E	3.43	
464.00	2.54	0.74	463.94	4.91N	3.08E	2.58	
496.00	3.40	17.37	495.90	6.53N	3.37E	3.78	
526.00	4.35	28.32	525.83	8.38N	4.17E	4.00	
556.00	5.46	30.01	555.72	10.62N	5.43E	3.73	
587.00	6.70	34.03	586.54	13.39N	7.18E	4.23	
617.00	7.73	38.37	616.31	16.42N	9.41E	3.88	
648.00	8.84	44.73	646.98	19.75N	12.38E	4.64	
679.00	9.74	50.84	677.58	23.10N	16.09E	4.30	
710.00	10.90	56.28	708.08	26.38N	20.56E	4.88	
755.00	11.71	61.48	752.20	30.92N	28.11E	2.89	
800.00	13.00	63.68	796.16	35.35N	36.66E	3.05	
845.00	14.67	65.44	839.85	39.96N	46.38E	3.83	
890.00	15.55	65.62	883.30	44.82N	57.06E	1.96	
935.00	16.47	64.14	926.55	50.09N	68.29E	2.24	
980.00	17.93	61.76	969.54	56.15N	80.14E	3.60	
1025.00	19.09	60.59	1012.21	63.04N	92.65E	2.71	
1070.00	19.99	60.44	1054.62	70.45N	105.75E	2.00	
1115.00	19.71	60.44	1096.94	77.99N	119.04E	0.62	
1160.00	19.55	59.65	1139.33	85.54N	132.14E	0.69	
1205.00	19.45	59.38	1181.75	93.16N	145.08E	0.30	
1250.00	19.07	60.03	1224.23	100.65N	157.90E	0.97	
1295.00	18.71	58.92	1266.81	108.05N	170.45E	1.13	
1340.00	18.66	58.39	1309.43	115.55N	182.76E	0.39	
1385.00	18.46	59.18	1352.09	122.97N	195.01E	0.71	
1430.00	18.00	59.39	1394.83	130.16N	207.11E	1.03	
1475.00	18.07	58.59	1437.62	137.34N	219.05E	0.57	
1520.00	17.74	57.98	1480.44	144.61N	230.82E	0.84	
1566.00	17.51	57.78	1524.29	152.01N	242.62E	0.52	
1611.00	16.98	57.92	1567.26	159.11N	253.91E	1.18	
1656.00	16.71	58.81	1610.33	165.95N	265.02E	0.83	

1701.00	16.70	57.04	1653.43	172.82N	275.97E	1.13
1746.00	16.56	56.39	1696.55	179.89N	286.74E	0.52
1791.00	16.17	57.04	1739.73	186.85N	297.34E	0.96
1836.00	15.84	58.11	1782.98	193.50N	307.81E	0.98
1881.00	15.63	59.49	1826.30	199.82N	318.25E	0.95
1926.00	15.98	62.04	1869.60	205.81N	328.94E	1.73
1971.00	15.54	63.96	1912.90	211.36N	339.83E	1.52
2016.00	14.91	63.68	1956.33	216.57N	350.43E	1.41
2061.00	14.16	64.35	1999.88	221.52N	360.59E	1.71
2106.00	13.55	64.43	2043.58	226.18N	370.30E	1.36
2151.00	13.09	65.39	2087.36	230.57N	379.69E	1.13
2196.00	12.90	64.52	2131.21	234.86N	388.86E	0.61
2241.00	12.66	65.21	2175.10	239.09N	397.87E	0.63
2286.00	12.44	64.76	2219.02	243.22N	406.73E	0.53
2331.00	11.81	62.80	2263.02	247.39N	415.21E	1.67
2377.00	11.30	60.50	2308.09	251.76N	423.32E	1.49
2422.00	11.00	61.55	2352.24	255.98N	430.93E	0.80
2467.00	10.28	62.70	2396.46	259.87N	438.27E	1.67
2512.00	9.97	63.86	2440.76	263.42N	445.34E	0.82
2557.00	9.24	64.15	2485.13	266.72N	452.09E	1.63
2602.00	9.25	60.92	2529.55	270.05N	458.50E	1.15
2647.00	9.18	58.32	2573.97	273.69N	464.72E	0.94
2692.00	8.28	56.77	2618.44	277.35N	470.48E	2.07
2737.00	7.64	57.41	2663.01	280.74N	475.71E	1.44
2782.00	7.02	56.97	2707.64	283.85N	480.54E	1.38
2827.00	6.50	59.44	2752.33	286.64N	485.04E	1.32
2872.00	5.73	61.38	2797.07	289.02N	489.20E	1.77
2917.00	5.14	65.65	2841.87	290.92N	493.01E	1.59
2962.00	4.29	71.11	2886.72	292.30N	496.44E	2.13
3007.00	3.50	72.79	2931.61	293.25N	499.34E	1.77
3052.00	2.66	73.01	2976.55	293.96N	501.65E	1.87
3097.00	1.65	75.90	3021.52	294.42N	503.28E	2.26
3142.00	1.18	63.79	3066.50	294.79N	504.32E	1.23
3187.00	1.16	56.43	3111.49	295.24N	505.12E	0.34

3233.00	0.88	48.36	3157.49	295.74N	505.77E	0.68
3278.00	1.00	59.73	3202.48	296.16N	506.37E	0.49
3323.00	0.83	51.31	3247.47	296.57N	506.96E	0.48
3368.00	1.04	44.48	3292.47	297.06N	507.50E	0.53
3413.00	1.30	54.62	3337.46	297.65N	508.21E	0.74
3458.00	1.32	46.74	3382.45	298.30N	509.00E	0.40
3503.00	1.45	57.72	3427.43	298.96N	509.86E	0.66
3548.00	1.44	56.33	3472.42	299.57N	510.81E	0.08
3593.00	1.35	53.67	3517.41	300.20N	511.71E	0.25
3638.00	1.27	41.10	3562.39	300.89N	512.46E	0.66
3683.00	1.06	53.79	3607.39	301.51N	513.13E	0.74
3728.00	0.86	36.64	3652.38	302.03N	513.66E	0.77
3773.00	0.94	45.18	3697.37	302.56N	514.13E	0.35
3818.00	0.79	40.85	3742.37	303.06N	514.59E	0.36
3863.00	0.91	35.91	3787.36	303.58N	515.00E	0.31
3908.00	0.57	34.85	3832.36	304.05N	515.34E	0.76
3953.00	0.72	27.39	3877.36	304.49N	515.60E	0.38
3999.00	0.76	21.75	3923.35	305.03N	515.85E	0.18
4044.00	0.50	1.72	3968.35	305.50N	515.96E	0.75
4089.00	0.68	346.19	4013.35	305.96N	515.90E	0.53
4160.00	0.62	318.14	4084.34	306.65N	515.55E	0.45

LEGAL NOTICE: Because of the uncertainty of variable well conditions and the necessity of relying on facts, information and supporting services furnished by others, GE Oil & Gas is unable to guarantee the accuracy of any chart interpretation, research analysis, or recommendations contained herein. While best efforts should be used in gathering and interpreting such information, USERS OF THIS REPORT AGREE THAT GE OIL & GAS SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY DAMAGES ARISING FROM THE USE OF THIS REPORT. Produced by Lufkin. Copyright © 2009 - 2015 by GE Oil & Gas - Confidential & Proprietary. SROD is a trademark of Lufkin Industries, LLC.

ANEXO F.

**RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL POZO TIPO CON LA UNIDAD DE
SUPERFICIE MAXIMIZER II A CONDICIONES ACTUALES EN SOFTWARE
SROD**



GE Oil & Gas
 Well Performance Services
 Automation & Optimization
 T +1 281 495 1100 (Automat
 www.lufkin.com

SROD v7.0.1259 - PREDICTION OF ROD PUMPING SYSTEM PERFORMANCE

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:39:18 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
 2)
 COMMENTS : TESIS-MaxII

**** PRIME MOVER ****

Mfgr and Type : G.E. 100 HP KOF
 Max Speed (rpm) : 1203 Speed Variation (%) : 3.5
 Min Speed (rpm) : 1161 Cyclic Load Factor : 1.136
 Power Required (hp) : 28.58 Peak Regenerative Power (hp) : -4.42
 Motor Load (% of Rating) : 28.6 Prime Mover Output (hp) : 24.53
 Sheave Ratio (Unit/ Prime Mover) : 9.705

**** PUMPING UNIT ****

Mfgr and Type : MAXIMIZER II 912-427-192 P14-117-49 CRANKS (C'WISE)
 Actual Max Load (lbs) : 24762 Actual Min Load (lbs) : 6653
 Average Pumping Speed (spm) : 3.86 Max Load (% of Rating) : 58
 Polished Rod Power (hp) : 22.08 Unit and Drive Train Loss (hp) : 2.45
 Computed Surface Stroke (in) : 192.1

**** SUMMARY OF REDUCER LOADING ****

IN BALANCE

Max Torque (m in-lbs) : 694.5
 Min Torque (m in-lbs) : -48
 Counterbalance Moment (m in-lbs) : 1475.6
 Counterbalance Effect (X100 lbs) : 164.08
 Percent of Reducer Rating : 76.2

**** ROD LOADING ****

	<u>Diameter (in)</u>	<u>Length (ft)</u>	<u>Modulus (psi)</u>	<u>(MM Fr Coeff)</u>	<u>Guides</u>	<u>Loading</u>
1)	1.156	3686	29	0.2	N (0)	42

Max Stress (surf.) (psi) : 23497 Min Stress (surf.) (psi) : 6434

ROD LOADING AT SURFACE AS % OF RATING

<u>Service Factor</u>	<u>Class C,K</u>	<u>Class D</u>	<u>COROD SER</u>
1	87	66	37
0.9	100	75	42
0.8	118	88	48
0.7	144	105	56

**** DOWNHOLE PERFORMANCE ****

	<u>Stroke (in)</u>	<u>BPD at 100% eff.</u>	<u>BPD at 95% eff.</u>
Gross :	180.4	507 (24h/d)	482 (24h/d)
Net :	158.8	446 (24h/d)	424 (24h/d)

Tubing Stretch (in) :	4	Lost Displacement (bpd) :	11
Loss Along Rod String (hp) :	10.35	Pump Power (hp) :	11.73
Tubing Size (in) :	3.5	Tubing Anchor Location (ft) :	0
Pump Spacing Guide (in) :	N/A	Pump Fillage (%) :	90

**** Non-Dimensional Variables ****

Fo/S/Kr : 0.05 N/No' : 0.06

**** OTHER BASIC DATA ****

Reducer Rating (in-lbs) :	912	Crank Rotation :	(C'WISE) -
Overall Speed Ratio :	305.6	Rod Damping Factors (up/down) :	0.05 / 0.15
Min/Max Tubing Head Press. (psi) :	N/A	Buoyant Rod Weight (lbs) :	11122
Total Load on Pump (lbs) :	7090	Pump Bore Size (in) :	2.5
Pump Load Adjustment (lbs) :	0	Tubing Gradient (psi/ft) :	0.433
Pump Depth (ft) :	3686	Pump Intake Pressure (psi) :	239
Pump Friction (lbs) :	200	SV Load (lbs) :	10822
TV Load (lbs) :	18512		

**** ROD LOADING AT SPECIAL DEPTHS (Top of Lower Interval) ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:39:19 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
 2)
 COMMENTS : TESIS-MaxII

Interval : 1

Depth (ft) : 0 Rod Diameter (in) : 1.156
 Max Stress (psi) : 23497 Min Stress (psi) : 6434
 Min Stress at : -1874 Rod Weight : 3.57
 Bottom (psi) (lbs/ft)

ROD LOADING AS % OF RATING

<u>Service Factor</u>	<u>Class C,K</u>	<u>Class D</u>	<u>COROD SER</u>
1	87	66	37
0.9	100	75	42
0.8	118	88	48
0.7	144	105	56

**** Electric and Power Summary ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:39:20 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
 2)
 COMMENTS : TESIS-MaxII

Prime Mover Description : G.E. 100 HP KOF (118 Amps)
 Output of Motor (hp) : 24.53
 Input to Motor (true hp) : 25.6 Input to Motor (detent : 25.87 hp)
 Peak Upstroke Amps : 62.4 Peak Downstroke Amps : 62.6
 Thermal Current (amps) : 51.4 Average Power Factor : 0.483
 Max Power Factor : 0.778 Min Power Factor : -0.133
 Demand (kw) (100% run in : 19.1 Motor Load (% of rated : 43.6
 15 min.) amps)
 Electrical CLF : 1.0093 Rated Voltage (volts) : 460
 KVA (kilovolt amps) : 39.6 Run Time (h/d) : 24

Cost (\$/kwh)	Basis	Monthly Bills(\$)		Cost/Barrel/1000ft(\$)	
		Non-Detent	Detent	Non-Detent	Detent
0.01		139	141	0.003	0.003
0.02		279	282	0.006	0.0061
0.04		557	563	0.012	0.0122
0.06		836	845	0.0181	0.0182
0.08		1115	1127	0.0241	0.0243
0.1		1393	1408	0.0301	0.0304

Power costs do not include transformer and surface transmission line losses. Also, power factor penalty and demand charges, if any, are not considered. Lifting cost is based on net pump stroke and BPD at 100% efficiency.

Fixed Capacitors for Power Factor Correction

Max Power Factor Desired	KVAR Required	Resulting Average Power Factor
0.778	0	0.483
0.835	5.8	0.552
0.893	11.7	0.64
0.95	18.6	0.765

Losses in Surface Unit and Drive Train : 2.45 (hp)
 Polished Rod Power (hp) : 22.08
 Losses Along Rod String (hp) : 10.35

Useful Downhole Pump Output (hp) : 11.73
Overall Surface Equipment Efficiency : 86.2
(%)
Motor Efficiency (%) : 95.8
Rod Efficiency (%) : 53.1
Overall System Efficiency (%) : 45.8

Caution: A good electrical power prediction requires a good prediction of polished rod power. Motor manufacturers may not always use the same rating criteria. Thus, electrical comparisons between different manufacturers should be used with caution.

**** INPUT DATA SUMMARY ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:39:20 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e WELL TYPE : Deviated
 (CASE 2)
 COMMENTS : TESIS-MaxII

WELL NAME : CIRA2842
 ANALYST : AMERICA
 COMPANY : OXY
 PUMPING UNIT ID : MAXII912-427-192
 (Description) MAXIMIZER II 912-427-192 P14-117-49 CRANKS
 MOTOR ID : GE100HP
 (Description) (G.E. 100 HP KOF)
 'C'BAL OPTION : SROD Defined
 COUNTERBALANCE MOMENT (in-lbs) : 0
 CRANK HOLE : 1 - 192.1 (in)
 ROTATION OF UNIT : C'WISE
 SPEED VARIATION : VARIED
 PUMP DEPTH (ft) : 3686
 PUMP DIAMETER (in) : 2.5
 PUMP INTAKE PRESSURE (psi) : 239
 PUMPING SPEED (SPM) : 3.86
 PERCENT COMPLETE PUMP FILLAGE : 90
 TUBINGHEAD PRESSURE (psi) : 120
 TUBING ANCHOR DEPTH (ft) : 0
 TUBING GRADIENT (psi/ft) : 0.433
 TUBING SIZE : 4 - 3 1/2 in.

Rod/Taper Information:

ROD STRING DESIGN OPTION : SPECIFY ROD DESIGN

	<u>Diameter (in)</u>	<u>Length (ft)</u>	<u>Tensile (psi)</u>	<u>Modulus (MM psi)</u>	<u>Weight (lbs/ft)</u>	<u>Guide Type</u>
1) COROD	SER 3686		140000	29	3.57	N
	1.15625					

SERVICE FACTOR : 0.9
 ELECTRIC COST (cents/kwh) : 10
 UPSTROKE DAMPING FACTOR : 0.05
 DOWNSTROKE DAMPING FACTOR : 0.15
 PUMP FRICTION (lbs) : 200
 STUFFING BOX FRICTION (lbs) : 100
 PUMP LOAD ADJUSTMENT (lbs) : 0
 BUOYANT WEIGHT ADJUSTMENT (lbs) : 0
 PUMP LOAD COEFFICIENT (lbs/ft/sec) : 5
 Run Time (h/d) : 24
 MAX SIDE LOAD FOR BASE ROD : 50
 (lbs/rod)
 MAX SIDE LOAD FOR MOLDED GUIDE : 40
 (lbs/rod)

MAX SIDE LOAD FOR WHEELED GUIDE : 200
(lbs/rod)
ROD FRICTION COEFFICIENT : 0.2
MOLDED GUIDE FRICTION RATIO : 1.5
WHEELED GUIDE FRICTION RATIO : 0.1
OTHER GUIDE FRICTION RATIO : 2
WELL DEVIATION SURVEY : See Well Deviation Report
User Input Rod Guide Weights
**** WARNINGS / NOTIFICATIONS ****

**** DYN0 GRAPH ****

WELL NAME : Pozo Tipo

DATE/TIME : 4/27/2016 5:39:20 PM

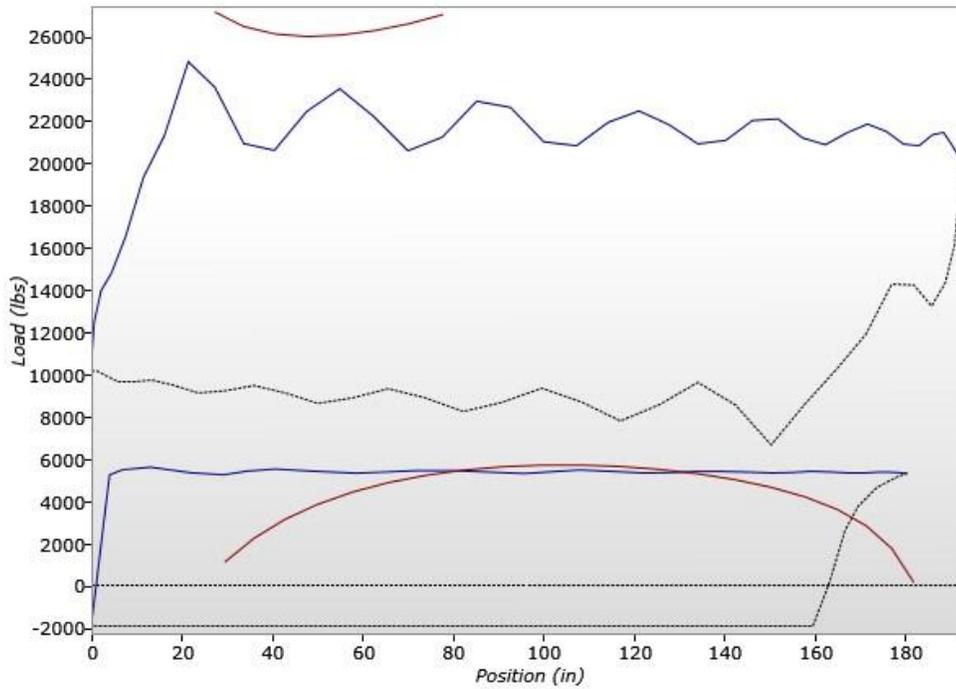
ANALYST : AMERICA

COMPANY : OXY

DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
2)

Comments : TESIS-MaxII

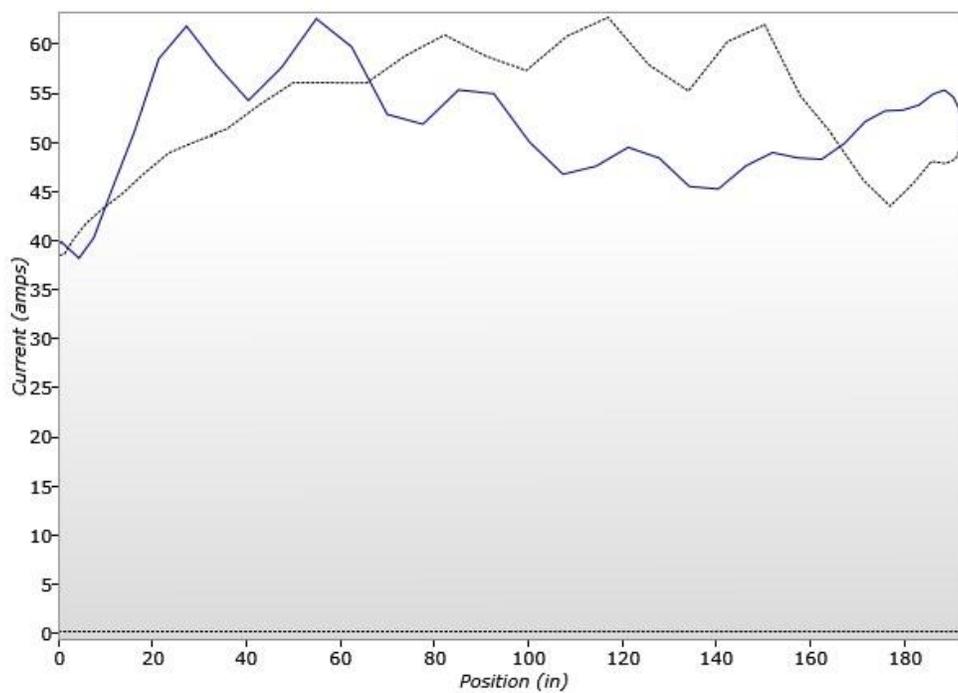
Dyno Surface and Pump Cards and Permissible Loads



**** MOTOR CURRENT ****

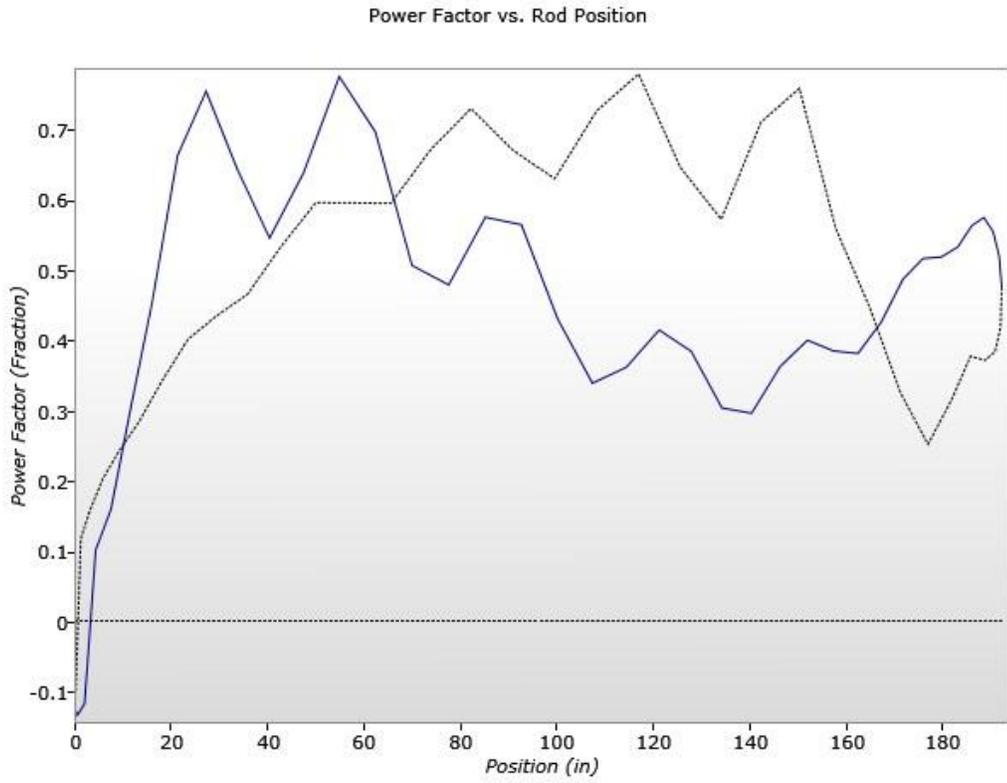
WELL	NAME	Pozo Tipo	DATE/TIME	4/27/2016 5:39:21 PM
:	:	:	:	:
ANALYST	AMERICA	COMPANY	OXY	:
:	:	:	:	:
DATA	FILE	Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE 2)	WELL	TYPE Deviated
:	:	:	:	:
Comments :	TESIS-MaxII			

Current vs. Rod Position



**** MOTOR Power Factor ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:39:21 PM
ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE 2) WELL TYPE : Deviated
Comments : TESIS-MaxII



**** SIDE/DRAG LOAD ****

WELL NAME : Pozo Tipo

DATE/TIME : 4/27/2016 5:39:21 PM

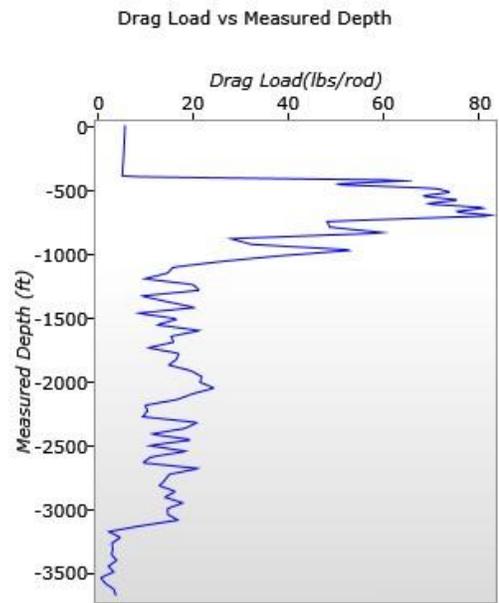
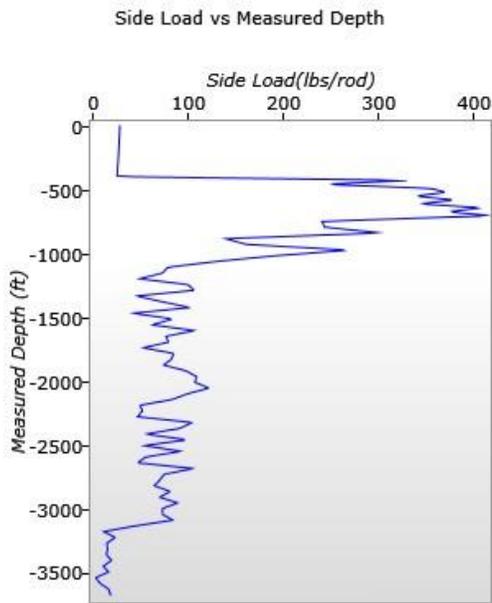
ANALYST : AMERICA

COMPANY : OXY

DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE 2)

WELL TYPE : Deviated

Comments : TESIS-MaxII



Max Side Load (lbs/rod) : 412
Max Drag Load (lbs/rod) : 82
Rod Length for Steel/Fiberglass : 25/37.5 (ft/ft)

**** WELL DEVIATION ****

WELL NAME : Pozo Tipo

DATE/TIME : 4/27/2016 5:39:21 PM

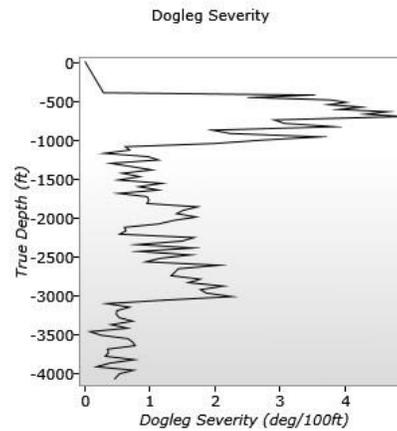
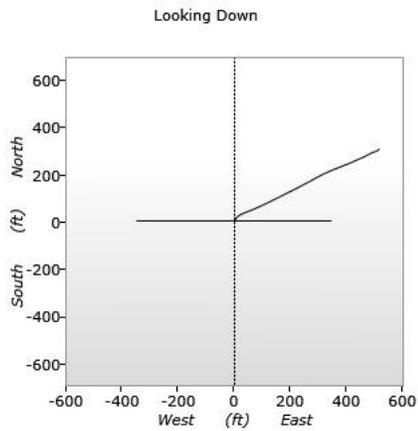
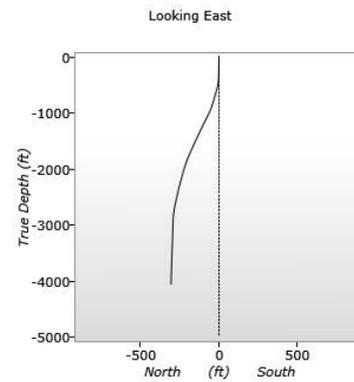
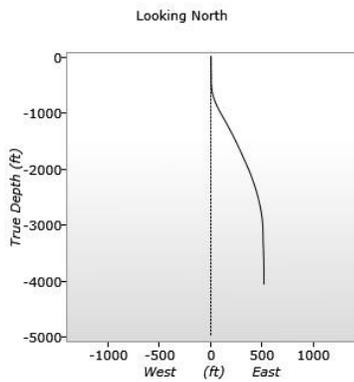
ANALYST : AMERICA

COMPANY : OXY

DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE 2)

WELL TYPE : Deviated

Comments : TESIS-MaxII



MD (ft)	INC (deg)	Azimuth (deg)	TVD (ft)	N-S (ft)	E-W (ft)	Dogleg (deg/100ft)	Severity
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00N	0.00E	0.00	
403.00	1.15	41.38	402.97	3.03N	2.67E	0.29	
433.00	1.85	11.44	432.96	3.74N	2.97E	3.43	
464.00	2.54	0.74	463.94	4.91N	3.08E	2.58	
496.00	3.40	17.37	495.90	6.53N	3.37E	3.78	
526.00	4.35	28.32	525.83	8.38N	4.17E	4.00	
556.00	5.46	30.01	555.72	10.62N	5.43E	3.73	
587.00	6.70	34.03	586.54	13.39N	7.18E	4.23	
617.00	7.73	38.37	616.31	16.42N	9.41E	3.88	
648.00	8.84	44.73	646.98	19.75N	12.38E	4.64	
679.00	9.74	50.84	677.58	23.10N	16.09E	4.30	
710.00	10.90	56.28	708.08	26.38N	20.56E	4.88	
755.00	11.71	61.48	752.20	30.92N	28.11E	2.89	
800.00	13.00	63.68	796.16	35.35N	36.66E	3.05	
845.00	14.67	65.44	839.85	39.96N	46.38E	3.83	
890.00	15.55	65.62	883.30	44.82N	57.06E	1.96	
935.00	16.47	64.14	926.55	50.09N	68.29E	2.24	
980.00	17.93	61.76	969.54	56.15N	80.14E	3.60	
1025.00	19.09	60.59	1012.21	63.04N	92.65E	2.71	
1070.00	19.99	60.44	1054.62	70.45N	105.75E	2.00	
1115.00	19.71	60.44	1096.94	77.99N	119.04E	0.62	
1160.00	19.55	59.65	1139.33	85.54N	132.14E	0.69	
1205.00	19.45	59.38	1181.75	93.16N	145.08E	0.30	
1250.00	19.07	60.03	1224.23	100.65N	157.90E	0.97	
1295.00	18.71	58.92	1266.81	108.05N	170.45E	1.13	
1340.00	18.66	58.39	1309.43	115.55N	182.76E	0.39	
1385.00	18.46	59.18	1352.09	122.97N	195.01E	0.71	
1430.00	18.00	59.39	1394.83	130.16N	207.11E	1.03	
1475.00	18.07	58.59	1437.62	137.34N	219.05E	0.57	
1520.00	17.74	57.98	1480.44	144.61N	230.82E	0.84	
1566.00	17.51	57.78	1524.29	152.01N	242.62E	0.52	
1611.00	16.98	57.92	1567.26	159.11N	253.91E	1.18	
1656.00	16.71	58.81	1610.33	165.95N	265.02E	0.83	

1701.00	16.70	57.04	1653.43	172.82N	275.97E	1.13
1746.00	16.56	56.39	1696.55	179.89N	286.74E	0.52
1791.00	16.17	57.04	1739.73	186.85N	297.34E	0.96
1836.00	15.84	58.11	1782.98	193.50N	307.81E	0.98
1881.00	15.63	59.49	1826.30	199.82N	318.25E	0.95
1926.00	15.98	62.04	1869.60	205.81N	328.94E	1.73
1971.00	15.54	63.96	1912.90	211.36N	339.83E	1.52
2016.00	14.91	63.68	1956.33	216.57N	350.43E	1.41
2061.00	14.16	64.35	1999.88	221.52N	360.59E	1.71
2106.00	13.55	64.43	2043.58	226.18N	370.30E	1.36
2151.00	13.09	65.39	2087.36	230.57N	379.69E	1.13
2196.00	12.90	64.52	2131.21	234.86N	388.86E	0.61
2241.00	12.66	65.21	2175.10	239.09N	397.87E	0.63
2286.00	12.44	64.76	2219.02	243.22N	406.73E	0.53
2331.00	11.81	62.80	2263.02	247.39N	415.21E	1.67
2377.00	11.30	60.50	2308.09	251.76N	423.32E	1.49
2422.00	11.00	61.55	2352.24	255.98N	430.93E	0.80
2467.00	10.28	62.70	2396.46	259.87N	438.27E	1.67
2512.00	9.97	63.86	2440.76	263.42N	445.34E	0.82
2557.00	9.24	64.15	2485.13	266.72N	452.09E	1.63
2602.00	9.25	60.92	2529.55	270.05N	458.50E	1.15
2647.00	9.18	58.32	2573.97	273.69N	464.72E	0.94
2692.00	8.28	56.77	2618.44	277.35N	470.48E	2.07
2737.00	7.64	57.41	2663.01	280.74N	475.71E	1.44
2782.00	7.02	56.97	2707.64	283.85N	480.54E	1.38
2827.00	6.50	59.44	2752.33	286.64N	485.04E	1.32
2872.00	5.73	61.38	2797.07	289.02N	489.20E	1.77
2917.00	5.14	65.65	2841.87	290.92N	493.01E	1.59
2962.00	4.29	71.11	2886.72	292.30N	496.44E	2.13
3007.00	3.50	72.79	2931.61	293.25N	499.34E	1.77
3052.00	2.66	73.01	2976.55	293.96N	501.65E	1.87
3097.00	1.65	75.90	3021.52	294.42N	503.28E	2.26
3142.00	1.18	63.79	3066.50	294.79N	504.32E	1.23
3187.00	1.16	56.43	3111.49	295.24N	505.12E	0.34

3233.00	0.88	48.36	3157.49	295.74N	505.77E	0.68
3278.00	1.00	59.73	3202.48	296.16N	506.37E	0.49
3323.00	0.83	51.31	3247.47	296.57N	506.96E	0.48
3368.00	1.04	44.48	3292.47	297.06N	507.50E	0.53
3413.00	1.30	54.62	3337.46	297.65N	508.21E	0.74
3458.00	1.32	46.74	3382.45	298.30N	509.00E	0.40
3503.00	1.45	57.72	3427.43	298.96N	509.86E	0.66
3548.00	1.44	56.33	3472.42	299.57N	510.81E	0.08
3593.00	1.35	53.67	3517.41	300.20N	511.71E	0.25
3638.00	1.27	41.10	3562.39	300.89N	512.46E	0.66
3683.00	1.06	53.79	3607.39	301.51N	513.13E	0.74
3728.00	0.86	36.64	3652.38	302.03N	513.66E	0.77
3773.00	0.94	45.18	3697.37	302.56N	514.13E	0.35
3818.00	0.79	40.85	3742.37	303.06N	514.59E	0.36
3863.00	0.91	35.91	3787.36	303.58N	515.00E	0.31
3908.00	0.57	34.85	3832.36	304.05N	515.34E	0.76
3953.00	0.72	27.39	3877.36	304.49N	515.60E	0.38
3999.00	0.76	21.75	3923.35	305.03N	515.85E	0.18
4044.00	0.50	1.72	3968.35	305.50N	515.96E	0.75
4089.00	0.68	346.19	4013.35	305.96N	515.90E	0.53
4160.00	0.62	318.14	4084.34	306.65N	515.55E	0.45

LEGAL NOTICE: Because of the uncertainty of variable well conditions and the necessity of relying on facts, information and supporting services furnished by others, GE Oil & Gas is unable to guarantee the accuracy of any chart interpretation, research analysis, or recommendations contained herein. While best efforts should be used in gathering and interpreting such information, USERS OF THIS REPORT AGREE THAT GE OIL & GAS SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY DAMAGES ARISING FROM THE USE OF THIS REPORT. Produced by Lufkin. Copyright © 2009 - 2015 by GE Oil & Gas - Confidential & Proprietary. SROD is a trademark of Lufkin Industries, LLC.

ANEXO G.

**RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL POZO TIPO CON LA UNIDAD DE
SUPERFICIE CONVENCIONAL A CONDICIONES ACTUALES EN SOFTWARE
SROD**



**SROD v7.0.1259 - PREDICTION OF ROD PUMPING SYSTEM
 PERFORMANCE**

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:43:23 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
 3)
 COMMENTS : TESIS-Convencional

**** PRIME MOVER ****

Mfgr and Type : G.E. 100 HP KOF
 Max Speed (rpm) : 1205 Speed Variation (%) : 4.7
 Min Speed (rpm) : 1148 Cyclic Load Factor : 1.342
 Power Required (hp) : 32.94 Peak Regenerative Power (hp) : -6.78
 Motor Load (% of : 32.9 Prime Mover Output (hp) : 24.54
 Rating)
 Sheave Ratio (Unit/ : 10.71
 Prime Mover)

**** PUMPING UNIT ****

Mfgr and Type : LUFKIN C912-365-192 (106110C CRANKS) (C'WISE)
 Actual Max Load (lbs) : 25213 Actual Min Load (lbs) : 6615
 Average Pumping Speed : 3.83 Max Load (% of Rating) : 69.1
 (spm)
 Polished Rod Power (hp) : 22.08 Unit and Drive Train Loss (hp) : 2.45
 Computed Surface Stroke : 193.3
 (in)

**** SUMMARY OF REDUCER LOADING ****

IN BALANCE

Max Torque (m in-lbs) 933.3
 Min Torque (m in-lbs) -82.5
 Counterbalance Moment (m in- 1811.9
 lbs)
 Counterbalance Effect (X100 182.19
 lbs)
 Percent of Reducer Rating 102.3

**** ROD LOADING ****

	<u>Diameter (in)</u>	<u>Length (ft)</u>	<u>Modulus</u>	<u>(MM Fr Coeff</u>	<u>Guides</u>	<u>Loading</u>
			<u>psi)</u>			
1)	1.156	3686	29	0.2	N (0)	43

Max Stress (surf.) (psi) : 23928 Min Stress (surf.) (psi) : 6397

ROD LOADING AT SURFACE AS % OF RATING

<u>Service Factor</u>	<u>Class C,K</u>	<u>Class D</u>	<u>COROD SER</u>
1	89	68	38
0.9	103	77	43
0.8	121	90	49
0.7	148	108	58

**** DOWNHOLE PERFORMANCE ****

	<u>Stroke (in)</u>	<u>BPD at 100% eff.</u>	<u>BPD at 95% eff.</u>
Gross :	181.8	508 (24h/d)	483 (24h/d)
Net :	160	447 (24h/d)	425 (24h/d)

Tubing Stretch (in) :	4	Lost Displacement (bpd) :	11
Loss Along Rod String (hp) :	10.35	Pump Power (hp) :	11.74
Tubing Size (in) :	3.5	Tubing Anchor Location (ft) :	0
Pump Spacing Guide (in) :	N/A	Pump Fillage (%) :	90

**** Non-Dimensional Variables ****

Fo/S/Kr :	0.05	N/No'	: 0.06
-----------	------	-------	--------

**** OTHER BASIC DATA ****

Reducer Rating (in-lbs) :	912	Crank Rotation :	(C'WISE) -
Overall Speed Ratio :	307.6	Rod Damping Factors (up/down) :	0.05 / 0.15
Min/Max Tubing Head Press. (psi) :	N/A	Buoyant Rod Weight (lbs) :	11122
Total Load on Pump (lbs) :	7090	Pump Bore Size (in) :	2.5
Pump Load Adjustment (lbs) :	0	Tubing Gradient (psi/ft) :	0.433
Pump Depth (ft) :	3686	Pump Intake Pressure (psi) :	239
Pump Friction (lbs) :	200	SV Load (lbs) :	10822
TV Load (lbs) :	18512		

**** ROD LOADING AT SPECIAL DEPTHS (Top of Lower Interval) ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:43:23 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
 3)
 COMMENTS : TESIS-Convencional

Interval : 1

Depth (ft) : 0 Rod Diameter (in) : 1.156
 Max Stress (psi) : 23928 Min Stress (psi) : 6397
 Min Stress at : -1874 Rod Weight : 3.57
 Bottom (psi) (lbs/ft)

ROD LOADING AS % OF RATING

<u>Service Factor</u>	<u>Class C,K</u>	<u>Class D</u>	<u>COROD SER</u>
1	89	68	38
0.9	103	77	43
0.8	121	90	49
0.7	148	108	58

**** Electric and Power Summary ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:43:24 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
 3)
 COMMENTS : TESIS-Convencional

Prime Mover Description : G.E. 100 HP KOF (118 Amps)
 Output of Motor (hp) : 24.54
 Input to Motor (true hp) : 26.63 Input to Motor (detent : 27.53 hp)
 Peak Upstroke Amps : 76 Peak Downstroke Amps : 76.5
 Thermal Current (amps) : 53.8 Average Power Factor : 0.511
 Max Power Factor : 0.819 Min Power Factor : -0.161
 Demand (kw) (100% run in : 19.9 Motor Load (% of rated : 45.6
 15 min.) amps)
 Electrical CLF : 1.0292 Rated Voltage (volts) : 460
 KVA (kilovolt amps) : 38.9 Run Time (h/d) : 24

Cost (\$/kwh)	Basis	Monthly Bills(\$)		Cost/Barrel/1000ft(\$)	
		Non-Detent	Detent	Non-Detent	Detent
0.01	145	145	150	0.0031	0.0032
0.02	290	290	300	0.0063	0.0065
0.04	580	580	599	0.0125	0.0129
0.06	870	870	899	0.0188	0.0194
0.08	1160	1160	1199	0.025	0.0259
0.1	1449	1449	1498	0.0313	0.0323

Power costs do not include transformer and surface transmission line losses. Also, power factor penalty and demand charges, if any, are not considered. Lifting cost is based on net pump stroke and BPD at 100% efficiency.

Fixed Capacitors for Power Factor Correction

Max Power Factor Desired	KVAR Required	Resulting Average Power Factor
0.819	0	0.511
0.863	5.7	0.582
0.906	11.7	0.674
0.95	18.5	0.8

Losses in Surface Unit and Drive Train : 2.45 (hp)
 Polished Rod Power (hp) : 22.08
 Losses Along Rod String (hp) : 10.35

Useful Downhole Pump Output (hp) : 11.74
Overall Surface Equipment Efficiency : 82.9
(%)
Motor Efficiency (%) : 92.1
Rod Efficiency (%) : 53.1
Overall System Efficiency (%) : 44.1

Caution: A good electrical power prediction requires a good prediction of polished rod power. Motor manufacturers may not always use the same rating criteria. Thus, electrical comparisons between different manufacturers should be used with caution.

**** INPUT DATA SUMMARY ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:43:24 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e WELL TYPE : Deviated
 (CASE 3)
 COMMENTS : TESIS-Convencional

WELL NAME : CIRA2842
 ANALYST : AMERICA
 COMPANY : OXY
 PUMPING UNIT ID : LC912-365-192
 (Description) LUFKIN C912-365-192 (106110C CRANKS)
 MOTOR ID : GE100HP
 (Description) (G.E. 100 HP KOF)
 'C'BAL OPTION : SROD Defined
 COUNTERBALANCE MOMENT (in-lbs) : 0
 CRANK HOLE : 1 - 193.3 (in)
 ROTATION OF UNIT : C'WISE
 SPEED VARIATION : VARIED
 PUMP DEPTH (ft) : 3686
 PUMP DIAMETER (in) : 2.5
 PUMP INTAKE PRESSURE (psi) : 239
 PUMPING SPEED (SPM) : 3.83
 PERCENT COMPLETE PUMP FILLAGE : 90
 TUBINGHEAD PRESSURE (psi) : 120
 TUBING ANCHOR DEPTH (ft) : 0
 TUBING GRADIENT (psi/ft) : 0.433
 TUBING SIZE : 4 - 3 1/2 in.

Rod/Taper Information:

ROD STRING DESIGN OPTION : SPECIFY ROD DESIGN

	<u>Diameter (in)</u>	<u>Length (ft)</u>	<u>Tensile (psi)</u>	<u>Modulus (MM psi)</u>	<u>Weight (lbs/ft)</u>	<u>Guide Type</u>
1) COROD	SER 3686	140000	29	3.57	N	
	1.15625					

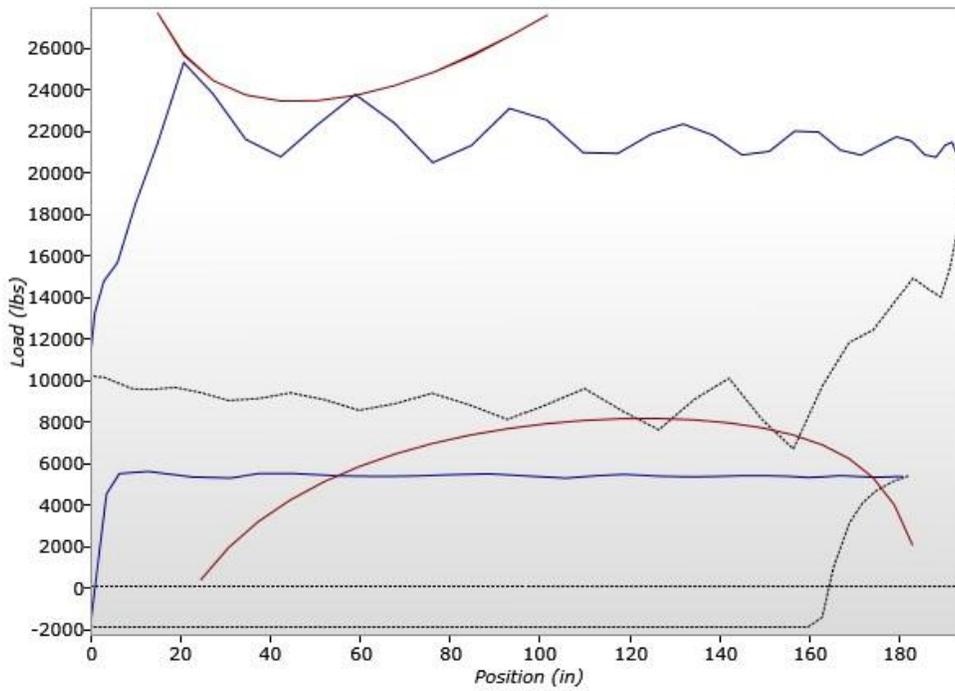
SERVICE FACTOR : 0.9
 ELECTRIC COST (cents/kwh) : 10
 UPSTROKE DAMPING FACTOR : 0.05
 DOWNSTROKE DAMPING FACTOR : 0.15
 PUMP FRICTION (lbs) : 200
 STUFFING BOX FRICTION (lbs) : 100
 PUMP LOAD ADJUSTMENT (lbs) : 0
 BUOYANT WEIGHT ADJUSTMENT (lbs) : 0
 PUMP LOAD COEFFICIENT (lbs/ft/sec) : 5
 Run Time (h/d) : 24
 MAX SIDE LOAD FOR BASE ROD : 50
 (lbs/rod)
 MAX SIDE LOAD FOR MOLDED GUIDE : 40
 (lbs/rod)

MAX SIDE LOAD FOR WHEELED GUIDE : 200
(lbs/rod)
ROD FRICTION COEFFICIENT : 0.2
MOLDED GUIDE FRICTION RATIO : 1.5
WHEELED GUIDE FRICTION RATIO : 0.1
OTHER GUIDE FRICTION RATIO : 2
WELL DEVIATION SURVEY : See Well Deviation Report
User Input Rod Guide Weights
**** WARNINGS / NOTIFICATIONS ****

**** DYNO GRAPH ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:43:24 PM
ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
3)
Comments : TESIS-Convencional

Dyno Surface and Pump Cards and Permissible Loads

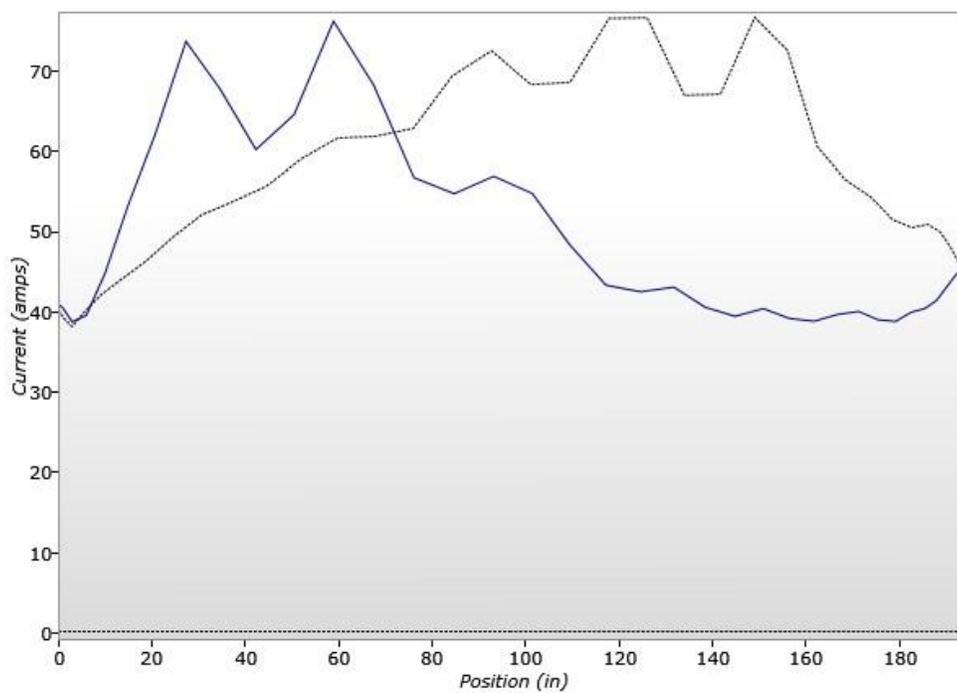


**** MOTOR CURRENT ****

WELL NAME	Pozo Tipo	DATE/TIME	4/27/2016 5:43:26 PM
:	:	:	:
ANALYST	AMERICA	COMPANY	OXY
:	:	:	:
DATA FILE	Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE 3)	WELL TYPE	Deviated
:	:	:	:

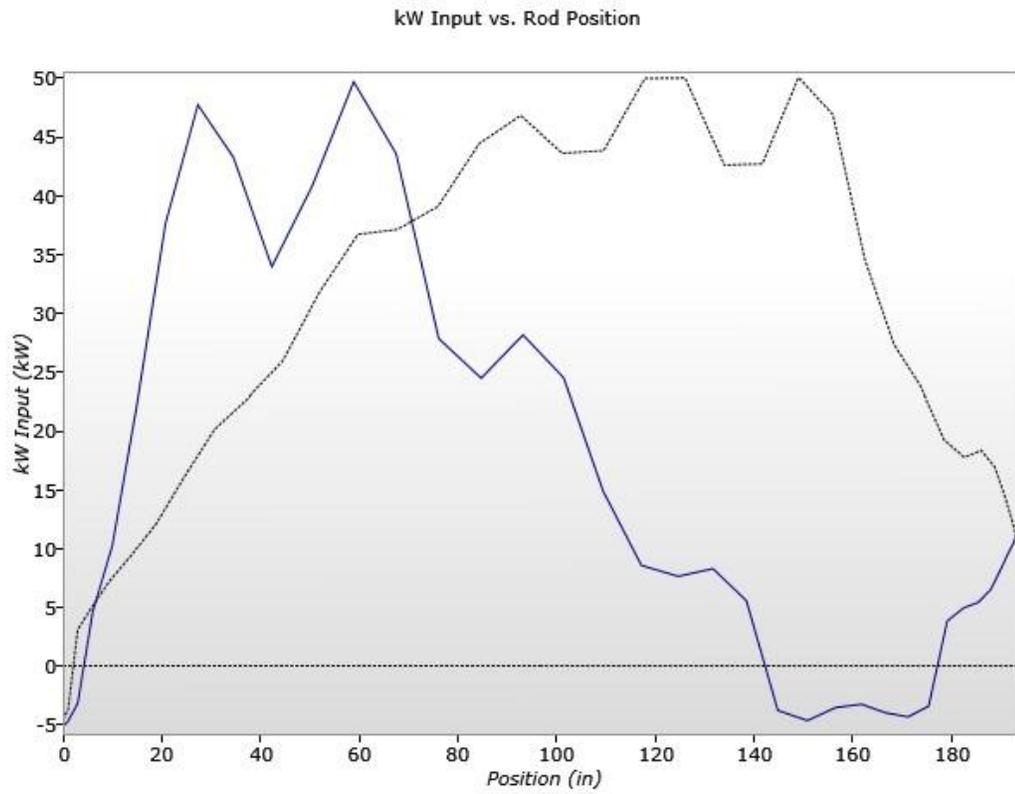
Comments : TESIS-Convencional

Current vs. Rod Position



**** MOTOR INPUT ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:43:23 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE 3) WELL TYPE : Deviated
 Comments : TESIS-Convencional



**** SIDE/DRAG LOAD ****

WELL NAME : Pozo Tipo

DATE/TIME : 4/27/2016 5:43:26
PM

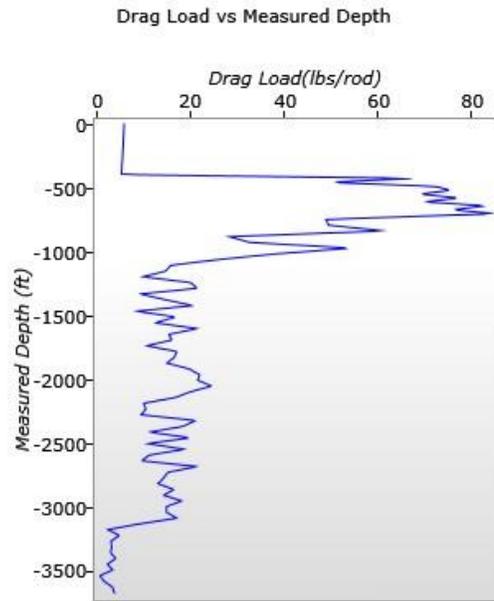
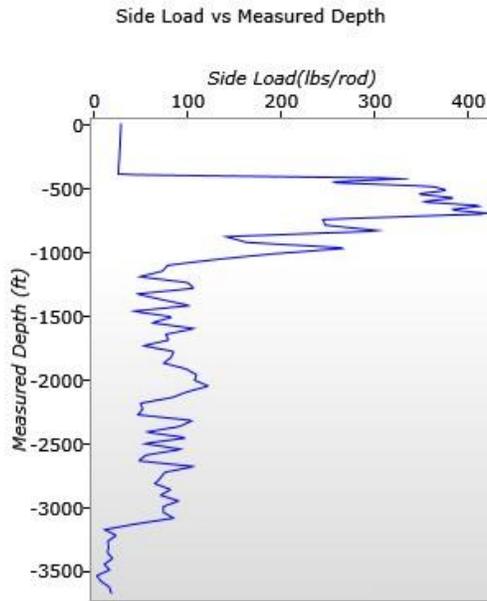
ANALYST : AMERICA

COMPANY : OXY

DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE 3)

WELL TYPE : Deviated

Comments : TESIS-Convencional



Max Side Load (lbs/rod) : 418

Max Drag Load (lbs/rod) : 84

Rod Length for Steel/Fiberglass : 25/37.5
(ft/ft)

**** WELL DEVIATION ****

WELL NAME : Pozo Tipo

DATE/TIME : 4/27/2016 5:43:26 PM

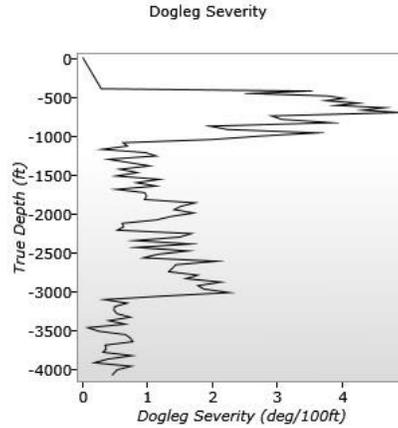
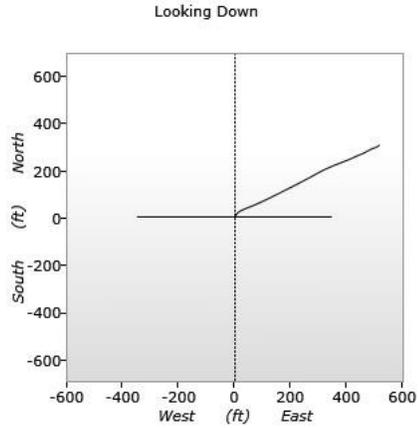
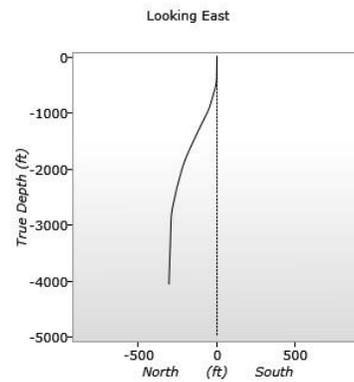
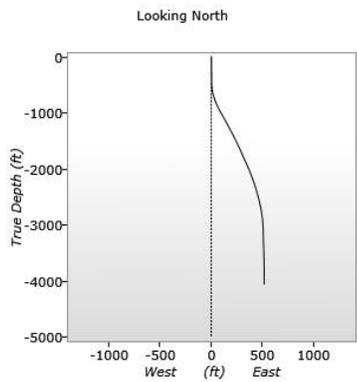
ANALYST : AMERICA

COMPANY : OXY

DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE 3)

WELL TYPE : Deviated

Comments : TESIS-Convencional



MD (ft)	INC (deg)	Azimuth (deg)	TVD (ft)	N-S (ft)	E-W (ft)	Dogleg (deg/100ft)	Severity
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00N	0.00E	0.00	
403.00	1.15	41.38	402.97	3.03N	2.67E	0.29	
433.00	1.85	11.44	432.96	3.74N	2.97E	3.43	
464.00	2.54	0.74	463.94	4.91N	3.08E	2.58	
496.00	3.40	17.37	495.90	6.53N	3.37E	3.78	
526.00	4.35	28.32	525.83	8.38N	4.17E	4.00	
556.00	5.46	30.01	555.72	10.62N	5.43E	3.73	
587.00	6.70	34.03	586.54	13.39N	7.18E	4.23	
617.00	7.73	38.37	616.31	16.42N	9.41E	3.88	
648.00	8.84	44.73	646.98	19.75N	12.38E	4.64	
679.00	9.74	50.84	677.58	23.10N	16.09E	4.30	
710.00	10.90	56.28	708.08	26.38N	20.56E	4.88	
755.00	11.71	61.48	752.20	30.92N	28.11E	2.89	
800.00	13.00	63.68	796.16	35.35N	36.66E	3.05	
845.00	14.67	65.44	839.85	39.96N	46.38E	3.83	
890.00	15.55	65.62	883.30	44.82N	57.06E	1.96	
935.00	16.47	64.14	926.55	50.09N	68.29E	2.24	
980.00	17.93	61.76	969.54	56.15N	80.14E	3.60	
1025.00	19.09	60.59	1012.21	63.04N	92.65E	2.71	
1070.00	19.99	60.44	1054.62	70.45N	105.75E	2.00	
1115.00	19.71	60.44	1096.94	77.99N	119.04E	0.62	
1160.00	19.55	59.65	1139.33	85.54N	132.14E	0.69	
1205.00	19.45	59.38	1181.75	93.16N	145.08E	0.30	
1250.00	19.07	60.03	1224.23	100.65N	157.90E	0.97	
1295.00	18.71	58.92	1266.81	108.05N	170.45E	1.13	
1340.00	18.66	58.39	1309.43	115.55N	182.76E	0.39	
1385.00	18.46	59.18	1352.09	122.97N	195.01E	0.71	
1430.00	18.00	59.39	1394.83	130.16N	207.11E	1.03	
1475.00	18.07	58.59	1437.62	137.34N	219.05E	0.57	
1520.00	17.74	57.98	1480.44	144.61N	230.82E	0.84	
1566.00	17.51	57.78	1524.29	152.01N	242.62E	0.52	
1611.00	16.98	57.92	1567.26	159.11N	253.91E	1.18	
1656.00	16.71	58.81	1610.33	165.95N	265.02E	0.83	

1701.00	16.70	57.04	1653.43	172.82N	275.97E	1.13
1746.00	16.56	56.39	1696.55	179.89N	286.74E	0.52
1791.00	16.17	57.04	1739.73	186.85N	297.34E	0.96
1836.00	15.84	58.11	1782.98	193.50N	307.81E	0.98
1881.00	15.63	59.49	1826.30	199.82N	318.25E	0.95
1926.00	15.98	62.04	1869.60	205.81N	328.94E	1.73
1971.00	15.54	63.96	1912.90	211.36N	339.83E	1.52
2016.00	14.91	63.68	1956.33	216.57N	350.43E	1.41
2061.00	14.16	64.35	1999.88	221.52N	360.59E	1.71
2106.00	13.55	64.43	2043.58	226.18N	370.30E	1.36
2151.00	13.09	65.39	2087.36	230.57N	379.69E	1.13
2196.00	12.90	64.52	2131.21	234.86N	388.86E	0.61
2241.00	12.66	65.21	2175.10	239.09N	397.87E	0.63
2286.00	12.44	64.76	2219.02	243.22N	406.73E	0.53
2331.00	11.81	62.80	2263.02	247.39N	415.21E	1.67
2377.00	11.30	60.50	2308.09	251.76N	423.32E	1.49
2422.00	11.00	61.55	2352.24	255.98N	430.93E	0.80
2467.00	10.28	62.70	2396.46	259.87N	438.27E	1.67
2512.00	9.97	63.86	2440.76	263.42N	445.34E	0.82
2557.00	9.24	64.15	2485.13	266.72N	452.09E	1.63
2602.00	9.25	60.92	2529.55	270.05N	458.50E	1.15
2647.00	9.18	58.32	2573.97	273.69N	464.72E	0.94
2692.00	8.28	56.77	2618.44	277.35N	470.48E	2.07
2737.00	7.64	57.41	2663.01	280.74N	475.71E	1.44
2782.00	7.02	56.97	2707.64	283.85N	480.54E	1.38
2827.00	6.50	59.44	2752.33	286.64N	485.04E	1.32
2872.00	5.73	61.38	2797.07	289.02N	489.20E	1.77
2917.00	5.14	65.65	2841.87	290.92N	493.01E	1.59
2962.00	4.29	71.11	2886.72	292.30N	496.44E	2.13
3007.00	3.50	72.79	2931.61	293.25N	499.34E	1.77
3052.00	2.66	73.01	2976.55	293.96N	501.65E	1.87
3097.00	1.65	75.90	3021.52	294.42N	503.28E	2.26
3142.00	1.18	63.79	3066.50	294.79N	504.32E	1.23
3187.00	1.16	56.43	3111.49	295.24N	505.12E	0.34

3233.00	0.88	48.36	3157.49	295.74N	505.77E	0.68
3278.00	1.00	59.73	3202.48	296.16N	506.37E	0.49
3323.00	0.83	51.31	3247.47	296.57N	506.96E	0.48
3368.00	1.04	44.48	3292.47	297.06N	507.50E	0.53
3413.00	1.30	54.62	3337.46	297.65N	508.21E	0.74
3458.00	1.32	46.74	3382.45	298.30N	509.00E	0.40
3503.00	1.45	57.72	3427.43	298.96N	509.86E	0.66
3548.00	1.44	56.33	3472.42	299.57N	510.81E	0.08
3593.00	1.35	53.67	3517.41	300.20N	511.71E	0.25
3638.00	1.27	41.10	3562.39	300.89N	512.46E	0.66
3683.00	1.06	53.79	3607.39	301.51N	513.13E	0.74
3728.00	0.86	36.64	3652.38	302.03N	513.66E	0.77
3773.00	0.94	45.18	3697.37	302.56N	514.13E	0.35
3818.00	0.79	40.85	3742.37	303.06N	514.59E	0.36
3863.00	0.91	35.91	3787.36	303.58N	515.00E	0.31
3908.00	0.57	34.85	3832.36	304.05N	515.34E	0.76
3953.00	0.72	27.39	3877.36	304.49N	515.60E	0.38
3999.00	0.76	21.75	3923.35	305.03N	515.85E	0.18
4044.00	0.50	1.72	3968.35	305.50N	515.96E	0.75
4089.00	0.68	346.19	4013.35	305.96N	515.90E	0.53
4160.00	0.62	318.14	4084.34	306.65N	515.55E	0.45

LEGAL NOTICE: Because of the uncertainty of variable well conditions and the necessity of relying on facts, information and supporting services furnished by others, GE Oil & Gas is unable to guarantee the accuracy of any chart interpretation, research analysis, or recommendations contained herein. While best efforts should be used in gathering and interpreting such information, USERS OF THIS REPORT AGREE THAT GE OIL & GAS SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY DAMAGES ARISING FROM THE USE OF THIS REPORT. Produced by Lufkin. Copyright © 2009 - 2015 by GE Oil & Gas - Confidential & Proprietary. SROD is a trademark of Lufkin Industries, LLC.

ANEXO H.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL POZO TIPO CON LA UNIDAD DE SUPERFICIE HIDRÁULICA A CONDICIONES ACTUALES EN SOFTWARE SROD



GE Oil & Gas
Well Performance Services
Automation & Optimization

T +1 281 495 1100 (Automat
www.lufkin.com

SROD v7.0.1259 - PREDICTION OF ROD PUMPING SYSTEM PERFORMANCE

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:48:10 PM
ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
4)
COMMENTS : TESIS-Hidraulica

**** PRIME MOVER ****

Mfgr and Type : ROBBINS & MYERS 150 HP NEMA D(OLD TYPE)
Est. Power Required (hp) : 43.19 Motor Load (% of Rating) : 28.8

**** PUMPING UNIT ****

Mfgr and Type : Hydraulic unit tundra
Actual Max Load (lbs) : 24685 Actual Min Load (lbs) : 7922
Average Pumping Speed : 2.53 Max Load (% of Rating) : 61.7
(spm)
Polished Rod Power (hp) : 21.59 Computed Surface Stroke (in) : 288

**** ROD LOADING ****

	<u>Diameter (in)</u>	<u>Length (ft)</u>	<u>Modulus psi)</u>	<u>(MM Fr Coeff</u>	<u>Guides</u>	<u>Loading</u>
1)	1.156	3686	29	0.2	N (0)	40

Max Stress (surf.) (psi) : 23424 Min Stress (surf.) (psi) : 7644

ROD LOADING AT SURFACE AS % OF RATING

<u>Service Factor</u>	<u>Class C,K</u>	<u>Class D</u>	<u>COROD SER</u>
1	82	62	35
0.9	96	71	40
0.8	114	84	46
0.7	142	102	54

**** DOWNHOLE PERFORMANCE ****

	<u>Stroke (in)</u>	<u>BPD at 100% eff.</u>	<u>BPD at 95% eff.</u>
Gross :	275.4	508 (24h/d)	483 (24h/d)
Net :	244.3	450 (24h/d)	428 (24h/d)

Tubing Stretch (in)	: 4	Lost Displacement (bpd)	: 7
Loss Along Rod String (hp)	: 9.77	Pump Power (hp)	: 11.82
Tubing Size (in)	: 3.5	Tubing Anchor Location (ft)	: 0
Pump Spacing Guide (in)	: N/A	Pump Fillage (%)	: 90

**** Non-Dimensional Variables ****

Fo/S/Kr	: 0.04	N/No'	: 0.04
---------	--------	-------	--------

**** OTHER BASIC DATA ****

Reducer Rating (in-lbs)	: N/A	Crank Rotation	: N/A
Overall Speed Ratio	: N/A	Rod Damping Factors (up/down)	: 0.05 / 0.15
Min/Max Tubing Head Press. (psi)	: N/A	Buoyant Rod Weight (lbs)	: 11122
Total Load on Pump (lbs)	: 7090	Pump Bore Size (in)	: 2.5
Pump Load Adjustment (lbs)	: 0	Tubing Gradient (psi/ft)	: 0.433
Pump Depth (ft)	: 3686	Pump Intake Pressure (psi)	: 239
Pump Friction (lbs)	: 200	SV Load (lbs)	: 10822
TV Load (lbs)	: 18512		

**** ROD LOADING AT SPECIAL DEPTHS (Top of Lower Interval) ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:48:10 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
 4)
 COMMENTS : TESIS-Hidraulica

Interval : 1

Depth (ft) : 0 Rod Diameter (in) : 1.156
 Max Stress (psi) : 23424 Min Stress (psi) : 7644
 Min Stress at : -1874 Rod Weight : 3.57
 Bottom (psi) (lbs/ft)

ROD LOADING AS % OF RATING

<u>Service Factor</u>	<u>Class C,K</u>	<u>Class D</u>	<u>COROD SER</u>
1	82	62	35
0.9	96	71	40
0.8	114	84	46
0.7	142	102	54

**** INPUT DATA SUMMARY ****

WELL NAME : Pozo Tipo DATE/TIME : 4/27/2016 5:48:11 PM
 ANALYST : AMERICA COMPANY : OXY
 DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e WELL TYPE : Deviated
 (CASE 4)
 COMMENTS : TESIS-Hidraulica

WELL NAME : CIRA2842
 ANALYST : AMERICA
 COMPANY : OXY
 PUMPING UNIT ID : tundra
 (Description) Hydraulic unit tundra
 Hydraulic Stroke (in) : 288
 Hydraulic Structure Rating (in) : 40000
 IS DUAL SPEED VARIATION : NO
 Percentage Upstroke Time (%) : 50
 Percentage Dnstroke Time (%) : 50
 MOTOR ID : RM150HP
 (Description) (ROBBINS & MYERS 150 HP NEMA D(OLD TYPE))
 IS DUAL SPEED VARIATION : NO
 PERCENTAGE UPSTROKE TIME : 50
 PERCENTAGE DOWNSTROKE TIME : 50
 PUMP DEPTH (ft) : 3686
 PUMP DIAMETER (in) : 2.5
 PUMP INTAKE PRESSURE (psi) : 239
 PUMPING SPEED (SPM) : 2.53
 PERCENT COMPLETE PUMP FILLAGE : 90
 TUBINGHEAD PRESSURE (psi) : 120
 TUBING ANCHOR DEPTH (ft) : 0
 TUBING GRADIENT (psi/ft) : 0.433
 TUBING SIZE : 4 - 3 1/2 in.

Rod/Taper Information:

ROD STRING DESIGN OPTION : SPECIFY ROD DESIGN

	<u>Diameter (in)</u>	<u>Length (ft)</u>	<u>Tensile (psi)</u>	<u>Modulus (MM psi)</u>	<u>Weight (lbs/ft)</u>	<u>Guide Type</u>
1)	COROD 1.15625	SER 3686	140000	29	3.57	N

SERVICE FACTOR : 0.9
 ELECTRIC COST (cents/kwh) : 10
 UPSTROKE DAMPING FACTOR : 0.05
 DOWNSTROKE DAMPING FACTOR : 0.15
 PUMP FRICTION (lbs) : 200
 STUFFING BOX FRICTION (lbs) : 100
 PUMP LOAD ADJUSTMENT (lbs) : 0
 BUOYANT WEIGHT ADJUSTMENT (lbs) : 0
 PUMP LOAD COEFFICIENT (lbs/ft/sec) : 5
 Run Time (h/d) : 24

MAX SIDE LOAD FOR BASE ROD : 50
(lbs/rod)
MAX SIDE LOAD FOR MOLDED GUIDE : 40
(lbs/rod)
MAX SIDE LOAD FOR WHEELED GUIDE : 200
(lbs/rod)
ROD FRICTION COEFFICIENT : 0.2
MOLDED GUIDE FRICTION RATIO : 1.5
WHEELED GUIDE FRICTION RATIO : 0.1
OTHER GUIDE FRICTION RATIO : 2
WELL DEVIATION SURVEY : See Well Deviation Report
User Input Rod Guide Weights
**** WARNINGS / NOTIFICATIONS ****

**** DYN0 GRAPH ****

WELL NAME : Pozo Tipo

DATE/TIME : 4/27/2016 5:48:11 PM

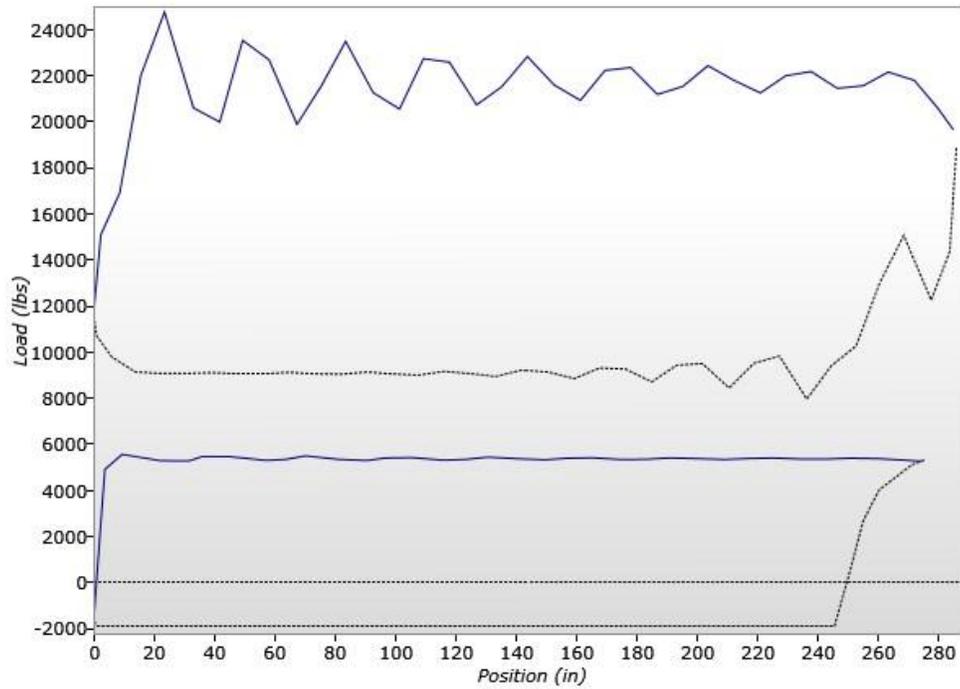
ANALYST : AMERICA

COMPANY : OXY

DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE WELL TYPE : Deviated
4)

Comments : TESIS-Hidraulica

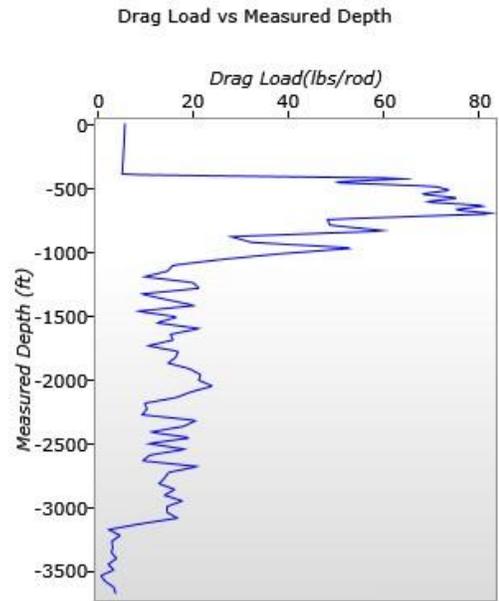
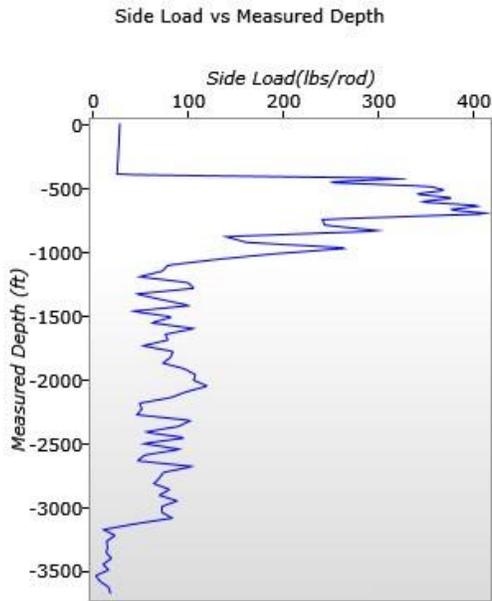
Dyno Surface and Pump Cards and Permissible Loads



**** SIDE/DRAG LOAD ****

WELL NAME : Pozo Tipo
ANALYST : AMERICA
DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE 4)
Comments : TESIS-Hidraulica

DATE/TIME : 4/27/2016 5:48:11 PM
COMPANY : OXY
WELL TYPE : Deviated



Max Side Load (lbs/rod) : 411
Max Drag Load (lbs/rod) : 82
Rod Length for Steel/Fiberglass : 25/37.5
(ft/ft)

**** WELL DEVIATION ****

WELL NAME : Pozo Tipo

DATE/TIME : 4/27/2016 5:48:12 PM

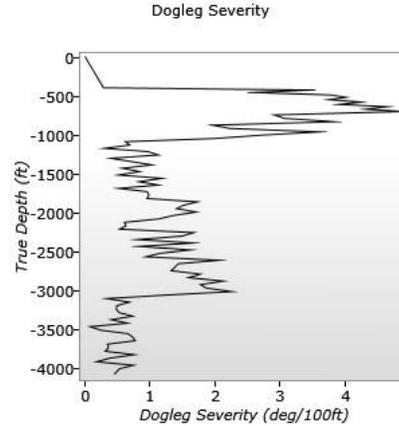
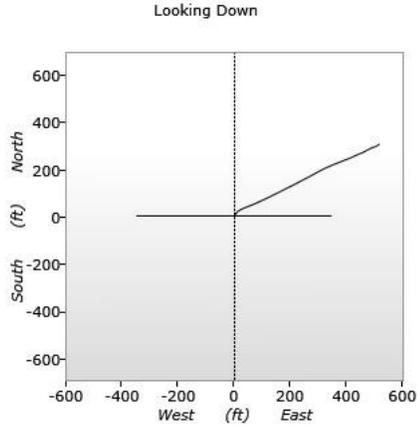
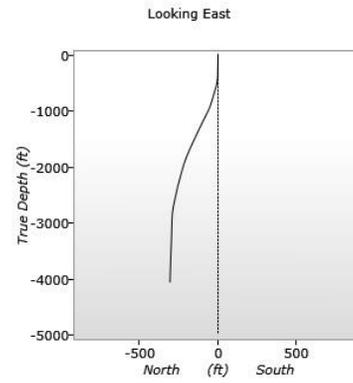
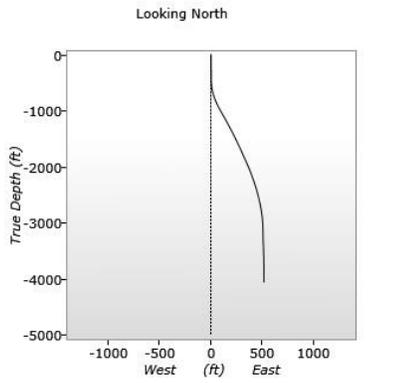
ANALYST : AMERICA

COMPANY : OXY

DATA FILE : Pozo Tipo_MII.inp6e (CASE 4)

WELL TYPE : Deviated

Comments : TESIS-Hidraulica



MD (ft)	INC (deg)	Azimuth (deg)	TVD (ft)	N-S (ft)	E-W (ft)	Dogleg (deg/100ft)	Severity
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00N	0.00E	0.00	
403.00	1.15	41.38	402.97	3.03N	2.67E	0.29	
433.00	1.85	11.44	432.96	3.74N	2.97E	3.43	
464.00	2.54	0.74	463.94	4.91N	3.08E	2.58	
496.00	3.40	17.37	495.90	6.53N	3.37E	3.78	
526.00	4.35	28.32	525.83	8.38N	4.17E	4.00	
556.00	5.46	30.01	555.72	10.62N	5.43E	3.73	
587.00	6.70	34.03	586.54	13.39N	7.18E	4.23	
617.00	7.73	38.37	616.31	16.42N	9.41E	3.88	
648.00	8.84	44.73	646.98	19.75N	12.38E	4.64	
679.00	9.74	50.84	677.58	23.10N	16.09E	4.30	
710.00	10.90	56.28	708.08	26.38N	20.56E	4.88	
755.00	11.71	61.48	752.20	30.92N	28.11E	2.89	
800.00	13.00	63.68	796.16	35.35N	36.66E	3.05	
845.00	14.67	65.44	839.85	39.96N	46.38E	3.83	
890.00	15.55	65.62	883.30	44.82N	57.06E	1.96	
935.00	16.47	64.14	926.55	50.09N	68.29E	2.24	
980.00	17.93	61.76	969.54	56.15N	80.14E	3.60	
1025.00	19.09	60.59	1012.21	63.04N	92.65E	2.71	
1070.00	19.99	60.44	1054.62	70.45N	105.75E	2.00	
1115.00	19.71	60.44	1096.94	77.99N	119.04E	0.62	
1160.00	19.55	59.65	1139.33	85.54N	132.14E	0.69	
1205.00	19.45	59.38	1181.75	93.16N	145.08E	0.30	
1250.00	19.07	60.03	1224.23	100.65N	157.90E	0.97	
1295.00	18.71	58.92	1266.81	108.05N	170.45E	1.13	
1340.00	18.66	58.39	1309.43	115.55N	182.76E	0.39	
1385.00	18.46	59.18	1352.09	122.97N	195.01E	0.71	
1430.00	18.00	59.39	1394.83	130.16N	207.11E	1.03	
1475.00	18.07	58.59	1437.62	137.34N	219.05E	0.57	
1520.00	17.74	57.98	1480.44	144.61N	230.82E	0.84	
1566.00	17.51	57.78	1524.29	152.01N	242.62E	0.52	
1611.00	16.98	57.92	1567.26	159.11N	253.91E	1.18	
1656.00	16.71	58.81	1610.33	165.95N	265.02E	0.83	

1701.00	16.70	57.04	1653.43	172.82N	275.97E	1.13
1746.00	16.56	56.39	1696.55	179.89N	286.74E	0.52
1791.00	16.17	57.04	1739.73	186.85N	297.34E	0.96
1836.00	15.84	58.11	1782.98	193.50N	307.81E	0.98
1881.00	15.63	59.49	1826.30	199.82N	318.25E	0.95
1926.00	15.98	62.04	1869.60	205.81N	328.94E	1.73
1971.00	15.54	63.96	1912.90	211.36N	339.83E	1.52
2016.00	14.91	63.68	1956.33	216.57N	350.43E	1.41
2061.00	14.16	64.35	1999.88	221.52N	360.59E	1.71
2106.00	13.55	64.43	2043.58	226.18N	370.30E	1.36
2151.00	13.09	65.39	2087.36	230.57N	379.69E	1.13
2196.00	12.90	64.52	2131.21	234.86N	388.86E	0.61
2241.00	12.66	65.21	2175.10	239.09N	397.87E	0.63
2286.00	12.44	64.76	2219.02	243.22N	406.73E	0.53
2331.00	11.81	62.80	2263.02	247.39N	415.21E	1.67
2377.00	11.30	60.50	2308.09	251.76N	423.32E	1.49
2422.00	11.00	61.55	2352.24	255.98N	430.93E	0.80
2467.00	10.28	62.70	2396.46	259.87N	438.27E	1.67
2512.00	9.97	63.86	2440.76	263.42N	445.34E	0.82
2557.00	9.24	64.15	2485.13	266.72N	452.09E	1.63
2602.00	9.25	60.92	2529.55	270.05N	458.50E	1.15
2647.00	9.18	58.32	2573.97	273.69N	464.72E	0.94
2692.00	8.28	56.77	2618.44	277.35N	470.48E	2.07
2737.00	7.64	57.41	2663.01	280.74N	475.71E	1.44
2782.00	7.02	56.97	2707.64	283.85N	480.54E	1.38
2827.00	6.50	59.44	2752.33	286.64N	485.04E	1.32
2872.00	5.73	61.38	2797.07	289.02N	489.20E	1.77
2917.00	5.14	65.65	2841.87	290.92N	493.01E	1.59
2962.00	4.29	71.11	2886.72	292.30N	496.44E	2.13
3007.00	3.50	72.79	2931.61	293.25N	499.34E	1.77
3052.00	2.66	73.01	2976.55	293.96N	501.65E	1.87
3097.00	1.65	75.90	3021.52	294.42N	503.28E	2.26
3142.00	1.18	63.79	3066.50	294.79N	504.32E	1.23
3187.00	1.16	56.43	3111.49	295.24N	505.12E	0.34

3233.00	0.88	48.36	3157.49	295.74N	505.77E	0.68
3278.00	1.00	59.73	3202.48	296.16N	506.37E	0.49
3323.00	0.83	51.31	3247.47	296.57N	506.96E	0.48
3368.00	1.04	44.48	3292.47	297.06N	507.50E	0.53
3413.00	1.30	54.62	3337.46	297.65N	508.21E	0.74
3458.00	1.32	46.74	3382.45	298.30N	509.00E	0.40
3503.00	1.45	57.72	3427.43	298.96N	509.86E	0.66
3548.00	1.44	56.33	3472.42	299.57N	510.81E	0.08
3593.00	1.35	53.67	3517.41	300.20N	511.71E	0.25
3638.00	1.27	41.10	3562.39	300.89N	512.46E	0.66
3683.00	1.06	53.79	3607.39	301.51N	513.13E	0.74
3728.00	0.86	36.64	3652.38	302.03N	513.66E	0.77
3773.00	0.94	45.18	3697.37	302.56N	514.13E	0.35
3818.00	0.79	40.85	3742.37	303.06N	514.59E	0.36
3863.00	0.91	35.91	3787.36	303.58N	515.00E	0.31
3908.00	0.57	34.85	3832.36	304.05N	515.34E	0.76
3953.00	0.72	27.39	3877.36	304.49N	515.60E	0.38
3999.00	0.76	21.75	3923.35	305.03N	515.85E	0.18
4044.00	0.50	1.72	3968.35	305.50N	515.96E	0.75
4089.00	0.68	346.19	4013.35	305.96N	515.90E	0.53
4160.00	0.62	318.14	4084.34	306.65N	515.55E	0.45

LEGAL NOTICE: Because of the uncertainty of variable well conditions and the necessity of relying on facts, information and supporting services furnished by others, GE Oil & Gas is unable to guarantee the accuracy of any chart interpretation, research analysis, or recommendations contained herein. While best efforts should be used in gathering and interpreting such information, USERS OF THIS REPORT AGREE THAT GE OIL & GAS SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY DAMAGES ARISING FROM THE USE OF THIS REPORT. Produced by Lufkin. Copyright © 2009 - 2015 by GE Oil & Gas - Confidential & Proprietary. SROD is a trademark of Lufkin Industries, LLC.

ANEXO I.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL POZO TIPO CON LA UNIDAD DE SUPERFICIE ROTAFLEX A CONDICIONES ACTUALES EN SOFTWARE RODSTAR

ANEXO J.

**RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL POZO TIPO CON LA UNIDAD DE
SUPERFICIE MARK II A CONDICIONES ACTUALES EN SOFTWARE
RODSTAR**

ANEXO K.

**RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL POZO TIPO CON LA UNIDAD DE
SUPERFICIE MAXIMIZER II A CONDICIONES ACTUALES EN SOFTWARE
RODSTAR**

ANEXO L.

**RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL POZO TIPO CON LA UNIDAD DE
SUPERFICIE CONVENCIONAL A CONDICIONES ACTUALES EN SOFTWARE
RODSTAR**

ANEXO M.

**RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL POZO TIPO CON LA UNIDAD DE
SUPERFICIE HIDRÁULICA A CONDICIONES ACTUALES EN SOFTWARE
RODSTAR**

